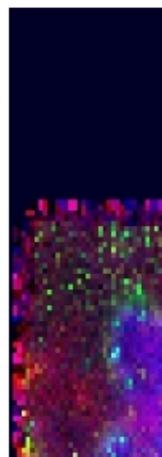
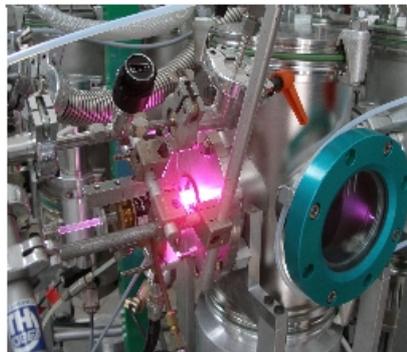
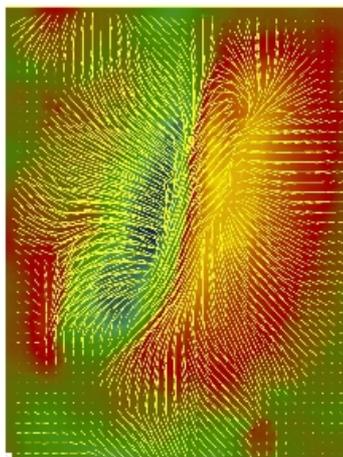
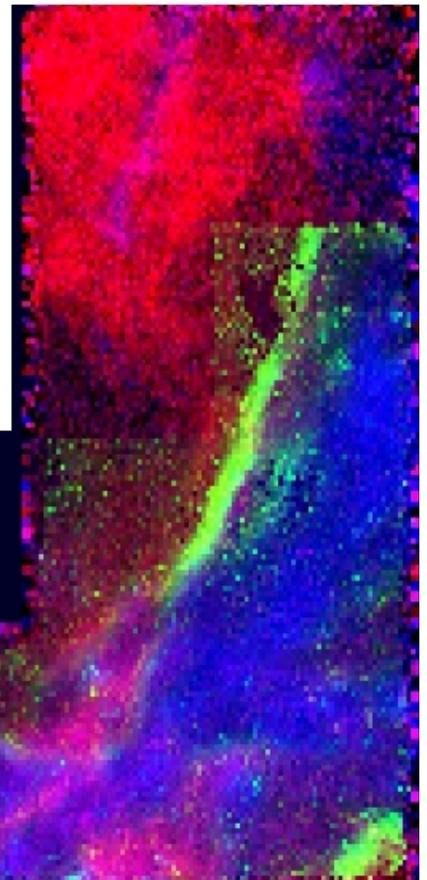


LERMA

Dossier unique - Contractualisation vague D

BILAN 2004-2008

1. Rapport scientifique (version v2.0)

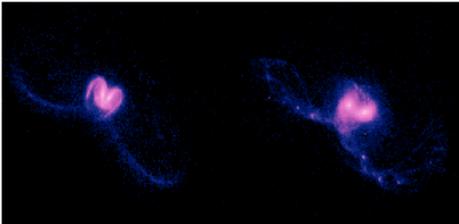


LERMA - UMR 8112



normalesup⁶



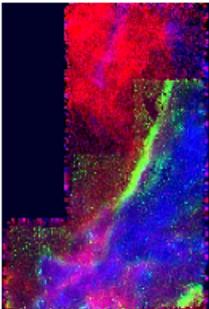


Interactions de galaxies en gravité modifiée: Simulations de la friction dynamique dans la fusion des Antennes avec MOND (à droite) comparée au cas avec matière noire (à gauche) © Tiret & Combes 2008 (Equipe Galaxies et Cosmologie)



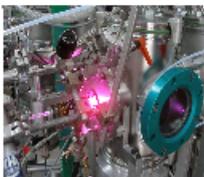
Le satellite Herschel dans la salle d'intégration. L'équipe GEMO du LERMA a construit le canal 1 de l'instrument hétérodyne HIFI, en collaboration avec l'IRAM Grenoble.

© ESA 2008



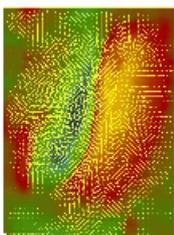
Carte CO d'un nuage diffus observé avec HERA à l'IRAM (1,5 million de spectres). Deux intervalles de vitesse sont montrés (en bleu et rouge) ainsi que les zones de dissipation turbulente maximale (en vert ou rose).

© Hily-Blant & Falgarone 2008 (Equipe Champ magnétique, réactions et accréation).



Source d'hydrogène atomique dans l'expérience FORMOUSM (Université de Cergy-Pontoise)

© Lemaire et al. 2008 (Equipe Interactions gaz/surface et réactivité hétérogène).



Vecteur champ magnétique dans la région active solaire NOAA 10808 (50 000 km de diamètre) déduit par inversion UNNOFIT des observations THEMIS. En tirets: composante transverse. En couleurs: composante longitudinale (rouge-jaune: entrante, vert-bleu: sortante).

© Bommier et al. 2008 (Equipe Atomes, Molécules et Plasmas dans l'Univers)

Structure du document

PARTIE I.

Bilan scientifique.....5

Chap. 1. Rapport scientifique [2004-2008].....13

Chap. 2. Production scientifique [2004-2008].....99

Chap. 3. Enseignement et culture.....239

Chap. 4. Actions en direction des personnels.....247

Chap. 5. Annexe: tableaux de données complémentaires.....259

PARTIE II.

Formulaire tabulé.....275

PARTIE III.

Fiches individuelles.....281

PARTIE I.

Bilan scientifique

Table des matières de la Partie I

PARTIE I.	
Bilan scientifique.....	5
Avant-propos.....	11
Chap. 1. Rapport scientifique [2004-2008].....	13
1. Les missions et l'organisation du LERMA.....	15
2. Résultats en physique atomique et moléculaire.....	19
2.1. Atomes, Molécules et Plasmas dans l'Univers.....	19
2.2. Interactions gaz/surface–réactivité hétérogène.....	30
3. Résultats en dynamique des systèmes astrophysiques.....	37
3.1. Etoiles et environnements circumstellaires.....	37
3.2. Champ magnétique, réactions, accrétion.....	43
3.3. Galaxies et cosmologie.....	51
4. Résultats en gravitation, relativité et univers primordial.....	59
4.1. Gravitation et Relativité.....	59
4.2. Univers primordial et modèle standard de l'Univers.....	63
5. Résultats en instrumentation et télédétection.....	67
5.1. Télédétection des atmosphères et surfaces planétaires.....	67
5.2. Groupe d'étude des micro-ondes (GEMO).....	70
6. Réalisations: outils, instruments et services.....	77
6.1. Instrumentation (sub-)millimétrique.....	77
6.2. Instrumentation logicielle.....	81
6.3. Bases de données et Observatoire virtuel.....	83
6.4. Outils de calcul.....	85
6.5. Services d'observation.....	86
7. Fonctionnement de l'unité.....	89
7.1. Organisation.....	89

7.2. Personnels.....	91
7.3. Budget et répartition des ressources.....	94
7.4. Le LERMA dans le contexte national et international.....	96
Chap. 2. Production scientifique [2004-2008].....	99
1.1. Codes utilisés pour les publications.....	99
1.2. Règles appliquées pour la collecte des publications.....	99
1.3. Statistique des publications	100
2. Articles publiés dans des revues à comité de lecture (ACL).....	101
2.1. Année 2004.....	101
2.2. Année 2005.....	112
2.3. Année 2006.....	124
2.4. Année 2007.....	133
2.5. Année 2008.....	149
3. Actes de colloques (ACT).....	159
3.1. Année 2004.....	159
3.2. Année 2005.....	176
3.3. Année 2006.....	191
3.4. Année 2007.....	207
3.5. Année 2008.....	219
4. Conférences invitées (INV).....	227
5. Livres (OS-OV).....	235
6. Thèses soutenues sur la période 2004-2008 (TH).....	237
Chap. 3. Enseignement et culture.....	239
1. Enseignement et formation par la recherche, information, et culture scientifique et technique.....	241
1.1. Importance de la formation par la recherche dans l'UMR 8112.....	241
1.2. Membres du laboratoire responsables d'une formation LMD.....	242
1.3. Implication des chercheurs CNRS et des ingénieurs de l'unité dans l'enseignement	242
2. Diffusion de l'information et de la culture scientifique et technique.....	245
Chap. 4. Actions en direction des personnels.....	247
1. Formation permanente des personnels.....	249
1.1. Correspondants de formation – rôle :.....	249

1.2. Domaines de formations :.....	250
1.3. Transfert des connaissances :.....	251
2. Hygiène et Sécurité.....	253
2.1. Fonctionnement des structures Hygiène et sécurité du laboratoire.....	253
2.2. Formation du personnel dans le cadre H&S.....	253
2.3. Identification et analyse des risques spécifiques dans l'unité	254
2.4. Identification des problèmes restant à résoudre.....	256
Chap. 5. Annexe: tableaux de données complémentaires.....	259
1. Indicateurs de l'Observatoire: projets et contrats.....	261
2. Bilan des thèses soutenues.....	265
3. Responsabilités exercées, distinctions.....	271

Avant-propos

Ce rapport d'activité, d'un format nouveau, obéit aux instructions publiées pour la contractualisation en vague D 2010-2013. Sur la forme, il doit être concis (rapport scientifique de 60 pages) et léger (4Mo), sur le fond il doit s'intéresser aux mécanismes profonds du laboratoire, à sa structure, son fonctionnement, son efficacité et ses performances.

Le bilan est demandé sur 4 années. Qui ne peuvent pas être celles du contrat en cours (2006-2009), car il s'arrête à l'été 2008. Pour des raisons pratiques (exercice annuel), il a été décidé de commencer ce bilan au début 2004. La période couverte est donc de 4,5 années.

Le plan retenu suit d'assez près les instructions : 5 chapitres principaux (rapport scientifique, publications et valorisation, diffusion des savoirs, formation permanente, hygiène et sécurité. Une annexe inclut quelques tableaux qui ont semblé pertinents pour décrire l'activité du Laboratoire, en complément du formulaire (partie II).

Cet exercice imposé n'a pas été très facile. Le seul exposé des **résultats scientifiques** est difficile à compacter en moins de 60 pages, car chacun a souhaité l'illustrer, et donner un peu plus à comprendre qu'un énoncé épuré. Les autres aspects abordés, moins visibles, moins attendus, ont été traités plus sobrement. Ils n'en sont pas moins importants. Les **réalisations** sont présentées séparément des résultats: elles représentent les productions utiles pour la recherche, mais qui ne sont pas en elles-mêmes des résultats scientifiques: instruments, équipements expérimentaux, logiciels, services scientifiques. La force d'un laboratoire dépend en partie de sa capacité à mobiliser une partie de ses ressources pour construire des outils communs qui serviront sur le long terme. Les **services d'observation** sont un autre volet essentiel du rapport d'activité dans un laboratoire engagé dans la préparation et l'exploitation des grands moyens d'investigation observationnelle.

La contrainte d'une présentation du rapport par équipes ne figurait pas dans les instructions, mais elle est explicite dans le carnet de visite de l'AERES. Contrairement à une croyance répandue, la division d'un laboratoire en équipes n'est pas toujours une évidence. La géométrie du LERMA, implanté sur 5 sites distants, ne simplifie pas cette division : très engagé dans la recherche et dans l'enseignement de physique et d'astrophysique fondamentales, mais aussi laboratoire d'observation, le LERMA suit en effet à la fois une logique de site, une logique thématique, et une logique de projets. Ces 3 approches sont liées, mais elles ne sont pas identiques. La géométrie qui en résulte est multiple, et évolutive.

Le choix qui a été fait pour la présentation du présent bilan est de retenir un ensemble de 9 groupes scientifiques de tailles inégales, présentés sous 4 thèmes principaux. Cette division entérine un état de fait au cours de la période considérée, tel qu'il s'est développé, sous la direction de Jean-Michel Lamarre, pendant les années qui ont suivi la création du LERMA en 2002. Compromis entre les 7 équipes fonctionnelles du laboratoire, réparties sur 5 sites, et les activités et projets, qui croisent les sites.

Le chapitre présentant les résultats scientifiques est rédigé explicitement selon ce découpage. Les autres aspects sont traités globalement pour le laboratoire.

De nombreux rédacteurs ont participé à ce document. Les responsables d'équipes ont été particulièrement sollicités. Je tiens à les remercier de leur patiente coopération. L'homogénéisation et la mise en forme finale ont été réalisées par un petit comité de rédaction que je tiens à remercier tout particulièrement, composé de Sylvie Cabrit, Edith Falgarone, Laurent Pagani et Valérie Audon.

Michel Pérault, directeur du LERMA le 15 octobre 2008 à Paris

Chap. 1. Rapport scientifique [2004-2008]

1. Les missions et l'organisation du LERMA

Le Laboratoire d'Etudes du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique, UMR 8112, dérive d'une double histoire nationale, celle de la physique atomique et moléculaire et celle de la radioastronomie, née après la Guerre à l'initiative de chercheurs du Laboratoire de physique de l'Ecole normale supérieure (ENS). Les deux anciens laboratoires, Atomes et molécules en astrophysique (LAMAP/DAMAP) et Radioastronomie millimétrique (LRM/DEMIRM) ont fusionné en 2002 pour constituer le LERMA. L'école française sur ces deux axes a marqué le dernier demi-siècle : en créant le Programme national de physico-chimie du milieu interstellaire (PCMI), premier programme réellement pluridisciplinaire, et en fondant l'Institut de radioastronomie millimétrique (IRAM) aujourd'hui en première ligne mondiale. Les équipes parisiennes ont beaucoup essaimé au fil des années (à Grenoble et Bordeaux en particulier), mais le LERMA continue à jouer un rôle moteur sur ces thématiques.

C'est aussi un laboratoire très investi dans l'enseignement, pas seulement à l'ENS, dont c'est la vocation première, mais également à l'Université Pierre et Marie Curie (UPMC), à l'Université de Cergy-Pontoise (UCP), à l'Observatoire de Paris (OP), et hors de ses quatre établissements d'implantation.

Si l'on doit identifier, dans l'ensemble des missions de recherche qui incombent à nos laboratoires, celles dont le LERMA est aujourd'hui particulièrement investi, il faut en citer au moins quatre, en forte synergie entre elles, et qui font à nos yeux la force et la spécificité du laboratoire :

- **l'élaboration de modèles dynamiques** des systèmes astrophysiques, des amas de galaxies aux disques protoplanétaires, incluant la microphysique dans des simulations numériques intensives. Le couplage entre microphysique et dynamique à grande échelle dans ces systèmes hors équilibre, est une clé essentielle de la compréhension de leur formation et évolution;
- **la conduite de programmes observationnels d'envergure sur les grands télescopes**, pour contraindre et valider l'approche numérique. Les sondes grande longueur d'onde sont favorisées au LERMA, mais non exclusives (IRAM, CSO, VLT, télescopes spatiaux Hubble et Spitzer, bientôt l'Observatoire Spatial Herschel, Planck, ALMA ...);
- **la recherche et le développement sur les chaînes de détection** des instruments submillimétriques de prochaine génération qui équiperont les télescopes de l'IRAM et d'ALMA, les futurs observatoires dans l'infrarouge lointain (interférométrie spatiale), ainsi que les prochains satellites d'observation de la Terre et des planètes;
- **la recherche en physique atomique et moléculaire**, incluant calculs théoriques et expériences de laboratoire, et conduisant au développement de bases et services de données indispensables pour les diagnostics fins de la spectroscopie.

Pour remplir ces missions, le LERMA s'appuie sur des moyens déployés dans les quatre établissements franciliens qui l'hébergent : moyens expérimentaux à l'UCP et à l'OP, moyens de calcul lourd à l'ENS et à l'OP, bientôt également à l'UPMC, moyens technologiques pour l'instrumentation à l'OP, ainsi que sur un large ensemble de moyens régionaux, nationaux et internationaux (centres et grilles de calcul, plateformes technologiques, moyens lourds

1. Les missions et l'organisation du LERMA

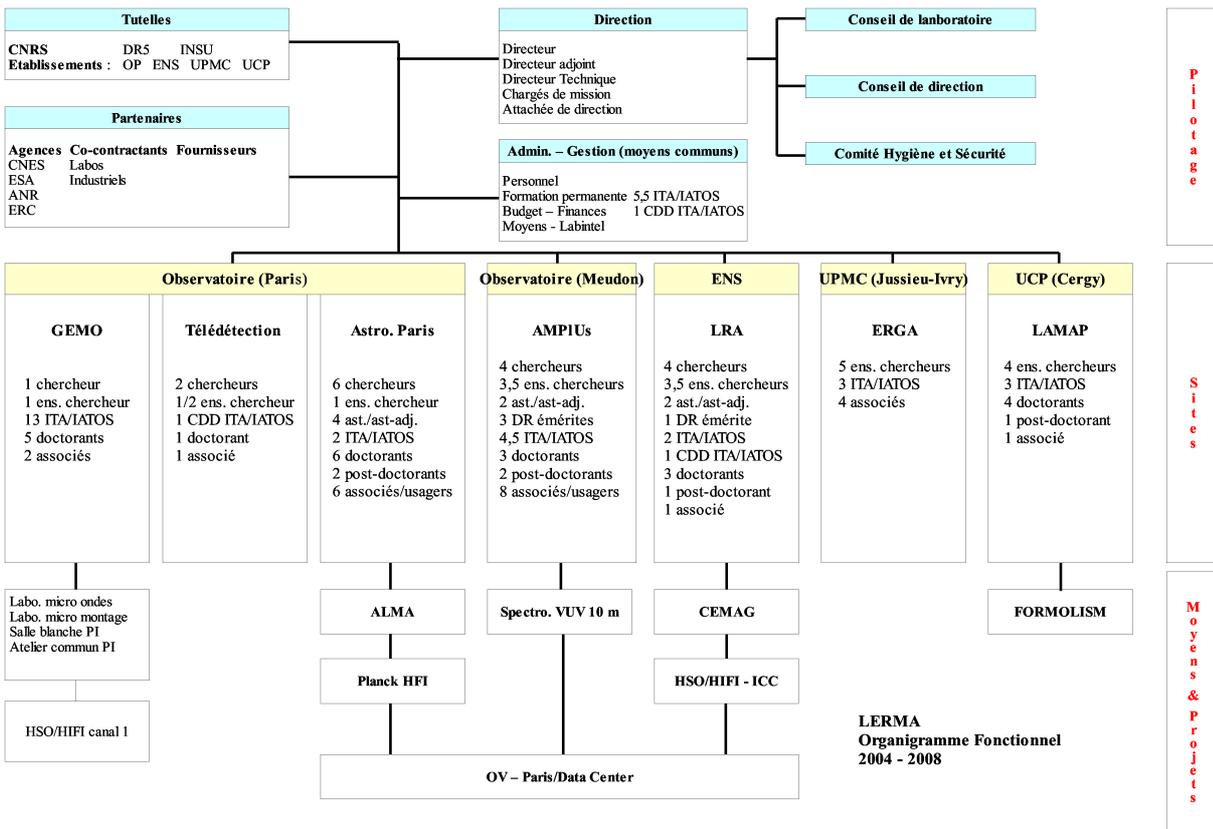


Fig. 1.1: Organigramme fonctionnel du LERMA distinguant la couche pilotage du Laboratoire, les équipes fonctionnelles par site, et les principaux projets et moyens du laboratoire. Effectifs en ETP des seuls personnels statutaires et chercheurs bénévoles associés au 1/10/2008.

