



Institut d'astrophysique de Paris



**RAPPORT D'ACTIVITE 2007 - 2011  
DE L'INSTITUT D'ASTROPHYSIQUE DE PARIS  
UMR7095 – CNRS ET UPMC**

**- RAPPORT SCIENTIFIQUE -**

**Table des matières :**

1. Planètes extrasolaires et Milieux interstellaires	2
2. Physique stellaire et planétaire et Planètes extrasolaires	11
3. Origine et évolution des galaxies	25
4. Cosmologie et Astrophysique des hautes énergies	42
5. Grandes structures et Univers profond	61
6. Physique théorique - Gravitation et Cosmologie	87
7. Projets	102

INSTITUT D'ASTROPHYSIQUE DE PARIS  
UMR7095 – CNRS et Université Paris-6  
98 bis boulevard Arago – 75014 Paris – Tél : 01.44.32.80.00 – Fax : 01.44.32.80.01  
internet : <http://www.iap.fr> - email : [dir@iap.fr](mailto:dir@iap.fr)

---

## 1 Planètes extrasolaires et Milieux interstellaires

Le groupe de recherche « Planètes extrasolaires et Milieux interstellaires » est composé de :

3 chercheurs CNRS : Roger Ferlet, Guillaume Hébrard, Alain Lecavelier

1 chercheur CNRS émérite : Alfred Vidal-Madjar

1 astronome : François Bouchy

1 ingénieur de recherche : Jean-Michel Désert (en détachement depuis 2010)

Sur la période 2007 – 2011 :

2 post-doctorants : Rodrigo Díaz, David Sing

3 doctorants : Isabelle Boisse, David Ehrenreich, Benoît Loeillet

4 thèses ont été soutenues : Isabelle Boisse, Jean-Michel Désert, David Ehrenreich, Benoît Loeillet

2 habilitations à diriger des recherches ont été soutenues : François Bouchy, Alain Lecavelier

3 prix ont été décernés par l'Académie des Sciences et le CNRS : François Bouchy (Médaille de bronze du CNRS), Alain Lecavelier (Prix Del Duca), Alfred Vidal-Madjar (Prix Ampère)

Nombre de chercheurs avec HDR ou équivalents : 4

Nombre de publications rang I : 178

Nombre de publications rang II : 90

*Les références en italique sont « hors bibliographie »*

---

Une refonte des équipes scientifiques de l'IAP a abouti en 2008 à la création du groupe « Planètes extrasolaires et Milieux interstellaires », dont le thème fédérateur est la détection et la caractérisation des systèmes planétaires extrasolaires.

De même qu'une maison se construit avec des pierres, la planétologie extrasolaire se construit avec des faits observationnels. Ainsi, le groupe possède un savoir-faire unique d'une part dans la principale méthode de découverte de nouvelles exoplanètes : la vélocimétrie des vitesses radiales et d'autre part dans une méthode particulièrement puissante pour la détection et la caractérisation des atmosphères d'exoplanètes : la spectroscopie de transits.

Mais une simple accumulation de faits ne suffit pas, tout comme un tas de pierres ne fait pas une maison. Ainsi, le groupe possède une compétence reconnue en modélisation des atmosphères d'exoplanètes. Aujourd'hui, le contenu et la structure de l'atmosphère de quelques planètes ont été déterminés avec un très haut niveau de détail.

Pendant très longtemps, les membres du groupe ont été très fortement impliqués dans la mission spatiale FUSE de spectroscopie UV, à travers des programmes concernant le milieu interstellaire mais aussi les disques circumstellaires jeunes et les planètes du Système Solaire. FUSE a été arrêté par la NASA en juillet 2007. La contribution de l'IAP en terme d'articles publiés dans des revues à réferés s'est par conséquent amenuisée jusqu'à l'assèchement total de la participation financière du CNES en 2010.

Depuis la fin des années 1980, quelques membres du groupe s'étaient investis dans le projet EROS de recherche de la matière noire baryonique du Halo galactique sous forme d'objets compacts, par effet de microlentille gravitationnelle. Ce projet s'est terminé avec un long article (Tisserand et al. 2007) mettant un terme définitif aux spéculations sur la nature de la matière noire du Halo : il est exclu que celui-ci soit constitué d'objets compacts dans la gamme  $0.6 \times 10^{-7} - 15 M_{\text{sol}}$ . Cependant, au cours des sept ans d'observation d'EROS, la création d'une impressionnante collection de courbes de lumière (de l'ordre de 100 millions dont 35 millions dans les Nuages de Magellan) avait conduit le groupe EROS de l'IAP à se poser la question de la valorisation de cette foison de données. Deux membres du groupe restent associés aux publications signées par l'ensemble du consortium EROS.

Enfin, plusieurs membres du groupe participent très activement à la diffusion des connaissances scientifiques. En particulier, un membre est co-directeur du projet mondial Global-HOU (Roger Ferlet, Hands-On Universe) et co-coordonateur de sa partie européenne EU-HOU (financée entre autres sur contrats européens), pour la mise en œuvre des méthodes d'investigation dans l'enseignement scientifique à travers l'astronomie, au niveau secondaire.

## **1.1 Vélocimétrie radiale**

### **1.1.1 Recherche et découverte de planètes extrasolaires**

La première planète en orbite autour d'une étoile de type solaire a été découverte en 1995 à l'Observatoire de Haute-Provence avec l'instrument ELODIE. Les recherches en exoplanétologie se sont fortement développées depuis lors, avec notamment plus de 700 planètes extrasolaires découvertes. Ces recherches ont été réalisées par différentes équipes, en grande partie avec la méthode des vitesses radiales, qui permet la détection indirecte d'une planète grâce à la mesure précise des mouvements qu'elle induit sur l'étoile autour de laquelle elle est en orbite. Les techniques progressent et permettent désormais d'explorer le domaine des exoplanètes de masse de plus en plus faible - jusqu'à quelques masses terrestres - et sur des périodes orbitales de plus en plus longues. Notre équipe est fortement impliquée dans ces programmes de vélocimétrie radiale, notamment au moyen de l'ANR Jeune chercheur SuperTerres dirigée par F. Bouchy.

Le spectrographe SOPHIE a été mis en service en 2006 au télescope de 193 cm de l'Observatoire de Haute-Provence. Il présente une sensibilité et une précision bien meilleures que l'instrument ELODIE, auquel il a succédé. Il s'agit d'un spectrographe échelle, alimenté par fibres optiques, et placé dans un environnement stabilisé. Il fait partie des instruments les plus pointus actuellement ; il a en effet la capacité de réaliser les mesures de vitesses radiales parmi les plus précises au monde. Un consortium

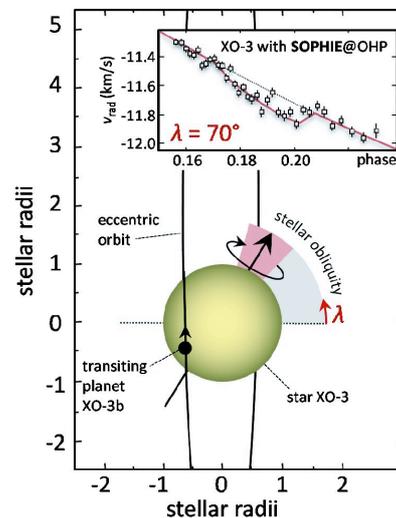
d'une vingtaine de chercheurs européens s'est constitué afin de mener un programme ambitieux et compétitif de recherche et de caractérisation de planètes extrasolaires. Il est organisé en cinq sous-programmes, visant à i) rechercher les planètes de petite masse à haute précision, ii) détecter et étudier les planètes géantes, iii) rechercher les planètes autour des naines M, iv) des étoiles précoces, et enfin v) rechercher les planètes à longue période en utilisant les données ELODIE (dont certaines remontent à 1994). Le consortium obtient en moyenne plus d'une centaine de nuits d'observation par an sur SOPHIE.

Ce consortium comprend plusieurs membres du groupe de l'IAP : F. Bouchy (qui le dirige), G. Hébrard (responsable de l'un des sous-programmes), A. Vidal-Madjar (membre du consortium jusqu'en 2010), Rodrigo Diaz (postdoc depuis 2009), Isabelle Boisse (thèse soutenue en 2010). A. Lecavelier collabore également à certains programmes effectués par le consortium.

De nombreux résultats ont d'ores et déjà été obtenus. Plusieurs nouvelles planètes et naines brunes ont été détectées et publiées (Da Silva et al. 2007, Santos et al. 2008, Bouchy et al. 2009a, b, Desort et al. 2009, Hébrard et al. 2010a, b, c, Boisse et al. 2010, 2011, Bouchy et al. 2011a, b, Diaz et al. 2011), et d'autres sont en cours de publication. Une étude de l'activité de l'étoile HD189733, hôte d'une des plus fameuses planètes en transit, a également pu être menée grâce à une campagne SOPHIE (Boisse et al. 2009), de même que la détection du spectre d'absorption de la Terre lors d'une éclipse de Lune, reproduisant certains aspects d'un transit exoplanétaire (Vidal-Madjar et al. 2010).

### 1.1.2 Caractéristiques orbitales et obliquité

Enfin, de nombreux transits d'exoplanètes ont également été observés en spectroscopie avec SOPHIE, permettant ainsi de mesurer l'obliquité de ces systèmes (Loeillet et al. 2008b, Moutou et al. 2011a). Nos observations de la planète XO-3 ont ainsi permis de publier le premier cas de non-alignement entre l'axe de rotation stellaire et l'axe de révolution de la planète (Hébrard et al. 2008, voir Figure 1.1). Ce résultat a été confirmé par des observations Keck (Winn et al. 2009) et Subaru (Narita et al. 2011).



**Figure 1.1.** Transit spectroscopique observé avec SOPHIE de l'exoplanète XO-3b devant son étoile. Cette observation a permis la détection du premier cas connu de non-alignement entre l'axe de rotation stellaire et l'axe de révolution de la planète.

Nous avons également publié la détection du transit spectroscopique de la planète HD 80606b, que nous avons complétée avec la détection photométrique de ce transit, effectuée simultanément au télescope de 120 cm de l'OHP dans un programme complémentaire (Moutou et al. 2009a). Il s'agissait alors de la planète à transit sur la plus longue orbite (111 jours de période ; le précédent record pour une planète à transit était de 21 jours). Nos observations SOPHIE indiquaient un non-alignement rotation-orbite, second cas connu après XO-3b. Nous avons confirmé ce non-alignement par une

---

analyse qui combinait toutes les données alors disponibles (Pont et al. 2009), puis mené une campagne simultanée avec SOPHIE et le télescope spatial Spitzer pour préciser les paramètres de ce système (Hébrard et al. 2010c).

À la suite des deux premiers cas de non-alignement rotation-orbite publiés par le consortium SOPHIE, d'autres ont été observés, y compris sur des orbites rétrogrades (e.g. Winn et al. 2009, Triaud et al. 2010, Queloz et al. 2010, Hébrard et al. 2011a). L'ensemble de ces résultats remet en cause la migration dans un disque comme modèle standard et unique permettant d'expliquer l'origine des planètes géantes proches de leur étoile, et a suscité de nombreux travaux théoriques.

### 1.1.3 Observations des candidats-planètes détectés en transit

Nous participons également à un second grand programme sur SOPHIE, qui vise à effectuer le suivi en vitesse radiale des candidats planètes détectés en transit par les sondages photométriques sol et espace. Ce suivi en vitesse radiale est indispensable pour établir la nature planétaire des transits, puis pour caractériser les planètes détectées et notamment mesurer leur masse et l'excentricité de leur orbite. Ce programme occupe plus de 80 nuits d'observation par an sur SOPHIE. Il a permis d'obtenir de nombreux résultats, avec la détection et la caractérisation d'une vingtaine de planètes SuperWASP (e.g. Collier-Cameron et al. 2007, Bouchy et al. 2010, Simpson et al. 2011a, Hébrard et al. 2012, en préparation) et de deux planètes HAT. SOPHIE est également l'un des deux piliers, avec HARPS, du suivi en vitesse radiale de la mission spatiale CoRoT, et a notamment contribué à la détection et la caractérisation d'une vingtaine de planètes CoRoT (e.g. Moutou et al. 2009b, Fridlund et al. 2010, Bordé et al. 2010, Bouchy et al. 2011a, Hébrard et al. 2011b, Guenther et al. 2011). Nous nous sommes enfin lancés en 2010 dans le suivi des candidats de la mission américaine Kepler (Ehrenreich et al. 2011, Santerne et al. 2011a, b, Bouchy et al. 2011b, Bonomo et al. 2011, Diaz et al. 2012, en préparation). L'expérience acquise dans ces programmes pourra être réinvestie dans les programmes futurs de détection et d'étude de planètes en transit, et notamment la mission TESS, présélectionnée par la NASA, à laquelle nous sommes associés.

### 1.1.4 Collaborations nationales et internationales

La grande implication de notre équipe dans les programmes effectués avec SOPHIE a conduit trois d'entre nous (F. Bouchy, G. Hébrard, R. Diaz) à effectuer des missions de longue durée à l'OHP. Nous pouvons ainsi réaliser au plus près le suivi de l'instrument et des observations. Nous avons pu également participer activement aux améliorations portées à SOPHIE. Une portion de fibres à section octogonale a notamment été posée sur le train de fibre en juin 2011, apportant un gain très significatif dans la précision des vitesses radiales, à présent de l'ordre du m/s. SOPHIE est le premier instrument à être équipé d'un tel système, actuellement à l'étude pour d'autres spectrographes. Ces missions de longue durée ont également permis de renforcer et développer les collaborations entre les équipes de l'IAP et de l'OAMP travaillant sur les exoplanètes.

Nous participons également à des programmes en vélocimétrie radiale effectués dans l'hémisphère sud avec le spectrographe HARPS, installé au foyer du télescope de 3,60 m à La Silla. F. Bouchy est notamment responsable des *Large Programmes* qui ont été acceptés par l'ESO pour effectuer le suivi de la mission CoRoT (Bouchy et al. 2008, Queloz et al. 2009, Gandolfi et al. 2010), en synergie avec SOPHIE, et nous sommes associés à plusieurs programmes de sondages en vitesse radiale (e.g. Bouchy et al. 2009a, Triaud et al. 2009, Hébrard et al. 2010b). Enfin, nous participons au développement de l'instrument SPIRou, un spectrographe à haute précision (qui doit être installé au foyer du CFHT) afin de réaliser dans le domaine infrarouge des programmes de vélocimétrie radiale focalisés sur les naines M. Ces étoiles constituent la majorité des étoiles de la Galaxie, et présentent l'avantage d'avoir de faibles rayons et masses, facilitant la détection des petites planètes (en transit ou non), et de faibles températures, facilitant la détection de planètes dans la zone habitable.

## 1.2 Spectroscopie de transits

Une autre approche pour déceler les exoplanètes consiste à mesurer l'infime baisse de luminosité périodique d'une étoile due au passage d'une planète devant son disque (aussi appelé transit

photométrique). Il s'agit d'une configuration optimale pour des études détaillées de spectrophotométrie permettant d'observer et caractériser les atmosphères de ces planètes extrasolaires.

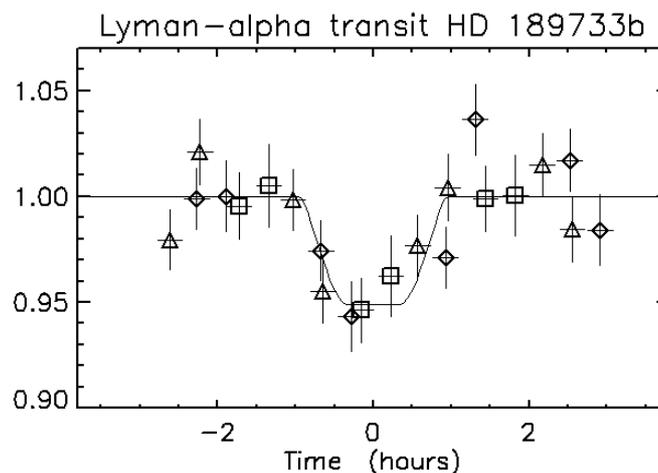
### 1.2.1 Découverte de l'évaporation des Jupiters-chauds

Notre équipe avait observé HD209458b avec le Télescope Spatial Hubble (HST) afin de chercher l'hydrogène atomique HI avec la raie UV *Lyman*  $\alpha$  ce qui avait conduit à la découverte de l'évaporation de cette planète (Vidal-Madjar et al. 2003). Avec un taux d'échappement de  $10^{10}$  g/s, le nuage d'hydrogène cache 15% de la surface de l'étoile, une taille plus grande que le lobe de Roche, et les atomes sont observés à une vitesse de plus de 100 km/s, dépassant la vitesse d'échappement (Lecavelier des Etangs et al. 2004). Toutes les analyses convergent désormais vers la conclusion que HD209458b s'évapore (Vidal-Madjar et al. 2008, Ehrenreich et al. 2008, *Linsky et al. 2010*).

Nous avons également découvert la présence du carbone et de l'oxygène dans l'atmosphère supérieure de cette planète (Vidal-Madjar et al. 2004). Ces observations démontrent que la planète s'évapore dans un régime hydrodynamique, un processus similaire à celui qui a probablement éliminé l'atmosphère primitive de la Terre. Cela a été confirmé avec le nouveau spectrographe COS du HST.

Des observations d'une autre planète en transit devant une étoile brillante – HD189733b – étaient programmées avec le spectrographe STIS du HST, mais ont été retardées du fait de la panne de celui-ci. En attendant, nous avons pu rechercher des signatures d'évaporation de HD189733b en utilisant le spectrographe à prisme ACS du HST. Le nuage d'hydrogène de HD189733b a été détecté et la planète s'évapore aussi avec un taux d'échappement de  $10^7$ - $10^{10}$  g/s. C'est le deuxième cas d'évaporation d'une planète extrasolaire (voir Figure 1.2, Lecavelier des Etangs et al. 2010).

L'origine des atomes d'hydrogène observés dans ces exosphères de Jupiters-chauds est encore débattue avec deux *scenarii* : la formation par recombinaison des protons du vent stellaire avec les électrons de l'atmosphère, ou origine directe à partir de l'atmosphère et accélération par pression de radiation (*Holmström et al. 2008*, Lecavelier des Etangs et al. 2008b, c). Quoiqu'il en soit, dans les deux cas, la planète s'évapore.



**Figure 1.2.** Flux Lyman  $\alpha$  en fonction du temps pendant le transit de HD189733b observé avec HST. Cette figure montre la détection de l'échappement d'hydrogène qui produit une absorption de 5% pendant le transit.

Tous ces travaux ont ouvert la porte à un grand nombre de développements théoriques sur les mécanismes qui conduisent à l'évaporation des Jupiters-chauds. Les nombreux modèles développés montrent tous que près de 100% de l'apport d'énergie stellaire sous forme de rayons X et Extrême Ultraviolet (EUV) sont utilisés pour échapper au puits de potentiel de la planète. Ce résultat général est le fondement du développement des « diagrammes d'énergie » décrits dans Lecavelier des Etangs (2007) qui permettent de prédire les taux d'évaporation des planètes extrasolaires et de calculer leur évolution. Ils expliquent aussi l'absence de planètes géantes peu massives près de leur étoile et

prédissent l'existence de planètes sous forme de résidus d'évaporation tels qu'observés par Corot avec la planète Corot-7b (Léger et al. 2009).

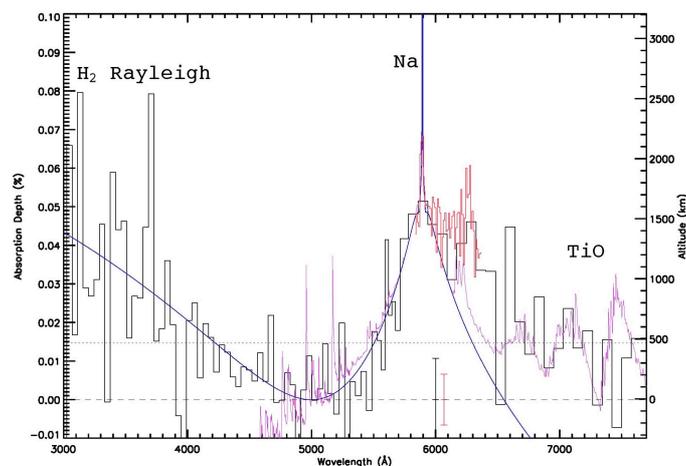
### 1.2.2 Détection et caractérisation des atmosphères d'exoplanètes

L'étude détaillée de la structure atmosphérique des exoplanètes peut être réalisée grâce à des observations spectroscopiques des transits avec les télescopes spatiaux Hubble dans le visible et *Spitzer* en IR (Tinetti et al. 2007a). L'analyse et l'interprétation des observations de HD189733b à 3,6 et 5,8 microns ont d'abord conduit à l'annonce de la détection de la molécule d'eau (Tinetti et al. 2007b) ; mais cette détection a été remise en cause par une nouvelle analyse détaillée des mêmes données (Ehrenreich et al. 2007a, Désert et al. 2009a). Puis une nouvelle série d'observations *Spitzer* a permis d'obtenir une mesure globale du spectre d'absorption de 3 à 8 microns et de conclure à un rapport CO/H<sub>2</sub>O élevé dans l'atmosphère de HD189733b (Désert et al. 2009b).

Utilisant les mesures HST, nous avons également montré que le spectre de l'atmosphère de HD189733b entre 0,55 et 1,05 micron est caractéristique de la diffusion Rayleigh. Il a aussi été possible de mesurer la température de l'atmosphère ( $T=1340\pm 150$  K). Les particules responsables de la diffusion Rayleigh pourraient être des aérosols composés de MgSiO<sub>3</sub> tels que ceux prédits en abondance dans ce type d'atmosphère (Fortney et al. 2007, Lecavelier des Etangs 2008a).

Enfin, nous avons entrepris une analyse systématique de toutes les données HST de HD209458b pour produire un spectre d'absorption par l'atmosphère de HD209458b de 3000 Å à 8000 Å (voir Figure 1.3, Sing et al. 2008a). Grâce à ce spectre, de nombreuses découvertes sur l'atmosphère de cette planète ont été faites, comme :

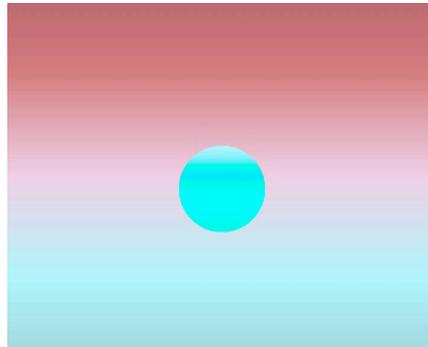
- La détection de la diffusion Rayleigh par les molécules d'hydrogène (Lecavelier des Etangs et al. 2008c) ; cette mesure permet de fixer la relation pression-altitude qui restait jusqu'alors indéterminée et qui est nécessaire pour convertir les détections des autres éléments en termes d'abondance absolue.
- La détection de différentes couches atmosphériques ayant des abondances de sodium différentes en fonction de l'altitude (Sing et al. 2008b). Il s'agit de la première observation d'une variation d'abondance dans l'atmosphère d'une planète extrasolaire.
- La détection des molécules TiO et VO prédites par les modèles théoriques et dont la présence est nécessaire pour interpréter l'excès d'absorption que nous observons entre 6500 Å et 7500 Å (Désert et al. 2008).
- La mesure du profil de température-pression de ~100 millibars à 10 microbars, avec un profil adiabatique de 2200 K à moins de 700 K (Sing et al. 2008b, Vidal-Madjar et al. 2011).



**Figure 1.3.** Spectre d'absorption de l'atmosphère de HD209458b. On peut voir la diffusion Rayleigh par les molécules de H<sub>2</sub> dans le proche UV, l'absorption par différentes couches de sodium autour de 6000 Angströms, et la détection de l'absorption par des molécules de TiO et de VO autour de 7000 Angströms.

---

Par ailleurs, à partir de ce spectre visible mesuré, nous avons calculé les couleurs que l'on pourrait voir en regardant le ciel et le coucher d'étoile à partir de la planète elle-même (voir Figure 1.4). Ces calculs ont donné lieu à la production d'un petit film ("coucher d'étoile") et ont servi de support à la publication d'un communiqué de presse du CNRS sur les résultats de notre analyse des observations HST (voir ["Un disque cyan dans un ciel pourpre : coucher de soleil sur Osiris"](#)).



*Figure 1.4. Simulation d'un coucher de soleil vu d'Osiris.*

Imaginez que vous êtes dans un ballon flottant dans l'atmosphère de la planète extrasolaire HD209458b, alias Osiris. L'étoile est très proche et apparaît 20 fois plus grosse que le Soleil vu de la Terre. La lumière diffusée par le sodium de la haute atmosphère donne au ciel une couleur pourpre. Le ballon se déplace emporté par des vents rapides ; l'étoile se rapproche de l'horizon, devient moins éblouissante et vire au cyan. Quand ce soleil gigantesque se couche à l'horizon, il est devenu vert, flottant dans un ciel pourpre au-dessus, cyan au-dessous. Puis tout devient vert, un vert de plus en plus sombre laissant place à la nuit.

En conclusion, les travaux menés par notre équipe ont donné de nombreux résultats nouveaux et inattendus sur les atmosphères et l'évaporation des planètes extrasolaires, à la fois observationnels et théoriques ; nous avons apporté de nouvelles contraintes sur les propriétés des atmosphères des Jupiters-chauds. Ces progrès posent de nouvelles questions, et nous envisageons d'autres avancées, en particulier grâce aux nouveaux télescopes comme le GTC (Grantecan) sur lequel un grand programme de 20 nuits d'observation est en cours de réalisation. Un *large program* HST de plus de 100 orbites est programmé pour le cycle 19 (PI D. Sing) et un programme d'observation du transit de Vénus avec HST a été accepté pour juin 2012. A plus long terme, les résultats de ces programmes en cours nous permettront d'imaginer les futures avancées rendues possibles par les nouvelles générations de télescopes au sol (ELT) ou dans l'espace (JWST).

### **1.3 Recherche d'émission radio des planètes extrasolaires**

La détection de l'émission radio d'une planète extrasolaire serait une étape majeure dans la caractérisation de ces planètes et de leur environnement. Une telle observation pourrait fournir des informations sur le champ magnétique planétaire et l'interaction de la planète avec le champ magnétique stellaire et la couronne.

Il y a déjà eu quelques recherches d'émission radio dans le domaine décimétrique ( $f \sim 80$  MHz) pour quelques planètes extrasolaires (voir la revue de *Lazio et al. 2010*). Toutes ces recherches ont donné un résultat négatif. Pourtant, la détection d'émission radio des planètes extrasolaires les plus proches est actuellement réalisable si ces planètes émettent un flux de  $10^3$  à  $10^4$  fois supérieur à celui de Jupiter. Les conditions extrêmes des « Jupiters-chauds » et les lois d'échelle pour les émissions radio permettent d'envisager une telle situation (*Zarka et al. 2001*). Toutefois, toutes les estimations théoriques de l'émission maser cyclotron décimétrique impliquent plusieurs inconnues, par exemple, les vents stellaires, la densité coronale et les champs magnétiques stellaires et planétaires.

---

Jusqu'à présent, seules des non-détections ont été rapportées. Les principaux contributeurs au niveau de bruit à ces basses fréquences sont le fond de ciel, les interférences radio, et la scintillation ionosphérique. Par conséquent, les observations interférométriques de haute sensibilité et à haute résolution sont très prometteuses. Ainsi, le Giant Metrewave Radio Telescope (GMRT situé près de Khodad en Inde), un interféromètre de 30 km comprenant 30 antennes de 45 mètres de diamètre chacune, semble être le télescope de choix. Nous avons donc entrepris un vaste programme de recherche d'émission radio avec le GMRT. Il repose sur l'idée originale de l'utilisation des éclipses de planètes en transit par l'étoile pour discriminer toute émission planétaire d'éventuelles contributions stellaires ou d'arrière-plan.

Nous avons obtenu des observations de plusieurs planètes ("Jupiters-chauds" et "Neptunes-chauds"), dans plusieurs domaines de fréquences (par exemple à 244 et 614 MHz, Lecavelier des Etangs et al. 2009 ; ou à 150 MHz, Lecavelier des Etangs et al. 2011). Pour HD189733b, nous avons obtenu des valeurs limites supérieures avec une sensibilité améliorée de plus d'un ordre de grandeur par rapport aux observations précédentes obtenues par d'autres équipes à des fréquences similaires. Pour HD209458b, les observations donnent également un résultat négatif avec une limite supérieure de  $\sim 2\text{mJy}$  à 150 MHz. Quoiqu'il en soit, le programme se poursuit et 6 autres planètes ont été observées à 150 MHz. Des résultats très encourageants sont attendus de ce projet.

## 1.4 Prospective

Un exercice de prospective est certainement fort utile en permettant le recul indispensable pour situer des travaux de recherche dans le cadre d'une stratégie à plus long terme. Cependant, il faut garder à l'esprit qu'il ne s'agit en aucun cas d'un engagement car on espère bien que les travaux futurs apporteront suffisamment de découvertes et de surprises pour justifier une réorientation des recherches, que des questions inimaginables aujourd'hui apparaîtront demain.

### *Atmosphères des planètes extrasolaires*

Nous projetons de contraindre d'une part les exosphères étendues des planètes en évaporation, et d'autre part les atmosphères à plus basse altitude – non seulement des planètes géantes mais aussi de planètes de plus petite masse – le tout en utilisant la spectroscopie d'absorption pendant des transits, - soit en observant avec les meilleurs télescopes disponibles : plusieurs programmes sont déjà en cours sur le Gran Telescopio Canarias (GTC, 10,4 m) et le Hubble Space Telescope (HST), (Sing et al. 2011b) ;

- soit en élargissant l'échantillon des atmosphères exoplanétaires détectées et analysées.

20 nuits sur le GTC ont été accordées pour de la photométrie rapide avec l'instrument de dernière génération «Osiris». La taille sans précédent de l'échantillon de planètes extrasolaires ainsi sondées ouvrira la voie d'une exoplanétologie comparée. Un résultat a déjà été obtenu avec la première découverte de potassium dans l'atmosphère d'une planète extrasolaire, le Jupiter-chaud XO-2b (Sing et al. 2011a).

6 programmes HST (STIS et COS) ont été obtenus dans le but de mieux contraindre la structure, la dynamique et la composition des atmosphères des Jupiters-chauds, en particulier les taux d'échappement et les mécanismes d'évaporation. Un *large program* qui vient d'être accepté sur le HST (plus de 100 orbites) sondera l'atmosphère de plus d'une dizaine d'exoplanètes. A plus long terme, nous utiliserons l'ELT au sol et JWST dans l'espace pour mieux connaître les profils de température, de pression et d'abondance sur le plus grand intervalle possible d'altitude ; nous continuerons simultanément le développement des modèles théoriques de l'évaporation des Jupiters-chauds pour mieux contraindre leur évolution et destin en fonction de leur diversité.

### *Recherche d'émission radio des planètes extrasolaires*

Les premiers résultats obtenus avec le GMRT (Inde) sont très encourageants. Cependant, les mécanismes d'émission radio pouvant être d'une extrême diversité, et les ordres de grandeurs des quantités clés comme les champs magnétiques stellaires et planétaires étant totalement inconnus, il sera nécessaire de sonder un grand nombre de cibles couvrant la grande variété des exoplanètes. De même, l'extrême variabilité temporelle et directivité des émissions radio plaideront pour une

---

couverture de toute la période orbitale. Enfin, la fréquence de l'émission cyclotron dépendant essentiellement du champ magnétique planétaire inconnu, la couverture en fréquence doit être la plus large possible. Le GMRT offre une sensibilité sans égale de 150 MHz à 1,4 GHz. A plus basse fréquence, l'utilisation d'Arecibo ou de l'URT2 doit être envisagée. A plus long terme, LOFAR offrira une sensibilité et une couverture en longueur d'onde exceptionnelles.

#### *Vélocimétrie radiale*

Nous comptons poursuivre nos travaux en utilisant la méthode des vitesses radiales, notamment avec le spectrographe SOPHIE à l'OHP. Ses récentes optimisations offrent des programmes pour au moins 5 ans, notamment pour la recherche et l'étude des planètes de petite masse. La recherche des planètes sur de longues périodes peut être encore étendue, en tirant profit des observations disponibles sur une base de temps débutant en 1994 avec les premières observations ELODIE. SOPHIE sera également partie prenante du suivi en vitesses radiales des sondages photométriques, et notamment de la mission TESS de la NASA, pour laquelle nous avons un accord avec le PI. Nous comptons également poursuivre nos implications dans les programmes menés avec HARPS à l'ESO-La Silla, et sur les instruments qui seront bientôt disponibles, comme ESPRESSO sur le VLT et HARPS-N aux Canaries. Enfin, nous sommes impliqués dans le développement de SPIRou, un spectropolarimètre dans le domaine infrarouge accepté pour être installé au foyer du CFHT à Hawaï. Plusieurs programmes de recherche et de caractérisation de planètes extrasolaires autour de naines M seront menés avec cet instrument. Ces cibles sont particulièrement favorables à la détection de planètes de petite masse, en transit et dans la zone habitable de leur étoile.

---

## 2 Physique stellaire et planétaire et Planètes extra-solaires

Le groupe de recherche « Physique stellaire et planétaire et Planètes extra-Solaires » est composée de :

7 chercheurs CNRS : Jean-Philippe Beaulieu, Lotfi Ben-Jaffel, Claude Bertout, Serge Koutchmy (émérite), Jean-Pierre Maillard (émérite), Jean-Baptiste Marquette, Juan Zorec

2 enseignants-chercheurs (UPMC) : Arnaud Cassan, Caroline Terquem

1 chercheur CEA (émérite) : Thierry Montmerle (contrat UMPC)

1 assistant ingénieur: François Sèvre

Sur la période 2007-2011 :

7 doctorants : Adel Auiti (co-direction IAP-Université de Sétif, Algérie), Cyril Bazin (co-direction IAP-Université de Marseille), Omar Delaa (co-direction IAP-Université de Nice), Philip Galli (co-direction IAP-Université de Sao Paulo, Brésil), Thierry Semaan, Jean Teyssandier, Frédéric E. Vincent

4 thèses ont été soutenues : Suleiman Baraka, Virginie Batista, Ehsan Tavabi, Frédéric E. Vincent

Nombre de chercheurs avec HDR ou équivalents : 8

Nombre de publications rang I : 149

Nombre de publications de rang II : 179

*Nous tenons à rendre hommage à notre regretté collègue et ami, Michaël Friendjung, décédé le 22 octobre 2011. Ses travaux sont mentionnés dans le rapport ci-après.*

---

Conformément aux recommandations du Comité d'Évaluation qui a examiné l'activité du laboratoire en 2008, le groupe "Physique Stellaire" a cherché à fusionner avec d'autres activités de l'IAP, tout en respectant une certaine cohérence thématique, afin d'élargir son domaine et rassembler un nombre de chercheurs plus significatif. La recherche dans le domaine des planètes extra-solaires montre que celle-ci s'avère de plus en plus indissociable de la physique stellaire. Le thème des planètes extra-solaires constitue donc une composante importante de la nouvelle équipe. Dans cette fusion, nous avons également associé une activité tournée vers les problèmes de haute énergie dans les régions de formation stellaire et l'exploitation massive de bases de données stellaires. Par ailleurs, la thématique solaire a été maintenue active et les efforts dans le domaine du développement des instruments au service de la physique stellaire comme de celles des planètes ont été poursuivis. Ainsi, le groupe dénommé "Physique stellaire et planétaire et Planètes extra-Solaires" représente désormais un pôle incontournable en vue du rapprochement de plusieurs activités de l'IAP liées à la physique stellaire, qu'il est souhaitable de mener à terme rapidement comme en témoigne le rapport d'activité qui suit.

## **2.1 Microlentilles gravitationnelles**

La méthode des microlentilles gravitationnelles est basée sur un phénomène de relativité générale, la déviation des rayons lumineux par un corps massif situé sur la ligne de visée d'une étoile lointaine. La modélisation des courbes de lumière observées permet de détecter des systèmes exo-planétaires situés à plusieurs dizaines de milliers d'années-lumière de la Terre, c'est-à-dire plusieurs dizaines de fois plus loin que ne le permettent les autres techniques observationnelles. D'autre part, les planètes détectées sont situées à plusieurs Unités Astronomiques (0,5-10 UA) de leurs étoiles-hôtes, alors que les autres méthodes ont une sensibilité limitée (à part pour les planètes géantes) pour des planètes proches de leurs étoiles (souvent inférieures à 0,25 UA).

### **2.1.1 Modélisation et méthodes numériques**

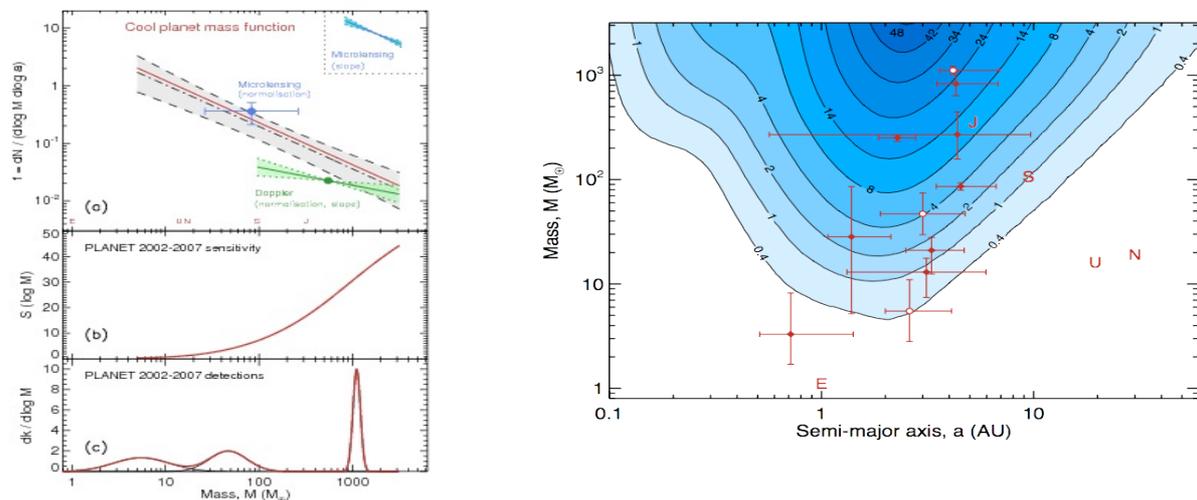
Une des composantes essentielles de l'interprétation des événements de microlentille gravitationnelle repose sur leur modélisation. Le but est, pour une courbe de lumière observée, de déterminer le modèle physique qui reproduit le mieux les données (étoile isolée, système planétaire, présence de parallaxe, mouvement orbital de planète, étoile-source binaire, etc.), et de mettre en évidence les minima locaux dans l'espace des paramètres. Certains paramètres sont parfois corrélés, et seule une analyse très poussée permet de privilégier un modèle par rapport aux modèles concurrents.

Des outils performants mettant en oeuvre des systèmes de paramètres plus proches des observables ont été développés (Cassan 2008), notamment pour les microlentilles binaires pour lesquelles des jeux de paramètres très différents peuvent expliquer les données avec autant de crédibilité (Kains et al. 2009). Récemment, nous avons développé des méthodes bayésiennes spécialement adaptées au cas de microlentilles (Cassan et al. 2010) qui permettent de prendre en compte d'autres observables statistiques non directement liés à la microlentille observée, et de réduire considérablement le temps de calcul par un meilleur choix des modèles de départ. Les modèles qui sont élaborés pour expliquer les courbes de lumière complexes font intervenir plusieurs effets secondaires (brièvement mentionnés plus haut) et peuvent totaliser de nombreux jours de calcul sur ordinateurs dédiés (plusieurs semaines/CPU), et le gain apporté par ces progrès dans la modélisation est essentiel. Un code original de modélisation a été développé à l'IAP, avec pour objectif une automatisation permettant un calcul en temps réel des modèles, afin d'optimiser l'efficacité de détection des exoplanètes.

### **2.1.2 Étude statistique sur l'abondance des planètes extra-solaires**

Nous avons mené à bien une étude statistique sans précédent visant à estimer l'abondance des planètes extra-solaires, basée sur 6 ans de données de microlentilles obtenues avec une stratégie d'observation homogène. Cette étude donne pour la première fois une abondance de planètes extra-solaires pour des masses allant de 5 masses terrestres à 10 masses de Jupiter, et des séparations orbitales comprises entre 0,5 et 10 Unités Astronomiques. La Figure 2.1 représente l'efficacité de détection obtenue lors de cette campagne d'observation entre 2002 et 2007 (voir la légende pour une explication détaillée de

la figure). Cette étude montre que les planètes géantes gazeuses et massives (0,3 à 10 fois la masse de Jupiter) sont présentes autour de 17% (barres d'erreur : +6%,-9%) des étoiles. Les planètes de faible masse, notamment les super-Terres (5-10 masses terrestres) et les Neptunes (10-30 masses terrestres) glacées sont encore plus communes : leurs abondances par étoile sont respectivement de 52% (barres d'erreur : +22%,-29%) et 62% (barres d'erreur : +35%,-37%). Il existe donc dans la Voie Lactée au moins autant de planètes que d'étoiles. Ce travail est publié dans la revue Nature (Cassan et al. 2011).

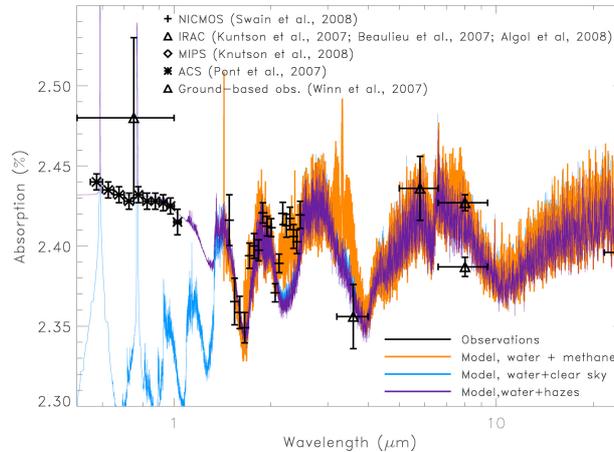


**Figure 2.1.** Panneau de droite : Sensibilité de détection de planètes extra-solaires par effet de microlentille, pour les observations réalisées entre les saisons 2002 et 2007 (soit 6 ans) par la collaboration PLANET. Les contours bleus représentent le nombre de détections attendues si chaque étoile avait exactement une planète de séparation orbitale  $a$  et de masse  $M$ . Les points rouges désignent toutes les planètes détectées dans la même période 2002-2007, avec leurs barres d'erreur pris dans la littérature. Les trois points marqués d'un disque blanc sont les détections compatibles avec la stratégie d'observation adoptée par PLANET, et qui peuvent donc être comparées aux contours bleus. Les lettres rouges (E, J, S, U, N) désignent les planètes du Système Solaire (Terre, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune) pour référence. Ce diagramme montre que la sensibilité des observations s'étend environ de 0,5 à 10 Unités Astronomiques, et d'environ 5 masses terrestres à 10 masses de Jupiter. La majorité des planètes détectées ont des masses plus faibles que celle de Saturne, bien que l'efficacité de détection soit bien plus grande pour les planètes plus massives. Panneau de gauche : Fonction de masse (courbe rouge, avec l'intervalle de confiance à 68% marqué en gris), calculée pour les observations PLANET 2002-07 et combinées aux études statistiques de microlentilles publiées précédemment (contraintes marquées en bleu). Ces deux figures montrent clairement que les planètes sont au moins aussi nombreuses que les étoiles, et que les planètes de faible masse (super-Terres et Neptunes froides) sont bien plus abondantes (rapport 6 estimé ici) que les planètes géantes gazeuses autour des étoiles de notre Galaxie.

## 2.2 Caractérisation des planètes extra-solaires

Dans le zoo des exoplanètes, une catégorie peut nous permettre dès maintenant de sonder leurs atmosphères, les planètes géantes évoluant sur des très courtes orbites, les Jupiters chauds. En particulier, ceux qui transitent devant leurs étoiles hôtes nous donnent accès à une estimation de leur rayon et de leur masse en combinant les mesures de vitesse radiale et de transit. Mais ce n'est pas tout, il est aussi possible de sonder leur atmosphère et d'estimer directement des propriétés physiques clés. Lors d'un *transit primaire*, la planète passe devant l'étoile, et il est ainsi possible de sonder les abondances de molécules dans l'atmosphère au limbe ainsi que tester la présence de nuages. Durant un transit secondaire, on observe la planète en train de disparaître derrière l'étoile, il est alors possible de prendre un spectre en émission du côté jour de ladite planète. Les observations seront sensibles aux profils de températures, ainsi qu'à la présence de nuages. En utilisant des données photométriques « bande large » obtenues avec le satellite *Spitzer* sur HD189733b, nous avons présenté la première détection d'une molécule dans une atmosphère de planète extra-solaire, la vapeur d'eau (Tinetti et al. 2007b, Beaulieu et al. 2008, Beaulieu et Tinetti 2008, Tinetti et Beaulieu 2009), confirmée par *Swain et al. (2008)*. La détection de l'eau fut ensuite confirmée par différentes études, et suivies par l'annonce du méthane, du monoxyde de carbone et du CO<sub>2</sub> par d'autres groupes. Désormais, nous disposons d'observations de 0,5 à 24 microns collectées par différents instruments, et d'une

modélisation cohérente (Tinetti et Beaulieu 2009, Figure 2.2). C'est une thématique hautement compétitive et cela a ouvert des perspectives excellentes. Nous avons aussi détecté de la vapeur d'eau avec *Spitzer* dans l'atmosphère de HD209458b.



**Figure 2.2.** Spectre en transmission de HD189733b de 0,5 à 24 microns. Différents jeux de données sont utilisés pour couvrir une large plage de longueurs d'onde, avec des instruments différents et donnant des résultats cohérents. Dans l'infrarouge moyen, c'est le spectre d'absorption de l'eau qui sculpte le spectre, et on remarque la contribution du méthane dans la plage 1,5-2,5 microns. A plus courte longueur d'onde, des nuages ou des aérosols aplatissent le spectre (pour le modèle nous avons pris des particules de l'ordre du micron). Le satellite ECHO prendra simultanément un spectre de 0,4 à 16 microns, avec une résolution  $R=300$ .

## 2.3 Dynamique des disques protoplanétaires et des planètes extra-solaires

Concernant les disques protoplanétaires, un membre du groupe s'est intéressé à la structure de disques contenant des « zones mortes », c'est-à-dire des zones qui ne sont pas sujettes à des instabilités. Les autres parties du disque sont soit suffisamment massives pour que des instabilités gravitationnelles s'y développent, soit suffisamment ionisées pour que la turbulence MHD puisse y être maintenue. Ces processus conduisent à l'accrétion de la matière par l'objet autour duquel gravite le disque. L'étude effectuée a montré que, si la matière peut être transportée dans les zones mortes du fait de l'activité dans les zones voisines, de tels disques peuvent exister dans un état stationnaire. Les zones mortes sont plus massives, plus épaisses et plus chaudes que dans des disques complètement actifs, et sont donc un endroit particulièrement favorable pour la formation planétaire (Terquem 2008).

D'autres travaux ont porté sur la formation de systèmes planétaires à partir d'embryons. Des planètes dont la masse est de quelques masses terrestres voire comparable à celle de Neptune ont été découvertes sur des orbites serrées. Le développement d'un code numérique N-corps permet d'étudier la formation de systèmes planétaires à partir d'embryons, en prenant en compte leurs interactions mutuelles et leur dynamique et stabilité. Cette étude considère une population de cœurs dont la masse est comprise dans l'intervalle 0,1–1 masse terrestre et qui migrent dans le disque tout en interagissant gravitationnellement les uns avec les autres. Ces interactions conduisent à un croisement des orbites et à des collisions entre les cœurs qui s'agglutinent et croissent ainsi. La migration des cœurs à des vitesses qui dépendent de leur masse produit par ailleurs des captures dans des résonances de moyen mouvement (qui correspond au rapport des périodes). Ces simulations indiquent que si les « super-Terres » et Neptunes mentionnés ci-dessus sont formés par collision de cœurs qui migrent, alors ces planètes ne sont pas isolées. Il devrait y avoir d'autres planètes de masse du même ordre de grandeur sur des orbites proches et quasi-commensurables. Cette prédiction constitue un test observationnel pour la théorie (Terquem et Papaloizou 2007), qui semble être confirmée par les observations du satellite *Kepler* rendues publiques en 2011. Lorsque la planète sur l'orbite la plus serrée se rapproche suffisamment de l'étoile centrale pour que l'interaction de marée avec l'étoile devienne importante, le système de planètes s'éloigne des résonances exactes de moyen mouvement, mais il a été montré que

---

les planètes restent cependant couplées dynamiquement (Papaloizou et Terquem 2010). Ces travaux sont également confirmés par les observations de *Kepler*, qui a détecté un grand nombre de systèmes planétaires dans lesquels beaucoup de couples de planètes sont proches des résonances de moyen mouvement.

Des observations récentes utilisant l'effet Rossiter-MacLaughlin indiquent qu'un nombre significatif de planètes extra-solaires ont une orbite inclinée par rapport au plan équatorial de leur étoile parente. L'effet d'un disque situé dans le plan équatorial de l'étoile sur l'orbite inclinée d'une planète a été étudié. Il a été constaté avec surprise que, lorsque le demi-grand axe de l'orbite de la planète est suffisamment petit devant le rayon du disque, le potentiel gravitationnel du disque provoque un cycle de type Kozai au cours duquel l'excentricité et l'inclinaison de l'orbite de la planète varient en opposition de phase (Terquem et Ajmia 2010). Ces paramètres peuvent ainsi atteindre des valeurs très importantes. Cette étude est poursuivie dans la thèse de Jean Teyssandier, commencée en octobre 2011.

Au cours d'un séjour de sept mois à l'Université de Princeton en 2011, C. Terquem a développé avec un postdoc de l'IAS (Princeton) une étude de la structure des enveloppes qui se forment autour des cœurs planétaires de faible masse enfouis dans des disques protoplanétaires. Il a été montré que de tels cœurs ont une atmosphère qui remplit le lobe de Roche, même lorsque celui-ci est plus grand que le rayon de Bondi (Terquem et Heinemann 2011). Ceci est en contraste avec les modèles communément utilisés dans lesquels l'atmosphère est contenue dans le rayon de Bondi (lorsqu'il est plus petit que le lobe de Roche) et est entourée d'un écoulement de type Bondi.

## **2.4 Atmosphères des planètes de notre système solaire et extra-solaires et interaction planète-étoile-milieu interstellaire local**

Nos études passées, respectivement de l'atmosphère des planètes de notre système solaire et de l'interaction entre le vent solaire et le milieu interstellaire local (LISM), nous ont motivés pour engager une étude globale du système planète-étoile-LISM par le développement d'outils sophistiqués et adéquats de diagnostic dans le cadre des projets INSPIRE et ESINPLE (code particules électromagnétique 3D, code MHD 3D, code transfert de rayonnement (voir chapitre 7, projet simulations numériques). Ces outils sont appliqués aux autres systèmes de planètes extra-solaires avec des conditions aux limites appropriées. Cette approche globale constitue aussi le socle des projets de formation par la recherche, SWEP et FORREST, qui sont orientés vers les pays du sud méditerranéen (voir dans l'Annexe le chapitre enseignement). Après la phase 2004-2007 de construction d'outils, la période 2007-2011 a été très productive pour l'application et l'amélioration de ces outils dans des domaines pluridisciplinaires :

- Mesure précise du champ magnétique interstellaire (IMF) au voisinage de notre système solaire  
Malgré la faible intensité de l'IMF ( $\sim 2\text{mG}$ ), son orientation relative à la direction du vent interstellaire local (VIL) produit une distorsion forte de l'héliosphère que nous avons détectée dès l'an 2000 (Ben-Jaffel et al. 2000). La distorsion a été observée par plusieurs mesures spatiales distinctes dont les analyses établissent l'obliquité de l'IMF ( $\sim 40^\circ$  à partir du VIL) en conformité avec nos premières analyses (Ratkiewicz, Ben-Jaffel et Grygorczuk 2008, Strumik et al. 2011). Nos analyses sont fondées sur une approche globale alliant observations, mesures *in situ*, et simulations MHD 3D.

- Première détection d'atomes (OI et CII) superthermiques dans l'atmosphère d'une exoplanète  
Les atomes superthermiques sont des marqueurs clés de la structure atmosphérique, des processus collisionnels, et de la dynamique en jeu dans un plasma chaud hors équilibre. Leur détection représente le meilleur indicateur des forces et des énergies colossales en jeu dans l'environnement des exoplanètes géantes en orbite à proximité de leur étoile-mère. Dans le cas de HD 209458b, notre analyse a permis une mesure approximative des températures effectives de OI et CII (Ben-Jaffel et Hosseini 2010).

- Simulation avec un code particule (PIC) électromagnétique relativiste en 3D d'une magnétosphère terrestre

---

Une application du code PIC a fait l'objet du travail de thèse de S. Baraka (Baraka et Ben-Jaffel 2007, 2011) et sert d'outil de formation par la recherche dans le cadre des projets SWEP et Forrest. SWEP qui est soutenu par la MAE (2011-2013) et l'IAP, participe à la chaire d'astrophysique que l'UNESCO vient d'offrir aux universités à Gaza avec l'aide de l'UAI (2011-2015). Une seconde application en cours concerne la magnétosphère des planètes géantes solaires et extrasolaires (voir Figure 2.3).

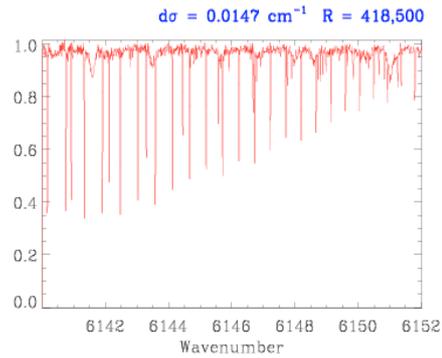


**Figure 2.3.** Simulation PIC 3D du plasma dans le système Io-Jupiter. La forme en “donut” représente le torus d’Io observé d’en haut. Le nuage de particules qui coupe le torus, connectant son centre (position de Jupiter) vers les régions externes (à gauche) est naturellement produit par un transport de particules du satellite vers les pôles de Jupiter, le long des lignes du champ magnétique. Ce couplage électromagnétique a été observé pour la première fois avec le HST en 2002. Le même couplage est attendu entre des exoplanètes géantes et leurs étoiles-mères.

## 2.5 Spectro-imagerie grand champ pour l'étude des régions de formation stellaire

Le développement du spectro-imageur fondé sur le spectromètre de Fourier qui a été mis en œuvre initialement sur le télescope Canada-France-Hawaï (FTS imageur), a été poursuivi. Dans ce cadre nous nous sommes concentrés sur l'exploration de l'association potentielle entre les observations « grand champ » et une haute résolution spectrale car ce type d'instrument le permet. Cet effort s'est traduit par plusieurs propositions instrumentales permettant l'étude des régions de formation stellaire à différents degrés d'évolution :

- mission spatiale pour de grands relevés entre 9 et 28,5  $\mu\text{m}$ , dans les quatre premières raies rotationnelles de  $\text{H}_2$ , le matériau de base de la formation des étoiles, (mission  $\text{H}_2$  Explorer ou H2EX) soumise dans le cadre de l'appel Cosmic Vision de l'ESA (voir chapitre 7.3.6).
- dans le cadre du réseau européen ARENA pour le développement de l'astronomie en Antarctique (2006 – 2009), étude d'un FTS imageur pour le Dôme C dans le domaine 1,8 – 5,5  $\mu\text{m}$  à placer derrière un télescope spécialisé de 2,5 m, cela permet d'exploiter les qualités du site en IR pour l'étude de la composition chimique et la dynamique des régions de formation stellaire.
- projet d'un FTS imageur, dénommé SITELLE pour le télescope CFH, centré sur le domaine visible (350 – 900 nm). Cet instrument étudié et construit avec les partenaires de l'Université Laval (Québec) avec un champ de 12'x12' permet l'étude globale i) des zones ionisées des régions HII, ii) de l'enveloppe étendue des nébuleuses planétaires proches, iii) jusqu'aux restes de supernovae. L'instrument devrait être disponible sur le télescope au printemps 2013.
- Dans ce contexte la rédaction d'un article de revue « *Wide integral field spectroscopy in astronomy : the Imaging FTS solution* » est en cours (Maillard et al. 2012, en préparation).



**Figure 2.4.** À partir d'un spectre martien à très haute résolution ( $R \approx 420000$ ) obtenu dans la région  $1,585 - 1,660 \mu\text{m}$  ( $6022 - 6308 \text{ cm}^{-1}$ ) avec le FTS du CFH, un très grand nombre de raies des principaux isotopes de  $\text{CO}_2$  ( $^{13}\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}^{17}\text{O}$ ,  $\text{CO}^{18}\text{O}$ ) a pu être identifié. Cela a permis la détermination la plus précise jamais obtenue du rapport  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  et  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  dans l'atmosphère martienne et de donner des conclusions sur les causes de l'enrichissement observé des isotopes lourds.

## 2.6 Analyse des atmosphères planétaires

Les rapports isotopiques du carbone et de l'oxygène dans l'atmosphère martienne sont des indicateurs des conditions d'échappement de l'atmosphère depuis sa formation. La molécule  $\text{CO}_2$  peut permettre la détermination de ces rapports (Krasnopolsky et al. 2007 Figure 2.4). Toutefois, leur mesure précise est limitée par le niveau de qualité des bases de données pour les forces de raie et par celui des modèles de structure thermique de l'atmosphère.

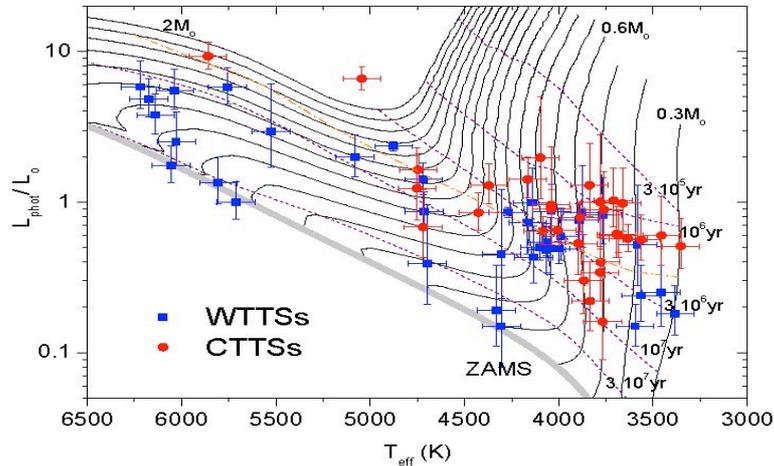
L'observation des zones aurorales de Jupiter en spectro-imagerie par FTS a permis d'observer à la fois l'émission de  $\text{H}_2$  et celle de  $\text{H}_3^+$  et d'en déduire la vitesse du vent neutre et celle du vent ionisé dans la thermosphère de la planète. Le vent neutre apparaît plus lent que le vent ionisé avec une différence de  $1,7 \text{ km/s}$  confirmant que les deux émissions aurorales se forment à des altitudes différentes (Chaufray et al. 2011).

## 2.7 Paramètres fondamentaux des étoiles de pré-série principale

La cinématique des régions de formation stellaire a été étudiée dans le but de calculer les parallaxes individuelles des membres des associations T proches pour lesquelles seules des distances moyennes sont généralement connues. Dans une première étude, une variante de la méthode du point de convergence classique qui a été optimisée pour étudier les associations d'étoiles jeunes caractérisées par une dispersion de vitesse interne relativement grande et des groupements inhomogènes dans l'espace avait été considérée. Cette méthode a été appliquée à la région de formation stellaire de Taurus-Auriga, produisant ainsi des parallaxes individuelles pour 67 membres du groupe en mouvement ayant des vitesses radiales connues. En utilisant ces nouvelles distances, Bertout, Siess et Cabrit (2007) ont déduit des estimations améliorées des âges et des masses des étoiles jeunes et ont mis en évidence une relation entre l'âge des étoiles et la présence de disques circumstellaires (Figure 2.5).

Une telle relation était attendue mais n'avait jamais été démontrée auparavant, sans doute parce que la distance moyenne au Taureau utilisée dans les études précédentes brouille les déductions d'âge et de masse. Ce résultat confirme que les disques sont probablement présents autour de toutes les étoiles qui se forment et disparaissent avec le temps par accrétion de matière sur l'étoile et / ou par la dissipation causée par la formation des planètes. L'étude de Taurus-Auriga était basée sur les vitesses radiales trouvées dans les bases de données CDS, et il s'est avéré que la précision des distances calculées a été affectée par l'hétérogénéité des différentes mesures. Des observations de régions de formation stellaire de l'hémisphère Sud ont donc été planifiées et réalisées en utilisant l'instrument FEROS sur le télescope de  $2,2 \text{ m}$  ESO. Simultanément, Galli et al. (2011) ont développé une nouvelle implémentation de la méthode du point de convergence qui utilise explicitement le fait que les membres de groupes stellaires animés d'un même mouvement se déplacent le long de grands cercles sur le ciel pour améliorer les performances de l'algorithme de la recherche du point de convergence.

Cette nouvelle méthode est actuellement utilisée pour ré-analyser un échantillon élargi d'étoiles T Tauri de Taurus-Auriga. Les données de vitesse radiale obtenues à l'ESO pour les étoiles jeunes de Lupus et d'Ophiuchus sont également utilisées actuellement pour l'étude de la cinématique de ces deux régions afin d'en tirer les parallaxes individuelles pour les membres de ces associations. Une comparaison des durées de vie du disque protoplanétaire dans des environnements différents sera alors possible, avec des implications pour les échelles de temps de formation des planètes.



**Figure. 2.5.** Diagramme H-R des étoiles de la région de formation stellaire de Taurus-Auriga. Les points rouges indiquent les étoiles T Tauri classiques (CTTs) entourées par des disques protoplanétaires et les carrés bleus marquent les étoiles T Tauri à faibles raies d'émission (WTTs) pour lesquelles on n'a aucune preuve de la présence de disques protoplanétaires. Les barres d'erreur indiquent les incertitudes luminosité photométrique  $L_{\text{phot}}$  et la température effective  $T_{\text{eff}}$ . Les lignes continues sont des trajets d'évolution, calculés avec  $Y = 0,277$  et  $Z = 0,02$ , pour les étoiles ayant des masses allant de 0,3 à 2 masses solaires avec un incrément de masse de 0,1 masse solaire. La position actuelle du Soleil calculée avec ces paramètres est indiquée par un symbole solaire. Notez que les paramètres choisis pour le calcul de l'évolution pré-séquence principale ne sont pas solaires, de sorte que les propriétés calculées du modèle d'étoile d'une masse solaire ne correspondent pas exactement à celles du Soleil réel.

## 2.8 Phénomènes à haute énergie dans les étoiles jeunes et les régions de formation d'étoiles massives

Les phénomènes à haute énergie (rayons X et  $\gamma$ , accélération de particules) qui se déroulent dans les étoiles jeunes et dans l'environnement des étoiles massives sont ici considérés.

### 2.8.1 Emission X stellaire

Un "Large program" XMM sur le système T Tauri binaire spectroscopique V4046Sgr (deux étoiles "jumelles" quasi-solaires distantes de  $\sim 2,5 R_{\odot}$ ), qui est entouré d'un disque d'accrétion circumbinaire a été mené à bien dans le but de rechercher une modulation rotationnelle orbitale de l'émission X liée à la chute de matière en provenance du disque sur le système. Ce phénomène d'accrétion est canalisé par des champs magnétiques, et des observations coordonnées au sol, notamment avec le CFHT/Espadons, ont pu être effectuées. Cette modulation a pu être détectée (en la distinguant de l'activité éruptive, aléatoire) et la topologie magnétique du système (Donati et al. 2011) a pu être décrite. Par ailleurs, grâce à un "Very Large program" Chandra, une très vaste mosaïque de la nébuleuse de la Carène (22 champs, couvrant 1,4 degré carré) a été obtenue. Entre autres résultats une étude de la hiérarchie de la fragmentation de la formation stellaire en amas a pu être menée à bien (Feigelson et al. 2011, Getman et al. 2011).

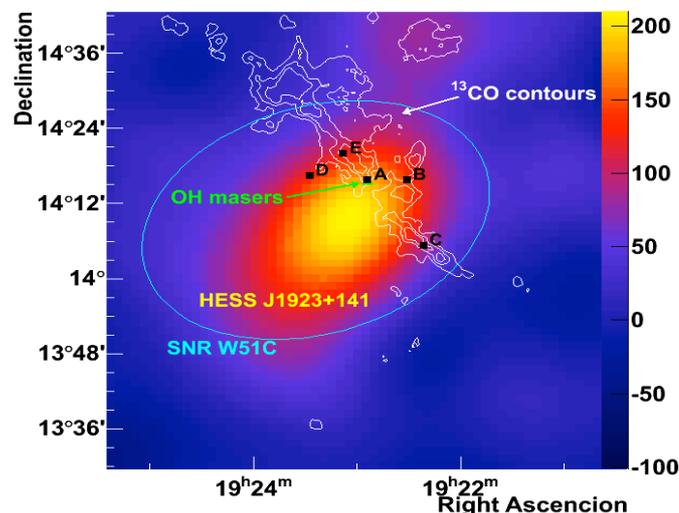
## 2.8.2 Emissions X diffuses liées aux étoiles massives

Le même programme *Chandra* a permis de révéler une émission X diffuse très intense de la Carène, associée à un plasma chaud ( $\sim 10$  MK) engendré par les vents des étoiles massives et les explosions de supernovae passées, emplissant ainsi les cavités inter-nuages moléculaires et s'écoulant hors de la région (Townsend et al. 2011a, b). En s'appuyant sur ce type de résultat, une recherche a été menée afin de déterminer si le chauffage "anormal" (température et luminosité élevées) de l'émission de la poussière observé par *Spitzer* dans la nébuleuse de l'Aigle (M16) pouvait être dû à un reste de supernova "caché", mais sans résultat (Flagey et al. 2011). Les phénomènes de "rétroaction" des étoiles massives sur le milieu environnant, galactique et extragalactique (Montmerle 2011a) ont été passés en revue.

## 2.8.3 Sources $\gamma$ , restes de supernovae, et ionisation des nuages moléculaires

Il est maintenant bien établi qu'une classe de sources  $\gamma$  (GeV-TeV) est associée à des restes de supernovae issus d'étoiles massives, donc encore présents dans leurs régions de formation, et interagissant "sous nos yeux" avec des nuages moléculaires (Montmerle 2011b). Cette hypothèse a été formulée pour la première fois en 1979, sur la base des résultats du satellite COS-B (Montmerle 1979). Dans ce cas, l'émission  $\gamma$  résulte de la décroissance de  $\pi^0$  issus des collisions  $pp$  entre rayonnement cosmique de haute énergie ( $> \text{GeV}$ ) accélérés "in situ" par le reste de la supernova, et l'hydrogène du nuage moléculaire.

Une idée comparable a été testée mais avec le rayonnement cosmique de basse énergie. Dans ce cas, le nuage moléculaire doit être "surionisé" par rapport à l'ionisation moyenne dans la Galaxie. Utilisant divers traceurs moléculaires d'ionisation, nous avons pu en effet mettre en évidence pour la première fois (avec le télescope de 30m de l'IRAM) un accroissement d'un facteur  $\sim 100$  de l'ionisation d'un nuage moléculaire associé à une source  $\gamma$  détectée par le télescope à effet Čerenkov HESS. Ceci ouvre la voie à de nombreuses études sur l'accélération du rayonnement cosmique par ondes de choc, et sur la chimie interstellaire dans un environnement très ionisé (Ceccarelli et al. 2011, Figure 2.6).



**Figure 2.6.** Exemple d'interaction entre un reste de supernova ("SNR": W51C) et un nuage moléculaire (contours  $C^{13}O$ ), expliquant l'émission  $\gamma$  (TeV ; à peine résolue) détectée par le télescope HESS. Cette émission provient de collisions  $pp$  entre le rayonnement cosmique de haute énergie accéléré par l'onde de choc du SNR (matérialisée par un maser OH), et le nuage. Des observations millimétriques (lignes de visée "A" à "E") ont pu mettre en évidence pour la première fois une surionisation d'un facteur 100 dans ce nuage : celle-ci est produite par la composante à basse énergie du même rayonnement cosmique.

## 2.9 Eros

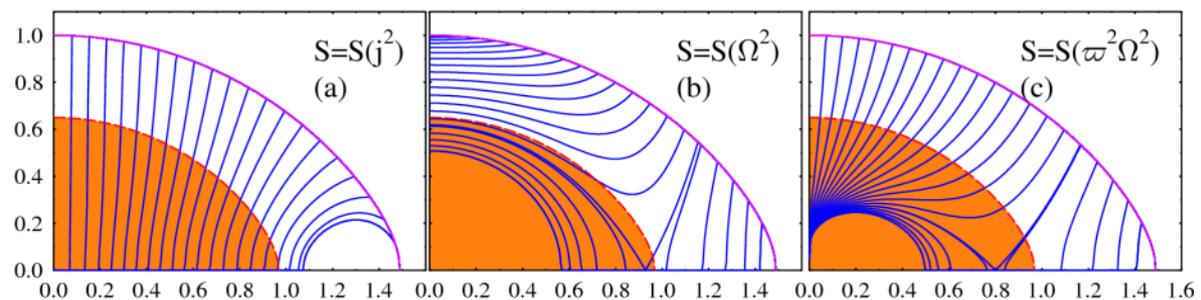
La collaboration EROS (Expérience de Recherche d'Objets Sombres) dans sa phase 2 (EROS-2) a eu pour objectif de détecter des événements de microlentilles gravitationnelles en vue de mesurer le contenu en matière noire baryonique (les objets sombres, ou MACHOs en anglais) du halo de la Galaxie. EROS-2 a apporté une réponse claire à cette question fondamentale en publiant (Tisserand et al. 2007) un article d'analyse fouillée de ces données accumulées durant sept années. Les détails de ce projet sont regroupés au chapitre 7.3.4.

## 2.10 Étoiles massives et moyennement massives

### 2.10.1 Rotation différentielle rapide

Les rotateurs rapides massifs développent une zone convective externe étendue qui favorise la présence d'une rotation différentielle non-conservative. Celle-ci induit des signatures sur les profils des raies spectrales et produit des modifications géométriques à la surface stellaire (Figure 2.7) qui sont mesurables par l'interféromètre VEGA/CHARA. Nous avons mis en place des programmes de recherche combinés en spectroscopie et en interférométrie, ainsi que développé des codes de modélisation pour interpréter les observations (Zorec et al. 2011). L'enjeu de ces recherches est de mieux comprendre les phénomènes de redistribution du moment angulaire et les mécanismes de mélange des composants chimiques dans les intérieurs stellaires, dont dépendent la structure des étoiles massives et moyennement massives en rotation et les modes de pulsation non-radiales, observables actuellement avec les satellites CoRoT et KEPLER.

Le caractère bimodal des distributions de vitesses de rotation des étoiles A précoces a été mis en évidence. Les étoiles de la fraction des rotateurs très rapides ont des surfaces radiatives et convectives en alternance selon la latitude. L'imagerie interférométrique de l'assombrissement gravitationnel de ces rotateurs confirme actuellement ce phénomène. De plus les étoiles de masse  $M \sim 3 M_{\odot}$  subissent une accélération de leur vitesse de rotation en surface dans le premier tiers de leur phase de Série principale, ce qui ne peut pas être expliqué actuellement avec les modèles d'évolution stellaire (Royer, Zorec et Gomez 2007, Zorec et Royer 2012, sous presse).



**Figure 2.7.** Lignes de iso-vitesse angulaire (bleue) obtenues pour surfaces d'entropie parallèles au moment angulaire spécifique (a), parallèles à la vitesse angulaire (b), parallèles à l'énergie de rotation (c). Seule la partie claire de l'enveloppe est considérée comme ayant une loi de rotation non-conservative. La forme de la surface de l'étoile dépend de la vitesse angulaire de la surface en fonction de la colatitude  $\Omega = \Omega(\theta)$ .

### 2.10.2 Progéniteurs des sursauts gamma longs

La fraction d'étoiles Be massives ( $M > 17 M_{\odot}$ ) ayant la métallicité des galaxies irrégulières Im, dont le SMC, peuvent rendre compte du nombre observé des LGRBs (long gamma ray bursts) dans l'Univers à  $z < 0,2$ . Ces étoiles Be deviennent alors des progéniteurs potentiels des LGRBs. Elles remettent en question, cependant, les schémas connus d'évolution de rotateurs rapides basés aussi bien sur la composition chimique uniforme que sur la composition non-uniforme (Martayan et al. 2007, 2010).

---

### 2.10.3 CoRoT

Pour la première fois une étude statistique de pulsations non-radiales des étoiles Be de notre Galaxie a été réalisée grâce aux données du satellite CoRoT. Par le nombre de modes de pulsation trouvé et les propriétés afférentes, les étoiles Be se situent aussi bien dans les domaines d'instabilité des bêta-Cep (rotateurs lents massifs) et des SPB (rotateurs lents moins massifs), qu'ailleurs, ce qui laisse de nombreuses questions ouvertes sur l'excitation de ces modes de pulsation (Semaan et al. 2011). Les paramètres fondamentaux qui ont permis l'analyse de ces étoiles ont été obtenus à partir des spectres observés avec les spectrographes FLAMES/GIRAFFE et X-shooter au VLT/ESO.

### 2.10.4 Paramètres stellaires fondamentaux et les télescopes géants

La nouvelle génération de télescopes géants (GMT, E-ELT et TMT) permettra d'étudier aussi des populations stellaires dans d'autres galaxies plus au moins éloignées. Les étoiles les plus massives et/ou évoluées sur lesquelles reposent de nombreux diagnostics sur l'évolution des galaxies et l'étude des progéniteurs de sursauts gamma seront spécifiquement considérés. C'est pour caractériser ces objets que nous avons entamé des calibrations de quantités mesurables autour de la discontinuité de Balmer (DB) libres des extinctions interstellaires et circumstellaires, en paramètres fondamentaux (Zorec et al. 2009). Cette méthode a révélé des incohérences dans les modèles d'atmosphères stellaires pour la détermination de ces paramètres. Cette méthode a aussi été employée pour caractériser des objets très différents tels que les étoiles B[e] et les étoiles massives chimiquement particulières (Cidale et al. 2007).

### 2.10.5 Environnements circumstellaires des étoiles WR et Be

Le suivi spectroscopique à haute résolution mené sur plusieurs mois dans cinq observatoires (OHP/SOPHIE, France, IAC, Espagne, DAO et OMM, Canada, Three Hilles, UK) du prototype d'étoile binaire à vents en interaction, WR140 entre 2008 et 2009, a conduit à la détermination des masses des composantes et des taux de perte masse (Fahed et al. 2011).

Les enveloppes des étoiles Be ont été étudiées par l'interprétation des raies de FeII en émission et des observations polarimétriques dans l'UV lointain (Zorec et al. 2007), ainsi que par la modélisation des observations interférométriques au VLTI/VINCI (Kanaan et al. 2008) et VEGA/CHARA (Delaa et al. 2011). Ces études montrent que les disques de ces objets ne sont pas minces, qu'il y a des vents polaires et que leur rotation képlérienne n'est pas une caractéristique générale.

## 2.11 Étoiles binaires particulières et étoiles de type Fu Orionis

La variation périodique de la raie de H $\alpha$  révélée par un suivi spectroscopique de HR Del, ex-nova qui, 45 ans après son explosion, montre une activité intense encore inexplicée, a été interprétée comme due à une tache brillante sur le disque d'accrétion autour de la composante naine blanche (Friedjung, Dennefeld et Voloshina 2010). La nature des vents des novae après l'éruption a été aussi étudiée (Friedjung 2011).

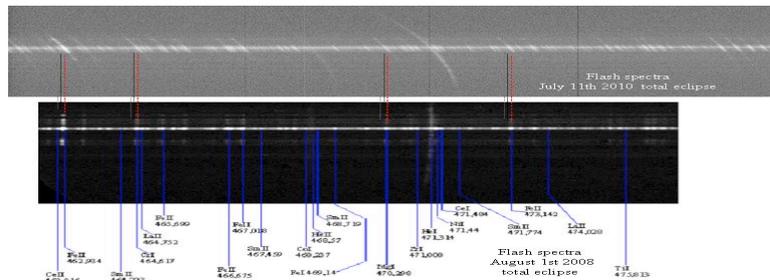
Un travail de synthèse sur les symbiotiques a été effectué (Friedjung 2007). Les raies en émission de RR Tel ont été étudiées spécifiquement (Kotnik-Karuza, Friedjung et Exter 2009), ainsi que la stratification des vitesses du vent de la composante froide de ce type d'objets (Friedjung et al. 2010a, b).

Les raies de Fe II en émission dans l'objet B[e] MMC314 ont été analysées par la méthode SAC (courbes d'auto-absorption) et la nature de la binaire a été confirmée. De plus cet objet a un disque d'accrétion, des vents polaires, et l'axe de rotation de la composante observée est incliné par rapport à celui de l'orbite (Muratorio et al. 2008, Rossi et al. 2011).

Plusieurs nouveaux objets de type FU Orionis ont fait l'objet d'un suivi spectroscopique à long terme pour étudier l'évolution de ces étoiles jeunes et leur interaction avec le disque protostellaire environnant (Semkov et al. 2010).

## 2.12 Magnétisme, activité solaire et héliophysique

L'analyse et la simulation numérique du transfert de rayonnement, notamment dans les raies d'absorption les plus intenses des atmosphères stellaires, sont les principales méthodes utilisées pour modéliser les atmosphères stellaires, la convection et la turbulence. Des raies sont en fait mesurées en émission immédiatement au-dessus de la photosphère, en regardant au bord d'un Soleil occulté par la Lune durant une éclipse totale (sans lumière parasite provenant du disque). Plus haut, des raies chaudes apparaissent en émission, dans la chromosphère et la couronne, et peuvent alors être étudiées dans les X-EUV grâce aux missions spatiales (SoHO, Hinode, Stereo, SDO...). Les modèles 1D sont devenus totalement inadéquats pour décrire cette région et la transition photosphère-chromosphère-couronne doit être modélisée en prenant en compte les structures : boucles et spicules. Cette transition révèle donc l'activité magnétique résultant des effets dynamo locaux en interaction avec les champs émergents issus des couches profondes, de la dynamique à grande échelle et de la reconnexion des lignes de champ. Les domaines d'application sont étendus, tels que les effets relativistes dans les interactions photon-matière, les effets thermodynamiques dans les régions singulières de reconnexion magnétique et de points neutres multiples (protubérances, couronne), les formations de vents lents dans les grands jets coronaux avec l'éjection de plasmoides, ou celles des vents rapides récurrents des trous coronaux peuplés de mini-éruptions (jets X), ou encore les éruptions sporadiques des régions actives. Les phénomènes dynamiques étudiés dans la couronne solaire forment un ensemble multi-échelles qui comprend les micro-boucles et les spécules (mini-éruptions), les points brillants, les flares et les CME (éjections de masses coronales) si importants pour une nouvelle discipline naissante, l'héliophysique, avec pour application la météorologie de l'espace (Koutchmy et al. 2008, 2010). Des observations ciblées de récentes éclipses totales de Soleil ont permis de collecter des spectres 2D qui complètent parfaitement les données collectées dans l'espace (missions Trace, Stereo, Hinode, SDO), (voir Figure 2.8). De plus, des images de la couronne solaire permettent d'étudier, grâce à la polarimétrie et la photométrie absolue, la composante poussiéreuse située plus loin dans la couronne avec comme sous produit, l'analyse de points neutres du vecteur polarisation. Enfin, le chrono-datage GPS rapide durant l'occultation du Soleil par la Lune et l'analyse spectrale du très fin croissant entre les montagnes lunaires, permet de préciser la valeur du diamètre solaire en support sol à la mission spatiale Picard lancée en 2010, permettant de précieux étalonnages absolus (Bazin, Koutchmy et Lamy 2011).



---

Concernant l'activité solaire du groupe, une expédition sera montée en 2012 pour observer l'éclipse totale solaire en Australie. L'interprétation des données spatiales des missions SoHO, Picard, Proba- 2 (SWAP), Stereo, SDO sera effectuée. Il y aura aussi une participation au projet SPIICS (Proba-3- ESA) d'éclipse artificielle dans l'espace durant un vol en formation et coronographie miroirs.

Concernant le volet planètes et exoplanètes, l'Étude de la physique et de la chimie de leurs atmosphères sera menée à bien dans le cadre de la mission ECHO présélectionnée par le CNES.

Le projet Forrest sera étendu à d'autres pays du sud-méditerranéen, et le code ESINPLE sera appliqué aux différentes familles d'exoplanètes pour en étudier aussi l'atmosphère et l'environnement voisinant, INSPIRE sera prolongé vers un projet de micro-satellite (CNES) pour cartographier le ciel en *Lyman* à très haute résolution.

Enfin, grâce à la mise en fonction de nouveaux télescopes robotiques à grand champ, il est possible désormais de procéder à la détection et au suivi photométrique des microlentilles de façon conjointe. L'automatisation de codes de modélisation performants devient une priorité, car les courbes de lumière recueillies seront bien plus nombreuses. D'autre part, une stratégie d'observation très bien définie pourra être mise en oeuvre. Ceci permettra de déterminer avec grande précision l'efficacité de détection des planètes sur plusieurs années, ce qui est indispensable à toute étude statistique sur l'abondance des exoplanètes.

Au plan théorique, l'activité sur la thématique de la dynamique des disques et des planètes extra-solaires va porter sur l'interaction entre le disque protoplanétaire et l'orbite des planètes inclinées par rapport à ce disque. Les observations révèlent de plus en plus de systèmes ayant une telle inclinaison, ce qui est difficile à comprendre dans le cadre d'un modèle où les planètes se forment dans le disque. Un scénario selon lequel des planètes massives peuvent se former lors de la fragmentation de l'enveloppe protostellaire d'où est issue l'étoile a déjà été proposé. C'est dans le contexte de ce modèle que va être étudiée la dynamique de systèmes avec des orbites inclinées.

Concernant le volet stellaire, les régions de formation d'étoiles massives seront étudiées en recherchant les étoiles nouvellement formées et l'émission diffuse dans la nébuleuse RCW120 (programme *Chandra* accepté) ; des recherches d'amas ouverts évolués dans les régions de formation d'étoiles massives est programmé (programmes XMM acceptés) ; enfin, l'étude des liens entre les sources  $\gamma$  et les restes de supernovae en interaction avec les nuages moléculaires sera effectuée ainsi que la mesure de l'ionisation (programmes IRAM acceptés).

Des programmes de recherche combinés en spectroscopie et en interférométrie VEGA/CHARA pour la recherche de la rotation différentielle en surface des étoiles massives viennent d'être mis en place. Ce travail sera activement poursuivi, notamment dans le développement de codes de modélisation nécessaires à l'interprétation des observations. La mise au point de modèles de structure stellaire en rotation rapide avec des lois non-conservatives qui déterminent la loi d'assombrissement gravitationnel et dont dépendent aussi bien la synthèse des spectres et l'interprétation des données interférométriques sera poursuivie.

Dans le cadre de GREAT (*GAIA Research for European Astronomy Training*) patronné par l'*European Science Foundation Research Networking Program*, la participation du groupe se fera via les codes FASTROT de synthèse spectral pour les rotateurs rapides. L'analyse des spectres VLT/FLAMES-GIRAFFE pour l'étude des étoiles dans les amas ouverts de notre Galaxie pour lesquelles GAIA donnera des parallaxes sera effectuée ainsi que la mise au point du mécanisme « Alertes-GAIA » pour le suivi au sol des objets variables (notamment supernovae, LBV et Be) dont les courbes de lumière ont des caractéristiques qui nécessitent une réaction immédiate en spectroscopie et/ou autres techniques. Afin d'éviter la saturation des moyens d'observation avec des cas non urgents, un travail de vérification des précisions des Alertes est mené.

Par ailleurs, La mise en service au printemps 2013 du FTS imageur grand champ, SITELLE, au télescope CFH, avec un champ de 12'x12' associé à une résolution spectrale de plusieurs milliers, doit permettre de conduire des programmes inaccessibles jusqu'ici. Par la combinaison offerte de champ et de résolution spectrale il rend possible l'étude intégrale de la distribution et de la dynamique du gaz intra-amas des amas de galaxies, du gaz dans les régions HII des galaxies proches, du gaz interstellaire

---

dans des amas stellaires avec l'inventaire des étoiles jeunes avec disques, de l'enveloppe ionisée des nébuleuses planétaires proches, des restes de supernovae.

Enfin, une collaboration s'est mise en place avec le Time Series Center (TSC) de l'Université d'Harvard (Cambridge, Massachussetts). Les 87 millions de courbes de lumière EROS-2 ont été transférées au TSC, pour mise à disposition publique sur la page web du TSC. On trouvera le lien EROS-2 sur la page <http://timemachine.iic.harvard.edu/search/> où les données commencent à se mettre en place, de manière analogue à celles des surveys MACHO et OGLE2. Il devient donc possible, pour des cibles données, de comparer sur une interface unique, toutes les données temporelles disponibles issues de ces diverses observations. Les catalogues répertoriant ces objets seront publiés par le biais du CDS à Strasbourg. A cela s'ajouteront 13 284 images de référence, réparties à parité sur les deux bandes photométriques EROS-2, sur lesquelles ont été identifiés les objets dont on a construit les courbes de lumière. Elles permettront classer la future base de données GAIA des étoiles variables. Il a été proposé à l'ESO que les images scientifiques EROS-2 soient versées dans le *Science Archive* de l'ESO. Il faudra faire en sorte que ces données soient mises au standard ESO.

---

### **3 Origine et évolution des galaxies**

Le groupe de recherche « Origine et évolution des galaxies » est composé de :

5 chercheurs CNRS : Stéphane Charlot, Valérie de Lapparent, Daniel Kunth, Nicolas Prantzos, Jacques Roland

5 astronomes : Emmanuel Bertin, Michel Dennefeld, Florence Durret, Gary Mamon, Hélène Roussel

3 enseignants-chercheurs : Michel Fioc (UPMC), Damien Le Borgne (UPMC), Brigitte Rocca Volmerange (U. Paris-Sud)

1 chercheur CEA : Laurent Vigroux

Sur la période 2007 – 2011 :

8 post-doctorants : Paula Coelho, Benjamin Johnson, Yuko Kakazu, Susan Kassin, Sundar Srinivasan, Dylan Tweed, Jakob Walcher, Vivienne Wild

11 doctorants : Hakim Atek, Anthony Baillard, Gwenaël Boué, Jacopo Chevallard, Elisabete da Cunha, Guillaume Drouart (cotutelle ESO), Artur Hakobyan (cotutelle Obs. Byurakan, Arménie), Jean-Christophe Mauduit, Camilla Pacifici, Dmitry Prokhorov (cotutelle Inst. Physique Technologie Moscou), François Riquebourg

6 thèses ont été soutenues : Hakim Atek, Anthony Baillard, Elisabete da Cunha, Artur Hakobyan, Jean-Christophe Mauduit, Dmitry Prokhorov

1 habilitation à diriger les recherches a été soutenue : Valérie de Lapparent

Nombre de chercheurs avec HDR ou équivalents : 8

Nombre de publications de rang I : 329

Nombre de publications de rang II : 156

---

Le thème de l'origine et de l'évolution des galaxies est au cœur des préoccupations des chercheurs de l'IAP. L'objectif est de comprendre l'histoire cosmique des différentes composantes des galaxies que sont les étoiles, les noyaux actifs, le gaz et la poussière. Des questions fondamentales se posent concernant la formation des galaxies et leur transformation au cours du temps : les propriétés des galaxies sont-elles acquises très tôt ou tardivement ? Quelle est la part des fusions d'objets dans l'établissement de la séquence morphologique ? Quel est l'effet de l'environnement galactique ? Quelle est l'histoire de l'enrichissement en éléments lourds dans les différents types de galaxies ? Les flambées de formation d'étoiles sont-elles un phénomène marginal ou majeur ? Quels types de galaxies proches et lointaines sont détectés préférentiellement dans les domaines ultraviolet, infrarouge, submillimétrique et radio ?

La physique interne des galaxies étant influencée par l'environnement en galaxies et gaz intra-galactique, via les effets de marée, de balayage, et les coalescences, les chercheurs du groupe examinent les propriétés des galaxies dans des environnements très divers, incluant les groupes et les amas de galaxies. Ces travaux menés à l'IAP mettent en œuvre des programmes d'observation et de suivi sur une large gamme d'instruments au sol (CFHT, ESO et VLT, IRAM, VLBI) et dans l'espace (*XMM-Newton*, *Chandra*, *GALEX*, *HST*, *Spitzer*, *Herschel*). En parallèle, des efforts cohérents de modélisations et de simulations théoriques permettent une interprétation détaillée des données observationnelles : codes de synthèse spectrale ; modèles d'évolution spectrale et chimique des galaxies ; modèles d'analyse cinématique des galaxies et structures des galaxies ; modèles des effets de fusion d'amas sur les taux de fusions et d'interactions de galaxies et sur le gaz intra-amas ; modèles des noyaux des galaxies radio par des systèmes de trous noirs super massifs.

En fournissant le bilan radiatif des divers types de galaxies dans les différents domaines de longueurs d'onde (rayons X, ultraviolet, lumière visible, infrarouge et radio), et grâce à l'interprétation au moyen des modèles théoriques, les observations visent à mieux comprendre l'histoire de l'accumulation de la masse dans les galaxies, par l'assemblage des halos de matière noire, les accrétions et éjections de gaz, et la formation d'étoiles, ainsi que le rôle des phénomènes énergétiques (noyaux actifs, galaxies radio) et dynamiques (collisions, instabilités internes).

### **3.1 Physique interne des galaxies**

Un des points forts du groupe concerne l'étude des processus intimes qui régissent les différentes composantes des galaxies : gaz, poussières et étoiles, disque, bulbe, halo et noyaux actifs. Depuis quelques années déjà, il est apparu nécessaire de prendre en compte les interactions entre ces multiples composantes. L'analyse de la composition chimique dans la Voie Lactée et dans les autres galaxies permet d'étudier les sources de nucléosynthèse, mais aussi de retracer les époques de mise en place des composantes galactiques. Par ailleurs, on sait que cette évolution se fait principalement par le biais des étoiles de grande masse et de masse intermédiaire, dont l'impact sur le milieu interstellaire est considérable (enrichissement chimique, ionisation). On peut ainsi utiliser les régions de formation d'étoiles dans les galaxies comme traceurs de l'activité galactique, ce qui permet d'orienter les recherches de galaxies primordiales à grand décalage spectral.

Les chercheurs de ce groupe s'intéressent en particulier aux mécanismes de couplage entre la formation d'étoiles et le milieu interstellaire, en caractérisant les mécanismes de chauffage et de refroidissement de ce dernier, ainsi que le processus d'enrichissement en éléments lourds. Ils s'attachent également à comprendre la physique galactique à toutes les échelles spatiales et aux longueurs d'onde allant de l'ultraviolet jusqu'à l'infrarouge lointain. L'émission radio, qui permet de déchiffrer la synergie entre la formation et l'évolution galactique et les phénomènes actifs au centre des galaxies (noyaux actifs, jets radio), joue également un rôle clé. Par ailleurs, les chercheurs du groupe contribuent de manière significative à l'étude statistique des supernovae en fonction des propriétés de leurs galaxies hôtes, un sujet qui connaît un développement fulgurant depuis quelques années.

---

### 3.1.1 La Voie Lactée

#### 3.1.1.1 Emission de positons

L'émission Galactique à 511 keV provenant de l'annihilation des positons est observée depuis une quarantaine d'années, mais sa morphologie spatiale n'est connue que depuis quelques années, grâce aux observations du satellite INTEGRAL de l'ESA, et indique un bulbe galactique plus brillant que le disque ; ceci est extrêmement intrigant car contraire à la situation dans toutes les autres longueurs d'onde. Après avoir passé en revue la physique des différentes sources possibles des positons, depuis les supernovae de type Ia et les binaires X de faible masse jusqu'à la désexcitation de la matière sombre, une équipe de 11 chercheurs dont un membre du groupe a pu identifier la propagation des positons de faible énergie ( $< \text{MeV}$ ) comme la clé potentielle de l'énigme (Prantzos et al. 2011).

#### 3.1.1.2 Evolution chimique et Groupe Local

Le modèle hiérarchique, selon lequel les galaxies se forment par accrétion et fusion de plus petites unités, constitue le paradigme actuel de la formation galactique. La distribution de métallicité du Halo galactique peut être calculée de manière semi-analytique dans ce cadre, en tenant compte, d'une part, des distributions de métallicité observées ces dernières années, grâce au VLT, dans les petites galaxies satellites de la Voie Lactée, et d'autre part, de la relation observée entre la masse et la métallicité de ces objets (Prantzos 2008a). Par ailleurs, une étude comparative de l'évolution des disques de la Voie Lactée et de la galaxie d'Andromède (M31), suggère une histoire de formation stellaire plutôt calme pour la première, mais épisodique pour M31, avec une perturbation récente qui aurait affaibli son taux actuel de formation stellaire. Ce dernier ingrédient est en accord avec des observations infrarouges suggérant une collision frontale de M31 avec M32, il y a environ 200 millions d'années (Yin et al. 2009).

### 3.1.2 Cycle des poussières et formation d'étoiles enfouie

Des chercheurs du groupe participent aux programmes de temps garanti avec *Herschel* sur les galaxies proches (situées à des distances de l'ordre de 10 Mpc) et sur la formation stellaire, ainsi qu'au programme-clé de temps ouvert KINGFISH (P.I. R. Kennicutt). Les premiers résultats du « *Very Nearby Galaxies Survey* » (P.I. C. Wilson) incluent une étude de M82, la plus proche galaxie à sursauts de formation d'étoiles qui possède un vent galactique. Le halo de poussières, précédemment détecté par *Spitzer* dans l'émission des hydrocarbures aromatiques polycycliques (ou PAH), mais sans que l'on n'ait pu estimer ses propriétés physiques, s'étend jusqu'à plus de 9 kpc du disque vu par la tranche (Roussel et al. 2010). L'analyse des cartes de l'instrument SPIRE conduit à conclure qu'une fraction considérable (environ un quart) de la poussière produite par M82 a été éjectée hors du disque ; mais plus des deux tiers de cet éjecta ne doivent rien au vent galactique, puisque les zones de plus grande densité de masse, et les plus froides, coïncident exclusivement avec les bras de marée observés en HI. Ainsi, l'interaction gravitationnelle avec le groupe de M81 est bien plus efficace que le sursaut de formation d'étoiles pour enrichir et opacifier le milieu intergalactique.

Pour le programme KINGFISH (Kennicutt et al. 2011), les cartes de l'instrument PACS (voir Figure 3.1) ont été réduites avec *Scanamorphos* (Roussel 2011) et délivrées à l'équipe. Il devient possible avec *Herschel* d'isoler l'émission de la totalité des poussières provenant de différentes structures à l'intérieur des galaxies, et de sélectionner des régions où dominant soit des étoiles OB, soit des étoiles intermédiaires et évoluées, soit le champ de rayonnement interstellaire diffus, soit encore un noyau actif. L'un des objectifs est de quantifier les contributions de ces diverses composantes dans les distributions spectrales d'énergie observées de l'ultraviolet jusqu'à l'infrarouge à  $500 \mu\text{m}$ , en couplant cette information à des modèles d'évolution spectrale des galaxies (Johnson et al. 2007) ; d'estimer quelle fraction de la formation d'étoiles est opaque dans différents types de galaxies ; et d'accorder les contenus observés en poussières, étoiles et gaz des galaxies locales avec les prédictions des modèles, en prenant soigneusement en compte le rôle des étoiles AGB (stade final des étoiles de masse comprise entre 0,8 et 8 masses solaires) dans le cycle de la poussière. La contribution des AGB au

spectre infrarouge des galaxies est significative, du fait de leur grande abondance. La production de poussière dans leurs épaisses enveloppes, et son injection dans le milieu interstellaire par la pression de rayonnement, sont des ingrédients essentiels des modèles de synthèse et d'évolution chimique des galaxies. Pour simplifier leur traitement rigoureux, une large grille de modèles de transfert radiatif pré-calculés couvrant tout l'espace des paramètres stellaires et de ceux des enveloppes de poussières a été construite (Srinivasan et al. 2010, 2011), et sera utilisée dans le cadre de KINGFISH.



**Figure 3.1.** Images en trois couleurs de quelques-unes des 61 galaxies du programme-clé KINGFISH (70, 100 et 160  $\mu\text{m}$  en bleu, vert et rouge). La poussière chaude des complexes HII apparaît en bleu.

Enfin, l'étude des « proto-starbursts » (Roussel et al. 2006) a été poursuivie. Ce sont d'excellents candidats pour contenir un sursaut de formation d'étoiles extrêmement jeune (de 1 à 3 millions d'années) et isolé dans le temps. Pour modéliser les spectres infrarouges de ces sources, optiquement très épaisses, un code de transfert radiatif à symétrie sphérique a été développé, s'inspirant de DUSTY (Nenkova et al. 2000), mais prenant en compte plus rigoureusement les propriétés des poussières : distributions en taille réalistes, propriétés optiques des grains non moyennées, traitement du chauffage impulsif et de la sublimation (avec dépendance en composition et en taille). Ce code sera appliqué aux spectres *Spitzer* et à la photométrie *Herschel*, pour en déduire les conditions de température et densité au coeur des "proto-starbursts", la géométrie du réservoir de gaz, et des contraintes sur les propriétés de la poussière, probablement modifiées dans ces environnements particuliers.

### 3.1.3 Supernovae et galaxies hôtes

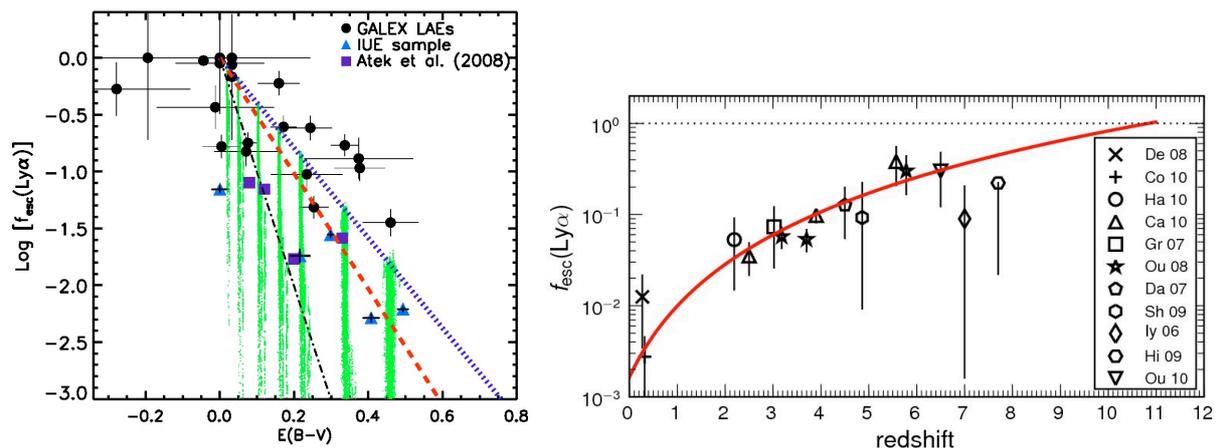
Le suivi spectroscopique régulier de plusieurs supernovae (SN) dont les progéniteurs sont des étoiles massives est en cours afin d'essayer de préciser les mécanismes d'explosion et d'évolution (e.g. Dennefeld et Stavinshi 2007). L'influence du milieu circumstellaire sur l'évolution spectrale a été mise en évidence dans l'un des cas (Pastorello et al. 2008) tandis qu'un phénomène explosif avant-coureur a pu être observé dans un autre (Pastorello et al. 2007). Ce programme va prendre de l'ampleur avec l'obtention d'un "Large program" à l'ESO (Smartt et al. 2011). En parallèle, la préparation à la mission spatiale *Gaia* (lancement prévu en 2012-2013), se poursuit afin de mettre au point le mécanisme d'alertes et de suivi au sol des SN. La préparation implique la mobilisation de moyens d'observation au sol adéquats (spectroscopie) et les tests de classification des alertes, à partir d'alertes provenant d'autres relevés au sol. En outre, l'obtention d'un échantillon homogène de SN Ia proches devrait permettre, enfin, d'établir la structure dynamique complète de l'Univers local, selon l'approche amorcée par Colin et al. (2011).

Une analyse des données pour environ 600 SN gravitationnelles (étoiles massives explosant après l'effondrement de leur cœur de fer) a montré que les rapports de fréquences de divers types de ces SN (SN Ib,c/SN II) sont corrélés à la métallicité globale de leur galaxie hôte, ainsi qu'à la métallicité locale. Ce résultat est interprété en termes d'évolution des étoiles massives simples, avec perte de masse et rotation, mais la contribution des étoiles binaires à la relation observée reste difficile à évaluer. Pour la première fois une corrélation significative, et inattendue, a été trouvée entre le rapport SN Ia/SN II et la métallicité (Boissier et Prantzos 2009). Une dépendance de la luminosité des SN de type Ia avec la métallicité, et, étonnamment, l'âge des populations stellaires, a été mis en évidence par le « *Supernova Legacy Survey* » (Howell et al. 2009). Ces résultats montrent l'importance de facteurs qui sont souvent négligés dans les utilisations cosmologiques des supernovae.

Les chercheurs du groupe s'intéressent également aux propriétés des galaxies hôtes de SN. Dans le cadre d'une collaboration avec des chercheurs de l'Observatoire de Byurakan en Arménie (thèse en cotutelle), la distribution des SN à effondrement de coeur (types II, Ib et Ic) a été ré-analysée avec un grand échantillon basé sur les données infrarouges de DENIS et 2MASS, afin de caractériser les taux de formation de SN dans les galaxies ainsi que les caractéristiques des galaxies hôtes. La distribution des SN est cohérente avec une distribution exponentielle dans le disque, et présente une concentration plus forte pour les types Ib/c que pour les types II, ce qui est peut-être un effet des gradients de métallicité des disques (Hakobyan et al. 2009). Par ailleurs, les propriétés (masse stellaire totale, taux de formation d'étoiles, etc.) des galaxies hôtes de sursauts gamma sont étudiées au sein de la collaboration « GHOSTS », grâce à une base de données complète et à une modélisation avec le code PEGASE (voir Sect. 3.2.1). Au vu de l'intérêt de ces divers résultats pour la théorie de l'évolution stellaire, et dans l'optique des futurs grands relevés de SN, le colloque annuel IAP de juin 2010 a été consacré à ces sujets (« *Progenitors and host galaxies of stellar explosions* »), et fut animé par trois membres du groupe.

### 3.1.4 La raie Lyman $\alpha$ dans les galaxies proches et lointaines

L'étude de la raie Lyman  $\alpha$  dans les galaxies locales en tant que traceur de galaxies primordiales est une des priorités dans le groupe depuis une dizaine d'années. Les résultats obtenus, grâce à l'imagerie et la spectroscopie avec les instruments ACS et STIS sur le Télescope Spatial *Hubble* ont montré l'importance des effets cinématiques, habituellement négligés pour l'émergence de cette raie. Les images en Lyman  $\alpha$  ont permis de révéler la présence d'émission dans cette raie diffusée par le milieu interstellaire neutre. Grâce à l'excellente résolution spatiale de *Hubble* ainsi qu'aux simulations numériques, l'étude du phénomène à petite échelle montre que la porosité du milieu interstellaire et la poussière jouent un rôle (Atek et al. 2008, Atek et al. 2009a). Une étude statistique et un suivi spectroscopique d'émetteurs Lyman  $\alpha$  révélés par le satellite GALEX met en lumière pour la première fois le comportement de la fraction d'échappement Lyman  $\alpha$  en présence de poussière (Atek et al. 2009b). On peut ensuite évaluer le type de sélection qu'opère le choix de la raie Lyman  $\alpha$  pour l'exploration des galaxies lointaines (Hayes et al. 2010), et établir que la fraction de photons Lyman  $\alpha$  qui s'échappe d'une galaxie évolue avec le décalage spectral (voir Figure 3.2). Les effets cinématiques sur la raie Lyman  $\alpha$  furent également explorés dans la raie NaD, avec FLAMES au VLT. Le colloque annuel de l'IAP en juillet 2009 fut consacré à ce sujet (« *The Lyman  $\alpha$  Universe* ») et animé par trois membres du groupe. Trois ateliers furent en outre organisés sur ce thème à l'IAP entre 2007 et 2011.



**Figure 3.2.** Effets de la poussière sur la fraction d'échappement de la raie Lyman  $\alpha$  (gauche), et l'évolution de cette fraction en fonction du décalage spectral (droite) ; les points verts (gauche) sont des galaxies simulées à l'aide d'un code de transfert radiatif.

---

### 3.1.5 Propriétés des galaxies à sursauts de formation d'étoiles ou riches en gaz

Une comparaison entre les données GALEX, *Spitzer* et *Chandra* obtenues pour des galaxies à sursauts de formation d'étoiles indique un bon accord entre les taux de formation calculés par l'ultraviolet et par les rayons X, ce qui prouve que la luminosité en X est un bon traceur de la formation d'étoiles dans ces galaxies, sauf en présence d'un AGN obscurci non détecté dans l'optique et causant un excès en X (Rosa-Gonzalez et al. 2007).

Les étoiles de Wolf Rayet constituent une phase importante de l'évolution des étoiles massives. Leur présence signe la manière dont les sursauts de formation d'étoiles sont caractérisés dans les galaxies dites « de Wolf Rayet ». Ces étoiles contribuent à enrichir le milieu interstellaire en éléments lourds. Des chercheurs du groupe ont réexaminé le problème en analysant des milliers de galaxies de ce type extraites du relevé « Sloan Digital Sky Survey ». Le résultat phare de cette étude est de révéler une différence notable de l'abondance en métaux dans le gaz ionisé des galaxies de Wolf Rayet comparées aux galaxies sans étoiles de ce type (Brinchmann et al. 2008a). En 2009, un atelier fut organisé à l'IAP sur le thème des étoiles de Wolf Rayet dans les galaxies.

Enfin, la composition en éléments lourds du gaz HI comparée à celle du gaz HII dans les galaxies riches en gaz montre toujours les mêmes différences : le gaz HI est moins riche en éléments lourds que celui du gaz HII. Ce point s'est confirmé avec les données FUSE obtenues pour la galaxie naine POX36 (Lebouteiller et al. 2009, Kunth et Lebouteiller 2011).

### 3.1.6 Les radiogalaxies

L'IAP maintient une activité significative dans le domaine des radiogalaxies, qui concerne l'analyse des objets individuels ainsi que leur rôle dans l'évolution de la formation d'étoiles.

#### 3.1.6.1 Structure du noyau et des jets internes

L'interprétation des objets complexes que sont les radiogalaxies ne peut se faire sans une modélisation approfondie des jets radio. Grâce à une modélisation de l'éjection des composantes VLBI (observations interférométriques intercontinentales) des radiosources compactes, un chercheur du groupe a contribué à montrer que la trajectoire suivie par le plasma éjecté par les noyaux des radiosources est généralement très complexe dans les premières millisecondes d'angle. La connaissance des variations des deux coordonnées de la composante éjectée en fonction du temps permet de trouver l'angle d'inclinaison de la radiosource et le facteur de Lorentz de la composante éjectée. La trajectoire peut être expliquée si le noyau de la radiosource contient un système binaire de trous noirs super massifs. Ce système binaire provoque une double perturbation de la trajectoire du plasma, la première perturbation étant due à la précession du disque d'accrétion, et la seconde au mouvement des trous noirs autour du centre de gravité du système binaire. Si le noyau de la radiogalaxie contient un système binaire de trous noirs supermassifs, les deux trous noirs peuvent éjecter des composantes VLBI et l'on observe deux familles de trajectoires (Roland et al. 2008). Une conséquence importante de la présence d'un système binaire de trous noirs supermassifs en est déduite : le coeur VLBI est associé à un des trous noirs, et si la composante VLBI est éjectée par le second trou noir, on peut détecter le décalage dans l'origine de l'éjection, ce qui fournit une mesure directe de la taille du système binaire. On constate en effet qu'à l'intérieur de 100 microsecondes d'angle, la structure des noyaux des radiosources est très complexe.

En outre, le flux des noyaux des radiosources compactes montre une variabilité rapide, de l'ordre du jour ou même de l'heure, aux longueurs d'onde radio et optique, dont l'origine est double. Une origine extrinsèque à la source peut être due au phénomène de scintillation du flux provoqué par le milieu interstellaire situé sur la ligne de visée entre la radiosource et l'observateur ; cette interprétation n'est cependant valable que pour les variations observées dans le domaine radio. Les variations optiques indiquent une contribution aux variations d'origine intrinsèque, causée par un phénomène se produisant dans le noyau de la radiosource ; l'explication proposée est celle d'une déformation des

---

parties centrales du disque d'accrétion, qui tourne avec une vitesse de rotation de quelques jours et provoque une petite perturbation de l'éjection du plasma, responsable des émissions radio et optique de la radiosource compacte (Roland et al. 2009).

### 3.1.6.2 Evolution des radiosources et des noyaux actifs de galaxies

La découverte de radio galaxies massives et très lointaines (à un décalage spectral de 6, soit 10% de l'âge de l'Univers) a relancé l'étude de ces sources et leur lien avec les galaxies hôtes. On s'attend à découvrir des galaxies primordiales au sein de radiosources, et la physique de l'évolution des bulbes pourrait être contrainte par ces observations. Des chercheurs du groupe contribuent à ce sujet par des développements observationnels et théoriques. D'une part, par une participation au consortium international « *High redshift Radio Galaxies* » (HzRG), visant à l'observation de puissantes radiosources en optique et en infrarouge avec les instruments IRAC, IRS et MIPS du satellite *Spitzer* (Seymour et al. 2007a, b, 2008) ; les observations avec *Herschel* (instruments SPIRE et PACS) sont en cours d'analyse et une demande ALMA a été soumise. D'autre part, les codes d'évolution PEGASE (<http://www.iap.fr/pegase>), dont la dernière version PEGASE.3, voir Sect. 3.2.1), sont utilisés pour mesurer la masse stellaire et nébulaire des galaxies de l'échantillon (Rocca-Volmerange et al. 2007, Seymour et al. 2007b), et apporter une interprétation pan-chromatique cohérente. Dans ce cadre, une thèse en cotutelle avec l'ESO et basée sur des observations avec APEX, le VLT, *Spitzer*, *Herschel*, et ALMA a démarré en octobre 2010 au sein du consortium HzRG (Guillaume Drouart, « Evolution des radiogalaxies aux confins de l'Univers : formation d'étoiles et noyaux actifs »).

En parallèle, une étude radio détaillée de champs profonds à basse fréquence a été lancée avec le radiotélescope indien GMRT, aux fréquences de 325 et 151 MHz, en vue d'une combinaison avec les données dans l'infrarouge lointain (*Spitzer*, puis *Herschel*) afin d'analyser la formation d'étoiles et sa variation cosmologique. Les premières observations ont été faites dans le champ ELAIS N1 (Sirothia et al. 2009, 2010) : elles révèlent un grand nombre de sources à spectre radio très pentu qui pourraient être situées à très grande distance. Leur caractérisation optique est en cours, tandis que les observations radio se poursuivent pour compléter les champs à plus basse fréquence. Par ailleurs, dans le domaine X, les contreparties optiques des noyaux actifs de galaxies du champ XMM-LSS (Tasse et al. 2008) ont été analysées avec le code d'évolution PEGASE (voir Sect. 3.2.1).

## 3.2 Propriétés spectrales et morphologiques des galaxies

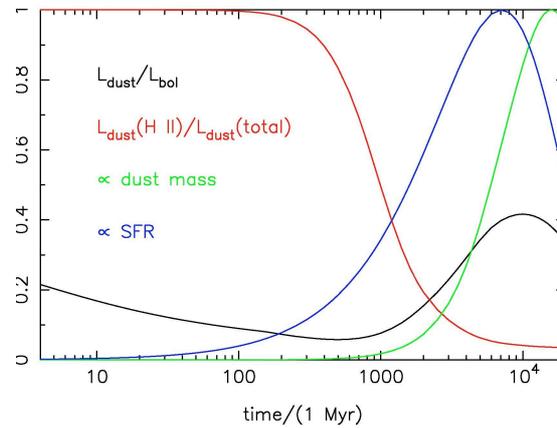
Le groupe possède une expertise reconnue internationalement dans la modélisation spectrale des galaxies, d'une part, et dans le traitement des images astronomiques et l'extraction des sources qu'elles contiennent, d'autre part. La confrontation des modèles et des observations permet de déduire des contraintes importantes sur l'histoire de la formation d'étoiles.

### 3.2.1 Modélisation spectrale des galaxies

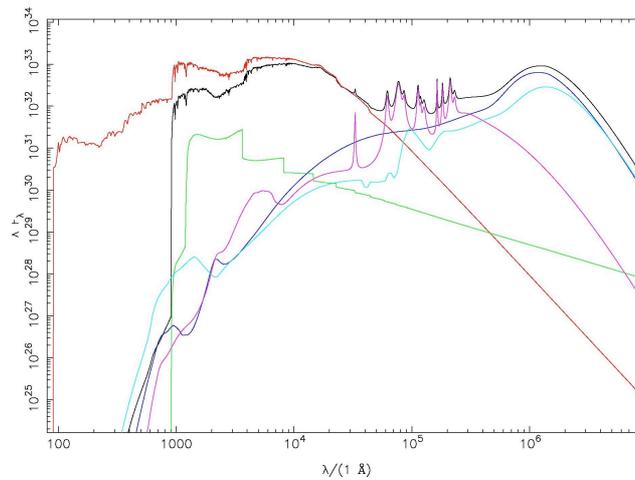
L'analyse de la distribution spectrale d'énergie d'une galaxie permet d'interpréter de façon cohérente son contenu en étoiles, en gaz interstellaire et en poussières. Les codes de synthèse spectrale permettent de lever les dégénérescences dont souffre un spectre, et de décrypter les informations qu'il contient. Par l'étude des galaxies à diverses époques de l'histoire de l'Univers, on peut alors contraindre l'évolution passée des différentes composantes des galaxies, et ainsi mieux comprendre l'histoire des différents types d'objets.

Afin d'améliorer l'exploitation des données infrarouges recueillies par les satellites *Spitzer* et *Herschel*, le développement de la version 3 du code PEGASE (<http://www2.iap.fr/pegase>) a été poursuivi (Fioc et al. 2012, en préparation). Il est désormais possible de calculer la distribution spectrale d'énergie d'une galaxie de l'ultraviolet à l'infrarouge lointain pour des scénarios d'évolution très divers, avec plusieurs épisodes de formation d'étoiles, et d'afflux ou de reflux de gaz ; ceci devrait favoriser l'emploi de PEGASE.3 dans les simulations cosmologiques de formation de galaxies. Le code a été modifié dans sa forme afin de permettre à l'utilisateur de définir les paramètres d'entrée des

scénarios de manière souple et d'obtenir des sorties plus riches, par exemple la contribution des différentes composantes à l'émission (voir Figures 3.3 et 3.4 pour une galaxie semblable à la Voie Lactée). Des améliorations de fond ont également été apportées : l'évolution des abondances dans le milieu interstellaire est calculée pour les principaux éléments chimiques et le code de transfert radiatif a été adapté à des géométries plus réalistes. Deux autres améliorations majeures sont en cours : l'introduction d'une bibliothèque théorique de spectres stellaires à haute résolution (Munari *et al.* 2005) ; et la modélisation de l'émission nébulaire des régions H II pour des métallicités non solaires.

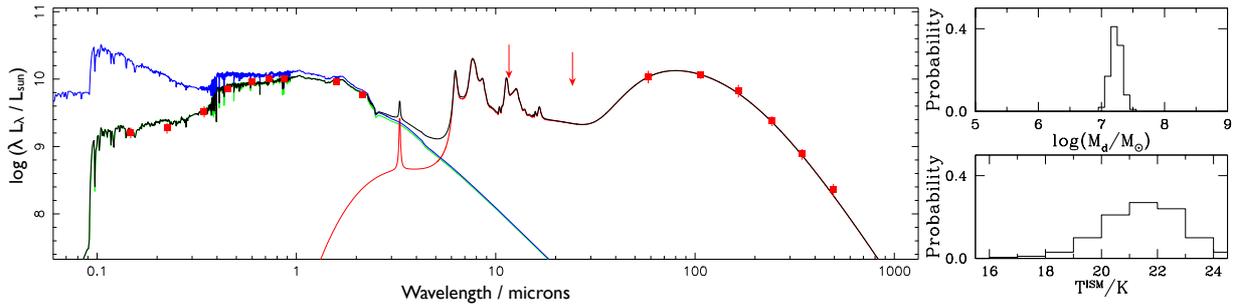


**Figure 3.3.** Luminosité de la poussière dans une galaxie Sbc. Noir : rapport de la luminosité de la poussière par la luminosité bolométrique. Rouge : fraction de luminosité de la poussière provenant des régions H II. Vert : masse de poussière. Indigo : taux de formation d'étoiles.



**Figure 3.4.** Spectre d'une galaxie Sbc à 10 milliards d'années (noir). Rouge : émission stellaire (sans extinction). Vert : émission nébulaire. Indigo : graphites. Cyan : silicates. Magenta : PAH.

En parallèle, un modèle simple et largement empirique permettant d'interpréter de façon cohérente l'émission combinée ultraviolette, optique et infrarouge des étoiles et de la poussière a été incorporé dans l'autre code d'évolution des galaxies développé par d'autres chercheurs du groupe (Da Cunha *et al.* 2008). Dans ce modèle, la distribution spectrale d'énergie infrarouge est la somme de plusieurs composantes de poussière (PAH, grains chauds et grains en équilibre thermique) dans les nuages de formation d'étoiles et dans le milieu interstellaire ambiant, qui contient en outre une composante de poussière froide. Ce modèle simple est suffisamment souple pour permettre l'obtention de contraintes statistiques sur les histoires de formation d'étoiles et le contenu en poussière de grands échantillons de galaxies observés dans l'ultraviolet, l'optique et l'infrarouge (Da Cunha *et al.* 2010, Dunne *et al.* 2011, voir Figure 3.5).



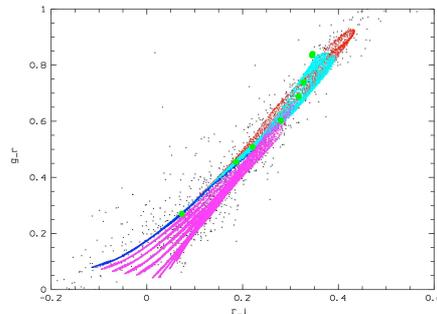
**Figure 3.5.** Exemple de modélisation spectrale ultraviolette, optique et infrarouge (gauche) et de détermination de la masse totale de poussière et de la température de la composante de poussière diffuse (droite) dans une galaxie du relevé optique SDSS observée avec les satellites GALEX dans l’ultraviolet et Herschel dans l’infrarouge. En bleu : émission stellaire non-atténuée ; en vert : émission stellaire atténuée ; en rouge : émission de la poussière ; carrés rouges avec barres d’erreur : observations.

De nouveaux outils statistiques d’analyse spectrale des galaxies ont par ailleurs été développés : ceux-ci sont basés sur des algorithmes de compression optimisée de spectres (Panter et al. 2007, 2008) ; sur des analyses en composantes principales dans d’étroits domaines spectraux (Wild et al. 2007) ; sur l’analyse multi-longueurs d’onde de chaque pixel dans des images optiques et infrarouges de galaxies (Zibetti et al. 2009). Ces méthodes produisent des contraintes originales sur la croissance hiérarchique, la caractérisation de la masse stellaire, et les histoires de formation d’étoiles et d’enrichissement chimique des galaxies (Panter et al. 2007, 2008, Arnouts et al. 2007, Salim et al. 2007, 2009, Eminian et al. 2008, Gallazzi et al. 2008, Wild et al. 2007, 2009, Walcher et al. 2008, Brinchmann, Pettini et Charlot 2008, Lamareille et al. 2009), ainsi que sur la synchronisation entre la croissance des trous noirs et la formation d’étoiles dans les galaxies (Kauffmann et al. 2007, Wild et al. 2010).

Enfin, un nouveau modèle permettant d’explorer les propriétés des galaxies dont les rapports d’abondances d’éléments lourds diffèrent de ceux des étoiles du voisinage solaire a été ajouté au modèle (Coelho et al. 2007), afin de remédier à cette limitation dans les modèles courants de synthèse de population stellaire. Une approche de synthèse spectrale « différentielle » de population stellaire permet alors de calculer les effets induits par des changements des rapports d’abondances [Fe/H] et [alpha/Fe] sur les déterminations de paramètres physiques des galaxies (Walcher et al. 2009).

### 3.2.2 Bibliothèque spectrale de galaxies

La satellite *Gaia* observera durant plusieurs années des millions de galaxies non résolues. La détection et la classification des galaxies sera automatique grâce au logiciel embarqué « *Unresolved Galaxy Classifier* » (UGC) basé sur une machine d’analyse vectorielle (SVM). L’entraînement du SVM est effectué à l’aide d’une large bibliothèque spectrale de galaxies synthétiques construite à partir du code PEGASE décrit ci-dessus (Tsalmantza et al. 2007, 2008, 2009, 2011, Rocca-Volmerange et al. 2008, Livanou et al. 2010, Karamelas et al. 2010, voir Figure 3.6). Cette bibliothèque par type est optimisée dans sa dernière version par une décomposition en composantes principales. Les principaux paramètres des galaxies seront également analysés.

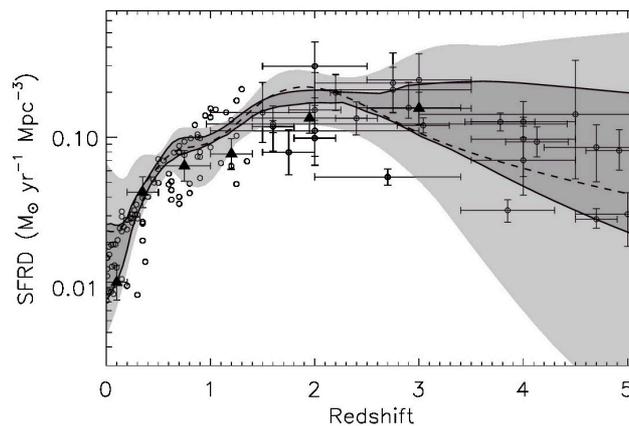


**Figure 3.6.** Diagramme couleur  $g-r-i$  pour la bibliothèque synthétique de galaxies par type (couleurs), construite à partir du code PEGASE pour le satellite *Gaia*, comparée ici aux observations du relevé SDSS (points).

### 3.2.3 Histoire de la formation d'étoiles

Les nouveaux télescopes infrarouges *Spitzer* et *Herschel* permettent de mesurer l'activité de formation d'étoiles qui se produit dans des cocons de poussière au sein des galaxies proches et lointaines. Le programme « GOODS-Herschel », dont l'IAP est partenaire, a permis d'observer en infrarouge les champs « *Hubble Deep Field* » Nord et Sud. Ces données, les plus profondes jamais obtenues pour des galaxies lointaines, ont dévoilé une relative uniformité des températures de poussière dans les galaxies au cours des âges (Elbaz et al. 2010, Hwang et al. 2010). En observant la distribution spectrale d'énergie dans l'infrarouge moyen et lointain, Elbaz et al. (2011) ont mis en évidence pour la majorité des galaxies un rapport constant entre la luminosité infrarouge, traçant la formation d'étoiles, et la luminosité à 8 microns. Ce rapport est plus faible pour les galaxies à sursauts de formation d'étoiles, qui sont plus compactes et plus chaudes. Les décalages spectraux et les masses des galaxies ont été mesurés avec le code Z-PEG (Le Borgne et Rocca-Volmerange 2002).

Pour compléter ces observations, Le Borgne et al. (2009) ont modélisé empiriquement l'histoire de la formation d'étoiles dans les galaxies en dé-projetant les comptages profonds de galaxies mesurés à diverses longueurs d'onde infrarouges (voir Figure 3.7). Cette inversion non-paramétrique a permis de déterminer indirectement l'histoire cosmique de formation d'étoiles avec ses incertitudes. Ce modèle a été largement utilisé par plusieurs équipes internationales pour la préparation et l'analyse d'observations de galaxies lointaines avec *Herschel*. Par une modélisation cette fois paramétrique, Bethermin et al. (2011) ont montré que les incertitudes estimées par l'inversion non-paramétrique sont réalistes.



**Figure 3.7.** Evolution de la densité du taux de formation d'étoiles depuis un décalage spectral de 5, modélisée (zones grises) par une inversion non-paramétrique des comptages infrarouges. Les points de données proviennent d'observations antérieures indépendantes dans l'ultraviolet, le visible et l'infrarouge.

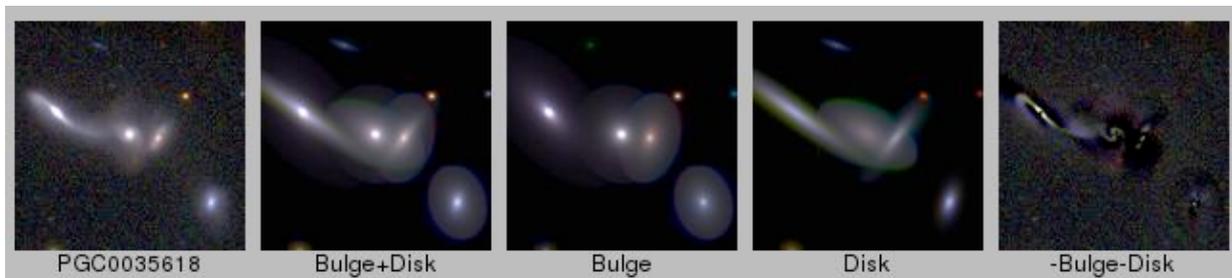
### 3.2.4 Analyse d'images et morphologie des galaxies

Si l'évolution spectrale des galaxies a été largement défrichée en utilisant la photométrie et la spectroscopie intégrée des objets, l'évolution de la morphologie reste à quantifier précisément. La difficulté réside dans l'instabilité des estimateurs de forme disponibles jusqu'à présent, en raison de leur sensibilité à la qualité des images (bruit, échantillonnage, réponse impulsionnelle), et aux effets de sélection (brillance de surface). Un vaste programme de détermination visuelle et automatique de la morphométrie des galaxies dans les grands catalogues digitaux existants a été entrepris par des chercheurs du groupe. Ce programme est rendu possible par les développements de logiciels d'analyse d'images astronomiques, et par l'acquisition de moyens de calcul et de stockage importants.

### 3.2.4.1 Un catalogue morphologique visuel et automatique

Un échantillon de référence de 4458 galaxies proches avec imagerie *ugriz* extraites du relevé « *Sloan Digital Sky Survey* » (SDSS) a été constitué dans le cadre du projet EFIGI « Extraction de Formes Idéalisées de Galaxies en Imagerie » et d'une thèse de doctorat (Baillard 2008). La morphologie visuelle détaillée des 4458 galaxies a été établie au moyen de 16 attributs morphologiques (selon 5 niveaux d'intensité et un intervalle de confiance) ; ces attributs décrivent les différentes composantes des galaxies, leur structure dynamique, leur texture, leur apparence sur le ciel, et leur environnement (Baillard et al. 2011). L'objectif est de relier la forme d'une galaxie aux phénomènes physiques sous-jacents, en caractérisant les composantes stellaires, gazeuses, et poussiéreuses ainsi que les structures dynamiques, et de prendre en compte l'impact de l'environnement immédiat et les biais d'observation sur la forme apparente d'une galaxie. Ce catalogue (<http://www.efigi.org>) permet pour la première fois d'effectuer une description détaillée et quantitative de la séquence visuelle de Hubble (de Lapparent et al. 2011) : celle-ci est liée à la diminution du rapport de luminosité bulbe-sur-total avec cependant une dispersion de cinq types, ainsi qu'à la décroissance progressive de l'enroulement des bras, comme le confirme un apprentissage supervisé du type de Hubble à partir des attributs (Baillard 2008).

Un ajustement des galaxies EFIGI par des profils de bulbe et disque convolés par la réponse impulsionnelle au moyen du logiciel SExtractor (voir Sect. 3.2.4.2) a mis en évidence des biais dans la chaîne de traitement du relevé SDSS : des écarts systématiques pouvant atteindre 2 magnitudes, à cause d'une mesure peu étendue du fond de ciel ; un morcellement et donc une sous-estimation du flux pour les galaxies spirales tardives et les irrégulières ; une contamination par les halos d'étoiles brillantes, affectant un nombre important d'objets lointains, et introduisant de nombreuses sources fantômes. Les nouveaux ajustements de profils effectués avec SExtractor montrent une transition progressive en couleur le long de la séquence morphologique, sans dichotomie entre les galaxies rouges et bleues. En revanche, la séparation des bulbes et des disques indique que les premiers sont systématiquement rouges, alors que les seconds décrivent tout l'intervalle de couleur jusqu'aux valeurs bleues des irrégulières (de Lapparent et Bertin 2012, en préparation, voir Figure 3.8) ; ceci contredit les résultats existants, probablement affectés par des biais dans les ajustements de profil (Peletier et Balcells 1996, Cameron et al. 2009).



**Figure 3.8.** Modélisation par SExtractor de la galaxie centrale PGC0035618 et de ses voisines par la somme d'un bulbe avec profil de Vaucouleurs et disque exponentiel. De gauche à droite : l'image SDSS de l'objet dans le catalogue EFIGI, les bulbes ajoutés aux disques, les bulbes seuls, les disques seuls, les résidus.

Par ailleurs, une galaxie naine compacte d'un nouveau type, intermédiaire entre les compactes elliptiques et les naines ultra-compactes, a été découverte (Chilingarian et Mamon 2008). Proche de la géante elliptique M59 de l'amas de la Vierge, cette naine a un âge et une métallicité suggérant qu'elle provient d'une naine elliptique (beaucoup plus massive) dont 90% des étoiles auraient été balayées par les marées de M59.

### 3.2.4.2 Logiciels d'analyse d'images

Les développements poursuivis autour du logiciel libre de photométrie automatisée SExtractor ont été marqués par l'ouverture, en 2009, du site internet *AstrOmatic.net*, regroupant les activités de maintenance de dix logiciels proposés à la communauté. Les « paquetages » d'*AstrOmatic.net* ont été

---

déposés à l'Agence de Protection des Programmes (APP) en 2010, et font l'objet d'une action de valorisation par l'« *Excellence Cluster* » (Allemagne) et le « *Fermi Consortium Alliance* » (Etats-Unis) via le Service de Partenariat et Valorisation (SPV) du CNRS.

Pour pouvoir décrire de façon à la fois synthétique et précise le contenu d'une image astronomique (positions, intensités, et formes des astres), il faut disposer de bons modèles des sources, du bruit et de la réponse impulsienne. Le logiciel PSFEx, rendu officiellement public en 2010, permet désormais une modélisation automatisée de la réponse impulsienne et de ses variations spatiales (Bertin 2011). Après avoir été utilisé principalement pour l'évaluation automatique de la qualité des observations au sein des chaînes d'analyse d'images astronomiques (notamment TERAPIX et Astro-WISE), et pour les mesures astrométriques et photométriques de champs stellaires (Bouvier et al. 2008, Delorme et al. 2008, 2010, Bertin 2010), PSFEx fait maintenant partie intégrante des procédures de morphométrie automatisée mises en œuvre pour analyser les grandes images du relevé « Canada-France-Legacy Legacy » (CFHTLS) par les chercheurs du groupe, en permettant la modélisation des sources étendues par des profils convolés à double composante de bulbe et de disque (dans SExtractor, Bertin 2011). PSFEx intègre également un module expérimental permettant d'homogénéiser les réponses impulsiennes entre images, un développement effectué en collaboration avec le groupe du « *Dark Energy Survey* » (Mohr et al. 2008, Darnell et al. 2009), et employé pour la première fois dans le relevé « *Blanco Cosmology Survey* » (par exemple High et al. 2010, Zenteno et al. 2011).

### **3.3 Distribution de la matière dans les galaxies, groupes et amas**

Les chercheurs du groupe s'attachent à observer et caractériser la distribution de la matière à grande échelle, depuis les galaxies individuelles jusqu'aux structures liées et parfois relaxées que sont les groupes et amas de galaxies. Ces derniers sont les lieux principaux de la transformation des galaxies. Par l'intermédiaire de modélisations numériques et analytiques, les observations permettent de préciser les liens entre la matière baryonique dans et autour des galaxies avec les halos de matière noire sous-jacents.

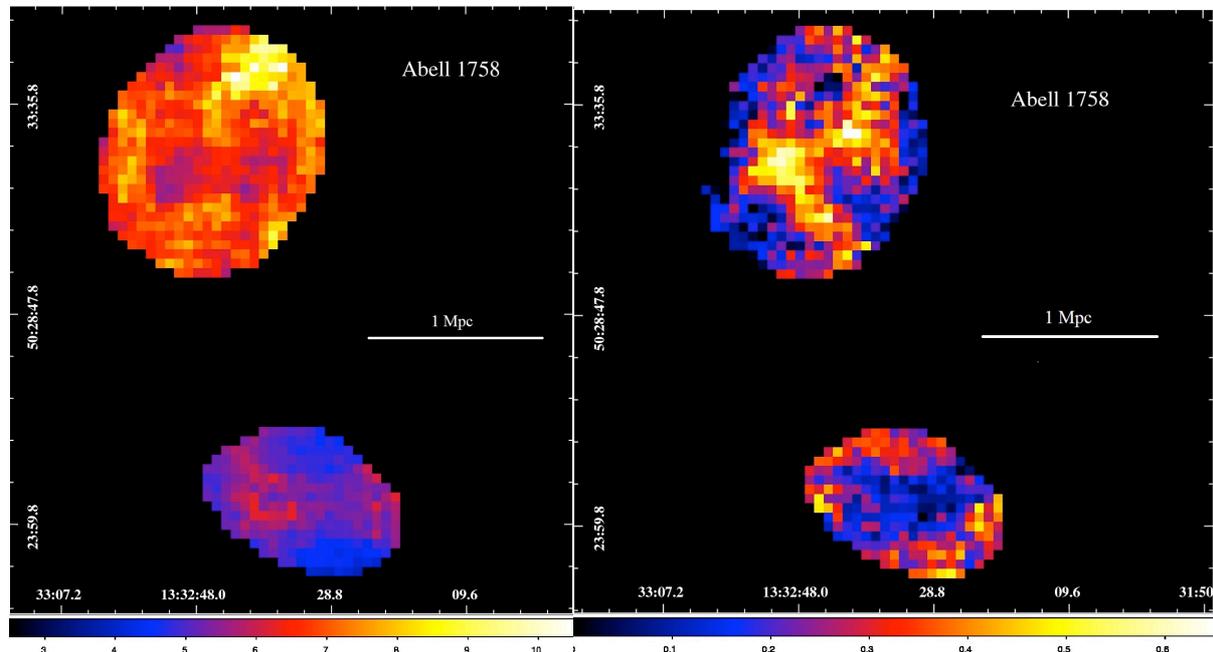
#### **3.3.1 Structure des groupes et amas de galaxies**

Deux travaux ont fait avancer le débat sur la nature des groupes compacts de galaxies (GC) : la mesure des distances indépendantes des décalages spectraux a permis de montrer que le GC le plus proche (situé dans l'amas de la Vierge) est causé par l'alignement fortuit de deux paires de galaxies séparées d'au moins 600 kpc le long de la ligne de visée (Mamon 2008). D'autre part, une analyse de trois catalogues virtuels de galaxies provenant de trois modèles semi-analytiques différents, appliqués à la simulation cosmologique de matière noire « Millennium », montre que 2/3 à 3/4 des GC virtuels, sélectionnés par la méthode habituelle, sont physiquement denses en 3D, le reste provenant d'alignements fortuits de galaxies dans des groupes virialisés (Díaz-Giménez et Mamon 2010).

Un membre du groupe a participé à une large collaboration sur l'amas de Coma (Adami et al. 2007a, b, d, 2008a, b, 2009a, b, c). Ces analyses suggèrent que la formation des amas est encore en cours, ceux-ci présentant des traces de fusions récentes ou actuelles (Durret et Lima Neto 2008). Par ailleurs, l'étude de paires d'amas (Durret et al. 2010, 2011a) a montré que les fusions d'amas rendent hétérogènes les cartes de température et la métallicité du gaz émetteur X (voir Figure 3.9), et déforment la fonction de luminosité des galaxies. Les fusions d'amas peuvent aussi accentuer le taux de formation d'étoiles dans certains filaments de galaxies, tel celui constitué de groupes en chute vers Abell 85 (Boué et al. 2008b), ou celui situé entre les deux amas Abell 1763 et 1770 (Biviano et al. 2011).

L'analyse et la modélisation des divers phénomènes physiques en jeu dans les amas montrent l'importance des phénomènes non thermiques dans ces structures (Prokhorov 2008, Prokhorov et al. 2009, Prokhorov 2010). On note l'importance de la prise en compte de la force de frottement visqueux s'exerçant sur le gaz d'un amas qui en traverse un autre (Prokhorov et Durret 2007). L'analyse de la

métallicité du gaz permet de déduire une distribution non maxwellienne des électrons (Prokhorov 2009, voir aussi Durret et al. 2008, pour une contribution à un livre consacré aux phénomènes non thermiques dans les amas). De surcroît, l'analyse de superamas a montré que les structures filamentaires étaient plus riches, plus étendues et plus lumineuses que les « crêpes » (Costa-Duarte et al. 2011).



**Figure 3.9.** Cartes de température (à gauche) et de métallicité (à droite) du gaz X dans la paire d'amas Abell 1758 Nord et Sud obtenue avec les instruments EPIC/MOS1, MOS2 et pn du satellite XMM-Newton.

### 3.3.2 Modélisation des profils de masse des galaxies et amas

La mesure par cinématique interne des profils radiaux de densité de matière noire dans les galaxies elliptiques, les groupes et les amas de galaxies souffre d'une dégénérescence entre les profils radiaux de masse totale et d'anisotropie des vitesses (liée aux formes des orbites). Celle-ci a été partiellement levée par l'inversion de masse des structures d'anisotropie connue (Mamon et Boué 2010, *Wolf et al. 2010*). D'autre part, la formulation simple des fonctions de distribution 6D des halos de matière noire des simulations cosmologiques  $\Lambda$ CDM, en termes d'énergie et de moment cinétique (Wojtak et al. 2008) permet l'estimation des profils de masse et d'anisotropie à partir des observations (Wojtak et al. 2009).