**GROUPES THEMATIQUES SCIENTIFIQUES PAR SITES
au 1er octobre 2008**

E1 : Atomes, Molécules, Plasmas dans l'Univers		E6 : Gravitation et relativité	
E2 : Interactions gaz/surface - réactivité hétérogène		E7 : Univers primordial	
E3 : Étoiles et environnements stellaires		E8 : Télé-détection des atmosphères et surfaces planétaires	
E4 : Champ Magnétique, Réactions, Accrétion		E9 : Etudes micro-ondes	
E5 : Galaxies et cosmologie			

Direction		Moyens communs	
Directeur : Michel Pérault DR		A. Gassais TCH	
Directeur adjoint : Laurent Paganini CR		A. Gernont IGE	
Directeur technique : Gérard Beaudin IGR		L. Giroit AI	
Chargée de mission : Sylvie Cabrit Astro		C. Joan IE	
Attachée de direction : Valérie Audon IE		M. Mege CDD	
		D. Zidani IE	

Observatoire (Paris)		Observatoire (Meudon)		ENS (Paris)		UPMC (Jussieu-Ivry)		UCP (Cergy)	
GEMO	Télé-détection	Astro. Paris	AMPIUs	LRA	ERGA	LAMAP			
Resp. : G. Beaudin IGR	Resp. : C. Prigent DR	Resp. : F. Combes Ast	Responsable : C. Stehle DR	Resp. : M. Gerin DR	Responsable : L. Tchang-B PR	Responsable : J.-L. Lemaire PR			
E9 M. Ba-Trung TCH G. Beaudin IGR B. Boussaha IR F. Dauplay IE Y. Delorme IR A. Deschamps IGR A. Feret IE P. Gallie Doc M. Gheudin Associé C. Jung Doc J.-M. Krieg IR P. Landry ASI B. Lecomte AI R. Lefèvre IR M.-C. Lemonnier IE A. Maestrini MCF W. Miao Doc J.-M. Munier Associé L. Polay TCH M. Salez CRI J. Treuttel Doc H. Wang Doc	E8 A. De Lima Doc E. Defier CR P. Encrenaz PR C. Jirenez Maquenedo CDD C. Prigent DR	E3 S. Cabrit Ast M. Heydari-Makayeri Ast T. Le Berre DR J.-F. Lestrade DR Y. Libert Doc D. Panoglou Doc	E1 C. Stehle DR C. Balanca MCF C. Blass TCH V. Bonnier DR M. Busquet ICA N. Champion IGE F. Dayou MCF M.-L. Dubernet-Tuckey Ast M. Fiddelberg Associé N. Feuatrier DREM D. Hoang Binh Associé C. Joann IE S. Leach DREM C.-Y. Lin Post-doc D. Lopes TCH A. Marocchino Doc M. Martinez-Gonzalez Post-doc N. Moreau IGE P. Rostas Associé S. Sahal-Brechot DREM A. Salun de Kerangy Ast-adj A. Spilfeldel CR J. Stepan Doc L. Tchang-Billet PR L. Vincent Doc L. Vb Ky Usager	E4 S. Balbus PR B. Comeron Doc B. Delforge CDD M.-F. Ducos TCH E. Falgarone DR M. Gerin DR B. Godard Doc M. Guélin DREM P. Hennebelle Ast-Adj H. Latter Post-doc P. Lesaffre CR F. Levrier MCF J.-F. Pamis MCF M. Pérault DR J. Pety * Ast-Adj L. Peitdemange Doc J.-F. Rabasse IR	E1 F. Dayou MCF L. Tchang-Billet PR	E2 M. Accola Doc H. Chaabouni MCF M. Chehrouri Doc V. Cobut MCF E. Congiu Post-doc S. Diana IGE F. Dulieu MCF F. Lachèvre TCH J.-L. Lemaire PR E. Matar Doc H. Mokrane Doc E. Somson ASI G. Testor Associé			
		E5 S. Baek Doc F. Boone Ast-Adj M. Caillat IGR A. Catalano Doc I. Chilingarian Post-doc F. Combes Ast A. Coulais IR J.-M. Lamare DR J. Lequeux Associé B. H. Müller Doc C. Mastropietro Post-doc A.-L. Melchior MCF G. Recouvreur Usager B. Semelin MCF M. Signore Associé F. Vaillafond DR A. Zonca Doc	E2 A. Moneni MCF	* détaché à PIRAM	E4 J.-F. Panis MCF	E5 A.-L. Melchior MCF B. Serrelin MCF	E6 C. Barbachoux PRAG G. Boudesseul TCH F. Debiasch MCF J. Garrel Associé G. Guéron TCH B. Quibal TCH G. Le Denmat Associé G. Marcellhacy Associé		
		E4 L. Paganini CR			E8 P. Encrenaz PR				
		E7 N. Sanchez DR							

Fig. 1.2: Répartition des personnels statutaires (permanents ou non) et des chercheurs bénévoles associés, et répartition des groupes thématiques (codage couleur) sur les 5 sites et dans les 7 équipes fonctionnelles du LERMA au 1/10/2008.

d'observation).

L'histoire et la géographie ont beaucoup influencé la structure et le fonctionnement du laboratoire : l'implantation sur plusieurs sites distants (5 actuellement, en distinguant OP-Paris et OP-Meudon) a dicté un fonctionnement à caractère fortement fédéral, chacun des sites gérant avec une large autonomie vie quotidienne et animation scientifique locales, réseaux de collaboration et partenariats locaux ou distants, moyens techniques, projets et programmes.

Mais l'Unité mixte de recherche garde un sens fort, parce que les grandes missions du Laboratoire sont largement partagées entre les sites. La politique scientifique du LERMA est définie en commun : demandes et répartition des moyens, politique pluriannuelle de recrutement (étudiants, chercheurs, personnels de support), engagement dans des projets, stratégies d'établissements. En support de cette politique commune:

- **organes communs** qui apparaissent sur l'organigramme fonctionnel ci-contre Fig. 1.1 (Conseil de laboratoire, Conseil de direction, Equipe administrative, comités internes : formation permanente, hygiène et sécurité, enseignement, communication);
- **animation commune** (Séminaire du LERMA, Journée d'accueil, Journée des doctorants, journées de prospective, voeux de début d'année, ...).
- **projets et infrastructures partagés**, dans la logique de nos priorités scientifiques : préparation d'Herschel/HIFI et d'ALMA, services de données et Observatoire virtuel, moyens de calcul de l'OP et de l'ENS.

La répartition géographique des neuf groupes thématiques du LERMA (équipes E1 à E9 des tableaux administratifs de la 2^e partie du document) est représentée en couleurs sur la Fig. 1.2, en regard de l'organigramme fonctionnel. La composition de chacun des groupes est rappelée sur la Fig. 1.3.

La cohérence du laboratoire aujourd'hui est construite sur quatre lignes directrices principales :

1. **physique atomique et moléculaire, et expériences** à l'OP/Meudon, Cergy et à l'UPMC (groupes Atomes, Molécules et Plasmas dans l'Univers (AMPIUs) et Interactions gaz/surface et réactivité hétérogène (LAMAP)); champs disciplinaires : CoNRS-4-17, CNU-30-34;
2. **dynamique des systèmes astrophysiques** à l'OP/Paris et l'ENS (groupes Galaxies et Cosmologie; Etoiles et Environnement Stellaire; et Champs Magnétiques, Réactions et Accrétion (MRA)); champ disciplinaire : CoNRS-17, CNU-34;
3. **gravitation, relativité et univers primordial** à l'UPMC et OP/Paris (groupes Relativité et Gravitation en Astrophysique (ERGA) et Univers Primordial); champs disciplinaires : CoNRS-2-17, CNU-29-34;
4. **instrumentation submm et télédétection** à l'OP/Paris (groupes Etude des Micro-Ondes (GEMO) et Télédétection des Atmosphères et Surfaces Planétaires) champs disciplinaires: CoNRS-8-17-19, CNU-63-34-35.

La Fig. 1.3 montre comment les groupes thématiques s'organisent sur ces quatre lignes directrices. La présentation des résultats scientifiques obtenus pendant la période couverte par le présent bilan est articulée en 4 sections correspondant à chacune de ces lignes (sections 2 à 5). Les autres aspects du bilan scientifique du laboratoire (réalisations, services, fonctionnement) seront traités en bloc pour l'ensemble du laboratoire dans les sections 6 et 7.

1. Les missions et l'organisation du LERMA

Physique atomique et moléculaire			
Atomes, Molécules, Plasmas dans l'Univers		Interactions gaz/surface - réactivité hétérogène	
E1 - AMPIUs		E2 - AMAP	
Resp. : C. Stehle DR2 C. Balanca MCF C. Blaess TCH V. Bomnier DR2 M. Busquet ICA N. Champion IGE F. Dayou MCF M.-L. Dubernet-Tuckey Ast M. Eidelsberg Associée N. Feautrier DREM D. Hoang Binh Associé C. Joan IE S. Leach DREM C-Y Lin Post-doc D. Lopes TCH A. Marocchino Doc M. Martinez-Gonzalez Post-doc N. Moreau IGE F. Rostas Associé S. Sahal-Brechot DREM A. Salaun de Kertanguy Ast-adj A. Spielfiedel CR1 J. Stepan Doc L. Tchang-Brillet PR1 L. Vincent Doc L. Vo Ky Usager	Resp. : J.-L. Lemaire PREX M. Accola Doc H. Chaabouni MCF M. Chehrouri Doc V. Cobut MCF E. Congiu Post-doc S. Diana IGE F. Dulieu MCF F. Lachevre TCH E. Matar Doc H. Mokrane Doc A. Momeni MCF E. Somson ASI G. Testor Associé		

Dynamique des systèmes astrophysiques					
Étoiles et environnement circumstellaire		Champ Magnétique, Réactions, Accrétion		Galaxies et cosmologie	
E3		E4 - MRA		E5	
Resp. : M. Heydari-Malayeri Ast S. Cabrit Ast T. Le Berre DR2 J.-F. Lestrade DR2 Y. Libert Doc D. Panoglou Doc	Ast Ast DR2 DR2 Doc Doc	Resp. : M. Gerin DR2 S. Balbus PR1 B. Commerçon Doc B. Delforge CDD M.-F. Ducos TCH E. Falgarone DR1 B. Godard Doc M. Guélin DREM P. Hennebelle Ast-Adj H. Latter Post-doc P. Lesaffre CR2 F. Levrier MCF L. Paganì CR1 J.-F. Panis MCF M. Pérault DR2 J. Pety Ast-Adj L. Petitdemange Doc J.-F. Rabasse IR	DR2 PR1 Doc CDD TCH DR1 Doc DREM Ast-Adj Post-doc CR2 MCF CR1 MCF DR2 Ast-Adj Doc IR	Resp. : F. Combes Ast S. Back Doc F. Boone Ast-Adj M. Caillat IGR A. Catalano Doc I. Chilingarian Post-doc A. Coulais IR J.-M. Lamare DR1 J. Lequeux Associé B. L'Huillier Doc C. Mastropietro Post-doc A.-L. Melchior MCF G. Recouvreur Usager B. Semelin MCF M. Signore Associée F. Vallefond DR2 A. Zonca Doc	Ast Doc Ast-Adj IGR Doc Post-doc IR DR1 Associé Doc Post-doc MCF Usager MCF Associée DR2 Doc

Gravitation, relativité, Univers primordial			
Gravitation et relativité		Physique de l'univers primordial	
E6 - ERGA		E7	
C. Barbachoux PRAG G. Boudesseul TCH F. Debbasch MCF J. Gariel Associé G. Gauron TCH B. Guibal TCH G. Le Denmat Associé G. Marilhac Associé	TCH MCF Associé TCH TCH Associé Associé	Resp. : N. Sanchez DR2	DR2

Instrumentation et télédétection			
Télédétection des atmosphères et surfaces planétaires		Études micro-ondes	
E8		E9 - GEMO	
Resp. : C. Prigent DR2 A. De Lima Doc E. Defer CR1 P. Encrenaz PREX C. Jimenez Maquenado CDD	DR2 Doc CR1 PREX CDD	Resp. : G. Beaudin IGR M. Ba-Trung TCH F. Boussaha IR F. Dauplay IE Y. Delorme IR A. Deschamps IGR A. Feret IE P. Gellie Doc M. Gheudin Associé C. Jung Doc J.-M. Krieg IR P. Landry ASI B. Lecomte AI R. Lefevre IR M.-C. Lemonnier IE A. Maestrini MCF W. Miao Doc J.-M. Munier Associé L. Pelay TCH M. Salez CR1 J. Treuttel Doc H. Wang Doc	IGR TCH IR IE IR IGR IE Doc Associé Doc IR ASI AI IR IE MCF Doc Associé TCH CR1 Doc Doc

Fig. 1.3 : Composition des 9 groupes thématiques du LERMA au 1/10/2008. Seuls les personnels statutaires du LERMA (permanents ou non) et les chercheurs bénévoles associés à l'OP ou à l'UPMC sont listés.

2. Résultats en physique atomique et moléculaire

2.1. Atomes, Molécules et Plasmas dans l'Univers

Ont contribué aux travaux de l'équipe «Atomes, molécules, plasmas dans l'Univers» entre 2004 et 2008 :

10 chercheurs, enseignants-chercheurs et astronomes : Nicole Allard, Christian Balança, Véronique Bommier, Michel Busquet, Fabrice Dayou, Marie-Lise Dubernet-Tuckey, Amaury Salaun de Kertanguy, Annie Spielfiedel, Chantal Stehlé, Lydia Tchang-Brillet

3 Directeurs de recherche émérites du CNRS : Nicole Feautrier, Sydney Leach, Sylvie Sahal-Bréchet

9 ITA et IATOS (dont 1 CDD) : Christophe Blaess, Norbert Champion, Jean-Louis Chotin, Monique Choucq Bruston, Dominique Jaquin (CDD), Christiane Jouan (50 %), Françoise Launay, Dominique Lopes, Nicolas Moreau

4 post-doctorants : Andrea Ciardi, Jean-Philippe Colombier, Chih-Yuan Lin, Marian Martinez-Gonzalez

2 doctorants dont les thèses sont actuellement en cours : Alberto Marocchino, Lucie Vincent (en co-tutelle Observatoire de Paris/CSIC Madrid)

6 thèses ont été soutenues : Moncef Derouich (2004), Sébastien Leygnac (2004, thèse soutenue au LUTH), François Lique (2006), Fabien Daniel (2007), Mourad Roudjane (2007), Jiri Štěpán (2008 en co-tutelle Observatoire de Paris/Université de Prague)

9 chercheurs associés et usagers de l'Observatoire de Paris : Franck Delahaye, Michèle Eidelsberg, Dy Hoang-Binh, Boutheina Kerkeni, Thierry Lanz, François Rostas, Nguyet Tran Minh, Lan Vo Ky, Jean-François Wyart

Publications pendant la période 2004 à mi-2008:

ACL: 283 (245) articles publiés dans une revue à comité de lecture

ACT: 265 (227) communications avec actes dans un congrès international

INV: 32 (32) conférences invitées dans un congrès international

version française : <http://lerma.obspm.fr/index.php?page=equipes/atomes/publications.php>

version anglaise : <http://lerma.obspm.fr/indexEN.php?page=equipes/atomes/publications.php>

L'équipe AMPlus est l'une des deux équipes scientifiques du LERMA ayant un caractère interdisciplinaire très fort entre l'astrophysique, la physique atomique et moléculaire, la chimie et la physique des plasmas. Son approche consiste d'abord à développer les outils théoriques nécessaires à l'étude des milieux naturels de l'astrophysique. Ce savoir-faire est utilisé dans la mise au point de méthodes d'investigation des milieux astrophysiques. L'équipe hérite d'une tradition ancienne et reconnue nationalement et internationalement dans

2. Résultats en physique atomique et moléculaire

le domaine de la physique atomique et moléculaire : spectroscopie théorique et expérimentale, collisions, profils de raie et redistribution du rayonnement, photophysique, domaines dans lesquels elle a formé de nombreux chercheurs. Elle a évolué depuis plus d'une décade vers la chimie quantique afin de mener l'étude théorique des processus réactifs (ou non) entre les molécules présentes dans le milieu interstellaire (MIS). L'objectif est de contribuer à l'interprétation des observations qui seront faites avec le télescope Herschel et l'interféromètre ALMA. L'interprétation des mesures de polarisation solaire est une tradition de longue date du laboratoire, qui s'est concrétisée par un fort investissement dans l'accompagnement du télescope THEMIS. Les activités de AMPLus se sont élargies récemment à l'astrophysique expérimentale (à haute densité d'énergie) avec l'accueil d'une nouvelle petite équipe en 2007.

L'équipe met à disposition de nombreuses données de physique atomique et moléculaire avec des bases dédiées opérationnelles et en développement. Ces activités de service se sont développées également autour de l'Observatoire Virtuel, motivées par la normalisation des formats des bases de données de physique atomique et moléculaire. Elle bénéficie du soutien de plusieurs programmes nationaux, tels le PCMI, le PNPS et le PNST. Elle est membre des GDR SPECMO et XUV du CNRS, de l'Institut Laser Plasma (ILP). L'équipe s'implique également dans la structuration des activités de plasmas à l'UPMC (Pôle Plasmas). Elle a fortement contribué aux deux réseaux européens Molecular Universe (2004-2008) et JETSET (2005-2008).

2.1.1. Champs magnétique et cinématique du soleil

L'interprétation des mesures de polarisation solaire, en terme de mesure de vecteur champ magnétique ou de vitesse, requiert un solide support théorique qui a été développé au LERMA dans le formalisme de la matrice densité, pour traiter l'ensemble du problème hors-ETL (transfert de rayonnement et équilibre statistique). La thèse récente de Jiri Štěpán en est le dernier exemple. Les mesures de champ magnétique se sont concrétisées avec les observations effectuées par le LERMA au télescope THEMIS, inversées au LERMA également. Deux types de champs sont à l'étude : le champ magnétique des régions actives, dans le but de mieux comprendre et prévoir les éjections de matière, ce qui nécessite aussi l'extrapolation du champ superficiel plus haut dans la Couronne, et le champ magnétique du soleil calme, qu'il faut connaître mieux pour savoir s'il peut être responsable de dynamos locales.

a) Polarisation linéaire des éruptions solaires : transfert du rayonnement polarisé avec polarisation atomique

Il s'agit de la thèse Jiri Štěpán (2005-2008). L'objectif concerne la formation des profils polarisés des raies dans une atmosphère monodimensionnelle en incluant les effets hors ETL multi-niveaux. De nombreux processus ont été pris en compte : effets Zeeman, Paschen-Back, Hanle, polarisation atomique, croisements de niveaux, pompage optique, (dé)polarisation par collisions, couplages multi-niveaux, multi-termes (Štěpán 2007), multi-niveaux avec structure hyperfine. Une technique multigrille non-linéaire (Štěpán 2006) a été développée pour le transfert de rayonnement polarisé. Ces codes de transfert polarisé ont été testés à partir de lois analytiques que nous avons développées (Štěpán & Bommier 2007). Puis, avec ces nouveaux outils numériques, la polarisation par impact de la raie $H\alpha$ de l'hydrogène dans les éruptions a été revue en incluant la décélération des protons énergétiques lors de la traversée de la chromosphère jusqu'à la région de formation de cette raie. Nous montrons qu'il est improbable que les faisceaux de protons soient la source de la polarisation linéaire observée (Štěpán et al. A&A 2007a). Nous montrons aussi que la prise en compte des courants

électriques de retour modifie significativement le profil des raies, leur effet sur la polarisation restant encore à chiffrer (Štěpán et al. A&A 2007b).

b) *Mesure du vecteur champ magnétique solaire par effet Zeeman*

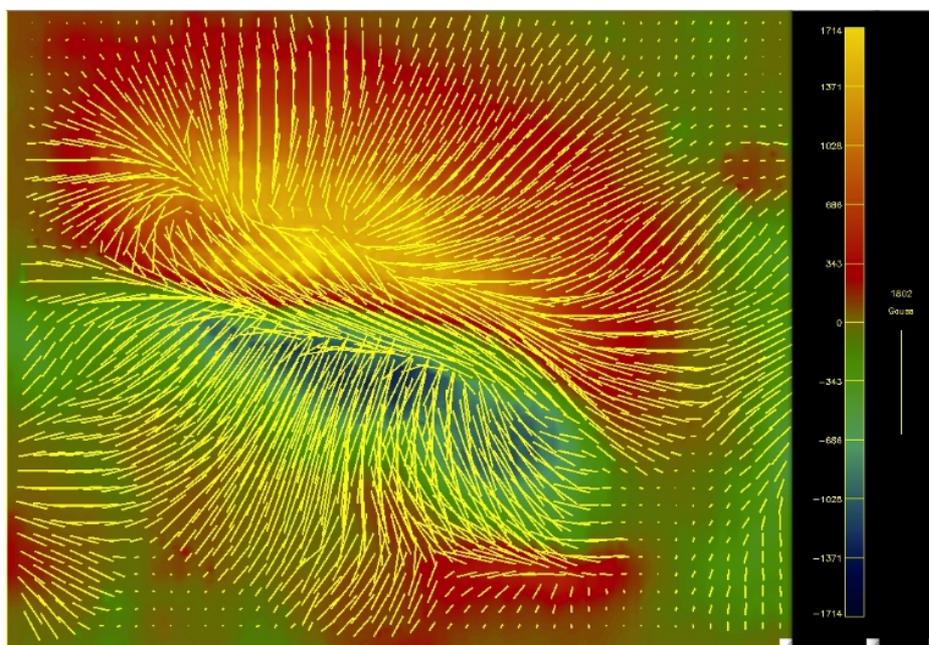


Fig. 2.1.1: Carte de champ magnétique vectoriel de la région active NOAA 10808 observée avec THEMIS le 13 septembre 2005 (inversion UNNOFIT). La couleur de fond montre la composante longitudinale du champ. Les tirets montrent la composante transverse. Après avoir été obtenue par les membres du LERMA (observation et inversion), cette carte a fourni les conditions aux limites pour une extrapolation plus haut dans la Couronne, effectuée par A. Canou, en stage de M2 sous la direction de T. Amari en juin 2008. Taille de l'image: 80x100 arcsec². (58000x73000 km²)

Notre collaboration de longue date avec E. Landi Degl'Innocenti (Université de Florence) nous a permis de disposer du code d'inversion UNNOFIT, qui permet de remonter des données spectropolarimétriques au champ magnétique qui a créé la polarisation observée. Nous avons obtenu nous-mêmes nos données polarimétriques au télescope THEMIS (analyse polarimétrique : Bommier & Rayrole, 2002, Bommier & Molodij 2002, première carte Bommier et al. 2005). La première carte a été inversée avec UNNOFIT ce qui a permis de mettre en évidence deux classes de champ : a) le champ du réseau (>100 Gauss), aux frontières des supergranules, est plutôt vertical ; b) dans l'interréseau, le champ (~20 Gauss) est turbulent (Bommier et al., 2007). Nous avons travaillé à interpréter d'autres observations, concernant en particulier la stabilité des filaments, très liée aux polarités parasites (Rondi et al., 2007, Li et al., 2007, Roudier et al. 2008, Dudik et al., 2008), et à la force du champ du réseau environnant, dont nous avons observé la décroissance avant l'envol d'un filament (Schmieder et al., 2008). Nos codes sont maintenant utilisés par d'autres groupes (BASS2000, P. Mein, B. Schmieder, S. Gosain (Inde)).