### 3.3.3 Influence de l'environnement et accumulation de la masse dans les galaxies

Le rôle de l'environnement dans l'histoire des galaxies a été exploré sous divers aspects. Carlberg et al. (2009) ont étendu la mesure de la fonction de corrélation angulaire aux faibles masses de galaxies dans le CFHTLS. Hwang et al. (2011) ont établi un lien entre fusion de galaxies et formation d'étoiles vues dans l'infrarouge par *Herschel*. Dans la simulation numérique cosmologique « *Mare Nostrum* » exploitée à l'IAP (voir chapitre 5, Gay et al. 2010) ont montré que la couleur des galaxies est mieux corrélée à la distance des galaxies au centre des halos qu'à la distance aux filaments. Enfin, Devriendt et al. (2010) ont proposé une modélisation de la fonction de luminosité dans l'ultraviolet observée à grand décalage spectral par une formation hiérarchique des galaxies dans un univers  $\Lambda$ CDM.

Cattaneo et al. (2011) ont par ailleurs développé une approche innovante, où la masse formée en étoiles après accrétion de gaz est une fonction du temps et de la masse du halo, que l'on peut modéliser par une seule équation ; les fusions sont contrôlées par une simulation cosmologique sans gaz à très haute résolution. Ce modèle suggère que la croissance en masse des galaxies dépend de la

---

masse finale en étoiles, et s'opère par fusions majeures sans gaz pour les galaxies avec  $M_{\text{étoiles}} > 10^{11} M_{\text{soleil}}$ , et par accréation de gaz en dessous (croissance sans fusion pour les naines elliptiques) ; en outre, les galaxies perdent environ 40% de leurs étoiles par effets de marée dans les groupes ou amas hôtes, comme trouvé indépendamment par Klimentowski et al. (2009) en simulant des paires de galaxies.

En effet, les propriétés des galaxies semblent dépendre non seulement de leur masse en étoiles, mais aussi de leur environnement, en particulier de la distance projetée de la galaxie au groupe/amas le plus proche. Il se trouve que cette *ségrégation* des propriétés est modulée par la vitesse de la galaxie par rapport à son hôte le long de la ligne de visée, ce qui permet de dé-projeter la fraction de galaxies à sursauts récents de formation stellaire (Mahajan et al. 2011).

### 3.4 Prospective

Dans l'avenir, les chercheurs du groupe « Origine et évolution des galaxies » continueront à utiliser les données provenant des observations au sol par les grands relevés dans le visible (SDSS, 6dFGS, CFHTLS), et dans l'infrarouge proche (WIRDS, UKIDSS), et poursuivront les suivis complémentaires depuis l'espace ou le sol avec XMM-Newton et Chandra dans les rayons X, les instruments COS et WFC3 du Télescope Spatial de Hubble dans l'ultraviolet et le visible, ainsi que l'IRAM et le GMRT (Inde) dans le domaine radio. Ils se préparent également à l'utilisation des prochains relevés systématiques qui seront obtenus dans l'optique et l'infrarouge proche avec le VST et VISTA (télescopes auxiliaires du VLT de l'ESO), ainsi que le relevé Pan-STARRS, et le « Dark Energy Survey », qui apporteront un gain en sensibilité, en résolution angulaire ou temporelle. Par leur expérience en matière d'observations et d'analyse des données, de modélisations et de simulations numériques, les chercheurs du groupe seront à même d'exploiter ces grandes quantités de données très diverses. Ils pourront également identifier et caractériser les sources détectées par l'analyse de sous-échantillons critiques avec ALMA et LOFAR dans le domaine submillimétrique et le radio, et des suivis spectroscopiques depuis l'espace : avec Hubble/COS puis WSO-UV dans l'ultraviolet, et ultérieurement l'instrument NIRSpec sur le Télescope Spatial James Webb (JWST) dans l'optique et l'infrarouge proche.

Sans conteste, les retombées principales du satellite Gaia seront l'étude détaillée de la structure et de l'évolution de notre Galaxie, qui pourra servir à étalonner les modèles de formation des disques. Il n'existe pas, aujourd'hui, de scénario décrivant les multiples propriétés (chimiques, photométriques, cinématiques) de la Voie Lactée dans un cadre cosmologique ; les simulations numériques n'ont pas encore la résolution spatiale nécessaire et les divers ingrédients physiques (taux de formation stellaire, rétroaction de l'énergie stellaire sur le gaz, etc.) ne sont pas suffisamment maîtrisés. Le développement d'un nouveau modèle devient impératif en vue de la multitude de données astrométriques que fournira Gaia. Un modèle évolutif de la structure de la Voie Lactée, partant de conditions initiales cosmologiques, est en cours de développement en collaboration avec des collègues du Laboratoire d'Astrophysique de Marseille. Parallèlement à ces efforts, une nouvelle génération des modèles semi-analytiques est en cours de développement dans ce groupe à l'IAP, incluant notamment la migration des étoiles dans le disque sous l'action des bras spiraux et de la barre galactique, un effet largement négligé jusqu'ici.

Une facette sans précédent de certains des grands relevés réside dans la grande quantité d'objets variables extragalactiques détectés (progéniteurs massifs variables, supernovae et noyaux actifs), et qui pourront être analysés en détail par les observations multi-longueur d'onde et spectroscopiques. A cet égard, on estime que 6000 supernovae seront observées en cinq ans par le satellite Gaia, dont un tiers avant leur maximum. Ces données fourniront un échantillon inégalé pour comprendre la physique de ces explosions, grâce à sa complétude et son homogénéité sur tout le ciel. On pourra alors affiner la classification des supernovae, entre autres pour les types particuliers peu représentés jusqu'ici, et améliorer la compréhension des mécanismes d'explosion et l'influence du milieu circumstellaire. Les relevés effectués avec Gaia serviront plus généralement de déclencheur pour entreprendre un suivi systématique du « ciel variable » dans l'optique. Un consortium de petits télescopes situés dans les deux hémisphères et qui pourront effectuer la spectroscopie optique des sources variables détectées se

---

met en place. Quant au suivi spectroscopique dans l'ultraviolet, il faudra compter sur le satellite WSO-UV pour prendre la relève de COS sur le Télescope Spatial de *Hubble*. La détection et le suivi immédiat des sursauts gamma par la mission spatiale SVOM/ECLAIRS fournira également des informations importantes sur la fin de vie de certaines étoiles massives, et jusqu'à des temps de regard en arrière remontant potentiellement aux premières générations d'étoiles.

Les données du satellite *Gaia* auront, en outre, de multiples applications cosmologiques. Avec les six coordonnées de l'espace des phases pour un très grand échantillon d'étoiles, *Gaia* devrait permettre de cartographier la masse totale et de déduire, par soustraction des composantes visibles, la distribution (encore mal connue) de la matière noire, ce qui pourra conduire à la mesure de l'aplatissement du halo de matière noire et à la détection de grumeaux sombres de matière noire de moins de  $10^8$  masses solaires. En outre, des observations résolues seront obtenues pour des systèmes binaires de trous noirs supermassifs, dont les caractéristiques (taille et positions des trous noirs) pourront être mesurées et confrontées aux modèles de jets radio basés sur les systèmes binaires. On pourra également raccorder le système local de coordonnées de référence avec les radiosources lointaines. Il est à noter que les bibliothèques de spectres synthétiques de galaxies pour *Gaia* seront étendues à plus grand décalage spectral et à plus haute résolution spectrale, en tenant compte d'éventuelles nouvelles sources, de l'émission nébulaire et des effets de la cosmologie et de l'évolution.

En parallèle, l'étude des liens entre la physique des galaxies dans l'Univers local et de celles de l'Univers lointain pourra être approfondie. De nouvelles observations de galaxies proches avec les instruments ACS et COS du Télescope Spatial *Hubble*, appuyées par des données au sol et de radio astronomie vont contribuer à la constitution d'une référence "locale" pour l'étude des galaxies lointaines. De nouvelles modélisations incluant l'hydrodynamique permettront une avancée décisive en matière d'interprétation. Des observations de galaxies à « sursauts de formation d'étoiles » par spectroscopie à intégrale de champ sont également prévues afin d'étudier l'impact des étoiles massives et des Wolf Rayet sur l'évolution du milieu interstellaire. L'évolution de la composition du milieu interstellaire sera de surcroît explorée de manière plus précise grâce à la grande sensibilité du spectrographe COS, avec l'objectif de déduire les abondances d'éléments non saturés dans le gaz neutre. Enfin, une vaste étude de caractérisation des galaxies hôtes de supernovae pour un échantillon statistique avec imagerie SDSS et morphologie est en cours, par une collaboration avec des chercheurs de l'Observatoire Astrophysique de Buyraikan (Arménie).

La prochaine mise à disposition des données des programmes de temps garanti et des programme-clés obtenus avec le satellite *Herschel* dans l'infrarouge moyen et lointain (instruments PACS et SPIRE), ainsi que les données des relevés complets du ciel par le satellite *Planck* dans le domaine millimétrique (instruments LFI et HFI) permettront aux chercheurs du groupe de poursuivre l'analyse des propriétés du gaz et la poussière dans les galaxies, afin de mieux comprendre les processus de formation d'étoiles et le lien avec les noyaux actifs, et d'examiner les conséquences sur les comptages de galaxies ultra-profonds et les fonds diffus extragalactiques. Ultérieurement, le relevé complet du ciel qui sera obtenu dans l'infrarouge moyen et lointain avec le satellite SPICA apportera un complément essentiel à ces recherches, grâce à une grande sensibilité photométrique et à une meilleure résolution angulaire.

La qualité des données recueillies par les satellites *Spitzer* et *Herschel* montre par ailleurs le besoin d'améliorer les modèles de synthèse spectrale et d'évolution des galaxies selon les axes suivants : le transfert radiatif doit être calculé de manière cohérente dans les régions de formation d'étoiles, notamment pour déterminer de manière fiable la fraction de photons *Lyman*  $\alpha$  et ionisants qui s'échappent ou sont absorbés par le gaz ou la poussière ; la prise en compte de l'impact des étoiles jeunes sur leur environnement (les régions HII et de photodissociation, le nuage moléculaire où elles sont nées) doit être également améliorée ; les processus de formation, de destruction et d'évolution de la poussière dans les enveloppes circumstellaires, autour des supernovae et dans le milieu interstellaire, requièrent une prise en considération moins phénoménologique ; enfin, la bonne résolution spatiale désormais accessible dans l'infrarouge (en complément de l'optique), et prochainement dans l'ultraviolet, met l'accent sur la nécessité de modéliser séparément les différentes

---

composantes d'une galaxie (bulbe, disque, bandes de poussière, etc.) au sein des scénarios.

Les données nécessaires à l'élaboration de ces derniers modèles seront obtenues dans le cadre d'une analyse morphométrique comparée des galaxies proches du relevé SDSS, et des galaxies lointaines des relevés du « Legacy Survey » du TCFH (CFHTLS). L'objectif est d'interpréter la séquence de Hubble en termes d'histoire des bulbes et des disques : par la mesure fiable des flux et des tailles de ces composantes, et par l'ajustement des scénarios d'évolution spectrophotométrique aux divers types de galaxies et à leurs composantes, on pourra poser des contraintes sur l'histoire de la formation d'étoiles et sur la part des fusions majeures le long de la séquence. Le rôle des barres, des anneaux, de la flocculence, et du contenu en poussière des disques pourra également être pris en compte. Une meilleure compréhension de la transformation des différents types de galaxies pourra se faire en explorant leurs regroupements respectifs au sein des halos de matière noire. A cet effet, un algorithme bayésien de regroupement optimal des galaxies calibré sur les simulations cosmologiques est en préparation, et devrait permettre de mieux discerner les effets de l'environnement sur les propriétés morphologiques, les couleurs, et la formation d'étoiles dans les galaxies. En outre, une technique réaliste pour l'analyse de la physique de l'environnement basée sur des simulations dynamiques et hydrodynamiques pourra être incorporée dans les modèles semi-analytiques de formation des galaxies.

Une étape importante dans la modélisation de l'évolution spectrophotométrique des galaxies sera l'utilisation des simulations numériques décrivant des volumes cosmologiques, afin d'étalonner les scénarios évolutifs par type de galaxie. On pourra également y explorer la synthèse spectrale des noyaux actifs de galaxies et leur lien avec les galaxies primordiales à grand décalage vers le rouge, et en déduire l'impact de ces objets dans le domaine submillimétrique et millimétrique qui sera observé avec ALMA, et à plus grande échéance dans le domaine radio avec le « Square Kilometer Array ». La confrontation des simulations numériques avec les observations permettront également d'étudier l'influence de la rétroaction et de l'environnement dans le déclenchement et la suppression de la formation d'étoiles. Ces améliorations dans la modélisation de l'évolution spectrophotométrique des galaxies seront cruciales pour interpréter les nombreuses galaxies à raies d'émission pour lesquelles la spectroscopie sera obtenue par satellite *Euclid*, et à partir desquelles on pourra étudier l'évolution du taux de formation d'étoiles dans les galaxies, et de l'état d'ionisation des noyaux actifs. La connaissance du milieu interstellaire des galaxies proches jouera un rôle important pour définir les modes de recherche des galaxies lointaines et des noyaux actifs à partir des observations fournies par *Euclid*. Par leur programmes en cours, les chercheurs du groupe « Origine et évolution des galaxies » détiendront les outils pour modéliser à la fois les profils angulaires et les distributions en énergie spectrale des millions de galaxies détectées par imagerie et spectroscopie avec *Euclid*, et quantifier les effets de sélection de la spectroscopie sans fente dans l'infrarouge proche. L'utilisation des profils des objets pour améliorer les mesures de décalages vers le rouge photométriques, en cours d'étude au sein des programmes actuels de morphométrie, pourra constituer un apport significatif pour les mesures cosmologiques visées avec *Euclid*.

Afin d'explorer les processus en jeu dans la formation et l'évolution des groupes de galaxies ainsi que les différences avec ceux, mieux connus, s'exerçant dans les amas de galaxies, il s'agit maintenant de faire la part des différentes composantes de matière baryonique dans les groupes : la matière stellaire sous forme galactique et diffuse, ainsi que le gaz chaud. Dans ce cadre, l'analyse d'un grand échantillon de groupes de galaxies basé sur les relevés SDSS et XMM-*Newton*, complétés par des observations avec MEGACAM au TCFH, vient d'être entreprise. En parallèle, les propriétés de l'échantillon de 91 amas lointains et massifs du projet DAFT/FADA (Guenou et al. 2010, 2011) sont analysées en vue de mieux contraindre la physique des amas à grand décalage vers le rouge, et de déduire des contraintes cosmologiques par la technique de tomographie par effet de lentille gravitationnelle faible. En outre, les milliers de candidats amas détectés dans les images des relevés du « Legacy Survey » du TCFH constituent un échantillon sans précédent d'amas lointains dont on pourra étudier la dynamique grâce au relevé spectroscopique VIPERS (« Large Program » de l'ESO, couvrant l'intervalle  $z \sim 0.5-1.2$ ), ainsi que les effets d'environnement en lien avec l'analyse morphométrique. L'évolution de la densité spatiale de ces amas pourra également poser des contraintes sur les paramètres cosmologiques, moyennant l'évaluation des effets de sélection par

---

comparaison avec des simulations numériques couvrant de larges volumes. Par la suite, la dynamique d'un nombre considérable de groupes et amas, via leurs galaxies à raies d'émission, qui pourra être mesurée grâce aux observations spectroscopiques avec *Euclid* (jusqu'à  $z \sim 2$ ), permettra l'étude des effets d'environnement en lien avec les propriétés des halos de matière noire : leur masse, leur stade d'effondrement, et leur localisation au sein de la toile cosmique.

A un horizon plus lointain, la spectroscopie de plusieurs milliers d'objets dans des champs de l'ordre du degré-carré a été reconnue comme l'une des priorités de ce domaine. Plusieurs projets instrumentaux sont à l'étude pour satisfaire ce besoin ; par exemple l'installation d'un télescope grand champ de la classe des 8-10 mètres est envisagée pour remplacer le télescope du CFH. Ainsi, l'acquisition des grands échantillons de galaxies de différents types et masses aux décalages vers le rouge entre 1 et 2 deviendra possible, ce qui représentera une étape indispensable vers un bon ajustement des modèles spectraux et des simulations numériques. En outre, les prochaines générations de télescope au sol (« European-Extremely Large Telescope », E-ELT) et dans l'espace (Télescope Spatial *James Webb*) permettront de sonder l'Univers très lointain ( $z \sim 10$ ), et à haute résolution angulaire et spectrale. Ces instruments permettront d'accéder aux diverses mesures nécessaires pour comprendre à quel moment sont apparues les premières étoiles et comment se sont formées les premières galaxies : le taux de formation d'étoiles par type, la fonction de masse initiale, l'enrichissement en métaux, les propriétés des galaxies hôtes de supernovae, les propriétés des supernovae dans les galaxies primordiales, les propriétés des galaxies hôtes des sursauts gamma. Ces programmes tireront bénéfice d'observations de spectroscopie intégrale de champ dans l'optique et l'infrarouge, qui sera accessible pour des échantillons statistiques avec la deuxième génération d'instruments du VLT de l'ESO (MUSE et KMOS), et permettra d'ajouter des contraintes cinématiques et dynamiques sur l'évolution des galaxies lointaines, et d'explorer l'environnement résolu des radiogalaxies et des quasars, ainsi que des galaxies hôtes de supernovae et de sursauts gamma.

---

## 4 Cosmologie et Astrophysique des hautes énergies

Le groupe de recherche « Cosmologie et Astrophysique des hautes énergies » est composée de :  
3 chercheurs CNRS : Robert Mochkovitch, Pasquier Noterdaeme (recrutement en 2010), Marta Volonteri (recrutement en 2011)  
4 chercheurs CNRS émérites : Jean Audouze, Jacqueline Bergeron, Jean-Pierre Lasota, Alain Omont  
1 ingénieur de recherche CNRS : Elisabeth Vangioni  
3 enseignants-chercheurs de l'UPMC : Patrick Boissé, Frédéric Daigne, Emmanuel Rollinde  
1 professeur (UMPC/ERC) : Joe Silk  
1 astronome : Patrick Petitjean

Pour la période 2007-2011 :

9 post-doctorants : Daniel Albornoz Vasquez, Alexander Belikov, Željka Bošnjak, Hum Chand, Andrew Fox, Maria Polletta, Lucas Z. Uhm, Ramia Sethuram, Gilles Vertongen  
14 doctorants : Ali Reza Aghae, Sara Caucci, Andrej Dobrotka (cotutelle), Nicolas Fiolet, Franck Genet, Rodney Guimaraes (cotutelle), Katarzyna Kruk (cotutelle), Pasquier Noterdaeme, Yu Pei, Hannachi Zitouni (cotutelle), Romain Hascoët, Jérôme Labasque, Isabelle Pâris, Susanna Vergani (cotutelle)  
7 thèses ont été soutenues : Ali Reza Aghae, Sara Caucci, Franck Genet, Hannachi Zitouni, Nicolas Fiolet, Pasquier Noterdaeme, Isabelle Pâris  
2 habilitations à diriger les recherches ont été soutenues : Frédéric Daigne et Emmanuel Rollinde

Nombre de chercheurs avec HDR ou équivalents : 11

Nombre de publications de rang I : 242

Nombre de publications de rang II : 77

---

Les travaux du groupe « Cosmologie et astrophysique des Hautes énergies » (COSMOH) sont centrés sur l'étude des sites astrophysiques de rayonnement à haute énergie, de l'Univers primordial aux sursauts  $\gamma$  et quasars, et sur l'utilisation de ces sources comme traceurs de l'histoire cosmique.

Le programme théorique du groupe comporte deux axes principaux :

–*modélisation des sources astrophysiques de rayonnement à haute énergie.* Ces objets sont généralement associés à une source compacte accrétante capable d'expulser de la matière, parfois à des vitesses relativistes. Nous travaillons sur la compréhension de la physique commune à ces sources (processus d'éjection, mécanismes d'émission dans le flot d'accrétion et dans les éjectas relativistes) et sur la modélisation détaillée de certains types de sources. Il s'agit en particulier des sursauts  $\gamma$ , qui bénéficient d'un contexte observationnel très favorable (lancement de *Swift* en 2004, de *Fermi* en 2008), et pour lesquels nous développons une approche originale qui modélise de manière cohérente les différentes phases d'émission (sursaut et rémanence) à toutes les longueurs d'onde.

–*nucléosynthèse primordiale et histoire cosmique des baryons, des premières étoiles à l'époque actuelle.* Mis à part le problème du lithium primordial qui est traité spécifiquement, la nucléosynthèse primordiale (BBN) est maintenant suffisamment maîtrisée pour contraindre les différents modèles de cosmologie primordiale impliquant de la nouvelle physique ; dans ce cadre la variation des constantes fondamentales est étudiée dans différents contextes astrophysiques. La BBN donne par ailleurs la composition chimique initiale pour l'élaboration d'un modèle cohérent d'évolution cosmique de la fin des âges sombres à aujourd'hui. Dans le cadre du scénario de formation hiérarchique des structures, l'accent est mis sur la problématique des premières étoiles et de la réionisation, et sur l'évolution chimique en fonction du *redshift* dans le milieu interstellaire des structures et le milieu intergalactique. Dans ce contexte cosmologique, l'évolution de la nucléosynthèse non thermique via le rayonnement cosmique est aussi analysée à travers l'étude de l'abondance des éléments légers Li, Be et B.

En parallèle, le groupe poursuit un ambitieux programme observationnel, selon deux axes principaux :

–*recherche et étude de sources à grand redshift.* Plusieurs grands relevés de l'optique au submillimétrique permettent de détecter des objets supermassifs distants, galaxies et quasars. Une étude multi-longueurs d'onde des sources individuelles permet de préciser leurs caractéristiques (taux de formation d'étoiles et propriétés du gaz interstellaire moléculaire par exemple) et donc d'apporter des contraintes observationnelles aux scénarios d'évolution globale de l'Univers. Les sursauts  $\gamma$  quant à eux nécessitent des moyens d'observation spécifiques en raison de leur caractère fugitif. Le groupe participe dans cette perspective au projet SVOM décrit au chapitre 7.3.5.

–*analyse spectrale de sources distantes pour sonder les milieux interstellaire et intergalactique.* Le spectre des quasars et des rémanences de sursauts  $\gamma$  présente des raies d'absorption dues au milieu interstellaire de la galaxie hôte ou des structures présentes sur la ligne de visée, et même au milieu intergalactique. L'analyse de ces raies permet de caractériser les propriétés physiques du gaz absorbant (composition chimique, température) et la répartition spatiale de la matière sur la direction radiale. Avec des lignes de visée proches (paires de quasars) cette information spatiale est également reconstituée dans la direction transverse. Ceci permet de comprendre l'évolution du milieu intergalactique, l'environnement des galaxies et leur milieu interstellaire. Le milieu interstellaire local peut être étudié de manière similaire avec des lignes de visée stellaires. La spectroscopie se révèle ainsi un outil puissant capable de sonder à la fois les régions très peu denses (milieu intergalactique), les structures en formation (systèmes lorentziens) et le milieu interstellaire de structures évoluées, ceci dans une vision évolutive, en observant à différents *redshifts*. La précision atteinte, en particulier avec UVES au VLT, permet même de tester la variation des constantes physiques entre un Univers plus jeune ( $z \sim 2$ ) et aujourd'hui, et ainsi de contraindre la physique fondamentale.

Les correspondances entre ces axes de recherche théoriques et observationnels sont nombreuses : on peut noter en particulier la place centrale des sursauts  $\gamma$  et des quasars dans nos activités qui visent à la fois à (i) détecter et observer ces objets, caractériser les populations existantes ; (ii) caractériser leurs propriétés et comprendre les mécanismes physiques mis en jeu ; (iii) tirer partie de leur luminosité exceptionnelle pour les détecter jusqu'à de grands *redshifts* ; (iv) utiliser l'analyse spectroscopique pour déterminer les propriétés physiques à différentes époques dans différents sites (milieu interstellaire et environnement proche des galaxies, structures en formation, milieu intergalactique), et

---

mettre à profit ces observations pour construire un scénario cohérent de l'évolution cosmique globale de la matière baryonique. On remarque aussi le rôle important et fédérateur des étoiles massives, qui sont le moteur de l'évolution chimique de l'Univers ; outre leur nucléosynthèse, elles participent, via les explosions de supernovae, à la production de vents galactiques et à l'accélération des rayons cosmiques (eux-mêmes à l'origine de la nucléosynthèse spallative). De plus, certaines d'entre elles sont identifiées aux astres parents des sursauts  $\gamma$ . Parmi ces étoiles, celles de première génération (étoiles de population III) ont une place centrale pour l'évolution de l'Univers jeune, comme source de flux ionisant et d'enrichissement chimique précoce. Les sursauts  $\gamma$  pourraient être l'un des rares moyens directs d'accéder à cette population.

Le groupe participe directement à deux projets qui font à nouveau apparaître le lien entre astrophysique des hautes énergies et cosmologie : (i) le projet SDSS-III/BOSS (chapitre 7.2.6) qui cartographie la distribution des quasars et des galaxies pour étudier l'échelle spatiale caractéristique introduite par les oscillations acoustiques des baryons dans l'Univers précoce. Cette mesure contraint la nature de l'énergie noire, un enjeu majeur de la cosmologie depuis que l'accélération de l'expansion a été découverte et confirmée ; (ii) le projet SVOM (chapitre 7.3.5) pour l'observation des sursauts  $\gamma$  et de leurs rémanences en vue de la compréhension physique de ces phénomènes et de leur utilisation pour la cosmologie.

Par ailleurs, des membres du groupe COSMOH ont initié ou ont participé à 3 projets acceptés et financés par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) : l'ANR « jeunes chercheurs » JETS\_GAMMA sur l'étude de l'émission à haute énergie des jets relativistes (janvier 2006 - septembre 2009), l'ANR « blanche » BOSS sur l'étude des oscillations acoustiques des baryons (janvier 2009 - décembre 2012) et l'ANR VACOUL sur l'étude de la variation des constantes fondamentales (septembre 2011- décembre 2015). Ces ANR rassemblent des chercheurs et enseignants chercheurs de l'IAP et d'autres laboratoires français de l'INSU ou de l'IN2P3 (IPAG, LRR et LPTA pour JET\_GAMMA ; APC et IRFU pour BOSS, CSNSM pour VACOUL).

Marta Volonteri, spécialiste de l'évolution des trous noirs supermassifs, vient d'être recrutée au CNRS. Joe Silk qui était jusqu'alors chercheur associé à notre groupe, a été récemment intégré (Mai 2011) en tant que Professeur. Il a obtenu une ERC (*European Research Council*) sur le sujet « *Dark matters* ». Ces nouvelles arrivées renforcent et élargissent grandement les champs d'activité du groupe.

Ces projets ANR/ERC, comme aussi la liste des collaborateurs et visiteurs du groupe, témoignent que les activités du groupe sont menées dans un cadre national et international très inter-disciplinaire (interaction avec la physique nucléaire, fondamentale, et des particules).

Les activités et principaux résultats du groupe en 2007-2011 sont détaillés ci-après. Une part importante de ces travaux est menée dans le cadre de stages de master et de thèses de doctorat.

Enfin, il convient de mentionner qu'en parallèle aux travaux de recherche décrits ici, le groupe COSMOH est très impliqué dans l'enseignement supérieur et la diffusion des connaissances à tous les niveaux, activités qui sont détaillées dans l'annexe (chaptitres B et C). En particulier, P. Boissé est directeur de la Faculté de Physique de l'UPMC (UFR 925) et a été jusqu'en 2011 membre du conseil de l'Ecole Doctorale d'Astrophysique d'Ile de France (ED127), E. Rollinde est responsable du parcours IPCM de l'UPMC (année de Licence 1 aménagée pour les bacheliers non scientifiques en cours de ré-orientation), F. Daigne est co-responsable (représentant de l'UPMC) de la spécialité de master 2 recherche "Astronomie, Astrophysique & Ingénierie Spatiale", co-habilitée par l'Observatoire de Paris, les universités Paris 6 (UPMC), 7 et 11 et l'ENS Ulm ; E. Vangioni est responsable de nombreuses activités menées à l'IAP en direction des plus jeunes, notamment : (i) le programme "Sciences à l'Ecole", (ii) les stages organisés tout au long de l'année pour les élèves du secondaire, (iii) les activités "junior" proposées à l'IAP pendant la semaine de la Fête de la Science.

---

## 4.1 Modélisation des sources de rayonnement à haute énergie

### 4.1.1 Sources compactes galactiques, trous noirs de masse intermédiaire ou supermassifs

#### 4.1.1.1 Trous noirs supermassifs dans les centres des galaxies : mécanisme d'éjection et évolution

Les rôles respectifs du mode d'accrétion et de la rotation intrinsèque du trou noir (*spin*) pour la formation de jets par les trous noirs accrétants reste une question centrale dans l'étude de ces sources. Nous l'avons abordée de manière originale dans le contexte des trous noirs supermassifs présents dans les noyaux actifs de galaxies (NAGs) (Sikora, Stawarz et Lasota 2007). Dans un plan intensité radio – luminosité totale en unité de la luminosité d'Eddington, nous montrons que toutes les sources suivent la même tendance mais selon deux séquences différentes en fonction de leur morphologie : à luminosité d'accrétion indentique, les NAGs des galaxies elliptiques géantes ont une intensité radio environ  $10^3$  plus élevée que ceux situés des galaxies à disque. Une explication naturelle réside dans l'influence du *spin* du trou noir, qui peut être beaucoup plus élevé dans les galaxies elliptiques en raison des fusions galactiques successives. Cette observation importante mettant en évidence le rôle du *spin* dans l'éjection favorise le mécanisme de Blandford-Znajek par lequel l'énergie de rotation du trou noir est injectée dans le jet via la présence de lignes de champ magnétique ancrées dans l'ergosphère. Elle a également des conséquences pour la recherche consacrée à l'évolution des trous noirs supermassifs. En particulier, nous avons étudié les scénarios de formation de galaxies qui pourraient conduire à un *spin* plus élevé pour les trous noirs au centre des galaxies elliptiques (Volonteri, Sikora et Lasota 2007). Nous montrons qu'une telle différence de *spin* est effectivement observée dans les scénarios dans lesquels les trous noirs supermassifs des galaxies elliptiques croissent par l'accrétion induite par des fusions successives, alors que dans les galaxies spirales un rôle plus important est donné à des épisodes d'accrétion brefs, peu intenses, mais nombreux (accrétion d'une étoile par exemple).

#### 4.1.1.2 Trous noirs de masse intermédiaire : la source X hyperlumineuse HLX-1

La source variable HLX-1 dans la galaxie spirale ESO 243-49 est très certainement un trou noir de masse intermédiaire ( $10^2$  à  $10^4 M_{\odot}$ ) car sa luminosité au pic atteint  $10^4$  fois la luminosité Eddington d'une masse solaire. Diverses déterminations de la masse du trou noir convergent vers une valeur entre  $10^3$  et  $10^4 M_{\odot}$ . La courbe de lumière d'HLX-1 est variable, avec une récurrence possible sur une échelle de 380 jours. Les éruptions ont une forme et un comportement spectral qui rappellent celles des sources transitoires X de faible masse qui contiennent des trous noirs de masse stellaire. Nous avons pourtant démontré que le même mécanisme d'éruption ne pouvait pas être à l'œuvre dans HLX-1 (Lasota et al. 2011). La seule alternative semble être le passage près du trou noir d'une étoile sur une orbite très excentrique. Seules des observations multi-longueurs d'onde pourront tester cette hypothèse. Nous disposons pour cela d'observations en cours au VLT et Gemini (co-PI : J.P. Lasota).

#### 4.1.1.3 Trous noirs astrophysiques : accrétion et détermination du *spin*

Les trous noirs astrophysiques (Lasota 2007), explorés principalement via le phénomène d'accrétion, ne sont décrits que par deux paramètres : la *masse*, mesurée par l'étude des mouvements dans leur voisinage ; le *spin*, déterminée via l'interprétation du spectre rayonné, ce qui nécessite des modèles de disques d'accrétion relativistes. Nous avons développé des modèles au-delà de l'approximation du *disque mince* qui perd sa validité pour une luminosité proche de celle d'Eddington, et avons illustré leur application à la mesure du *spin* (Sadowski et al. 2011a, b, Abramowicz et al. 2010).

---

#### 4.1.1.4 Evolution des binaires serrées contenant un trou noir

Nous avons proposé un modèle d'évolution des binaires X de faible masse contenant un trou noir qui repose sur deux hypothèses : l'absence de freinage magnétique de la rotation orbitale à longues périodes, et une efficacité élevée de l'éjection de l'enveloppe commune. Le succès de la confrontation aux observations justifie (et confirme en partie) ces hypothèses (Yungelson et Lasota, 2008), qui représentent désormais un défi pour les modèles d'évolution des systèmes serrés d'étoiles doubles.

#### 4.1.1.5 Accrétion : éruptions des novae naines et sursauts X des étoiles à neutrons

Le modèle d'instabilité du disque (MID) a été élaboré pour décrire les éruptions des novae naines. Nous avons développé le premier modèle spectral d'un cycle complet d'éruption (Idan et al. 2010), ce qui offre des diagnostics uniques sur le flot d'accrétion dans les binaires serrées. Le MID a depuis été proposé pour d'autres types de sources. Nous avons montré qu'il ne peut être évoqué pour expliquer la fonction de luminosité des quasars (Hameury, Viallet et Lasota, 2009) mais que son application aux disques d'hélium des étoiles de type AM CVn est justifiée et permet un test unique du modèle (Kotko, Lasota et Dubus 2010). Le MID rencontre finalement son problème le plus critique dans le contexte initial : la nova naine SS Cyg, très brillante, est particulièrement étudiée. La réévaluation récente de la distance de cette source, si elle était confirmée par GAIA, conduirait à augmenter sa luminosité au point de remettre en cause le modèle (Schreiber et Lasota 2007).

Les sursauts X sont des éruptions thermonucléaires à la surface d'étoiles à neutrons. Leur modélisation met en jeu des conditions physiques extrêmes et permet de contraindre certaines propriétés des étoiles à neutrons (rayon en particulier) qui sont importantes pour comprendre leur structure. L'un des aspects importants est le flot d'accrétion sur l'étoile à neutrons, qui fournit le combustible pour l'explosion thermonucléaire. Nous avons montré qu'une connexion inattendue était possible entre les sursauts X et le MID développé pour les éruptions des novae naines (Kuulkers, in't Znad et Lasota, 2009).

#### 4.1.2 Les sursauts $\gamma$ et leurs rémanences

La recherche menée par le groupe *sursauts  $\gamma$*  de COSMOH vise à élaborer une description cohérente de l'émission des sursauts et de leurs rémanences. Le scénario suivant est envisagé : une source compacte (trou noir stellaire) produit une éjection ultra relativiste. Au cours de son évolution, des ondes de choc se propagent dans l'éjecta en raison de sa variabilité initiale (*chocs internes*) ou de la décélération par le milieu extérieur (*choc en retour*). Ce freinage se traduit également par la formation d'un choc ultra relativiste dans l'environnement. Derrière tous ces chocs, l'énergie dissipée est susceptible d'être rayonnée de manière plus ou moins efficace et de contribuer à l'émission observée.

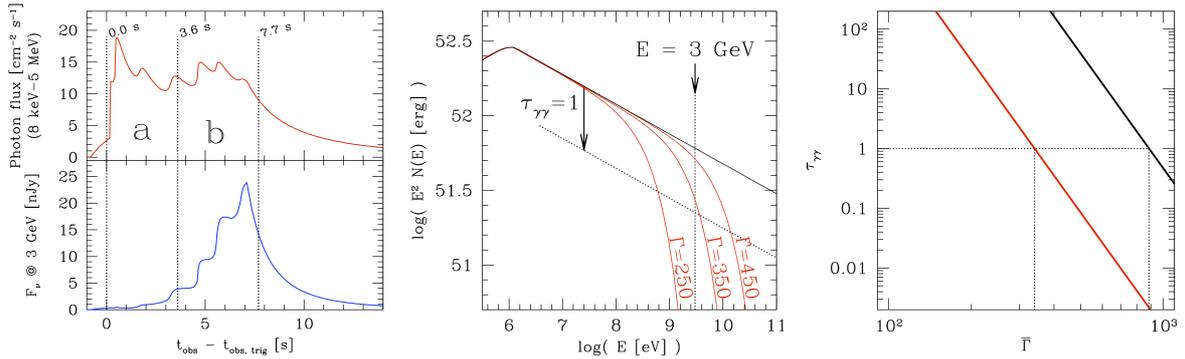
Les études du sursaut  $\gamma$  proprement dit ont bénéficié récemment de l'extension du domaine spectral (d'observation traditionnel, keV-MeV) d'une part vers l'optique par des télescopes robotisés, alertés par le satellite *Swift* (2004), et d'autre part vers le domaine  $\gamma$  de haute énergie (100 MeV-10 GeV) par le satellite *Fermi* (2008). Nous disposons depuis plusieurs années d'un modèle détaillé de la dynamique des chocs internes. Il a été complété, en particulier dans le cadre de l'ANR JETS\_GAMMA (2007-2009, responsable F. Daigne), par le couplage avec un calcul radiatif détaillé, en collaboration avec G. Dubus (IPAG, Grenoble). Ces outils placent notre groupe en bonne position pour interpréter les nouvelles observations disponibles. Des travaux en commun ont débuté avec des membres des collaborations *INTEGRAL* (D. Götz, CEA/IRFU/Sap) et *Fermi* (F. Piron, LPTA, Montpellier, S. Guiriec, MSFC, Huntsville, USA). Nous avons également rejoint en 2009 le GDRE *Exploring the dawn of the Universe with GRBs* qui associe des équipes de 11 instituts en France, Italie, Royaume-Uni, Allemagne et vise à encourager des collaborations pour le projet SVOM (voir chapitre 7.3.5).

#### 4.1.2.1 Les mécanismes de l'émission $\gamma$

Nous avons montré que les prédictions du modèle des chocs internes sont en bon accord avec les observations de *Fermi*, et favorisent un rayonnement dominé par le processus synchrotron avec une composante sous-dominante à haute énergie associée aux diffusions Compton inverses en régime Klein-Nishina (Bošnjak, Daigne et Dubus 2009, Guiriec et al. 2010, Daigne, Bošnjak et Dubus 2011). De nombreuses corrélations sont observées entre les propriétés temporelles et spectrales des sursauts (Bosnjak et al. 2008, Firmani et al. 2009). Nous montrons qu'elles sont toutes équivalentes et découlent d'une même évolution spectrale intrinsèque (Hafizi et Mochkovitch 2007, Boçi, Hafizi et Mochkovitch 2010). Le modèle proposé (chocs internes et rayonnement synchrotron dominant) reproduit qualitativement bien ces corrélations. Une étude plus détaillée de l'accord quantitatif (Bosnjak et al. en préparation) permettra de poser des contraintes sur l'efficacité de l'accélération dans les chocs relativistes. La diversité de la population des sursauts  $\gamma$  est aussi reproduite, depuis les sous lumineux jusqu'aux plus brillants (Daigne et Mochkovitch 2007, Zitouni et al. 2008).

#### 4.1.2.2 Le facteur de Lorentz de l'éjecta relativiste

Nos analyses permettent de contraindre les paramètres physiques du jet. En particulier, l'absence de coupure dans le spectre à haute énergie ne peut s'expliquer que si le facteur de Lorentz est assez élevé ( $> 100$ ) pour focaliser les photons de manière à éviter l'annihilation  $\gamma\gamma$ . Notre modèle détaillé (Figure 4.1) prédit des valeurs 3 fois plus faibles que celles obtenues par la collaboration *Fermi* avec une approche simplifiée, ce qui relâche les contraintes sur le moteur central (Hascoët et al. 2011).



**Figure 4.1. Emission de haute énergie des sursauts  $\gamma$  et mesure du facteur de Lorentz dans l'éjecta.** Un modèle des bins de temps 'a' et 'b' du sursaut GRB 080916C observé par *Fermi* est présenté ici. Gauche : profil  $\gamma$  à basse (rouge) et haute énergie (bleu). En accord avec les observations, le modèle reproduit la variabilité à courte échelle et l'émergence tardive de la composante à haute énergie. Milieu : Spectre du sursaut synthétique pour différentes valeurs du facteur de Lorentz (rouge). La coupure à haute énergie est due à l'annihilation  $\gamma\gamma$ . Le spectre non-absorbé est tracé en noir. Droite : opacité  $\gamma\gamma$  à 3 GeV (énergie maximum détectée) en fonction du facteur de Lorentz (bleu : notre étude, rouge : collaboration *Fermi*).

#### 4.1.2.3 L'émission optique simultanée au sursaut gamma

Toujours dans le même cadre théorique, nous avons montré qu'il est possible de rendre compte de l'émission optique simultanée au sursaut dans un cas standard d'émission optique modérée tel celui de GRB 041219A (Götz et al. 2011) comme dans le cas extrême du *naked eye burst* GRB 0801319B (Hascoët et al. 2011), en invoquant un jet très variable avec plusieurs générations de chocs internes.

#### 4.1.2.4 La nature du jet relativiste et son mécanisme d'accélération

Superposée à l'émission non thermique des chocs internes il est attendu une émission thermique *photosphérique* associée à la libération de l'énergie interne résiduelle du jet en fin d'accélération, lorsqu'il devient transparent. Nous avons prédit que l'émission photosphérique est généralement faible (Daigne et Mochkovitch, 2002, MNRAS, 336, 1271), ce qui a peut-être été confirmé par l'observation de GRB 100724B par *Fermi* (Guiriec et al. 2011). L'étude de Ghirlanda et al. (2007) montre

---

cependant que l'émission photosphérique peut dominer dans certains intervalles de temps de certains sursauts. Dans ce contexte, la construction d'un modèle détaillé incluant à la fois les composantes thermiques et non thermiques sera l'un de nos axes d'étude à court terme. Comme montré en 2002, la comparaison des deux composantes permet de contraindre la magnétisation du jet, encore très mal connue malgré une possible détection de polarisation dans le domaine  $\gamma$  dans GRB 041219A par *INTEGRAL* (Götz et al. 2009). De telles contraintes permettraient de mieux comprendre le mécanisme d'accélération du jet.

#### 4.1.2.5 L'origine physique de la rémanence

L'émission rémanente est généralement associée au choc avant ultra-relativiste qui se propage dans le milieu extérieur lorsque le jet commence à freiner. Ce modèle reproduit mal les observations de *Swift*, qui montre une variabilité inattendue de la rémanence. Nous avons donc proposé d'associer plutôt la rémanence à l'émission du choc en retour qui se propage dans le jet lui-même. Une plus grande variabilité temporelle devient alors possible. En collaboration avec une équipe de l'université de Columbia qui a développé indépendamment un modèle assez similaire, nous nous sommes dotés d'outils de modélisation adaptés (Genet, Daigne et Mochkovitch 2007, Uhm 2011, Beloborodov et al. 2011). Nous avons entrepris un ambitieux programme de comparaison systématique de ce modèle du choc en retour et du modèle standard aux données disponibles. Il s'agit de tester la capacité de chacun des deux modèles à reproduire les comportements génériques (travail en cours) mais aussi les sursauts au comportement exceptionnel, tels GRB 050820a (Genet, Daigne et Mochkovitch 2007), GRB 050421 (Hascoët et al. 2011) ou GRB 080503 (Hascoët et al. 2012, en préparation). Nos premiers résultats montrent que le modèle du choc en retour possède une bonne capacité à reproduire les observations avec des paramètres moins extrêmes que le modèle standard, et en meilleur accord avec notre connaissance des étoiles parentes des sursauts. Il privilégie en effet un milieu de type reste de vent stellaire, comme attendu autour d'étoiles massives.

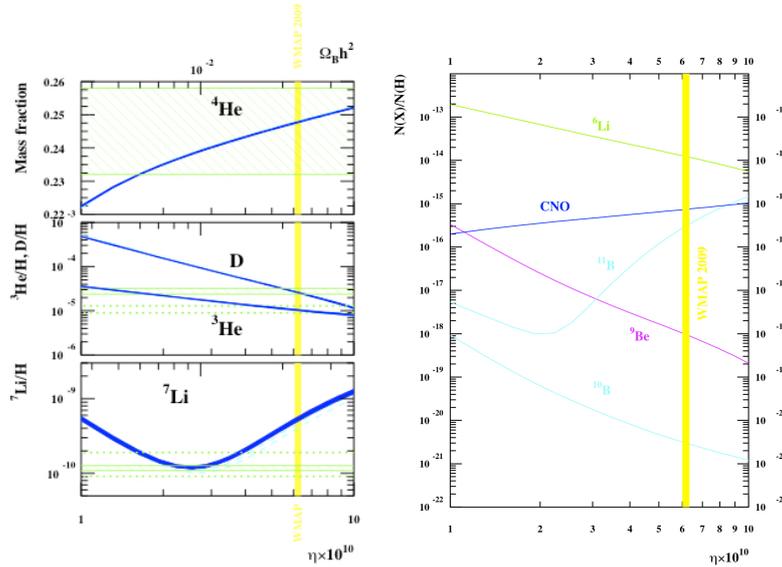
## 4.2 Cosmologie primordiale et nucléosynthèse primordiale

Depuis la mesure de la densité baryonique  $\Omega_b$  par l'analyse des anisotropies du fond diffus cosmologique par *WMAP*, la nucléosynthèse primordiale (BBN, Figure 4.2) n'a plus de paramètre libre (Coc et Vangioni 2010). Le principal problème qui subsiste est l'écart entre l'abondance du  $^7\text{Li}$  déduite de la BBN avec la mesure récente de  $\Omega_b$  via *WMAP*, et celle observée dans de vieilles étoiles du Halo galactique. Néanmoins, la BBN est désormais maîtrisée au point de pouvoir contraindre la nouvelle physique invoquée en cosmologie primordiale. L'impact de la chromodynamique quantique sur la physique nucléaire en jeu rend ses prédictions principalement sensibles à la constante de gravitation, aux trois constantes de couplage de jauge et aux constantes de Yukawa de l'électron et des quarks, ce qui offre un test des modèles d'unification dans lesquels ces paramètres, habituellement considérés comme des constantes fondamentales, varient d'une manière inter-dépendante. Nos études portent à la fois sur i) l'amélioration du modèle de la BBN standard et ii) les tests de la nouvelle physique (en collaboration avec Jean-Philippe Uzan du groupe « Physique théorique-Gravitation et Cosmologie »).

### 4.2.1 Nucléosynthèse primordiale standard jusqu'au CNO et le problème du lithium

Une expérience menée au synchrotron du GSI (Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, Allemagne) pour mesurer la section efficace de la réaction  $^2\text{H}(\alpha,\gamma)^6\text{Li}$ , canal essentiel de la production de  $^6\text{Li}$ , nous a permis d'obtenir la valeur primordiale  $^6\text{Li}/\text{H} = 10^{-14}$  (Hammache et al. 2010). Plus généralement, une mise à jour très soignée du réseau nucléaire de la BBN a été effectuée avec nos collègues physiciens et astrophysiciens nucléaires (A. Coc, CSNSM, Orsay et S. Goriely, ULB, Belgique). Le calcul complet des abondances primordiales jusqu'aux isotopes de Be, B, et CNO obtenu avec un réseau de plus de 400 réactions nucléaires (Coc et al. 2011) fixe les conditions initiales de l'évolution chimique cosmique, régie ensuite par les nucléosynthèses stellaire et spallative.

Dans le but de réconcilier les observations astrophysiques du  ${}^7\text{Li}$  et les résultats de la BBN, les effets de la désintégration des particules instables sur la production/destruction des éléments cosmologiques ont été étudiés. L'espace des paramètres des théories supersymétriques, comportant de la matière noire composée de neutralinos ou de gravitinos peut être contraint grâce à la BBN standard (Coc et al. 2011, 2012b, en préparation).



**Figure 4.2. BBN standard.** Les abondances sont représentées en fonction du rapport baryons sur photons  $\eta$  ou de la densité de baryons  $\Omega_b h^2$ , dont la valeur mesurée par WMAP7 est indiquée par une bande verticale jaune. Gauche : abondances de  ${}^4\text{He}$ , D,  ${}^3\text{He}$ , et  ${}^7\text{Li}$ . Les incertitudes du calcul théorique sont obtenues par Monte Carlo (bleu) et les mesures dans différents sites astrophysiques primitifs sont montrées par les régions hachurées (vert). Droite : abondances de  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^{10}\text{B}$ ,  ${}^{11}\text{B}$  et du CNO.

#### 4.2.2 Cosmologie primordiale et variation des constantes fondamentales

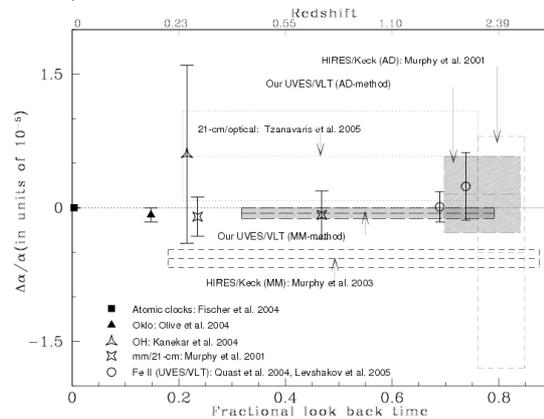
La BBN est très sensible à l'équilibre entre les interactions gravitationnelle et faible. La précision des mesures actuelles permet donc de tester des modèles alternatifs de la gravitation. Nous montrons que la BBN contraint plus fortement que les tests dans le système solaire deux classes de modèles dans lesquels le principe d'équivalence entre matière ordinaire et noire est violé (Coc et al. 2009). Nous avons également étudié les effets des possibles variations des paramètres nucléaires fondamentaux à l'époque de la BBN, en prenant en compte l'inter-dépendance entre ces paramètres prédite par les théories unifiées (Coc et al. 2007). La variation de l'énergie de liaison du D reliée à la variation des constantes peut réconcilier l'abondance du  ${}^7\text{Li}$  déduite de la BBN et de WMAP avec les observations des étoiles du halo, sans affecter les abondances de D et  ${}^4\text{He}$ .

#### 4.2.3 Contraintes observationnelles sur la variation des constantes fondamentales

L'étude des absorbants dans le spectre des quasars offre un outil adapté à l'étude de la variation des constantes (Figure 4.3). *Webb et al. (1999)* ont affirmé avoir détecté une variation significative de la constante de structure fine  $\alpha$ . En complétant leurs données au fil des années, ils ont confirmé l'existence d'une variation  $\Delta\alpha / \alpha = -0,53 (\pm 0,1) \times 10^{-5}$  entre  $z = 0,5$  et 3. Les exceptionnelles données du *Large program VLT-UVES The Evolution of the Intergalactic Medium* (334h d'observation) nous ont pourtant permis d'exclure une variation dans la limite  $|\Delta\alpha / \alpha| < 0,15 \times 10^{-5}$  (Srianand et al. 2007a).

Cette méthode peut être appliquée aux transitions de la molécule  $\text{H}_2$ , détectable dans certains systèmes à très haute colonne densité, dits *systèmes lorentziens* (*Damped Lyman  $\alpha$*  ou DLA). Notre groupe est leader mondial dans la découverte de ces systèmes encore très rares. Notre récent relevé avec 13 systèmes  $\text{H}_2$  découverts nous permet d'obtenir les meilleures contraintes actuelles sur la variation du rapport  $\mu$  de la masse du proton à celle de l'électron, avec une limite  $|\Delta\mu / \mu| < 2 \cdot 10^{-6}$  (Srianand et al. 2010). Des problèmes subsistent encore dans ces contraintes observationnelles sur la variation des

constantes, car toutes les erreurs systématiques ne sont pas comprises. Nous pensons pouvoir augmenter le nombre de raies observées par au moins un facteur trois, ce qui permettrait des mesures pour les mêmes raies dans plusieurs lignes de visée, et donc un bien meilleur contrôle de ces erreurs. Par ailleurs, un nouveau *Large program* sur UVES a été accepté récemment (34 nuits sur deux ans) pour prendre des données dans des conditions optimales et contrôlées, ce qui n'a pas toujours été le cas jusqu'à présent. Cela devrait nous permettre d'atteindre la limite de  $10^{-6}$  sur  $\Delta\alpha/\alpha$  mais aussi de tester les nouveaux résultats de Webb et al. sur la possible existence d'une variation spatiale de  $\alpha$  (Figure 4.3, Petitjean et al. 2009).



**Figure 4.3.** Contraintes observationnelles sur la variation de  $\alpha$ .

La variation des constantes fondamentales a été le sujet d'un colloque IAU en 2009, organisé par P. Molaro et E. Vangioni, (IAU Joint discussion 9, Rio, Brésil, Molaro et Vangioni 2010).

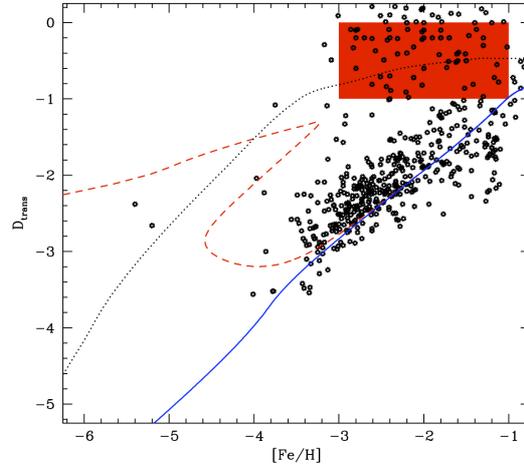
### 4.3 Histoire cosmique des baryons, de la première génération d'étoiles jusqu'à l'époque actuelle

L'histoire de la formation d'étoiles est un paramètre clé pour comprendre l'évolution chimique de l'Univers à travers la nucléosynthèse stellaire. Les explosions des étoiles massives (supernovae ou hypernovae, ces dernières pouvant être reliées aux sursauts  $\gamma$ ) jouent un rôle déterminant. Nous développons depuis 2004 un modèle de l'évolution spatio-temporelle des baryons dans le cadre de la formation hiérarchique des structures, fondé sur l'utilisation de l'ensemble des contraintes observationnelles cosmologiques et stellaires, taux cosmique de formation d'étoiles, réionisation de l'Univers, abondances chimiques à différents *redshifts* et dans différents sites (structures, milieu intergalactique), taux de supernovae, etc. Ce modèle global de l'évolution cosmique des baryons permet en particulier de poser des contraintes sur la première génération d'étoiles (population III).

#### 4.3.1 Signatures chimiques des premières étoiles

Les observations récentes du *Hubble Ultra Deep Field* montrent que le taux de formation d'étoiles chute au delà de  $z = 7$ . Un mode de formation stellaire *standard* ( $0,1 - 100 M_{\odot}$ ) reproduisant ces observations peut réioniser l'Univers d'une manière peu compatible avec la mesure par WMAP7 de l'épaisseur optique Thomson traversée par le rayonnement fossile. Le rôle des premières étoiles (étoiles de population III) doit donc être considéré pour cette réionisation précoce. Nous avons aussi étudié leur signature dans l'évolution chimique. Pour reproduire la fonction de distribution de métallicité du halo galactique obtenue par le relevé Hamburg/ESO d'étoiles pauvres en métaux, un pré-enrichissement chimique par des étoiles de population III massives ( $30 - 40 M_{\odot}$ ) est requis. De même, les observations de l'hélium dans les structures peu évoluées montrent un enrichissement post BBN précoce de cet élément ; le rôle d'une population d'étoiles de masse intermédiaire (progéniteur dudit élément) a été étudié dans un cadre cosmologique. Nous montrons de plus que la nucléosynthèse spécifique de ces étoiles de population III conduit à des abondances chimiques en accord avec la composition observée des très vieilles étoiles du halo extrêmement pauvres en fer mais riches en

carbone (CEMPs). Ces étoiles ont probablement été formées à très grand *redshift* par du gaz enrichi par les éjectas de la première génération d'étoiles (Rollinde et al. 2009, Vangioni et al. 2011, voir Figure 4.4).



**Figure 4.4. Signature chimique des étoiles de population III.** Le facteur  $D_{trans}$  (une fonction des abondances de C et O qui sert de discriminant pour la transition entre la formation d'étoiles de Population III et le mode standard) est tracé en fonction de  $[Fe/H]$  pour un échantillon d'étoiles pauvres en métaux (données ESO, cercles). Le mode standard de formation stellaire est attendu pour  $D_{trans} > -3.5$ . La courbe bleue correspond à un modèle d'évolution chimique n'incluant que ce mode. La courbe pointillée en rouge (resp. en noir) correspond à un modèle incluant également des étoiles de population III de masse 35-100  $M_{\odot}$  (resp. 2-8  $M_{\odot}$ ). Le rectangle rouge correspond aux étoiles observées, très riches en carbone qui sont bien reproduites par le mode de formation d'étoiles de population III de masse intermédiaire.

#### 4.3.2 Evolution du rayonnement cosmique dans l'Univers lointain et nucléosynthèse spallative associée

Des observations du  ${}^6\text{Li}$  dans les étoiles du halo de notre Galaxie ont montré une abondance surprenante, 1000 fois plus élevée que la valeur prédite par la BBN (Hammache et al. 2010). Cette abondance de  ${}^6\text{Li}$  semble indépendante de la métallicité, ce qui suggère une origine pré-galactique. Nous avons élaboré un scénario de production de cet isotope dans un cadre cosmologique par des processus de spallation dans le milieu intergalactique et montré que  ${}^6\text{Li}$  peut être synthétisé précocement à partir d'un rayonnement cosmique actif au sein des premières structures formées (Rollinde et al. 2008). Ce même modèle de spallation cosmologique prédit une synthèse de Be et B en accord avec les observations. Toutefois, des études récentes montrent des asymétries spectrales dans les étoiles observées, qui suggèrent qu'une analyse plus détaillée est nécessaire pour confirmer la détection du  ${}^6\text{Li}$  à ce niveau d'abondance (Rollinde et Vangioni 2011).

#### 4.3.3 Effets de la variation des constantes fondamentales sur l'évolution des étoiles de population III

La variation des constantes fondamentales peut affecter les taux de réactions thermonucléaires de la nucléosynthèse stellaire. En particulier, compte tenu de la grande instabilité du  ${}^8\text{Be}$ , la synthèse de  ${}^{12}\text{C}$  par la réaction triple  $\alpha$  est extrêmement sensible à toute variation. Nous avons quantifié cet effet à l'aide d'un modèle nucléaire, puis étudié l'évolution des étoiles massives de population III jusqu'à la combustion de l'hélium (voir aussi chapitre 6). A métallicité nulle, seule la chaîne pp est possible pour la fusion de H, ce qui ne permet pas aux étoiles massives de produire une énergie suffisante pour stopper la contraction gravitationnelle. Elle continue donc jusqu'au démarrage de la fusion de He, qui devient concomitante avec celle de H. La modification de la réaction  $3\alpha$  peut accélérer la contraction au point de supprimer toute nucléosynthèse au delà de la fusion de H. Ceci nous permet d'obtenir une limite de  $10^{-5}$  sur  $\Delta\alpha/\alpha$  à partir de l'impact sur la nucléosynthèse de C et O à  $z = 15-20$  (Ekström et al. 2010, Coc et al. 2010a, b).

## 4.4 Détection et observation de sources à grand décalage spectral

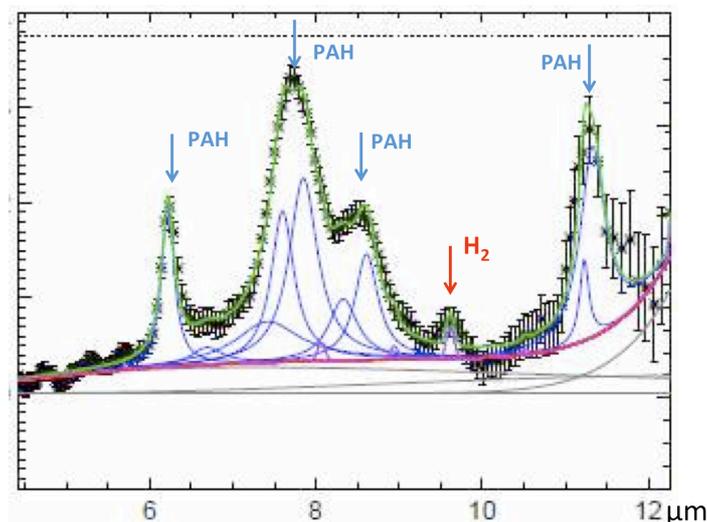
Le groupe COSMOH participe à de nombreux programmes d'observation ambitieux pour rechercher des sources lointaines susceptibles de fournir des sites astrophysiques pour la mesure de quantités physiques qui contraignent l'histoire cosmique (taux de formation d'étoiles, abondances chimiques, etc). Certains de ces objets (quasars, sursauts  $\gamma$ ) servent aussi de sources d'arrière plan pour les études spectroscopiques décrites dans la partie suivante.

### 4.4.1 Galaxies à flambées de formation d'étoiles

#### 4.4.1.1 Galaxies avec le télescope spatial Spitzer (IR) – Fond infrarouge cosmique

Après *IRAS* et *ISO*, *Spitzer* a révolutionné à nouveau l'étude des galaxies infrarouges, en particulier en rendant pleinement accessible l'époque  $z \sim 1,5-3$  qui correspond au maximum de densité des galaxies ultra-lumineuses infrarouges et des quasars. Notre activité est focalisée sur l'exploitation du relevé à grand champ SWIRE de *Spitzer* et ses données multi-longueurs d'onde qui permettent de révéler de nouvelles classes de galaxies à flambées de formation d'étoiles (*starbursts*) ou de NAGs (noyaux actifs de galaxies).

Notre effort porte sur l'identification des galaxies *starbursts* massives observées par *Spitzer* à  $z \sim 2$ . En collaboration avec le groupe de SWIRE, plusieurs projets observationnels ont été menés à l'*IRAM*, avec le spectroscopie IRS de *Spitzer*, et dans l'infrarouge lointain (FIR) avec *Herschel* (Younger et al. 2009, Fiolet et al. 2009, Kovács et al. 2010, Fiolet et al. 2010, Yan et al. 2010). Nous montrons que les données de *Spitzer* permettent d'identifier près de  $10^4$  de ces galaxies ultra-lumineuses dans l'infrarouge et le submillimétrique, à  $z \sim 2$ , avec un très fort taux de formation stellaire, une très forte émission des PAHs et une très grande masse stellaire. L'empilement des spectres IRS permet la détection de l'émission de  $H_2$  pour une des premières fois à  $z \sim 2$  (Figure 4.5), impliquant la présence d'une quantité surprenante de gaz moléculaire chaud (Fiolet et al. 2010).



**Figure 4.5.** Détection de la molécule  $H_2$  à  $z \sim 2$ . Empilement du spectre IR Spitzer de 7 galaxies à  $z \sim 2$ . Outre quatre fortes bandes des PAHs, une raie de la molécule  $H_2$  est clairement détectée.

Nous avons aussi observé à l'*IRAM* un champ profond à 1,2 mm, avec de riches données multi-longueurs d'onde, pour y caractériser les sources submillimétriques (Lindner et al. 2011). L'analyse de la distribution du flux des pixels a permis de pousser le comptage des sources millimétriques jusqu'à une limite extrêmement basse qui rend compte de la totalité du fond IR cosmique (CIB).

---

#### **4.4.1.2 Galaxies et lentilles gravitationnelles dans les relevés de l'observatoire spatial *Herschel* (sub-mm)**

Concernant l'observation des galaxies submillimétriques sur l'observatoire spatial *Herschel*, un membre du groupe (Alain Omont) participe activement à trois grands programmes-clés : HerMES, « *Herschel Multi-tiered Extragalactic Survey* », H-ATLAS, « *Herschel ATLAS* » et HLS, « *Herschel Lensing Survey* ».

En effet, pour les galaxies à grand *redshift* ultra lumineuses dans le FIR, l'apport d'*Herschel* est réellement révolutionnaire : (i) les bandes d'*Herschel*, spécialement de la caméra SPIRE (250-500  $\mu\text{m}$ ), couvrent très bien le pic de l'émission dans le FIR pour tous les *redshifts* d'intérêt ; (ii) les grands relevés effectués avec SPIRE couvrent d'énormes surfaces avec une bonne sensibilité ( $\sim 1000 \text{ deg}^2$ ), alors que les relevés au sol à  $\lambda \sim 1 \text{ mm}$  ont observé en tout moins de  $2 \text{ deg}^2$ . Pour la première fois, on peut mesurer directement la luminosité dans le FIR et donc le taux de formation stellaire des galaxies *starbursts* à grand  $z$ . On dispose ainsi de quelque  $10^5$  galaxies dans le submillimétrique, ce qui est capital pour tracer les grandes structures. La détermination précise de leurs *redshifts* reste par contre difficile car les contreparties optiques/IR proche sont très faibles et difficiles à identifier du fait de la confusion liée au grand lobe d'*Herschel*.

L'IAP bénéficie d'une participation appréciable aux grands programmes du temps garanti et du temps ouvert de l'instrument SPIRE (voir chapitre 3). Notre activité s'est concentrée sur deux thèmes : l'émission FIR des quasars et le suivi à l'IRAM des lentilles gravitationnelles fortes submillimétriques. Les relevés à très grand champ d'*Herschel* permettent la détection d'objets rares. En attendant l'identification difficile des objets à  $z > 6$ , qui commence à peine, les objets submillimétriques les plus spectaculaires sont sans conteste ceux qui résultent de lentilles gravitationnelles fortes. En extrapolant les premiers résultats, on prévoit que *Herschel* fournira plusieurs centaines de lentilles dont le facteur d'amplification approchera au moins 10. Pour préparer les multiples applications de tels objets exceptionnels pour sonder l'Univers lointain (voir chapitre 3), nous sommes activement impliqués dans leur suivi à l'IRAM, pour la détermination de leur *redshift* par les raies de CO, l'obtention d'images lentillées à haute résolution et la recherche de molécules telles  $\text{H}_2\text{O}$  à grand  $z$  (Scott et al. 2011, Wang et al. 2011a, b).

#### **4.4.1.3 Recherche de $\text{H}_2\text{O}$ dans les galaxies *Herschel* amplifiées gravitationnellement**

La recherche de molécules dans les galaxies est depuis longtemps un domaine d'expertise du groupe (Omont 2007) ; le travail ci-dessous en est une nouvelle illustration, tout comme la recherche de molécules à grand *redshift* dans les DLAs, sujet développé au chapitre 4.5.3.1.

Parmi les applications des lentilles exceptionnelles détectées par *Herschel*, notre groupe s'est spécialisé dans la recherche à l'IRAM de  $\text{H}_2\text{O}$  à grand décalage spectral. Après une des premières détections de  $\text{H}_2\text{O}$  à grand  $z$  (Omont et al. 2011), quatre autres détections ont été confirmées durant l'été 2011 dont l'une à  $z \sim 6$ . Du fait de l'énergie relativement élevée des niveaux rotationnels de  $\text{H}_2\text{O}$ , leur grande luminosité implique des conditions spéciales d'excitation et de chimie dans le cœur de ces galaxies, peut-être liées à la présence d'un puissant NAG. L'étude systématique des multiples raies de  $\text{H}_2\text{O}$  dans les lentilles *Herschel* va être poussée, notamment avec ALMA et l'IRAM, pour utiliser ce diagnostic afin de caractériser ces conditions dans un grand échantillon de sources à grand décalage spectral.

### **4.4.2 Quasars**

#### **4.4.2.1 Recherche de quasars dans les grands relevés en imagerie**

Notre groupe s'investit dans un programme de recherche de quasars à tout décalage spectral dans les grands relevés en imagerie qui permettra à terme (i) de chercher des sources adéquates pour l'étude de la distribution spatiale du milieu intergalactique (e.g. Caucci et al. 2006), (ii) d'étudier des ensembles non-biaisés de DLAs (e.g. Noterdaeme et al. 2008a, Noterdaeme et al. 2009a), (iii) d'étudier les fonctions de luminosité des NAGs. A ces fins, il a fallu mettre au point des méthodes de sélection de

---

candidats quasars à l'aide des données photométriques (Yèche et al. 2010) puis les appliquer aux données du *CFHT Legacy Survey* (CFHTLS) et du *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS). Un suivi spectroscopique au télescope Anglo-Australien a été mené à bien (Stalin et al. 2010, 2011). D'autre part, le projet SDSS-BOSS, dans lequel nous sommes très impliqués (chapitre 7.2.6), détectera au bout des cinq ans que durera le relevé environ 150 000 quasars à  $z > 2$ .