2. Résultats en physique atomique et moléculaire

c) Mesure du vecteur champ magnétique solaire par effet Hanle

L'effet Hanle est le moyen privilégié d'accès au champ magnétique faible. L'effet Hanle est observé près du bord solaire, où le rayonnement est polarisé linéairement par diffusion du rayonnement superficiel qui est anisotrope (le spectre de la polarisation linéaire est dénommé "second spectre solaire"). La polarisation linéaire émise résulte de la polarisation atomique créée par l'anisotropie du rayonnement incident, et des effets dépolarisants du champ magnétique et des collisions. L'interprétation des mesures passe donc par le calcul de la polarisation en champ nul, de la dépolarisation collisionnelle et de la dépolarisation magnétique. Nous avons interprété des observations que nous avons faites avec THEMIS d'une des raies les plus polarisées, Sr I 4607 Å. Les taux de collisions dépolarisantes ont été calculés au laboratoire (Derouich et al. 2003a), et nous avons mesuré un champ turbulent de 46 ± 10 Gauss en moyenne (Bommier, Derouich, et al., 2005). D'autre part, nous avons appliqué une technique d'effet Hanle différentiel par comparaison des polarisations de plusieurs raies d'une bande de la molécule MgH, pour déterminer à la fois le champ magnétique et le taux de dépolarisation collisionnelle dans l'état excité, qui échappe aux possibilités actuelles de calcul. Nous avons déterminé un champ turbulent moyen de 29 ± 12 Gauss (Bommier, Landi Degl'Innocenti, Feautrier, Molodij, 2006).

d) Vecteur champ de vitesse dans la Couronne Solaire

La raie de résonance O VI 1032 Å, visible dans la Couronne solaire, est linéairement polarisée par diffusion du rayonnement sous-jacent de la zone de transition. Cette polarisation est modifiée, non seulement par l'effet Hanle, mais aussi par le "Doppler dimming" (décalage Doppler du rayonnement incident), qui est l'effet du champ de vitesse de la matière sur les paramètres de Stokes de la raie diffusée (Sahal-Bréchet et al 1998). Après la thèse de N.E.Raouafi qui a interprété dans un travail pionnier les observations de la polarisation de cette raie vue par SOHO-SUMER en terme de champ magnétique, nous avons discuté les résultats de la méthode d'inversion destinée à la détermination des vecteurs champ de vitesse de la matière en dehors des trous coronaux (Sahal-Bréchet & Raouafi 2006). Ils montrent que cette méthode est adaptée à la basse et moyenne couronne.

e) Méthodes en traitement des données : application de la technique de développement en composantes principales (Principal Component Analysis) pour le débruitage de spectres stellaires

Cette méthode semble très prometteuse, robuste et facile d'emploi. Elle a été testée sur des spectres synthétiques, ce qui a permis de montrer que le rapport signal à bruit est amélioré. L'objectif est la détection du champ magnétique des atmosphères stellaires (Martínez González et al., 2008).

2.1.2. Collisions, opacités et champ magnétique dans les plasmas astrophysiques

Dans cette partie, nous regroupons les activités (théoriques et numériques) en physique atomique pour l'astrophysique, c'est-à-dire dans les conditions de ce laboratoire naturel qu'est l'univers : champ de rayonnement faible, milieu complexe, mélange statistique.

a) Dépolarisation de raies par collisions avec les atomes d'hydrogène neutre

En astrophysique, les collisions dépolarisantes qui doivent être prises en compte pour les modèles de formation et l'interprétation des mesures de raies polarisées, sont celles qui se produisent avec l'élément le plus abondant, l'hydrogène neutre. Ce fut l'objet de la thèse de

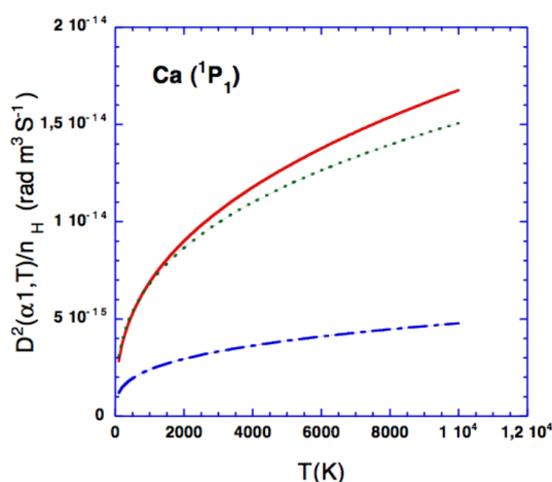


Fig. 2.1.2: Taux de dépolarisation pour $k=2$ par hydrogène atomique, en fonction de T : validation de la méthode semi-classique (trait plein), par comparaison de ses résultats avec ceux du calcul de chimie quantique également effectué au laboratoire (pointillés, Kerkeni 2002). Pour mémoire, le résultat de la théorie de Van der Waals est donné en traits alternés (Figure extraite de Derouich et al., 2003a).

étape (calcul analytique en cours) est de calculer la section efficace de polarisation par impact de cette raie, dans le cadre du modèle semi-classique-perturbation avec un potentiel d'interaction adapté tiré d'un article de Kazantsev.

c) Profils des raies "isolées" élargies par collisions avec les électrons et les ions

Les travaux sur l'élargissement par collisions avec les électrons et les ions sont menés en collaboration avec une équipe de l'université de Bizerte (coopération CNRS-DGRST de Tunisie), ainsi qu'avec M. Dimitrijevic (Observatoire de Belgrade) et ponctuellement avec M. Christova (Université de Sofia, Bulgarie) pour interpréter les expériences de profils de raies de Ar I de Dimitrijevic et al. PhysScr 2007. Dans le cadre d'un coencadrement informel, deux thèses tunisiennes et une thèse bulgare (M. Christova) ont été soutenues, et une thèse tunisienne (Mahmoudi) est en cours. Les résultats passés et en cours enrichissent la base de données STARK-B en cours de validation au laboratoire.

d) Opacité dans les ailes lointaines des raies de l'hydrogène

L'étude de profil de raies de l'hydrogène en collision avec les protons, et les atomes H et He permettant le diagnostic des conditions physiques de plasmas sera poursuivie en relation avec les observations des naines blanches (HST, FUSE). Seul un calcul quantique permet d'évaluer correctement les contributions des transitions lié-libre et libre-libre à toutes les températures. Ce travail bénéficie des calculs ab initio des potentiels interatomiques et des moments de transition effectués au sein du laboratoire.

e) Photodétachement et photoionisation des ions atomiques

Le développement des sources de rayonnement synchrotron (LURE, Aarhus) a permis des études très précises sur la photoionisation et le photodétachement d'atomes et ions lourds, impliquant des excitations de couches internes, mettant en jeu des énergies d'une ou plusieurs

Moncef Derouich soutenue en juin 2004 de développer une théorie semi-classique du calcul des taux de collisions dépolarisantes, à partir des travaux de O'Mara† et coll. sur l'élargissement des raies par l'hydrogène neutre. Un grand nombre de taux de dépolarisation et de transfert de polarisation par collisions avec l'hydrogène neutre ont été calculés (Derouich et al. 2003a, 2003b, 2004a, 2004b, 2005a, 2005b). Ces résultats originaux ont permis d'interpréter en terme de champ magnétique les spectres de raies polarisées linéairement au bord du soleil.

b) Polarisation de la raie rouge des aurores boréales

La polarisation de la raie rouge (raie interdite de O I) des aurores boréales a été récemment mise en évidence et mesurée par J. Liliensten et son équipe qui ont fait appel à nous pour l'interpréter. Cette polarisation serait due à l'impact anisotrope de faisceaux d'électrons dans la haute atmosphère. Notre première

2. Résultats en physique atomique et moléculaire

dizaines d'eV. Le code R-Matrix a été étendu avec la prise en compte explicite de l'interaction spin orbite (Han Xiao-Ying et al. 2007). Des résultats sur la photoionisation de Na ont été obtenus jusqu'à des énergies de 140 eV (Cubaynes et al. 2007), ils ont en particulier montré que l'absorption anormale obtenue expérimentalement vers 9 eV était due à l'ion Na^{2+} (Xiao-Ying Han & al. 2006). Un travail en cours concerne les ions du fer (Fe VI). Ce travail sera étendu prochainement aux ions de moins en moins chargés.

f) *Excitation atomique par collisions électroniques et atomiques, préparation de la mission GAIA*

Collaboration F. Thévenin, Nice, et M. Guitou, Marne-la-Vallée

L'un des objectifs de la mission GAIA est la détermination de paramètres fondamentaux d'étoiles, ce qui nécessite de construire tout un ensemble de modèles 3D, hydrodynamiques avec transfert hors ETL. Etant données les précisions attendues, nous avons démarré un nouveau projet sur le calcul des sections efficaces d'excitation par collisions avec e^- et H d'un certain nombre d'atomes abondants dans les atmosphères stellaires. Il s'agit tout d'abord des alcalins et alcalino-terreux. Les travaux en cours concernent l'excitation électronique de Na et l'excitation par H de Mg. L'élargissement par collision avec H des raies constituant le triplet IR de CaII, raies très fortes présentes dans la fenêtre spectrale (847-874 nm) du spectrographe RVS de GAIA, constitue un deuxième aspect de ce projet en cours.

g) *Participation au projet SPIN (Spectro-Polarimétrie Interférométrique)*

Le projet de Spectro-Polarimétrie Interférométrique a débuté fin 1999. Au sein d'une collaboration avec le LAOG et l'OCA, nous avons participé à la modélisation du signal SPIN (profils polarisés de raies de l'hydrogène, K. Rousselet-Perraut et al., C. Stehlé, 2006). Le concept a été validé en 2006 au GI2T/REGAIN. Actuellement, SPIN, devenu VEGA, est implanté sur CHARA où il donne ses premiers résultats.

2.1.3. Molécules dans l'Univers

Cette activité d'interface s'articule autour de la physique microscopique dans un contexte astrophysique. Notre originalité réside dans le choix des espèces ou des processus, pour la plupart peu étudiés au laboratoire car très complexes ou peu stables. Les sujets abordés nous conduisent à des développements théoriques ou numériques, stimulés par les futures missions Herschel et ALMA qui vont ouvrir de nouvelles fenêtres d'observation dans le domaine millimétrique avec de meilleures résolutions spectrale et spatiale. La préparation de ces missions et de leur exploitation scientifique nécessite l'utilisation de données moléculaires de grande précision dans les codes de transfert radiatif et dans la modélisation des milieux astrophysiques concernés. Dans ce contexte :

- il s'agit, d'une part, de déterminer les constantes de vitesse d'excitation rotationnelle ou ro-vibrationnelle de molécules par collision avec He et H_2 , pour des zones de températures allant des nuages froids jusqu'aux milieux chauds des régions de photodissociation.
- d'autre part, l'étude de la réactivité chimique constitue le deuxième volet de ce projet. Très peu de données fiables existent pour les nombreuses réactions (que ce soit en phase gazeuse ou à la surface des grains) alors que la connaissance de ces réactions est une des clés de la compréhension de l'évolution de la matière interstellaire.

Par ailleurs, notons le fort lien avec l'activité « Spectroscopie et photophysique » et les recherches en exobiologie.

Voici les principaux résultats obtenus

a) Excitation ro-vibrationnelle de molécules : Préparation à Herschel et ALMA

Les résultats récents ont porté sur un certain nombre d'espèces choisies parmi les traceurs des différents milieux étudiés. Les molécules choisies (SO (Lique et al. 2005, 2006a,b, 2007), CS (Lique et al. 2006a,b), SiS (Lique et al. 2007, 2008a,b), SiO (Dayou et al. 2006), N_2H^+ (Daniel et al. 2004, 2005), H_2O (Dubernet et al. 2006, Faure et al. 2007)) sont des traceurs de température et/ou de densité des régions froides (nuages denses froids) ou chaudes (zones de chocs, enveloppes circumstellaires), les perturbateurs sont He et H_2 . En raison de l'importance de H_2O (ortho/para), molécule clé de Herschel/HIFI, des calculs collisionnels d'extrême précision sont menés jusqu'à 1500K pour différents états rotationnels de H_2 ($j=0,1,2,3,4$). Les résultats sur SO et N_2H^+ montrent la nécessité de prendre en compte la structure fine et hyperfine des espèces considérées dans les calculs de collision. Il est d'autre part montré que les taux d'excitation par He et para- H_2 ($j=0$) diffèrent par des facteurs importants (3-10). Ceci est confirmé par les résultats obtenus récemment sur SiS. La modélisation précise des observations de milieux froids, où H_2 est l'espèce dominante, nécessite donc des calculs explicites d'excitation par para et ortho- H_2 (voir figure ci-dessous). Des calculs en cours concernent l'excitation rotationnelle de CN à basse température. Tous les résultats sont mis en ligne dans la base de données moléculaires "Basecol". L'ensemble de ces travaux a fait l'objet de deux thèses soutenues en 2006 (F. Lique) et 2007 (F. Daniel), une thèse en co-tutelle devrait s'achever en 2009.

Des taux de dépolarisation et de transfert de polarisation collisionnelle peuvent être obtenus comme sous-produit de ces calculs d'excitation. Les résultats obtenus pour les collisions CS-He (Lique et al. 2007) montrent que les taux de dépolarisation d'un niveau j donné sont très supérieurs aux taux de transfert entre niveaux. Les travaux en cours concernent la molécule SiO pour laquelle des émissions maser polarisées sont observées.

b) Modélisation

Il est important de connaître l'impact sur les modèles de transfert radiatif des nouveaux taux de collision calculés (Spielfiedel et al. 2007). L'excitation de SO, CS, N_2H^+ et H_2O a été étudiée à l'aide de codes de transfert radiatif non ETL (LVG et Monte Carlo) (Lique et al. 2006, Daniel et al. 2007, 2006, Cernicharo et al. 2006), une étude est en cours sur la modélisation d'observations de SiS. Une certaine sensibilité des résultats par rapport aux taux de collision a été mise en évidence, cependant la précision des observations actuelles ne permet pas toujours de contraindre les paramètres des modèles avec une grande précision. On peut néanmoins s'attendre à des avancées spectaculaires avec les futures observations effectuées avec le satellite Herschel et l'interféromètre ALMA, ce qui justifiera amplement les recherches entreprises sur des données moléculaires de haute qualité.

c) Réactivité chimique

La réactivité chimique conditionne la nature et l'abondance des espèces moléculaires présentes dans le milieu interstellaire. C'est dans ce cadre qu'a été entreprise l'étude de la formation/destruction de molécules silicées, et, plus particulièrement, l'étude de la réaction $Si+O_2 \rightarrow SiO+O$. L'utilisation des méthodes de chimie quantique les plus précises a permis d'identifier les états électroniques susceptibles de contribuer à la réactivité, puis de construire une surface d'énergie potentielle globale. Différentes approches théoriques ont été employées

2. Résultats en physique atomique et moléculaire

pour traiter la dynamique réactionnelle (Fig. 2.1.1) (Dayou et al. 2008). La complémentarité de ces approches a permis d'accéder à un large éventail de grandeurs physiques associées à cette réaction.

Les résultats obtenus ont mis en évidence une forte réactivité pour toute la gamme de températures étudiée (10-300K) (Dayou et al. 2005). Même si l'oxygène moléculaire ne semble pas être une espèce très abondante dans le MIS comme l'ont montré les observations du satellite ODIN (Pagani et al. 2003, Larsson et al. 2007), ces calculs de réactivité sont extrêmement utiles et montrent la précision des différentes approches. Ils seront mis en œuvre pour calculer la réactivité d'autres réactions à basse énergie, comme $\text{Si} + \text{OH}$, un autre mode de formation possible de SiO . L'étude des collisions $\text{O}_2 + \text{O}_2$ montre l'importance des couplages, spin-orbite notamment (Dayou et al. 2004a,b, 2005, 2007, Hernandez-Lamoneda et al. 2005).

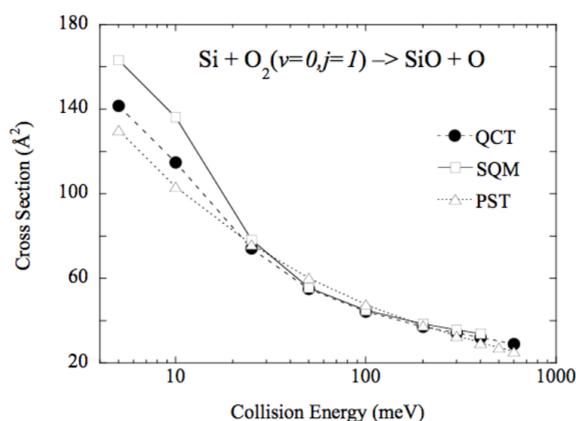


Fig. 2.1.3: Sections efficaces réactionnelles en fonction de l'énergie de collision pour la réaction $\text{Si} + \text{O}_2(v=0, j=1) \rightarrow \text{SiO} + \text{O}$ obtenues à partir d'approches de trajectoires quasi-classiques (QCT), statistique (PST) et mixte quantique/statistique (SQM) de la dynamique.

2.1.4. Spectroscopie VUV et photophysique. Exobiologie

Le domaine ultraviolet du vide (VUV) étudié correspond à celui des observations par HST, FUSE et SOHO. Les études expérimentales des spectres VUV font appel à des techniques complémentaires :

- spectrographe à réseau à haute résolution de Meudon pour études en émission sur un domaine étendu de longueurs d'onde ; mesure précise de longueurs d'onde ($\Delta\lambda/\lambda \sim 3 \cdot 10^{-6}$) sur plaques photographiques, qui conservent pour l'instant une meilleure taille de pixel, et mesure des intensités relatives des raies et des rapports de branchement par écran phosphore photostimulable mis en place en 2007.
- spectroscopie laser à très haute précision ($\Delta\lambda/\lambda \sim 10^{-8}$) dans un intervalle limité de longueurs d'onde au centre européen de laser VUV d'Amsterdam (LCVU).
- mesure en absorption des forces d'oscillateur utilisant le rayonnement synchrotron sur Super-ACO et SOLEIL. La spectroscopie et la photophysique des molécules prébiotiques et biotiques sont étudiées à Aarhus et Berlin.

Voici les principaux résultats obtenus.

a) Spectroscopie VUV d'ions atomiques multichargés

Nous avons entrepris une étude systématique des spectres VUV (700-2800Å) de lanthanides moyennement ionisés utilisant le spectrographe de 10 m de Meudon ($R \sim 150\,000$). Ces spectres très complexes sont intéressants pour diverses applications : atmosphères stellaires, matériaux de lasers solides, information quantique, industrie d'éclairage¹, etc. L'analyse des

¹ On cherche à diminuer la quantité de mercure utilisée dans les lampes à décharge où le mercure est utilisé pour son fort rendement de fluorescence. Une des solutions est d'utiliser des dopants constitués de sels ou oxydes de

spectres de N IV, N V et Tm IV a abouti à l'identification de plus de 2000 raies et la détermination de plus de 450 niveaux d'énergie (Wyart et al 2006, Meftah et al 2007, Wyart et al, 2007, Meftah et al 2008). L'analyse du spectre Eu III a été étendue (Wyart et al 2008a) grâce à de meilleurs calculs de probabilités de transition. Ces nouvelles données sur des configurations du type 4fN ont fourni un test de physique atomique fondamentale : la description des interactions de configurations proposée par B. Judd en 1985 (Wyart et al, 2008b).