#### 4.4.2.2 Quasars à grand $z$ : caractérisation de la population des quasars de faible luminosité

Avec C. Willott (Herzberg Institute of Astrophysics, Victoria, Canada), nous avons entrepris une recherche de quasars à  $z \sim 6$ , en utilisant le grand relevé CFHTLS couplé à des observations en IR proche (NIR) pour une meilleure sélection en couleurs (*Canada-France High- $z$  Quasar Survey*, CFHQS). Le *redshift* des candidats quasars à  $5.7 < z < 6.5$  a ensuite été confirmé par une étude à faible résolution spectrale dans le rouge. L'échantillon ainsi obtenu ( $\sim 25$  objets) double le nombre de quasars à  $z \sim 6$ , et couvre un domaine de 1 à 3 magnitudes plus faibles que celui du SDSS (Willott et al. 2010a). Ceci nous a permis de construire la fonction de luminosité des quasars à  $z \sim 6$  et de déterminer le flux ionisant correspondant. Il est de 20 à 100 fois plus faible que celui nécessaire pour réioniser l'Univers. Nous pouvons aussi prédire le nombre de quasars à plus grand  $z$  qui devraient être découverts par les relevés actuels ou à venir dans le NIR. Ces prédictions sont en accord avec la récente découverte du premier quasar à  $z > 7$ , ULAS J1120+0641 à  $z = 7.085$ , dans le *UKIRT Infrared Deep Sky Survey*.

La spectroscopie dans le NIR (largeur de la raie d'émission de MgII) de 9 quasars du CFHQS à  $z \sim 6$  a été utilisée pour déterminer la masse du trou noir central et la comparer à celles obtenues pour les quasars du SDSS. Nous trouvons une corrélation entre la masse du trou noir et la luminosité UV du quasar ; de plus ces quasars ont un taux d'accrétion proche de la limite d'Eddington et sont donc dans la phase initiale de croissance exponentielle. Les résultats comparatifs sur les fonctions de masse des trous noirs et des étoiles suggèrent que les étoiles se sont formées à grand  $z$  beaucoup plus rapidement que les trous noirs et/ou qu'une petite fraction seulement des galaxies avait un trou noir initial massif (Willott et al. 2010b).

#### 4.4.2.3 Quasars à grand $z$ : émission dans l'infrarouge lointain et formation stellaire

Dans le cadre d'une collaboration internationale, nous étudions à l'IRAM l'émission millimétrique des quasars lumineux à très grand  $z$ . Récemment, nous avons porté l'accent sur les quasars à  $z \sim 6$  identifiés dans les relevés du SDSS et du CFHQS. La quasi-totalité de l'échantillon disponible ( $\sim 50$  objets) a été observée à 1,2mm pour en déduire une estimation de la luminosité dans le FIR et le taux de formation stellaire. Près de 30% des quasars les plus lumineux en UV présentent un excès d'émission en FIR, probablement caractéristique d'un *starburst*. La molécule CO est détectée dans la quasi-totalité de ceux-ci et le rapport CO/FIR semble confirmer le *starburst*. De plus, l'émission de CO semble concentrée dans un petit rayon, peut-être un disque ou un tore moléculaire. Ces études ont été étendues à quelques NAGs enfouis dans un environnement poussiéreux détectés à  $z \sim 2-4$  par *Spitzer*. Désormais, *Herschel* permet de donner une bien plus grande dimension à ces études de l'émission des quasars dans le FIR, spécialement à grand  $z$ . Les premiers résultats montrent qu'environ 10 à 15% des quasars sont détectés dans les relevés *Herschel*, signalant à nouveau un probable *starburst*. Ce résultat et son interprétation seront affinés par les études en cours, qui seront étendues aux grands échantillons de quasars identifiés par SDSS-BOSS et présents dans les champs observés par *Herschel*.

#### 4.4.2.4 Quasars très absorbés en X dans le relevé Chandra Deep field-South (CDF-S)

Les sondages profonds en X effectués avec *Chandra* et *XMM-Newton* ont mis en évidence deux classes de quasars : l'une avec une faible absorption X et associée aux quasars classiques (type-1) et l'autre avec une forte absorption X et obscurcis en optique (type-2). Il reste à identifier les sources X d'absorption extrême ( $\log N(H) > 24$ , dits *Compton thick*) pour rendre compte du flux métagalactique

---

X dur (20-50 keV). Ceci est l'une des motivations qui a conduit à une étude détaillée en radio, optique (imagerie et spectroscopie) et NIR des sources X faibles du CDF-S.

Un relevé VLA nous a permis de montrer que même s'ils permettent d'identifier un grand nombre de sources (NAGs et *starbursts*), les relevés radio profonds ne sont pas efficaces pour découvrir cette population manquante de sources X fortement absorbées (Tozzi et al. 2009). La fraction des sources détectées en radio et en X montrant de l'absorption en X est plus faible que lorsque la sélection se fait en X uniquement. Une étude morphologique en optique et NIR identifie 95% des sources radio du CDF-S comme des galaxies à  $0,2 < z < 3,7$ , elliptiques ou S0 pour les brillantes (flux radio  $> 100$  mJy) et galaxies à formation d'étoiles pour les faibles ( $< 100$  mJy). La spectroscopie des sources X les plus faibles en optique au VLT et au Keck permet de déterminer la fonction de luminosité des NAGs à  $L < L_*$  ainsi que d'identifier des *starbursts*, optiquement faibles, jusqu'à  $z \sim 2-3$  (Silverman et al. 2010). De plus, nous identifions deux structures qui tracent un filament épais à  $z=0,67$ , autour d'un amas de galaxies, d'une longueur de 68 Mpc, et un filament plus fin à  $z=0,73$ , de 19 Mpc, comprenant des NAGs et des groupes de galaxies.

#### **4.4.2.5. Quasars très obscurcis de forte luminosité à $z \sim 3.5$ : fusion de galaxies ou vents galactiques ?**

Deux sources à  $z \sim 3.5$  qui présentent une forte activité de leur noyau actif et de leur formation stellaire ont été identifiées dans le relevé profond du CFHTLS. Elles sont très puissantes avec une luminosité bolométrique de  $10^{13} L_{\odot}$  et un taux de formation stellaire d'environ  $1000 M_{\odot}/\text{yr}$ . Le NAG est très obscurci ( $A_V \sim 4$ ) et absorbé en X ( $\log N(\text{H}) \sim 24.0$ ). La cinématique du gaz (spectroscopie à intégrale de champ en NIR) et des molécules (raie CO(4-3) en millimétrique) montre qu'une fraction significative du gaz ionisé et moléculaire atteint des vitesses supérieures à la vitesse d'échappement. Pour l'un des quasars, la dynamique met clairement en évidence un vent dû au noyau actif, alors que pour le deuxième, les hypothèses les plus plausibles sont un disque étendu ou une fusion de galaxies (Nesvadba et al. 2011).

#### **4.4.3 Sursauts $\gamma$**

Le groupe participe activement à la préparation du projet SVOM (Schanne et al. 2009) présenté au chapitre 7.3.5. Notre contribution porte en particulier sur le calcul du taux attendu de sursauts  $\gamma$  détectés par SVOM, à l'aide d'un modèle Monte Carlo de synthèse de populations de sursauts issu d'une étude de la distribution en *redshift* de ces phénomènes (Daigne, Rossi et Mochkovitch 2006). Ce travail permet de prédire les fractions de sursauts de chaque type (longs, courts, riches en X, brillants ou sous-lumineux, ...) et de préparer la stratégie de suivi au sol.

## **4.5 Spectroscopie des milieux interstellaire et intergalactique**

### **4.5.1 Spectroscopie le long de la ligne de visée des quasars**

#### **4.5.1.1 Grands relevés spectroscopiques de quasars brillants**

L'observation des raies d'absorption de HI et d'ions métalliques dans le spectre de quasars lointains offre un moyen observationnel unique pour étudier le milieu intergalactique et le milieu interstellaire de galaxies à grand  $z$ . De nombreux programmes sont en cours et ont obtenu du temps de télescope au VLT en particulier sur UVES et FORS mais aussi sur X-SHOOTER et SINFONI. En particulier une collaboration de nombreux astronomes des pays membres de l'ESO a engagé un projet VLT-UVES de relevé spectroscopique de raies d'absorption dans le spectre de quasars brillants (*Large program VLT-UVES*, PI : P. Molaro, Co-I P. Petitjean, 34 nuits). Le grand relevé d'hydrogène moléculaire quant à lui a obtenu plus de 50 nuits de VLT au total (PIs : P. Petitjean, C. Ledoux, P. Noterdaeme).

---

#### 4.5.1.2 Etude de l'origine de l'excès d'absorbants vers les blazars

Motivés par la présence surprenante d'un excès de systèmes d'absorption MgII dans le spectre des rémanences de sursauts  $\gamma$  par rapport aux quasars, nous avons entrepris de mesurer le nombre moyen de systèmes en direction des blazars, qui présentent certaines similitudes avec les sursauts. Un programme conduit avec l'instrument FORS1 au VLT (8 nuits) nous a permis d'observer 42 blazars et de montrer que l'excès de systèmes (facteur 2) est comparable à celui trouvé vers les sursauts  $\gamma$ . Un mécanisme dans lequel du gaz entraîné à grande vitesse par le jet provenant du noyau actif et pointant vers nous a été exploré (Bergeron, Boissé et Ménard 2011). Pour le tester, un programme d'observation VLT/UVES est actuellement en cours pour rechercher des indices de variabilité temporelle et de couverture partielle de la source de continuum dans les raies d'absorption de certains blazars.

#### 4.5.1.3 Etude détaillée d'un absorbant neutre associé à un groupe de galaxies

Afin d'analyser les propriétés du milieu interstellaire neutre de galaxies lointaines, un système d'absorption remarquable à  $z = 0,66$  détecté dans le spectre du quasar PKS2126-158 (grand relevé VLT/UVES conduit par J. Bergeron) a été sélectionné pour une étude détaillée. Ce système présente de très fortes raies de CaI et NaI sur un domaine de vitesse atteignant 500 km/s. Les contraintes apportées par des observations à 21 cm au WSRT et l'analyse détaillée d'images profondes du champ indiquent que l'absorption est très probablement associée à du gaz arraché par effet de marée dans le groupe de galaxies se trouvant devant le quasar, à  $z = 0,66$  (Boissé, Gupta et Srianand, 2012, en préparation).

#### 4.5.1.4 Enrichissement en métaux du milieu intergalactique et/ou du milieu circumgalactique

Les problèmes des baryons manquants ( $\sim 40\%$ ) à  $z \sim 0$  et des métaux manquants ( $\sim 50\%$ ) à  $z \sim 2,5$  peuvent être résolus par l'existence d'une phase modérément chaude ( $T \sim 10^5$  à  $10^6$  K). Un tel milieu a été mis en évidence par les raies d'absorption de OVI associées à la forêt *Lyman*  $\alpha$  dans le spectre de quasars distants. L'enrichissement du milieu intergalactique ou circumgalactique en éléments lourds apparaît très inhomogène et une étude préliminaire avait montré que la distribution de l'abondance de l'oxygène à  $z \sim 2,3$  est bimodale avec deux pics à 50% et 1% de sa valeur solaire. La contribution de la population riche en métaux à la densité cosmique de l'oxygène est d'environ 40%. La nature de la source de chauffage de cette phase n'est pas clairement établie (Fox, Bergeron et Petitjean 2008). Une étude récente (Muzahid et al. 2011) d'un plus grand échantillon à  $z \sim 2,3$  montre que seule une faible fraction de ces absorbants OVI tracent une phase unique, photoionisée et en équilibre. La majorité des systèmes ont une température  $T < 10^5$  K ce qui exclut un gaz en équilibre collisionnel, et sont multiphasés. Les vitesses non thermiques observées suggèrent qu'ils tracent soit des vents galactiques, soit un milieu préalablement chauffé par des chocs et qui se refroidit radiativement. La mesure de la métallicité est en cours pour les systèmes à faible colonne densité de HI pour lesquels on peut supposer une phase unique de degré d'ionisation élevé.

#### 4.5.2 Structure spatiale du milieu intergalactique

Nous nous investissons dans l'observation de paires de quasars séparés par des distances angulaires de 1 à 3 arcmin et l'étude de la corrélation des raies d'absorption observées le long de chacune des lignes de visée afin de sonder la structure du milieu intergalactique. Deux travaux précurseurs ont été réalisés avec des échantillons de taille restreinte (Rollinde et al. 2003, Coppolani et al. 2006). Ceci met en évidence des structures sur des échelles de distance de l'ordre ou supérieures à la séparation. Ces paires ont aussi été utilisées pour effectuer le premier test Alcock-Paczinsky de mesure de la géométrie de l'Univers en comparant la corrélation transverse et la corrélation longitudinale. Ce thème de recherche fait l'objet de nouveaux projets (thèse de Hayley Finley) dans le cadre de BOSS. Les nouveaux échantillons permettront bientôt de contraindre de façon indépendante et originale la densité

---

d'énergie sombre  $\Omega_L$  (Finley et al. 2012, en préparation). Bientôt, il devrait être possible d'observer des groupes de quasars dans un même champ puis d'inverser les absorptions détectées sur les lignes de visée pour reconstruire le champ de densité en 3D. Nous avons mis au point les méthodes d'inversion et étudions les outils statistiques pour retrouver les caractéristiques topologiques du milieu intergalactique (Caucci et al. 2008). Les simulations utilisées doivent être normalisées par l'observation de l'absorption moyenne dans le milieu intergalactique et son évolution avec  $z$ . Cela suppose de savoir normaliser le spectre des quasars, ce qui implique des erreurs systématiques évaluées au cours des thèses d'Ali Aghaee et d'Isabelle Pâris (Aghaee et al. 2005, Pâris et al. 2011). Près d'un quasar, le flux ionisant émis par celui-ci diminue l'absorption *Lyman* dans le spectre observé par rapport à l'absorption moyenne (effet de proximité), tandis qu'une surdensité de matière autour du quasar compenserait cet effet. Cet effet a pu être analysé en tenant compte de ces deux composantes sur les spectres du *Large program* UVES-VLT, à  $z=2$  et 3 (Rollinde et al. 2005), puis  $z > 4$  avec des spectres obtenus au Keck (Guimaraes et al. 2007). Ces deux études confirment la localisation des quasars dans un environnement dense. Elles vont pouvoir être étendues à l'effet de proximité transverse grâce aux nombreuses données de BOSS (Rollinde et al. 2012, en préparation).

#### 4.5.3 Étude du milieu interstellaire de galaxies à grand décalage spectral

Lorsque la ligne de visée vers un quasar distant traverse le disque ou le halo d'une galaxie, la grande quantité d'hydrogène neutre dans le milieu interstellaire de la galaxie produit une absorption caractéristique appelée système lorentzien (ou Damped Lyman-alpha system : DLA). Ces systèmes sont particulièrement intéressants car ils apportent des informations cruciales sur la formation des galaxies et sur l'histoire de formation stellaire. En effet, la détection des DLAs est indépendante de la luminosité de la galaxie associée et leur statistique est bien contrainte grâce au relevé SDSS et à son successeur BOSS en cours, dans lequel notre équipe joue un rôle fondamental.

##### 4.5.3.1 Évolution de la densité cosmologique de gaz neutre dans l'Univers

Grâce à une recherche systématique des DLAs dans le relevé SDSS-II, notre équipe a pu déterminer que ces derniers contiennent la majeure partie du gaz neutre dans l'Univers, correspondant à environ 2% de la matière baryonique. La masse de gaz neutre dans les DLAs est cependant environ deux fois plus faible que la masse contenue dans les étoiles à  $z = 0$ , et diminue avec le temps. Ceci implique que les galaxies à grand décalage spectral doivent être continûment alimentées en gaz et sont donc en interaction forte avec le milieu intergalactique.

##### 4.5.3.2 Composition chimique et conditions physiques

Le gaz étant neutre, les mesures d'abondances en métaux sont très précises et ces systèmes sont ainsi très utilisés pour étudier l'évolution chimique de l'Univers. Par exemple, l'étude de l'abondance d'azote et d'oxygène nous a permis de montrer que les systèmes Lorentziens sont sujets à des pics successifs de formation d'étoiles. Durant un tel épisode, le rapport  $[N/O]$  décroît rapidement dû à la production d'oxygène par les étoiles massives, tandis qu'entre deux pics successifs, le milieu interstellaire est lentement enrichi en azote par les étoiles de masse faible et intermédiaire (Petitjean et al. 2008).

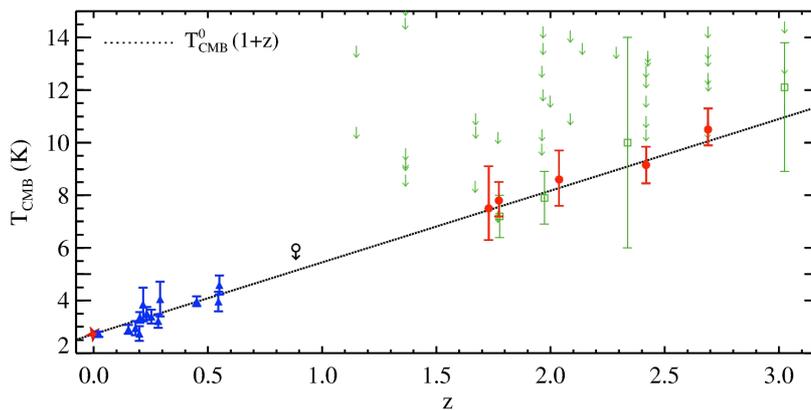
Notre groupe a également mené la première recherche systématique de  $H_2$  dans les systèmes lorentziens, observant avec VLT/UVES  $\sim 70$  quasars (Noterdaeme et al. 2008b). Ce travail a conduit à la détection de  $H_2$  dans 15 systèmes et CO dans 6 systèmes, aboutissant à plus d'une quinzaine de publications. La présence de molécules apparaît fortement corrélée à la métallicité du gaz,  $H_2$  étant détecté dans 40% des systèmes de métallicité supérieure à  $1/20$  solaire (Petitjean et al. 2006). Cette molécule possède également des propriétés radiatives et collisionnelles spécifiques qui en font une sonde très sensible aux conditions physiques du gaz.

Il est alors possible d'étudier en détail les propriétés physiques du gaz (voir par exemple Noterdaeme et al. 2007a, b).

Grâce à ces travaux, la détection de phases plus froides et poussiéreuses est devenue systématique, alors qu'elles étaient restées inaperçues jusqu'alors. Nous avons en particulier détecté la signature de poussière à 2175 Angströms (Srianand et al. 2008b, Noterdaeme et al. 2009b), étudié l'abondance d'hydrogène moléculaire deutéré (Noterdaeme et al. 2008b, Ivanchik et al. 2010) et détecté la molécule de CO dans du gaz moléculaire diffus et translucide (par exemple Srianand et al. 2008a, Noterdaeme et al. 2009b, 2010). Enfin, un grand relevé de l'absorption à 21cm dans les DLAs de décalage spectral intermédiaire au GMRT ( $> 300h$ , Gupta et al. 2009, Srianand et al. 2010) et à grand  $z$  au GBT est en cours. Nous sommes de ce fait associés au projet MALS de relevé systématique de l'absorption à 21 cm à  $z < 1,8$  qui a obtenu 4000h de temps du prochain télescope MEERKAT, précurseur de SKA.

#### 4.5.3.3 Température du fond diffus cosmologique

La théorie standard du Big-Bang prédit une augmentation linéaire de la température du fond diffus cosmologique (*Cosmic Microwave Background* : CMB) avec le décalage spectral, dû à l'expansion adiabatique de l'Univers. Cette relation doit cependant être vérifiée par des mesures directes. CO possède un moment dipolaire permanent qui lui permet d'être en équilibre radiatif avec le fond diffus cosmologique. Cette molécule, détectée dans le milieu interstellaire diffus à grand  $z$ , peut donc servir de thermomètre pour mesurer précisément  $T_{\text{CMB}}$ . Nos résultats à  $1,7 < z < 2,7$  montrent que les températures mesurées sont en parfait accord avec la théorie standard (Figure 4.6, Noterdaeme et al. 2011).



**Figure 4.6 :** Température du fond diffus cosmologique en fonction du décalage spectral. L'étoile représente la mesure à  $z=0$ . Nos mesures basées sur l'excitation rotationnelle de CO sont représentées par les points rouges à  $1,7 < z < 2,7$ . Les autres mesures à  $z > 0$  sont basées sur (i) l'effet Sunyaev-Zeldovitch ( $z < 0,6$ , Luzzi et al. 2009) et (ii) l'analyse des raies de structure fine du carbone (Cui et al. 2005, Ge et al. 1997, Srianand et al. 2000, Molaro et al. 2002). Les limites supérieures proviennent de l'analyse du carbone neutre (littérature et notre échantillon UVES: voir Srianand et al. 2008) et d'absorptions moléculaires ( $z=0,9$ , Wiklind & Combes 1996). La droite représente la relation prédite par la théorie standard du Big-Bang.

#### 4.5.4 Le milieu interstellaire local : observation et modélisation

Afin de comprendre l'origine du gaz  $H_2$  très excité détecté avec FUSE vers l'étoile à grande vitesse HD34078 (Boissé et al. 2005), nous avons cartographié au télescope de 30m de l'IRAM l'émission CO dans cette direction. Cette émission est clairement associée à HD34078 et présente une structure de choc en arc remarquable, due à l'interaction entre le vent stellaire et le nuage dense impacté. Le suivi temporel des raies d'absorption de CH et  $CH^+$  pour étudier la structure à petite échelle dans le gaz a été poursuivi et nous avons pu confirmer sans ambiguïté à l'aide d'une étoile de référence (zPer) la réalité des variations observées avant 2005. Cette variabilité est attribuée à la zone de choc ; en revanche, le gaz  $H_2$  non perturbé par HD34078 ne montre pas de variations donc pas de structure à petite échelle marquée (Boissé et al. 2009). Plusieurs études prolongeant ce projet sont en cours. Une cartographie plus détaillée de l'émission CO autour de HD34078 est actuellement menée à l'IRAM en collaboration

---

avec J. Pety et collaborateurs afin de mieux déterminer la géométrie de la région de choc. Une fois bien caractérisée, cette interface remarquable gaz ionisé/gaz neutre pourra servir par la suite de référence pour les modèles. Nous effectuons également avec F. Teyssier un suivi photométrique de HD34078 (AE Aur, cataloguée comme variable) afin de comprendre le lien éventuel entre les fluctuations de magnitude observées par *Hipparcos* et l'interaction vent stellaire/nuage. Enfin, les excellentes données acquises sur l'étoile zPer vont nous servir à étudier très finement la structure à petite échelle dans le nuage « standard » (non perturbé) situé sur la ligne de visée (collaboration avec S Federman).

## 4.6 Prospective

Les deux recrutements récents, les nombreuses thèses effectuées au sein de COSMOH, nos fructueuses collaborations nationales et internationales, nos succès aux appels d'offre de l'ANR, sont des indicateurs importants du dynamisme de notre groupe, qui propose un programme de recherche d'une grande cohérence à l'interface de la cosmologie et de l'astrophysique des hautes énergies. Les travaux qui viennent d'être résumés font apparaître les thèmes sur lesquels nous disposons d'une expertise reconnue et sur lesquels nos travaux de recherche à venir pourront s'appuyer : la physique de l'accrétion sur les trous noirs, et notamment la thématique de la formation et de l'évolution des trous noirs supermassifs, récemment renforcée par le recrutement de M. Volonteri ; la physique des sursauts  $\gamma$ , pour laquelle nous disposons d'outils de modélisation parmi les plus complets et qui pourront être étendus dans l'avenir à d'autres types de jets relativistes ; la nucléosynthèse primordiale avec le développement de tests de la nouvelle physique (projet ANR Vacoul et le « *Large Program* » ESO afférent) ; la recherche et la caractérisation de sources à grand  $z$ , avec en particulier l'implication dans les grands relevés en imagerie et le suivi multi-longueurs d'onde des sources ; le sondage spectroscopique de sites astrophysiques variés (structures et leur milieu interstellaire et circumgalactique, structures en formation, milieu intergalactique) à tous les décalages spectraux, avec en particulier une expertise mondiale sur les contraintes observationnelles sur la variation des constantes fondamentales, la recherche de molécules à grand  $z$ , renforcée par le recrutement de P. Noterdaeme, et la reconstruction de la structure spatiale du milieu intergalactique.

L'étude de la nouvelle physique grâce aux contraintes apportées par la BBN ainsi que la modélisation de l'évolution cosmique des baryons des premières étoiles à l'époque actuelle qui s'appuie sur nombre d'observables liées à la physique des particules et à la cosmologie à tout redshift, seront un axe de recherche important du groupe, renforcé par la venue de J. Silk dans le cadre de son ERC. Plusieurs projets observationnels du groupe proposent une vision transversale très complémentaire (voir par exemple le projet BOSS chapitre 7.2.6).

Le contexte instrumental nous est aussi favorable : à haute énergie, le satellite *Fermi* a été lancé en 2008 et devrait continuer à observer pendant encore plusieurs années. Dans la perspective d'une extension des travaux théoriques menés sur les sursauts  $\gamma$  à d'autres types de jets relativistes, les télescopes Čerenkov au sol HESS et plus tard CTA ouvrent l'accès aux rayons  $\gamma$  de très haute énergie. Dans le domaine des X durs /  $\gamma$  mous, si la localisation rapide des sursauts  $\gamma$  devrait connaître un ralentissement à la fin de la mission *Swift* dans un avenir proche, le projet SVOM prendra le relais à l'horizon 2017. Entre temps, les sursauts continueront à être observés par l'instrument basse énergie GBM de *Fermi*. SVOM détectera les sursauts avec de nombreux moyens d'observation disponibles à toutes les longueurs d'onde, et peut-être l'ouverture d'une nouvelle fenêtre avec les ondes gravitationnelles puisque les expériences *Advanced-Virgo/Ligo* pourraient détecter les premières coalescences d'étoiles à neutrons dont on pense qu'elles sont les précurseurs des sursauts  $\gamma$  courts. De manière générale, l'activité d'exploration multi-longueurs d'onde de l'Univers lointain va bénéficier dans les années à venir de nombreux instruments tels HST, IRAM, *Spitzer*, *Herschel*, APEX, *Planck*, CFHTLS, WIRCAM, VISTA. En particulier, l'un d'entre nous (Alain Omont) est déjà impliqué dans le programme *Planck* sur l'étude des objets à grand décalage spectral. Dans un horizon beaucoup plus lointain les projets Meerkat et SKA ainsi que les ELTs verront peut être le jour.

---

Notre groupe pourra tirer le meilleur parti de ces instruments pour multiplier les mesures précises dans des sites astrophysiques variés, avec une extension du domaine de *redshift* couvert et la possibilité un jour de sonder directement la fin des âges sombres et l'époque de formation des premières étoiles. Le groupe continuera ainsi à fournir des contraintes fondamentales pour les modèles d'évolution cosmique, et à proposer des tests variés de la nouvelle physique. Elle contribuera également directement aux développements théoriques sous-jacents, et à la modélisation physique des sources étudiées. Au sein de l'IAP, les travaux de recherche de COSMOH montrent de nombreuses connexions avec les autres équipes, notamment le GReCO (variation des constantes, processus d'accélération, contrepartie électromagnétique des sources d'ondes gravitationnelles), le groupe « Grandes Structures et Univers Profond » (mesures des paramètres cosmologiques, structuration de l'Univers à grande échelle, formation et évolution des structures et des trous noirs supermassifs), le groupe « Origine et évolution des Galaxies » (caractérisations des objets supermassifs à grand  $z$ , histoire de l'activité des noyaux galactiques) et le groupe « exoplanètes et milieu interstellaire » (étude du milieu interstellaire local).

En résumé, pour les années à venir, le programme de recherche du groupe « Cosmologie et Astrophysique des hautes énergies » s'appuie sur l'expertise acquise dans ce domaine afin d'obtenir les meilleures observations possibles et les interpréter de manière physique, avec le souci permanent de développer une vision globale cohérente, dans un cadre cosmologique.

---

## 5 Grandes structures et Univers profond

Le groupe de recherche « Grandes structures et Univers profond » est composée de :

13 chercheurs/ingénieurs de recherche CNRS : François Bouchet, Stéphane Colombi, Jean-François Cardoso, Bernard Fort, Raphaël Gavazzi, Eric Hivon, Roya Mohayaee, Christophe Pichon, Simon Prunet, Alain Riazuelo, Sébastien Peirani, Thierry Sousbie, Jean-François Sygnet

5 astronomes : Christophe Alard, Karim Benabed, Jacques Colin, Henry J. McCracken, Yannick Mellier

1 Professeur (UPMC) : Benjamin Wandelt

Sur la période 2007-2011 :

12 post-doctorants : Soumen Basak, Aurélien Benoit Levy, Richard Bielby, Pawel Bielewicz, Yohan Dubois, Franz Elsner, Silvia Galli, Catherine Heymans, Martin Kilbinger, Anna Mangilli, Sébastien Peirani, Thierry Sousbie

18 doctorants : Christopher Bonnett, Florence Brault, Sandrine Codis, Jean Coupon, Typhaine Dechelette, Anne Ducout, Ophelia Fabre, Liping Fu, Christophe Gay, Guilhem Lavaux, Michal Maciejewski, Alice Pisani, Guillaume Plum, Raphaël Sadoun, Jérôme Thiébaud, Hong Tu, Flavien Vansyngel, Melody Wolk

8 thèses ont été soutenues : Christopher Bonnett, Jean Coupon, Liping Fu, Christophe Gay, Guilhem Lavaux, Michal Maciejewski, Jérôme Thiébaud, Hong Tu

3 habilitations à diriger les recherches ont été soutenues : Stéphane Colombi, Henry McCracken et Christophe Pichon

Nombre de chercheurs avec HDR ou équivalents : 9

Nombre de publications de rang I : 380

Nombre de publication de rang II : 68

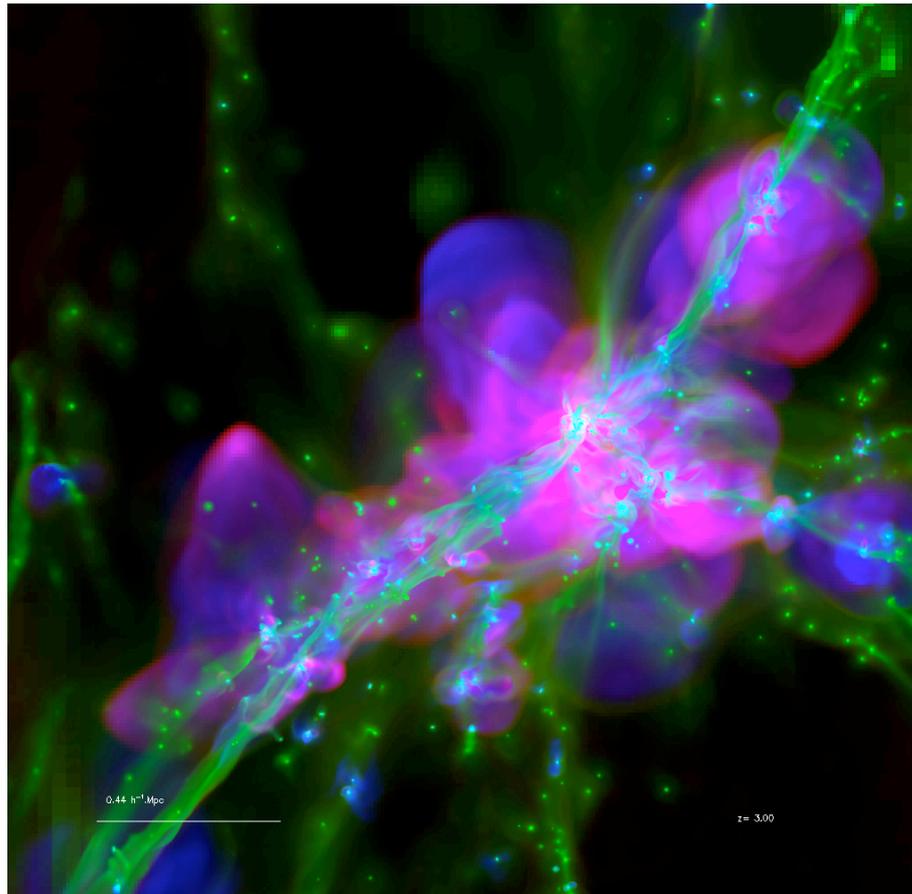
---

Les thèmes de recherche du groupe « Grandes structures et Univers profond » s'articulent autour de l'étude des propriétés à grande échelle de la distribution de matière dans l'Univers. Au-delà de la simple cartographie de l'Univers, la distribution des grandes structures fournit des informations sur ses propriétés et permet d'affiner et de tester statistiquement les prédictions des modèles cosmologiques. Ainsi le travail du groupe couvre des activités théoriques en amont des propriétés fines des grandes structures dans différents modèles cosmologiques. Les chercheurs participent aussi à d'importantes campagnes d'observation des propriétés statistiques globales de l'Univers, en passant par la simulation numérique qui reste la seule manière de progresser lorsque les outils théoriques ne sont plus suffisants, et de préparer les campagnes d'observation. Plus spécifiquement, la partie la plus théorique de l'activité du groupe se concentre sur l'étude de la phénoménologie des divers modèles cosmologiques primordiaux et le test des prédictions à l'aide de données. En d'autres termes, il s'agit de calculer l'impact de cette physique sur la distribution des grandes structures, d'en tirer d'éventuelles conséquences observationnelles et d'exploiter les données existantes et à venir afin de tester ces hypothèses. Une part importante de l'activité du groupe se focalise sur les méthodes mathématiques nécessaires à l'exploitation statistique des données issues des grandes structures. Cette activité est tout à la fois au service de la composante observationnelle et simulation numérique du groupe, mais aussi un service à la communauté astrophysique française et mondiale, certains des algorithmes développés au sein du groupe étant distribués.

La nature intrinsèquement statistique des modèles cosmologiques modernes et leur complexité rendent indispensables l'utilisation de la modélisation numérique, avec pour triple objectif (i) l'investigation de modèles trop complexes pour être calculés analytiquement, (ii) l'interprétation des données dans l'espace des paramètres, et (iii) la génération de pseudo données à confronter aux grands relevés. Cette thématique conduit à l'élaboration de nouveaux algorithmes de (post)-traitement, et à l'exploration des propriétés des grandes structures pour nourrir à la fois l'étude théorique et l'activité observationnelle du groupe.

Pour finir, cette équipe est fortement impliquée dans quatre thématiques observationnelles : la détection de matière noire non baryonique, la caractérisation de l'énergie noire, l'observation du rayonnement cosmologique, et l'observation de l'effet de lentille gravitationnelle. Cette activité constitue l'essentiel du travail du groupe au quotidien et mobilise d'importantes ressources tant humaines que matérielles. En effet, l'IAP pilote le traitement des données pour deux de ces projets (*Planck* et *Terapix/Euclid*).

L'analyse des données cosmologiques de l'expérience *Planck* alimente les thématiques théoriques et profite de l'expérience numérique acquise. Le groupe se prépare à tirer un maximum de profit de ces données, et de sa situation privilégiée de centre de traitement de l'instrument HFI. Cette mission a fait de l'IAP un des nœuds de l'exploitation des données de rayonnement cosmologique fossile (CMB). Elle cristallise aussi la complémentarité entre les mesures du CMB et les mesures d'effets de lentille gravitationnelle.



**Figure 5.1.** Le voisinage cosmique de la galaxie NUT ( $\frac{\text{O O O}}{\text{H H H}} \frac{\text{O}}{\text{O}} \frac{\text{H}}{\text{H}}$ ) à redshift 3 (un prototype de Voie Lactée). Le code couleur représente la densité en vert, les métaux en rouge et la température en bleu. L'advection du moment angulaire le long de la structure filamentaire, peut expliquer la formation hiérarchique radiale du disque central.

Le succès du projet Horizon, et la forte implication de l'IAP dans ce projet, ont incité notre groupe à continuer son investissement dans les simulations numériques, notamment via le recrutement de S. Peirani et T. Sousbie, et sa participation à la collaboration internationale Horizon-UK. (Figure 5.1, Kimm et al. 2011). L'expérience acquise a montré que la disponibilité de données synthétiques permettait une plus grande souplesse dans le développement de méthodes innovantes de traitement de données, et leur exploitation scientifique. De fait, l'IAP est devenu l'un des leaders de la thématique simulations numériques des grandes structures et de la formation des galaxies. Il semble important de pérenniser cette situation indispensable pour accompagner l'interprétation des données issues des grands relevés, en gardant à un niveau élevé la priorité donnée à cette thématique au sein de l'institut. La thématique « lentille gravitationnelle » est l'une des plus florissantes de l'astrophysique mondiale. Suite aux spectaculaires résultats obtenus par les différentes équipes observationnelles au niveau international (et dans lesquelles, l'IAP tient un rôle leader avec notamment l'exploitation scientifique des données issues du CFHTLS), l'avenir sera du côté des relevés grand champ et en particulier spatiaux, avec la mission ESA *Euclid* autour de laquelle le groupe se fédérera en partie. L'équipe a énormément investi ces dernières années dans les techniques de traitement et d'analyse de ces effets. Elle va pouvoir tirer parti de cet investissement, en renforçant son aptitude à exploiter scientifiquement les données d'effets de lentilles forts et faibles.

---

## 5.1 Fond diffus cosmologique

### 5.1.1 Les données de la mission *Planck*

Ce chapitre est complémentaire de la description du projet *Planck* décrit au chapitre 7.2.1. Les premiers résultats ont été publiés dans *Astronomy and Astrophysics* (*Planck* Collaboration 2011, 24 références).

L'équipe dirigée par François Bouchet a consacré une partie très importante de son temps dans la préparation, les opérations de la mission *Planck*-HFI et la réduction de ses données (Benabed et al. 2009). En particulier, l'établissement de la chaîne d'acquisition du pointage du satellite, en collaboration avec les ingénieurs de l'ESA, ainsi que son traitement et sa distribution au sein de la collaboration HFI ont été menés à bien. Les développements d'algorithmes à tous les stades du traitement des données, allant de la caractérisation du bruit de la chaîne instrumentale dans les données temporelles jusqu'à l'exploration de la probabilité a posteriori des paramètres cosmologiques (utilisant des techniques développées dans le cadre du projet ANR ECOSSTAT) ont été menés à bien. Par ailleurs, l'étalonnage fin de la réponse instrumentale à partir des données vol, ainsi que l'élaboration d'une fonction de vraisemblance réaliste permettant de faire le lien entre les données expérimentales et les modèles cosmologiques a été effectué. D'un point de vue méthodologique, l'impact d'une méthode classique de séparation de composantes astrophysiques (« *Internal Linear Combination* » ou ILC, destinée à minimiser la contamination du rayonnement de fond cosmologique des diverses sources d'émission d'origine galactique et extragalactique) sur la mesure du spectre de puissance des anisotropies de température (Saha et al. 2008) et de polarisation (Samal et al. 2010) ont été effectués. Le caractère non-linéaire (contrairement à ce que laisse supposer son nom) de l'ILC entraîne la présence de biais sur l'estimation du spectre des cartes filtrées. Ces biais peuvent être analytiquement calculés sous certaines hypothèses concernant les contaminants. Il a été mis en évidence la présence d'un déficit de puissance dans la composante quadrupolaire des anisotropies de température précisément dû à ce biais.

La fabrication des cartes optimales du fond diffus cosmologique en présence de bruit instrumental ayant une forte composante à longue échelle temporelle (bruit dit en  $1/f$ ) et aux propriétés statistiques du bruit résiduel présent dans les cartes a été menée à bien. Ont également été étudiés : les caractéristiques techniques du satellite *Planck* telles que mesurées avant le vol et qui conditionnent la qualité des résultats scientifiques à attendre de *Planck* plus particulièrement l'impact de la forme complexe des lobes optiques sur l'interprétation cosmologique des observations du CMB. Une nouvelle méthode de détermination de la vraisemblance du spectre de puissance angulaire du CMB à grande échelle, première étape vers une exploitation correcte des observations de *Planck* et de toute autre expérience CMB a été élaborée. Plus largement, l'opportunité offerte par la polarisation du CMB pour comprendre l'Univers primordial et de détecter la trace d'ondes gravitationnelles éventuellement laissée par la période d'inflation a été considérée.

Par ailleurs, un membre du groupe (Eric Hivon) a continué à maintenir la librairie de programme HEALPix disponible sur <http://sourceforge.net/projects/healpix/> et dont la pixelisation de la sphère est utilisée entre autres par WMAP et *Planck*, mais aussi dans d'autres domaines astrophysiques (planètes extra-solaires, rayons cosmiques à haute énergie, ...).

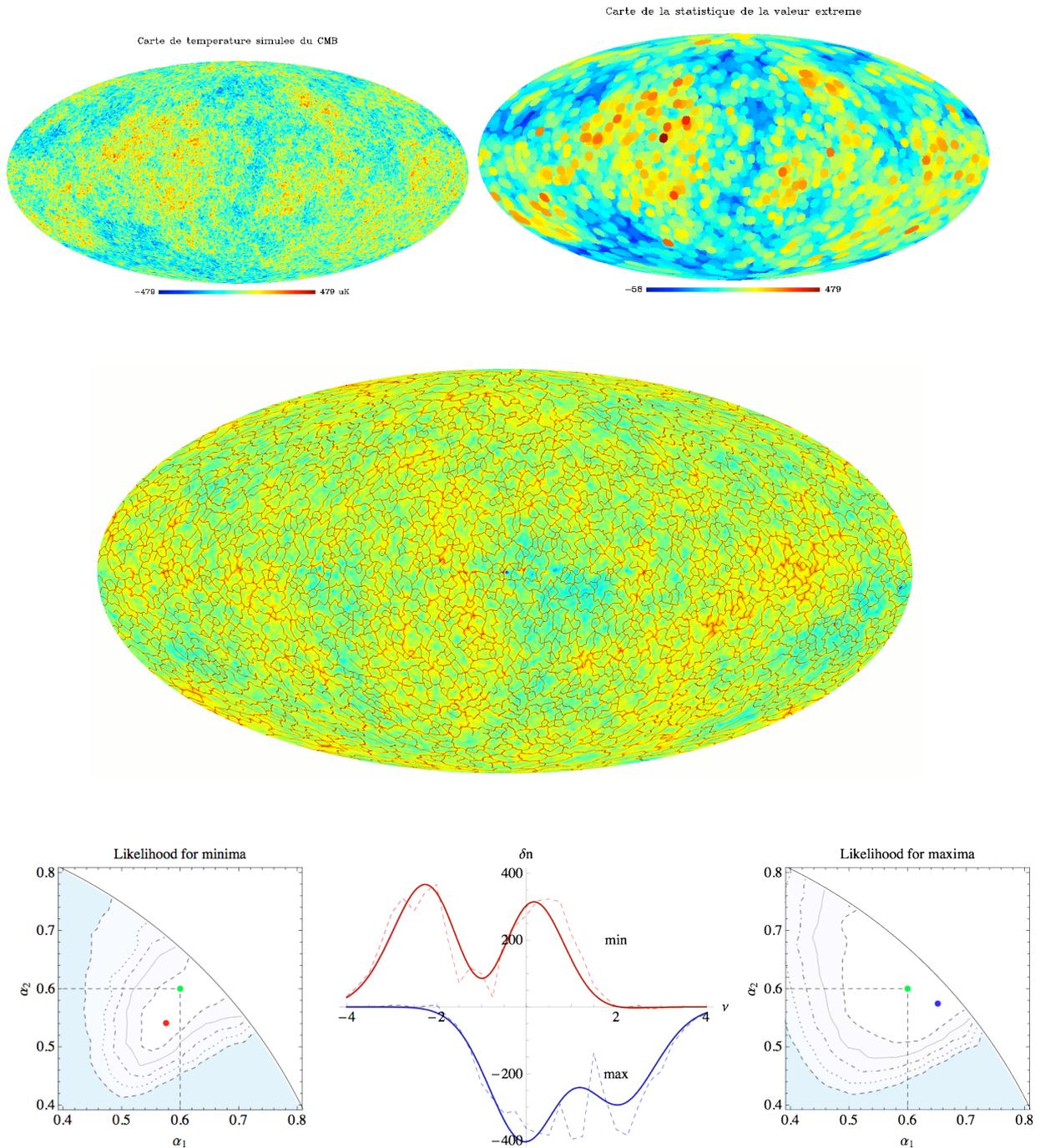
Enfin, l'analyse des données du ballon Boomerang a été poursuivie, en particulier sur la polarisation du CMB, et la détection d'éventuelles non-gaussianités du CMB et à la mesure de l'effet Sunyaev-Zeldovich (Veneziani et al. 2009). Les données de l'instrument BICEP installé au Pôle Sud et dédié à la mesure de la polarisation à grande échelle du CMB ont aussi été analysées.

### 5.1.2 CMB et les grandes structures

#### 5.1.2.1 CMB et les modèles de formation des structures

L'étude des événements rares dans une distribution, notamment les points chauds et froids du CMB et les plus gros amas de galaxies attendus dans l'Univers observable, représente une manière intéressante de contraindre les modèles de formation des grandes structures. Dans ce cadre, deux études ont été

menées (collaboration entre l'IAP et le département d'astrophysique de l'Université d'Oxford) : i) un calcul analytique de la fonction de distribution du maximum attendu dans une région de taille donnée sur un champ gaussien aléatoire (Figure 5.2, haut), validé par des expériences numériques (Colombi et al. 2011, voir aussi Gay, Pichon et Pogosyan 2011, Figure 5.2, bas), ii) un calcul analytique de la fonction de distribution de la masse attendue du plus gros amas de galaxies dans un volume de l'Univers donné (Davis et al. 2011), validé par des mesures issues de la simulation 4PI.<sup>1</sup>



**Figure 5.2.** Haut : à gauche, un champ gaussien aléatoire simulé sur la sphère, à droite la carte de la statistique des maxima du champ mesurés dans des disques centrés sur chaque pixel. On peut facilement deviner la taille du disque utilisé. Cette carte peut être en très bonne approximation déduite directement de la distribution des maxima locaux.

Centre : skeleton persistant de la carte WMAP.

Bas. Au centre, la correction non-gaussienne au comptage d'extrema sur une carte du CMB et les isocontours de vraisemblance correspondants à gauche et à droite.

### 5.1.2.2 CMB et lentilles gravitationnelles

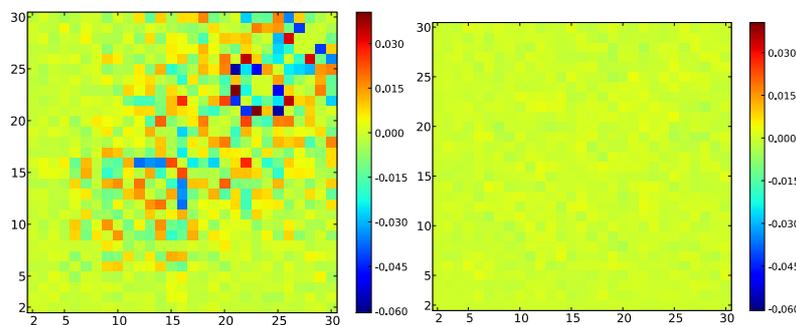
Dès l'arrivée des premières données trois mois après le lancement du satellite *Planck* (Mai 2009) (Lamarre et al. 2010, Tauber et al. 2010) les premières analyses des observations ont été effectuées afin de comprendre et améliorer les résultats sur le pointage du satellite et afin de prendre en compte des perturbations des données dues à la vitesse de déplacement du satellite (*dipôle-orbital*). A partir de 2011, l'étude de la vraisemblance des différentes théories cosmologiques au vu des données du CMB récoltées par *Planck* a débuté.

K. Benabed est coordinateur au niveau international (une vingtaine de chercheurs dont deux postsdoc IAP) du projet de mesure des effets de lentille gravitationnelle dans les données du satellite *Planck*.

Basak et al. (2009) ont travaillé sur la caractérisation des effets de lentille sur le CMB. Un nouveau code de simulation des effets de lentille faible des grandes structures sur le CMB d'une précision inégalée a été développé. Ce code est utilisé maintenant dans le cadre de la mission *Planck*.

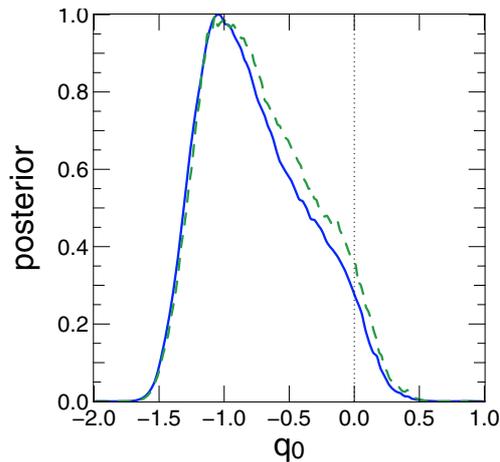
Un projet de construction d'une vraisemblance pour la caractérisation statistique des résultats de *Planck* a été mis sur pied. Cet outil mathématique est indispensable pour extraire des données une estimation des paramètres des modèles cosmologiques et pour améliorer la qualité des modèles. Ce travail est basé sur les résultats du projet ANR ECOSSTAT (2005-2009, IAP, LAM à Marseille et laboratoire TSI de Telecom-Paristech et du CEREMADE, Université Paris Dauphine).

L'objectif était d'améliorer les outils de caractérisation statistique des jeux de données astrophysiques et de les fonder en des représentations mathématiques cohérentes. Le travail réalisé s'est traduit principalement par la rédaction de quatre articles : le premier présente le résultat de la combinaison cohérente de différents jeux de données (Kilbinger et al. 2009) ; l'utilisation cohérente des dernières observations d'explosion de supernovae de type Ia dans le relevé CFHTLS et de mesure d'effets de lentille sur ce même relevé avec les données du rayonnement de fond était effectué pour la première fois ; le deuxième utilise ces mêmes données pour présenter un nouvel outil d'exploration bayésien (Wraith et al. 2009) ; le troisième décrit une particularité de ce nouvel algorithme qui permet de construire très simplement un critère de comparaison entre différents modèles cosmologiques (Kilbinger et al. 2010), et enfin, un dernier article appliquant les méthodes mathématiques développées dans le cadre plus général décrit ci-dessus, au problème de la caractérisation statistique des anisotropies de température du rayonnement de fond aux plus grandes échelles (Benabed et al. 2009, Figure 5.3). Ce dernier travail présente la première introduction en astrophysique de la construction de vraisemblance approchée à base de copule, reprise depuis dans la littérature. Par ailleurs, les outils informatiques développés sont maintenant distribués ([www.cosmopmc.info](http://www.cosmopmc.info)) et utilisés dans le cadre du projet *Planck* ainsi que par d'autres équipes.



**Figure 5.3.** Mesure de la corrélation entre différents multipoles bas des données d'anisotropies de température du rayonnement de fond cosmologique. La figure de gauche présente, dans le cas des données WMAP, une figure de cette corrélation obtenue après une coûteuse intégration Monte-Carlo (700 CPU-heures). La figure de droite montre la différence entre la figure de corrélation (gauche) et la figure de corrélation approchée calculée par notre approximation ; les différences sont infimes, de l'ordre de grandeur de la précision du calcul Monte-Carlo.

L'analyse du relevé CFHTLS pour mesurer l'effet de lentille des grandes structures observé dans ces données comme l'excès d'alignement cohérent aux échelles moyennes et grandes de l'ellipticité observée des galaxies d'arrière-plan a été effectué. Une analyse des conséquences cosmologiques de ces observations a été menée à bien grâce à des codes permettant de calculer des prédictions d'observations. Ces codes sont maintenant intégrés aux outils ECOSSTAT mentionnés ci-dessus (Fu et al. 2008). C'est aussi grâce à ces outils informatiques qu'a pu être réalisée une ré-analyse tomographique des données d'effet de lentille du relevé COSMOS permettant la première détection de l'accélération de l'expansion de l'Univers basée exclusivement sur des données d'effet de lentille gravitationnelle (Figure 5.4, Schrabback et al. 2010).

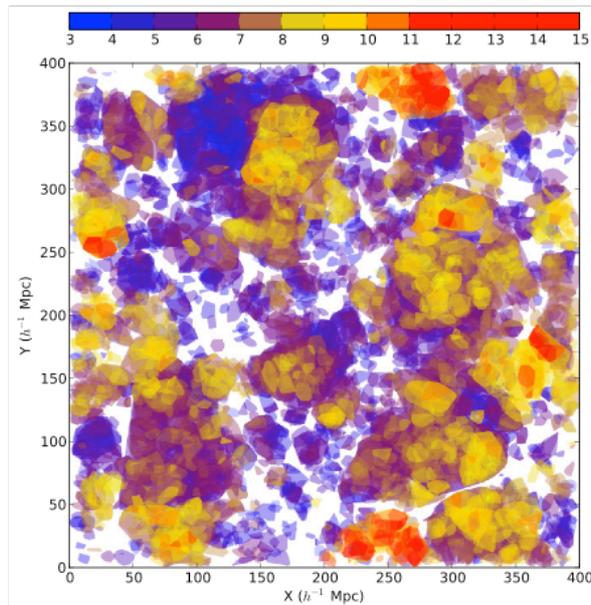


**Figure 5.4.** Densité de probabilité postérieure après analyse des données COSMOS pour que l'Univers soit en expansion accélérée (valeurs négatives du paramètre de décélération  $q_0$ ). Dans la courbe bleue, la probabilité que l'Univers soit en expansion accélérée est de 95%.

### 5.1.3 CMB et cosmologie primordiale

Par ailleurs d'autres sujets de recherche ont été initiés afin de contraindre, de la manière la plus directe possible, les conditions primordiales de l'Univers, et en particulier ses propriétés aux plus hautes énergies lors des premiers instants de l'Univers. Ce travail ouvre une fenêtre cosmologique sur la physique fondamentale de l'aube cosmique, à l'échelle de Planck, bien au-delà de la portée des accélérateurs de particules. Smith, Kamionkowski et Wandelt (2011) ont montré que les mesures de non-gaussianité conduisent à de nouvelles contraintes sur les processus qui ont créé les perturbations primordiales. Ben Wandelt est co-responsable des non gaussianités primordiales dans les données de *Planck*. Son groupe est en train de développer les outils nécessaires pour caractériser ces signatures à partir des données de *Planck*, tout en modélisant l'impact des anisotropies secondaires induites par les systématiques instrumentaux. *Planck* va accroître notre connaissance des non-gaussianités primordiales par un facteur non négligeable par rapport aux contraintes actuelles de WMAP ; l'interprétation des données correspondantes va nécessiter une étude détaillée des propriétés statistiques de l'estimateur de bispectre. Par ailleurs, la statistique de la longueur du squelette, qui correspond à une caractérisation morphologique des anisotropies du CMB, est une sonde prometteuse supplémentaire de non-gaussianité (Zhan et al. 2010).

Les analyses de corrélation à N points sur la sphère céleste nécessitent des temps de calcul importants. Elsner et Wandelt (2011) présentent une nouvelle approche numérique reposant sur le parallélisme massif des cartes graphiques pour accélérer les étapes clés de l'inférence des paramètres cosmologiques à partir des données du CMB cosmologique à la résolution de *Planck*. Lavaux et Wandelt (2011) (Figure 5.5) ont développé un moyen rapide et précis pour simuler l'effet de lentille gravitationnelle du CMB dû à la distribution de masse qui courbe la trajectoire des photons sur leur chemin de la surface de dernière diffusion.



**Figure 5.5.** Une représentation d'un arbre hiérarchique de vides pour contraindre l'énergie noire.

Par ailleurs l'analyse des données des relevés des structures à grande échelle via la généralisation et l'application des techniques d'analyses bayésiennes développées précédemment pour le CMB est poursuivie. En particulier, Jasche et Wandelt (2011) ont démontré notre capacité à correctement prendre en compte et même à réduire les erreurs sur les *redshifts* photométriques. Les publications récentes ont aussi souligné le fort potentiel des observations de l'absorption du fond diffus cosmologique par la raie 21cm de l'hydrogène. En principe, ces observations peuvent contraindre les phénomènes prédits par la physique au delà du modèle standard, comme la variation des constantes fondamentales ou la présence d'un réseau de cordes cosmiques, qui se forment génériquement, soit lors des transitions de phase cosmique soit lors de la phase finale de certains modèles d'inflation. Le groupe a effectué des simulations afin de valider la conception de nouveaux instruments susceptibles d'observer l'Univers primordial à partir du sol ou depuis l'espace aux fréquences radio (Sutter, Wandelt et Maler 2011). Ces trois thèmes de recherche vont continuer à être développés à travers une combinaison d'études théoriques, et la participation aux efforts d'observation tels que *Planck* pour le CMB, les relevés d'énergie noire, LSST, et maintenant *Euclid*. Depuis son arrivée à l'IAP, B. Wandelt a joint ses forces à celle de J. Silk pour former le projet « Initiative en Cosmologie et en Physique des Particules » (IPAC, voir chapitre 7.1.1).

Toujours sur le volet théorique, la première analyse de confrontation cohérente de certains modèles de quintessence non minimalement couplés avec des données de cisaillement gravitationnel en provenance de VIRMOS-Desart et du CHFTLS a été effectuée (Schimd et al. 2007) par un membre du groupe (Alain Riazuelo) ; il a mené à bien le calcul numérique de l'évolution des perturbations cosmologiques. Dans ce travail, le parti était pris de considérer des modèles de quintessence jugés réalistes (potentiels dits de Ratra-Peebles ou de supergravité), mais il demeure incertain que ces modèles correspondent effectivement à la quintessence (si celle-ci est bien la source de l'énergie noire). Dans un travail ultérieur, une approche plus phénoménologique a été adoptée : sans préjugé du réalisme du modèle sous jacent, quelles sont les caractéristiques de l'évolution du champ de quintessence qui sont effectivement observables par des mesures de supernovae ? Ce travail était motivé par le fait que les premiers modèles de quintessence (modèle de Ratra-Peebles) mettaient longtemps, lors de l'évolution de l'Univers avant de se comporter comme une constante cosmologique, ce qui les rendait peu compatibles avec les données. Par contre, les modèles de supergravité connaissaient une transition plus rapide vers le régime de quasi-constante cosmologique. La possibilité de détecter ou non une transition rapide dans le champ de quintessence méritait donc d'être étudiée (Douspis et al. 2008, Ferramacho et al. 2010), avec des conclusions encourageantes.

## 5.2 Sonder les grandes structures à partir des effets de distorsion gravitationnelle faible des galaxies

L'effet de distorsion gravitationnelle faible (*Weak Lensing* – WL, voir <http://terapix.iap.fr>) modifie les formes intrinsèques des galaxies sous l'effet des champs gravitationnels. Les effets de distorsion gravitationnelle cosmologique (*Cosmic Shear*) sont une de ses manifestations. Elles sont engendrées par les effets cumulés des grandes structures rencontrées pendant le parcours des photons le long d'une ligne de visée. L'analyse statistique du *cosmic shear* sur les galaxies permet de sonder l'histoire du taux de croissance des structures dans l'Univers et donc d'explorer la distribution de matière noire à toutes les échelles et la source de l'accélération de l'expansion. Pour cela, il faut être capable de mesurer les formes des galaxies avec une très grande précision ainsi que leur *redshift* approximatif (*redshifts* photométriques).

L'IAP est un des leaders mondiaux dans le domaine du *cosmic shear*. Au cours de la période 2008-2011, le groupe de l'IAP s'est concentrée sur le CFHTLS (voir Figure 5.6), le relevé HST COSMOS et la préparation de la mission *Euclid*.

**CFHTLS** : la fin de 2008 a vu la sortie de l'analyse de l'ensemble des données du CFHTLS Wide. L'analyse des données et leur interprétation cosmologique ont été publiées par Fu et al. (2008) à partir des *redshifts* photométriques mesurés par Coupon et al. (2009). L'étude de Fu et al. (2008) reste encore à ce jour le meilleur travail d'analyse d'un grand relevé portant sur le *cosmic shear* et a fait l'objet d'un communiqué de presse CNRS (<http://www.insu.cnrs.fr/co/univers/extragalactique-et-univers/270-millions-d-annees-lumiere-la-plus-grande-structure-de-matiere>).

Elles ont permis une analyse MCMC (Markov Chain-Monte Carlo) conjointe des données WL(CFHTLS)-SNLS-WMAP5 par Kilbinger et al. (2009) qui montre qu'ensemble elles sont cohérentes avec une constante cosmologique.

A la suite de cette première phase d'analyse du *cosmic shear* dans le CFHTLS, l'ensemble des scientifiques européens et canadiens intéressés par le CFHTLS s'est regroupé dans un nouveau consortium, le CFHTLens, avec pour objectif de comprendre et réduire d'un facteur 2 à 3 les effets systématiques qui contaminent les données du CFHT. Cette étude approfondie porte sur l'analyse des « *Spatial Point Spread Function* » (PSF), les mesures de forme des galaxies, les *redshifts* photométriques et les effets d'alignement intrinsèque des galaxies. Ce travail, qui est aussi préparatoire aux futurs grands relevés WL (DES, KIDS, HSC, LSST, *Euclid*) a demandé des efforts très importants d'une dizaine de personnes pendant trois années. A l'IAP, C. Bonnett, et Y. Mellier travaillent sur ce projet qui est en phase d'achèvement. Une vingtaine d'articles sont soumis. Ils seront présentés officiellement à l'AAS en janvier 2012. Le premier article (Hildebrandt et al. 2011) vient d'être diffusé.

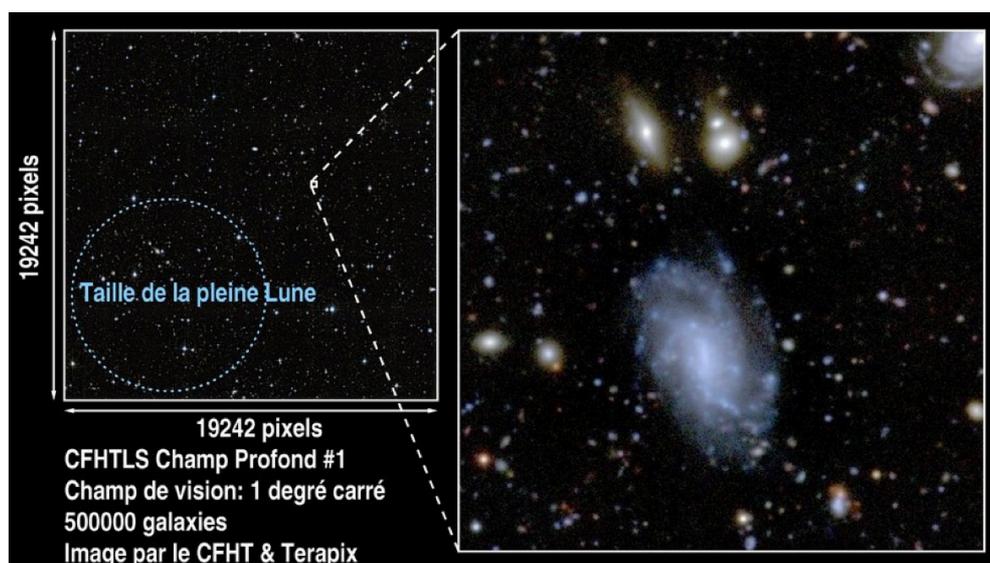


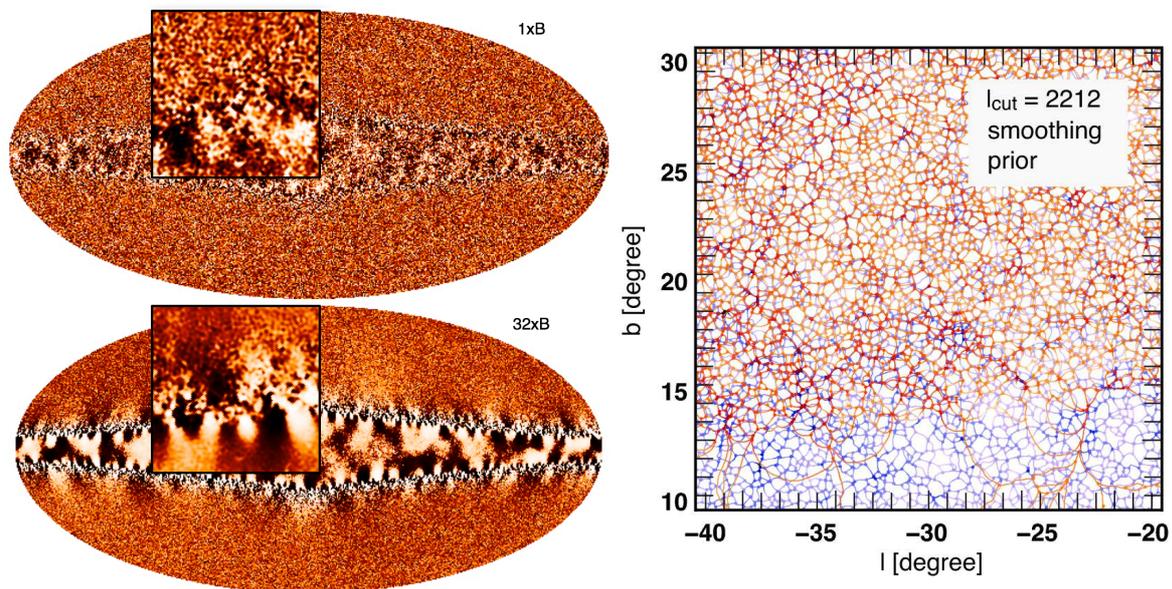
Figure 5.6. Un des champs profonds du CFHTLS.

**COSMOS** : le champ HST COSMOS dont la qualité d'image est inégalée est parfaitement complémentaire du CFHTLS qui surclasse tous les autres par la taille du champ et sa profondeur. Une analyse *weak lensing* tomographique du champ COSMOS, identique à celle du CFHTLS, en utilisant les *redshifts* photométriques de Ilbert et al. (2009) a permis pour la première fois de vérifier de façon indépendante que l'Univers est en expansion accélérée (i.e.  $q_0 < 0$ ). Schrabback et al. (2010) ont développé un travail qui est un véritable précurseur de la mission spatiale *Euclid* (communiqué de presse CNRS : <http://www2.cnrs.fr/presse/communiqu/1837.htm>).

Les effets de *weak lensing* dans le champ COSMOS ont aussi été utilisés conjointement avec des observations *XMM-Newton*. Ensemble, elles permettent de reconstruire la forme et l'évolution de la relation masse-luminosité des groupes émetteurs X dans l'Univers (Leauthaud et al. 2010).

**Euclid** : le groupe *weak lensing* de l'IAP est fortement impliqué dans la préparation de la mission *Euclid* et de sa sélection. Au cours de la période 2008-2011, il a participé à la définition des objectifs et des spécifications scientifiques. Karim Benabed est l'un des responsables du *working group weak lensing* de la mission et Y. Mellier est responsable scientifique de la mission (*Chair du Euclid Consortium board*, (voir *Euclid* au chapitre 7.2.3).

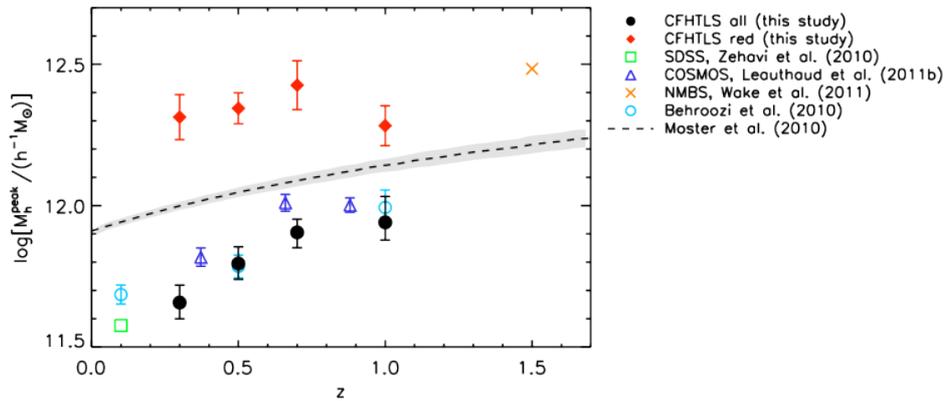
Enfin, concernant le volet simulation, Pichon, et al. (2010) ont abordé le problème de la reconstruction de cartes de convergence gravitationnelle (à partir de mesures d'ellipticités sur l'ensemble de la voûte céleste). Pour ce faire, ils ont utilisé les cartes de kappa obtenues à partir de la simulation Horizon- $4\pi$  et transposé sur la sphère les techniques d'inversion pénalisées développées par ailleurs. Ce travail d'inversion gère en particulier les masques et la contamination associée en modes "B", la non linéarité du modèle, et les amas quasi ponctuels à l'échelle de la carte par une pénalisation adaptative. Ils utilisent aussi le squelette (voir ci-dessous) et les comptages des points sources pour quantifier la qualité de la reconstruction. Ils démontrent que l'interpolation associée à la régularisation est extrêmement efficace pour reconstruire le champ de convergence dans les masques (voir Figure 5.7, Pichon et al. 2010, Teyssier et al. 2009).



**Figure 5.7.** Gauche : exemple de fuite des modes B due aux masques galactiques pour l'inversion de la convergence cosmique sur l'ensemble du ciel ; droite : squelette reconstruit (en rouge) au voisinage du masque (relativement au "vrai" filaments en bleu). Les données virtuelles ont été produites avec la simulation horizon  $4\pi$ .

### 5.3 Sonder les grandes structures à partir des relevés photométriques et spectroscopiques des galaxies

Deux sujets principaux ont été abordés : i) comprendre l'évolution des grandes structures de l'Univers des grands *redshifts* jusqu'au temps présent et sa relation avec le domaine sous-jacent de densité de matière noire, et ii) sonder l'Univers à *redshifts* intermédiaires, où la formation d'étoiles et l'assemblage en masse des galaxies ont atteint leur apogée.