Le premier article sur Nd IV, avec 410 téléchargements, a été classé parmi les 30 articles les plus intéressants de 2006 pour la communauté Atomes, molécules et optique par J. Phys. B.

b) Spectroscopie VUV de l'hydrogène moléculaire et de ses isotopologues D₂ et HD

Ces molécules légères présentent un spectre d'émission complexe par suite du chevauchement des différentes bandes. Seule, l'utilisation d'un programme de visualisation des données en grande quantité, développé pour les spectres d'atomes complexes, a permis d'identifier dans un délai raisonnable 80 % des 12 000 raies présentes dans l'intervalle 780-1240 Å. Ces données permettent d'aborder l'étude du spectre de HD produit par une source à décharge Penning où coexistent H₂, D₂ et HD. Nos calculs de niveaux d'énergie et de probabilités de transition utilisant les données ab initio les plus actuelles et tenant compte des couplages entre états électroniques excités ont été également indispensables à l'analyse.

Pour une calibration absolue en longueurs d'onde des spectres, nous avons mesuré des raies de HD et de D₂ à $\Delta\lambda/\lambda=10^{-8}$ par spectroscopie laser XUV au LCVU d'Amsterdam. Les raies de HD et celles de H₂ mesurées auparavant forment une base de référence pour mettre en évidence une possible variation cosmologique du rapport de masse proton-électron $\mu=m_p/m_e$, par comparaison avec des raies d'absorption des quasars à grand décalage vers le rouge. L'ensemble de ces travaux a fait l'objet d'une thèse (M. Roudjane, décembre 2007) et de quatre publications (Roudjane et al, 2006, 2007, 2008), dont une dans Physical Review Letters en 2008 (Ivanov et al, 2008).

c) Photoabsorption de CO

Nous avons obtenu sur Super ACO d'excellents spectres d'absorption des bandes de CO et de ses isotopes ¹³C¹⁶O et ¹³C¹⁸O entre 928 et 1078Å. Ces spectres rotationnellement résolus nous ont permis d'obtenir une série exhaustive des forces d'oscillateurs des bandes de CO utiles pour interpréter les spectres de FUSE (Eidelsberg et al 2004a). Des largeurs de prédissociation de raies ont été obtenues pour chacune des bandes sièges d'interaction Rydberg-valence. Les niveaux d'énergie et les coefficients d'interaction nécessaires à leur obtention ont été déterminés à partir de spectres froids (30K) de jet obtenus au spectrographe de 10m (Eidelsberg et al 2004b). Ces premiers résultats nous ont permis de prévoir le spectre que nous pourrions obtenir avec le spectromètre TF de la ligne DESIRS de SOLEIL.

d) Spectroscopie et photophysique des fullerènes

Les travaux ont pour objectif de comprendre la structure électronique et la spectroscopie de fullerènes pour explorer des applications possibles de leurs propriétés en optique non linéaire et pour des applications aux transferts d'énergie et à la photothérapie².

lanthanides. Pour jouer sur les rendements énergétiques, les couleurs, etc..., l'industrie a besoin de données sur les niveaux d'énergie et les probabilités de transition.

² Dans la thérapie photodynamique appliquée à la destruction de cellules "tumoraux" (en particulier pour le cancer de la peau), on injecte dans la zone sensible du patient une molécule P qui agit comme un

2. Résultats en physique atomique et moléculaire

Les résultats obtenus concernent en particulier :

- Etude des effets de substitution et d'adduits chimiques sur les spectres d'absorption singulet et triplet de fullères (dérivés de pyrrolidine, et azaheterofullères) ainsi que sur les propriétés photophysiques. Applications possibles à la photothérapie.
- Modélisation théorique, par un modèle à électrons en couches sphériques perturbées, de l'effet d'adduits-n ($n = 1$ à 6) sur les spectres électroniques de C_{60} .

e) Spectroscopie et photophysique en exobiologie

réf: Jochims et al. 2005, Leach et al. 2006, Tepfer et al. 2006, Zalar et al. 2007a,b

La spectroscopie, la photophysique et la photochimie des acides aminés et des nucléobases, ainsi que leurs molécules précurseurs, sont d'un grand intérêt du fait que ces composés auraient pu arriver de l'espace et jouer un rôle dans le développement de la vie sur la Terre. Nous avons étudié la détectabilité et la viabilité de molécules organiques en milieu interstellaire ou cométaire, en vue de comprendre leur rôle éventuel dans l'origine de la vie, en particulier :

- les molécules prébiotiques : acide formique, acide acétique, acétonitrile, etc, entre 6 et 23 eV.
- 5 acides aminés et 3 nucléobases en phase gazeuse entre 6 et 25 eV. Les résultats ont montré que les nucléobases sont beaucoup plus photostables que les acides aminés, ce qui pourrait expliquer leur rapport relatif différent dans les comètes et dans les météorites.
- les molécules présentes dans les graines d'*Arabidopsis thaliana* entre 110 et 400 nm. L'étude a identifié celles qui sont capables de protéger l'ADN des graines de plantes des effets nocifs du rayonnement UV et VUV dans l'espace. Des expériences sur la Station Spatiale Internationale sont en cours, en collaboration avec des biologistes, pour tester l'aptitude des graines de plantes à survivre dans l'espace.

2.1.5. Astrophysique stellaire au laboratoire

L'astrophysique de laboratoire à haute densité d'énergie consiste à étudier sur des installations laser ou pinch des processus énergétiques d'intérêt astrophysique. Dans ce domaine, à l'interface entre l'astrophysique et la physique des plasmas denses et chauds, nous nous intéressons aux propriétés des écoulements hypersoniques radiatifs et magnétisés. Ces études, stimulées par le réseau européen RTN JETSET, s'intègrent dans une large collaboration (CEA SAP&DRECAM, IFN Madrid, PALS Prague, Imperial College, Université du Maryland).

a) Jets stellaires

Les étoiles considérées accrètent de la matière à partir d'un disque et éjectent perpendiculairement au plan du disque des jets puissants et collimatés, caractérisés par des nombres de Mach entre 10-20, des angles d'ouverture faibles (quelques degrés), des contrastes de densité de 1-20 par rapport au milieu interstellaire ambiant, et un fort

photosensibilisateur (dans notre cas, un fullerène ou un dérivé fullerénique). Par la suite, on irradie avec des photons qui excitent la molécule P dans un état électronique singulet excité S. Puis, il se produit une conversion intersystème de S vers un état triplet T (métastable) de P. Ensuite, il y a un transfert d'énergie de P(T) vers l'oxygène moléculaire qui se trouve dans les tissus tumoraux. Ce transfert d'énergie vers l'état fondamental (triplet) de O_2 l'excite dans un état singulet excité. L' O_2 singulet est très nocif: il réagit rapidement avec les cellules tumorales pour les mettre hors de fonction.

refroidissement radiatif. Leur origine est mal connue. Les modèles privilégient un scénario magnétique dans la zone disque-étoile, alors que leur propagation, loin de l'étoile et du disque est de nature purement hydrodynamique. Nos études ont porté sur :

- l'étude de différents scénarios de lancement des jets : les expériences sont réalisées à l'Imperial College sur le Pinch MAGPIE (1 MA, 240 ns); la modélisation MHD de « tours magnétiques » produites sur des cibles (faisceaux radiaux) de tungstène a été réalisée dans l'équipe. La reconnexion magnétique conduit à l'explosion de la bulle de plasma formée et à la libération de fragments de jets supersoniques collimatés (300-500 km/s, Mach~ 10) (Ciardi et al., PoP, 2007).
- la production de jets hydrodynamiques respectant les caractéristiques des jets stellaires : les expériences réalisées sur MAGPIE permettent d'obtenir des jets de quelques cm. Des expériences récentes ont permis de créer des jets en rotation, phénomène récemment observé sur les jets stellaires. Les résultats indiquent une profonde modification de la structure du jet, en particulier un évidement du centre du jet (Ampleford et al., APSS 2007). Des jets 2D ($M \sim 10$) ont par ailleurs été produits par B. Rus sur le laser de PALS à Prague. Ces derniers jets sont modélisés à l'aide de GORGON (Ciardi, et al. en prép.).
- l'interaction de jets hydrodynamiques avec le MIS : des expériences, réalisées sur MAGPIE, permettent de simuler la propagation des jets stellaires dans un milieu en mouvement relatif par rapport au jet (mouvement propre de la source, vents stellaires etc...). Ces expériences montrent en particulier la présence de chocs internes. Après mise à l'échelle du MIS, nous avons montré que la collision avec un vent stellaire peut conduire au déclenchement d'instabilités qui brisent le jet. La rotation précédemment mentionnée tend à stabiliser le système (Ciardi et al. ApJ 2008).

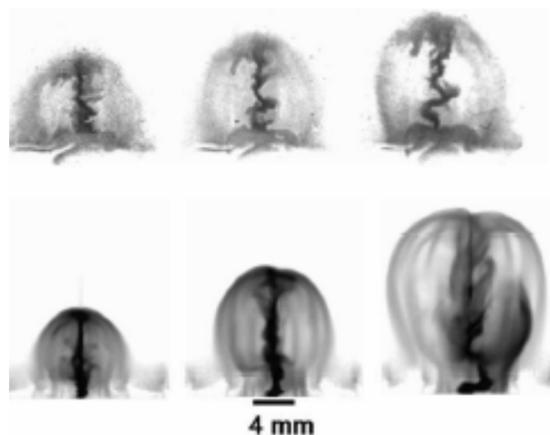


Fig. 2.1.4: Images synthétique (bas) et expérimentale (haut) en X de la tour magnétique à 220, 230 et 240 ns montrant le développement d'un jet supersonique à l'intérieur d'une bulle magnétique réalisée sur Z pinch . Pincé par le champ toroïdal qui règne à l'intérieur de la cavité magnétique, le jet est soumis à des instabilités de courant mais reste toutefois intact. La simulation MHD est réalisée avec GORGON (Ciardi, A et al., arXiv:astro-ph/0611441, Phys. Plasmas 14, 056501, 2007)

b) Chocs radiatifs, chocs d'accrétion

Les chocs forts, structurés par le rayonnement, présentent un précurseur radiatif développé et sont présents en particulier pendant l'accrétion stellaire. Nous avons étudié l'effet de l'ionisation/excitation, de l'énergie et de la pression radiative sur la structure des chocs. Nous avons montré que les effets radiatifs sur la pression sont masqués par les processus d'ionisation/excitation, pour des vitesses inférieures à 1000 km/s pour l'hydrogène et 400 km/s pour le Xénon (Michaut et al. EPJD2004). Après une série d'expériences, débutées en 2000 sur le LULI (Bouquet et al 2004, Koenig et al 2005), nous avons conduit des études sur le laser PALS de Prague (700J, 438nm, 0.35ns) (Gonzalez et al LPB 2006, Busquet et al HEDP 2007). Les chocs produits dans du Xénon à basse pression (~0.1 bar) se situent dans le régime radiatif caractérisé par le développement d'un précurseur étendu. Leur vitesse est de

2. Résultats en physique atomique et moléculaire

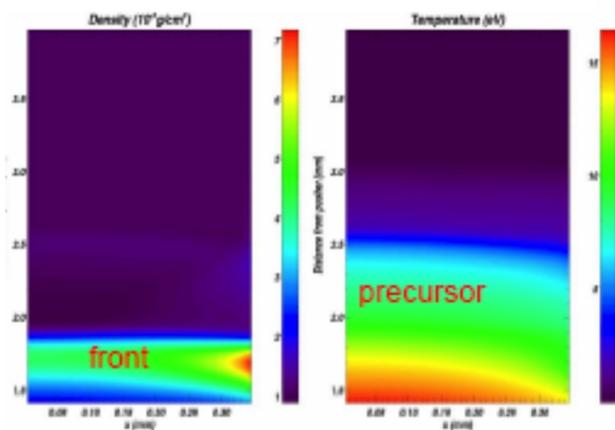


Fig. 2.1.5: Topologie d'un choc radiatif créé dans le xénon à 0.2 bars et se propageant à une vitesse d'environ 60 km/s. L'axe des z est l'axe de symétrie de la cellule. Le choc se propage de bas en haut. Les écarts à la structure 1D sont dus aux pertes radiatives. Le rayonnement issu du front de choc s'échappe en effet partiellement sur les bords et n'est plus disponible pour chauffer le précurseur. Simulation réalisée avec le code 3D hydro-radiatif HERACLES du CEA SAp (Gonzalez et al., *Laser Particle Beams*, 2006)

l'ordre de 60 km/s. Nous avons étudié la cinétique de ces chocs sur des durées plus longues (50 ns) que les expériences menées au LULI (5 ns) et avons mis en évidence l'effet des pertes radiatives par les bords du tube à choc sur la cinétique et la structure du choc. Ces résultats, interprétés grâce au code HERACLES (Gonzalez et al, soumis) ont montré que la luminosité du choc présente une forte anisotropie angulaire, ce dont il faut tenir compte pour les observables liées à l'accrétion stellaire dans des topologies 2/3D.

Développements numériques :

- Nous développons au sein de collaborations un code MHD 2D/3D GORGON et un code 2D hybride GEMINI. En ce qui concerne GORGON, un nouvel algorithme permettant d'utiliser le code sur des machines massivement parallèles a été testé sur le supercalculateur MARENOSTRUM. Le code hybride GEMINI a pour objectif d'étudier des régimes de plasmas partiellement collisionnels en astrophysique et au laboratoire. GEMINI inclut un algorithme de Monte Carlo pour les collisions avec les ions, qui sera étendu au cas des neutres
- La spectroscopie et l'opacité des ions sont des éléments clés pour nos études. Nous avons développé un outil rapide de calcul (OPACS, Michaut et al. EPJD 2004) de données radiatives. Les fonctions de refroidissement fournies par OPACS ont été intégrées dans GORGON. Le code structure atomique relativiste HULLAC, que nous enrichissons, fournit les données spectroscopiques et collisionnelles fines utiles aux études spectroscopiques.

2.2. Interactions gaz/surface–réactivité hétérogène

Ont contribué aux travaux de l'équipe «Interactions gaz/surfaces - Réactivité hétérogène» entre 2004 et 2008 :

6 enseignants-chercheurs : **Henda Chaabouni, Vincent Cobut, François Dulieu, Jean-Hugues Fillion, Jean-Louis Lemaire, Anouchah Momeni**

3 IATOS : **Stéphan Diana, François Lachèvre, Eric Somson**

1 post-doctorant : **Emanuele Congiu**

4 doctorants dont les thèses sont actuellement en cours : **Mario Accola** (cotutelle Université de Catane, Italie), **Mourad Chehrouri** (en co-tutelle Ministère algérien de l'enseignement

supérieur), *Elie Matar, Hakima Mokrane*

4 thèses ont été soutenues : *Saoud Baouche (2004), Gonzague Callejo (2005), Lionel Amiaud (2006), Lars Kristensen (2007)*

1 chercheur associé de l'Observatoire de Paris : *Gérard Testor*

Publications pendant la période 2004 à mi-2008:

ACL: 28 (28) articles publiés dans une revue à comité de lecture

ACT: 54 (54) communications avec actes dans un congrès international

INV: 7 (7) conférences invitées dans un congrès international

2.2.1. Expérience FORMOLISM : Formation d'hydrogène moléculaire et de petites molécules sur des surfaces d'intérêt astrophysique à très basse température.

a) Contexte

La molécule d'hydrogène, par son abondance, est la molécule clé de la chimie interstellaire. H_2 intervient dans tous les réseaux complexes de réactions chimiques entre éléments. L'étude des processus conduisant à sa formation par chimie hétérogène à la surface des grains interstellaires, ainsi que celle de l'excitation de ses niveaux internes d'énergie, est donc du plus grand intérêt pour la communauté astrophysique. Or ces processus de formation souffrent d'un manque crucial de données expérimentales. Notre programme scientifique a commencé à combler cette lacune.

L'expérience FORMOLISM est destinée à l'étude de la formation de molécules à la surface des grains interstellaires (Lemaire et al 2008). Les objectifs que nous nous étions fixés dans les contrats quadriennaux précédents ont été parfaitement remplis. L'expérience semi-lourde FORMOLISM, proposée dans le cadre d'un projet SESAME (Conseil Régional d'Ile de France) et soutenue par l'Observatoire de Paris, l'Université de Cergy-Pontoise et le CNRS/INSU (via le programme national PCMI) a été construite ex nihilo de 2000 à 2004. Complètement opérationnelle fin 2004, ses premiers résultats scientifiques ont été publiés début 2005.

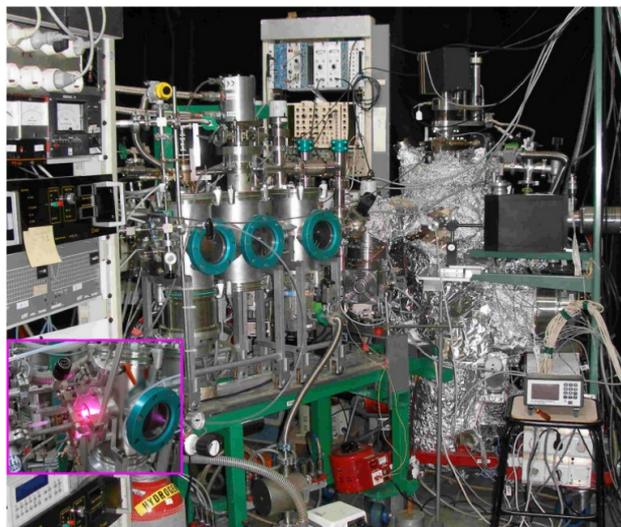


Fig. 2.2.1: Photo de l'expérience FORMOLISM.

Les champs d'investigation ouverts par cette expérience sur les différents analogues de grains interstellaires sont extrêmement vastes. Ce programme continue à se développer en bénéficiant depuis Novembre 2006 d'un nouveau contrat SESAME complété depuis Décembre 2007 d'un contrat ANR, ce dernier en collaboration avec l'équipe de théoriciens du

2. Résultats en physique atomique et moléculaire

LCAM (Orsay).

b) Premiers résultats scientifiques de FORMOLISM

Les mesures effectuées sur des surfaces couvertes d'un manteau de glaces sont, en principe, plus simples à réaliser et à interpréter que celles menées sur des surfaces sèches car la couverture de glace, dès quelques monocouches, estompe les effets des défauts du substrat. Nous avons donc commencé notre programme avec des surfaces couvertes de glaces diverses (H_2O , $CO...$). En comparant nos résultats à ceux obtenus sur une glace d'eau par Roser et al (ApJ 2002 et 2003) et Hornekaer et al (Science 2003), nous avons en quelque sorte calibré notre expérience. La majorité de nos premiers résultats concorde avec les leurs, quelques autres ont jeté des doutes sur certaines des mesures déjà publiées tandis que de nouveaux les complètent sur des aspects négligés ou non observés auparavant. Pour cela, nous avons d'abord acquis la maîtrise des processus thermiques de fabrication de glaces cristallisées comme ceux des glaces poreuses de densité variable. Une autre étape préliminaire a porté sur le diagnostic de spectroscopie TPD (désorption thermique programmée en température). Cette étape a consisté à déposer des molécules H_2 , D_2 ou HD sur des glaces de différentes morphologies et porosités afin de caractériser leur cinétique de désorption. Nous trouvons que les coefficients de collage et les énergies de liaison de ces molécules sur des glaces poreuses dépendent directement de leur taux de remplissage et indirectement de leur épaisseur. Les différences observées entre H_2 , D_2 et HD sont par ailleurs suffisamment importantes pour nous permettre d'interpréter correctement les courbes de TPD obtenues lorsque la surface est exposée aux atomes H et/ou D. Ces mesures permettent de distinguer les deux mécanismes qui régissent la recombinaison des atomes et qui dépendent fortement de la porosité ou de la compacité de la glace.

Nous avons également mesuré la cinétique de désorption de molécules D_2 déposées sur un film mince de glace d'eau amorphe (GEA) poreuse, déposée elle-même à 10K par dépôt lent de vapeur. La désorption de D_2 se produisant entre 10 et 30 K est utilisée ici comme une sonde de la surface effective de la glace interagissant avec le gaz. Les énergies de liaison de D_2 en fonction du taux de couverture de la surface présentent des distributions asymétriques et larges, avec un maximum aux basses énergies. Nous modélisons cette cinétique en supposant à chaque instant un équilibre thermique complet des molécules avec le film de glace et une occupation des sites d'adsorption donnée par une statistique de Fermi-Dirac. Le modèle simule l'ensemble des courbes de TPD pour les différentes couvertures et permet de remonter aux paramètres décrivant la distribution des molécules en fonction de leur énergie de liaison. Cette approche simple conduit à une description quantitative de l'interaction de l'hydrogène moléculaire avec la glace d'eau poreuse (Amiaud et al 2006).