**Figure 5.8.** Masse des halos pour lesquels a lieu le pic d'efficacité de formation d'étoiles. Les ronds noirs pleins concernent l'échantillon de galaxies CFHTLS complet, les points rouges, l'échantillon CFHTLS des galaxies rouges. A plus grand redshift, les sites de formation d'étoiles migrent vers des halos de plus en plus massifs.

Les amas de galaxies peuvent fournir des indices importants relativement au processus de formation des galaxies comme la distribution des galaxies dépend sensiblement de leurs histoires de formation. McCracken et al. (2008) ont démontré que les *redshifts* photométriques pourraient être utilisés pour étudier les propriétés de *clustering* des galaxies en fonction du décalage spectral, des couleurs intrinsèques des quatre champs du CFHTLS profond produite par TERAPIX. La précision de ces mesures a été comparée à des mesures spectroscopiques sur des échantillons plus petits qui nécessitent de nombreuses heures de pause sur des télescopes de la classe 8 mètres. Un des principaux résultats de ce travail a été de montrer que, pour des luminosités intermédiaires, la couleur intrinsèque joue un rôle plus important dans la détermination des propriétés de *clustering* d'un objet que, par exemple, sa luminosité absolue, ce qui confirme le rôle important que jouent les effets environnementaux dans la formation des galaxies.

Toutefois, ce travail présentait plusieurs limitations qui ont dû être chacune surmontées : d'une part, bien que le CFHTLS "champs profonds" produise des mesures très précises de *redshifts* photométriques pour des luminosités faibles, le nombre d'objets lumineux est relativement petit, ce qui rend difficile la construction d'échantillons couvrant une large gamme de luminosités. C'est important, parce que les galaxies massives plongées dans des halos de matière noire plus ou moins massifs sont supposées avoir subi une évolution assez différente. De même, l'interprétation de ces résultats dans le cadre des modèles de formation des galaxies nécessite un cadre théorique qui pourrait facilement être appliqué à des observations. Pour ces raisons, deux tâches importantes ont été entreprises : premièrement, des catalogues de *redshifts* photométriques ont d'abord été générés pour toutes les galaxies du CFHTLS, ces *redshifts* photométriques ont depuis été distribués à la communauté et sont entièrement décrits dans Coupon et al. (2009). Deuxièmement, une nouvelle implémentation du «modèle de halo» analytique a été développé.

Dans ce modèle, on suppose que le nombre de galaxies à l'intérieur d'un halo de matière noire donné est simplement une fonction monotone de la masse du halo (voir Cooray et Sheth, 2002 pour une revue). A partir de cette hypothèse, il est possible de prédire les propriétés de *clustering* des échantillons de galaxies sélectionnées en masse en fonction de leur *redshift* et de leur luminosité. En comparant les propriétés de *clustering* observées avec les prédictions du modèle, on peut déduire la masse des halos de matière noire hôtes de la population de galaxies. Dans l'Univers local, il est

---

maintenant bien établi que l'efficacité de formation d'étoiles dépend de la masse du halo hôte (*Gao et al. 2011*) ; notamment les halos qui forment le plus efficacement des étoiles ont une masse d'environ  $10^{10}$  masses solaires. Dans des halos plus massifs ou moins massifs, l'efficacité de formation stellaire diminue en raison d'un ensemble varié de processus physiques. Une question clé est de savoir dans quelle mesure cette efficacité de formation d'étoiles dépend du *redshift* et de la masse du halo car cela peut fournir des indices concernant le processus d'assemblage des galaxies. Dans une première application du modèle de halo, des mesures précises du *clustering* de plusieurs millions de galaxies ont été combinées avec ce modèle analytique pour montrer que les masses de halo, où les étoiles se forment le plus efficacement semblent migrer lentement vers les halos de moindre masse à bas *redshift* (Coupon et al. 2009, Figure 5.8). Ce travail fournit également l'analyse la plus détaillée et la plus exhaustive de l'évolution du facteur de «biais» des galaxies (et sa relation entre la matière sombre et la matière lumineuse) et l'analyse de la dépendance du *clustering* des galaxies vis à vis de la luminosité et la couleur, correspondant à une extension des mesures du *Sloan Digital Sky Survey* à l'époque où l'Univers avait moins de la moitié de son âge actuel.

Bien que la taille du CFHTLS couvre plus de  $100 \text{ deg}^2$ , il manque les données dans l'infrarouge proche sur une grande partie de cette zone, ce qui rend impossible la détermination précise des *redshifts* intermédiaires où la formation d'étoiles et le *clustering* des galaxies ont atteint leur apogée. Dans le projet COSMOS, une seule région de  $2 \text{ degrés}^2$  du ciel est couverte par la plupart des grands instruments, à la fois terrestres et spatiaux, visant à fournir l'un des plus riches ensembles de données multi-longueur d'onde dans l'Univers lointain. Le projet TERAPIX a été étroitement impliqué dans la production de jeux de données pour COSMOS, y compris en profondeur dans la bande  $u^*$  et K grâce aux observations de MegaCam et WIRCAM du TCFH. Les observations WIRCAM dans la bande Ks ont couvert le champ COSMOS tout entier à une profondeur en magnitude  $KAB \sim 23$  et ont été réduites par TERAPIX. Ces observations représentent le sondage le plus profond et le plus large dans le proche infrarouge de l'Univers lointain (McCracken et al. 2010). Ces relevés ont démontré de façon concluante que les galaxies elliptiques les plus massives étaient déjà en place à *redshift* intermédiaire et que, après cette époque, l'essentiel de l'évolution de la fonction de masse globale se produit à plus faible masse (Ilbert et al. 2010). Ces données ont été utilisées dans de nombreux autres travaux.

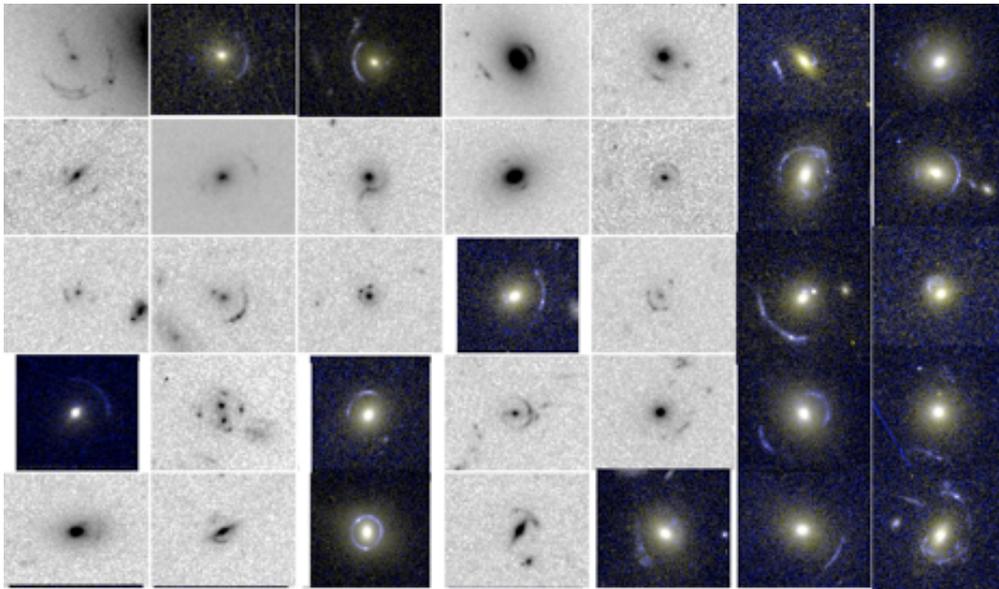
Des progrès considérables ont également été réalisés en ajoutant le proche infrarouge aux données des champs CFHTLS profonds. Grâce à un projet ANR intitulé "Désir" (PI, Jean-Paul Kneib), dirigé à Paris par Henry McCracken, un post-doctorant a été embauché durant la période 2008-2010. En collaboration avec TERAPIX, le pipeline de réduction de données du proche infrarouge développée par TERAPIX pour réduire l'ensemble des données JHK extraits des champs CFHTLS profonds a été utilisé (Bielby et al. 2011). Ces données ont été rendues publiques par le CCDA. Elles ont déjà conduit à la découverte de plusieurs nouveaux amas de galaxies à haut *redshift* et de ce fait à un test indépendant de notre modèle cosmologique (Bielby et al. 2010).

Pour comprendre les effets des processus physiques tels que les vents issus de supernovae sur la formation des galaxies, il est nécessaire d'atteindre des masses limites inférieures à plus grands *redshifts*. Le relevé UltraVISTA, projet qui sera réalisé sur cinq ans sur le nouveau télescope VISTA de sondage infrarouge proche à Paranal au Chili, cartographiera tout le champ COSMOS à une profondeur deux à quatre fois plus élevée que les données dans le proche infrarouge du champ COSMOS.

Les données décrites ici seront utilisées pour étudier la relation entre la masse sombre des halos de matière noire et la formation d'étoiles à  $z \sim 2$ , d'une manière analogue à ce qui a été réalisé à  $z \sim 1$  avec le CFHTLS. Une thèse a débuté (direction conjointe, Henry McCracken et Stéphane Colombi). La première année des données d'UltraVISTA a été réduite en collaboration avec le centre de données TERAPIX, et a été mis à la disposition de la communauté astronomique à la fin de 2010. TERAPIX a également été étroitement impliqué dans les opérations de réduction des données du nouveau télescope VISTA à Paranal. S'appuyant sur l'expertise acquise par WIRCam au CFHT, le pipeline de WIRCAM été déployé avec succès pour le télescope VISTA. Le principal avantage de ce pipeline par rapport aux pipelines de réduction accessibles au public correspond à la précision de l'algorithme de soustraction du ciel qui a été mis en œuvre, et qui peut être exécuté dans un environnement de traitement distribué, comme sur le *cluster* TERAPIX. Ce pipeline a été appliqué à la première année de données UltraVISTA qui sera bientôt rendue publique par l'ESO.

## 5.4 Sonder les halos de matière noire à partir des lentilles gravitationnelles fortes

Des travaux en cosmologie observationnelle s'orientent vers l'étude des propriétés des condensations de masse (galaxies et amas de galaxies) dans l'Univers au moyen de techniques de lentilles gravitationnelles. La principale caractéristique visée est la distribution en matière sombre qui, quoique de nature encore inconnue, est l'un des principaux constituants du modèle actuel de l'Univers. Pour mener à bien ce projet, (Gavazzi *et al.* 2007, 2008) ont constitué le plus grand échantillon de lentilles gravitationnelles à *redshift* intermédiaire ( $z \sim 0,6$ , Figure 5.9) grâce à une analyse unique de l'imagerie multi-bande du CFHTLS. Ce projet, le SL2S, combiné à l'autre relevé majeur de lentilles à bas  $z$ , du SLACS, issu de la spectroscopie du SDSS a conduit pour la première fois à des contraintes fortes sur la pente du profil de densité dans les régions centrales des galaxies massives ainsi que sur leur évolution. Ces échantillons uniques lui ont permis de conduire des analyses combinées *lensing* et dynamique puissantes. Cela fut rendu possible grâce à une abondante attribution de temps aux télescopes Keck et VLT mais aussi grâce à une régulière attribution de temps au télescope spatial pour faire le suivi en imagerie haute-résolution, ingrédient clé des analyses de lentille. Ces nombreuses allocations de temps d'observation sur les meilleurs instruments actuels témoignent de la pertinence et du rayonnement international des projets SLACS et SL2S (Gavazzi *et al.* 2008).



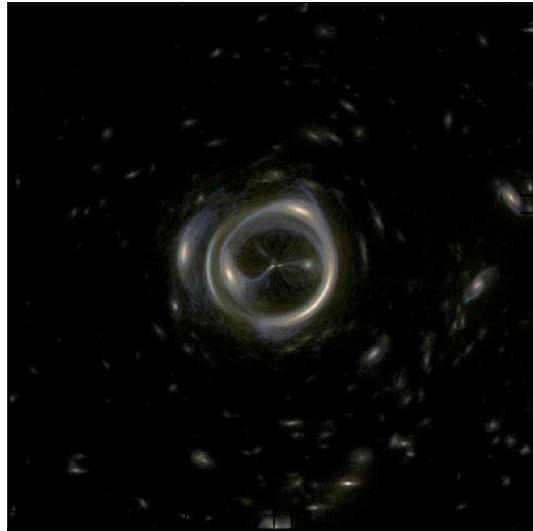
**Figure 5.9.** Galerie de lentilles gravitationnelles découvertes dans les images du CFHTLS et suivies par le télescope spatial Hubble pour une confirmation et une modélisation *lensing* détaillée.

Outre les applications scientifiques à court terme rendues accessibles par les échantillons SLACS et SL2S, ces travaux de recherche automatique de lentilles dans l'imagerie grand-champ constituent un travail de prospective essentiel pour les applications futures aux grands relevés à venir, tels que le LSST et *Euclid*. Dans ce contexte, un membre du groupe (Raphaël Gavazzi) s'est tout particulièrement consacré au développement d'outils de modélisation de lentilles, qui sont uniques par leurs capacités et leur portabilité. Ces derniers ont permis de conduire les analyses d'images HST mais forment aussi la pierre angulaire du futur programme de détection automatique.

Par ailleurs, des comparaisons fines entre les prédictions des simulations numériques et les observables *lensing* telles que mises en évidence dans les données au sol et spatiales sont effectuées. L'idée est de valider les ingrédients présents dans les simulations hydrodynamiques (prescriptions pour la formation stellaire et la rétroaction notamment) mais aussi d'analyser et corriger de possibles biais systématiques présents dans l'analyse observationnelle. À terme, il est souhaitable que

---

les analyses combinées *lensing+dynamiques* soient suffisamment précises pour tirer le meilleur parti du futur instrument MUSE au VLT. Depuis la fin 2010, l'analyse des lentilles gravitationnelles fournies par la nouvelle génération de relevés submillimétriques rendus possibles par le satellite *Herschel* a débuté. Les perspectives futures sont très prometteuses.



**Figure 5.10.** Un exemple d'arc gravitationnel synthétique produit avec *Mare Nostrum*.

Grâce à la mise à disposition par le centre TERAPIX de relevés profonds (CFHTLS) un nombre important de lentilles gravitationnelles fortes ont été détectées puis étudiées : détection automatique des candidats lentilles de différents types (Cabanac et al. 2007), en particulier les galaxies spirales *edge-on* (Sygnet et al. 2010) ; des logiciels de détection sur tous les champs des versions du CFHTLS-*Deep* ont été mis en oeuvre. Une fois la détection de candidats lentilles effectuée, des clichés à haute résolution et/ou des spectres de ces objets sont obtenus grâce au temps d'observation alloué sur le VLT, le Keck ou le HST. Cette dernière étape permet d'analyser la géométrie des lentilles et de préciser les caractéristiques des halos de matière noire responsables de la déflexion gravitationnelle (Limousin et al. 2009). Ces travaux ont également permis l'encadrement en co-tutelle de la thèse d'une étudiante chinoise (Tu et al. 2008, 2009).

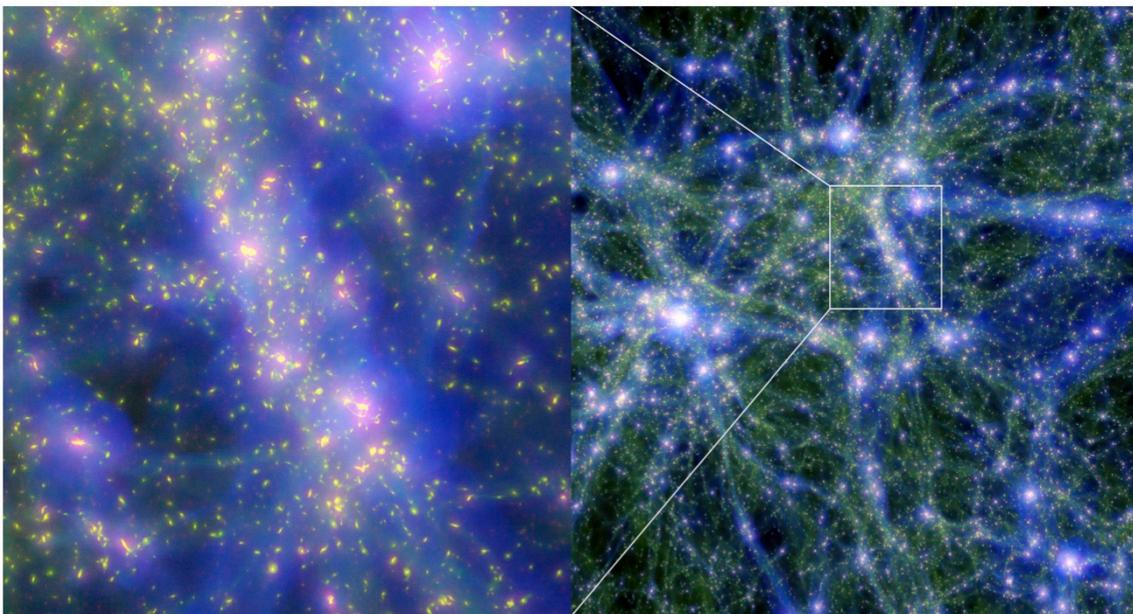
Une méthode automatique de reconnaissance des arcs gravitationnels a été développée (Alard 2006). La reconnaissance automatique des arcs est basée sur la mise au point d'un estimateur optimal de l'élongation locale. Des cartes d'élongation sont ensuite produites et les arcs y sont reconnus par seuillage et connectivité. Cette méthode a permis la détection d'un grand nombre de candidats dans le *survey* CHFT (Cabanac et al. 2007, More et al. 2011). Les nombreux systèmes d'arcs gravitationnels identifiés ainsi que les observations HST complémentaires offrent des informations sur la distribution de masse dans les lentilles et en particulier sur la matière noire. Cependant les techniques de modélisation conventionnelles butent sur le problème de la dégénérescence des modèles et leur manque de généralité.

Afin de développer une méthode plus globale et capable de dégager des quantités non dégénérées, une nouvelle approche des lentilles gravitationnelles fortes basée sur une théorie perturbative d'une situation singulière a été développée (Alard 2007). Cette approche ramène les lentilles fortes à un ensemble de quantités non dégénérées qui offrent une description générale du potentiel. La nouvelle approche perturbative a été étudiée pour différents types de modèles de halo de matière noire, comportant une ellipticité ainsi que des sous-structures. Alard (2008) a montré que cette méthode permet i) une reconstruction satisfaisante des images, ii) de remonter facilement aux paramètres de la distribution de masse et en particulier à la masse des sous-structures.

La méthode perturbative a également été testée avec des halos de matière noire réalistes issus de simulations numériques à haute résolution (Peirani et al. 2008a, Figure 5.10). Il a été démontré que la reconstruction des images était dans tous les cas meilleure que 1% (en unités du rayon d'Einstein.) L'efficacité de la méthode étant acquise, celle-ci a été appliquée à deux cas de lentilles gravitationnelles observés avec HST. La première lentille reconstruite avec cette méthode est un petit amas de galaxies dont le potentiel est complexe et démontre la présence de 2 halos et donc d'une probable fusion (Alard 2009). Il est intéressant de noter que les méthodes conventionnelles avaient toutes échoué à reconstruire cette lentille (ceci étant dû à sa complexité). La deuxième lentille est une seule galaxie située à la périphérie d'un amas. Dans ce cas il a été montré que la méthode permettait la séparation du champ propre à la galaxie et de celui extérieur au rayon d'Einstein de la galaxie (Alard 2010).

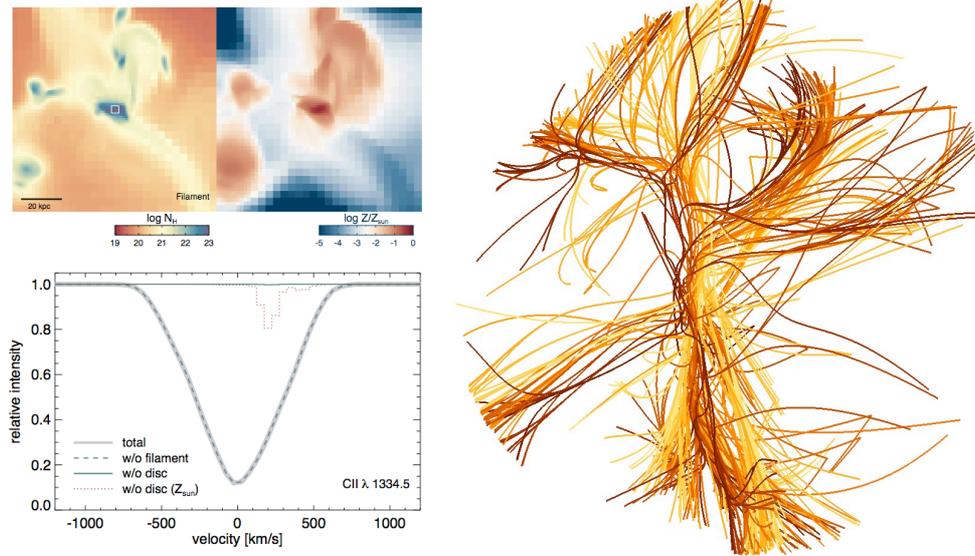
## 5.5 Cosmologie numérique et formation des galaxies

Le groupe a activement contribué à la mise en oeuvre du projet Horizon (et plus récemment à son extension Horizon-UK) ; il s'est impliqué dans la réalisation et la post analyse des simulations hydrodynamiques « physique complète » *Mare Nostrum* (Figure 5.11) ( $1024^3$  particules dans  $50 h^{-1}$  Mpc avec 4 niveaux de raffinement) et de matière noire Horizon  $4\pi$  ( $4096^3$  particules sur 2 Gpc/h ; Teyssier et al. 2009, Davis et al. 2011, Le Goff et al. 2011) et en particulier sur la génération des conditions initiales (Prunet et al. 2008) ; le suivi des runs ; l'élaboration d'algorithmes d'analyses et leur parallélisation (*powmes* : spectre de puissance multi-échelle, Colombi et al. 2009) ; la production systématique des catalogues des structures et des sous-structures ; la génération de la base de données synthétiques associée à partir des propriétés morphologiques et spectroscopiques des galaxies générées et la production de catalogues d'observables virtuelles associées et leur mise en ligne (Gay et al. 2010).



**Figure 5.11.** Vue multi-échelle des champs physiques de la simulation *Mare Nostrum* à redshift 1,5. La simulation a pour dimension 50 Mpc/h ; le zoom de gauche correspond à une région de 10 Mpc/h. Cette simulation trace la formation stellaire, les métaux, la rétroaction.

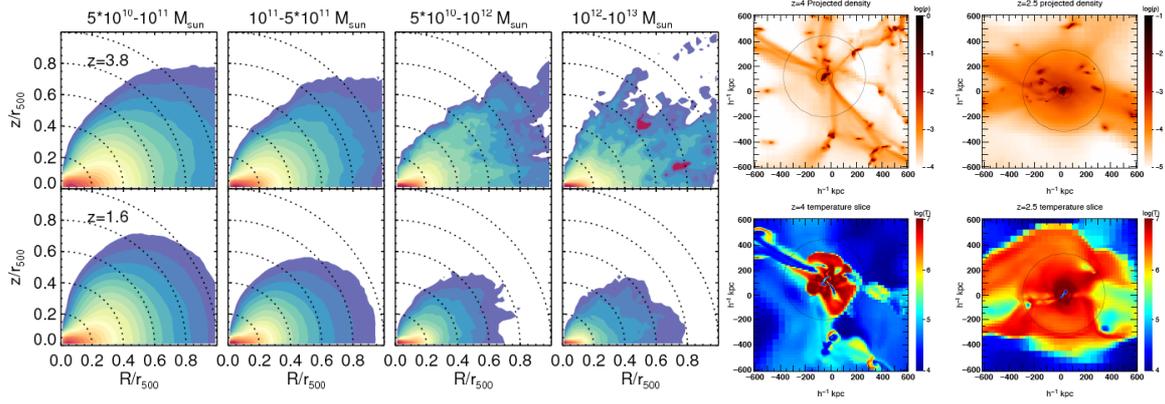
Ce travail a aussi conduit à l'analyse des cartes des différents champs physiques et l'analyse des processus d'accrétion au rayon du viriel (Ocvirk, Pichon et Teyssier 2008, Guillet, Teyssier et Colombi 2010), et à l'étude de fonction de luminosité et de son évolution cosmique (voir Figure 5.11, Figure 5.16 gauche, Devriendt et al. 2010).



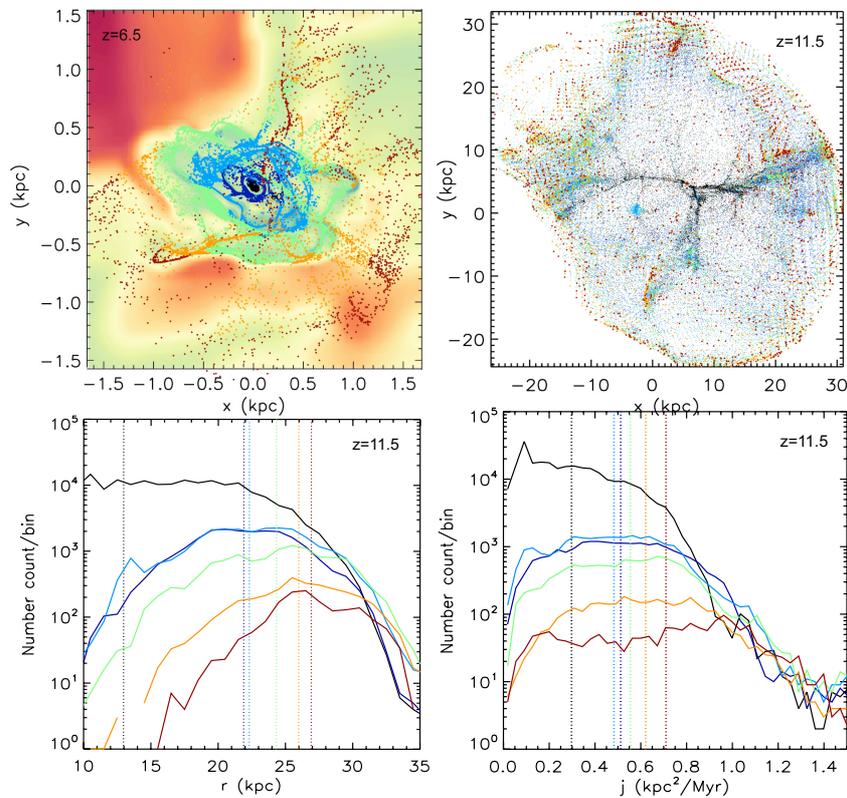
**Figure 5.12.** A gauche : carte de densité de colonne et de métallicité d'un amas typique et profil de raie correspondant montrant que les courants froids ne sont pas visibles en absorption. A droite : balayage cosmique des filaments centré sur un amas.

### 5.5.1 Processus de formation des galaxies dans leur environnement

Si l'environnement joue un rôle important dans l'établissement des caractéristiques des disques de galaxies (spirales, gauchissement, disques épais), son influence est modulée par la propension intrinsèque que possède un objet à réagir ou non à ces perturbations. La cosmologie numérique moderne atteint aujourd'hui une bonne précision pour les calculs de dynamique, ce qui lui permet d'aborder l'historique de la génération de galaxies de type Voie Lactée dans un contexte réaliste, avec une résolution suffisante pour explorer la structure interne de la Galaxie jusqu'à la centaine de parsecs. Plus spécifiquement Ocvirk, Pichon et Teyssier (2008) ont montré que la bimodalité observée (figure 5.13, droite) dans les propriétés spectro-photométriques des galaxies pouvait peut-être s'expliquer par un effet de rétroaction négative des galaxies les plus massives à *redshift* 2. En raison de leur formation stellaire plus élevée, et compte tenu de la métallicité du gaz dans leur environnement direct, elles éjectent plus d'énergie thermique dans le milieu intergalactique et coupent efficacement l'accrétion filamentaire de gaz froid (Figures 5.1 et 5.12). A contrario, cette accrétion continue pour les galaxies moins massives. Ce travail a aussi fait l'objet de la publication d'une lettre dans Nature (Dekel et al. 2009) qui montre que ce processus d'accrétion en gaz permet une formation stellaire importante, correspond au mode principal de formation stellaire à redshift intermédiaire. Il a aussi été montré que les fonctions de luminosité synthétiques de *Mare Nostrum* dans l'UV étaient compatibles avec les observations les plus récentes, modulo un modèle de poussière cohérent avec la métallicité de la simulation (Devriendt et al. 2010). Gay et al. (2010) ont étudié les propriétés morphologiques des galaxies en fonction de leur environnement cosmique mesuré par la distance au squelette (voir Figure 5.16, droite).



**Figure 5.13.** *A gauche* : cartes médianes (sur 10 000 halos) d'accrétion méridionale du moment angulaire du gaz au cœur des halos de la simulation *Mare Nostrum* en fonction du redshift et de la masse de l'objet central. Ils caractérisent de la sorte toutes les densités de flux : masse, énergie, métallicité, moment angulaire pour faire émerger une image cohérente entre la dynamique à grande échelle et ces processus d'accrétion. *A droite* : cartes d'accrétion dans *Mare Nostrum* à deux redshifts différents : apparition d'une bimodalité dans la distribution des chocs.



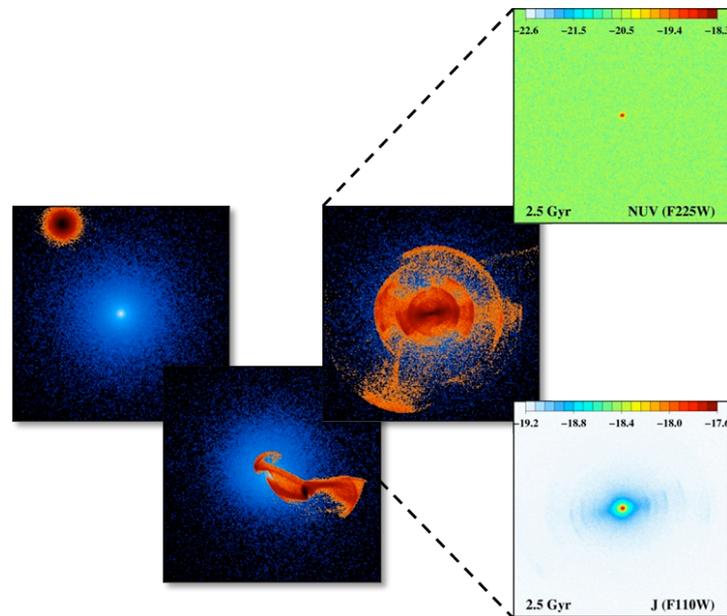
**Figure 5.14.** *Validation du modèle d'accrétion stratifiée du gaz en fonction de son origine cosmique.*

Kimm, et al. (2011) ont montré (Figure 5.12, gauche) à partir de la simulation *Mare Nostrum* que ces courants froids avaient peu de chance d'être détectés en absorption, car leur section efficace est faible relativement à celle de l'ISM. Ils ont aussi mené l'analyse de cartes chémo-hydrodynamiques des différents champs physiques et l'analyse des processus d'accrétion au rayon du viriel et dans le plan méridien des halos de *Mare Nostrum*. Ils ont identifié le flot de sous-structures virialisées et la géométrie de l'accrétion par le biais de mesures de flux et du squelette en se reposant sur la post-analyse de la simulation *Mare Nostrum* (Kimm et al. 2012, soumis). Cette analyse a conduit à présenter un nouveau paradigme de la phase d'effondrement secondaire pour la formation des disques à *redshift* intermédiaire, où le moment angulaire stratifié radialement de ces disques a pour origine directe le mouvement transverse résiduel du gaz issue des vides voisins (voir Figure 5.12 droite, Pichon et al. 2011 et Figure 5.14). Cette construction intérieur-extérieur du disque par les courants

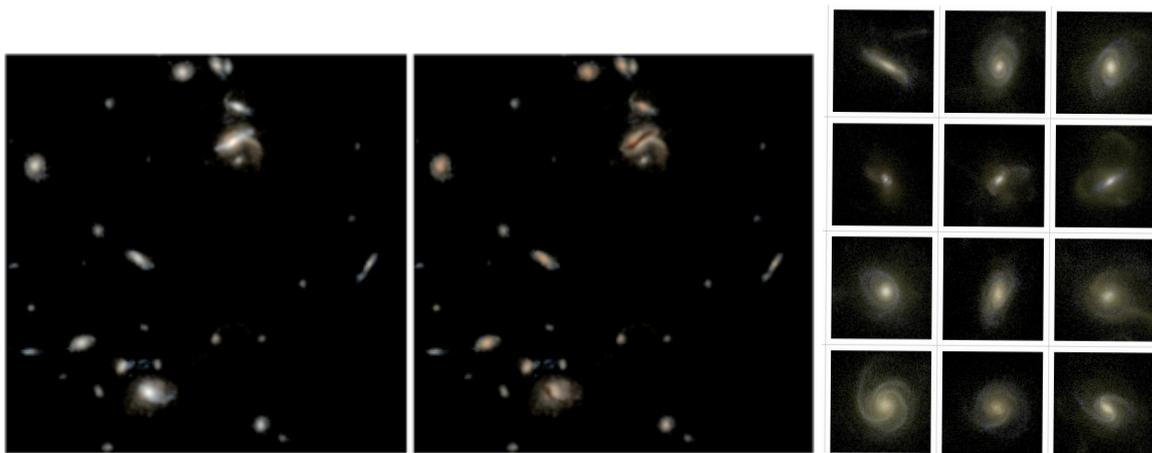
froids s'explique car le gaz s'entre choque de manière isotherme lors des croisements de coquilles de la toile cosmique avoisinante. Ce mécanisme est aussi partiellement à l'oeuvre à plus grand *redshift* lors de la formation rapide des premiers AGNs, après une première phase directe d'accrétion du gaz filamentaire par le bulbe central dont l'importance dépend de la rareté du halo (Dubois et al. 2011).

### 5.5.2 Des halos numériques aux observations des galaxies

L'étude et la caractérisation des sous-structures de matière noire dans les halos ont fait l'objet de plusieurs travaux. Par exemple, La présence des sous-structures est supposée avoir plusieurs effets sur les lentilles gravitationnelles, modifiant notamment la morphologie des images. A partir de modélisations numériques de plusieurs centaines de lentilles, une étude statistique a été réalisée sur les « perturbations » induites par les sous-structures sur les arcs gravitationnels (Alard 2007, Peirani et al. 2008a) afin de contraindre leur masse et leur profil de densité. Cette étude a également permis de faire des prédictions dans le cadre des présents et futurs grands relevés (i.e. CFHTLS, *Euclid*, etc...).



**Figure 5.15.** Un exemple de simulation numérique de l'accrétion d'une galaxie satellite (orange) par une galaxie elliptique massive (bleu) et cartes synthétiques dérivées en bande J et V en utilisant les caractéristiques de la caméra WFC3 (HST).



**Figure 5.16.** A gauche : un champ de la simulation Mare Nostrum avec (à droite) et sans (à gauche) post-traitement de la poussière. A droite : quelques galaxies virtuelles (parmi 160 000) apparues dans Mare Nostrum à  $z=2,4$ .

---

De même, afin d'expliquer les divergences entre le nombre de sous-structures prédites et le nombre de galaxies naines observées dans l'Univers local, des simulations cosmologiques hydrodynamiques «zoom»<sup>1</sup> de grande résolution d'un groupe local réaliste ont été réalisées (Peirani 2010). Un des résultats principaux de cette étude est la mise en évidence d'une population de halos de matière noire de faible masse ( $\sim 6 \cdot 10^9 M_\odot$ ) qui sont dépourvus d'étoiles à  $z = 0$ , principalement dû à l'action des supernovae et à la photoionisation des premières étoiles. Ces derniers sont alors caractérisés par une vitesse circulaire inférieure à une valeur critique  $V_c \sim 35$  km/s. Ces résultats sont en bon accord avec les prédictions de modèles théoriques.

Plusieurs travaux ont porté sur le rôle des épisodes de fusion dans l'évolution des propriétés dynamiques et photométriques des galaxies. Par exemple, des simulations numériques de l'interaction de galaxies ont permis de reproduire à la fois les observations du HST et les champs de vitesse dérivés par le spectrographe GIRAFFE (VLT) de certaines galaxies distantes ( $z = 0,4 - 0,7$ ) (Peirani et al. 2009). Ces études numériques ont délivré des informations cruciales sur la manière dont ces objets se sont formés puis évolués ou, en d'autres termes, sur la manière dont la séquence de Hubble se construit, puis évolue.

De même, à l'aide de simulations similaires, la formation stellaire induite par l'accrétion d'un satellite par une galaxie massive elliptique a été caractérisée en détail (évolution, distribution des nouvelles étoiles, etc...). Pour la première fois, des cartes synthétiques dans différentes bandes (J, H, NUV, H $\beta$  et V) ont été réalisées en utilisant des caractéristiques similaires à celles de la caméra WFC3 installée à bord du HST (voir Figure 5.15, Peirani et al. 2010). Avec sa sensibilité, il sera possible de résoudre les sous-structures et de les dater en utilisant les filtres UV par exemple. Ainsi, en les comparant aux cartes 2D de fusion obtenues à partir de ces modèles, il sera possible de contraindre les propriétés des épisodes de fusion (rapports de masse, configurations orbitales, etc...) et donc les scénarios (hiérarchiques?) de formation de ces galaxies.

Alard (2011) a étudié un échantillon de courbes de rotation de galaxies à faible brillance de surface. Cet échantillon est basé sur des mesures combinées à haute résolution en HI et H $\alpha$ . Les courbes de rotations ont été réduites en composantes principales. L'échantillon est correctement représenté par 2 composantes seulement, et il apparaît que le rapport de ces 2 premières composantes est relié à la concentration de la matière au centre, et ainsi au rayon de cœur. Dans la suite de l'analyse il est également montré que ce même paramètre est aussi relié à la fraction de gaz (HI) présente dans la galaxie (fraction relative à la masse au même rayon). Il a donc été logiquement conclu que la concentration des halos est un paramètre fondamental qui est lié à l'état d'évolution des galaxies, puisque lié à la fraction de gaz encore présente. Les galaxies évoluées ayant une faible fraction de gaz ont en moyenne une concentration au centre bien plus faible que les galaxies riches en gaz. On peut donc y voir l'effet d'une chaîne évolutive où les supernovae sont probablement la cause principale de l'éjection du gaz, et où l'évolution elle-même est due à l'effet de l'environnement (interaction, champs de marées, etc,...) mais aussi peut-être à des phénomènes stochastiques dans l'explosion des supernovae.

Guillet, Teyssier et Colombi (2010) ont mené une étude, en s'appuyant sur la simulation *Mare Nostrum*<sup>1</sup>, de l'effet de la dynamique des baryons sur le spectre de puissance, la variance et l'asymétrie de la distribution de matière à petite échelle avec un ajustement fin par le modèle du halo et une discussion sur les effets de *weak lensing*. Les champs de vitesse à grande échelle permettent d'apporter des contraintes sur le modèle cosmologique. Il est possible d'induire ces champs de vitesse de la distribution observée des galaxies en utilisant des méthodes de reconstruction lagrangiennes. Lavaux et al. (2008) ont ainsi testé exhaustivement la méthode de reconstruction Monge-Ampère-Kimotovitch (MAK) et l'ont appliquée au catalogue 2Micro Redshift Survey (2MRS) dans le cadre d'une collaboration avec *Institute for Astronomy* de l'Université d'Hawaï (Lavaux et Hudson 2011). L'étude de la convergence de la vitesse du Groupe Local vers le dipôle du CMB montre, en accord avec les travaux d'une équipe concurrente, un désaccord marginal avec le modèle de concordance qui nécessitera une étude plus approfondie en termes d'événements rares.

---

<sup>1</sup> voir annexe "Simulations Numériques"

---

A plus petite échelle (au niveau du milieu interstellaire) Thiébaud et al. (2010) ont enfin mené l'étude de la reconstruction tomographique du champ magnétique dans le milieu interstellaire à partir de la mesure spectrale de cartes de polarisation. Dans ce contexte, la dépendance spectrale de la longueur Faraday permet de sonder différenciellement le milieu en profondeur et donc d'accéder au champ tridimensionnel. L'inversion permet de reconstruire le champ  $B$  en volume et donc ses propriétés spectrales et sa topologie. C'est un problème inverse non linéaire novateur de grande dimensionalité qui permet aussi d'étudier les propriétés statistiques d'hélicité du champ. Dans ce cadre la dérivation du transfert du rayonnement polarisé dans un milieu magnétisé a été reprise.

### 5.5.3 Dynamique gravitationnelle

S'il est acquis qu'à grande échelle, la formation des structures (filaments, vides, murs) est assez bien décrite par la physique quasi linéaire (approximation de Zeldovitch, théorie perturbative...), la question du comportement plus ou moins stochastique de la dynamique gravitationnelle à plus petite échelle se pose de manière récurrente, et notamment dans le contexte des tentatives de re-simulation de l'Univers local. Thiébaud, et al. (2008) ont abordé cette question en comparant des observables eulériennes et lagrangiennes issues d'un jeu de simulations numériques  $N$ -corps qui ne diffèrent que du point de vue des phases des conditions initiales. Ils ont montré qu'à des échelles typiquement intra-amas, les exposants de Lyapunov augmentent avec l'amplitude des fluctuations initiales, tant du point de vue lagrangien (masses caractéristiques) qu'eulérien (longueur caractéristique). Ces exposants mesurent le taux de croissance exponentiel de la dispersion des observables sur un ensemble de simulations qui ne diffèrent que faiblement dans leurs conditions initiales : c'est un système chaotique (cela à petite échelle).

## 5.6 Analyse numérique et géométrique des grandes structures

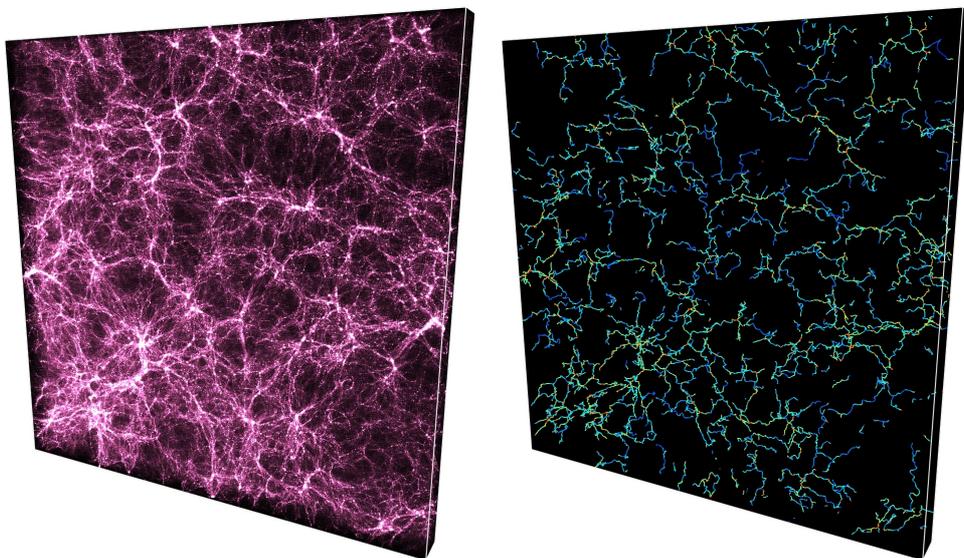
La topologie cosmique correspond à la structure à très grande échelle de l'Univers. Le fait que celui-ci soit homogène et isotrope détermine ses propriétés locales, à savoir qu'il est décrit par une métrique de Friedmann-Lemaître, mais ne suffit pas à en déterminer sa topologie, qui peut être simplement connexe (abusivement dénommée « triviale » dans ce contexte) ou multiconnexe. Dans ce dernier cas, l'Univers peut être vu comme un pavage périodique effectué à l'aide d'un volume moindre, appelé domaine fondamental, dont l'exemple le plus simple est le tore, qui correspond à un pavage périodique de l'espace euclidien par des parallélépipèdes. En réalité, le nombre de topologies admissibles est bien plus important que le seul tore, puisque l'on sait qu'il existe 17 topologies multi-connexes admissibles pour un espace euclidien (ce qui en cosmologie correspond à une courbure nulle des sections spatiales), et un nombre infini de topologies distinctes pour les espaces sphériques ou hyperboliques (qui correspondent ici respectivement à des univers dont la courbure spatiale est strictement positive ou strictement négative). La topologie étant une propriété à grande échelle, la mettre en évidence nécessite de faire appel aux plus grandes échelles accessibles observationnellement, à savoir le fond diffus cosmologique. Le principal impact de la topologie est d'introduire une série de directions privilégiées dans l'Univers : dans le cas du tore par exemple, même si l'Univers est localement homogène, à grande échelle, il va être influencé par l'orientation du domaine fondamental.

Dans les espaces euclidiens, les calculs dans des topologies multiconnexes sont relativement simples, car les modes propres du laplacien sont connus analytiquement : ce sont les exponentielles complexes (dans le cas du tore), ou diverses combinaisons linéaires simples de celles-ci. La situation est en revanche beaucoup plus complexe dans les espaces non euclidiens car on est en pratique très limité par la méconnaissance des modes propres. Dans ce contexte, les images à plus haute résolution alors disponibles de l'espace de Poincaré, qui représente le candidat le plus intéressant de topologie multiconnexe des espaces sphériques ont été produites (Caillerie et al. 2007).

Dans un contexte plus observationnel, ont été entreprises plusieurs études visant à déterminer quelles topologies sont détectables et comment elles le sont. Une méthode relativement récente pour mettre en évidence la topologie est celle des multipôles vecteurs, dont l'idée est d'associer, pour un multipôle donné un ensemble de vecteurs non orientés dont on étudie ensuite les directions relatives. En

l'absence de directions privilégiées, ces directions sont, schématiquement, toutes indépendantes, alors qu'en présence d'une direction privilégiée (ici, due à la topologie), diverses corrélations apparaissent entre ces multipôles vecteurs. Une étude détaillée des multipôles vecteurs dans des topologies toriques non nécessairement cubiques a ainsi été réalisée (Bielewicz et Riazuelo 2009). Dans un contexte plus général, il est important de comprendre le rôle des paramètres cosmologiques dans la détectabilité de la topologie. La présence d'énergie noire par exemple permet de sonder un univers plus vaste (la taille de l'horizon croît avec la densité d'énergie noire), mais la carte du fond diffus cosmologique est altérée par plus d'effets d'avant plan (notamment l'effet Sachs-Wolfe intégré). Kunz et al. (2008) ont ainsi montré que si la réionisation, qui est aussi génératrice d'effets d'avant-plan, ne gênait pas la détection de la topologie, l'énergie noire avait un effet négatif sur celle-ci. Pour l'énergie noire, A. Riazuelo a été un des premiers à faire des prédictions détaillées de modèles réalistes de quintessence sur le spectre des anisotropies du fond diffus cosmologique. Les modèles de quintessence sont une alternative à l'hypothèse d'une constante cosmologique, puisqu'ils supposent que la densité d'énergie noire est produite par un champ scalaire dont la dynamique l'amène aujourd'hui à posséder un terme cinétique très faible par rapport au terme potentiel, et donc se comporter de façon assez similaire à une constante cosmologique, puisque sa pression est à peu près l'inverse de sa densité.

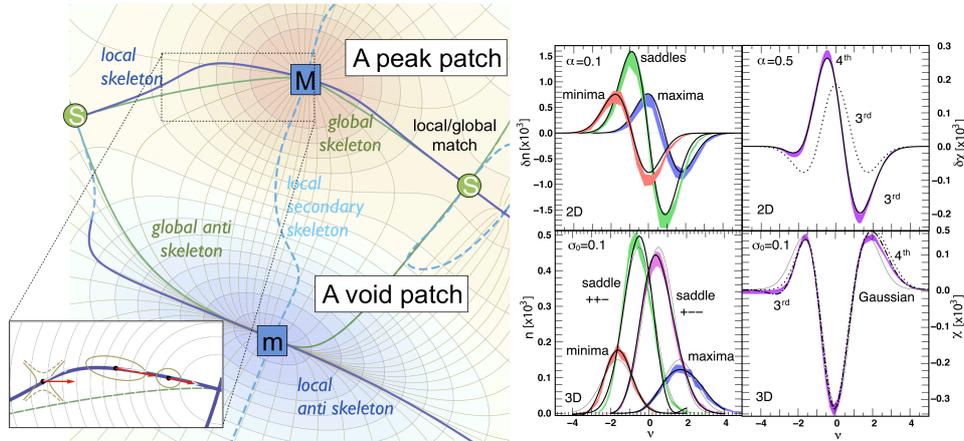
La toile cosmique représente sans aucun doute un des exemples les plus frappants de motif géométrique apparu spontanément dans la nature. Sa complexité intrinsèque rend sa compréhension délicate, mais celle-ci est d'une grande importance car la structure filamentaire actuellement observée de la distribution de matière conserve les traces de l'évolution de notre Univers depuis sa naissance. De plus, elle définit la nature de l'environnement dans lequel se forment les galaxies et la compréhension de son influence est donc critique. D'après la théorie de Bond et al (1996) qui est la plus communément acceptée, la structure filamentaire de la distribution de matière a pour origine la cohérence à grande échelle des fluctuations initiales du champ de densité, accentuées par les divers effets gravitationnels non-linéaires entraînant la croissance des halos par accréation de matière ainsi que leurs fusions.



**Figure 5.17.** Le skeleton tri dimensionnel persistant (à droite) d'une tranche de simulation (à gauche).

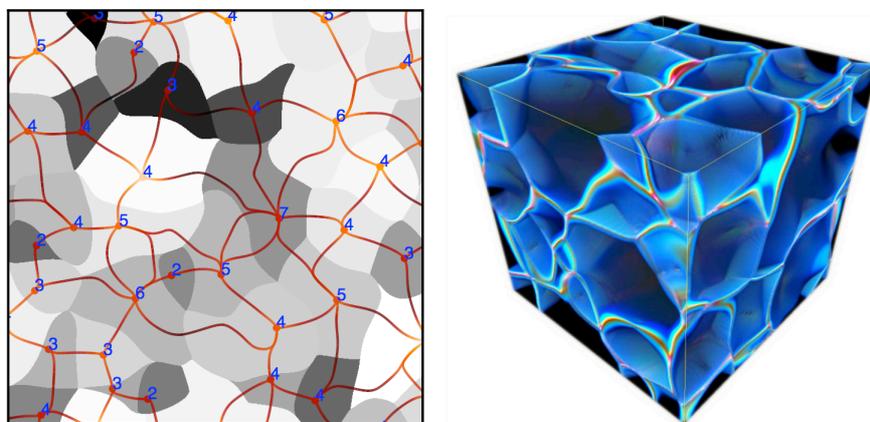
Le Squelette local 3D, le lieu géométrique où le gradient du champ est premier vecteur propre de son Hessien (Sousbie, et al. 2008a, Sousbie 2011 et Sousbie, Pichon et Kawahara 2011, Figure 5.17) a été développé et correspond aux lignes de crête du champ de densité : c'est un outil d'analyse de la topologie et de la géométrie des grandes structures qui permet d'une part de donner une définition mathématique de la structure filamentaire de la distribution de matière dans l'Univers, et d'autre part d'en formaliser l'extraction et la caractérisation par le biais de méthodes numériques basées sur l'intersection de surfaces critiques. Sa mise en oeuvre sur le SDSS a permis de poser une contrainte sur le contenu en matière et la géométrie de l'Univers (longueur totale et différentielle), de mener un test de Alcock-Paczynski pour contraindre les paramètres de courbure, et de contenu en énergie de

l'Univers, d'étudier l'évolution dynamique des filaments (Gay et al. 2010) et faire le lien avec la théorie des champs aléatoires pour conduire un test de non-gaussianité (Pogosyan et al. 2009, Figure 5.18, gauche, Pogosyan, Gay et Pichon 2009, voir Figure 5.18, droite, Pogosyan, Gay et Pichon 2010).

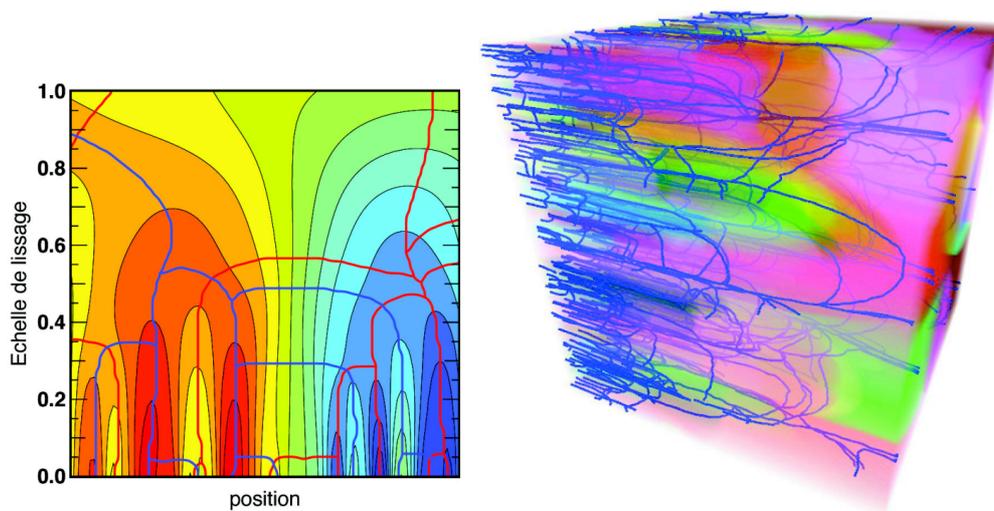


**Figure 5.18.** Gauche : le réseau des lignes critiques au voisinage d'un maximum. Droite : Evolution non linéaire des points critiques du champ (à gauche) et du Genus (à droite) en 2 et 3D.

Le squelette global repose sur une formulation probabiliste de la recherche de ses lignes critiques (Sousbie, Colombi et Pichon, 2009, Figure 5.19, droite). L'obtention d'un squelette continu et totalement connecté (par opposition au squelette local développé précédemment) permet de plus de se « promener » le long de la toile cosmique, rendant possible la caractérisation précise des propriétés des galaxies en fonction de la distribution de matière dans leur environnement (position dans les filaments, structure dynamique interne, distance curviligne aux halos les plus proches, anisotropie du tenseur de pression, orientation du tenseur de chaleur, etc...). Il a été montré que le déplacement de Zeldovich préservait la structure du squelette cosmique moyennant un lissage sur une échelle calibrée en fonction du redshift et de l'échelle de non linéarité des structures. De manière systématique l'analyse de l'orientation du spin des halos de matière noire relativement au squelette a été abordée (Codis et al. 2012). L'objectif est aussi d'étendre le formalisme du squelette aux espaces de dimension quelconque, afin d'une part d'étudier les propriétés de la distribution de matière dans un espace 6D des phases (position-vitesse) à partir de simulations numériques, et d'autre part de donner une suite à certains travaux théoriques en faisant le lien entre évolution temporelle de la distribution de la matière et squelette calculé dans un espace position-échelle de lissage (Figure 5.20), et en particulier du parallèle entre les squelettes 4D dans l'espace position-lissage et position-temps.



**Figure 5.19.** A gauche : connectivité 2D d'un champ Gaussien sur la carte des peakpatches correspondants. L'analyse de la géométrie de ces patches permet de comprendre le processus de l'acquisition du moment angulaire des proto-halos. A droite : carte de probabilité de la segmentation d'un champ gaussien au sens des peak patches.



**Figure 5.20.** Le squelette (en bleu) et l'antisquelette (en rouge) d'un champ Gaussien invariant d'échelle 1D (à gauche) et 2D (à droite) dans l'espace position-lissage, un proxy pour l'espace temps : un tel squelette représente la ligne de vie des halos de matière noire.

Pichon et al. (2010) (voir Figure 5.19, gauche) ont calculé les propriétés de la connectivité (le nombre de filaments connectés à un pic donné) du squelette et montré que le degré moyen d'un noeud était une propriété universelle pour les champs gaussiens. Dans un contexte cosmologique, la connectivité décroît avec le *redshift*, avec un changement de pente au moment où l'énergie noire entre en jeu. Pogosyan, Gay et Pichon (2009) ont prédit cette décroissance par le biais de l'évolution cosmique du décompte des points critiques du champ. Ce décompte passe par un développement dans les moments du champ et de ses dérivées successives qu'il est possible de calculer dans le cadre de la théorie perturbative de la gravitation. Gay, Pichon et Pogosyan (2011) ont aussi explicité la statistique de la densité jointe du champ et des invariants associés aux dérivées supérieures du champ en terme de développement multi-varié. Ce calcul présente un intérêt considérable dans le contexte de l'analyse des non-gaussianités gravitationnelles ou primordiales des grandes structures de l'Univers, ou du CMB, notamment depuis le lancement du satellite *Planck* et la sélection de la mission *Euclid*.

Dans ce cadre, Lavaux et Wandelt (2010, 2011) ont utilisé les vides pour l'étude des propriétés de l'énergie noire. D'une part, ces vides peuvent servir de base pour construire des estimateurs purement géométriques de l'histoire de l'expansion de l'Univers. D'autre part, des modèles précis de la distribution d'ellipticité de ces vides ont été développés. Ce travail permet leur utilisation pour sonder avec précision les paramètres de l'énergie sombre. Au-delà de ces premières études, les vides se révèlent prometteurs pour le développement de nouvelles observables reflétant les propriétés physiques de l'énergie sombre qui complètent les informations obtenues à partir des fonctions de corrélation halo-halo. (Sousbie 2011, Sousbie, Pichon et Kawahara, 2011, Figure 5.17) ont présenté le squelette persistant, une méthode permettant l'extraction rigoureuse des lignes critiques directement sur un ensemble discret de particules (comme un catalogue de galaxies ou une simulation N-corps). Contrairement aux méthodes précédentes, il n'est pas ici nécessaire d'introduire une échelle de lissage particulière, et le réseau est obtenu de manière cohérente à toutes les échelles accessibles. Le concept de persistance permet d'attribuer à chaque caractéristique topologique du champ (représentée par une paire de points critiques, minimum, maximum, points selles, reliés par le réseau) un nombre quantifiant son importance relative (voir le chapitre simulations, 7.2.4).

## 5.7 Phénoménologie et physique des galaxies dans leur environnement cosmique

Des recherches sont menées au sein du groupe sur les trous noirs supermassifs dans un contexte cosmologique : accélération de l'expansion de l'Univers, formation des trous noirs supermassifs, trous noirs binaires dans les AGN, relation entre la masse du trou noir central et la dispersion des vitesses

---

dans le bulbe des galaxies. En utilisant le catalogue UNION2, composé de 557 supernovae de type Ia, il a été montré que l'accélération de l'expansion n'était pas complètement isotrope. Localement des superamas comme l'amas de Shapley peuvent perturber l'accélération. En revanche le manque de mesures dans de grandes zones du ciel n'a pas permis de dire s'il y avait des anisotropies globales à grande échelle dépendantes éventuellement d'une évolution dynamique spécifique de l'Univers (Mohayaee et Colin 2008).

Ces trous noirs de l'ordre de  $10^9$  masses solaires, sont observés à des  $z$  très élevés ( $z=6$ ), c'est à dire environ un milliard d'années après le big bang. Pour le moment aucune théorie ne permet d'expliquer comment ils ont pu se former en aussi peu de temps. Des simulations numériques ont été développées en introduisant des contraintes nouvelles afin de modéliser ces formations (Sadoun, Mohayaee et Colin 2012, en préparation).

Le mouvement d'un objet dense dans un milieu diffus crée un sillage gravitationnel, et selon les conditions initiales ce sillage peut être d'une très haute densité. Appliqué à des trous noirs de très grand  $z$  ( $z$  entre 10 et 30, non observé mais prévu par les simulations) ce processus pourrait, dans une distribution de matière noire diffuse, produire des sillages d'une densité telle que des interactions neutralino-neutralino (la particule théorique la plus adaptée pour représenter la matière noire), pourraient se produire (annihilation). Dans ce cas des rayonnements gamma sont émis, il a été montré que ceci pourrait être observé avec les nouveaux télescopes en longueur d'ondes gamma. Sanderson, Mohayaee et Silk (2011) ont en particulier étudié l'émission gamma produite par l'auto-annihilation de la matière noire dans les queues de marée de M31. La faible vitesse de la matière dans ces caustiques conduit à une augmentation significative des émissions des rayons gamma relativement à la fois à l'émission diffuse du halo, et à celle prévue pour une section efficace indépendante de la vitesse. Le signal attendu pour le satellite *Fermi* a été calculé et des gabarits pour quantifier l'observabilité de ce signal ont été construits.

Lavaux et al. (2010) ont estimé les vitesses des galaxies du Groupe Local étendu à partir du relevé du ciel complet à deux microns (2MRS) en utilisant pour la première fois un algorithme de reconstruction des orbites. Grâce aux vitesses reconstruites, ils ont étudié le problème de la cohérence de ce flot vers le dipôle du CMB. Bien que l'essentiel de l'amplitude du dipôle CMB soit recouvert aux échelles de  $120 \text{ Mpc h}^{-1}$ , sa direction n'est pas correcte, et aucune convergence à cette échelle n'est observée. Ces résultats concordent avec le modèle cosmologique standard à 1-2 sigma.

Colin et al. (2011) ont utilisé les données de deux relevés de SNe Ia pour vérifier l'exactitude de ces résultats. Les distances des SNe Ia confirment qu'il n'y a pas de convergence pour l'orientation et l'accord avec le modèle hiérarchique reste à ce niveau. Le modèle d'effondrement secondaire a fourni un paradigme analytique de la formation et de l'évolution des halos de matière noire ces 40 dernières années. Ce modèle est étendu pour des solutions non sphériques, afin d'étudier l'origine de l'universalité des halos de matière noire. Des simulations avec différentes conditions initiales ont été effectuées et il a été montré que les halos finaux ont des profils de densité en loi de puissance et avec une anisotropie de vitesse quasi-constante dans leurs régions internes. Cependant, aussi bien l'index de la loi de puissance que la valeur de l'anisotropie de vitesse dépendent de l'indice d'auto-similarité des conditions initiales.

La structure du halo n'est donc pas «universelle», mais se souvient des conditions initiales. Les modèles d'effondrement secondaire peuvent également fournir un cadre pour l'étude des caustiques de la matière noire. L'effondrement gravitationnel de la matière noire, la fusion des halos de matière noire et le champ de marée des perturbations satellitaires sont des processus qui conduisent à la formation de fines et denses coquilles de matière noire, aussi connues comme caustiques de matière noire. Les particules faiblement liées qui sont les candidats putatifs de la matière noire devraient fortement s'annihiler dans les caustiques des halos, comme dans le halo de la Voie Lactée et de M31, et ce faisant, générer en particulier des rayons gamma, des antiprotons et positons. Mohayaee et Salati (2008) ont estimé le flux de ces particules d'antimatière sur Terre et montrent que les facteurs d'amplification de  $\sim 30$  peuvent être générés relativement à un profil lisse de type Navarro, Frenk et White, pour les antiprotons de grande énergie ou les positons de faible énergie.

---

L'activité des AGN est très probablement due à la fusion de deux galaxies possédant un trou noir central. Les observations ont maintenant montré que presque toutes les galaxies possèdent un trou noir central, donc en cas de fusion on devrait observer (par la présence de deux pics en émission, autour d'une même raie) dans la partie active, l'existence de deux trous noirs, ou plutôt de deux zones actives, en train de se rapprocher. Or c'est rarement le cas ; seulement 1% des cas montre ce phénomène, ce qui semble contradictoire avec l'hypothèse de départ. Des observations récentes ont montré que seule une petite fraction ( $\sim 0,1\%$  - $2,5\%$ ) d'AGNs à des *redshifts*  $z < \sim 0,3$  et présentant une séparation de l'ordre du kpc sont binaires, ce qui est plutôt faible par rapport au taux de fusion élevé de galaxies. Yu et al. (2011) ont construit un modèle phénoménologique pour estimer la densité en nombre d'AGNs binaires. Ils ont montré que ce résultat est tout à fait explicable si l'on tient compte conjointement de plusieurs paramètres (galaxies riches ou pauvres en gaz, différence de taille des galaxies hôtes, projection sur la ligne de visée...). Ils ont aussi montré que sous certaines conditions, la fréquence d'AGNs binaires observée est compatible avec le taux de fusion relativement élevé des galaxies et conforte ainsi l'hypothèse que l'activité des AGN/QSO est induite par des fusions. Ils prévoient que le nombre d'AGNs binaires aux échelles du kpc diminue avec l'augmentation en *redshift* et seulement environ 0,02% -0,06% des AGNs sont des AGNs binaires présentant des signatures de raies doubles étroites à  $z \sim 0,5-1,2$ . Les projets suivants sont poursuivis : 1) topologie de l'Univers primordial en liaison avec le fait que la vitesse du *bulk flow* ne converge pas vers la vitesse du dipôle CMB, 2) relation entre la masse des trous noirs centraux et la distribution des vitesses radiales observées dans les systèmes d'amas globulaires ; lien avec la relation M- $\sigma$  observée dans le bulbe des galaxies 3) modèle d'univers pré Big bang dans le contexte des hypothèses de *bubble*.

Le modèle du halo est un outil bien connu et maintenant largement utilisé pour interpréter les mesures des propriétés de regroupement des galaxies dans les observations. Il consiste à supposer que les briques élémentaires des grandes structures sont les halos de matière noire, dans lesquels les galaxies se distribuent selon un profil universel. Il permet de décrire avec précision les fonctions de corrélation des galaxies avec un faible nombre de paramètres. Dans le cadre de ce modèle, trois études ont été menées par l'IAP en collaboration avec d'autres laboratoires (département de physique de l'Université de Floride, département d'astronomie de l'Université d'Etat d'Ohio et le service d'astrophysique du CEA) : une modélisation analytique exhaustive du modèle du halo sur les probabilités de comptage validée par des mesures dans des simulations numériques (Fry et al. 2011). Une comparaison détaillée de simulations de matière noire pure à des simulations hydrodynamiques de mêmes conditions initiales pour voir dans quelle mesure les sous-structures des halos de matière noire tracent les galaxies (Weinberg et al. 2008).

## 5.8 Outils de modélisation et d'analyse d'images des grands relevés cosmologiques

Les développements poursuivis autour du logiciel libre de photométrie automatisé SExtractor (Bertin 2011) ont été marqués par l'ouverture en 2009 du site Web AstrOmatic.net. Le site regroupe les activités de maintenance de dix logiciels proposés à la communauté (documentation, forum de discussion, espaces de développements publics et privés, blog). AstrOmatic.net enregistre chaque mois les connections d'environ 2000 visiteurs et un millier de téléchargements. Les logiciels AstrOmatic sont désormais mentionnés dans environ 3% des articles en astronomie/astrophysique publiés ces dernières années et sont inclus dans les principales distributions Linux (Fedora, Ubuntu, Debian, RedHat,...). Les « paquetages » AstrOmatic ont été déposés à l'Agence de Protection des Programmes (APP) en 2010, et font l'objet d'une action de valorisation par l'*Excellence Cluster* (Allemagne) et le *Fermi Consortium Alliance* (Etats-Unis) via le Service de Partenariat et Valorisation (SPV) du CNRS. Cette action a déjà permis l'achat en 2011 de 10k€ de serveurs de calcul et de stockage destinés au groupe.

Pour pouvoir décrire de façon à la fois synthétique et précise le contenu d'une image astronomique (positions, intensités, et formes des astres), il faut disposer de bons modèles des sources, du bruit et de la réponse impulsionnelle. Une modélisation automatisée de la réponse impulsionnelle et de ses variations est désormais possible grâce au logiciel PSFEx, qui a été rendu officiellement public en 2010 (Bertin 2011), au terme de développements étalés sur plus de dix ans. Après avoir été utilisé principalement pour l'évaluation automatique de la qualité des observations au sein des pipelines

---

d'analyse d'images astronomiques (notamment TERAPIX et Astro-WISE), et pour les mesures astrométriques et photométriques de champs stellaires (Bouvier et al. 2008, Delorme et al. 2008, 2010, Bertin 2011), PSFex est maintenant partie intégrante des procédures de morphométrie automatisée mises au point dans le groupe « Origine et évolution des galaxies » (Baillard et al. 2011, Bertin 2011). PSFex intègre également un module expérimental permettant d'homogénéiser les réponses impulsives entre images, un développement effectué en collaboration avec le groupe du *Dark Energy Survey* (Mohr et al. 2008, Darnell et al. 2009), et employé pour la première fois dans le relevé *Blanco Cosmology Survey* (par exemple High et al. 2010, Zenteno et al. 2011).

## 5.9 Prospective

Nous vivons un moment unique pour la cosmologie : le satellite *Planck* en orbite est un succès, tout comme l'a été le relevé CFHTLS. Plusieurs missions au sol et spatiales s'apprêtent à contraindre les propriétés physiques de l'énergie noire et matière noire à un niveau de précision sans précédent. La mission spatiale *Euclid* qui permettra de mener à bien la prochaine génération de relevés a été sélectionnée par l'ESA. Enfin ces cinq dernières années ont permis de faire émerger des compétences d'analyse statistique basées sur les simulations dimensionnantes les plus avancées de la discipline. L'importance de l'environnement cosmique sur la formation des galaxies a été mise en évidence par ces différents travaux. Les données générées par ces efforts internationaux vont nous permettre d'aborder les énigmes de l'aube et du destin cosmique associées d'une part aux conditions physiques de l'Univers très jeune, et d'autre part de sonder les propriétés de l'énergie noire et de la matière noire qui dominent l'Univers tardif et constitue la structure dans laquelle se forment les galaxies.

Le groupe a joué un rôle pivot dans la montée en puissance de ces thématiques scientifiques, tant du point de vue de la préparation de ses opérations que pour leur modélisation, et dans leur valorisation scientifique en terme de publications à fort impact bibliométrique.

Dans le futur, l'activité du groupe restera structurée autour de l'exploitation scientifique de ces données de l'Univers profond, des méthodes de traitement et d'analyse de ces données et de leur production en participant à ces campagnes expérimentales, et par le biais de simulations numériques dimensionnantes pour leur contrepartie virtuelle.

Le déploiement des thématiques scientifiques du groupe donne une position très attractive à l'Institut, au niveau d'excellence des plus grands laboratoires internationaux. Il conviendra de continuer à veiller dans l'avenir à ce que la forte implication du groupe dans le traitement massif des données observationnelles n'obère pas sa capacité à tenir son rang dans leurs exploitations scientifiques.

---

## 6 Physique théorique – Gravitation et Cosmologie

Le groupe de recherche « Physique théorique – Gravitation et Cosmologie » est composée de :  
8 chercheurs CNRS : Gianfranco Bertone, Luc Blanchet, Gilles Esposito-Farèse, Guillaume Faye, Martin Lemoine, Jérôme Martin, Patrick Peter, Jean-Philippe Uzan  
1 enseignant-chercheur de l'UPMC : Dan Israël

Sur la période 2007 – 2011 :

6 post-doctorants : Alejandro Bohé, Fabio Iocco, Resmi Lekshmi, Giovanni Marozzi, José-María Martín-García, Alberto Vallinotto

9 doctorants : Émeline Cluzel, Sihem Kalli, Flavien Kiefer, Kumiko Kotera, Alexandre Le Tiec, Marc Lilley, Larissa Lorentz, Sylvain Marsat, Cyril Pitrou

1 habilitation à diriger les recherches a été soutenue : Jean-Philippe Uzan

Le prix de la Société Française de Physique 2010 a été attribué à Cyril Pitrou

Le prix Langevin de la Société Française de Physique 2011 a été décerné à Jean-Philippe Uzan

Nombre de chercheurs avec HDR ou équivalents : 5

Nombre de publications de rang I : 258

Nombre de publications de rang II : 54

---

Les thèmes de recherche se concentrent sur : (1) l'étude des signaux d'ondes gravitationnelles produites dans des événements cataclysmiques, (2) les théories modernes de la gravitation (théories tenseur-scalaire, supercordes,...) (3) l'astrophysique des particules (rayonnement cosmique de ultra haute énergie, processus d'accélération de particules et détection de matière noire) et (4) la cosmologie théorique primordiale (énergie noire, théorie de l'inflation et perturbations cosmologiques).

## 6.1 Relativité générale et développements post-newtoniens

### 6.1.1 Étude du recul gravitationnel des systèmes binaires de trous noirs sans spin

Le recul gravitationnel d'un système de trous noirs en réponse à l'émission anisotrope d'ondes gravitationnelles est un phénomène ayant d'importantes conséquences potentielles en astrophysique. Dans les modèles de formation d'un trou noir massif par fusion successive de petits trous noirs, un recul gravitationnel avec une vitesse suffisante empêche la poursuite du processus de croissance du trou noir ; ce type d'éjection peut se produire dans les galaxies naines ou les amas globulaires voire dans de grandes galaxies ; le déplacement du centre de masse pourrait avoir des conséquences sur la dynamique du noyau.

Le Tiec et Blanchet (2010) et Le Tiec, Blanchet et Will (2010) ont calculé le recul gravitationnel de trous noirs binaires à l'ordre 2PN au delà de l'approximation dominante, obtenant, pour la première fois, la correction d'ordre 1,5PN due aux sillages d'ondes gravitationnelles, et le terme suivant à 2PN. Cette expression est valable lors de la phase spirale avant le passage à la dernière orbite circulaire (ICO). Il a été trouvé que l'effet de recul est en fait dominé par la contribution de la phase ultérieure dite du « plongeon », allant de l'ICO jusqu'à la formation d'un horizon commun aux deux trous noirs.

### 6.1.2 Corrections d'amplitude des ondes gravitationnelles émises par une binaire compacte

L'importance de disposer de modèles analytiques pour la phase, mais aussi pour l'amplitude du signal émis par les systèmes binaires de corps compacts, à des ordres d'approximation élevés a conduit au calcul des corrections post-newtoniennes aux polarisations à l'ordre qui suit 2,5PN. À l'ordre 3PN, tous les moments radiatifs qui paramétrisent la forme d'onde ont été déterminés (Blanchet et al. 2008). Ils dépendent des moments multipolaires de sources, ainsi que de corrections quadratiques et cubiques. Les corrections quadratiques sont données par un algorithme dont la mise en œuvre à 3PN nécessite l'utilisation du progiciel *xAct*, extension du logiciel *Mathematica* (voir section 6.1.8). Après avoir calculé tous les termes correctifs requis, l'amplitude cherchée dans le cas où les orbites des corps sont quasi-circulaires a été déduite. Enfin la décomposition modale du résultat a été réalisée. L'effort se porte à présent sur l'ordre 3,5PN. Le calcul du mode (2,2) est presque achevé.

### 6.1.3 Effets des spins sur les équations du mouvement et le champ d'onde d'une binaire compacte

Les effets des spins doivent être pris en compte lors de l'analyse du signal de ces systèmes dans VIRGO/LIGO/LISA. À l'ordre le plus bas, l'effet du spin se réduit au terme de couplage spin-orbite. À l'ordre 2PN, on a l'effet du couplage relativiste spin-spin, qui est quadratique dans les spins. Les effets spin-orbite à 1,5PN et spin-spin à 2PN, dans la dynamique et la radiation gravitationnelle de trous noirs binaires, sont déjà connus. À l'ordre 2,5PN intervient la correction relative d'ordre 1PN à l'effet du spin-orbite. Cet effet à 2,5PN est de nouveau un effet linéaire dans les spins, et de ce fait on s'attend à ce qu'il soit numériquement comparable à l'effet quadratique spin-spin. Il a été montré par des simulations que les spins à 2,5PN devraient être inclus dans les patrons d'ondes des binaires spirales de trous noirs. Après les calculs de 2006, cela a été récemment étendu à l'ordre 3PN (Blanchet, Buonanno et Faye 2011).

Avant de poursuivre aux ordres supérieurs, la réécriture des polarisations des ondes gravitationnelles tronquées à l'ordre 1,5PN sous une forme prête à l'emploi a été entreprise. Pour simplifier, nous nous sommes restreints à des orbites quasi-circulaires mais nous avons pris en compte les effets produits par la précession des spins (Arun et al. 2009b). De plus, nous avons effectué la décomposition modale du signal sur la sphère des observateurs vus par la source, et étudié leur évolution pour différentes orientations initiales des spins. Nous observons que les modes quadrupolaires (2,0) et (2,1) peuvent devenir comparables au mode dominant (2,2) lorsque la précession est importante.

#### 6.1.4 Comparaison entre le post-newtonien et la théorie des perturbations

Pour les observations d'ondes gravitationnelles par LIGO/VIRGO/GEO au sol et par LISA dans l'espace, l'identification des binaires compactes en coalescence requiert des patrons d'onde de haute précision. Deux schémas d'approximation en sont capables : (i) le développement post-newtonien, décrivant la phase spiralante dans le régime des champs faibles mais indépendamment du rapport de masse, et (ii) l'approche de la force propre, fondée sur la théorie des perturbations de trous noirs, permettant une description précise dans le régime de champ fort mais dans la limite d'un rapport de masse élevé.

Nous avons effectué une comparaison de haute précision entre les résultats post-newtoniens et ceux de la force propre dans leur domaine de validité commun, celui d'un système binaire en régime de champ faible et ayant un rapport de masse élevé. Nous avons utilisé une variable observable associée à la dynamique conservative de la binaire, susceptible d'être calculée par les deux méthodes. Dans Blanchet et al. (2010a, b) le développement post-newtonien de cette variable est mené à l'ordre 3PN avec en plus le calcul de certaines contributions logarithmiques survenant aux ordres 4PN et 5PN. Le résultat de la comparaison avec la force propre est montré sur la Figure 6.1, qui donne la valeur de notre observable en fonction de la distance (en unité de la masse totale des trous noirs) pour les différents ordres post-newtoniens ainsi que la valeur exacte calculée numériquement.

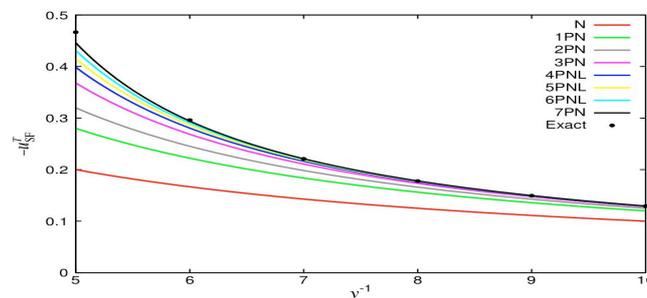


Figure 6.1.

#### 6.1.5 Théorie des perturbations

La théorie des perturbations du deuxième ordre constitue une extension naturelle des méthodes de perturbations linéaires en relativité générale. Les équations impliquées au delà de l'ordre linéaire sont extrêmement compliquées : leur mise en forme n'est possible qu'à l'aide de calculs formels par ordinateur et leur résolution ne peut être que numérique. Le formalisme général des perturbations invariants de jauge non-sphériques dans un espace de fond à symétrie sphérique a été appliqué à deux problèmes.

Le premier est celui des perturbations d'un trou noir de Schwarzschild. Nous avons développé une approche générale (Brizuela, Martín García et Tiglio 2009), appliquée à des calculs numériques dans Pazos et al. (2010), se fondant sur des méthodes spectrales pour résoudre les équations aux dérivées partielles. Nous avons étudié les fréquences de vibration des modes du deuxième ordre, ainsi que le couplage propre des modes du premier ordre engendrant des modes au deuxième ordre. Nous avons ensuite étudié les perturbations au deuxième ordre d'une étoile fluide en effondrement (Brizuela et al. 2010). Les équations décrivant l'évolution des variables de perturbation libres ont été obtenues.

---

Différentes procédures de raccordement à la surface de l'étoile ont été proposées.

### 6.1.6 Spectre d'absorption des trous noirs

Le spectre d'absorption d'un champ scalaire par un trou noir présente des oscillations autour d'une valeur moyenne, la section géométrique de sa sphère de photons. Ces oscillations sont coûteuses à calculer numériquement par la méthode standard, consistant à décomposer l'onde plane entrante en harmoniques sphériques. En prolongeant les indices de ces ondes partielles dans le plan complexe, nous avons montré que ces oscillations peuvent être obtenues très précisément à partir de résidus calculés aux pôles de Regge (Décanini, Esposito-Farèse et Folacci 2011). Dans la limite des hautes fréquences, nous obtenons même une très simple expression analytique, qui garde une forme universelle pour tous les trous noirs sphériques et en dimension quelconque. Elle fait intervenir les caractéristiques (période orbitale et exposant de Lyapounov) des géodésiques sur la sphère de photons.

### 6.1.7 Le problème de Cauchy

Le problème de Cauchy posé sur un cône caractéristique présente un intérêt fondamental en relativité générale. Cependant il est beaucoup plus difficile à traiter que son équivalent sur une surface de genre espace. Après une analyse du cas d'un espace-temps minkowskien comme banc d'essai (Choquet-Bruhat, Chrusciel et Martín García 2009a, b), nous avons mené à bien une analyse approfondie des équations de contraintes d'essai (Choquet-Bruhat, Chrusciel et Martín García 2010, 2011) au moyen de calculs formels par ordinateur. En partant de résultats précédemment obtenus par Cagnac et Dossa, nous avons pu établir un théorème d'unicité ainsi que divers résultats sur l'existence de solutions dans certains cas.

### 6.1.8 Méthodes de calcul pour la relativité générale

La résolution de la plupart des problèmes actuels en relativité générale exige de combiner des techniques mathématiques, numériques, ou de calcul formel par ordinateur. Les travaux effectués au sein du groupe utilisent différentes combinaisons de ces méthodes. Certains ont pour objet ces méthodes elles-mêmes.

Nous avons mis au point une méthode numérique de sommation pour une équation d'onde à l'aide de décomposition en harmoniques sphériques (Gundlach, Martín García et Garfinkle 2010). Certaines discrétisations particulières des opérateurs de dérivées partielles obéissent à la propriété de « sommation par partie », fournissant des simulations extrêmement stables lorsqu'il existe une énergie conservée. Nous avons généralisé cette idée aux équations en coordonnées sphériques, en introduisant de nouvelles techniques de discrétisation. Nous avons vérifié la validité de la méthode et montré qu'elle est plus performante que les méthodes traditionnelles.

Le progiciel libre *xAct* (<http://www.xact.es>) pour le calcul tensoriel formel est un projet à long terme, auquel nous avons pris part entre 2008 et 2010. Il est constitué de modules d'extension au logiciel *Mathematica*. Divers développements ont été effectués, dont deux significatifs : (1) ajout d'un sous-module traitant de la décomposition d'espaces vectoriels ou de fibrés vectoriels en structures de dimension inférieure (Faye et Martín García 2010) ; (2) inclusion d'une extension, consacrée au calcul spinoriel sur des espace-temps lorentziens quadri-dimensionnels (García-Parrado, Faye et Martín García 2010). Ce dernier travail a été motivé par une étude portant sur le calcul spinoriel dans des espaces-temps de dimension 5 (García-Parrado et Martín García 2009, Edgar, García-Parrado et Martín García 2009). L'utilisation des spineurs en relativité générale conduit en effet fréquemment à des preuves concises et simples de résultats importants, et ces dernières années ont vu un intérêt accru pour les espaces-temps de trous noirs en dimension 5. Nous avons été amenés à généraliser l'approche de Penrose à 5 dimensions.

---

## 6.2 Théories de la gravitation

### 6.2.1 Existence de singularités nues dans les théories tenseur-scalaire

Nous avons généralisé la célèbre preuve de Christodoulou, sur l'existence des singularités nues dans le processus d'effondrement d'un champ scalaire non-massif dans le cas d'une symétrie sphérique, à une classe plus large de modèles, incluant la théorie de Brans-Dicke. La situation devient plus complexe et certaines étapes de la démonstration doivent être remplacée par des observations tirées de simulations numériques qui montrent que le système d'équation gouvernant le modèle possède des solutions auto-similaires aux propriétés voulues (Bedjaoui et al. 2010).

### 6.2.2 Partenaires scalaires ou vectoriels du graviton

Pour comprendre quels aspects de la relativité générale sont testés dans les expériences gravitationnelles, la meilleure méthode consiste à la comparer à d'autres théories. De ce point de vue, les théories « tenseur-scalaire » jouent un rôle privilégié. Nous nous en servons pour illustrer divers aspects de la gravitation relativiste (Esposito-Farèse 2011), notamment le théorème de la calvitie des trous noirs, les effets de taille finie et le principe d'effacement en relativité générale, et le fait que la dynamique gravitationnelle influe sur le mouvement des corps matériels. Nous avons également tenu compte des dernières données expérimentales pour mettre à jour les contraintes sur les théories tenseur-scalaire, et sommes en train d'analyser celles imposées par plusieurs pulsars binaires récemment chronométrés.

De nombreuses extensions de la théorie de la relativité générale font intervenir des champs vectoriels. Nous avons établi les contraintes qu'imposait la positivité de l'énergie et le fait que le problème de Cauchy soit bien posé (Esposito-Farèse, Pitrou et Uzan 2010). Parmi celles qui conduisent à des équations de champs d'ordre 2 (évitant les instabilités liées aux ordres supérieurs), nous montrons qu'il en existe dans lesquelles le champ vectoriel n'est pas dilué au cours de l'expansion cosmologique.

### 6.2.3 Gravitation newtonienne modifiée

Le modèle MOND (Modified Newtonian Dynamics) a été proposé par Milgrom en 1983 comme une alternative à la matière noire. L'accord entre ses prédictions et de nombreuses observations astronomiques est remarquable. Il est possible de le tester dans le système solaire, grâce à la dynamique des planètes, en utilisant les meilleures éphémérides disponibles (Blanchet et Novak 2011a, b).

Il est très difficile de reproduire cette phénoménologie dans une théorie des champs relativiste cohérente. Nous avons effectué une étude critique des modèles proposés (Bruneton et Esposito-Farèse 2007), du point de vue expérimental et théorique. L'un des plus satisfaisants est la théorie tenseur-vecteur-scalaire (TeVeS), mais une fonction la définissant nécessite d'être ajustée finement pour être compatible avec les tests de gravitation dans le système solaire et les pulsars binaires, tout en conservant un hamiltonien borné inférieurement et un problème de Cauchy bien posé.

Cette théorie TeVeS peut être considérablement simplifiée grâce à un couplage particulier du champ scalaire à la courbure, issu des théories de « galiléons » (cf. section 6.2.5). Ce couplage non-linéaire conduit pourtant à des équations des champs ne contenant que des dérivées d'ordre  $\leq 2$ , évitant les instabilités d'Ostrogradski et permet d'effacer les effets du champ scalaire à petite distance. La théorie devient compatible avec les tests du système solaire et des pulsars binaires, sans nécessiter d'ajustement fin ni devoir spécifier la dynamique du champ vectoriel (Babichev, Deffayet et Esposito-Farèse 2011b).

Nous avons exploré une autre façon de reproduire la phénoménologie de MOND dans une théorie non-locale, comme certaines corrections quantiques le prédisent (Deffayet, Esposito-Farèse et

---

Woodard 2011). Dans ce cadre, nous avons montré qu'un modèle purement métrique peut non seulement tendre vers la relativité générale à petite distance malgré son comportement MONDien à grande distance, mais également prédire une déflexion de la lumière compatible avec les lentilles gravitationnelles observées.

Une autre approche a été étudiée dans (Blanchet et Marsat 2011). Elle est fondée sur l'idée que dans un régime de très faibles accélérations, en dessous de l'accélération critique de MOND, l'invariance locale de Lorentz pourrait être violée. Cette idée est inspirée par des travaux récents qui suggèrent que l'invariance de Lorentz pourrait être violée à très haute énergie, et que cela permettrait de définir une théorie quantique de la gravitation renormalisable (théorie dite de Hořava-Lifchitz).

#### **6.2.4 Matière noire modifiée**

Dans une approche très différente, Blanchet (2007a) montre que la phénoménologie MOND peut se réinterpréter comme résultant d'un effet de « polarisation gravitationnelle » d'un milieu formé de moments dipolaires gravitationnels, alignés dans le champ produit par les masses ordinaires, et qui constituerait une forme nouvelle de matière noire. Ce modèle, initialement non relativiste, a été fortement amélioré (Blanchet 2007b, Blanchet et Le Tiec 2008, 2009) et permet d'aboutir à un modèle viable de matière noire, et aussi d'énergie noire. La matière noire dipolaire reproduit la phénoménologie de l'énergie sombre plus la matière noire standard (CDM) sur des échelles cosmologiques, au premier ordre de perturbations cosmologique autour d'un espace de Friedman-Lemaître-Robertson-Walker.

#### **6.2.5 Théories de « galiléons »**

Le modèle d'univers branaire de Dvali, Gabadadze et Porrati (DGP) est correctement décrit, dans sa limite dite de découplage, par un champ scalaire dont l'équation ne dépend que de ses dérivées secondes. Elle est donc invariante par l'ajout à son gradient d'un quadrivecteur constant arbitraire. Cette symétrie lui permet de décrire un modèle cosmologique en expansion accélérée. Ses généralisations, sous le nom de « galiléons » ont été étudiées par Nicolis, Rattazzi et Trincherini. En espace plat, ils ont obtenu toutes les actions d'un champ scalaire conduisant à des équations ne dépendant que des dérivées secondes.

Cependant, en espace courbe, ces actions conduisent à des équations contenant des dérivées d'ordre 3, ce qui implique généralement une instabilité de la théorie. Nous avons démontré qu'il suffit d'y ajouter certains couplages non-minimaux à la courbure pour éliminer toutes les dérivées d'ordre 3 (Deffayet, Esposito-Farèse et Vikman 2009). Ce travail a ensuite été généralisé en toute dimension (Deffayet, Deser et Esposito-Farèse 2009). Finalement, nous avons montré que cette notion de galiléon généralisé pouvait aussi être définie, en espace courbe de dimension arbitraire, pour des  $p$ -formes de degré quelconque (Deffayet, Deser et Esposito-Farèse 2010). Ce travail fournit une très vaste classe de théories dont les équations dépendent de dérivées d'ordre  $\leq 2$ .

#### **6.2.6 Rayonnement gravitationnel des branes**

Les branes peuvent être accélérées et se pose alors la question de leur rayonnement gravitationnel, correspondant à l'émission de boucles de corde. Ce problème peut être étudié en considérant une brane dans un univers de Rindler. On peut montrer (De Klerk, Murugan et Uzan 2011) qu'une corde suspendue à la brane a une forme de chaînette. Si on permet à ses extrémités de se déplacer librement sur la brane, il est possible de calculer le temps caractéristique pour que les extrémités se rejoignent.

#### **6.2.7 Principe d'équivalence et constantes fondamentales**

La non variation des constantes de la nature permet de tester le principe d'équivalence aux échelles cosmologiques. Ce sujet de recherche a activement été considéré par notre groupe, ce qui a mené à la publication d'une revue invitée (Uzan 2011), et à plusieurs conférences invitées (Uzan 2009a, b,

---

2010b). Ces dernières années ont vu l'amélioration de nombreuses contraintes expérimentales et observationnelles. Nous avons contribué à ces progrès dans le domaine de la nucléosynthèse primordiale en collaboration avec le groupe "Cosmologie et Astrophysique des hauts énergies" (Coc et al. 2007) et en proposant une nouvelle méthode (Ekström et al. 2010, Coc et al. 2009) basée sur l'évolution des étoiles de population III et de sa modification due au déplacement du niveau de Hoyle.

D'un point de vue théorique, nous avons étudié en détail les conséquences des théories d'unification sur la variation couplée des constantes (Coc et al. 2007). Nous avons ainsi établi (Luo, Olive et Uzan 2011) les expressions des moments gyromagnétiques en fonction des constantes fondamentales sous plusieurs hypothèses d'unification. Ceci permet d'obtenir des contraintes plus fortes sur la variation des constantes. D'un point de vue phénoménologique, il a été argumenté que les observations des systèmes d'absorption de quasars indiquaient une variation spatiale de la constante de structure fine. Une telle variation est difficilement compatible avec les modèles existants. Nous avons proposé le premier modèle (Olive, Peloso et Uzan 2011) permettant d'obtenir une variation strictement spatiale aux échelles cosmologiques.

Nous avons montré (Wolf et al. 2010, 2011a,b,c) que la réinterprétation récente par Müller, Peters et Chu des expériences d'interférométrie atomique comme tests du rougissement gravitationnel est incorrecte.

## 6.3 Théorie des Cordes et applications

La théorie des cordes est susceptible de décrire la gravitation quantique, mais aussi les autres interactions. Ces deux aspects, inextricables, nous apportent tantôt un éclairage sur la gravitation, tantôt sur les théories de jauge décrivant les interactions non-gravitationnelles.

### 6.3.1 Théories de cordes et de jauge non-supersymétriques

La construction de théories de jauge non supersymétriques à l'aide de la théorie des cordes nécessite la compréhension de modèles de théorie des cordes sans fermions. Cela semblait impossible à obtenir en raison d'un théorème dû à Kutasov et Seiberg. Nous avons montré (Israël et Niarchos, 2007a) comment contourner ce théorème en utilisant des cordes non-critiques et non-orientées. Cela a nécessité la construction de nouveaux « orientifolds » (Israël et Niarchos, 2007b). Nous avons obtenu le premier modèle connu de cordes stables perturbativement sans fermions, et ensuite étudié (Armoni et al. 2008) une variante particulière de la chromodynamique quantique pour laquelle cette construction induit une dualité électrique/magnétique qui permet d'étudier le confinement. Par des méthodes similaires, nous avons étudié la théorie sur le volume d'univers des murs de domaines séparant différents vides après brisure de la symétrie chirale en théorie de jauge supersymétrique (Armoni et al. 2009), trouvant une dualité permettant d'accéder au couplage fort.

### 6.3.2 Compactifications hétérotiques avec flux

Les compactifications avec flux sont actuellement les candidats les plus sérieux pour obtenir des modèles phénoménologiquement réalistes. Dans le cas de la corde hétérotique, ces compactifications sont encore mal connues. Nous avons montré (Carlevaro, Israël et Petrououlos 2010, Carlevaro et Israël 2010) comment obtenir des modèles locaux de telles compactifications exactement solubles. Nous utilisons maintenant ces résultats pour calculer les corrections quantiques aux couplage de jauge.

### 6.3.3 Gravitation quantique à trois dimensions

La gravitation quantique à trois dimensions possède une physique plus simple qu'à quatre dimensions. Une généralisation, la *gravitation topologiquement massive*, permet l'existence d'un degré de liberté dynamique. Les vides de cette théorie sont des espaces anti-de Sitter déformés, pour lesquels les propriétés asymptotiques sont mal connues. Nous avons étudié leur plongement en théorie des cordes

---

(Detournay et al. 2011), obtenant une réalisation microscopique de leurs symétries asymptotiques.

#### **6.3.4 Annihilation des branes**

Les Dp-branes peuvent s'annihiler lorsque leurs charges sont opposées, par la condensation d'un champ tachyonique. Une solution décrivant ce processus n'était connue que lorsque les deux branes sont coïncidentes. Nous avons étudié en détail (Israël et Kiefer, 2012) ce processus lorsque les deux branes sont séparées dans l'espace. Ce cas de figure est plus réaliste dans le cadre de modèles d'inflation. Nous avons trouvé une famille de solutions exactes du système, et montré comment l'existence de telles solutions contraignait la forme de l'action effective.

#### **6.3.5 D-branes et géométrie aux petites échelles**

La géométrie de l'espace-temps aux très petites échelles est perçue de manière différente pour la théorie des cordes ; ainsi un cercle de rayon comparable à l'échelle des cordes peut être équivalent à un segment. Nous avons montré (Gaberdiel, Israël et Rabinovici 2008) comment, dans cet exemple, cette ambiguïté de la description géométrique persiste pour toutes les D-branes. Dans un autre travail Israël (2007) a étudié la décroissance du tachyon sur deux types de D-branes, l'une avec une instabilité géométrique et l'autre avec une instabilité due à son absence de charge, dans un espace-temps fortement courbé. Il a montré que lorsque la courbure devient de l'échelle des cordes, les deux types de D-branes, ainsi que l'état de bord décrivant leur décroissance, coïncident.

### **6.4 Astroparticules**

Dans le domaine des astroparticules, notre activité s'est focalisée sur la compréhension de l'origine du rayonnement cosmique d'ultra haute énergie, sur les processus d'accélération de particules dans les sources relativistes et sur les techniques de détection directe et indirecte de matière noire.

#### **6.4.1 Rayonnement cosmique d'ultra haute énergie**

Le rayonnement cosmique d'ultra haute énergie ( $E > 10^{18}$  eV) se compose principalement de protons ou noyaux lourds issus de sources extragalactiques. Le flux est extrêmement faible mais l'énergie est considérable. L'origine de ces particules constitue une énigme de l'astrophysique moderne, qui repose sur deux questions essentielles : quelle source (et par quel mécanisme) peut accélérer des particules jusqu'aux plus hautes énergies ? Pourquoi ne voit-on pas de contrepartie astrophysique dans la direction d'arrivée de ces événements ? Notre groupe s'intéresse à l'accélération dans les sources relativistes, à la propagation de ces particules dans les champs magnétiques et à l'interprétation des résultats expérimentaux.

Nous avons déjà mis en évidence l'existence d'un horizon magnétique : le temps caractéristique de diffusion d'un proton de  $< 10^{18}$  eV depuis une source située à 50Mpc devient supérieur à l'âge de l'Univers si le champ intergalactique typique excède 1 nano-Gauss (Lemoine, 2005). Nous avons amélioré cette étude en prenant en compte l'inhomogénéité du champ magnétique, en calquant leur intensité sur une simulation N-corps de matière noire produite par le groupe « Grandes structures et Univers profond » (Kotera et Lemoine 2008a). Nous observons que l'effet d'horizon magnétique subsiste mais que son efficacité dépend du degré de magnétisation des vides de grandes structures.

Nous avons également élaboré une méthode de calcul analytique de la déflexion angulaire, qui prend en compte de façon simplifiée l'inhomogénéité des champs magnétiques extragalactiques (Kotera et Lemoine 2008b). Ce travail permet d'explicitier la dépendance de l'influence des champs magnétiques sur les paramètres qui caractérisent leur distribution. Nous avons discuté la corrélation entre les directions d'arrivée des événements de haute énergie et les noyaux actifs de galaxies proches, annoncée en 2007 par l'expérience Pierre Auger, arguant que cette corrélation est probablement un

---

artifice qui traduit la corrélation entre les directions d'arrivée et les grandes structures, dans lesquelles les sources de ces particules se cachent. Les noyaux actifs de galaxies « vus » par Auger semblent en effet trop faibles pour accélérer des protons aux énergies détectées (Lemoine et Waxman 2009). Même si les champs magnétiques impartissent une faible déflexion angulaire aux particules, ils peuvent biaiser la distribution des directions d'arrivée sur le ciel si les sources sont des objets éphémères (Kalli, Lemoine, Kotera 2011). Cette signature particulière pourrait aider les expériences de prochaine génération à distinguer si la source est éphémère ou continue, pour des protons.

Si les particules d'ultra-haute énergie sont des noyaux lourds, la déflexion angulaire attendue devient importante ; la production de particules secondaires par interaction avec les fonds de rayonnement lors du trajet en est réduite ; l'accélération devient plus aisée et donc la phénoménologie en est radicalement modifiée (Lemoine 2011). Ainsi la détection de contreparties aux sources en photons gamma GeV-TeV qui proviennent des cascades électromagnétiques engendrées à proximité des sources devient difficile, même avec les instruments de prochaine génération comme CTA (Kotera, Allard, Lemoine 2011).

La corrélation entre les directions d'arrivée et les grandes structures devrait s'effacer avec une déflexion angulaire croissante. Néanmoins, nous avons montré qu'une anisotropie importante devrait être produite à une énergie  $E/Z$  si on observe une anisotropie à une énergie  $E$ , produite par des noyaux de charge  $Z$ . Appliquant ce test aux données d'Auger, nous montrons que les anisotropies observées sont en contradiction apparente avec une composition lourde aux très hautes énergies, si la composition chimique à la source s'apparente à celle à plus basse énergie. Cette proposition a fait l'objet d'une publication dédiée de la collaboration *Auger (2011)*, validant nos résultats. Dans Lemoine et Waxman (2009), nous proposons qu'au moins une partie de l'excès d'événements observé par Auger dans la direction de Cen A résulte de l'accélération de protons dans des sources de type sursauts gamma ou magnetars.

#### **6.4.2 Accélération de particules dans les sources relativistes**

L'accélération aux très hautes énergies requiert des sources plus énergétiques que les supernovae et des flots relativistes (e.g. Lemoine et Waxman 2009). L'accélération par le schéma de Fermi est le mécanisme le plus couramment envisagé ; il fait l'objet de nombreuses investigations dans la limite relativiste. Nous avons quantifié les caractéristiques de la micro-turbulence devant permettre à ce processus de se développer, en analysant la cinématique des particules (Pelletier, Lemoine et Marcowith 2009). Ce travail permet de comprendre les résultats de simulations de Monte-Carlo menées par un autre groupe. Nous avons étudié en détail le transport des particules dans une telle micro-turbulence en présence d'un champ magnétique moyen et évalué analytiquement les coefficients de diffusion dans Plotnikov, Pelletier et Lemoine (2011). Dans le travail précédent nous avons également proposé une nouvelle source de micro-turbulence en mettant en évidence une instabilité magnétohydrodynamique relativiste en amont de l'onde de choc, provoquée par la charge électrique nette des particules accélérées. Ce travail met donc en évidence une relation non-linéaire entre le processus d'accélération et le processus de génération de la micro-turbulence.

Ce domaine de recherche a connu un développement accéléré grâce aux performances des simulations numériques de type N-corps. En 2008, Spitkovsky a mis en évidence l'existence d'un processus de Fermi relativiste dans une onde de choc non-magnétisée, puis l'absence d'accélération à forte magnétisation. Ce dernier résultat est en bon accord avec les arguments développés ci-dessus. Dans le cas de l'onde de choc non magnétisée, les particules accélérées génèrent elles-mêmes la micro-turbulence avec laquelle elles interagissent dans le processus de Fermi. Nous avons étudié les instabilités cinétiques qui peuvent se développer en amont d'une onde de choc relativiste, les particules supra-thermiques jouant le rôle de faisceau précurseur pénétrant le plasma non choqué (Lemoine et Pelletier 2010). En calculant et comparant le temps de croissance des diverses instabilités au temps disponible avant traversée du choc, nous identifions les instabilités principales ainsi que le niveau de magnétisation en deçà duquel les instabilités peuvent croître. Nos résultats sont validés par des simulations récentes. Nous avons ensuite pris en compte la dispersion angulaire du faisceau et le chauffage du milieu non choqué en amont du choc dans Lemoine et Pelletier (2011a). Ces travaux tissent des liens avec la communauté des interactions laser-plasmas avec laquelle nous avons entamé

---

des discussions en vue d'une collaboration.

Au final, nous montrons que les chocs relativistes à magnétisation modérée ou élevée ne donnent pas lieu à un processus de Fermi car les instabilités n'ont pas le temps de croître sur le temps de traversée du précurseur, qui diminue avec une magnétisation croissante. Ces résultats sont détaillés dans un article de revue consacré à l'accélération dans les sursauts gamma (Lemoine et Pelletier 2011b).

Nous avons appliqué notre modélisation analytique du processus de Fermi à l'accélération de particules autour d'une onde de choc externe d'un sursaut gamma en phase de décélération. Pour cela, nous suivons la dynamique de l'onde de choc dans un milieu externe supposé magnétisé (1 milli-Gauss ou plus), puis nous calculons la signature radiative du chauffage ou de l'accélération des électrons en fonction des capacités accélératrices de l'onde de choc (Lemoine et Pelletier 2011c). Nous trouvons une courbe de lumière caractéristique dans le domaine des X, avec une perte de flux marquée environ 100 secondes après le sursaut puis une récupération au-delà de 10000 sec, lorsque l'accélération devient efficace. Cette signature s'apparente à une partie des courbes de lumière en X observée par le satellite *Swift*. Ces travaux tissent des liens avec le groupe « Astrophysique et Cosmologie des hautes énergies ».

### 6.4.3 Détection directe ou indirecte de matière noire

Le groupe s'investit dans la détection directe ou indirecte de matière noire. En 2008, l'observation d'un important flux de positrons à haute énergie par le satellite PAMELA a donné vie à une véritable explosion d'intérêt vers les recherches indirectes de matière noire. Notre groupe a montré que l'interprétation des données de PAMELA en termes d'annihilation de matière noire n'est pas possible, à moins de postuler des propriétés exotiques pour ces particules (Bertone et Fairbairn 2008, Bertone et al. 2009a, b, Pato, Pieri et Bertone 2009). Nous avons calculé les contraintes sur la section efficace d'auto-annihilation provenant de l'analyse du fond diffus cosmologique (Galli et al. 2009, 2011), via l'analyse des modifications du spectre de température et polarisation mesuré par WMAP. Nous avons également étudié les contraintes qui pourront être obtenues avec le satellite *Planck*. Ces contraintes sont particulièrement fortes car elles ne dépendent pas des détails de formation de structures comme montré dans (Cirelli, Iocco et Panci 2009).

Parmi les recherches indirectes, les observations de photons gamma sont probablement les plus intéressantes, car ces photons ne perdent pas d'énergie dans l'Univers local et ils ne subissent pas l'effet des champs magnétiques. En partant de simulations numériques de haute résolution, notre groupe a étudié le nombre de sous structures de matière noire qui pourrait être observées par le satellite *Fermi* (Pieri, Bertone, Branchini 2008). Notre groupe s'est distingué dans l'analyse des anisotropies de la radiation d'annihilation dans le fond diffus gamma (Fornasa et al. 2009, Taoso et al. 2008).

Un autre sujet d'activité importante pour notre groupe concerne l'étude des effets de différents modèles de matière noire sur des étoiles des différentes générations. Par exemple, les modèles de matière noire auto-annihilante laissent une trace dans les étoiles de première génération (Population III) soit dans leur phase de formation proto-stellaire (Ripamonti et al. 2010) soit dans leur phase de séquence principale (Taoso et al. 2009). Cela pourrait offrir des observables à grand décalage spectral, avec des signatures reconnaissables par les télescope spatiaux de prochaine génération tels que JWST (Zackrisson et al. 2010a, Iocco 2009). Des contraintes sur la section efficace d'interaction ont également été obtenues à partir du flux de chaleur estimé au centre de la Terre (Mack et al. 2007).

La matière noire n'ayant pas la propriété d'auto-annihilation a quant à elle la possibilité de s'amasser à l'intérieur des étoiles et de modifier leur structure : ainsi, les petites modifications imposées sur la structure du soleil devraient déjà être visibles avec une modification du flux de neutrinos. Leur non-observation permet donc d'éliminer des régions de l'espace des paramètres pertinents (Taoso et al. 2010).

Notre groupe a aussi contribué aux activités de recherche directe de matière noire. La détermination de la densité locale de matière noire apparaissant ici comme une des informations cruciales, nous avons

---

utilisé des données astrophysiques afin de la déterminer (Iocco et al. 2011).

Dans certaines théories supersymétriques, le gravitino est la particule la plus légère. Les recherches indirectes sont pratiquement impossibles, sauf si la parité-R est violée. Notre groupe, en collaboration avec des théoriciens du laboratoire allemand DESY, a montré que dans ce cas l'observation de rayons gamma provenant de la désintégration des gravitinos devrait être possible, et que la distribution des directions d'arrivée de ces photons serait bien différente par rapport au cas de l'annihilation des neutralinos (Bertone et al. 2007a). Le gravitino devient également le partenaire supersymétrique le plus léger dans les modèles GMSB (« *gauge mediated supersymmetry breaking* »). Nous avons montré qu'alors un gravitino de masse 1 MeV apparaît comme un candidat naturel de matière noire lorsque le messenger le plus léger est un singlet sous le groupe d'unification SO(10) (Lemoine, Moultaqa et Jedamzik 2007).

## 6.5 Cosmologie et physique fondamentale

### 6.5.1 Accélération de l'Univers et quintessence

L'existence d'une phase récente d'accélération de l'expansion cosmique semble établie. Une constante cosmologique est un candidat naturel. Cependant, sa densité d'énergie ( $\sim 10^{-47}$  GeV<sup>4</sup>) diffère d'un facteur  $10^{120}$  de l'énergie attendue des fluctuations du vide. Si cette dernière est nulle, une autre composante de matière pourrait être responsable de l'accélération. Il faut toutefois expliquer pourquoi cette composante a une densité d'énergie comparable à celle de la matière noire aujourd'hui. Les modèles de quintessence, qui font intervenir un champ scalaire, peuvent résoudre ce problème. Reste à les incorporer dans un modèle réaliste de physique des particules (Brax et Martin 2007a).

Récemment, nous avons étudié le couplage du champ de quintessence avec la matière ordinaire. La supergravité est le cadre naturel pour cette analyse. Nous avons également considéré un secteur où la supersymétrie est brisée. Si on suppose que les trois secteurs (visible, caché, quintessence) sont indépendants, alors le couplage entre les différents champs est entièrement fixé. Nous avons calculé ces couplages et établi l'esquisse d'un théorème montrant la grande difficulté qu'il y a à construire un modèle convaincant ; soit la brisure de supersymétrie donne une masse très grande au champ de quintessence, et le modèle devient équivalent à une constante cosmologique. Soit le secteur caché et le secteur de quintessence sont tels que la masse du champ de quintessence reste faible ; dans ce cas le couplage entre les champs de Higgs et le champ de quintessence implique la présence d'une cinquième force, qui viole génériquement de plusieurs ordres de grandeur les contraintes connues.

Dans Brax et al. (2009) nous avons essayé de résoudre le problème précédent en utilisant la symétrie dite de décalage. Elle permet de réduire le couplage entre l'énergie sombre et la matière ordinaire. Nous avons démontré qu'une brisure de cette symétrie ne modifie pas ce résultat. Cependant, la présence d'opérateurs brisant la symétrie de décalage conduit à un potentiel qui développe un minimum à une très petite valeur du champ. Le champ se stabilise très tôt et le modèle devient équivalent à une constante cosmologique.

Nous avons considéré (Brax et Martin 2007b) que le champ de quintessence était un module, donnant un potentiel de forme adéquate. Puis, nous avons essayé de « cacher » l'interaction entre le secteur sombre et la matière en utilisant l'effet caméléon (c.-à-d. que le potentiel effectif de la quintessence dépend des champs de matière environnants). Par exemple, il n'est pas le même à l'intérieur d'un corps massif et dans le vide. Dans le cas du module envisagé dans notre article, l'effet caméléon existe mais, malheureusement, il est trop faible pour passer les tests de la gravité.

Il est possible d'obtenir des contraintes sur les potentiels de quintessence en combinant les observations de SNIa, du fond diffus cosmologique et de distorsion gravitationnelle du CFHTLS . Nous avons effectué la première analyse de données du CFHTLS pour contraindre les propriétés de l'énergie sombre en collaboration avec le groupe « Grandes structures et Univers profond » (Vallinotto et al. 2007).

---

L'accélération cosmique pourrait également résulter d'une déviation de la relativité générale aux échelles cosmologiques. Une classification des modèles capables d'expliquer une telle accélération regroupant les modèles par classe d'universalité a été proposée (Uzan 2007). Cette étude a aussi proposé la première méthode d'une paramétrisation post- $\Lambda$ CDM afin de tester la relativité générale aux échelles cosmologiques. Ce formalisme est utilisé pour diverses études liées à la mission *Euclid*. Une approche différente consiste à considérer la version sans trace des équations d'Einstein. Cette idée a été revue et actualisée dans Ellis et al. (2011). Les rôles du principe copernicien et des hypothèses sur notre théorie de la gravitation sont détaillés dans Uzan (2010a).

Parallèlement, divers modèles spécifiques ont été étudiés en détail afin d'obtenir des contraintes à partir des observations cosmologiques. Nous avons étudié les modèles de quintessence (Schimd et al. 2007), et surtout les théories tenseur-scalaire en étendant nos analyses précédentes sur la nucléosynthèse primordiale afin d'inclure des modèles avec des couplages non-universels (Coc et al. 2009) avec le groupe « Cosmologie et Astrophysique des hautes énergies » et les corrections à la dynamique cosmologique induite par les effets quantiques (Cembrano et al. 2009).

Cette thématique nous a conduits à confronter les prédictions de plusieurs modèles cosmologiques aux observations (Schimd et al. 2007). Nous avons montré que l'utilisation des seules données cosmologiques nécessite l'introduction de neutrinos sans masse (Tereno et al. 2009). Nous avons aussi démontré le bien fondé de l'utilisation de la dérive temporelle des *redshifts* gravitationnels (Uzan, Clarkson et Ellis 2008) et proposé une étude de la distorsion spectrale des anisotropies du fond diffus cosmologique comme signature de la dynamique non-linéaire (Pitrou, Bernardeau, and Uzan 2010).

Nos travaux (Babichev, Deffayet et Esposito-Farèse 2011b) ont montré que les effets d'un champ scalaire peuvent être écartés à courte distance grâce à une généralisation de l'effet Vainshtein (« *k*-mouflage »). Dans ce cadre, on s'attend donc à ce qu'aucune déviation de la relativité générale ne puisse être observable dans le système solaire. Toutefois, nous montrons (Babichev, Deffayet et Esposito-Farèse 2011a) qu'un effet cosmologique n'est pas supprimé par ce mécanisme, dans les théories tenseur-scalaire ne dépendant que du gradient de ce champ : la variation temporelle de la constante de gravitation. Cela réduit l'espace des théories envisageables.

### 6.5.2 Modèles d'inflation et données observationnelles

Le modèle prototype pour l'inflation est celui d'un champ scalaire en roulement lent. L'inflation fournit également un mécanisme expliquant l'origine des perturbations cosmologiques (Martin 2008) par amplification des fluctuations quantiques du vide. La procédure de quantification est bien comprise quand l'espace-temps moyen est homogène et isotrope. Celle-ci a été généralisée à des espaces homogènes mais non isotropes (Pitrou et Uzan 2007) afin de comprendre la robustesse du mécanisme.

Les modèles d'inflation fondés sur la théorie des cordes apportent de nouveaux aspects. Par exemple, le terme cinétique peut être de type Dirac-Born-Infeld, cas particulier d'une classe plus large appelée « *k*-inflation », mais justifié par la théorie des cordes. Les prédictions physiques de ces modèles sont changées. La confrontation de celles-ci aux données a été étudiée dans Lorenz, Martin et Ringeval (2008a, b, c).

Dans un premier article, nous nous sommes intéressés au calcul du spectre des fluctuations primordiales en « *k*-inflation ». Nous avons montré que, contrairement au cas standard, la vitesse du son des perturbations n'est plus égale à 1. Il est nécessaire de définir une nouvelle hiérarchie de paramètres de roulement lent liée aux dérivées de la vitesse du son. On obtient alors de nouveau un spectre dont les coefficients dépendent des paramètres de la nouvelle hiérarchie. Nous avons appliqué le formalisme ainsi obtenu à différents modèles d'inflation branaria connus dans la littérature, excluant l'un d'eux par les observations. Le deuxième travail a consisté à comparer ce spectre aux données les plus récentes, celles de WMAP5. Nous avons été les premiers à obtenir des contraintes sur la

---

température de réchauffement à partir des données sur le rayonnement de fond (Martin et Ringeval 2010), et à calculer l'évidence bayésienne pour un certain nombre de modèles (Martin, Ringeval et Trotta 2011). Nous avons ainsi pu montrer que, l'inflation à petits champs semble être le modèle qui rend compte le mieux des données de WMAP.

L'étude détaillée des perturbations de densité (modes scalaires) et des ondes gravitationnelles (modes tenseur) produites devient cruciale. Le spectre des ondes gravitationnelles produites par le couplage à l'ordre 2 des modes scalaire et tenseur (Osano et al. 2007) a été calculé. Nous avons aussi montré comment le formalisme de quantification des perturbations pendant l'inflation pouvait se généraliser afin de prendre en compte de tels effets non-linéaires (Pitrou et Uzan 2007).

Les scénarios impliquant plusieurs champs ont une phénoménologie riche. Dans les modèles de curvaton, les désintégrations différentielles de l'inflaton et du curvaton peuvent donner lieu à des modes de perturbation isocourbes de grande ampleur (Lemoine, Martin et Petit 2008). Dans le cadre de la théorie des cordes, les champs modules apparaissent comme d'excellents candidats curvatons. En réalité, les perturbations isocourbes baryons-rayonnement ou matière noire-rayonnement produites lors de la désintégration tardive de ces champs sont de grande ampleur, en contradiction avec les limites supérieures obtenues par l'analyse du fond diffus cosmologique, sauf si les champs modules possèdent une masse élevée durant l'inflation (Lemoine, Martin et Yokoyama 2010). Il est donc possible de contraindre de manière sévère l'espace des paramètres de ces champs modules (Lemoine, Martin et Yokoyama 2009).

La dynamique post-inflationnaire peut induire des effets intéressants. Nous avons calculé le niveau d'ondes gravitationnelles produites pendant la phase de (p)réchauffage (Dufaux et al. 2007), et montré comment la quantification des perturbations pouvait se généraliser afin de prendre en compte de tels effets non-linéaires (Pitrou et Uzan 2007). Nous avons montré que les perturbations de faible longueur d'onde sont sujettes à une forte instabilité paramétrique pendant le préchauffage (Jedamzik, Lemoine et Martin 2010a) et calculé le spectre d'ondes gravitationnelles qu'elle produit (Jedamzik, Lemoine et Martin 2010b). Les signaux obtenus semblent à la portée d'expériences de type DECIGO.

Un volume édité par notre groupe (Lemoine, Martin et Peter 2007) dans *Lecture Notes in Physics* rassemble des textes sur l'inflation, à l'occasion du colloque de l'IAP 2006 organisé par notre groupe.

### 6.5.3 Rebonds primordiaux

En dépit des succès phénoménologiques de l'inflation, il paraît important de construire des modèles alternatifs. Dans les modèles de rebond, le facteur d'échelle passe par un minimum. Il faut alors soit que l'Univers ait des sections spatiales sphériques, soit qu'il existe un fluide d'énergie négative. Il faut alors expliquer pourquoi cette courbure est si faible aujourd'hui, ce qui revient à invoquer une phase d'inflation. Quant aux fluides d'énergie négative, ils génèrent des instabilités presque incontrôlables.

En premier lieu, le cas d'un espace positivement courbé contenant un champ scalaire a été étudié, ce qui a permis de déterminer les conditions rendant un rebond possible. Les perturbations sont modifiées au passage du rebond, rendant douteux certains modèles où un spectre invariant d'échelle serait produit dans la phase de contraction. Nous avons étudié toutes les contraintes et les conséquences cosmologiques possibles d'un tel rebond classique (Falciano, Lilley et Peter 2008). Ultérieurement, le spectre modifié au travers d'un tel rebond a été comparé aux données de WMAP (Lilley, Lorenz Clesse 2011). Nous avons aussi étudié la situation dans laquelle le rebond est liée à la présence d'un fluide d'énergie négative, calculant le spectre correct résultant (Finelli, Peter et Pinto-Neto 2008), mettant fin à une polémique.

De manière générale, un rebond classique à sections spatiales plates n'est possible que de deux façons : en acceptant que le fluide cosmologique ne satisfasse pas la condition d'énergie nulle ou en modifiant la théorie de la gravitation. Le premier cas représente une adaptation des modèles dit de *K*-essence (Abramo et Peter 2007) ; il s'ensuit de ces modèles qu'une courbure, même infinitésimale, est nécessaire pour passer au travers de la phase de rebond. Dans le deuxième cas, nous avons étudié des

---

théories de gravité modifiées construites de sorte à éviter la présence de singularités (Abramo, Peter et Yasuda 2010) ; là encore, la courbure s'avère cruciale, quoique le temps caractéristique mis par l'Univers pour réaliser le rebond n'en dépende pas explicitement, de sorte que la limite à courbure nulle est bien définie.

L'introduction des effets de cosmologie quantique peut être réalisée grâce à la formulation hamiltonienne de la relativité générale. On tente alors de résoudre l'équation de Wheeler-de Witt en postulant que la fonction d'onde ne dépend que du facteur d'échelle. Il est possible d'écrire le hamiltonien des perturbations sous une forme canonique dans laquelle les modes sont découplés. Les équations de ces modes peuvent être obtenues sans utiliser les équations de la métrique de base. En s'appuyant sur l'interprétation de de Broglie-Bohm de la fonction d'onde, il est possible d'exhiber des solutions d'univers de courbure nulle et dominés par un gaz parfait d'équation d'état constante, dans lesquelles se produit un rebond à une échelle de longueur arbitraire. La théorie des perturbations peut alors être appliquée pour prédire le spectre d'ondes gravitationnelles ; il peut être invariant d'échelle si la phase de contraction est dominée par la poussière. Donc il est possible, quoique très contraint, de produire des perturbations cosmologiques compatibles avec les observations dans un modèle n'ayant aucune phase d'inflation (Peter, Pinho et Pinto-Neto 2007). Cela nous a permis de construire un nouveau paradigme dans lequel aucune phase d'inflation n'est nécessaire, tous les problèmes de la cosmologie standard ayant des solutions dans ce cadre (Peter et Pinto-Neto 2008). Nous étudions maintenant les prédictions afférentes.

#### 6.5.4 Défauts topologiques

La revue de Peter (2007) a initié un regain d'intérêt pour les cordes cosmiques. Cela a été l'occasion de considérer des cordes parcourues par plusieurs courants. Nous avons alors montré (Lilley, Peter et Martin 2009) que deux cas de figure se présentaient : soit les courants étaient faiblement couplés, et alors il était possible d'ajouter simplement les lagrangiens macroscopiques des différents courants, soit au contraire les couplages étaient forts, voire intermédiaires, et alors certains condensats jouaient un rôle de masse effective pour d'autres, de sorte que le nombre total de courants effectivement condensés dans les vortices était diminué, ces courants se comportant alors comme s'ils étaient faiblement couplés.

La généralisation aux courants non-abéliens pose beaucoup de problèmes. Nous avons étudié par exemple le cas où le condensat est un doublet de  $SU(2)$ . Nous avons constaté (Lilley et al. 2010) que les courants induits sont soit de genre lumière, soit de genre quelconque, et il faut alors avoir recours à une approximation dite « ultra-locale » qui comporte, au lieu du paramètre d'état usuel de la corde, 12 nouveaux paramètres !

#### 6.5.5 Dynamiques des perturbations cosmologiques

L'interprétation des observations cosmologiques repose en grande partie sur la théorie des perturbations. Ces dernières années ont vu le développement de la compréhension des aspects non-linéaires, auquel nous avons activement participé, en particulier l'analyse des anisotropies de température du fond diffus. La première étude de l'équation de Boltzman à l'ordre 2 a été effectuée dans la thèse de Cyril Pitrou (Pitrou 2007, Pitrou 2009a) ; dans Pitrou (2009b) la polarisation a été incluse.

Nous avons proposé la première compréhension analytique (Pitrou, Uzan et Bernardeau 2008) du bispectre de ces anisotropies de température aux petites échelles. Ce résultat a été confirmé par l'analyse complète de l'équation de Boltzmann pour le transfert de la radiation au second ordre et de son intégration numérique (Pitrou, Uzan et Bernardeau 2010). Il s'agit de la première étude complète de ce genre et elle a permis d'obtenir une estimation du niveau de non-gaussianité induite par la dynamique non-linéaire de la gravitation. Ce travail repose sur une extension du formalisme du ciel plat (Pitrou, Bernardeau et Uzan 2010) et a aussi permis de montrer qu'il existait une signature particulière de ces effets sous la forme d'une distortion spectrale du spectre.

---

Parallèlement, nous avons développé (Pereira, Pitrou et Uzan 2007) le premier formalisme de perturbations pour des espace-temps non isotropes (de type Bianchi I). Ceci a permis (Pitrou, Pereira et Uzan 2008) d'obtenir la signature d'une anisotropie primordiale. Ce formalisme nous a aussi permis de démontrer (Kofman, Uzan et Pitrou 2011) l'instabilité des espace-temps de Kasner à des perturbations linéaires.

### 6.5.6 Remise en cause et tests du principe copernicien

Nous avons proposé le premier test observationnel du principe copernicien (Uzan, Clarkson et Ellis 2008) en utilisant la dérive temporelle des *redshifts* cosmologiques. Nous avons ensuite montré (Dunsby et al. 2010) que cette mesure permettrait en effet de différencier des modèles cosmologiques ayant des signatures observationnelles identiques. Ceci nous a conduits à essayer de comprendre comment la structure de l'Univers, supposée homogène à grande échelle, émerge de celle d'une distribution de points. Cela a nécessité le développement de nouvelles solutions cosmologiques des équations de la relativité (Uzan, Ellis et Larena, 2011) et ouvre des voies de recherches intéressantes.

## 6.6 Prospective

Les travaux du groupe GReCO se poursuivent dans les directions suivantes :

- Thermodynamique des trous noirs binaires à l'aide d'approximations post-newtoniennes ;
- Polarisations d'ondes gravitationnelles à l'ordre 3,5PN pour des trous noirs binaires sans spin ;
- Le calcul de l'effet spin-orbite à un ordre post-newtonien élevé ;
- Technique des pôles de Regge pour resommer la série des corrections relativistes ;
- La prise en compte de pulsars binaires récemment chronométrés pour contraindre diverses théories alternatives de la gravitation, dont les tenseur-scalaire et TeVeS (MOND relativiste) ;
- L'étude de la stabilité et du problème de Cauchy des théories de galiléons généralisés en espace courbe, ainsi que de solutions particulières notamment en symétrie sphérique ;
- L'étude de la dynamique d'une onde de choc relativiste, en prenant en compte l'interaction non-linéaire entre particules accélérées et environnement du choc ;
- L'application des modèles d'accélération de particules aux sources astrophysiques relativistes, en particulier les sursauts gamma, vents de pulsars et noyaux actifs de galaxies ;
- L'interprétation des résultats d'Auger sur les anisotropies angulaires et la mesure conjointe de la composition chimique des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie ;
- la croissance des perturbations dans les modèles de rebond et les effets non-linéaires associés ;
- modèles basés sur des univers non isotropes, au moins pendant une période limitée de temps ;
- effet des dimensions supplémentaires sur l'équation d'état des cordes cosmiques ;
- description microscopique de compactification de cordes avec flux ;
- étude des tachyons d'un système multi-branes en théorie de champs de cordes avec bord.

---

## 7 Projets

### 7.1 Projets transversaux

#### 7.1.1 ICAP

En octobre 2011 le projet ICAP (*Initiative in Cosmology and Astroparticle Physics*) a vu le jour à l'IAP sous la direction conjointe des Professeurs Benjamin D. Wandelt et Joseph Silk.

Ce nouveau projet pluridisciplinaire a pour but de financer et de structurer un groupe de jeunes postdoctorants et thésards et fédérer l'ensemble des compétences de l'IAP afin d'étudier les tout débuts de notre Univers, la matière noire et l'énergie sombre ainsi que l'origine et l'évolution des structures du cosmos. Ces jeunes astrophysiciens et cosmologistes, à l'aube de leur carrière de chercheur ont la possibilité d'être immergés dans un environnement unique et peuvent travailler avec les différents experts et directeurs de projets observationnels/expérimentaux qu'ils soient membres de l'IAP ou visiteurs de longue durée, cela pour des périodes allant de deux à cinq ans.

Ce projet est étroitement lié aux activités prioritaires, existantes de l'IAP, à savoir la recherche sur le secteur sombre dont on sait qu'il représente probablement 95 % de l'Univers. Les projets observationnels comme *Planck* (dont l'une des missions consiste à caractériser la statistique de l'Univers primordial via les données engrangées sur le rayonnement cosmologique fossile), les grands *surveys* qui étudient la structure de l'Univers à grande échelle (BOSS, CFHTLS au sol et *Euclid* récemment sélectionné par l'ESA) rendent les interactions très riches pour développer un tel projet. ICAP organise aussi chaque semaine un journal club.

Les principales sources de financement du projet viennent d'une part de la Chaire d'Excellence obtenue par B. Wandelt en Cosmostatistique (financé par l'Agence Nationale de la Recherche en 2010) et d'autre part de l'obtention d'une ERC (*European Research Council*) par Joe Silk intitulée "Dark Matters" (financé par la Communauté Européenne). Des financements supplémentaires proviennent de l'Université Pierre et Marie Curie à travers la Chaire Internationale obtenue par B. Wandelt, via des projets de recherche financés par la « *US National Science Foundation* » à l'Université de l'Illinois (NSF AST-0908902) et via le prix de la Fondation allemande « *Alexander von Humboldt* ». Enfin, Joe Silk a obtenu en 2011 le prix de la Fondation italienne Balzan, il est prévu de financer environ trois mois par an un jeune visiteur étranger postdoctorant.

Les postdoctorants sont actuellement au nombre de six. Un septième arrivera en janvier 2012. Deux étudiants démarrent leur thèse. Ce nouveau projet fort d'une dizaine de jeunes chercheurs encadrés par d'éminents astrophysiciens permettra des retombées scientifiques de premier ordre à moyen terme et arrive à point, au moment où l'IAP est le coordinateur du LABEX, Institut Lagrange de Paris, dévolu à ces thématiques.

#### 7.1.2 L'Institut Lagrange de Paris : un nouveau centre international pour la recherche en Cosmologie et Astroparticules

Dans le cadre du projet *Initiatives d'Avenir* proposé par le Ministère des Universités et de la Recherche, L'Institut d'Astrophysique de Paris, en collaboration avec le LPNHE et le LPTHE, a été le fédérateur d'un *Laboratoire d'Excellence*, l'*Institut Lagrange de Paris (ILP)* qui a été accepté par nos tutelles. Le LABEX aura une durée de dix ans au minimum. Le but de ce nouveau laboratoire est de développer des projets de recherche sur trois questions ouvertes :

- 1) Quelle est la physique qui décrit les débuts de l'Univers?
- 2) Quelle est la nature physique des constituants majeurs de l'Univers, à savoir la matière noire et l'énergie sombre ?
- 3) Comprendre la dynamique non linéaire qui préside à l'origine et l'évolution des structures à grande échelle.

Afin de mener à bien ce projet ambitieux nous devons :

- Fédérer les laboratoires impliqués afin de mobiliser toutes les compétences existantes, reconnues à l'échelle internationale en physique théorique et en physique des particules (aux plans expérimental et théorique), en astrophysique, en cosmologie observationnelle, dans l'analyse statistique des données, en simulation numérique et en mathématiques.

---

- Créer ainsi un environnement de recherche attractif et visible internationalement grâce au caractère très interdisciplinaire du projet. Ainsi des thèses et des postdocs (« ILP *fellows* ») conjoints seront effectués au sein des laboratoires du LABEX ; des colloques internationaux seront organisés et il sera développé un programme visiteurs important, de courte ou moyenne durée. Des actions communes telle l'élaboration d'un Physics Reports de synthèse sur les sujets précités est prévu à mi-course en 2015 ; en effet, les données *Planck* et une partie importante des données du LHC ainsi que les observations disponibles de la nouvelle génération de « surveys » à grande échelle seront alors à notre disposition. Six prix Lagrange seront décernés sur 10 ans à des chercheurs de renom afin qu'ils conduisent leur recherche à Paris pour une période de six mois à un an.

L'Institut Lagrange de Paris créera de fait des collaborations entre les membres des laboratoires impliqués sur les sujets suivants :

- Confronter la théorie des cordes aux nouvelles contraintes observationnelles et expérimentales
- Utiliser les résultats du fond diffus cosmologique et les observations des structures à grande échelle pour sonder la physique de l'inflation et le cadre théorique des débuts de l'Univers
- Analyser de façon conjointe les observations cosmologiques et les données issues de la physique des particules afin de traquer la nature de la matière noire
- Rechercher des signatures au-delà des modèles standard de la physique des particules et de la cosmologie
- Explorer de nouvelles méthodes mathématiques et numériques afin de progresser sur la compréhension de l'évolution des structures cosmiques
- Développer de nouvelles approches numériques relatives aux simulations numériques, à l'analyse des données de flux important ainsi qu'aux aspects statistiques liés aux thèmes de recherche considérés.

Les laboratoires de l'ILP (affiliés au CNRS et à l'UPMC) sont leaders dans les sujets de recherche sélectionnés ; ils ont donc les moyens humains de relever ces défis scientifiques. Le cœur de l'ILP est constitué des trois entités suivantes :

- L'Institut d'Astrophysique de Paris (IAP)
- Le Laboratoire de Physique Nucléaire et des Hautes Energies (LPNHE)
- Le Laboratoire de Physique Théorique et des Hautes Energies (LPTHE)

Deux autres structures sont associées à l'ILP : la Fédération de Recherche Interactions Fondamentales (FRIF) et l'Institut Henri Poincaré (IHP) qui aura la capacité d'organiser les rencontres scientifiques et de loger les intervenants.

Deux groupes font aussi partie du LABEX :

- Une équipe du Laboratoire d'Etude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique (partie du LERMA, Observatoire de Paris), responsable, Françoise Combes
- Le Collège de France, Chaire de Particules Élémentaires, Gravitation et Cosmologie, Pr. Gabriele Veneziano

L'ILP participera à la formation des jeunes étudiants en créant un programme d'enseignement spécifique (physique fondamentale et cosmologie) complémentaire à celui des Master. Cette initiative combinée à la création d'écoles d'été permettra de drainer les meilleurs étudiants au niveau international intéressés par l'approche interdisciplinaire proposée.

Ce projet a l'avantage de s'étaler sur dix ans. Dans le meilleur des cas l'ILP pourra alors être converti en un Institut permanent de l'UPMC et du CNRS.

L'organisation et la gouvernance de l'ILP seront simples. Il faudra cependant veiller à préserver l'identité du LABEX vis à vis des laboratoires même si une grande fraction des activités des laboratoires sont étroitement liées à celles du LABEX (de 50% à 80%). Chaque laboratoire devra définir ses propres priorités en dehors de l'ILP.

La gouvernance sera menée grâce à deux comités :

Le Comité de Direction qui définira la stratégie scientifique globale de l'ILP et un Comité Scientifique qui évaluera et sélectionnera les étudiants en thèse, les postdoctorants et les sujets de recherche afférents.

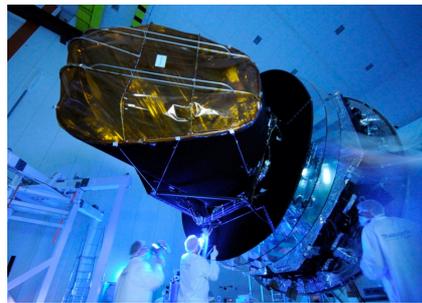
Le Directeur de l'ILP sera assisté par un Directeur adjoint ; ils seront nommés pour 2,5 ans et élus par le Comité de Direction.

---

## 7.2 Projets avec tâches de service labellisés

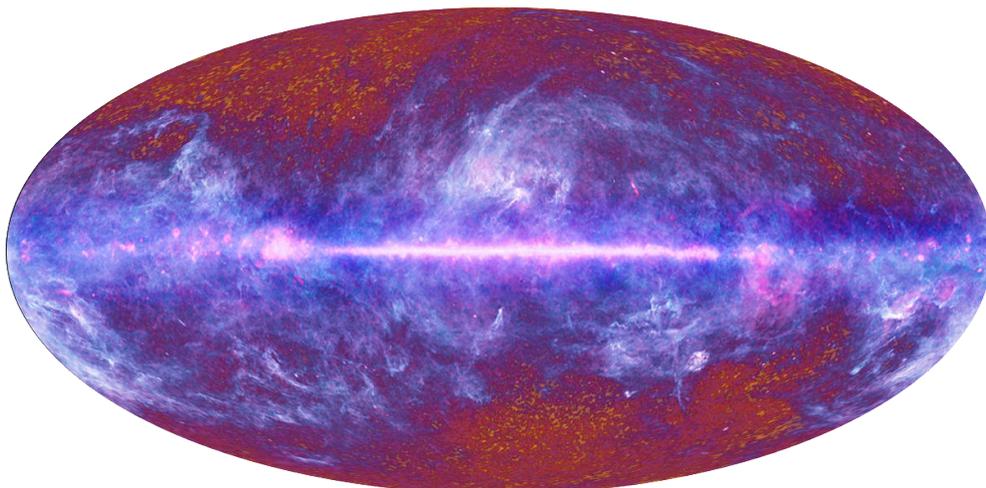
### 7.2.1 *PLANCK*

Le groupe *Planck* de l'IAP met en œuvre la contribution de l'IAP au projet *Planck*. Ce satellite de l'ESA a pour objectif la cartographie définitive des anisotropies de température et de polarisation du rayonnement cosmologique avec une sensibilité, une résolution, et un contrôle des effets systématiques tels que l'ensemble des informations cosmologiques contenues dans les fluctuations de température puissent être extraites.



*Figure 7.1a. Planck Surveyor*

Le projet a débuté suite à l'appel à propositions fait par l'ESA en Novembre 1992 pour la 3<sup>ème</sup> mission de classe moyenne du programme Horizon 2000+. L'étude de phase A a débuté en novembre 1994 et a abouti à la sélection du projet en mai 1996 (sans parler de la sélection d'une certaine forme du projet par le CNES comme petite mission CNES ou la participation à la proposition FIRE de la NASA). La phase de constitution du consortium HFI comme candidat à la construction de la charge utile à commencée en février 1997, phase conclue début 1999 par la confirmation des résultats de la sélection pour la charge utile de *Planck* et *Herschel*. Ces deux satellites ont été lancés de Kourou par une Ariane 5 le 14 mai 2009. Les opérations régulières de relevé ont commencé 3 mois plus tard, et devrait continuer jusqu'à la mi-janvier 2012, ce qui est presque deux fois plus long que la durée de la mission dite nominale. Cette dernière a été finalisée fin novembre 2010, quand tous les détecteurs ont vu au moins deux fois chaque direction du ciel (à la résolution du relevé près).