Ce travail a été complété par l'étude des interactions du deutérium atomique et moléculaire avec une surface de GEA non poreuse (Amiaud et al 2007). Selon les circonstances de leur dépôt, ces deux types de glace peuvent coexister à la surface des grains interstellaires à très basse température. On montre que la recombinaison de D atomique se produit par l'intermédiaire d'une réaction rapide qui relâche immédiatement les molécules dans la phase gazeuse. Une partie des molécules ainsi formées sort dans des états vibrationnellement excités du niveau fondamental ($v=1$ à 7). Nous mesurons aussi que l'efficacité de formation augmente avec le nombre de molécules D_2 déjà adsorbées sur la glace, probablement parce qu'elles augmentent le coefficient de collage des atomes. On s'attend à ce que ce phénomène se produise dans le milieu interstellaire (MIS). L'efficacité de formation diminue rapidement quand la température augmente et s'annule au-delà de 13K, ce qui permet d'estimer une limite supérieure de l'énergie d'adsorption des atomes sur la surface ($E_a \sim 29$ meV), en accord avec les calculs précédents.

L'effet du degré de porosité sur les énergies de liaison (gamme d'énergie, position du maximum) a pu être abordé grâce à une meilleure connaissance de la fabrication de différents types de GEA, en particulier la maîtrise de sa porosité (Amiaud et al, soumis). Nous avons observé entre 10 et 35K des effets isotopiques très importants qui n'avaient pas été remarqués précédemment, dans l'adsorption et la désorption de l'hydrogène. Ils mettent en évidence un processus de ségrégation isotopique (Dulieu et al 2005, Amiaud et al 2005) très efficace au profit de la molécule de deutérium sur la glace d'eau amorphe poreuse. Les gammes d'énergie d'adsorption pour différentes couvertures de surface ont été déterminées pour H₂, HD et D₂ (de 25 à 50 meV). Le même modèle statistique, utilisant des distributions d'énergie différentes pour les sites d'adsorption des isotopes en concurrence, rend compte des spectres TPD. Ce mécanisme de ségrégation isotopique joue sûrement un rôle important dans la chimie à la surface des grains interstellaires.

Un autre résultat important a été obtenu, grâce au diagnostic REMPI-TOF, combinant ionisation laser des molécules désorbées (une technique sensible aux états quantiques de la molécule étudiée) et spectrométrie de masse à temps de vol. Ce résultat concerne la différence d'énergie d'adsorption (~1.4 meV) entre les états ortho et para de D₂ adsorbés sur une GEA. Un effet de ségrégation (Amiaud et al 2008) est mis en évidence, au profit de l'espèce ortho-D₂ (J''=1) qui apparaît plus liée au substrat que la variété para. Nos résultats corroborent des calculs théoriques antérieurs. A nouveau ce résultat pourrait avoir de fortes incidences sur la physico-chimie du MIS dans les cœurs préstellaires denses et froids.

Une collaboration a débuté en 2007 entre un membre de notre équipe spécialiste des simulations de type Monte Carlo (SMC) et S. Cazaux (Groningen). En cinétique chimique hétérogène, ce type de simulation est bien adapté pour reproduire l'aspect stochastique de la diffusion des espèces. Dans le cas présent, la chimisorption des atomes est prise en compte. Plus puissante que la physisorption et présentant des barrières d'activation fortes sur les petits grains graphitiques, elle conduit à une différenciation de H, léger, et D plus lourd, vis à vis de l'effet tunnel. Il en résulte des taux de formation beaucoup plus élevés qu'avec la physisorption, de H₂ et HD sur les petits grains dont les surfaces sont de type graphitique, et de D₂ sur les gros grains, dont la surface est amorphe (Cazaux et al 2008, et en prép.). Ces résultats sont à rapprocher de l'enrichissement en deutérium observé en phase gazeuse dans les régions de formation d'étoiles.

Nous nous intéressons aussi à la formation de la molécule d'eau (Dulieu et al, en prép.) qui est observée dans de nombreux environnements astronomiques : comètes, nuages interstellaires denses, disques circumstellaires et régions de formation stellaire... on pense que l'eau originelle ou primitive s'est formée et développée à la surface des grains de poussière couverts de glace, dans les régions les plus froides des nuages interstellaires. Nous avons obtenu la première démonstration expérimentale de la synthèse de l'eau dans des conditions interstellaires, par recombinaison de D et O sur un substrat de glace d'eau à 10 K. Les expériences sont actuellement poursuivies afin de déterminer les voies réactionnelles, et en particulier le rôle des intermédiaires de réaction (H₂O₂, HDO, D₂O, O₃ en particulier). Le substrat d'eau lui-même semble jouer un rôle actif dans la formation des nouvelles molécules d'eau. Ce travail est mené dans le cadre d'une collaboration internationale avec V. Pirronello (It.), un des acteurs pionniers sur ce thème de recherche.

Pour répondre à une critique adressée à la méthode TPD, qui induirait la mobilité et donc la réactivité par activation thermique, nous avons réalisé une expérience qui teste la mobilité à 10K des atomes d'hydrogène sur une GEA poreuse préparée dans des conditions interstellaires (Matar et al, accepté). Cette question est d'importance car l'hydrogénation des espèces adsorbées, comme leur deutération, dépend de la mobilité des atomes H ou D sur la

2. Résultats en physique atomique et moléculaire

glace d'eau. Nous mettons en évidence expérimentalement la mobilité des atomes d'hydrogène sur les surfaces de glace poreuse à 10 K. La méthode est la suivante : des molécules O_2 sont déposées sur un substrat de glace amorphe poreuse, puis des atomes de D y sont déposés, toujours à 10 K. On constate que plus la durée d'exposition aux atomes D est longue, moins la quantité de O_2 qui désorbe ensuite pendant le TPD est grande. On observe donc que les molécules O_2 disparaissent après avoir réagi avec des atomes de D. Nous prouvons ainsi que D est mobile à 10 K sur la surface de glace. Dans ces conditions, l'hydrogénation peut avoir lieu efficacement sur les grains interstellaires. Ces résultats expérimentaux sont en conformité avec la plupart des calculs théoriques et valident l'hypothèse de la mobilité des atomes, utilisée dans les modèles d'astrochimie.

L'ensemble des résultats obtenus sur glaces poreuse et non poreuse nous permet de montrer que, dans les deux cas, l'énergie de formation de la molécule D_2 (4.5 eV) sur une GEA à 10K est piégée dans la matrice lorsque cette glace est préalablement couverte de molécules (Congiu et al, en prép.). La différence avec le cas précédent est la présence de molécules déjà adsorbées sur lesquelles les molécules nouvellement formées se désexcitent.

Une collaboration internationale avec H.J. Fraser (UK) porte sur l'efficacité des échanges isotopiques D/H en phase solide entre des dépôts superposés de glace d'eau et de glace de méthanol (Congiu et al, en prép.). Des expériences TPD sont réalisées avec différentes proportions binaires de glaces de CD_3OD-H_2O et CH_3OH-D_2O . L'étude des spectres TPD entre 120 et 160K correspond à la gamme de températures caractéristiques des comètes et des régions de formation stellaire. Nous montrons que l'échange isotopique entre CD_3OD et H_2O est très efficace avec un rendement $\sim 70\%$.

Enfin, le diagnostic FT-RAIRS (Fourier Transform-Reflection Absorption InfraRed Spectroscopy) sera mis en service sur FORMOLISM fin 2008. Ce dispositif permettra de caractériser la morphologie des glaces d'intérêt astrophysique grâce à leur spectre d'absorption dans les modes de vibration IR, ainsi que les molécules nouvelles formées sur ces surfaces. Il est complémentaire des diagnostics actuels (QMS, TPD et REMPI-TOF).

c) Bilan

L'ensemble des résultats obtenus depuis le début du projet a fait l'objet de 2 thèses (S Baouche fin 2004 et L Amiaud 2006) et de 7 publications dont 2 de synthèse (Amiaud et al, 2005, Lemaire et al, 2008). 3 publications sont soumises, et 3 autres sont pratiquement achevées en Juillet 2008. Une 3ème thèse sera soutenue en 2009. Tous nos travaux sont présentés dans des conférences internationales. Ce thème de recherche est d'une grande actualité et très concurrentiel, et notre équipe est maintenant bien reconnue parmi les quelques acteurs mondiaux travaillant sur ce thème. A preuve le succès de la conférence internationale « Molecules in Space & Laboratory » proposée et organisée par JL Lemaire et F Combes à Paris en Mai 2007 (235 participants, budget de 85 k€).

2.2.2. Observations de régions de formation stellaire galactiques et extragalactiques

a) Contexte Scientifique

L'efficacité de la formation d'étoiles est en moyenne extrêmement faible dans l'univers actuel, et plusieurs scénarios ont été envisagés pour expliquer cette faible efficacité. L'un invoque l'interaction des premières étoiles formées dans le cœur d'un nuage moléculaire avec le reste du gaz dense non effondré, susceptible de former de nouvelles étoiles. L'émission UV

et X de ces jeunes étoiles, et leurs jets bipolaires puissants alimentés par le processus d'accrétion, chauffent, dispersent, ionisent le gaz environnant et le stabilisent ainsi gravitationnellement. Les transitions de vibration de la molécule H_2 sont des traceurs spécifiques des régions de chocs et de photodissociation (PDRs). Nous les avons observées avec la haute résolution spatiale fournie par les systèmes d'optique adaptative (AO) dans deux régions de formation stellaire galactique et extragalactique : le nuage moléculaire d'Orion (OMC1) et les nuages de Magellan (MCs) (Lemaire et al, 2007).

b) Résultats obtenus sur une région galactique : OMC 1

Le nuage moléculaire d'Orion (OMC1) est l'archétype des régions de formation d'étoiles massives. C'est aussi l'une des plus proches de nous (450 pc). Deux mécanismes principaux d'excitation coexistent dans la partie centrale de OMC1 : (1) un champ de rayonnement ultraviolet (UV) intense émanant des étoiles OB du Trapèze, et illuminant des PDRs et (2) différents types de chocs (avec ou sans précurseur magnétique) associés au processus d'accrétion-éjection de la formation stellaire.

L'AO combinée avec la résolution spectrale (obtenue soit avec des filtres à bande étroite soit avec un étalon Fabry-Pérot, disponibles au CFHT avec l'instrument GriF ou à l'ESO-VLT avec NACO-FP), permettent d'observer plusieurs raies d'émission IR de H_2 dans le but de déterminer son excitation et sa distribution spatiale. Dans la période 2005-2008, nous avons (1) caractérisé la morphologie de l'émission H_2 et établi un lien avec la turbulence du milieu (Gustafsson et al 2006a,b,c) ; (2) conduit l'analyse 2D et 3D des structures spatiales et des champs de vitesse à la recherche de l'origine des phénomènes observés (Nissen et al 2007, et en prép) et (3) déduit, à l'aide de modèles de chocs, les caractéristiques physico-chimiques du milieu, notamment par l'analyse du rapport ortho/para des raies de l'hydrogène (Kristensen et al, 2007, 2008, en prép.).

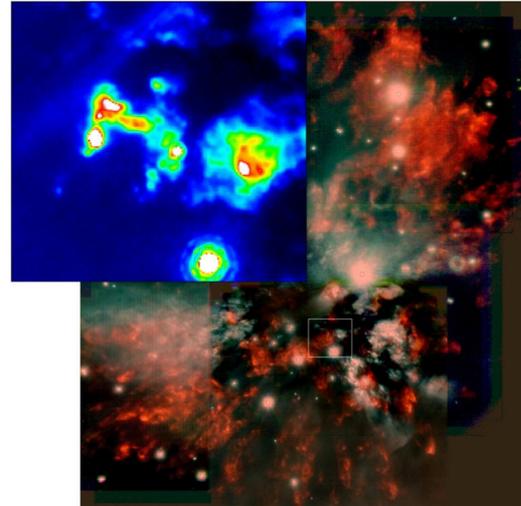


Fig. 2.2.2: OMC1 (NACO VLT-ESO). A droite, trichromie RGB ($2.12\mu\text{m}$ - H_2 - et continus adjacents). En haut à gauche, zoom sur IRc2 et source I en bande L'

c) Résultats obtenus sur une région extragalactique : Nuages de Magellan (MCs)

Les nuages de Magellan (MCs), le grand (LMC) et le petit (SMC) sont riches en régions HII et en associations d'étoiles massives. Le LMC est un laboratoire idéal pour étudier la formation et l'évolution d'étoiles de forte masse dans un environnement à faible métallicité. Ces étoiles jouent un rôle primordial dans l'évolution des galaxies, car leur temps de vie est court et elles enrichissent considérablement le MIS en éléments lourds à la fin de leur vie. Cependant, les scénarios conduisant à la formation de ces étoiles sont peu connus à cause de la rareté et de la rapidité du phénomène. Les MCs offrent une vue d'ensemble fort intéressante des différentes étapes de la formation d'étoiles massives. C'est pourquoi nous y avons observé plusieurs sources, en utilisant la haute résolution spatiale permise par l'optique adaptative (AO) dans l'infrarouge. Nous avons observé quelques HEBs (High Excitation Blobs) qui sont considérés comme l'étape finale des régions HII ultra compactes et caractérisés par une excitation élevée, une faible taille (~ 2 pc), une densité élevée et une grande extinction comparées aux régions HII typiques des MCs. Ces objets sont étroitement

2. Résultats en physique atomique et moléculaire

liés aux premières étapes de la formation d'étoiles massives, quand les étoiles déchirent leurs cocons.

Pour la première fois l'AO a été utilisée pour résoudre des cœurs stellaires dans ces régions HII compactes et ultracompactes fortement obscurcies. Elle a permis de mettre en évidence des amas très jeunes contenant des étoiles excitatrices et d'observer l'émission de H₂ dans leur environnement proche (Testor et al, 2005, 2006, 2007, soumis). Nos résultats concernent N88 et N88A dans le SMC et N159A et N159-5 dans le LMC. D'autres objets sont encore en cours d'analyse.

d) Bilan

Ces travaux ont fait l'objet, depuis 2005, de deux thèses (G Callejo 2005 et L.E. Kristensen 2007), de 11 publications (6 pour OMC1, 4 pour les MCs et 1 de synthèse). Ils ont été régulièrement présentés dans des conférences internationales.

3. Résultats en dynamique des systèmes astrophysiques

3.1. Étoiles et environnements circumstellaires

Ont contribué aux travaux de l'équipe «Étoiles et environnements stellaires» entre 2004 et 2008 :

4 chercheurs et astronomes : Sylvie Cabrit, Mohammad Heydari-Malayeri, Thibaut Le Bertre, Jean-François Lestrade

1 Directeur de recherche émérite du CNRS : Rieu Nguyen Quang

2 doctorants dont les thèses sont actuellement en cours : Yannick Libert, Despina Panoglou (en co-tutelle Paris 6 / Université de Porto)

1 thèse a été soutenue : Frédéric Meynadier (2005)

1 visiteur longue durée : Juan Marcaide

2 chercheurs associés de l'Observatoire de Paris : Vassilis Charmandaris, Guillaume Pineau des Forets

Publications pendant la période 2004 à mi-2008:

ACL: 127 (43) articles publiés dans une revue à comité de lecture

ACT: 150 (55) communications avec actes dans un congrès international

INV: 15 (8) conférences invitées dans un congrès international

Programmes nationaux et internationaux : PCMI, PNPS, ASA, JETSET

L'équipe « Étoiles et environnements circumstellaires » étudie les propriétés des étoiles et de leur milieu circumstellaire (enveloppes, disques, jets, régions HII) à différents stades : étoiles jeunes, séquence principale, et évoluées. L'équipe utilise une approche observationnelle multi-longueurs d'onde du visible au radio cm, en particulier à haute résolution angulaire (HST, VLT, IRAM Plateau de Bure, VLA), couplée à une modélisation du transfert radiatif, de la dynamique, et de la chimie des systèmes considérés. Le but est d'obtenir une meilleure compréhension de l'origine des étoiles massives, du mécanisme de perte de masse à différents stades d'évolution stellaire, de son impact sur la physico-chimie du milieu interstellaire, et de la formation des systèmes planétaires. Les résultats majeurs obtenus au cours des 4 dernières années sont décrits ci-après.

3.1.1. Les étoiles massives les plus jeunes des Nuages de Magellan

M. Heydari-Malayeri, F. Meynadier (doctorant jusqu'en 2005), V. Charmandaris (chercheur associé)

Collaborations internationales : N. Walborn (STSci, Baltimore), R. Barba (U. La Serena, Chili), J. Maiz-Apellaniz (Granade, Espagne), M. Rosa et L. Tacconi-Garman (ESO-ESA,

3. Résultats en dynamique des systèmes astrophysiques

Garching), D. Schaerer (Obs. de Genève), H. Zinnecker (U. Potsdam, Allemagne),
Collaborations nationales : L. Deharveng (Obs. Marseille) , F. Martins (Obs. Montpellier)
PI et coI observations NACO/VLT et HST

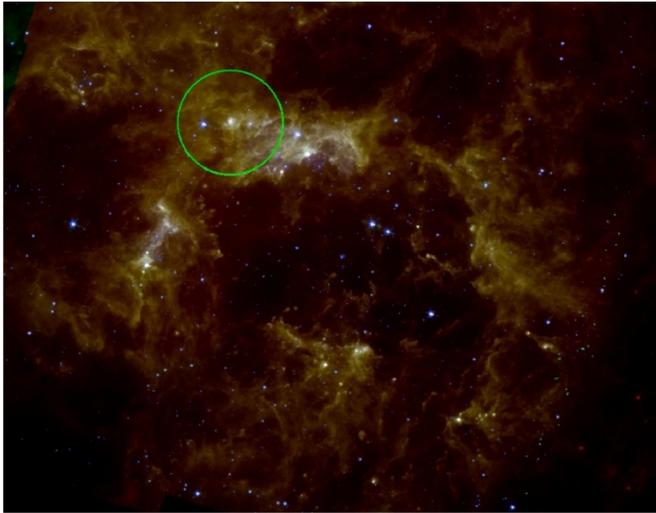


Fig. 3.1.1: Image couleur composite de la région HII géante N11 dans le Grand Nuage de Magellan observée avec Spitzer (les 3 bandes IRAC à $3.6\mu\text{m}$, $5.8\mu\text{m}$, et $8.0\mu\text{m}$ sont codées en bleu-vert-rouge). Le cercle vert est centré sur la jeune région HII compacte N11A au bord de la cavité (Charmandaris et al. 2008).

La formation des étoiles massives est encore un problème non résolu, malgré les progrès réalisés ces dernières années aussi bien en observation qu'en théorie. Une meilleure connaissance des paramètres physiques des étoiles massives nouvellement nées est indispensable pour mieux comprendre leur formation. Les objets dits HEBs (High-Excitation Blobs), que nous avons découverts dans les Nuages de Magellan offrent une occasion unique de progrès, car ces objets compacts, régions de gaz ionisé très excité, de $4''$ à $10''$ (soit 1 à 3 pc) abritent les étoiles massives les plus jeunes détectables en infra-rouge proche et optique.

Un cas très intéressant est l'objet compact que nous avons détecté, en collaboration avec N.R. Walborn du

STScI à Baltimore, dans la région N214C (Meynadier et al. 2005). Cette région H II exceptionnelle du Grand Nuage de Magellan est ionisée par une étoile chaude très rare que nous avons classifiée O2((f*)). Sa magnitude correspondrait à une masse initiale de $80 M_{\odot}$. Nous montrons qu'elle est multiple et fait partie d'un amas d'au moins six étoiles massives dans un rayon de 1 parsec. Nous avons aussi détecté un « blob » plus au nord, de rayon ~ 1 pc, traversé par une bande de poussière. Il coïncide avec une source IRAS de luminosité $2 \times 10^5 L_{\odot}$, comparable à celle d'une étoile O7 d'environ $40 M_{\odot}$. Cet objet massif enfoui est probablement membre d'un amas infrarouge. On ne peut néanmoins exclure l'hypothèse d'une seule protoétoile qui serait particulièrement massive ($\sim 100 M_{\odot}$) et avec un taux d'accrétion très élevé, de l'ordre de $10^{-3} M_{\odot}$ par an. Ce travail a fait l'objet d'un communiqué de presse de l'ESO le 22 avril 2005. Par ailleurs, nous avons aussi mis en évidence une nouvelle classe de régions H II compactes dans les Nuages de Magellan, les « Low-excitation Blobs » (LEBs), contrepartie à faible excitation des HEBs. Ils apportent de nouvelles informations sur la fonction initiale de masse des étoiles massives (Meynadier & Heydari-Malayeri 2007). Nos résultats ont fait l'objet d'une revue invitée au symposium de l'ESA sur « L'impact du HST sur l'astronomie européenne » (Heydari-Malayeri et al. 2007). Enfin, nous avons utilisé les images d'archive du satellite Spitzer pour étudier pour la première fois les propriétés infrarouge 3-8 μm et le contenu en poussière d'un échantillon de 27 « blobs » des Nuages de Magellan, de degrés d'excitation variés (Charmandaris et al. 2008). L'émission à $8\mu\text{m}$ est plus forte dans les HEBs que dans les LEBs et semble provenir principalement de très petits grains

excités dans des régions de photodissociation.