*Figure 7.1b. La carte du ciel vu par le satellite Planck.*

Le responsable du groupe, François Bouchet, est un des porteurs du projet depuis l'origine (Bouchet 2007) ; il est responsable (*Deputy PI*) et coordinateur scientifique (*Science coordinator*) du consortium HFI qui construit l'instrument au cœur de *Planck* ; il est aussi responsable du traitement des données

(DPC *manager*). Le « *Data Processing Center* » (DPC), hébergé à l'IAP, a d'ores et déjà produit (été 2010), à partir du flot de données temporelles du satellite et des données de calibration obtenues au sol avant le vol, une série de 6 cartes de tout le ciel basée sur les 10 premiers mois de données. L'analyse de ces cartes a permis d'en retirer la contribution cosmologique et d'effectuer une première analyse des émissions d'avant-plan dans ce domaine de fréquence. Ces cartes (voir Figure 7.2) ont permis entre autres, la découverte de 20 nouveaux amas de galaxies (ultérieurement confirmés par des observations X du satellite XMM) via l'effet Sunyaev-Zeldovich (et le plus large ensemble mondial de mesures de cet effet), l'étude des fluctuations du fond de galaxies lointaines, du milieu interstellaire de notre Galaxie (e.g. gaz sombre, poussière en rotation, etc.)...ainsi que la livraison d'un pré-catalogue de sources compactes pour suivi par *Herschel*. Pré-catalogue et publication (25) ont été mis à disposition de la communauté en janvier 2011 (Planck collaboration 2011).

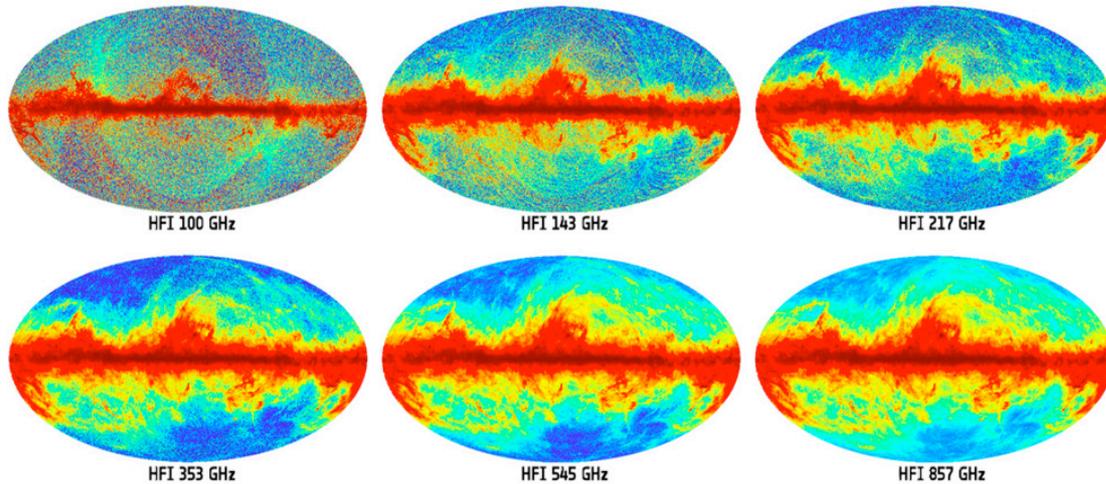
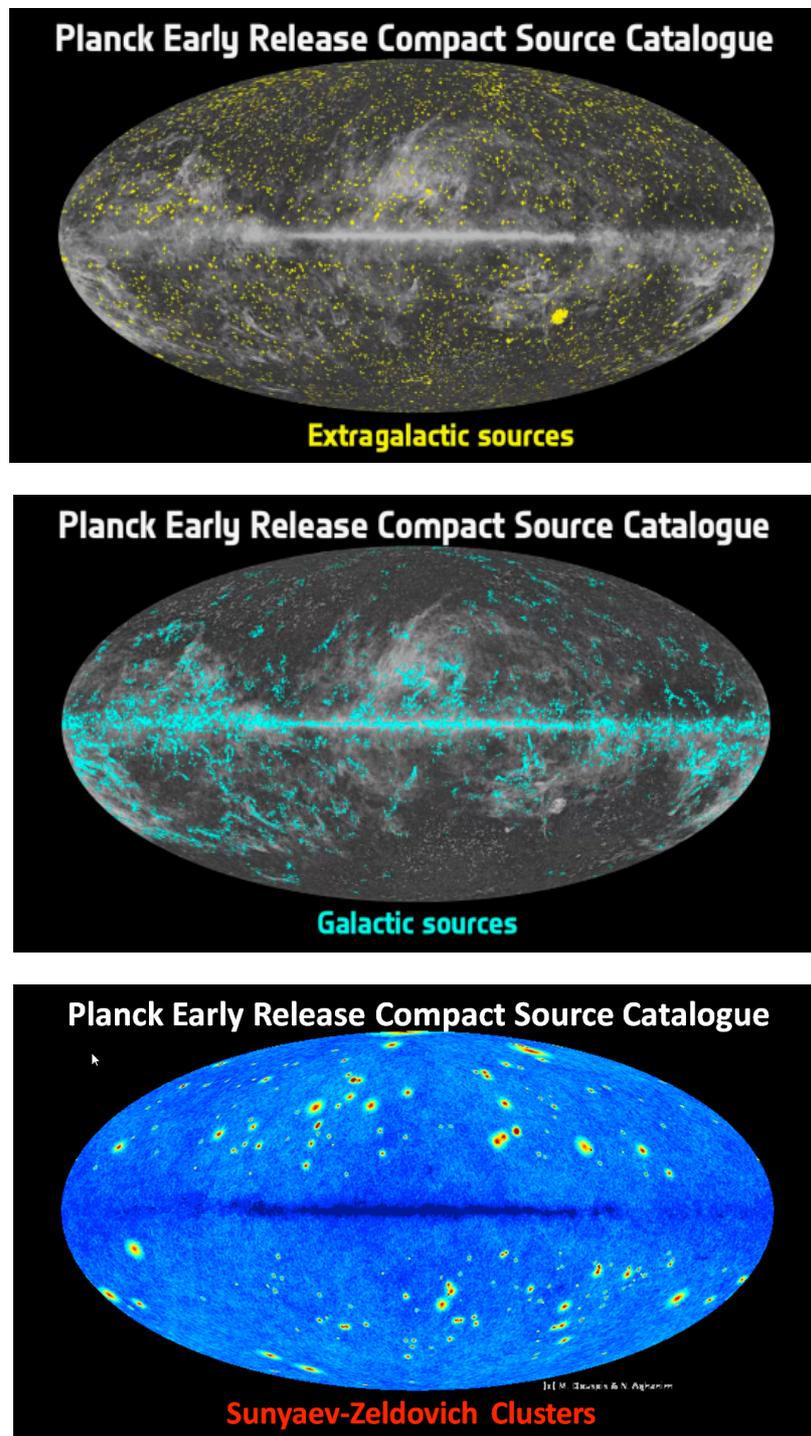


Figure 7.2. Six cartes obtenues par Planck au bout de 10 mois de données.

Le DPC vient (été 2011) de créer un nouvel ensemble de cartes, basée sur la durée de mission nominale, et les premières publications correspondantes sur la physique des avant-plans devrait avoir lieu en Janvier 2012. Fin 2012, le DPC fournira à l'ESA (pour mise à disposition de la communauté peu après) un nouveau jeu de cartes dont l'objectif est qu'elles soient au niveau de qualité requis pour une analyse de cosmologie primordiale. Nous fournirons aussi des cartes des composantes astrophysiques identifiées (1<sup>ère</sup> Génération) dont bien sûr celle du RCF, et la caractérisation détaillée des anisotropies (Spectres de puissance angulaire, code de vraisemblance). Une 2<sup>ème</sup> livraison affinée est attendue au début de 2014 sur la base de l'ensemble des données que HFI aura collectées avant son réchauffement. Les données seront mises à la disposition de la communauté scientifique mondiale via la « *Planck Legacy Archive* » que l'ESA mettra en œuvre sur la base des données, codes et documents qui lui seront livrés. Le DPC doit aussi fabriquer des produits intermédiaires pour exploitation scientifique par la collaboration durant les opérations et le temps propriétaire (un an), ~ tous les 6 mois (dès le début des opérations). Cet effort a initialement été estimé à environ 300 ETP.

Le DPC est géographiquement distribué, au sens où les développements ont été répartis entre quelques pays (France, GB, USA, Allemagne, Canada) et, en France, entre plusieurs laboratoires (APC, CESR, IAP, IAS, LAL, SAp, LERMA, LPSC). La France est responsable d'environ la moitié de l'effort global, comme sur l'instrument. Le groupe de l'IAP a la charge de coordonner l'ensemble du traitement des données acquises (partie SGS2), l'IAS pilote l'acquisition et les opérations (partie SGS1). L'IAP coordonne aussi la responsabilité française spécifique, qui concerne la transformation des données temporelles en cartes du ciel par fréquence. Cette partie du traitement des données étant la plus lourde, tant en terme de volume des données que des moyens de calcul nécessaires. Le groupe a investi ces dernières années beaucoup d'efforts dans l'implémentation d'une infrastructure matérielle et logicielle permettant un traitement efficace et traçable des données. L'infrastructure mise en œuvre est

ensuite déployée dans d'autres centres (CCALI, CPAC, IPAC) qui permettent d'augmenter significativement la capacité de traitement du DPC.



*Figure 7.3. « Early Release Compact Source Catalogues »*

D'un point de vue matériel, le groupe a piloté en 2008 la spécification, l'acquisition, le déploiement, et elle opère un *cluster* de 1128 cœurs de processeurs, 4 Tera-octets de mémoire, plus de 300 Tera-octets de disque rapides pour permettre le traitement et l'analyse de l'intégralité du volume des données. Une salle informatique spécifique (dimensionnement thermique, électrique, etc.) a d'ailleurs été conçue et

mise en opération avec le support des équipes technique et administrative de l'IAP et grâce au financement du CNES. En 2011, nous avons dimensionné, approvisionné, et sommes en train de mettre en opération une extension de cette machine pour notamment augmenter la capacité de stockage rapide sur disque jusqu'à un Peta-octets. D'un point de vue logiciel, le groupe a développé un système d'entrées-sorties optimisé s'appuyant sur une base de données, qui permet une traçabilité complète de l'ensemble des opérations faites dans les pipelines de traitement de données tout en étant compatible avec un très gros volume de données. Le groupe a aussi déployé et opère l'infrastructure de collaboration (e.g. cvs, cmt, server de listes, ftp, web, cf. <http://www.planck.fr>) avec l'aide d'ingénieurs de l'APC et du LAL.

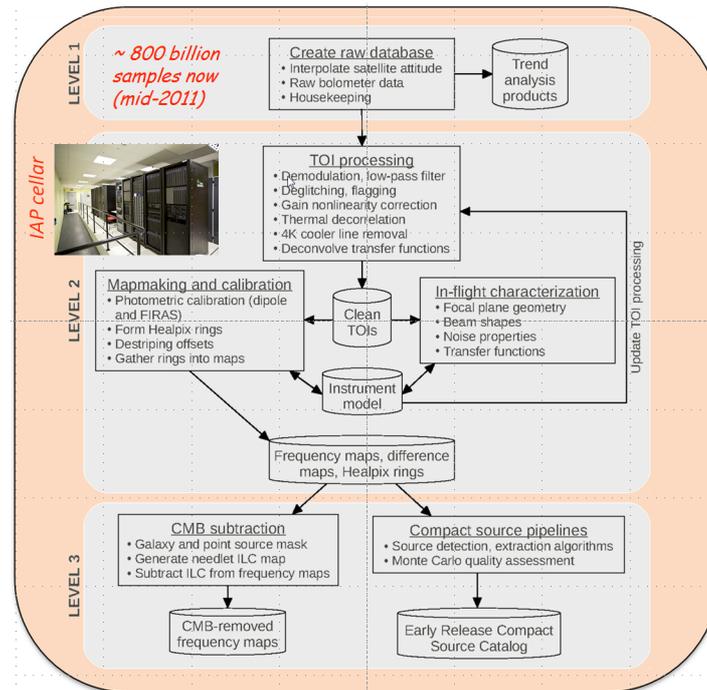


Figure 7.4. “HFI Data processing data flow”

En outre, le groupe a également développé et implémenté un certain nombre de tâches essentielles au traitement des données *Planck*, notamment des algorithmes de caractérisation statistique du bruit, de cartographie, de caractérisation statistique des cartes produites, et d'algorithmes de reconstruction du pointage du satellite. Dans tous les cas, les algorithmes ont été parallélisés pour s'adapter à l'infrastructure matérielle de calcul, et pouvoir traiter l'intégralité du volume de données. Un certain nombre de ces algorithmes ont pu être testés avant leur utilisation *Planck* sur des données réelles dans le cadre des expériences Archeops, Boomerang et Bicep, en particulier pour les mesures de polarisation.

Les scientifiques du groupe sont par ailleurs impliqués dans les projets scientifiques au cœur même des objectifs premiers de l'expérience, raison d'être d'ailleurs de leur engagement, extrêmement lourd et sur une très longue période, dans la mise en œuvre et la coordination du DPC. Nous coordonnons en effet pour tout *Planck* les projets scientifiques suivants : « *Temperature and Polarisation Power Spectra and likelihood* », « *Cosmological Parameters from Planck/CMB data alone* », « *Non-standard inflationary model* », « *Cosmic strings and other defect* » (tout en continuant à faire tourner la boutique !).

Le groupe *Planck* de l'IAP comporte actuellement vingt et une personnes, dont 8 chercheurs, et 8 ingénieurs, dont 2 sont en CDD, ainsi qu'une assistante projet. Il y a de plus 4 post-doctorants et 3 thèses sont en cours.

---

Personnes impliquées dans le projet :

*Nadi Abdalla, Karim Benabed, Aurélien Benoit-Levy, François Bouchet, Stéphane Colombi, Jean-Marc Delouis, Anne Ducout, Franz Elsner, Éric Hivon, Andrea Moneti, Sylvain Mottet, François Orieux, Asja Prohic-Doric, Simon Prunet, Philippe Riant, Stéphane Rouberol, Jean-François Sygnet.*

## 7.2.2 TERAPIX

TERAPIX est un centre national de traitement d'images astronomiques (<http://terapix.iap.fr>). Il a été créé en 1998 pour donner à notre communauté des moyens adaptés au traitement des données des nouveaux imageurs panoramiques visibles et infrarouges, comme MegaCam, et WIRCam, et pour produire le relevé « *Canada-France-Hawaiï-Telescope Legacy Survey* » (CFHTLS). Le centre a trois objectifs prioritaires : (1) le développement de logiciels optimisés pour le traitement des grandes images et pour la construction de chaînes automatiques de traitement des relevés astronomiques ; (2) la production de données prêtes à l'exploitation scientifique ; (3) une assistance technique aux utilisateurs souhaitant bénéficier de l'expérience de TERAPIX pour effectuer par eux-mêmes le traitement de leurs images. Le centre qui était sous la responsabilité de Y. Mellier jusqu'en février 2011, l'est aujourd'hui sous celle de P. Hudelot.

TERAPIX a pour vocation de servir la communauté astronomique. Outre l'assistance et la production de données, il met ses logiciels d'analyse ou de gestion de données à la disposition de la communauté. Ses logiciels libres et génériques permettent une utilisation autonome sur tous types d'images numériques. Ses ressources sont pourvues par l'INSU, l'UPMC, le PNCG, et l'IAP qui accueille le centre. Elles financent l'environnement informatique (machines, disques, réseau), le fonctionnement et les opérations. Le centre dispose d'un réseau Gigabit, d'un *cluster* de 40 machines totalisant 290 CPUs et d'environ 600TB de disques montés sur des baies RAID sécurisés.

Au cours de ce quinquennat, les activités de TERAPIX ont porté sur le développement de nouveaux logiciels de gestion et de contrôle qualité des images et des grands relevés astronomiques visibles ou infrarouges, le fonctionnement pérenne du centre, et la production de données pour des « PI » ou de grands relevés : CFHTLS, NGVS, VIPERS, WIRDS, WUDS, CFHQSIR, MIRACLE, UltraVISTA, VIKING et VIDEO.

### *Développements logiciels*

TERAPIX continue à développer et maintenir tous ses logiciels de manipulation des images, catalogues et méta-données. Ces développements qui étaient une activité prioritaire de sa mission jusqu'à 2006 sont aujourd'hui placés au second rang, derrière les opérations. Cependant, TERAPIX y maintient encore une activité soutenue orientée sur des outils de gestion de données (YOUPI) et de contrôle qualité.

Durant la période 2007-2011, TERAPIX a développé, intégré, exploité puis délivré à la communauté l'outil « YOUPI » ( <http://adsabs.harvard.edu/abs/2010ASPC..434..495M>). YOUPI est un pipeline flexible basé sur une interface WEB (python et Django, technologies interactives Ajax et Javascript) et pouvant opérer sur une large gamme d'architecture, du simple ordinateur de bureau aux grappes de calcul étendues. Il s'appuie sur une suite d'outils logiciels *opensource* pour l'organisation des données, la gestion des tâches de traitement en temps réel et l'organisation du travail en équipe par une gestion fine de droit d'accès et de partage de données. Depuis l'ingestion des données jusqu'à la finalisation des contrôles qualité des images combinées, tout le cycle de traitement du pipeline TERAPIX est intégré. Un module de conversion d'en tête FITS permet d'étendre la compatibilité du pipeline avec des données FITS provenant de nombreux instruments disponibles (E.g. CFHT-MegaCam, CFHT-WIRCam et ESO-VISTA-VIRCAM). Il utilise massivement en production de données à TERAPIX, sa flexibilité le rend optimal pour le traitement des grands relevés systématiques (CFHTLS) ou pour des ensembles de données hétérogènes (requêtes TERAPIX-PI).

## Opérations

Les chaînes de traitement des images installées à TERAPIX sont en opération depuis 2004 et ont atteint un régime stable depuis 2006. Le traitement se déroule en quatre grandes étapes : (1) l'ingestion des données (YOUPI). Elle comporte le contrôle de l'intégrité des données et de leur conformité aux normes afin d'en permettre un traitement automatique ; (2) l'évaluation des images individuelles et la production des cartes de pondération associées (QFITS). Cette étape s'achève par une série de contrôle et d'évaluation. Les paramètres de gestion du pipeline et des logiciels de traitement des images sont éventuellement ajustés pour optimiser les processus de traitement (YOUPI) ; (3) la calibration et le traitement automatique des données conduisant aux images co-additionnées finales. Cette étape gère des séries d'images monochromatiques et se conclut par une procédure d'évaluation ; (4) la production de catalogues puis le contrôle qualité. Ce contrôle porte sur l'analyse monochromatique et panchromatique des données, l'investigation des résidus systématiques et l'homogénéité des grands relevés aux échelles dépassant la taille d'un champ.

La base de données YOUPI conserve toutes les informations se rapportant à chaque produit de sortie et aux images individuelles ayant servi pendant l'une des phases de la production.

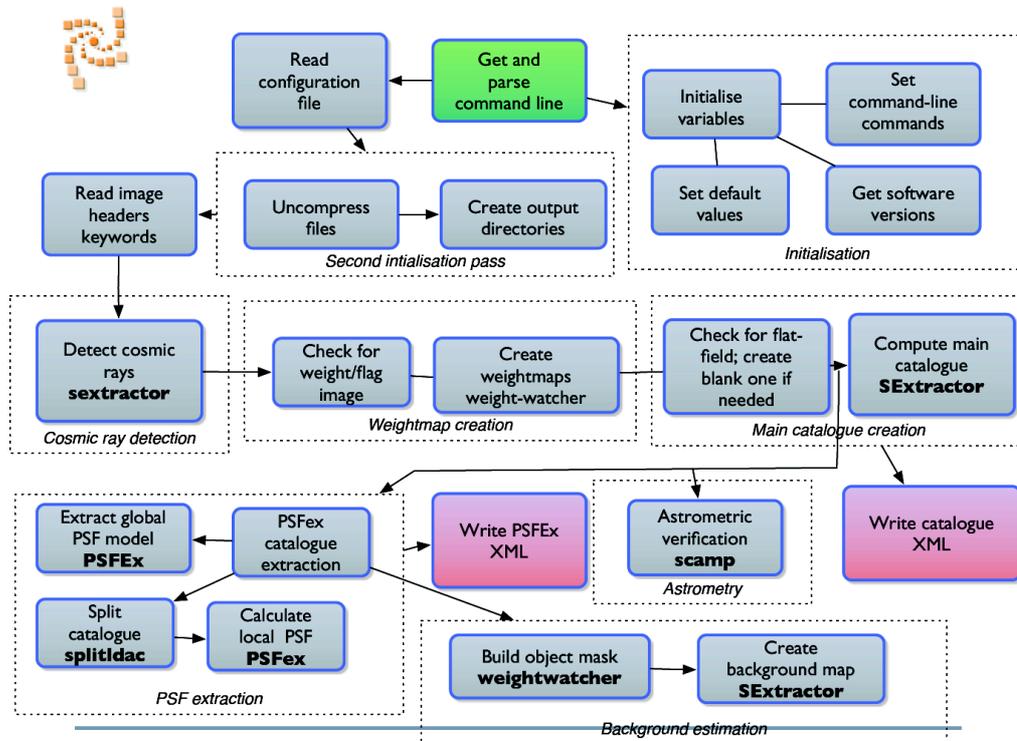


Figure 7.5. Séquences du pipeline TERAPIX standard.

Avec WIRCam, les programmes PI-MegaCam, le CFHTLS, et VISTA/(Ultra-VISTA +VIDEO), TERAPIX consacre depuis 2008 plus de 90% de ses activités à la production de données. Pour MegaCam, les programmes PI forment 30% à 40% du volume, mais le CFHTLS et les relevés publics VISTA représentent plus de 80% du travail de production. En ce qui concerne les programmes CFHT/PI (dont les *Large Program* NVGS, WIRDS, WUDS et CFHQSIR), entre 2008 et 2011 TERAPIX a traité 51 programmes WIRCam concernant 30 PI différents, et 30 programmes MegaCam concernant 23 PI différents. Les programmes PIs traités sont de toutes nationalités.

Concernant le CFHTLS, au cours de la période 2008-2011, TERAPIX a produit les *releases* T0005 (août 2008), T0006 (octobre 2009) et T0007 (novembre 2011). Ces 3 *releases* représentent plus de 100 000 images MegaCam individuelles, la production de plus de 10 000 images finales co-additionnées et de plus de 3 millions de fichiers de méta-données. Les *releases* sont disponibles au CADC et sont

---

décrites sur le site TERAPIX ( [http://terapix.iap.fr/rubrique.php?id\\_rubrique=259](http://terapix.iap.fr/rubrique.php?id_rubrique=259) , <http://terapix.iap.fr/cplt/T0006-doc.pdf>). S'y ajoute la production de catalogues de *redshifts* photométriques, établis avec O. Ilbert du LAM, pour la communauté ( [http://terapix.iap.fr/rubrique.php?id\\_article=830](http://terapix.iap.fr/rubrique.php?id_article=830) ). TERAPIX produit aussi les catalogues des cibles du relevé spectroscopique VIPERS avec le VLT/VMOS (PI : L. Guzzo). VIPERS porte sur 100, 000 *redshifts* de galaxies des champs CFHTLS W1, W2 et W4. Enfin, TERAPIX produit les données du *Large program* WIRCam CFHQSIR (PI J.-G. Cuby) qui couvre 130 deg<sup>2</sup> du CFHTLS-Wide dans les bandes Y et , J, H et Ks. Cette couverture infrarouge du CFHTLS-Wide va permettre de construire un relevé homogène en u\*grizYJHKs du CFHTLS Wide, parfaitement aligné sur les *releases* T0006 et T0007. Les premières pré-*releases* de TERAPIX du CFHQSIR ont été produites en 2011.

L'évaluation des activités de TERAPIX sont surveillées. Si l'on se réfère aux remerciements dans les papiers scientifiques ( [http://terapix.iap.fr/article.php?id\\_article=597](http://terapix.iap.fr/article.php?id_article=597) ), il y a à ce jour 215 articles scientifiques publiés dans des revues à comité de lecture qui proviennent directement des données de TERAPIX, dont 150 depuis le dernier rapport quadriennal.

### ***Perspectives : « VISTA public surveys » et Euclid***

TERAPIX opère depuis trois ans un tournant vers les relevés publics du télescope ESO/VISTA. Pour néanmoins respecter ses obligations TERAPIX se concentre sur les projets impliquant des Co-Is français : (1) relevé public UltraVISTA, du champ COSMOS. Le relevé comporte 1800 heures d'observation sur 1,5 deg<sup>2</sup> en YJHKs. A ce jour plus de 7000 images de UltraVISTA ont été traitées au centre, et une première *release* fut délivrée en avril 2011. (2) relevé public VIKING. Il porte sur 1500 deg<sup>2</sup> en ZJHKs et a commencé en octobre 2009. TERAPIX se concentre sur des secteurs couvrant des zones du CFHTLS-Wide. Le relevé VIKING porte sur 2160 heures d'observation, jusqu'en 2016 ; (3) réponse à une sollicitation du PI du relevé VIDEO. VIDEO n'implique pas de PI français, mais TERAPIX a répondu favorablement car il s'agit d'une valorisation de nos outils et de notre expertise. TERAPIX a commencé le traitement de ces données en 2011.

Sur le plus long terme, TERAPIX participera au segment sol de la mission *Euclid*. (voir le rapport d'activité *Euclid*). Cette orientation implique une réorganisation des activités TERAPIX et *Euclid* au sein de l'IAP pour coordonner et planifier leurs tâches. C'est une des difficultés qu'anticipent tous les acteurs (TERAPIX, *Euclid*, *Planck*, IAP). Elle fait déjà l'objet d'études pour construire le meilleur scénario de mise en place progressive. C'est un des objectifs prioritaires pour les années 2012 et 2013.

Les personnes de l'IAP impliquées dans le projet TERAPIX dans des proportions variées sont : Y. Goranova (CCD), P. Hudelot (CDD), F. Magnard, H.J. McCracken, Y. Mellier (PI), M. Monnerville, M. Schultheis, G. Sémah (CDD).

### **7.2.3 EUCLID**

*Euclid* est une mission spatiale qui a été sélectionnée le 4 octobre 2011 dans le cadre des missions de classe M du programme « *Cosmic Vision* » de l'ESA (<http://www.euclid-ec.org>). *Euclid* a pour objectif de comprendre l'origine de l'accélération de l'expansion de l'Univers à partir d'un grand relevé photométrique, morphométrique et spectroscopique de galaxies. Il est conçu pour pouvoir décrire l'histoire de l'expansion et celle de la formation des structures via deux sondes cosmologiques « primaires », l'analyse tomographique des effets de distorsion gravitationnelle cosmologique (*Weak Lensing* - WL) et l'analyse de l'histoire de la structuration des galaxies (*Galaxy Clustering* - GC), notamment les oscillations acoustiques baryoniques (BAO) et les distorsions espace-*redshift*. *Euclid* utilisera aussi deux sondes « secondaires », les amas de galaxies et l'effet Sach's Wolf intégré. Pour parvenir à ses objectifs, *Euclid* sera doté d'un télescope de 1,2 mètre de diamètre qui alimente trois instruments couvrant un champ identique de 0,5 deg<sup>2</sup> : un imageur visible à très haute qualité d'image équipé d'un filtre à très large bande (RIZ), un imageur infrarouge équipé de trois filtre (Y, J, H) et un spectrographe sans fente formé de 4 Grisms. Avec ses instruments, *Euclid* va observer 15000 deg<sup>2</sup> du ciel extragalactique pour mesurer les formes et les *redshifts* photométriques de 2 milliards de

---

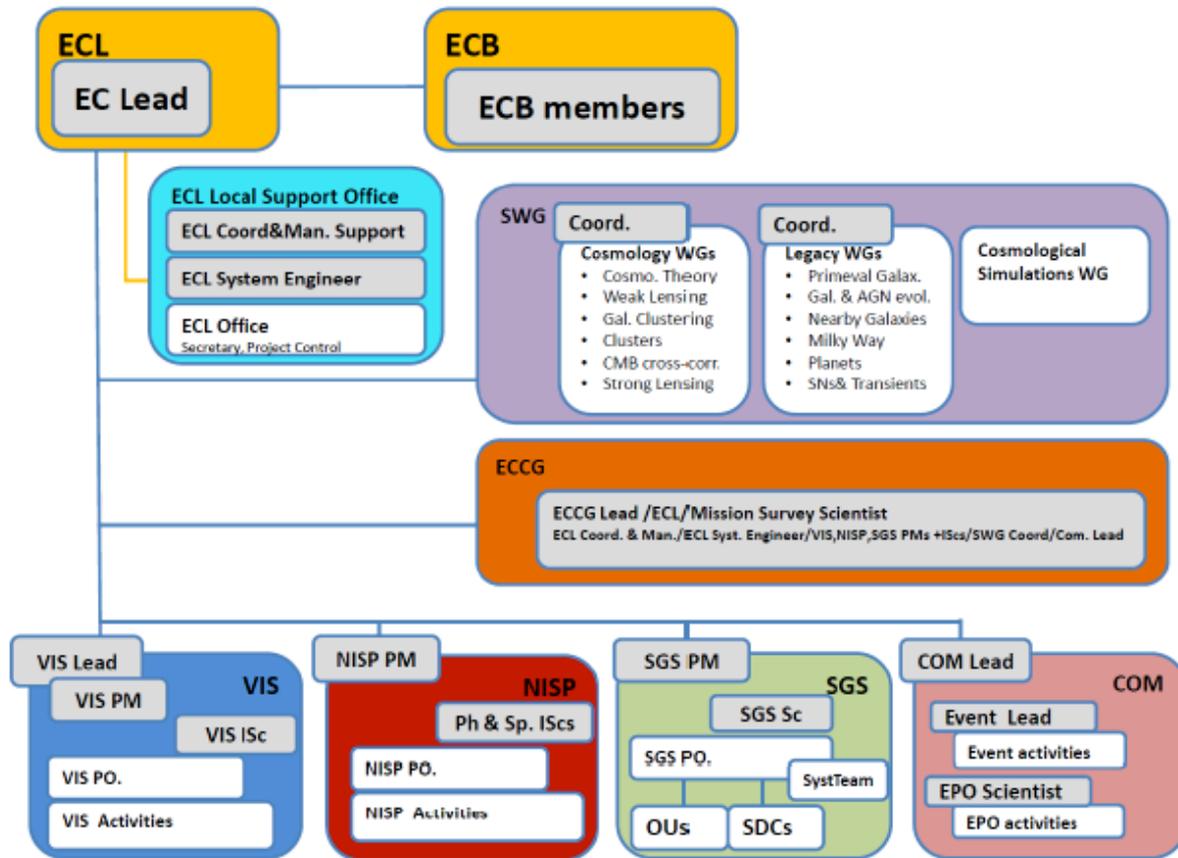
galaxies et les *redshifts* spectroscopiques de 50 millions de galaxies. Avec cet échantillon unique et sans concurrent, les gains en précision par rapport aux missions actuelles seront d'un facteur 300 et permettront de répondre de façon décisive si la source de l'accélération est une substance nouvelle, l'énergie sombre, ou s'il s'agit d'une signature d'effets de la gravitation qui ne sont pas pris en compte dans la relativité générale.

Avec ses échantillons photométriques et spectroscopiques dans l'infrarouge, *Euclid* est aussi une formidable source de données pour l'ensemble de la communauté astronomique, une source de cibles pour l'E-ELT et le JWST, et un outil parfaitement complémentaire de *Planck*, e-Rosita et Gaia.

*Euclid* devrait être lancé en 2019 vers le point de Lagrange L2 depuis Kourou par une fusée Soyouz. La durée de la mission devrait être de 6 ans. Les détails de la mission sont décrits dans le rapport de fin phase de définition (Red Book : <http://xxx.lanl.gov/abs/1110.3193> ). Le projet *Euclid* devrait donc s'achever vers 2027.

La mission *Euclid* est sous la responsabilité de l'ESA. Mais un consortium européen (*Euclid Consortium* – EC) composé de laboratoires de 13 pays membres de l'ESA a la responsabilité de la construction de l'imageur visible (VIS), des instruments infrarouges (NISP) et du segment sol (SGS). Ce consortium est aujourd'hui sous la responsabilité scientifique de Y. Mellier (*Euclid Consortium Lead* – ECL) auquel l'*Euclid Consortium Board* (ECB) délègue le fonctionnement et le suivi du projet et les contacts avec l'ESA (voir Figure 7.6).

La contribution de l'IAP aux étapes de sélection de la mission *Euclid* a évolué et fortement progressé au cours des trois dernières années. Elle porte à ce jour sur deux plans : la responsabilité scientifique de la mission (Y. Mellier) et du consortium EC, des responsabilités dans plusieurs aspects du segment sol (C. Grenet, J.-M. Delouis) et dans le *Science Working Group Weak Lensing* (K. Benabed) et Planet (J.-P. Beaulieu). Il faut noter que certaines des responsabilités de l'IAP n'étaient pas prévues et ont demandé des actions immédiates au détriment d'autres priorités comme certaines missions de TERAPIX. Le retard pris sur la livraison de la *release* CFHTLS T0007 résulte directement de ces décisions urgentes.



**Figure 7.6.** Organisation du Consortium Euclid. Les activités de l'IAP sont concentrées dans l'ECL, le SGS, la COM et une partie du SWG Weak Lensing.

### **Responsabilité scientifique**

Depuis fin février 2011, Y. Mellier est ECL et a pris la responsabilité de la mission *Euclid*. A ce titre, il est responsable scientifique du projet et préside l'ECB. Au cours des mois écoulés l'unique objectif fut de créer une dynamique nouvelle et d'obtenir la sélection de la mission. Cette étape franchie, les dernières semaines de l'année 2011 sont consacrées à la préparation de l'adoption de la mission en juin 2012.

Les activités de l'IAP dans la gestion du projet *Euclid* n'étaient pas prévues et ont donc conduit l'IAP à prendre des actions imprévues et urgentes, dont une réorganisation dans TERAPIX et dans les activités SGS d'*Euclid* à l'IAP. Avec l'aide du CNES et du CEA, l'IAP a construit en mars 2011 un groupe de management (ECL) et de coordination (ECCG) autour de Y. Mellier pour conduire la phase de définition (documents à remettre en mars 2011, mai 2011, juin 2011 puis juillet 2011) et passer la sélection (octobre 2011). En ce qui concerne l'IAP ce groupe comprend S. Arduini, C. Grenet et Y. Mellier. La création d'une *Tiger Team* en mai 2011 qui a permis de démontrer la faisabilité de la mission, puis la sélection de la mission sont les actions concrètes majeures conduites ces derniers mois.

### **Segment sol d'Euclid**

Dans une première phase (2009-2010), l'IAP a pris la responsabilité du projet DADA (Dark Data). DADA avait pour objectif de définir les besoins en organisation et infrastructure permettant à l'ensemble des communautés de physiciens et d'astrophysiciens français de préparer l'exploitation scientifique de la mission *Euclid*. Le projet DADA mis en œuvre par C. Grenet (PM) et Y. Mellier (PI) a permis de cristalliser les énergies des scientifiques des différentes agences (INSU, IN2P3, CEA,

---

CNES) vers un projet commun autour d'infrastructures préexistantes (le CCIN2P3 notamment). C'est à partir de ce projet que fut construit le « *Science Data Centre France* ». (SDC-FR). Le SDC-FR décrit les infrastructures et les ressources prévues en France pour le développement, le déploiement et les opérations de traitement et d'exploitation des données *Euclid* en France dans le cadre du SGS.

Au cours de la période 2009- février 2011, le poste de responsable scientifique du segment sol (SGS-S) était occupé par Y. Mellier. Avec F. Pasian (PM du SGS), fut construite l'organisation du segment sol et la conception des tâches du processing (dont l'Euclidisation) sous la forme des 10 *Organisation Units* (OUs) et des 7 *Science Data Centres* (SDCs) de la Figure 7.6 Y. Mellier a abandonné cette responsabilité fin février pour celle d'ECL.

Depuis mars 2010, l'IAP est responsable de l'Organisation Unit OU-VIS qui a la charge de concevoir le pipeline, de définir les tâches et d'évaluer les ressources nécessaires pour le traitement des données de l'instrument VIS depuis la phase de définition jusqu'à la fin des opérations (2027). C. Grenet est seule coordinatrice de OU-VIS depuis que Y. Mellier est ECL. Au cours de l'année 2011, C. Grenet a produit et délivré l'ensemble des documents de la phase de définition et de la préparation de la phase d'implémentation concernant OU-VIS. Une partie du personnel de TERAPIX y consacre une fraction de son temps.

L'IAP est aussi responsable d'une partie des activités système d'*Euclid*. J.-M. Delouis (du groupe *Planck*), C. Grenet et M. Monnerville ont participé à la définition de l'architecture système du segment sol : développement d'un outil de simulation des flux entre centre de traitements de données, définition de l'architecture logique ainsi que d'une couche d'abstraction entre les pipelines et l'infrastructure sous-jacente, choix d'un outil de modélisation des données.

#### **« Working Group » Scientifique**

Les activités de l'IAP dans les groupes de travail scientifiques d'*Euclid* concernent principalement le *Working Group Weak Lensing et Planet* où K. Benabed et J.-P. Beaulieu jouent des rôles de coordinations (voir Figure 7.6). A ce titre au cours des années 2009-2011 ils ont participé à la définition des besoins scientifiques de la mission, aux travaux de prédictions de performances d'*Euclid* et à la production de documents clés, dont le *Red Book*.

Plusieurs chercheurs de l'IAP sont déjà impliqués dans le projet dans des proportions variables : S. Arduini, J.-M. Delouis, C. Grenet, P. Hudelot, F. Magnard, H.J. McCracken, Y. Mellier (PI), M. Monnerville (départ septembre 2011).

#### **7.2.4 Simulations numériques**

La force de l'IAP dans le calcul numérique réside dans son aspect pluridisciplinaire, qui peut se résumer en trois volets thématiques : une composante lourde centrée sur la cosmologie, deux autres centrées sur l'astrophysique des hautes énergies et l'étude des exoplanètes ainsi que leur environnement. Initié par le passé grâce à des actions individuelles fortes autour de projets ponctuels, le projet de simulation, avec deux recrutements récents (un ingénieur de recherche et un chargé de recherche), a atteint aujourd'hui un niveau de maturité suffisant pour projeter dans l'avenir une fédération de moyens/outils techniques qui font déjà de l'IAP un centre de référence mondiale dans ce domaine. Sur la période 2007-2011, on peut énumérer les sujets de recherche suivants :

- La formation des galaxies et les grandes structures de l'univers (projet HORIZON, [www.projet-horizon.fr](http://www.projet-horizon.fr))
- La simulation d'observations virtuelles de l'Univers profond (le lensing, les forêts *Lyman  $\alpha$* , les rayons cosmiques de ultra-haute énergie, la signature des cordes cosmiques sur le CMB, Pégase, skymaker et autres) ;
- L'évolution dynamique des environnements stellaires et interstellaires des planètes et

- 
- exoplanètes en présence des champs magnétiques locaux (projet ESINPLE)
- La modélisation numérique des sursauts gamma
  - L'étude numérique des effets de la métrique autour d'une singularité.

Les objectifs scientifiques de ces thématiques sont discutés dans la partie principale de ce rapport. Même s'il faut s'attendre à quelques répétitions, il convient d'insister sur les aspects techniques, c'est-à-dire sur le savoir faire développé en termes de méthodes numériques à l'IAP (et non pas sur l'exploitation de routine). Celui-ci se sépare en 3 grandes catégories non exclusives :

1. le développement de nouveaux schémas numériques et la programmation parallèle ;
2. le post-traitement et la génération d'observations virtuelles ;
3. la visualisation des résultats.

L'IAP a bien entendu accès aux moyens de calculs nationaux (IDRIS, CINES, CCRT) pour réaliser les simulations dimensionnantes et à la grille HORIZON pour réaliser le post-traitement. La composante locale de cette dernière est principalement dotée d'un *cluster* de 3 machines à 32 cœurs et une acquisition récente, sur des fond propres de l'IAP, avec 64 cœurs et 1Tb de mémoire partagée, ainsi qu'un espace de stockage dédié conséquent de l'ordre de 150Tb. Notre capacité à maintenir constamment à flot notre capacité hardware bénéficie ainsi d'un effort soutenu qu'il convient de ne pas relâcher pour être capable de faire face aux besoins importants reliés à la visualisation et au post-traitement (notamment dans le cadre des projets HORIZON et ESINPLE).

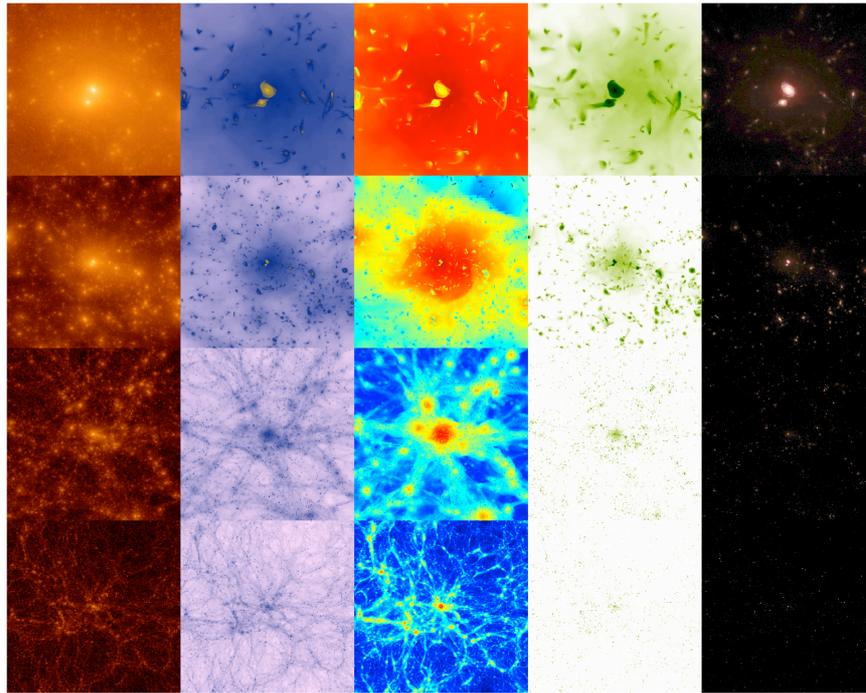
Enfin il faut également mentionner que l'IAP a participé de manière active au module d'ouverture (formation post-master) « Simulations numériques et programmation parallèle » organisé conjointement avec l'IAS, l'IDRIS et le CEA.

### **Développement de nouveaux schémas numériques et programmation parallèle**

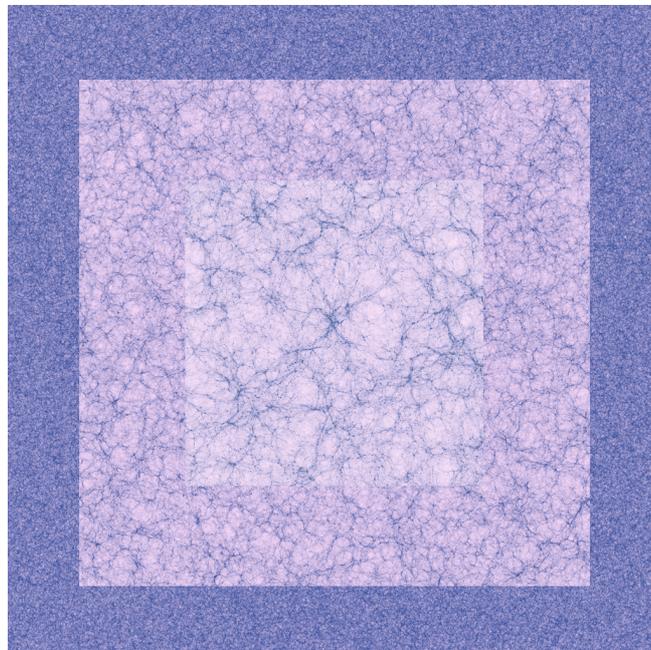
A l'heure actuelle, pas moins de 8 codes sont en cours de développement ou d'exploitation à l'IAP : Le code RAMSES (R. Teyssier - CEA), le treecode public GADGET2 dans sa version standard et deux versions « customisées » par S. Peirani et R. Sadoun, 2 solveurs des équations de Vlasov-Poisson, 1 code 3D d'évaporation de Jupiters-Chauds, 1 code PIC (plasma) et un code MHD dans le cadre du projet ESINPLE, ainsi qu'un code de simulation hydrodynamique relativiste de sursaut gamma.

#### *Pôle cosmologie :*

Dans le cadre du projet HORIZON dont il est l'un des acteurs majeurs, l'IAP a participé au développement du code hydrodynamique cosmologique RAMSES (code à raffinement adaptatif de maille écrit par R. Teyssier) par l'ajout de modules, dont un de refroidissement, qui modélise l'évolution chimique des éléments primordiaux à l'équilibre d'ionisation sous l'effet d'un terme photo-ionisant homogène et un module de génération en temps réel d'un cône de données dans l'espace temps. L'exploitation du code RAMSES dans le cadre du projet HORIZON a permis de réaliser, entre autres, deux simulations cosmologiques parmi les plus grandes de leur génération (en fait, les plus grosses au monde dans leur catégorie au moment de leur réalisation) : la simulation hydrodynamique « *Mare Nostrum* » (Figure 7.7) de formation des galaxies (Devriendt et al. 2010) et la simulation de matière noire pure Horizon-4II (Figure 7.8, Teyssier et al. 2009). Cette dernière comporte près de 70 milliards de particules dans un volume de  $2000 h^{-1}$  Mpc de côté ! L'exploitation scientifique directe de ces simulations a déjà conduit, sur la période 2007-2011, à une quinzaine de publications dans lesquelles l'IAP est directement impliqué (voir chapitre « Grandes structures et Univers profond »). Pour pouvoir calculer les conditions initiales de telles simulations il a été nécessaire d'adapter le code « *graphic* », initialement écrit sous sa forme scalaire par E. Bertschinger, aux architectures massivement parallèles. Le code public correspondant, « *MPgraphic* » (Prunet et al. 2008), a été développé à l'IAP et est maintenant devenu un outil standard de la cosmologie numérique.



**Figure 7.7.** Vue multi-échelle des champs physiques de la simulation Mare Nostrum : de la gauche vers la droite, la matière noire, le gaz, la température du gaz, la métallicité et les étoiles.



**Figure 7.8.** Vue multi-résolution de la simulation Horizon-4II.

Outre son usage standard pour réaliser des simulations de matière noire, la version hydrodynamique du code GADGET2 a été complétée par S. Peirani avec un modèle spécifique de formation d'étoiles tenant compte des processus de rétroaction dus aux supernovae de type Ia et II, de la perte de masse des étoiles au profit du gaz lorsque de tels événements se produisent, ainsi que de

---

l'enrichissement en métaux du milieu interstellaire et de la présence d'un fond ultraviolet dû aux quasars. En utilisant ces modélisations, il a été possible d'étudier, entre autres, la formation stellaire induite au cours d'épisodes de fusion entre galaxies (voir chapitre « Grandes structures et Univers profond »).

Par ailleurs, dans le cadre de sa thèse sous la direction de R. Mohayaee, R. Sadoun a rajouté les trous noirs dans GADGET2, ce qui représente une certaine difficulté technique en raison des effets de relaxation numérique que cela implique entre un corps massif et les particules de matière noire et les étoiles. Il est en train d'utiliser le code ainsi modifié pour étudier la formation de trous noirs supermassifs à grand *redshift*.

La technique des simulations « zoom » est souvent utilisée notamment afin d'étudier la formation de galaxies isolées ou de groupes de galaxies. Il est bon de mentionner que l'IAP possède une expertise dans ce domaine. En particulier, des simulations zoom à haute résolution d'un groupe local réaliste ont été réalisées et ont permis d'étudier par exemple la distribution des sous-structures de matière noire comme décrit dans le chapitre « Grandes structures et Univers profond », le champ de vitesse des galaxies satellites dans l'Univers local (Peirani 2010) ou encore la distribution des baryons (Peirani et al. 2012, en préparation).

Les équations de Vlasov-Poisson, qui décrivent la dynamique de la matière noire ou encore des étoiles dans les galaxies, sont généralement résolues avec une approche à N corps qui a le défaut d'être bruitée dans l'espace des phases (bruit de Poisson, effets de relaxation artificiels). L'objectif est de développer de nouvelles méthodes de résolution directe dans l'espace des phases. Colombi et Touma (2008) expérimentent la méthode traditionnelle du « *waterba* » qui consiste à suivre les isocontours de la fonction de distribution dans l'espace des phases à l'aide de polygones orientés adaptatifs : des tests sont conduits pour le cas 1D, les systèmes sphériques et les disques. Nous sommes également en train, dans le cadre d'un projet au long cours, d'implémenter la méthode semi-lagrangienne de « *splitting* » couramment utilisée en physique des plasmas.

#### *Pôle exoplanètes et leur environnement :*

Trois codes PIC/MHD/Cinétique ont été développés depuis 1998 afin d'explorer, de comprendre et de prédire la formation et l'évolution de la magnétosphère d'une planète extrasolaire et son interaction avec son étoile. Ce projet est le fruit d'une collaboration internationale regroupant plusieurs équipes dans le domaine de la simulation cinétique ou fluide (IAP, CEA, ESS à Seattle, CBK à Varsovie, LPL à Tucson). Les deux voies de recherche suivantes sont simultanément développées.

Afin de simuler l'environnement immédiat d'une planète, un code PIC 3D électromagnétique (Vlasov) et relativiste est en développement depuis 2001. Ce code tient compte des champs magnétiques respectivement planétaire et stellaire, de la présence de satellites naturels (magnétisés ou non), et de la gravité des objets présents. Ce code offre un accès direct aux données microscopiques du plasma telles que la fonction de distribution des vitesses en 3D, ainsi qu'à la topologie générale 3D des champs magnétiques et des courants électriques qui circulent dans le système. Une application du code à l'étude d'une magnétosphère terrestre a fait l'objet du travail de thèse de S. Baraka (Baraka et Ben-Jaffel 2007, 2011) et sert d'outil de formation par la recherche dans le cadre du projet Forrest qui est soutenu par la MAE (2011-2013). Une seconde application en cours concerne la magnétosphère des planètes géantes solaires et extrasolaires, tenant compte des champs magnétiques stellaires et planétaires, de la présence d'un satellite et de son champ magnétique intrinsèque, de la rotation de la planète, et de l'inclinaison de l'axe du dipôle par rapport à l'axe de spin. Une application est en cours sur l'exoplanète HD 189733b dans le cadre de l'analyse des données obtenues par HST dans l'UV lointain (Ballester et Ben Jaffel 2011).

Par ailleurs, un code MHD 3D décrivant l'interaction du vent stellaire avec le milieu interstellaire est utilisé pour simuler l'environnement interstellaire. Le code tient compte aussi bien des champs magnétiques stellaire et interstellaire que de la présence des neutres (Ratkiewicz et al. 2008). Sur la

---

période 2008-2011, l'activité du vent solaire/stellaire comme une condition aux limites évolutive a été introduite. Cette extension nécessite des moyens importants de calcul mais permet de relier dans le temps et l'espace plusieurs observations héliosphériques obtenues à des dates/régions différentes.

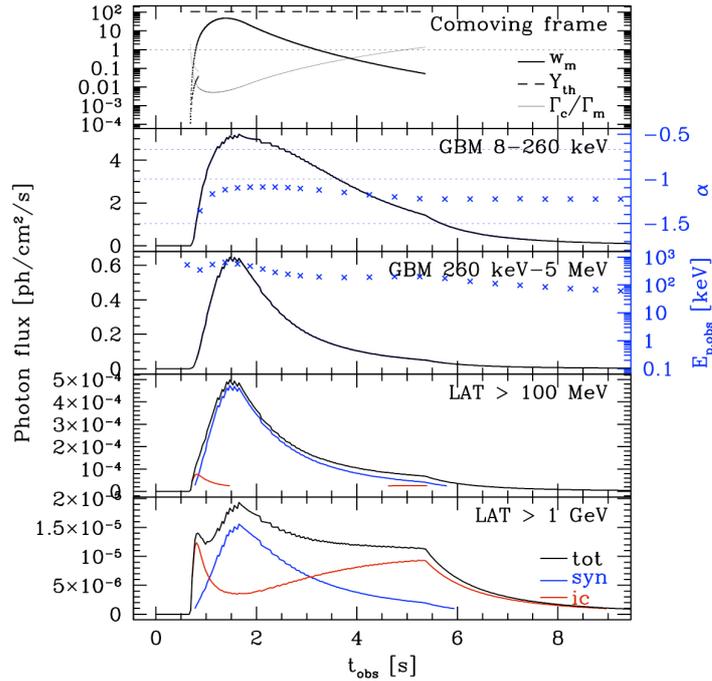
Ainsi, les déformations des structures respectivement de l'héliopause, du choc terminal, et du choc interstellaire qui ont été prédites en détail dès 2002 (Ratkiewicz et Ben-Jaffel, 2002), ne cessent d'être confirmées aussi bien par des mesures in situ des sondes Voyager 1 et 2 que des observations d'atomes énergétiques d'origine héliosphérique par le satellite Ibx. Une étude paramétrique d'envergure avec le code MHD 3D sur plusieurs mois a permis l'utilisation de la distorsion observée pour en déduire la mesure définitive du champ magnétique interstellaire (intensité et orientation) au voisinage du système solaire (Ratkiewicz, Ben-Jaffel et Grygorczuk, 2008, Strumik et al. 2011).

Les observations de transit de Jupiters-Chauds ont suggéré que ces planètes très proches de leurs étoiles hôtes peuvent avoir une atmosphère étendue, ce qui peut conduire à une perte de masse importante (Vidal-Madjar et al. 2003, 2004). Afin de comparer ces observations aux modèles de la dynamique des atmosphères de Jupiters-chauds, il est nécessaire de convertir la mesure de la profondeur de transit observée en *Lyman*  $\alpha$  en terme de taux d'échappement. L'IAP a développé un modèle numérique 3D permettant de répondre à cette question, tenant compte des forces de gravitation, de la pression de radiation à la vitesse radiale des particules, du transfert de rayonnement à l'intérieur du nuage d'hydrogène en évaporation dans la haute atmosphère de la planète. La simulation à N-corps correspondante permet d'interpréter la profondeur du transit de ainsi que le profil spectroscopique de l'absorption, et conduit par exemple à une estimation de l'ordre de  $10^{10}$  g/s pour le taux d'échappement d'hydrogène de HD189733b (Lecavelier des Etangs et al. 2010).

#### *Pôle astrophysique des hautes énergies :*

Les sursauts gamma et leurs rémanences sont parmi les phénomènes les plus brillants de l'Univers. Ils sont associés à des éjectas ultra relativistes émis par une source compacte de masse stellaire. Dans le scénario le plus discuté, l'émission du sursaut est produite dans le jet, par la dissipation d'une partie de l'énergie interne via la propagation d'ondes de choc, les chocs internes, et la rémanence est associée au freinage du jet par le milieu extérieur. Dans les deux cas, l'émission est due à une distribution non thermique d'électrons accélérés dans les chocs (voir chapitre 4 « Cosmologie et Astrophysique des hautes énergies »). La simulation numérique des sursauts gamma doit sa difficulté au caractère ultra relativiste de la dynamique du jet et au grand domaine dynamique spatio-temporel qui caractérisent le phénomène, notamment de l'ordre de 10 à 11 ordres de grandeur en termes d'échelle spatiale et une échelle de temps radiative beaucoup plus petite que l'échelle de temps dynamique.

Dans ce contexte, le groupe « sursauts gamma » de l'IAP développe des outils de simulations uniques, dont l'originalité est de suivre l'ensemble de l'histoire de l'émission du jet, depuis le moment où il devient transparent jusqu'à la fin de son freinage (voir Figure 7.9). Le code dynamique développé depuis 1998 pour les chocs internes a été étendu en 2007 pour inclure l'effet du milieu extérieur (Genet, Daigne et Mochkovitch, 2007). Il a été ensuite couplé à un code radiatif détaillé (Bosnjak, Daigne et Dubus, 2009), qui suit l'évolution de la distribution des électrons et des photons dans le référentiel propre de la matière choquée, en incluant le rayonnement synchrotron, la diffusion Compton inverse et l'annihilation  $\gamma\gamma$ . Le flux observé est ensuite calculé en intégrant l'émissivité comobile sur des surfaces de temps d'arrivée égaux, avec les effets relativistes (effet Doppler et focalisation du rayonnement) et cosmologiques (*redshift* et dilatation des temps). Le traitement fin de l'annihilation  $\gamma\gamma$ , indispensable pour l'interprétation des observations à haute énergie par le satellite *Fermi*, nécessite un traitement numérique dédié en raison de la forte dépendance du processus à l'angle d'interaction (Hascoët et al. 2011). L'opacité se calcule par une triple intégrale, sur la position du photon de haute énergie et sur la direction et la fréquence du champ de photon de basse énergie, qui se révèle fortement anisotrope. L'ensemble de ces outils forment un modèle numérique unique qui place l'IAP en très bonne place pour l'interprétation des données des satellites *Swift* et *Fermi*.



**Figure 7.9.** Sursaut gamma synthétique obtenu avec le modèle de l'IAP. Ce pulse unique est produit par un éjecta d'une épaisseur de 2 secondes lumière constitué d'une partie « lente » (facteur de Lorentz  $G=100$ ) et « rapide » ( $G=400$ ), ce qui conduit à une collision interne. A l'issue de la simulation dynamique, les conditions physiques dans la région choquée sont connues. Le panneau du haut montre ainsi l'évolution de trois paramètres caractérisant respectivement l'efficacité de la diffusion Compton inverse ( $Y_{Th}$ ), son régime ( $w_m$ ) et l'efficacité radiative des électrons ( $G_c/G_m$ ). Le code radiatif puis l'intégration du flux observé permettent alors de calculer les courbes de lumière et le spectre du sursaut. Les 4 panneaux successifs donnent la courbe de lumière dans les différents canaux des deux instruments (GBM et LAT) de Fermi, en distinguant les émissions synchrotron et Compton inverse. Deux indicateurs de l'évolution du spectre (la pente à basse énergie  $\alpha$  et l'énergie de pic  $E_{p,obs}$  de la composante synchrotron) sont également indiquées. L'ensemble montre un bon accord avec le comportement observé dans les sursauts détectés par Fermi.

## Le post-traitement et la génération d'observations virtuelles

A partir des simulations produites il est nécessaire de mener une chaîne d'analyse qui conduit à la génération et à l'analyse d'observations virtuelles pour contraindre les paramètres (ou les hypothèses) sous-jacents au modèle numérique, un domaine dans lequel l'IAP excelle, notamment à travers le projet HORIZON et le projet ESINPLE.

*Pôle cosmologie :*

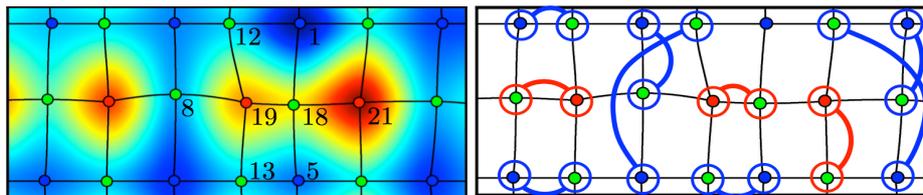
Les derniers développements de codes d'analyse statistique et de détection des structures dans les simulations cosmologiques comprennent :

- Une adaptation du code *adaptahop* (Aubert, Pichon et Colombi 2004) de détection des halos et sous-halos pour l'utiliser dans le cadre des modèles semi-analytiques de formation des galaxies couplés aux simulations  $N$ -corps (Tweed et al. 2009). L'algorithme *adaptahop* est largement utilisé dans le cadre du projet HORIZON.
- Un algorithme de détection des structures et sous-structures développé dans le cadre de la thèse de M. Maciejewski : HSF (Maciejewski et al. 2009a, b). Ce code utilise toute l'information dans l'espace des phases et s'avère ainsi l'un des 2 ou 3 meilleurs codes à l'heure actuelle de ce type, comme montré par l'article de comparaison entre différentes méthodes de Knebe et al. (2011) auquel l'IAP a participé.
- Le code *powmes* (Colombi et al. 2009) qui utilise une approche en développement de Taylor pour extraire rapidement et avec une grande précision le spectre de puissance d'une simulation à  $N$ -corps sur tout le domaine dynamique. Ce code est maintenant largement utilisé en cosmologie numérique.

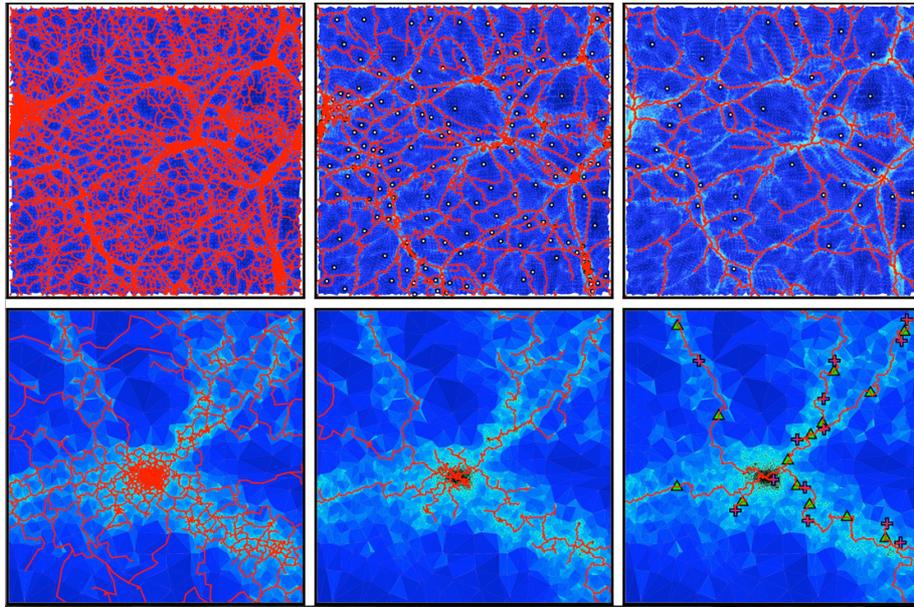
- Un code de post-traitement simulant de manière cohérente les effets de lentille gravitationnelle sur des galaxies d'arrière plan à partir de la distribution tridimensionnelle de masse (Teyssier et al. 2009). Ce code est novateur dans la mesure où il a, pour la première fois, rendu possible le calcul, au-delà de l'approximation de Born, des effets de lentille des différentes couches de matière en géométrie sphérique ; ceci a permis de réaliser une carte simulée de convergence du ciel complet à partir de la simulation 4II. Ces travaux sont préparatoires à la mission *Euclid* récemment sélectionnée par l'ESA.

- Un code de détection des filaments en 2D et 3D (Sousbie et al. 2008) s'appuyant sur une approximation locale des filaments initialement suggérée par Novikov, Colombi et Doré (2006) ; une amélioration de ce code permettant de dessiner les véritables lignes de crête dans un champ lisse non bruité en combinant une approche probabiliste et un algorithme de percolation (Sousbie, Colombi et Pichon 2009) ; finalement, un algorithme robuste (Sousbie 2011, Sousbie, Pichon et Kawahara, 2011, Figure 7.11) tenant compte des effets de bruit en s'appuyant sur les derniers développements de la topologie discrète et sur le concept de persistance, qui permet d'attribuer à chaque caractéristique topologique du champ (représentée par une paire de points critiques, minimum, maximum, points selles, reliés par un réseau) un nombre quantifiant son importance relative. Il devient alors possible de définir un seuil en dessous duquel les caractéristiques correspondantes peuvent être considérées comme résultant du bruit. Ces caractéristiques topologiques sont alors effacées par une transformation géométrique minimale du champ résultant en une simplification du réseau de lignes critiques (Figure 7.10). Le code correspondant, DisPerSE, est en phase d'ajustement final pour être rendu public.

A cela il faut rajouter de nombreux autres utilitaires (programmes de lissage adaptatifs, algorithmes de percolation, d'analyse de structure angulaire des halos, comptages dans les boîtes, etc...) qui font de l'IAP un groupe d'expertise de niveau mondial pour le post-traitement des simulations numériques en cosmologie.

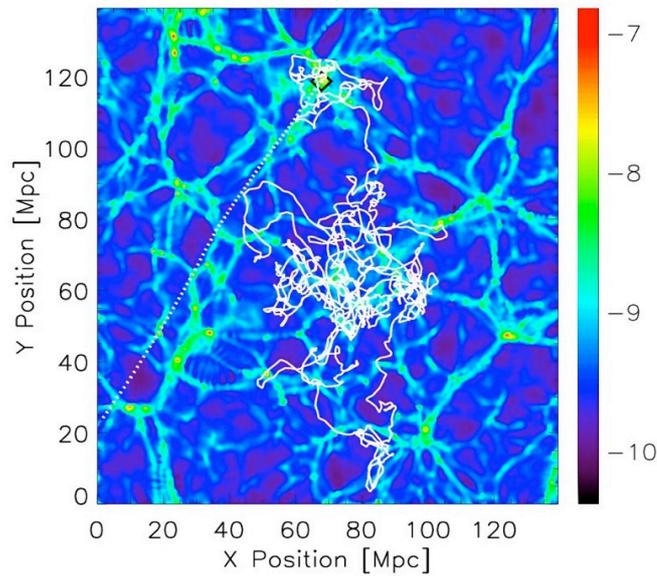


**Figure 7.10.** A gauche : un champ et ses lignes critiques ; à droite, les appariements au sens de la persistance.



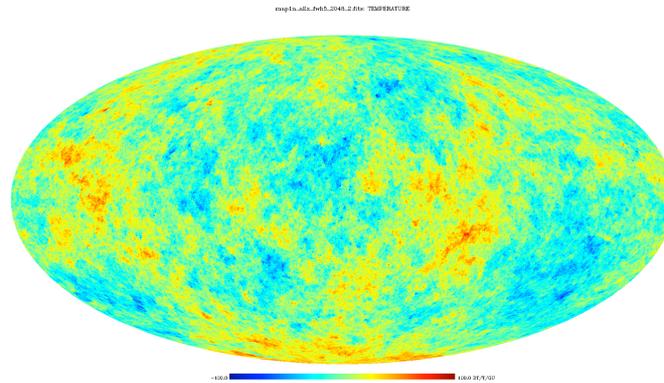
**Figure 7.11.** De haut en bas et de gauche à droite, le squelette à niveau de persistance croissant, à grande échelle et au voisinage d'un amas, en rouge, superposé à la tessellation de Delaunay du nuage de particules d'une simulation de matière noire (Sousbie, Pichon et Kawahara, 2011).

L'IAP a également développé un savoir faire unique pour la génération d'observations virtuelles. Ces observations virtuelles s'obtiennent par un post-traitement sophistiqué des simulations numériques. Leurs applications sont nombreuses : entre autres on peut compter les relevés de galaxies profonds, les lentilles gravitationnelles dans le régime fort ou faible (e.g. Semboloni et al. 2007, Peirani et al. 2008a, Teyssier et al. 2009), la forêt *Lyman*  $\alpha$  (e.g. Caucci et al. 2008), ainsi que la propagation des rayons cosmiques de ultra-haute énergie dans le milieu intergalactique en couplant méthode semi-analytique et simulations cosmologiques (Figure 7.12, Kotera et Lemoine 2008, Kotera et al. 2009).



**Figure 7.12.** Trajectoire de rayons cosmiques d'énergie  $10^{18}$  eV et  $10^{20}$  eV (ligne droite) dans un champ magnétique intergalactique estimé à partir d'une simulation cosmologique de 280 Mpc de côté, en supposant que l'intensité du champ magnétique est une fonction de la densité de matière sous-jacente.

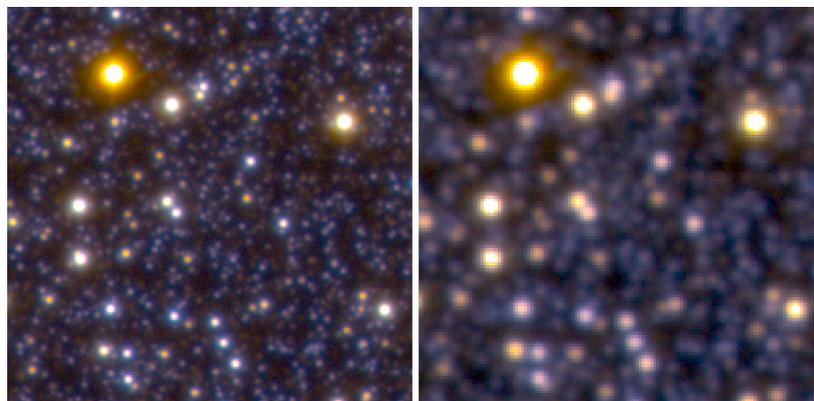
Dans le cadre du relevé *Planck* un effort particulier est conduit pour la génération de cartes synthétiques de fluctuations du CMB tenant compte de la présence de cordes cosmiques. A cette fin, en collaboration avec l'Université de Louvain, des simulations d'évolution cosmologique de réseaux de cordes cosmiques (Ringeval, Sakellariadou et Bouchet 2007, Figure 7.13) sont couplées à la propagation de photons. Pour la première fois, en généralisant les méthodes développées par Fraisse et al. (2008) puis Ringeval (2010), des cartes du ciel complet ont été réalisées avec une résolution de 5' et sont en cours d'exploitation pour l'interprétation des données *Planck*.



**Figure 7.13.** Carte “full sky” des anisotropies du CMB induites par l’effet ISW de cordes cosmiques de Nambu–Goto .

Comme complément aux simulations numériques, des codes d'évolution de galaxies suivent (l'Univers local et l'Univers profond) les luminosités, couleurs, masses et abondances des galaxies par type. Ainsi, l'IAP a développé et maintient un tel code, Pégase, (<http://www2.iap.fr/pegase>) comme présenté dans le chapitre 3 « Origine et évolution des galaxies ». Coupler un tel code aux simulations de matière noire pure ou hydrodynamiques représente un outil essentiel pour générer des observations virtuelles réalistes et interpréter les résultats des grands relevés.