3.1.2. Les jets protostellaires et leur interaction avec le milieu moléculaire

Sylvie Cabrit, G. Pineau des Forêts (IAS, chercheur associé), A. Gusdorf (stagiaire de M2 en 2005), D. Panoglou (2005-2008, cotutelle avec le Portugal), N. Pesenti (2002-2005, co-encadré avec le LAOG), V. Agra-Amboage (2005-2008, co-encadrement avec le LAOG).

Collaborations : LAOG (J. Ferreira, C. Dougados, B. Lefloch), IRAM (J. Pety, F. Gueth), Italie (T. Giannini, B. Nisini, C. Codella), Irlande (T. Downes), Portugal (P. Garcia), UK (D. Flower),

Coordination scientifique du réseau européen JETSET (11 instituts dans 7 pays : Allemagne, France, Grèce, Irlande, Italie, Portugal, Royaume-Uni)

PI et coI programmes IRAM, VLT, co-I ANR Starshock (PI Stehle),

Co-I Herschel Guaranteed time Key Project "Unbiased spectral survey of Star Forming regions" (PI Ceccarelli)

Les étoiles jeunes passent par une phase d'éjection bipolaire intense, alimentée par l'accrétion du disque circumstellaire sur l'étoile. Le mécanisme exact d'éjection demeure parmi les grandes énigmes de la formation stellaire, ainsi que son impact sur la physique même du disque d'accrétion, et sur la turbulence du milieu interstellaire. Au cours des 4 dernières années nous avons progressé sur plusieurs plans.

a) Contraintes observationnelles sur les modèles d'éjection et de collimation des jets

Nous avons développé un outil permettant de calculer des cartes et profils de raies synthétiques pour les modèles les plus récents de jets MHD issus de disques d'accrétion. Dans le cadre de la thèse de N. Pesenti au LAOG, ces diagnostics ont été appliqués aux signatures de rotation, et ont montré que seuls les vents de disque incluant un fort chauffage à la base seraient compatibles avec les observations (Pesenti et al. 2004). Puis, nous avons mené une revue critique d'autres mécanismes d'éjection proposés (vent stellaire, vent X, reconnections magnétosphériques) et conclu que bien que certains sont présents dans les étoiles jeunes, ils ne suffisent pas à expliquer le flux de masse, ou la rotation du jet (Ferreira, Dougados, Cabrit 2006). Ces conclusions sont modérées par nos observations de RW Aur avec l'interféromètre de l'IRAM, qui révèlent que les signatures de « rotation » de jet doivent être interprétées avec grande prudence, car en sens inverse de la rotation du disque dans cet objet (Cabrit et al. 2006). Concernant le processus de collimation, nous avons obtenu avec la nouvelle ligne de base étendue de l'interféromètre de l'IRAM une carte à très haute résolution (0."3) du jet moléculaire HH 212, qui a permis d'exclure définitivement un confinement du jet par l'enveloppe circumstellaire et de confirmer la nécessité d'une collimation magnétique dans les parties centrales du disque (Codella et al. 2007 ; Cabrit et al. 2007). Trois revues invitées ont été données sur ces résultats (Symposium IAU 243 à Grenoble 2007, JENAM 2007, colloque « Protostellar jets in context » en Juillet 2008).

b) Modélisation des chocs d'étrave et de la physico-chimie associée

Depuis 2001, nous nous sommes investis dans la modélisation des chocs produits par les jets dans le milieu interstellaire, afin d'obtenir de meilleures estimations de l'énergie et de la quantité de mouvement mises en jeu, et donc de l'efficacité du mécanisme d'éjection. Le code de choc MHD stationnaire 1D élaboré par G. Pineau des Forêts (IAS) et D. Flower (Durham)

3. Résultats en dynamique des systèmes astrophysiques

a permis de modéliser avec succès plusieurs zones de choc observées en H_2 , CO, et H_2O avec ISO et en infrarouge proche (Giannini et al. 2006, Kristensen et al. 2008). En parallèle, des simulations numériques avec réseau chimique simplifié ont permis de clarifier les aspects non-stationnaires (simulations MHD en 1D ; Lesaffre et al. 2004a,b), et les biais observationnels dus à la dissociation de H_2 et CO (simulations hydrodynamiques en 2D, Downes & Cabrit 2007). Enfin, l'enrichissement en SiO dans les chocs MHD par érosion des grains, et l'émission SiO résultante, ont été étudiés pour une vaste gamme de paramètres (Gusdorf et al. 2008a). Les contraintes conjointes en H_2 et SiO exigent des chocs non-stationnaires, avec 5-10% du silicium dans les manteaux de grains (Gusdorf et al. 2008b).

c) Réseau européen JETSET (Jet Simulations, Experiments, and Theories)

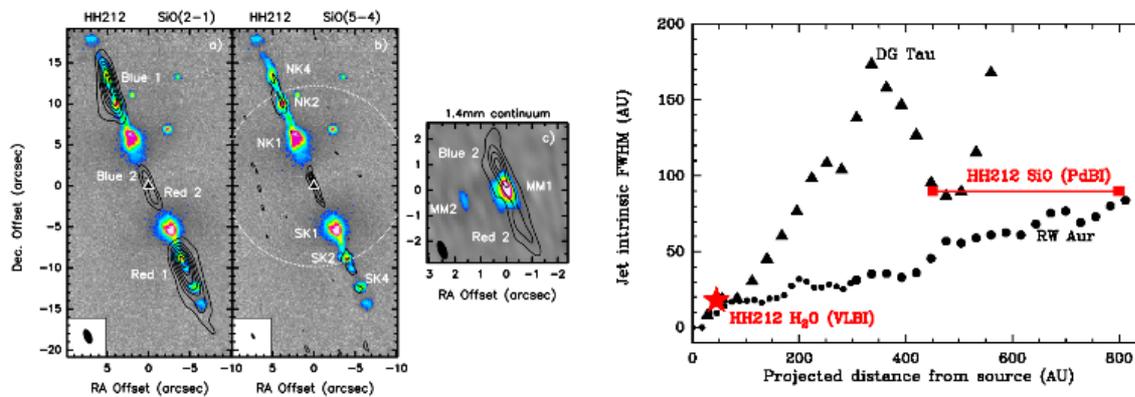


Fig. 3.1.2: (à gauche) Le jet issu de la protoétoile enfouie HH212 vu en SiO à l'interféromètre de l'IRAM (contours), superposé à l'image H_2 en couleurs (Codella et al 2007). (à droite): le jet de HH212 a une largeur similaire aux jets d'étoiles T Tauri; cela exclut un confinement par l'enveloppe circumstellaire et favorise une collimation MHD (Cabrit et al. 2007).

De Février 2005 à Janv. 2009, S. Cabrit a assuré la coordination scientifique du réseau européen JETSET (FP6), qui comprend 11 instituts de 7 pays. Le réseau a permis d'initier une approche trans-disciplinaire des jets combinant théorie des écoulements MHD, simulations numériques lourdes, observations à haute résolution angulaire, et expériences de jets en laboratoire (dont celles menées au LERMA dans l'équipe «Atomes, Molécules, et Plasmas dans l'univers»). Il a aussi permis de démarrer de nouvelles collaborations, qui ont donné lieu à de nombreux programmes d'observation conjoints entre les nœuds du réseau, à la création d'une base de données unique sur les observations de jets protostellaires, et au développement d'un outil commun de prédictions synthétiques à partir de simulations numériques (OpenSESAME). Le survey spectral non-biaisé d'un flot typique avec Herschel a également été préparé conjointement par JETSET dans le cadre d'un Key Project sur le temps garanti du stellite (PI : Ceccarelli). S. Cabrit a aussi co-encadré 2 thèses financées par JETSET : D. Panoglou (en cotutelle avec Porto) sur la physico-chimie des vents de disque MHD, qui a permis d'étudier pour la première fois de façon rigoureuse la survie des molécules dans ces modèles d'éjection, et V. Agra-Amboage (au LAOG) sur l'étude à haute résolution angulaire de microjets d'étoiles T Tauri, dont les résultats sont en phase finale de rédaction. S. Cabrit a présenté une revue invitée sur les avancées théoriques de JETSET au colloque « Magnetic Fields in the Universe II » en Janvier 2008. Enfin, un colloque international « Protostellar jets in context » a été organisé en Juillet 2008 à Rhodes, qui a rassemblé 130 participants et reçu un écho très favorable dans la communauté.

3.1.3. Disques de débris autour des étoiles de faible masse (type spectral M)

Jean-François Lestrade, Juan Marcaide (visiteur longue durée)

Collaborations nationales : J.-C. Augereau (LAOG), P. Charlot (Bordeaux)

Collaborations internationales : M. Wyatt (U. Cambridge, UK), F. Bertoldi (U. Bonn, Allemagne), K. Menten (MPI Bonn, Allemagne), G. Bryden (JPL/Caltech, USA).

PI de programmes sur l'IRAM, HST, Spitzer, Gemini-North (8 depuis 2004)

Co-I ANR disques de débris (PI Jean-Charles Augereau),

Co-I Herschel Open Time Key Project DEBRIS (PI Brenda Matthews)

Un disque de débris autour d'une étoile de la séquence principale est composé de poussières issues de collisions entre plus gros corps, de taille cométaire. Il pourrait même être le résidu de la formation de planètes, à l'instar des ceintures d'astéroïdes et de Kuiper dans le système solaire. Ces disques sont donc potentiellement intéressants pour comprendre la formation des exoplanètes. Les sondages avaient jusqu'ici été menés uniquement autour d'étoiles de types spectraux A à K. Nous avons entrepris de les étendre aux étoiles de type M, qui représentent 70% des étoiles de la Galaxie, mais qui sont aussi les moins lumineuses, rendant la détection plus difficile. Deux approches ont été utilisées :

- Nous avons engagé une première recherche de disques de débris froids autour d'un échantillon d'étoiles M en Octobre 2004 avec SCUBA sur le JCMT à 850 μ m, complétée de 2005 à 2008 par deux relevés au télescope de 30m de l'IRAM avec la matrice de bolomètres MAMBO à 1.2mm. Nous avons découvert un disque à 850 μ m autour de l'étoile M0.5 GJ842.2, âgée de 200 millions d'années (Lestrade et al. 2006), ainsi qu'une structure complexe autour de l'étoile M1.5 GJ526 à 1.2mm qui est soit un très grand disque inhomogène ($r=500$ UA), soit un amas anormalement dense de sources de fond (galaxies sub-mm) aligné par chance avec cette étoile. A présent qu'un échantillon de 50 étoiles a été observé, nous estimons que le taux de détection de disques de débris froids autour des étoiles M est de 2% +4/-1.6%, probablement plus petit qu'autour des étoiles A à K (17% +10/-9%). L'origine d'une telle différence est encore inconnue. En ce qui concerne le disque de GJ842.2, l'excès photométrique infrarouge attendu vient d'être détecté par le satellite Spitzer, au cours d'un programme sur les disques de débris auquel nous collaborons. Par ailleurs, J.-F. Lestrade est PI d'une proposition HST acceptée (Cycle 15) pour tenter d'imager ce disque en lumière diffusée.
- Dans une deuxième approche, nous avons piloté une ré-analyse de la base de données IRAS pour chercher des excès photométriques de faible rapport signal-à-bruit en direction des 400 étoiles M les plus proches, et identifier des candidats de disques chauds. Cependant, trois candidats n'ont pas été confirmés par GEMINI (11 μ m et 18.5 μ m) lors d'un programme conduit en 2007 en collaboration avec Mark Wyatt (IoA, Cambridge, UK). Un autre candidat très intéressant, car montrant sans doute la bande des silicates à 11 μ m caractéristique de la poussière cométaire, a été soumis pour confirmation par Spitzer. Cette proposition dont nous sommes PI est acceptée pour le cycle 5 en cours.

3. Résultats en dynamique des systèmes astrophysiques

3.1.4. Enveloppes circumstellaires des géantes rouges, et interaction avec le milieu environnant

Thibaut Le Bertre, Yannick Libert (étudiant en thèse depuis octobre 2006)

Collaborations nationales: GEPI (E. Gerard), IRAM Grenoble (J.M. Winters)

Collaborations internationales: USA (L. Matthews, M. Reid, D.J. MacConnell), Japon (I. Yamamura), Italie (M. Busso et R. Guandalini).

Projet IRSIS (Inde) : S.K. Gosh, PI projet IRSIS

Réseau ARENA : Italie (M. Busso et R. Guandalini), IAS/Orsay (E. Dartois et L. d'Hendecourt), CRAL Lyon (I. Vauglin), Univ. de Nice (N. Epchtein).

Au cours de leur évolution après la Séquence Principale, les étoiles rejettent une fraction importante de leur masse dans le milieu interstellaire et contribuent ainsi au cycle cosmique de la matière. Notre équipe se concentre sur le phénomène de perte de masse par les géantes rouges, et l'interaction et le mélange entre ces enveloppes et le milieu environnant.

L'essentiel de la masse éjectée par les géantes rouges l'est sous forme d'hydrogène. On s'attend à ce que, selon les conditions prévalant dans les atmosphères stellaires et leurs enveloppes, cet hydrogène se présente principalement sous forme atomique. En collaboration avec Eric Gérard (GEPI), Lynn Matthews et Mark Reid (MIT & CfA, USA), nous étudions l'émission de ces objets dans la raie HI à 21 cm avec le radiotélescope de Nançay et, depuis peu, le Very Large Array (VLA) et le Green Bank Telescope (USA). Ces observations ont permis pour la première fois la détection d'une cinquantaine d'objets en HI (e.g. Gérard & Le Bertre 2006). La modélisation des profils de la raie HI permet de reconstituer l'histoire de la perte de masse au cours des quelques 10^5 ans passés et d'étudier son interaction avec le milieu environnant (X Her : Gardan et al. 2006 ; Y CVn : Libert et al. 2007 ; RX Lep : Libert et al. 2008 ; Mira : Matthews et al. 2008).

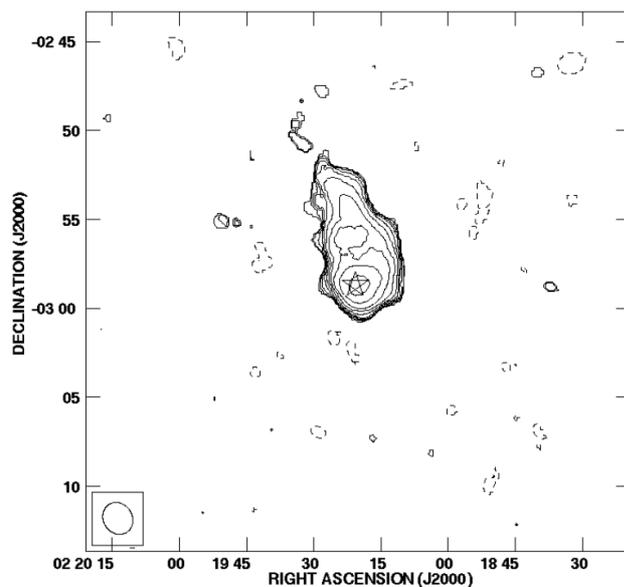


Fig. 3.1.3: Image de la géante rouge Mira obtenue au VLA dans la raie de l'hydrogène neutre à 21 cm (Matthews et al. 2008). L'enveloppe circumstellaire est déformée par le mouvement relatif de l'étoile et du milieu interstellaire ambiant ($\Delta V \sim 130 \text{ kms}^{-1}$).

Le dernier exemple est particulièrement illustratif. En effet l'étoile centrale se déplace à grande vitesse dans le milieu interstellaire, à environ 130 kms^{-1} , et laisse derrière elle une traînée de matière fortement excitée, détectée en ultra-violet par GALEX sur 2 degrés dans le ciel, soit $\sim 3 \text{ pc}$. Nos observations au VLA (voir Fig. 3.1.1) montrent l'enveloppe circumstellaire déformée par l'interaction avec le milieu local. Par ailleurs les données obtenues avec le radiotélescope de Nançay le long de la traînée UV

permettent de détecter la matière stellaire arrachée de l'enveloppe au cours des $\sim 10^5$ dernières années. Grâce à nos travaux, la raie HI à 21 cm apparaît maintenant comme un des traceurs importants des environnements circumstellaires, complémentaire des raies moléculaires émises par les régions internes de l'enveloppe (<0.1 pc) que nous étudions avec les télescopes de l'IRAM (Winters et al. 2007 ; Libert et al. 2008), et du continu dans l'infrarouge lointain observé avec les satellites IRAS, ISO, Spitzer, et Akari (voir Projets).

3.2. Champ magnétique, réactions, accrétion

Ont contribué aux travaux de l'équipe «Champ Magnétique, Réactions, Accrétion (MRA)» entre 2004 et 2008 :

12 chercheurs, enseignants-chercheurs et astronomes : Steven Balbus, Edith Falgarone, Maryvonne Gerin, Patrick Hennebelle, Pierre Lesaffre, François Levrier, Laurent Paganì, Jean-François Panis, Michel Pérault, Jérôme Pety

1 Directeur de recherche émérite du CNRS : Michel Guélin

3 ITA (dont 1 CDD) : Bertrand Delforge CDD), Marie-Françoise Ducos, Jean-François Rabasse

4 post-doctorants : Javier Goicoechea, Henrik Latter, Henrik Olofsson, Lara Silvers

3 doctorants dont les thèses sont actuellement en cours : Benoît Commerçon, Benjamin Godard, Ludovic Petitdemange

4 thèses ont été soutenues : François Levrier (2004), Pierre Hily-Blant (2004), Estelle Bayet (2005), Tanim Islam (2007, cotutelle U. Virginie)

1 chercheur associé de l'Observatoire de Paris : Fabien Daniel

Publications pendant la période 2004 à mi-2008:

ACL: 164 (163) articles publiés dans une revue à comité de lecture

ACT: 135 (128) communications avec actes dans un congrès international

INV: 33 (33) conférences invitées dans un congrès international

Collaborations

Nationales : SAP (R. Teyssier, E. Audit, P. André, F Motte, S Fromang, V Minier ...), IAP (C Terquem), IAS (MA Miville-Deschênes, E Dartois, G Pineau des Forêts, ...), Luth (E Roueff, J Le Bourlot, F Le Petit), LESIA (D Bockelee-Morvan, N Biver), CESR (C Joblin, E Caux, C Vastel, I Ristorcelli, A Walters ...), LAOG (P Hily-Blant, AM Lagrange, C Ceccarelli, S Maret ...), LAB (cote technique pour FIRI/Esprit), CRAL (G Chabrier), LATT (JF Donati), IRAM (J Pety, M Guélin), OCA (T Passot)

Internationales Cambridge (C. Tout, R. Martin), Oxford (P. Podsiadlowski), Londres (J. Cho), CalTech (T. Phillips, G. Serabyn ...), JPL, CSIC (J. Cernicharo), Chalmers, NCAC Torun, U. Heidelberg (Klessen), MPIA Heidelberg (H. Klahr), U. Illinois (R. Crutcher, T. Troland), U. Kentucky (E. Bergin), Gemini Observatory at Hilo (T. Geballe), U. Cologne and HIFI consortium, NRAO (A. Wootten, T. Hunter, H. Liszt), TU Berlin (M. Hegmann), U. Kyoto (Inutsuka), Mexique (E. Vasquez-Semedani), U. Cardiff (A. Whitworth),

Note

Cette équipe thématique regroupe l'ensemble des membres du Laboratoire de Radioastronomie

3. Résultats en dynamique des systèmes astrophysiques

de l'ENS, plus Laurent Pagani, à l'exclusion du groupe théorie de l'effet dynamo (resp. Emmanuel Dormy, rattaché à l'IPGP)

3.2.1. Introduction

Le LRA regroupe des chercheurs de deux UMR, le LERMA pour la grande majorité, et l'IPGP. Cette équipe, abritée dans les locaux du département de physique de l'ENS, est composée de 9 chercheurs et enseignants-chercheurs permanents, et d'un nombre comparable d'étudiants et de post-doctorants. L'équipe fait également partie de la fédération de recherche du département de physique de l'ENS. Un ingénieur de recherche et une secrétaire-gestionnaire partagent leur activité entre les projets de l'équipe et le département.

Les chercheurs du LRA sont engagés dans plusieurs projets majeurs, qui se rattachent pour la plupart au domaine scientifique de la formation stellaire et planétaire. La composition de l'équipe, combinant des expertises en théorie, simulation numérique et observations, permet des approches complémentaires à ces problèmes hautement non-linéaires. Son expertise en astrochimie provient de collaborations étroites avec les groupes de modélisation en Ile-de-France (LUTH et IAS) et des chercheurs de l'IRAM et du CESR. A ces titres, l'équipe bénéficie du soutien régulier des programmes nationaux de l'INSU PCMI (Physique et Chimie du Milieu Interstellaire) et PS (Physique Stellaire). L'équipe s'est investie depuis plus d'une décennie dans la préparation de la mission spatiale Herschel, dont le lancement est prévu pour le printemps 2009, et dans la réflexion sur l'exploitation scientifique d'ALMA. Elle regroupe également des utilisateurs assidus des grands télescopes nationaux et internationaux, au sol comme dans l'espace (IRAM, CSO, Spitzer, etc.).

Grâce à l'obtention d'une Chaire d'Excellence du ministère de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur, puis d'un financement complémentaire de la Région Ile-de-France (contrat SESAME), un ordinateur parallèle performant (256 processeurs) a pu être installé à l'ENS à l'automne 2006. La configuration a été optimisée pour les simulations d'hydrodynamique et de magnétohydrodynamique (MHD). Une nouvelle structure, le CEMAG (Centre d'Étude des Écoulements Magnétisés en Astrophysique) héberge ce ordinateur, et sert de point de rencontre entre les experts de la région parisienne (au LRA mais aussi au CEA/Sap, à l'Observatoire de Paris, au MNHN...). Un séminaire régulier combinant un exposé théorique et une synthèse des observations sur le même sujet permet d'échanger et de confronter les points de vue, et de renforcer les contacts dans la communauté.

3.2.2. Quelques résultats remarquables

a) *Turbulence magnétohydrodynamique : milieu interstellaire et disques d'accrétion*

Les fluides astrophysiques sont des milieux magnétisés, où le rôle dynamique du champ magnétique ne peut être ignoré. Le milieu interstellaire n'échappe pas à cette règle. L'étude de la formation et de l'évolution des nuages moléculaires, est abordée par le biais de simulations numériques intensives grâce à des codes MHD performants, qui prennent en compte les résultats de travaux détaillés sur les processus physiques qui contrôlent l'évolution

du gaz. La mise en oeuvre de telles simulations numériques est rendue excessivement difficile par les très fortes non-linéarités du système étudié : le milieu interstellaire est un fluide multiphasique et réactif, dont les propriétés thermiques et de transport varient au cours de l'évolution. Il est par conséquent important de valider les résultats numériques par une comparaison avec les résultats observationnels. Tout récemment, les propriétés statistiques du milieu interstellaire diffus ont pu être reproduites par des simulations numériques de la turbulence subsonique dans le milieu chaud (Hennebelle & Audit 2007, Hennebelle et al. 2008, 2. Fig. 3.2.1), malgré les simplifications notoires du code. Des structures denses et froides sont créées naturellement avec un spectre de masse comparable à celui, observé, des nuages moléculaires. Ces résultats sont encourageants et incitent à s'engager vers des simulations plus réalistes physiquement.

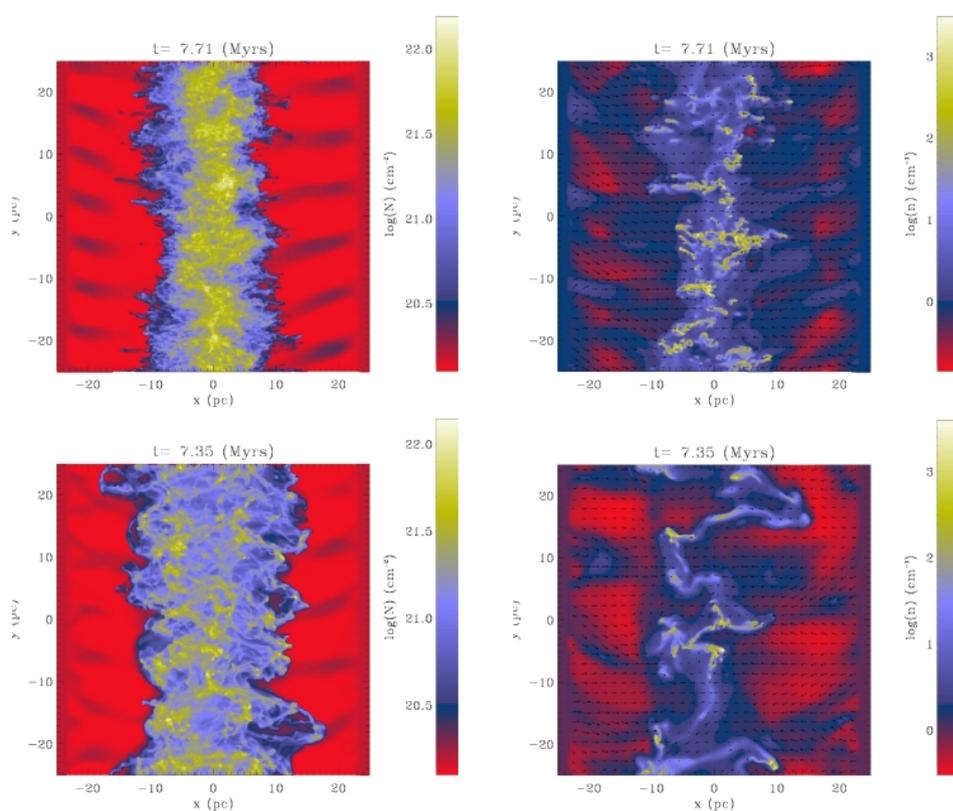


Fig. 3.2.1: Comparaison de simulations hydrodynamique (haut) et MHD (bas) d'un flot convergent dans la turbulence du milieu atomique chaud. A gauche, densité de colonne d'hydrogène. A droite, coupe de densité et vitesse en $z=0$. Des multitudes de structures denses et froides sont formées, leur cohérence spatiale est plus grande en présence de champ magnétique.

L'étude de l'origine et du développement de la turbulence dans les disques d'accrétion, qu'ils soient stellaires (binaires, systèmes symbiotiques, disques protoplanétaires) ou galactiques (noyaux actifs de galaxies), est un deuxième thème majeur de l'équipe. Des simulations numériques de l'instabilité magnétorotationnelle (MRI) en présence de gravité, ont mis en évidence les rôles antagonistes de la MRI et de l'instabilité de Jeans, ce qui prolonge la vie des systèmes où ces deux instabilités sont actives (Fromang, Balbus et al. 2004). Dans les

3. Résultats en dynamique des systèmes astrophysiques

disques d'accrétion, les propriétés de transport sont affectées par les instabilités qui s'y développent. L'étude d'une instabilité visqueuse, présente dans les plasmas dilués où le transport se fait principalement le long des lignes de champ magnétique, a fait l'objet du travail de thèse de T. Islam. Cette instabilité joue un rôle important pour le transport de moment cinétique dans les disques de faible densité (Islam & Balbus 2005).

b) Milieu interstellaire : dissipation de la turbulence, transport turbulent, chimie

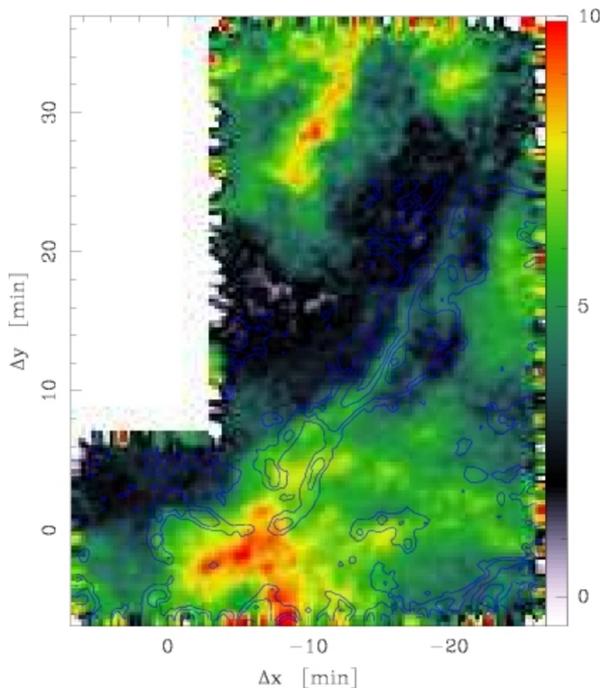


Fig. 3.2.2: Image IRAM-30m/HERA de l'émission $J=1-0$ du monoxyde de carbone dans un nuage moléculaire diffus. Le grand nombre de spectres (1.5 million) permet d'obtenir une statistique très sensible du champ de vitesse du nuage. L'image (fausses couleurs) présente l'intensité intégrée de la raie tandis que les contours bleus tracent le lieu des points hors-statistique gaussienne de la vitesse (i.e. extrema du cisaillement de vitesse). Ces zones sont remarquablement organisées en fines structures, cohérentes sur des longueurs très supérieures à leur dimension transverse, et distinctes de la distribution du CO. Elles révèlent la géométrie des sites de dissipation turbulente (Hily-Blant & Falgarone, en préparation).

Falgarone et al. 2008).

Les molécules sont en effet d'irremplaçables outils dans l'étude du milieu interstellaire. Elles sont les traceurs de sa distribution spatiale et de son champ de vitesse, de ses conditions

Le milieu interstellaire étant un fluide turbulent, sa dynamique est dissipative. Or, ce sont ses propriétés dissipatives, notoirement peu connues, qui régissent en partie la formation de condensations, et à terme d'étoiles et de planètes. L'équipe est engagée depuis plusieurs années dans un vaste effort de modélisation des régions de dissipation de la turbulence interstellaire, dans le but d'identifier ses signatures observationnelles. Bien que le paradigme actuel soit une dissipation rapide, permettant une formation d'étoiles efficace, les observations de l'équipe, révèlent plutôt le contraire : la dissipation de la turbulence est modérée en moyenne, car intermittente dans le temps et l'espace (i.e. se produisant sous la forme de bouffées intenses mais brèves et localisées). Ces conclusions sont déduites de l'analyse statistique du champ de vitesse du gaz interstellaire dans de grandes cartographies de transitions moléculaires obtenues avec la mosaïque de récepteurs HERA sur le télescope IRAM-30m (Fig. 3.2.2). Ces observations ont permis d'identifier, pour la première fois, les structures cinématiques à l'origine de la statistique non-gaussienne du champ de vitesse. Elles apparaissent comme de fines zones de cisaillement intense du champ de vitesse, cohérentes sur des échelles spatiales plus de cent fois supérieures à leur dimension transverse. Leurs propriétés dynamiques, thermiques (et chimiques, voir ci-dessous) sont en accord avec le fait qu'elles sont les sites d'une intense dissipation de la turbulence (Hily-Blant & Falgarone 2007, Hily-Blant et al. 2007,

physiques et de sa composition, mais aussi les principaux agents de son évolution : son refroidissement et son couplage avec le champ magnétique sont contrôlés par les différentes espèces présentes dans le milieu. La compréhension des modes de formation et de destruction des molécules interstellaires nécessite la prise en compte de grands réseaux de réactions chimiques, qui décrivent la chimie en phase gazeuse, mais aussi des phénomènes se déroulant dans les manteaux de glaces des poussières. Ceci produit des modèles d'une grande complexité, qui doivent être testés par des jeux de données fiables et précis. L'élaboration d'un tel jeu de données est l'un des objectifs de l'équipe poursuivi depuis plusieurs années. Parmi les résultats marquants, citons la mise en évidence d'une association spatiale étroite entre radicaux carbonés (CCH, $c\text{-C}_3\text{H}_2$, C_4H) et hydrocarbures polycycliques aromatiques (PAHs) dans les régions de photodissociation (PDRs), qui suggère une relation causale entre ces deux familles (Pety et al. 2005, Fig. 3.2.3). La détermination d'une abondance élevée du soufre en phase gazeuse, à partir d'observations de CS et HCS^+ (Goicoechea et al. 2006) constitue un deuxième exemple, l'abondance de cet élément étant restée jusqu'à présent laissée à l'appréciation des théoriciens par manque de données d'observation.

L'étude de ces processus est pertinente pour comprendre la croissance de la complexité moléculaire dans le milieu interstellaire, mais aussi dans les disques protoplanétaires. La similitude reconnue des propriétés de la matière primitive du système solaire avec la matière interstellaire renforce l'intérêt de ces processus, pour comprendre l'ensemble du chemin menant du milieu interstellaire à la matière primitive du système solaire, et aux futurs planètes, comètes et astéroïdes. Cependant, aux petites échelles, dans le milieu interstellaire turbulent (et ceci est encore plus vrai dans les disques protoplanétaires), les temps caractéristiques d'évolution dynamique et chimique deviennent commensurables. Le défi est alors de traiter conjointement l'évolution chimique et dynamique, comme l'illustrent les deux exemples suivants. La dissipation de la turbulence interstellaire se produisant de façon intermittente dans le temps et l'espace (Fig. 3.2.2) fait subir au gaz de fortes excursions en température, déclenchant ainsi une chimie

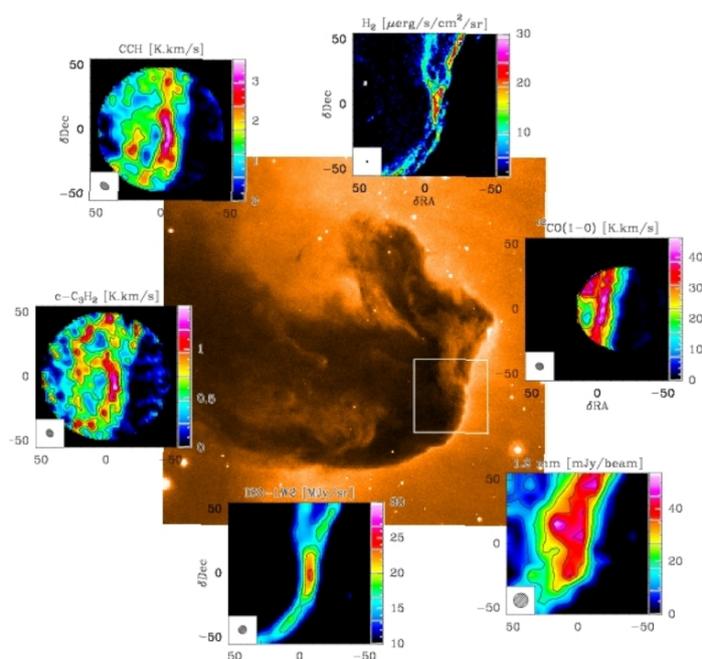


Fig. 3.2.3: Résumé des observations d'hydrocarbures dans la direction de la nébuleuse de la Tête de Cheval, présentées autour d'une image de la nébuleuse prise dans le domaine visible (Pety et al 2005). Les différents traceurs permettent de sonder la matière et d'étudier finement l'interaction avec le rayonnement ultra-violet ambiant. Tandis que l'émission de l'hydrogène moléculaire excité se produit uniquement le long du bord externe de la nébuleuse, l'émission des poussières et de C^{18}O est détectée partout dans le nuage. L'émission des hydrocarbures suit fidèlement l'émission des PAHs en IR moyen (ISOCAM), un résultat inattendu qui suggère une relation étroite entre ces deux familles.

3. Résultats en dynamique des systèmes astrophysiques

riche et originale car de nombreuses barrières endo-énergétiques sont ouvertes. On montre que l'enrichissement perdure près de 100 fois plus longtemps que l'évènement dissipatif qui lui a donné naissance, imprimant au gaz une véritable signature chimique, observable et en bon accord avec les données (Falgarone et al. 2006, Godard et al. 2008). La diffusion turbulente au voisinage d'une interface séparant un milieu froid et dense et un milieu ténu et chaud (en équilibre de pression) met en contact les gaz froid et chaud, et rend ainsi possibles des réactions chimiques possédant une forte barrière d'activation. (Lesaffre et al. 2007). Ces modèles permettent de prédire la production d'espèces réactives détectées dans le milieu interstellaire diffus, comme CH^+ , dont l'abondance est inexplicée dans les modèles standards.

c) Conditions d'allumage des supernovae de type Ia

Les explosions de supernovae de type Ia font partie des indicateurs de distance qui permettent de mesurer les paramètres cosmologiques, grâce à la relation étroite entre leur luminosité absolue et la forme de leur courbe de lumière. Cette relation a été établie pour les SNIa dans l'univers local, mais n'a néanmoins pas de base théorique solide. En particulier, on ne sait pas comment elle se transformerait dans des environnements très différents de l'univers local. Dans le but de mieux cerner l'origine de cette relation, et le rôle des éléments lourds, l'étude du processus Urca convectif (pour lequel la capture électronique et la désintégration beta perturbent fortement l'état convectif de l'étoile avant explosion) est menée, cet effet étant susceptible d'induire une dépendance de la courbe de lumière à la métallicité. Cet effet est décrit depuis les années 1970, mais n'a été pris correctement en compte que très récemment car il nécessite la résolution d'équations non-linéaires couplées très raides (Lesaffre, Podsiadlowski, Tout 2005). L'objectif final est la prédiction de la structure physique et chimique de l'étoile juste avant l'explosion, structure qui détermine la nucléosynthèse et la courbe de lumière suivant l'explosion (Lesaffre et al 2006).

3.2.3. Autres activités et thèmes de recherche

a) Caractérisation des phases moléculaires du milieu interstellaire

Les observations du milieu interstellaire menées depuis les années 50 y révèlent la coexistence (et l'intrication, jusqu'à de très petites échelles) de phases aux propriétés chimiques et thermiques extrêmement différenciées, dont les caractéristiques ne correspondent pas aux propriétés moyennes observées. Les processus dynamiques, ceux notamment liés à la turbulence, ont une influence déterminante sur la formation et l'évolution de ces phases, mais aussi sur leurs échanges et interactions réciproques. Le champ magnétique figure parmi les acteurs principaux de ces interactions. Plusieurs axes de recherche de l'équipe font progresser la compréhension de cette structuration.

Des observations du milieu diffus galactique dans les raies de rotation pure de la molécule H_2 en absorption avec le satellite FUSE (Nehmé et al. 2008) ou en émission avec les satellites ISO (Falgarone et al. 2005) et plus récemment Spitzer, ont révélé l'existence d'une petite fraction (quelques %) de gaz moléculaire chaud associé au gaz froid. Ces poches de gaz chaud sont attribuées au processus de dissipation intermittente de la turbulence décrit ci-dessus et le refroidissement dans les raies de rotation pure de H_2 est le processus dominant dans la phase de relaxation thermique et chimique du gaz ayant traversé une bouffée de dissipation (Godard et al. 2008). Cette découverte de l'importance de l'énergie rayonnée dans les raies de rotation de H_2 par une petite fraction chaude du gaz diffus se refroidissant entre 1000K et 200K a été l'un des moteurs de la proposition d'explorer dans l'infra-rouge proche, H2EX, faite au CNES

puis à l'ESA, qui n'a malheureusement pas abouti à une sélection. Cette émission H_2 , parce que disséminée dans le gaz froid, y était proposée comme un traceur unique de l'hydrogène moléculaire froid, porteur invisible en émission d'une fraction inconnue de la matière noire baryonique.

Un effort de développement méthodologique est mené en parallèle, pour la recherche des structures cohérentes de la turbulence dans de grands jeux de données observationnelles. Ces méthodes innovantes (i.e. mesure d'une quantité de structure à partir de la distribution de la phase des coefficients de Fourier dans les données interférométriques) ont été testées sur des données existantes mais donneront toute leur mesure avec la prochaine génération d'instruments comme l'interféromètre ALMA (Levrier et al. 2006).

La mesure du champ magnétique dans le milieu interstellaire (orientation et intensité) constitue un défi majeur. L'équipe est engagée dans un programme d'observations de l'intensité du champ magnétique par la détection de l'effet Zeeman de 7 composantes hyperfines du radical CN dans des régions de formation d'étoiles. Ces mesures révèlent une équipartition moyenne des énergies magnétique et turbulente et un champ magnétique trop faible pour stabiliser gravitationnellement les coeurs denses observés (Falgaronne et al. 2008).