Enfin, des efforts de développement sur les outils de simulation de catalogues et d'images Stuff et SkyMaker ont été poursuivis (Bertin 2009), avec le soutien d'une petite communauté d'utilisateurs. Les nouvelles fonctionnalités incluent notamment l'évolution avec le décalage spectral des dimensions des sphéroïdes et des disques, et la possibilité de générer des réponses impulsionnelles variables sur le champ. Les deux logiciels ont été mis à contribution en 2010 et 2011 dans le cadre d'études préliminaires pour simuler les images produites par l'imageur grand-champ à optique adaptative du projet « Imaka » (Figure 7.14, Lai et al. 2008).



**Figure 7.14.** Un champ stellaire de 30x30 arcsec observé (en simulation avec SkyMaker) dans les bandes g,r et i depuis le télescope CFHT de 3.6m avec l'instrument MEGACAM (à droite), et ce qui est attendu avec Imaka (à gauche).

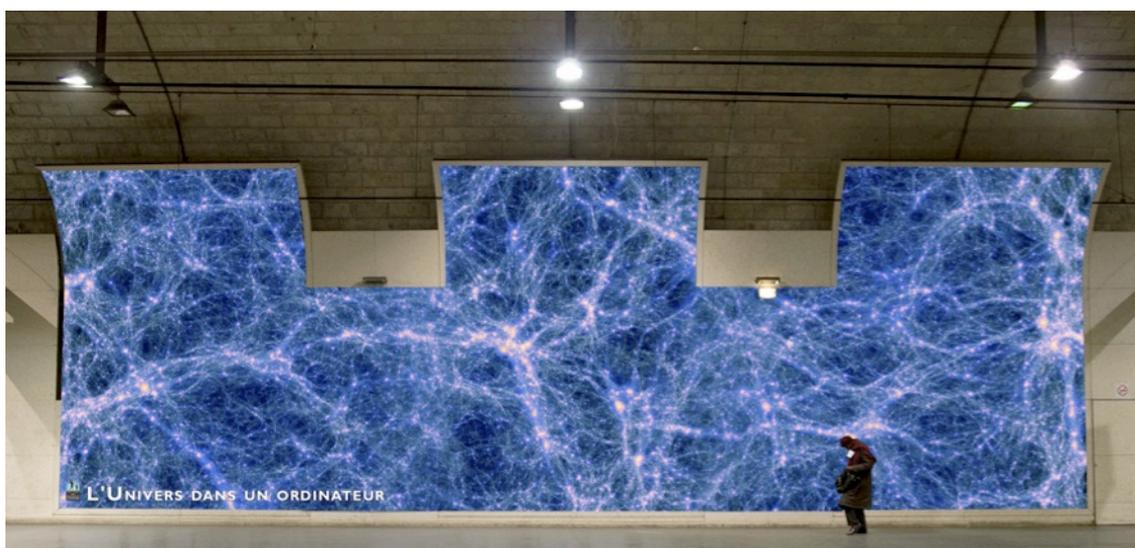
## *Pôle exoplanètes et leur environnement*

Les simulations réalisées dans le cadre du projet ESINPLE utilisent une boîte de  $256^3$  nœuds au mieux, et devraient atteindre  $512^3$  dans un avenir proche. Plusieurs routines de diagnostic ont été développées pour étudier la sensibilité du code au nombre total de particules, la taille de la grille, la masse relative des particules, les conditions aux limites de la boîte en terme de gain/perte de particules, réflexion/périodicité des champs, etc... Cet effort a permis de localiser dans l'espace des phases les « recettes » qui sont les moins gourmandes en CPU et en RAM. En parallèle, nous avons développé de nombreuses routines (IDL et fortran) pour le traitement en temps réel des données des simulations (analyse Fourier/wavelet des séries temporelles d'observables en 3D, capture de structures fines telles des chocs, des surfaces de courants, des courants alignés aux lignes du champ magnétique ambiant, etc.).

### **La visualisation des résultats**

L'IAP investit un gros effort sur la visualisation, à la fois pour l'exploitation scientifique et la valorisation des résultats, notamment pour le grand public.

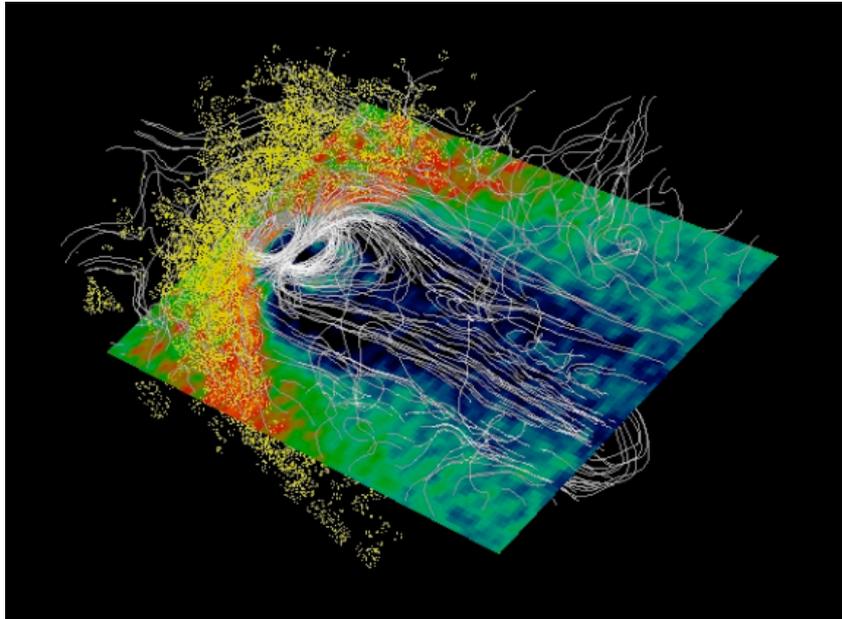
Ainsi, un code de visualisation a été développé (T. Sousbie), qui utilise l'accélération des cartes vidéo (avec la librairie OpenGL) et permet de visualiser en temps réel la distribution de particules de matière noire dans une simulation. Ce code permet également de représenter les isosurfaces, le squelette de la distribution. Il utilise des développements sophistiqués des images de synthèse, notamment le « *marching cube algorithm* », et permet d'extraire des films. Le code RealGal (C. Pichon) permet de créer des films de galaxies ou de distributions de galaxies (Figure 7.15) en s'appuyant de manière transparente sur des codes de domaine public (pov-ray, yorick, mpeg\_encode). Le code de lancer de rayon RayT (S. Colombi) permet de générer des images à partir de simulations à N corps, quelle que soit leur taille, en s'appuyant sur une lecture séquentielle des données et un lissage adaptatif à la volée se basant sur un algorithme de type KDtree. Il a par exemple permis de réaliser un film en vision stéréoscopique et à très haute résolution à partir de la simulation 4Π.



**Figure 7.15.** Vue des champs physiques de la simulation *Mare Nostrum* réalisée par C. Pichon et exposée en 2009 dans la station Luxembourg du RER B à Paris dans le cadre de l'Année Mondiale de l'Astronomie. Cette image comporte 40000x16000 pixels !

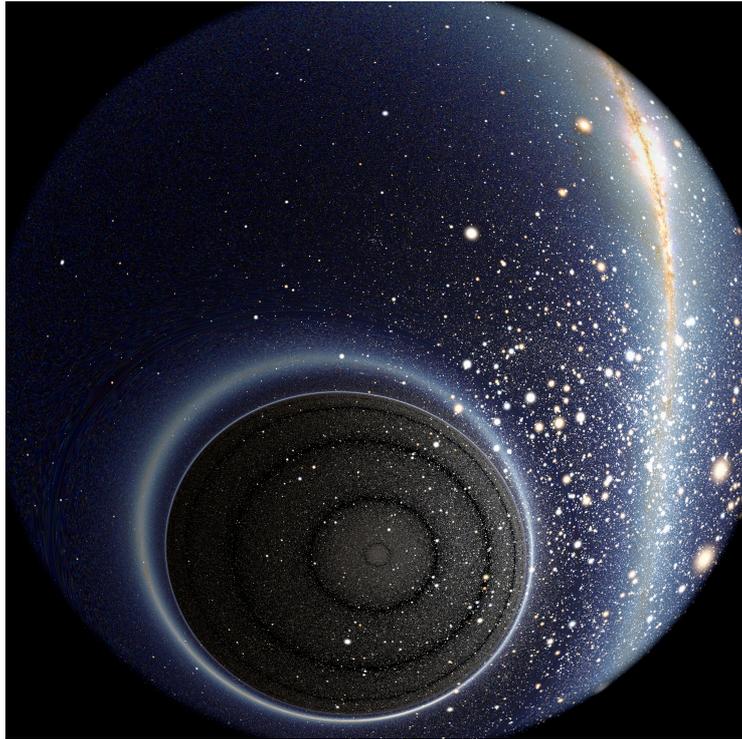
Pour le projet ESINPLE, un effort important a été fourni pour construire des outils de visualisation sur la base du logiciel graphique IDL avec l'aide de J. Grygorczuk (CBK, Pologne). Le projet dispose

désormais de plusieurs logiciels (widgets) optimisés pour explorer en 3D les différents moments de la fonction de distribution (densité, vitesses de groupe, température, etc) dans des plans ou sur des sphères centrées sur la planète, de tracer en 3D les lignes du champ magnétique par un simple clic de la souris ; et de représenter la fonction de distribution locale pour les vitesses parallèles et perpendiculaires aux lignes de champ afin de mesurer l'anisotropie de la distribution et son écart par rapport à une distribution de Maxwell. Par ailleurs, une collaboration avec D. Pomarede (CEA) a démarré en 2010 pour l'utilisation et l'amélioration du logiciel SDvision pour la visualisation des données 3D (particules, iso-surfaces, lignes de champ, film, etc., Figure 7.16).



**Figure 7.16.** Magnétosphère d'une planète tellurique : les lignes de champ magnétique en blanc, la densité de plasma équatoriale en vert. Le vent stellaire se propage de la gauche vers la droite. Le saut en densité en forme d'arche jaune correspond à l'arc de choc qui se forme quand les particules sont stoppées et réfléchies par le champ magnétique planétaire. Visualisation obtenue grâce au logiciel SDvision.

Enfin, un programme de visualisation de la métrique de trous noirs (métriques de Schwarzschild ou de Reissner-Nordström) développé courant 2006-2007 continue à être maintenu et étendu (A. Riazuelo) ; il tient compte de la panoplie des effets relativistes causés par ces objets (aberration, effet Doppler, intensité, distorsions gravitationnelles, amplification des images et images multiples). Ce programme, de type lancer de rayons, permet entre autres de visualiser ce que verrait un observateur en orbite circulaire, elliptique, parabolique ou hyperbolique autour d'un trou noir, ainsi que le spectacle éphémère auquel il aurait droit en passant dans l'horizon du trou noir. D'un point de vue plus théorique, il permet aussi de représenter ce à quoi ressembleraient une singularité en trou blanc, un trou de ver ou une singularité nue si de tels objets existaient dans la nature (Figure 7.17). L'exploitation de ce code a conduit à de nombreuses productions pour le grand public (publications dans les revues Ciel et Espace, Sciences et Avenir, Science et Vie, Pour la Science ; conférences publiques et festivals d'astronomie), à une « *Astronomical Picture of the Day* » et surtout à la production d'un DVD de 38 minutes (Desenne, Riazuelo et Rouat) vendu à près de 25000 exemplaires et distingué par le prix 2008 du journalisme scientifique de la fondation Varrenne (décerné à S. Rouat) et le second prix du festival de film de chercheur de Nancy en 2009 (décerné à A. Riazuelo). En 2009 a été réalisée une version pour planétariums numériques (résolution 4000x4000 en fish-eye, format DomeMaster) dans le cadre d'une collaboration avec la Société RSA Cosmos, diffusée pour la première fois en 2009 à la Cité des Sciences et de l'Industrie (colloque APLF) et maintenant dans d'autres planétariums à travers le monde, notamment celui de Mannheim (Allemagne). Grâce à un programme de mécénat « *Passion for Innovation* » de l'entreprise Dassault Systèmes, il vient d'être possible d'améliorer le logiciel pour qu'il fonctionne en temps réel (50 images par seconde) en haute résolution (1920x1200).

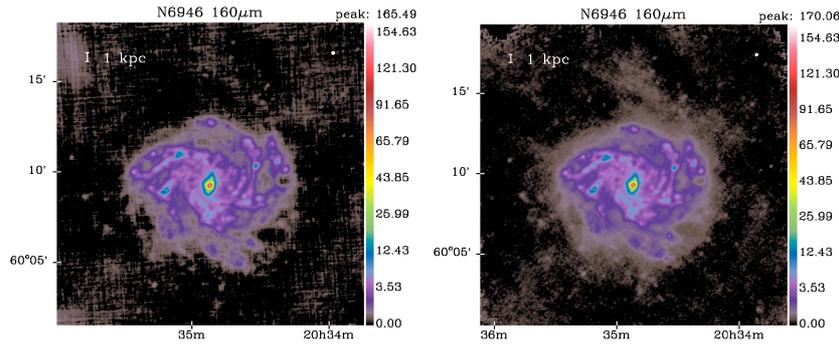


*Figure 7.17. En orbite rapprochée autour d'un trou de ver...*

### **7.2.5 HERSCHEL**

Le télescope spatial européen *Herschel* a été lancé en mai 2009 conjointement avec *Planck*, et aura épuisé ses réserves cryogéniques début 2013. Il réalise des observations pointées dans le domaine infrarouge-submillimétrique, entre 60 et 600  $\mu\text{m}$ , dans de nombreux modes photométriques et spectroscopiques. Les programmes de temps garanti et de temps ouvert ciblent l'Univers froid au sens général, excepté bien sûr le rayonnement du fond diffus cosmologique. Les objets astronomiques concernés sont extrêmement divers : petits corps du système solaire, proto-étoiles, enveloppes circumstellaires et restes de supernovae, nuages atomiques et moléculaires, régions de formation d'étoiles, galaxies à tous décalages spectraux, et milieu intergalactique. La communauté des utilisateurs d'*Herschel* est donc très vaste. Le nombre de publications dévolu à la mission *Herschel* s'élève à plus de 500 dont environ 200 sont signées par un membre de l'IAP.

La couverture spectrale d'*Herschel* donne accès simultanément au pic de l'émission thermique des poussières, et au spectre de Rayleigh-Jeans qui est indispensable pour estimer correctement la masse totale de poussières. La sensibilité est limitée principalement par le bruit de confusion des sources, et la résolution angulaire est de l'ordre de 5" à 12" de 70 à 160  $\mu\text{m}$ , comparable à celle qu'on pouvait obtenir avec *Spitzer* en infrarouge moyen, ce qui permet de détecter des condensations de faible masse dans les nuages de la Voie Lactée les plus proches, de caractériser des régions individuelles de quelques centaines de parsecs à l'intérieur de galaxies locales de tous types, et de construire pour ces régions des distributions spectrales d'énergie complètes en infrarouge. Avec *Herschel*, il est aussi devenu possible de cartographier des champs profonds de manière très efficace dans le submillimétrique. Les capacités spectroscopiques permettent des études détaillées de physico-chimie et de cinématique dans les nuages voisins ; dans les objets extragalactiques, sont ciblées les raies d'émission responsables de la majeure partie du refroidissement du milieu interstellaire et, pour ceux qui sont suffisamment brillants, les raies à forte excitation de CO et d'autres traceurs susceptibles de contraindre la nature des mécanismes de chauffage du gaz.



**Figure 7.18.** A gauche : carte de la galaxie NGC 6946 à 160  $\mu\text{m}$ , réduite avec le pipeline officiel. A droite : mêmes données réduites avec *Scanamorphos*. Le pipeline produit des cartes beaucoup plus bruitées, et élimine une part importante de l'émission diffuse de la galaxie

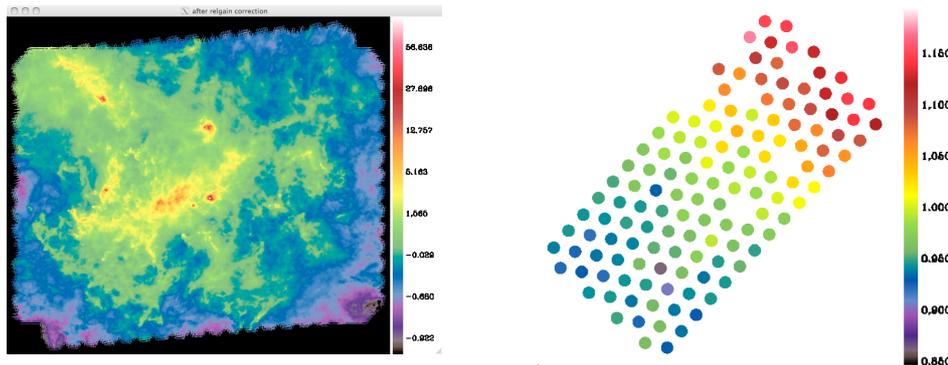
Nous participons à l'ICC (*Instrument Control Center*) de l'instrument SPIRE, qui opère entre 200 et 600  $\mu\text{m}$ , dont le P.I. est Matt Griffin (Cardiff) et le co-P.I. Laurent Vigroux. Les ICC regroupent des chercheurs dans de nombreux instituts et sont en charge, notamment, du développement et de la documentation du pipeline de réduction des données, et des activités de calibration. Plus précisément, nous faisons partie du groupe de validation du pipeline pour les observations de balayage (SMPVT : *Scan Map Pipeline Validation Team*) et de l'équivalent pour les observations du spectromètre à transformée de Fourier (FTS). Les personnes associées à l'exploitation d'*Herschel* comprennent 5 chercheurs permanents et 2 chercheurs en contrat postdoctoral. Les activités techniques sont menées par deux d'entre eux (astronome adjoint et postdoc), qui bénéficient du soutien à temps partiel d'un ingénieur informatique de l'IAP.

### Logiciel de réduction et cartographie pour les données de balayage

Pour exploiter au mieux les capacités d'*Herschel*, en particulier pour la cartographie de grand champ, nous avons développé un logiciel public de réduction et de projection des données acquises en mode de balayage, allant au-delà des outils du pipeline officiel (Roussel 2011 soumis, <http://www2.iap.fr/users/roussel/herschel>). La tâche cruciale de ce logiciel est la soustraction des dérives causées par les fluctuations thermiques du bain cryogénique et le bruit de scintillation des bolomètres. Bien que les instruments de *Planck* et *Herschel* soient de même nature (des matrices de bolomètres), le problème de la soustraction des dérives se pose différemment pour les deux observatoires, du fait que les modes de balayage et les contraintes dues au volume des données sont très dissemblables. La solution retenue pour notre propre outil est d'extraire les dérives des données elles-mêmes, en mettant à profit la redondance automatiquement obtenue par les observations de balayage, et sans utiliser de modèle de bruit, nécessairement lacunaire. Pour l'instrument PACS (observant à 70, 100 et 160  $\mu\text{m}$ ) qui est le plus affecté par ces dérives, *Scanamorphos* est à ce jour le seul logiciel public qui préserve aussi bien les sources compactes que l'émission étendue, tout en diminuant drastiquement le bruit. Concernant l'instrument SPIRE (qui observe à 250, 350 et 500  $\mu\text{m}$ ), c'est aussi pour l'instant le seul logiciel à réaliser une projection matricielle plutôt qu'une projection dans le plus proche pixel, et à prendre en compte les variations de la taille du faisceau d'un bolomètre à l'autre, procurant donc une réduction du bruit et une calibration en flux plus précise pour l'émission étendue. Le développement a commencé fin 2007 à partir de simulations de SPIRE et d'observations au sol de P-Artémis (sur APEX), puis l'algorithme a continué à être amélioré en utilisant les observations en vol. *Scanamorphos* a été rendu public en juillet 2010. Depuis cette date une dizaine de versions améliorées ont été livrées régulièrement, prenant en compte les remarques et suggestions des utilisateurs. Il a été adopté par plusieurs programmes *Herschel*.

## Calibration des sources étendues

La calibration en flux réalisée par l'ICC de SPIRE n'inclut pas, jusqu'ici, les variations de la taille du faisceau à l'intérieur de chaque matrice de bolomètres, c'est à dire qu'elle n'est strictement valable que pour des sources ponctuelles. La calibration des sources étendues, prenant en compte leur couplage avec chaque bolomètre, requiert une étape supplémentaire, toujours plus tardive dans la mission. Nous avons déterminé les tailles relatives des faisceaux des trois matrices de SPIRE, uniquement à partir d'observations scientifiques, donc sans augmenter le volume des observations de calibration. Les données sélectionnées couvrent des régions de la Galaxie dont la dynamique en brillance de surface est la plus large possible, pour que les erreurs venant des dérives résiduelles soient négligeables devant l'effet des gains différentiels des bolomètres. Nous obtenons des variations cohérentes (avec de clairs gradients le long des matrices) et significatives, de l'ordre de 10%. Ces gains ont été testés et sont en cours d'inclusion dans le pipeline.



*Figure 7.19. A gauche : carte du nuage de la Rosette à 250 µm, l'un des champs ayant servi à déterminer les tailles relatives des faisceaux (champ d'environ 88' x 69'). A droite : Gains relatifs applicables aux sources étendues, pour la matrice à 250 µm. Chaque disque représente un bolomètre.*

## Analyse morphologique des nuages interstellaires

Dans le cadre des simulations numériques à l'IAP, nous avons adapté un logiciel initialement destiné aux simulations cosmologiques (DisPerSE, Sousbie 2010 et Sousbie et al. 2010), pour identifier et mesurer les propriétés topologiques des filaments et autres structures des nuages interstellaires. Il permet d'extraire des cartes de filaments répondant à une définition mathématique précise et de calculer leurs distributions propres de densité et de température. Cela fut un outil déterminant qui a permis de montrer que tous les filaments avaient une longueur standard d'environ 0,1 pc et de montrer ainsi l'importance de la turbulence interstellaire pour la formation de ces filaments.

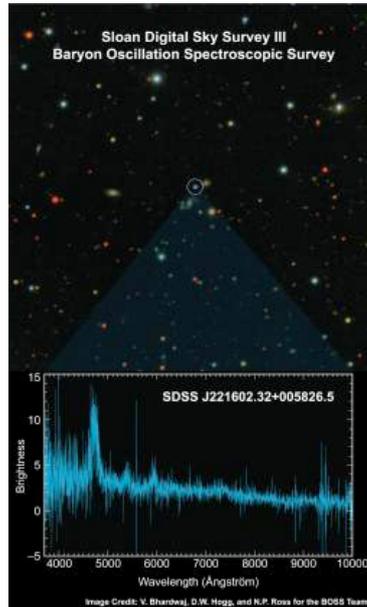
### 7.2.6 BOSS

Boss est l'un des quatre projets du relevé SDSS-III (Sloan digital sky survey III). Cette expérience, dédiée à la recherche des oscillations de baryons, implique des équipes de l'IN2P3/CNRS (APC), de l'INSU/CNRS (IAP, LAM et Observatoire de Besançon) et de l'IRFU/CEA.

Les premières indications d'une expansion accélérée de l'Univers sont venues de mesures de supernovae utilisées comme chandelles standards et n'ont cessé d'être confirmées. Cette accélération est supposée être la conséquence directe de l'existence d'une mystérieuse énergie noire. Découvrir la nature de l'énergie noire est un enjeu majeur de la cosmologie.

Plusieurs techniques doivent être utilisées pour mieux contraindre les propriétés de l'énergie noire, en particulier le cisaillement gravitationnel, l'étude des amas, et les oscillations acoustiques de baryons. Le projet BOSS s'intéresse à cette dernière technique. Des quatre méthodes comparées par le DETF (Albrecht et al. 2006) et le groupe de travail ESA-ESO (Peacock et Schneider 2006), celle qui utilise la mesure des oscillations de baryons est la mieux comprise et a les erreurs systématiques les plus petites.

Une des premières détections des oscillations de baryons (BAO) a été obtenue grâce au relevé SDSS-II (Eisenstein et al. 2005), à un décalage vers le rouge de l'ordre de  $z=0,3$ . La continuation de ce projet dans SDSS-III a obtenu le soutien de la fondation Sloan et de la NSF.



**Figure 7.20.** Un des premiers spectres de quasar pris par Boss. Sur la partie haute de la figure, le quasar bleu est indiqué par un cercle sur l'image du ciel prise par SDSS. La partie basse de la figure montre son spectre mesuré par Boss. Crédit : D. Hogg, V. Bhardwaj et N. Ross.

Le projet BOSS (*Baryon Oscillations Spectroscopic Survey*), grâce à une jouvence modérée du spectrographe (1000 fibres, CCDs plus efficaces, couverture spectrale plus étendue, installation de réseaux holographiques), permettra d'obtenir un relevé de 1,5 million de galaxies lumineuses rouges (LRG), sur une surface cinq fois plus grande (jusqu'à  $z = 0,8$ ) et à une densité deux fois plus importante que SDSS-II. Il est en outre prévu un relevé spectroscopique de 160 000 QSO (Figure 7.20) à  $z > 2,15$ , afin de mesurer la fonction de corrélation dans le milieu intergalactique, et donc d'obtenir une mesure de l'étalon de distance fourni par les BAO à  $z \sim 2,5$ . L'IAP s'est concentré sur le relevé de quasars.

Le groupe français (FPG) qui participe au projet SDSS-III comprend l'Institut d'Astrophysique de Paris, le laboratoire AstroParticule et Cosmologie, le Service de physique des particules du CEA, l'Observatoire UTINAM de Besançon et le Laboratoire d'Astrophysique de Marseille. Nous avons obtenu une ANR qui permet de financer le ticket d'entrée dans SDSS-III et le financement de deux post-docs, dont Sébastien Peirani qui a ensuite été recruté à l'IAP. Le groupe de l'IAP est constitué de P. Petitjean, P. Noterdaeme, E. Rollinde, I. Pâris et H. Finley. Depuis octobre 2008, I. Pâris est en thèse sous la direction de P. Petitjean et E. Rollinde. H. Finley a commencé une thèse en 2011. Le financement de ce projet est complété par le soutien du PNCG et de la CSA ; ce qui nous a permis de participer aux conférences pluriannuelles aux USA, et d'organiser une conférence à l'APC et un atelier de travail en juillet 2011 à l'IAP.

Le FPG et en particulier l'IAP a pris une place prépondérante dans la collaboration BOSS sur la sélection des cibles et ensuite sur l'analyse et la vérification des données obtenues. Les premières données sont arrivées en décembre 2010 et la première « *data release* » publique devrait avoir lieu en Juillet 2012 (DR9). Elles seront mises à la disposition de la communauté astronomique française grâce au Centre de calcul de l'IN2P3 (CC-IN2P3). Nous sommes également présents sur l'analyse spécifique des BAO et sur des analyses portant sur les milieux intergalactique et interstellaire.

**1. Sélection des cibles.** L'analyse en réseaux de neurones est une nouvelle méthode de sélection de quasars (Yeche, Petitjean et al. 2010). Elle est maintenant partie intégrante des méthodes utilisées pour la sélection des cibles de BOSS.

---

**2. Contrôle des spectres et mise en place de la base de données.** P. Petitjean et I. Pâris ont scanné l'ensemble des 100 000 spectres obtenus à ce jour. Ce contrôle a permis de mettre en évidence des problèmes importants dans la calibration des spectres, mais également de repérer des quasars intéressants qui pourront faire ensuite l'objet d'études spécifiques. I. Pâris est très impliquée dans la mise en place de la base de données qui sera utilisée pour la DR9. Elle devrait prendre en charge la rédaction de l'article décrivant cette base.

**3. Analyse du continu.** Un des problèmes majeurs de l'étude du milieu intergalactique est la définition du continu du quasar dans la forêt *Lyman  $\alpha$* . Nous avons comparé et mis en place différentes méthodes (lois de puissance, méthodes inverses, méthode PCA) pour contrôler la qualité de la reconstruction du continu dans des spectres à basse résolution tels que ceux de SDSS (Pâris et al. 2010). Cette étude a également permis de revenir sur la question de l'évolution du flux moyen, et de la présence d'un changement d'évolution à  $z \sim 3$ .

**4. Détection des DLAs.** L'étude du MIS à grand décalage spectral, par l'observation des systèmes DLAs (*Damped Lyman  $\alpha$  systems*) a connu un nouvel essor grâce à l'énorme base de données fournie par SDSS. Notre groupe domine la recherche mondiale dans le domaine de la recherche et de l'analyse de l'hydrogène moléculaire à grand décalage spectral (e.g. Ledoux et al. 2003, Noterdaeme et al. 2008a). Nous avons établi un catalogue de DLAs dans le relevé SDSS-II (DR7, Noterdaeme et al. 2009a). Un catalogue similaire sera fourni à la communauté internationale pour DR9. Celui-ci sera également utilisé pour masquer ces raies lors de l'analyse des BAOs.

**5. L'analyse du signal BAO.** Différentes méthodes d'analyse sont envisagées au sein de la collaboration SDSS. L'ensemble du FPG prend part à l'effort théorique et numérique sur cette question. En 2009, nous avons mis en place les outils pour construire un relevé synthétique à partir de la simulation Horizon, qui est une des plus grandes simulations disponibles aujourd'hui (2 Gpc/h ; 4096 particules). Nous avons également mis en place la production de simulation gaussienne pour permettre une étude statistique à partir d'un grand nombre de simulations (Le Goff, Magneville, Rollinde et al. 2012, en préparation).

**6. Propriété du MIG.** Nous avons également travaillé sur des sujets concernant la structure du milieu intergalactique. I. Pâris a donc analysé la distribution du flux transmis et son évolution avec le décalage spectral (Pâris et al. 2010). H. Finley a effectué un stage de master sur la corrélation transverse du flux sur des échelles inférieures ou égales à 10 Mpc à partir des paires de quasars observées dans BOSS. Enfin, E. Rollinde est responsable de l'étude de la corrélation entre quasar et absorbants dans la direction transverse. Ces deux études donneront lieu à des publications lorsque le catalogue DR9 sera finalisé (et avant la 'data release' publique).

### 7.2.7 Le Consortium Exoplanètes SOPHIE

Simultanément avec la mise en place du spectrographe SOPHIE au télescope de 193cm de l'Observatoire de Haute-Provence, un consortium d'observateurs s'est constitué afin de mener un grand programme compétitif et cohérent de recherche et d'étude des planètes extrasolaires avec cet instrument. Ce *Consortium Exoplanètes SOPHIE* vise à la fois à apporter des contraintes sur les processus de formation planétaire et à caractériser physiquement ces astres. Il aborde notamment les points suivants : déterminer la fonction de masse des exoplanètes, élargir l'échantillon d'exoplanètes connues afin de déterminer leurs propriétés statistiques et contraindre leurs modèles de formation et d'évolution, détecter des exoplanètes autour d'étoiles proches et brillantes permettant un suivi sol et spatial, étudier la relation entre les exoplanètes et les propriétés physico-chimiques de leur étoile, étudier les exoplanètes en transit (mesures d'obliquité par effet Rossiter-McLaughlin et suivi à long terme).

Le Consortium Exoplanètes SOPHIE réunit une vingtaine de chercheurs de six instituts (IAP, OHP, LAM, IPAG, Genève, Porto). Il est organisé autour de cinq sous-programmes, chacun visant une population particulière de planètes et d'étoiles hôtes, et un mode donné d'utilisation de SOPHIE :

- sous-programme 1 : haute précision pour la recherche de super-terres ;
- sous-programme 2 : précision modérée pour la recherche et l'étude des planètes géantes ;
- sous-programme 3 : planètes autour des étoiles de type naines M ;
- sous-programme 4 : planètes autour des étoiles de type précoce ;

- sous-programme 5 : recherche des planètes à longue période, en utilisant la base de données disponible depuis 1994 (avec ELODIE, prédécesseur de SOPHIE).

Rassembler ces cinq sous-programmes permet d'optimiser la répartition du temps de télescope et de mettre en commun les expertises et compétences des membres du consortium en favorisant les synergies. Dans son ensemble, ce programme dispose de 130 à 180 nuits par an avec SOPHIE. Ce volume important permet également aux membres du Consortium d'avoir une bonne connaissance de l'instrument et d'optimiser son suivi et ses opérations.

Ce consortium comprend plusieurs membres de l'équipe à l'IAP : F. Bouchy (qui le dirige), G. Hébrard (responsable de l'un de ses sous-programmes), A. Vidal-Madjar (membre du consortium jusqu'en 2010), Rodrigo Diaz (postdoc de 2009 à 2011), Isabelle Boisse (thèse soutenue en 2010). A. Lecavelier collabore également à certains programmes effectués par le consortium. Les données sont réduites à l'IAP et chargées dans une base de données, mise en place à l'IAP avec le soutien de son service informatique. Elle permet aux responsables des différents sous-programmes d'avoir un accès direct aux données et d'effectuer sur la machine dédiée des traitements particuliers et des analyses. Ce projet est soutenu par des financements alloués à l'IAP par l'ANR et le Programme National de Planétologie (INSU).

Plus d'une quinzaine d'articles ont été publiés par le Consortium dans des revues à comité de lecteurs depuis le début des observations. Des membres de l'IAP sont très impliqués dans la totalité de ces publications, et ils en signent en premier auteur la majorité d'entre elles.

Parmi les résultats déjà obtenus, on peut citer des détections de nouvelles planètes (e.g. Bouchy et al. 2009, Hébrard et al. 2010, Boisse et al. 2010, Diaz et al. 2011, Boisse et al. 2012), l'étude de l'activité stellaire de l'étoile à planète HD189733 (Boisse et al. 2009), ou l'observation de la lumière transmise par l'atmosphère terrestre lors d'une éclipse de Lune, simulant l'observation d'une hypothétique future exo-terre en transit (Vidal-Madjar et al. 2010). L'un des résultats les plus marquants est probablement la découverte des deux premiers cas d'obliquités non-nulles pour des systèmes exoplanétaires (Hébrard et al. 2008, Moutou et al. 2009, Hébrard et al. 2010), qui remettent en cause les modèles standards de formation des planètes géantes par migration dans les disques circumstellaires.

Prévu pour s'étendre sur une durée de 10 ans, le Consortium Exoplanètes SOPHIE doit poursuivre ses activités au moins jusqu'en 2016. Il va notamment profiter des améliorations très significatives apportées en 2011 à SOPHIE, qui lui permettent à présent d'avoir accès au domaine des planètes de petites masses. À terme, l'expérience acquise sera réinvestie dans l'exploitation de l'instrument SPIRou, spectropolarimètre infrarouge programmé pour 2015 au CFHT.

## 7.3 Autres projets

### 7.3.1 INSPIRE

Le projet spatial INSPIRE de spectro-polarimétrie UV est un projet de fusée sonde financé conjointement par le CNES et la NASA dans le but de mieux définir la structure du milieu interplanétaire et de mesurer le champ magnétique à la surface de Jupiter. C'est aussi un projet exploratoire pour tester dans l'espace des instruments de pointe dans le domaine de l'interférométrie - polarimétrie UV, instruments qui pourraient servir dans les projets futurs de la NASA.

La partie française regroupe Lotfi Ben Jaffel (IAP, responsable), Véronique Bommier (Meudon), et Frédéric E. Vincent (IAP et UC-Davis). Le groupe s'occupe du suivi de production des réseaux holographiques par l'industriel Jobin Yvon, et de la construction respectivement d'un code de transfert radiatif pour l'interprétation des données, et d'un code cinétique simulant l'interaction du vent solaire avec la magnétosphère de Jupiter. Le groupe américain est constitué d'une dizaine de personnes dans les universités de Californie (Davis) et du Wisconsin (Madison). Elle s'occupe de la conception et du développement de l'instrument HYPE (*Hydrogen Polarimetric Explorer*), ainsi que de la construction et du vol de la fusée suborbitale. Frédéric E. Vincent, un étudiant de l'UPMC, a obtenu une bourse à l'UC Davis en 2007 et vient de soutenir sa thèse sur le projet Inspire. Il continue sa participation au développement instrumental à UC Davis en préparation du prochain vol fusée.

---

L'industriel Jobin Yvon a fourni un premier réseau holographique en 2007. Malheureusement, l'efficacité du réseau mesurée par deux équipes indépendantes a montré une anomalie qui n'était pas prévue par l'industriel. Il a fallu caractériser l'anomalie, en chercher l'origine, et enfin la corriger. Ce processus a duré trois ans, occasionnant un retard inévitable sur le vol fusée (Vincent et al. 2011a). Si on rajoute le fait que le site de lancement fusée à la NASA est en cours de restructuration, il est difficile de prévoir un vol avant le mois de mars 2012.

Le projet dispose d'un parc informatique comprenant : un serveur de calcul de 48 cœurs avec 128Go de Ram et 10 Téra octets (To) de stockage, une baie IBM de 6 Téra de stockage, un serveur de calcul bi-dual cœurs AMD avec 16 Go de Ram et 6 To de stockage. Ce parc est le fer de lance des simulations numériques : PIC 3D des magnétosphères planétaires et MHD 3D de l'interaction vent solaire-vent interstellaire menées par le groupe (projet ESINPLE). Le groupe a publié 9 articles de rang A et plusieurs communications. On peut résumer le bilan du groupe français sur 4 pôles :

- Proposition de l'effet Hanle pour la première fois en planétologie pour mesurer le champ magnétique de Jupiter à sa surface (Ben-Jaffel et al. 2005, 2007).
- Détection d'une anomalie dans l'efficacité des réseaux holographiques qui dépend de l'incidence de la lumière, une information importante pour les différentes applications de l'interférométrie UV dans l'avenir (Vincent et al. 2011b).
- Construction d'un code de simulation particules PIC 3D électromagnétique et relativiste (Baraka et Ben-Jaffel, 2007, 2011).
- Simulations MHD 3D d'envergure qui ont permis de mesurer le champ magnétique interstellaire au voisinage du système solaire, offrant ainsi une meilleure base théorique pour l'étude du milieu interplanétaire (Ratkiewicz, Ben-Jaffel et Grugroczuk, 2008, Strumik et al. 2011).

La partie française a donc rempli son rôle en fournissant le hardware et les logiciels requis. Néanmoins, avec l'incertitude sur la disponibilité du site de lancement aux USA, nous avons demandé la suspension temporaire de la participation française en attendant que le groupe américain soit en position de lancer sa première fusée. Cette solution, validée par le CNES, permet à l'équipe US l'usage des réseaux holographiques tout en laissant une porte ouverte d'une participation française future dans l'analyse des données si un vol en fusée a lieu.

Enfin, un projet de microsatellite pour cartographier le ciel dans la raie *Lyman  $\alpha$*  à très haute résolution est en préparation pour une demande de financement CNES en 2013-2014. Le satellite est principalement basé sur l'interféromètre « *Spatial Heterodyne Spectrometer* » (SHS) que le prochain vol INSPIRE devra valider. Le microsatellite permettra de mesurer avec précision la distorsion de l'héliosphère produite aussi bien par le champ magnétique interstellaire que par le vent solaire.

### **7.3.2 PLANET, HOLMES : Recherche de planètes par microlentilles gravitationnelles**

Parmi les différentes techniques de recherche d'exoplanètes, vitesses radiales, transits, imagerie directe, astrométrie, chronométrage de pulsars, le microlensing gravitationnel a une caractéristique unique : il offre un maximum de sensibilité aux planètes situées au-delà de la ligne des glaces jusqu'aux faibles masses. Quinze planètes ont été publiées (ou vont l'être) par cette méthode. Bien que modeste en nombre comparé aux vitesses radiales, le microlensing teste un volume de l'espace des paramètres (séparation/masse) inaccessible à moyen terme aux autres techniques.

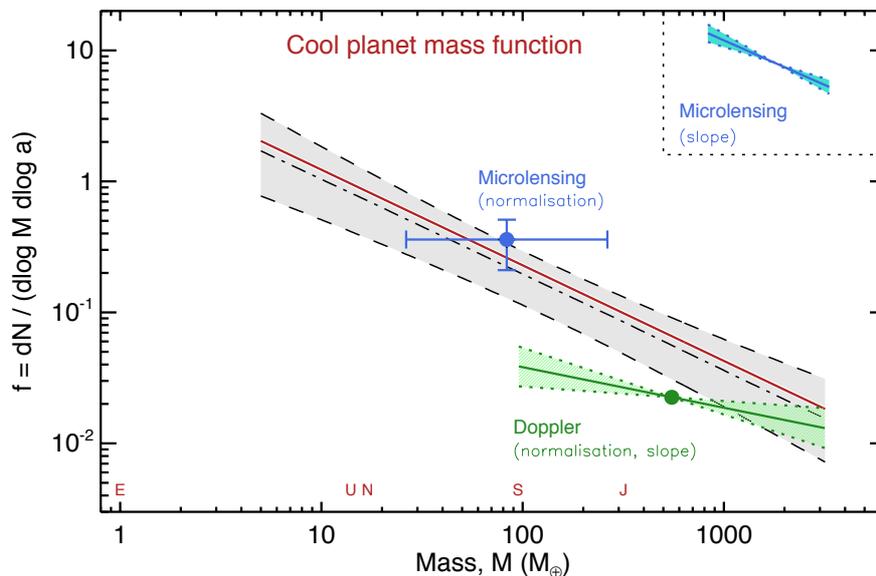
Le groupe de l'IAP pilote la collaboration PLANET (Probing Lensing Anomaly NETwork) depuis 2002. Cette collaboration internationale originellement d'environ 35 personnes de 10 pays dispose d'un réseau mondial de télescopes ayant évolué de 4 à plus de 40 télescopes disponibles sur alertes. PLANET réalise un suivi photométrique de microlentilles avec analyse en temps réel et diffusion des données et modèles en temps réel sur son site web (<http://planet.iap.fr>). Le résultat le plus marquant a été la découverte de la première super Terre froide (Beaulieu et al. 2006). PLANET a été financé par l'ANR HOLMES dans la période 2007-2011. Depuis 2007, la communauté microlensing a évolué d'un

ensemble de groupes de chasseurs de planètes en compétition, pour devenir un consortium mondial (PLANET/uFUN et les télescopes avec caméra grand champ OGLE, MOA et WISE). Les observations sont coordonnées et partagées en temps réel au niveau mondial.

Dans la période 2007-2011, nous avons en moyenne découvert (ou participé à la découverte) d'environ 4 planètes par an. Certaines ne sont pas encore publiées, mais parmi les résultats importants on notera au niveau des détections :

- Découverte de Jupiters massifs en orbite autour d'étoiles de faible masse, en contradiction avec les prédictions des scénarios de formation des systèmes planétaires par accréation de cœur (Dong et al. 2009, Batista et al. 2011).
- Une saturne en orbite autour d'une étoile située dans le bulbe de notre Galaxie (Janczak et al. 2010).
- Une planète de 3.2 masses terrestres en orbite autour d'une étoile de 0,08 Msol (Bennett et al. 2008, Kubas et al. 2010).
- Des Neptunes froides (Sumi et al. 2010, Miyake et al. 2011, Muraki et al. 2011). Muraki et al. (2011) a observé simultanément la microlentille depuis le sol et avec le satellite DEEP IMPACT pour utiliser la parallaxe Terre-Espace pour contraindre les paramètres physique du système à 10 %.
- un modèle réduit à l'échelle 1/2, de notre système solaire comportant une étoile de 0,5 M<sub>⊙</sub> et deux géantes gazeuses (Gaudi et al. 2008, Bennett et al. 2010).
- Détection d'une planète Saturne (Bachelet et al. 2012, en préparation), avec contribution du télescope ASTEP basé en Antartique au DOME C.

Une des grandes forces de la méthode est son approche statistique. En effet, Batista et al. (2009) ont montré que l'efficacité de détection de la méthode s'étend jusqu'à 1 Terre sous des conditions favorables. Une première mesure de la fréquence des géantes gazeuses au-delà de la ligne des glaces donne une fréquence à peu près 7 fois plus grande que celle donnée par la méthode Doppler. Cette comparaison suggère que la plupart des géantes ne migrent pas loin de leur lieu d'origine (Gould et al. 2010). Cassan et al. (2011) ont montré, pour des orbites de 0,5 à 10 AU, qu'environ 17 % des étoiles ont une planète de masse 0,3-10 Jupiters. Les Neptunes froides (10-30 Mterre) et les super terres (5-10 Mterre) sont encore plus communes, leurs abondances relatives par étoile sont de 52(+22-29) % et 62(+35-37) % respectivement. Ce résultat publié dans la revue Nature, indique qu'avoir une planète (ou plus) est la règle pour les étoiles de notre Galaxie (voir Figure 7.21, Cassan et al. 2011).



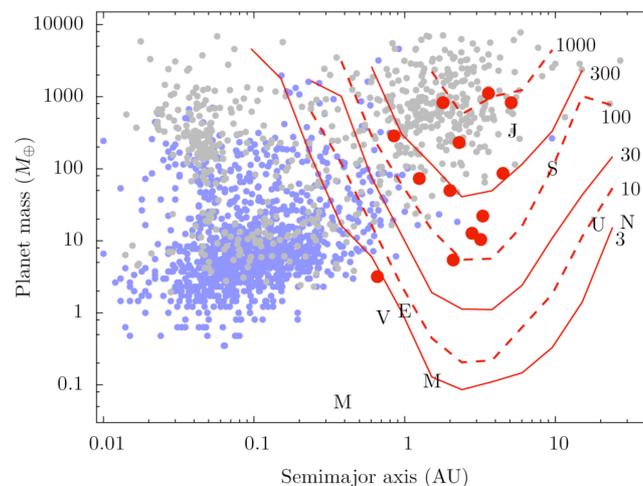
**Figure 7.21.** Fonction de masse des planètes froides sur des orbites de 0,5-10 AU. La bande grise donne la contrainte obtenue par les microlentilles analysées dans cette étude. Le point bleu provient de Gould et al. (2010) à partir des microlentilles de grande amplification seulement, et en vert sont tracées les contraintes par vitesse radiales. Avoir une planète de masse comprise entre 5 Mterre et 10 Mjupiter est la règle pour les étoiles de notre Galaxie.

## Des Terres gelées aux Terres habitables : *Euclid*-MLENS et WFIRST 2012-2020

La prochaine étape est de mesurer les statistiques des Terres froides en utilisant un réseau de télescopes munis de caméras grand champ (2012-2018). Au niveau IAP, nous allons continuer notre investissement dans cette phase, en participant activement avec deux télescopes grand champ en Australie, opérant conjointement avec ceux de OGLE (Chili), WISE (Israël), MOA (Nouvelle Zélande), aidant au déploiement d'un site en Afrique du sud/Namibie.

L'objectif ultime sera de détecter des planètes froides de masse martienne, puis enfin des planètes de masse terrestre habitables, en réalisant un grand relevé en bande H avec un imageur grand champ à bord d'un satellite comme *Euclid* ou WFIRST (Beaulieu et al. 2011, Barry et al. 2011). Un programme de 10 mois à bord d'*Euclid* permettrait de mesurer la fonction de masse jusqu'à la masse de Mars, estimer l'abondance de planètes terrestres habitables et détecter une population de planètes éjectées lors des processus de formation. Penny et al. (2012, en préparation) ont réalisé une simulation détaillée de *Euclid* résumé dans la Figure 7.22.

Les découvertes des planètes extrasolaires et de l'énergie noire comptent parmi les sujets les plus excitants en astrophysique de ces 15 dernières années. Les deux communautés des cosmologistes et des chasseurs de planètes se rejoignent sur les deux grands projets *Euclid* et WFIRST. Le groupe de l'IAP est en charge du programme microlentille à bord d'*Euclid* (actuellement dans la science additionnelle), mais est aussi lié à WFIRST.



**Figure 7.22.** Plan séparation orbitale masse. Les points gris sont les planètes détectées à ce jour, les points bleus les candidats détectés par Kepler et les points rouges les planètes détectées par microlentilles. Les courbes rouges indiquent le nombre de détections pour un Survey de 10 mois avec *Euclid* en faisant l'hypothèse que chaque étoile a une planète à chaque point dans le plan demi-grand axe masse.

### 7.3.3 ECHO

**ECHO** (*Exoplanet Characterisation Observatory*) est l'un des quatre projets présélectionnés pour des études complémentaires par l'ESA en vue d'une mission M3 dans le programme COSMIC VISION 2015-2025 (lancement prévu en 2022). Elle sera la première mission dédiée entièrement à l'étude de la physique et de la chimie des atmosphères des exoplanètes. Elle permettra de placer notre système solaire dans un contexte plus général en s'interrogeant sur les conditions d'émergence de la vie sur d'autres planètes.

ECHO permettra de répondre à quelques conditions fondamentales du program ESA COSMIC VISION :

- *Quelles sont les conditions pour la formation des planètes et l'émergence de la vie ?*
- *Les systèmes comme notre système solaire sont ils rares ou très communs ?*

ECHO est un télescope spatial de 1,2 à 1,5 m de diamètre, qui fournira des spectres d'atmosphère de planètes sur une large plage de longueur d'onde (0,5 à 16 microns au mieux), avec une résolution variant de 1000 à 20. Une de ses avantages est d'être un instrument simple, basé sur des technologies existantes, utilisant un refroidissement passif avec pour objectif une très grande stabilité sur une grande période de temps.

Durant un transit primaire, une fraction de la lumière de l'étoile passe par le limbe de l'atmosphère de la planète. Ainsi il est possible de révéler le spectre en transmission de l'atmosphère de la planète. Durant un transit secondaire, une comparaison du flux reçu avant que la planète ne passe derrière son étoile et pendant permet d'observer dans l'infrarouge un spectre en émission du côté jour de la planète, et la lumière réfléchiée dans les domaines optiques. Une observation au cours du cycle orbital de la planète montrera une modulation qui peut être utilisée pour contraindre les gradients thermiques en latitude et la composition des exoplanètes. Ces trois approches permettent d'obtenir des informations complémentaires sur les profils de température et la composition chimique sur 3 décades de pression, la présence / l'opacité / la composition des nuages de l'atmosphère, la dynamique et les variations de températures et de composition. Une spécificité d'ECHO est d'utiliser la résolution temporelle pour extraire le signal planétaire et le résoudre spatialement.

ECHO donnera des contraintes sur la formation des exoplanètes, caractérisera leur climat, étudiera la chimie de leurs atmosphères. Au cours des cinq ans de la mission, un portfolio de 80 exoplanètes de différents types sera observé, des Jupiters chauds aux super terres habitables.

Ce projet regroupe plus d'une centaine de chercheurs de tous pays. Les Français sont en charge de la voie 5-11 microns et une participation forte au segment sol. J.P. Beaulieu est le représentant Français, et le site web d'ECHO est hébergé à l'IAP (Tessenyi et al. 2011, Tinetti et al. 2011).

### 7.3.4 EROS

La collaboration EROS (Expérience de Recherche d'Objets Sombres) dans sa phase 2 (EROS-2) a observé en configuration « champ large » (on a observé des centaines de champs, chacun d'entre eux ayant une surface de 1 degré carré) entre juillet 1996 et mars 2003 dans la direction des Nuages de Magellan et du Centre galactique. La collaboration a pour cela utilisé le télescope MARLY à La Silla, qui avait été rénové pour cette expérience. Le but était de détecter des événements de microlentilles gravitationnelles en vue de mesurer le contenu en matière noire baryonique (les objets sombres, ou MACHOs en anglais) du Halo galactique. EROS-2 a apporté une réponse claire à cette question fondamentale en publiant en 2007 (Tisserand et al. 2007) un article d'analyse détaillée de ces données accumulées durant sept années. Citons l'abstract :

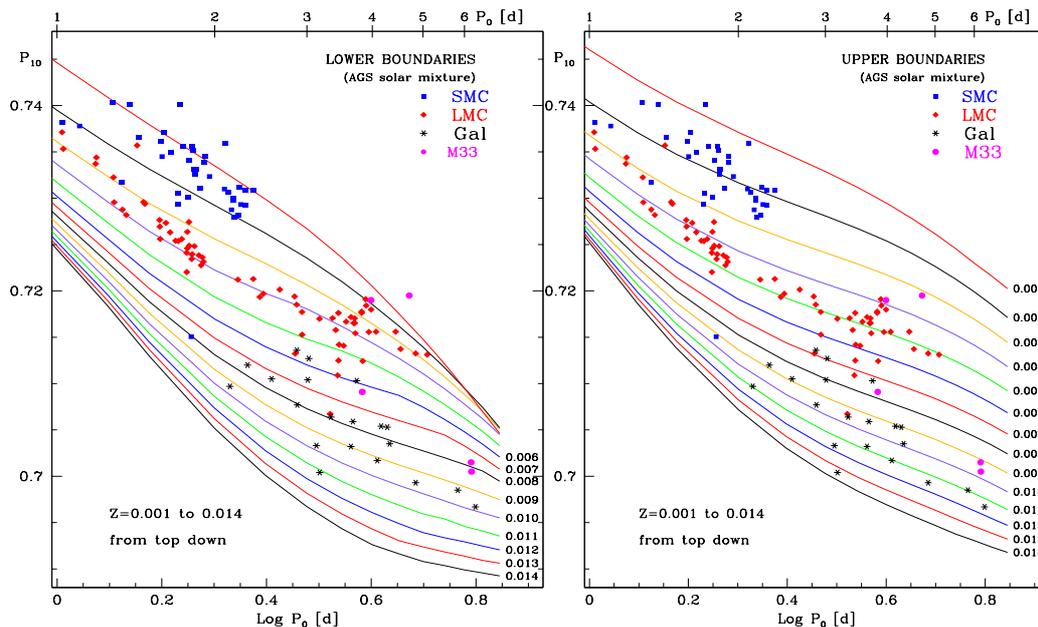
*More generally, machos in the mass range  $0,6 \times 10^{-7} M_{\odot} < M < 15 M_{\odot}$  are ruled out as the primary occupants of the Milky Way Halo.* Ce résultat fondamental a été confirmé tout récemment par la collaboration polonaise concurrente OGLE (*Wyrzykowski et al. MNRAS (2011), 413, 493*). Citons leur analyse : *This is in clear contradiction to a significantly larger number of events claimed by the MACHO collaboration (Alcock et al. 2000, Bennett 2005), but is in agreement with results obtained with the EROS group data (Tisserand et al. 2007).*

Il résulte de ce travail d'analyse un ensemble de données unique qui n'a pas d'équivalent au niveau national, constitué de 87 millions de courbes de lumière stellaires dans deux bandes photométriques larges acquises simultanément durant ces 7 ans d'observation, de catalogues décrivant ces objets, et de 1,55 million d'images scientifiques réparties dans les directions des Nuages de Magellan, du Centre galactique et des Bras spiraux. S'est constitué dès les années 2000 à l'IAP autour de Jean-Baptiste Marquette et Jean-Philippe Beaulieu un groupe élargi à des collaborations internationales pour travailler à la valorisation astrophysique des données EROS-2, rendue possible par l'avènement des systèmes de stockage à très grande capacité. Plusieurs travaux ont ainsi été publiés entre 2007 et 2011. Nous avons analysé l'échantillon complet des courbes de lumière vers le Bulbe galactique (~ 44 millions d'objets) pour y rechercher la signature temporelle d'un type d'objet très rare, les R Coronæ

Borealis (RCB), des supergéantes évoluées riches en carbone. Un échantillon de 14 nouveaux objets a été constitué, portant à 51 le nombre de RCB connues dans la Galaxie (Tisserand et al. 2008). Une étude analogue a été conduite vers le Grand Nuage de Magellan (Tisserand et al. 2009). Les RCB sont typiques d'une phase brève et tardive de l'évolution stellaire. Ces étoiles pourraient être formées par un processus analogue à celui des supernovae de type Ia, d'où leur importance fondamentale pour la compréhension de ces mécanismes.

Notre analyse des données EROS-2 nous a conduits à identifier un objet tout à fait particulier sur le bord Nord du Petit Nuage de Magellan (Marquette et al. 2008). Cette étoile présente localement les caractéristiques temporelles d'une Céphéide de plus de 5 jours de période. Mais sa courbe de lumière présente sur le long terme des variations tout à fait inhabituelles en amplitude comme en magnitude moyenne. De plus, nous avons confirmé un mouvement propre qui indiquerait que cette étoile est un objet d'avant-plan dans la direction du Petit Nuage. Sa nature exacte reste à ce jour à confirmer.

Les données accumulées vers les Nuages de Magellan ont également servi à faire une recherche systématique des Céphéides double mode dans ces galaxies (Marquette et al. 2009). Nous avons identifié un grand nombre d'objets inconnus jusqu'ici, et les populations d'étoiles pulsant sur le mode fondamental et le premier harmonique ont été utilisées pour mesurer la métallicité de ces objets, sur la base de modèles hydrodynamiques développés par Robert Buchler à l'Université de Floride. Il s'agit là d'une méthode tout à fait originale de mesure de métallicité uniquement basée sur les propriétés pulsantes des Céphéides, illustrée par les Figures 7.23 qui montrent les valeurs limites inférieure et supérieure des lignes d'iso-métallicité dans un diagramme de Petersen (rapport des périodes de pulsation harmonique/fondamental en fonction du logarithme de la période du mode fondamental), pour toutes les étoiles connues dans les Nuages de Magellan, la Galaxie, et M33. Nous avons en effet détecté 5 étoiles de ce type dans cette dernière (Beaulieu et al. 2006). On a ainsi la possibilité de cartographier la métallicité stellaire dans ces galaxies.

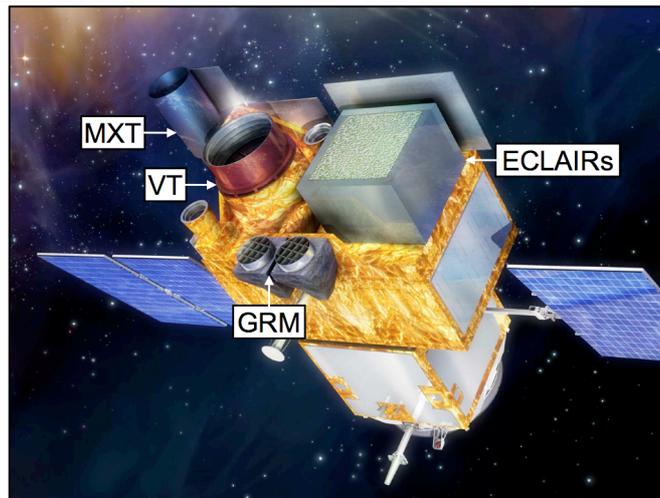


**Figure 7.23 :** diagrammes Petersen composites ( $P_{10} = P_1/P_0$  vs.  $P_0$ ) du FO/F BCs à partir de EROS-2 comparé à d'autres étoiles connues. Les lignes délimitent les périodes pour lesquelles à la fois F et FO sont linéairement instables à un Z donné (limites inférieures et supérieures pour en Z pour  $P_{10}$  and  $P_0$  donnés). La métallicité croît de  $Z = 0,001$  (ligne du haut) à  $0,014$  par paliers de  $0,001$ .

C'est également vers les Nuages de Magellan que les populations de géantes rouges ont été étudiées (Wiśniewski et al. 2011). Grâce à la construction d'un catalogue de plus de 34000 objets une méthode tout à fait inédite a été élaborée. Ainsi, il a été possible de classifier des géantes riches en carbone ou en oxygène, ceci basé sur l'utilisation de la pente de variation photométrique des objets dans le diagramme couleur-magnitude.

### 7.3.5 Le projet SVOM

Le projet de *SVOM*, (*Moniteur Spatial d'Objets Variables*) est un projet franco-chinois (<http://smc.cnes.fr/SVOM/>) dont le programme scientifique principal est l'observation des sursauts gamma et de leurs rémanences (cf. chapitre 4.1.2), dans l'objectif de l'étude de ces phénomènes et de leur utilisation pour la cosmologie. Le projet se compose principalement d'un satellite représenté Figure 7.24 avec un télescope gamma à grand champ pour la détection des sursauts, un instrument gamma qui étend la couverture spectrale au-delà du MeV et plusieurs télescopes destinés au suivi en X et dans le visible pour la détection de la rémanence. Le satellite est complété d'instruments au sol : des caméras grand champ (GWAC) pour la détection de l'émission optique *prompte*, et des télescopes dédiés pour le suivi de la rémanence dans le visible (GFTs). L'un des deux GFT, fourni par la partie française de la collaboration, pourra suivre la rémanence également dans le proche IR, jusqu'en bande J, ce qui est bien adapté aux sursauts les plus distants.



**Figure 7.24. Le satellite SVOM** : SVOM comportera plusieurs instruments : (1) le télescope ECLAIRs pour la détection et la localisation des sursauts. Domaine spectral : 1 à 300 keV ; (2) le moniteur GRM pour l'émission gamma des sursauts entre 50 keV et 5 MeV (4 détecteurs) ; (3) le télescope X MXT pour la détection de l'émission X de la rémanence précoce. Domaine spectral : 0,3 à 7 keV ; (4) Le télescope optique VT pour le suivi de la rémanence précoce dans le visible. Le MXT et le VT sont des télescopes à plus petit champ que ECLAIRs, ils nécessitent un repointage à partir de la position de la source gamma déterminée à bord. Le projet compte également des instruments au sol : (1) un instrument grand champ (GWAC) pour détecter l'émission optique précoce ; (2) deux télescopes robotiques (GFT) de 1m de diamètre, l'un allant jusqu'en bande J, pour suivre la rémanence.

Les principaux objectifs de *SVOM* sont : (1) détecter pendant la durée nominale de la mission au moins 200 sursauts gamma de tous types (longs et courts, riches en X, ...) ; (2) être en mesure de les observer dans le domaine 1 keV - 5 MeV afin de caractériser précisément le spectre du sursaut et son évolution ; (3) observer simultanément (y compris dans les 5 minutes qui précèdent afin de rechercher d'éventuels précurseurs) plus de 25% des sursauts dans le domaine visible (magnitude V limite 15) ; (4) mesurer en moins de 10 secondes la position du sursaut à mieux que 10 minutes d'arc (mieux que 1 minute d'arc dans 50 % des cas) et la transmettre au sol en temps réel de manière à ce que la position soit disponible pour la communauté en moins de 1 minute ; (5) commencer à observer au plus tard 5 min après le sursaut la rémanence dans le visible et le proche infrarouge. Le relais sera pris ensuite par les grands télescopes. La France participe en particulier à l'instrument XSHOOTER qui a été mis en place sur l'un des VLT fin 2008. Le VLT est capable de réagir en mode semi-automatique aux alertes sursauts gamma pour pointer vers la source en environ 15-30 minutes et utiliser cet instrument – spécialement conçu pour la spectroscopie rapide – afin de mesurer le spectre de la rémanence lorsque celle-ci est encore très brillante. L'étape intermédiaire des télescopes robotisés est indispensable pour obtenir une position à la seconde d'arc afin de pointer le très grand télescope. Cette chaîne instrumentale ouvre la possibilité de plusieurs applications cosmologiques à partir de la spectroscopie des absorbants sur la ligne de visée (cf. chapitre 4.5). Les sursauts gamma permettront de repousser les limites en *redshift*, pour se rapprocher de l'époque de la réionisation et des premières étoiles.

---

En France, le projet *SVOM* est piloté par le CNES et les principaux laboratoires impliqués sont le Service d'Astrophysique du CEA, l'Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie à Toulouse, l'Observatoire de Haute Provence, le Laboratoire d'Astrophysique de Marseille, le laboratoire Astroparticules et Cosmologie à Paris, et l'Institut d'Astrophysique de Paris. Le responsable principal (*P.I.*) est Jacques Paul (CEA/IRFU/Sap) et Stéphane Basa (LAM) est *co-P.I.* Le Memorandum d'Entente (MOU) entre la France et la Chine a été signé en octobre 2006 entre le CNES et l'Agence Spatiale Chinoise. Récemment (automne 2011), la responsabilité du projet côté chinois est passée à l'Académie des Sciences. La phase A est terminée depuis janvier 2009 et la phase B devrait commencer au début de l'année 2012, le délai étant dû principalement à la difficulté à trouver un accord entre la Chine et la France sur le choix et le coût de la plateforme du satellite. Ceci a provisoirement ralenti le projet jusqu'à l'automne 2011, même si le développement des instruments et du segment sol a continué. En ce qui concerne la charge utile, la France fournit principalement le télescope ECLAIRs et le télescope MXT en collaboration avec l'université de Leicester. La date de lancement sera au plus tôt en 2015 et ne pourra être fixée qu'une fois la phase B démarrée et le déroulement normal du projet retrouvé (première moitié de 2012).

L'IAP compte trois *co-investigators* du projet *SVOM*, au sein de son équipe COSMOH : *F. Daigne, R. Mochkovitch et P. Petitjean*. *F. Daigne* est aussi l'un des 4 *mission scientists* chargés en particulier d'assister le *P.I.* dans les prises de décision ayant un impact sur le programme scientifique.

Deux ingénieurs informaticiens de l'IAP, *L. Domisse et G. Missonnier* participent au projet.

La première contribution de l'IAP est un soutien scientifique à la mission, présenté au chapitre 4.4.3, qui se traduit principalement par l'élaboration d'un modèle de synthèse de population de sursauts pour l'estimation des taux de détection par *SVOM* et l'optimisation des algorithmes de déclenchement et de la stratégie de suivi. Ce travail s'effectue en collaboration étroite avec les équipes du CEA/IRFU/Sap et de l'IRAP qui conçoivent l'instrument ECLAIRs et l'ordinateur de bord de *SVOM*. L'IAP contribue par ailleurs au développement du *French Science Center (FSC)*, piloté par le CEA/IRFU/Sap, dont le rôle est de recevoir les données, générer les alertes, et produire et archiver les produits scientifiques. L'IAP a contribué principalement à la définition de la stratégie d'alertes, et à la définition des produits scientifiques du programme principal (les sursauts gamma), en particulier ceux de haut niveau qui sont élaborés à partir des données de plusieurs instruments à bord et/ou au sol. Dans la phase suivante, il participera à l'écriture et au codage des algorithmes correspondants dans la chaîne de traitement des données, ainsi qu'à la préparation de la « fenêtrée ouverte sur le monde » de *SVOM*, c'est à dire à l'accès par la communauté scientifique à certaines données sursauts gamma.

### 7.3.6 Projet H2EX : Molecular Hydrogen Explorer

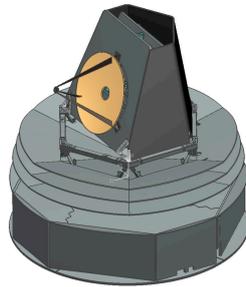
En réponse à l'appel à projets « Cosmic Vision » 2015 – 2025 lancé par l'ESA, la mission H2EX fut proposée comme mission de classe M, avec une participation de la NASA et de l'Agence spatiale canadienne (CSA). Un consortium international de 30 instituts regroupant six pays européens fut constitué autour du projet, les principales responsabilités de définition du programme scientifique, de conception et d'étude de l'instrument étant réparties entre l'Institut d'Astrophysique Spatial et l'IAP, éléments moteur du projet.

Un inventaire du gaz moléculaire tiède ( $\geq 100$  K) dans une large variété de sites constitue le principal objectif de la mission qui propose d'observer sur un grand champ (diamètre 20') et à une résolution pouvant atteindre  $\sim 30000$  à  $10 \mu\text{m}$ , les quatre raies rotationnelles de  $\text{H}_2$ , S(0) à S(3), entre 9,7 et 28,2  $\mu\text{m}$ . Ce domaine est couvert par des détecteurs Si :As 1Kx1K. Avec ce large domaine spectral ces raies peuvent être accessibles à grand  $z$  et des raies atomiques et moléculaires (HD,  $\text{HC}_n\text{N}$ ...) offrent un intérêt scientifique supplémentaire. Le programme scientifique de la mission s'appuie sur sept grands relevés, chacun pouvant couvrir jusqu'à 10 degrés carrés, destinés à une problématique particulière : la formation des galaxies, des étoiles dans l'Univers local, des planètes dans des amas stellaires proches, des molécules complexes dans des nuages moléculaires galactiques.

Pour obtenir ces résultats un Spectromètre de Fourier en mode imageur (Imaging FTS) constitue l'unique instrument focal, alimenté par un télescope infrarouge en C/SiC, de diamètre utile égal à 1,2

---

m. Dans le projet soumis à l'ESA le télescope est afocal et un relai Offner sert de collimateur d'entrée. Dans une étude ultérieure, pour rendre le concept adaptable à un télescope classique, le relai a été remplacé par un miroir de champ asphérique et un miroir collimateur hors-axe donnant une résolution spatiale compatible avec la limite de diffraction du télescope (Maillard et al. 2008).



**Figure 7.25.** Satellite du projet H2EX.

---

La conception du satellite (Figure 7.25) a été basée sur l'héritage de la mission *Planck* en station à L2 pour atteindre le refroidissement passif de la charge utile à 40 K, afin d'être limité seulement par l'émission zodiacale sur la plus grande partie du domaine spectral. Le projet est décrit en détail dans l'article de Boulanger et al. (2009).

La proposition n'a finalement pas été sélectionnée pour une étude en phase A, mais les idées scientifiques demeurent ainsi que le concept de FTS imageur grand champ, repris dans le projet SAFARI pour la mission SPICA qui a franchi la première étape du processus de sélection et dans d'autres projets comme le FTS Imageur SITELLE qui entrera en fonction sur le télescope CFH en 2013.