Les coeurs denses préstellaires sont les objets privilégiés pour comprendre le déclenchement de la formation stellaire et la complexification de la matière. Ces régions denses et froides sont le siège d'une chimie particulière, où la condensation en glaces des espèces gazeuses comme CO ou CS, augmente l'abondance d'espèces minoritaires, et renforce l'efficacité du fractionnement isotopique en deutérium. Les observations et travaux théoriques récents ont permis d'identifier les traceurs de ces régions extrêmes : H_3^+ , les espèces azotées (NH_3 , N_2H^+) et leurs dérivés deutérés dont H_2D^+ , D_2H^+ , NH_2D , etc., restent présents dans le gaz, et sont donc les seules espèces en phase gazeuse susceptibles de véhiculer des informations sur l'état, la structure, la cinématique et la composition du gaz dans les coeurs denses (Pagani et al. 2005). L'analyse d'un jeu complet de transitions de N_2H^+ et de ses dérivés a permis de montrer que le gaz se refroidit en dessous de 10K. A une si basse température, il est nécessaire de séparer les états d'énergie des espèces réactives comme H_2 , H_2D^+ , D_2H^+ , pour en étudier la chimie, l'énergie apportée par l'excitation rotationnelle pouvant significativement affecter la constante de vitesse de la réaction chimique (Pagani et al. 2007, 2008). Dès son lancement, le satellite Herschel permettra des mesures bien plus précises des dérivés deutérés de H_3^+ , qui permettront de tester l'ensemble des aspects de cette nouvelle chimie.

b) Formation stellaire : effondrement des coeurs denses préstellaires

Les étoiles et les planètes peuvent être considérées comme les produits finals de l'effondrement gravitationnel des coeurs préstellaires. Le rôle du champ magnétique sur le résultat de l'effondrement a été étudié, par des simulations numériques en collaboration avec l'équipe de formation stellaire du CEA. Des simulations spécifiques ont été réalisées pour ajuster les observations de la région de formation stellaire NGC2264 (Peretto et al. 2007). Les simulations numériques de l'effondrement d'un coeur dense en présence de champ magnétique permettent de montrer qu'un jet est spontanément créé dans ce cas, et que le champ magnétique a une très forte influence sur la dynamique de l'effondrement : le champ diminue la tendance du système à se fragmenter en de multiples condensations (Hennebelle & Fromang 2008, voir Fig. 2 de la partie Projet). Un résultat plus étonnant est la difficulté à former un disque auto-gravitant lorsque le champ est presque dominant dynamiquement. Ces études sont menées dans le cadre de la MHD idéale et dans un milieu isotherme. L'objectif à long terme est de lever ces hypothèses simplificatrices pour obtenir des simulations plus réalistes du devenir des coeurs denses moléculaires. Néanmoins, il semble que les simulations

3. Résultats en dynamique des systèmes astrophysiques

capturent dès à présent de nombreux ingrédients physiques des systèmes naturels, puisqu'elles permettent de reproduire avec succès certaines lois d'échelles du milieu interstellaire. Cette idée a été mise à profit par P. Hennebelle et G. Chabrier, qui ont développé un nouveau formalisme, inspiré de celui de Press et Schechter appliqué à la formation des galaxies, pour dériver de manière analytique la forme de la fonction initiale de masse des étoiles (IMF). Ce formalisme permet de calculer les propriétés du spectre de masse des coeurs denses, qui dépend des lois d'échelles des fluctuations de vitesse, ainsi que celles de la fonction initiale de masse, car la forme de l'IMF dépend, dans ce formalisme, du spectre de masse des coeurs denses (Hennebelle & Chabrier 2008).

c) Refroidissement et formation d'étoiles dans les galaxies

Les mêmes processus microphysiques sont responsables du rayonnement des galaxies les plus lointaines comme de celui des nuages interstellaires les plus proches. La spectroscopie dans les domaines du submillimétrique et de l'infra-rouge lointain permet de mesurer les principaux processus de refroidissement (émission continue des poussières et raies de refroidissement du gaz) du milieu moléculaire, et ainsi de sonder complètement l'activité de formation stellaire des galaxies, y compris les régions les plus précoces encore enfouies dans leur nuage parent. Les paramètres globaux des régions sondées sont déduits des observations grâce à des modèles sophistiqués développés pour l'étude des régions de photodissociation de la Galaxie. Un va et vient s'établit donc entre compréhension des phénomènes à petite échelle dans la Galaxie, et l'étude des phénomènes globaux. Une première étape a été franchie lors de la thèse d'E. Bayet, par l'exploration du spectre submillimétrique des galaxies (Bayet et al. 2006). Ces premiers travaux ont permis de dégager des diagnostics observationnels des propriétés de formation stellaire des galaxies à partir de leurs raies spectrales dans les domaines (sub)millimétriques qui donneront toute leur mesure avec la sensibilité accrue de Herschel et surtout ALMA.

d) Préparation et exploitation d'instruments scientifiques.

Avant le lancement du satellite Herschel, l'exploration du ciel submillimétrique a débuté avec les satellites SWAS (NASA) et ODIN (Suède, Canada, France, Finlande). ODIN emportait un télescope de 1m de diamètre muni de plusieurs récepteurs. L'un de ces détecteurs était dédié à la mesure d'une transition fondamentale de l'oxygène moléculaire, dans l'atmosphère terrestre et le milieu interstellaire. ODIN a effectué les recherches les plus sensibles à ce jour de la présence d'oxygène moléculaire et obtenu une détection convaincante (5 sigma) dans le coeur dense rho Oph A (Larsson et al 2007). L'ensemble des mesures obtenues par ODIN (et SWAS) confirme la faible abondance de l'oxygène moléculaire, mais n'a malheureusement pas la résolution angulaire pour en identifier sans ambiguïté l'origine. La meilleure résolution et sensibilité de Herschel devrait permettre des progrès significatifs sur cette question.

L'équipe a été très impliquée dans la préparation de l'instrument HIFI du satellite Herschel, à la fois pour le volet scientifique (programmes de temps garanti et de temps ouvert), pour l'étalonnage (participation au groupe de calibration, à la rédaction du plan d'étalonnage, aux campagnes de tests), et le développement de logiciels pour la simulation de l'instrument et l'analyse des données.

A plus long terme, l'équipe participe (et a participé) à la définition de nouvelles missions dans l'infrarouge et le submillimétrique (SPICA, FIRI) et projet ballon (CIDRE) en liaison avec les groupes instrumentaux du LERMA/GEMO et de l'IAS.

e) Développement de codes numériques de simulations

Les codes numériques sont indispensables pour les travaux de MHD. L'équipe contribue au, voire pilote, le développement et la parallélisation de plusieurs codes MHD : RAMSES, PARODY et ZEUS 3D. Ces codes sont disponibles en ligne sur le site du projet MAGNET (<http://magnet.ens.fr/>), dirigé par E. Dormy (IPGP et LRA). La fiabilité des codes numériques est validée par la résolution de problèmes possédant des solutions analytiques. De nouvelles classes de solutions ont donc été proposées pour la validation des codes.

Des comparaisons des différentes méthodes numériques ont été effectuées pour cerner les artefacts de ces différentes méthodes et mieux comprendre les limites de validité des différentes approches numériques (Commerçon, Hennebelle, Audit et al. 2008)

3.2.4. Données annexes

Projets sélectionnés et Distinctions

L'équipe pilote le projet de recherche ANR MAGNET (2006 2009) (Magnétohydrodynamique en Astrophysique et Géophysique Numérique et Théorique) coordonné par E. Dormy, avec le CETP et le Service d'Astrophysique du CEA.

Les objectifs principaux de MAGNET sont i) l'étude de l'origine, de la structure et du rôle dynamique du champ magnétique dans différents systèmes astrophysiques et géophysiques, ii) le développement de codes numériques adaptés à ces questions, et leur mise à disposition de la communauté.

Le projet "Star Formation Models and Tools : A Theoretical Database " (PI P. Hennebelle) présenté par l'équipe en réponse à l'appel d'offre européen ASTRONET, vient également d'être sélectionné.

Invitations de chercheurs étrangers: D. Johnstone, M. Arnold, R. Klessen, C. Reynolds, R. Crutcher, S. Inutsuka, A. Whitworth, S. Stanimirovic

Séminaire MHD (P Hennebelle) : mensuel, 2 exposés 1 théorie/1 expérience; séminaire d'équipe.

Deux membres de l'équipe ont été distingués : S. Balbus a reçu une Chaire d'excellence du Ministère de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur, et la médaille de bronze du CNRS 2008 a été attribuée à P. Hennebelle.

3.3. Galaxies et cosmologie

Ont contribué aux travaux de l'équipe «Galaxies et cosmologie» entre 2004 et 2008 :

8 chercheurs, enseignants-chercheurs et astronomes : Frédéric Boone, Fabienne Casoli, Françoise Combes, Jean-Michel Lamarre, Claudine Laurent, Anne-Laure Melchior, Benoît Semelin, François Viallefond

3 ITA et IATOS : Michel Caillat, Alain Coulais, Mireille Dantel

4 post-doctorants : Igor Chilingarian, Paola di Matteo, Chiara Mastropietro, Yves Revaz

4 doctorants dont les thèses sont actuellement en cours : Andrea Catalano, Sunghye Baek,

Benjamin L'Huillier, Andrea Zonca

6 thèses ont été soutenues : **Philippe Salomé** (2004), **Simon Verley** (2005), **Frédéric Bournaud** (2006), **Pavel Jachym** (2006, en co-tutelle Université de Prague), **Viviana Casasola** (2008, en co-tutelle Université Paris 6/Université de Padoue), **Olivier Turet** (2008)

2 visiteurs longue durée : **Vladimir Reshetnikov, Nemesio Rodrigues-Fernandez**

4 chercheurs associés et usagers de l'Observatoire de Paris : **James Lequeux, Raymond Michard, Geneviève Recouvreur, Monique Signore**

Publications pendant la période 2004 à mi-2008:

ACL: 169 (169) articles publiés dans une revue à comité de lecture

ACT: 206 (203) communications avec actes dans un congrès international

INV: 37 (37) conférences invitées dans un congrès international

3.3.1. Présentation

L'équipe « Galaxies » travaille à la fois sur l'observation des galaxies locales, la physique des galaxies dans les amas, les galaxies à plus grand redshift, et sur la théorie des phénomènes dynamiques qui font évoluer les galaxies, sur la formation des étoiles à grande échelle, et sur la formation des structures et des galaxies. Des observations multi-longueurs d'onde sont abondamment utilisées, dans le millimétrique et le centimétrique avec les instruments de l'IRAM et du VLA, l'infra-rouge avec le satellite Spitzer (et bientôt Herschel), l'optique et l'infra-rouge proche, avec le CFHT et l'ESO. Plusieurs personnes du groupe sont impliquées dans des programmes-clé, comme le consortium NUGA sur l'interféromètre de l'IRAM, le consortium PrimGal au VLT, ou grand programme du VLT avec Giraffe, et encore l'observation de galaxies à grand z avec APEX. Une des spécialités du groupe est aussi les simulations numériques lourdes, et l'équipe est impliquée à un très fort niveau dans le projet HORIZON (ANR 2005-2008, PI : Romain Teissier, CEA/SAP), programme de formation des galaxies dans un contexte cosmologique. Quelques résultats marquants obtenus dans les 4 dernières années, sont décrits dans les paragraphes suivants.

3.3.2. Construction d'une librairie de fusions de galaxies : Projet HORIZON-GALMER



Base de données VO-Paris : **I. Chilingarian, F. Combes, P. Di Matteo A-L. Melchior, B. Semelin, LERMA, obs. De Paris**

Par des multiples simulations numériques à N-corps (voir Fig. 3.3.1), prenant en compte auto-gravité des étoiles, gaz et matière noire, et modélisant toute une gamme de phénomènes physiques (formation d'étoiles, rétroaction des supernovae, perte de masse des étoiles, métallicité), une vaste variété de fusions de galaxies a été calculée. Des résultats fondamentaux sur l'efficacité des interactions de galaxies dans les flambées de formation d'étoiles ont été établis, comme le fait que les flambées sont plus intenses pour des rencontres

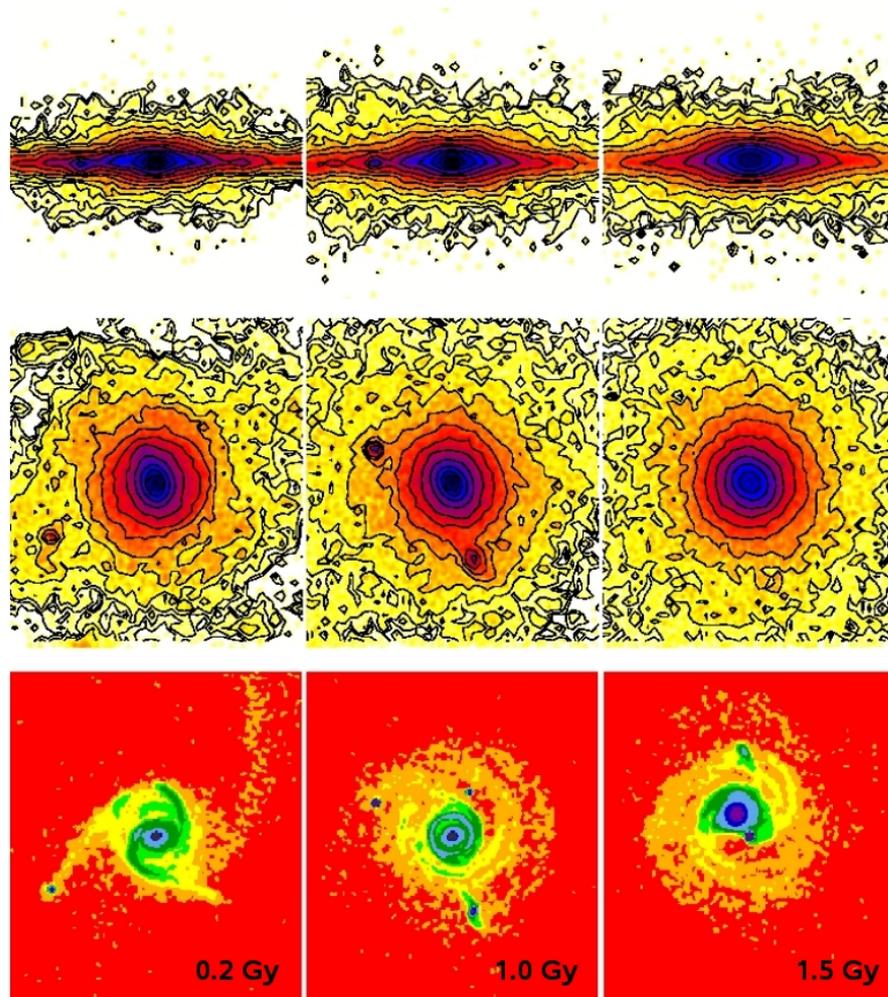


Fig. 3.3.1: Interaction dans le sens direct, entre deux galaxies spirales Sb. En haut : Composant stellaire, vu par la tranche, Au milieu : Composant stellaire, vu de face ; En bas : gaz avec formation d'étoiles, vue de face. (Di Matteo et al 2007, 2008)

rétrogrades et non directes (Di Matteo et al. 2007, 2008). La construction de systèmes galactiques en contre-rotation a aussi été étudiée. La base de données GALMER³ a été implémentée dans l'Observatoire Virtuel Théorique sur le site de l'Observatoire de Paris, afin d'être mise à la disposition des observateurs. Un programme de synthèse de populations stellaires (dérivé de PEGASE) permet de construire les spectres en chaque pixel des images ainsi formées. Les modèles peuvent alors être construits pour prédire les observations avec Herschel ou ALMA. Cette base de simulations n'a pas d'équivalent publié.

3.3.3. Observations et modélisation des courants de refroidissement (« cooling flows »)

Le gaz chaud des amas de galaxies, émetteur de rayons X, est la composante qui domine la masse des baryons, surtout dans les amas riches où il représente 10 fois la masse des galaxies. Le temps de refroidissement de ce gaz chaud est plus grand que l'âge de l'Univers, sauf au

³site web : <http://galmer.obspm.fr>

3. Résultats en dynamique des systèmes astrophysiques

centre des amas, où la densité du gaz le raccourcit. On prévoit donc des flots de refroidissement (« cooling flows ») au centre de certains amas riches, là où en général existe une galaxie particulière, la galaxie cD. Les satellites X Chandra et XMM ont mis en évidence ce phénomène, et ont aussi montré que les quantités de gaz en refroidissement étaient plus petites que prévu, à cause d'un phénomène de réaction ou « rétroaction » négatif : Le gaz qui tombe vers le centre alimente un noyau actif dans la galaxie cD, et celui-ci émet alors des jets radio, qui réchauffent le milieu et retardent le refroidissement.

L'observation dans la molécule CO de gaz moléculaire froid dans les galaxies centrales d'amas avec cooling flows a été effectuée à l'IRAM (30m et interféromètre du Plateau de Bure) par notre équipe. Pour la première fois, l'association de gaz moléculaire froid avec le cooling flow, le gaz ionisé Halpha, a pu être démontrée dans un des amas les plus proches, celui de Perseus (Salomé & Combes 2004, Salomé et al 2006). Le gaz CO froid est observé à grande distance du centre, en général en bordure des cavités formées dans le gaz X par les jets radio.

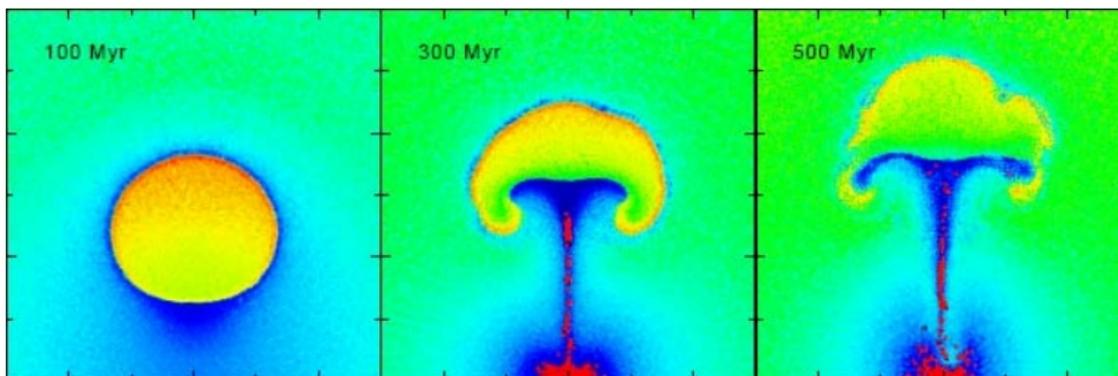


Fig. 3.3.2: Evolution d'une bulle de plasma dans un milieu chaud inter-amas. Les points rouges indiquent la présence de gaz froid ($<10^4\text{ K}$) formé par compression, dans le sillage de la bulle chaude. Chaque boîte correspond à 150 kpc (Revaz et al. 2008 astro-ph/0711.4051)

Des simulations numériques du processus de refroidissement, produit par les jets radio de l'AGN central, ont été proposées. Le phénomène considéré ici est la montée des bulles de plasma chaud, par la poussée d'Archimède, et la compression du gaz aux bords de ces cavités, qui permet au gaz en refroidissement de couler selon des filaments fins vers le centre de l'amas (voir Fig. 3.3.2). Ces simulations hydrodynamiques, à haute résolution spatiale, permettent d'expliquer les observations CO et Halpha (Revaz et al. 2008). Elles mettent en évidence un nouvel effet de rétroaction du jet radio sur le courant de refroidissement, cette fois dans un sens positif.

3.3.4. Dynamique des galaxies en gravité modifiée

La dynamique des galaxies a été étudiée dans le cadre de la gravité modifiée et le modèle MOND en particulier, au cours de la thèse d'Olivier Tiret. Un code numérique multi-grille a été mis au point pour traiter cette dynamique non conventionnelle, et non-linéaire. Les simulations numériques ont montré que la formation de barres dans ce modèle était plus facile

que dans la dynamique newtonienne avec matière noire. La fréquence des barres correspond alors mieux aux observations (Tiret & Combes 2007, 2008). Par contre la friction dynamique est beaucoup plus faible dans ce nouveau modèle, et le temps de fusion entre galaxies est beaucoup plus long. Des simulations d'interactions de galaxies montrent qu'il est toutefois possible de former des queues de marée et même des naines de marée, qui reproduisent de façon satisfaisante les observations (cf. Figure des « Antennes » en couverture de ce document). La dynamique des satellites, et le phénomène de champ extérieur « polarisant » dans MOND, ont aussi été étudiés en détail et donné lieu à plusieurs publications (Tiret & Combes 2007, 2008).

3.3.5. Réionisation et Transfert de rayonnement

L'équipe s'intéresse aussi à la période de réionisation de l'univers, qui correspond à la formation des premières étoiles, qui mettent fin à l'âge sombre. Dans le cadre du projet HORIZON, nous simulons la dynamique d'une portion d'univers de 50 à 100 Mpc de large, en prenant en compte la formation d'étoiles et l'ionisation du milieu environnant. Un programme Monte-Carlo (LICORICE), couplé au code SPH a été mis au point pour traiter le transfert de rayonnement en 3D. Le transfert radiatif est maintenant validé, autant pour le continuum et son couplage à la dynamique que pour le transfert Lyman- α (Baek et al 2008, Iliiev et al, 2008, Semelin, Combes, Baek 2007). Le transfert radiatif est parallélisé en OpenMP. Le degré d'ionisation est suivi en fonction du redshift, entre $z=11$ et 6.

D'autre part, nous essayons de prédire l'effet sur la température du gaz d'hydrogène neutre HI, afin de calculer les possibles cartes de brillance à 21 cm redshifté, c'est-à-dire aux longueurs d'onde métriques, qui vont être observées par LOFAR et SKA (Fig. 3.3.3). Nous avons mis en évidence des effets particuliers dans l'excitation du gaz HI par les photons Lyman- α . L'effet Wouthuysen-Field permet à ces photons de découpler le gaz du fond de rayonnement cosmique, afin d'aligner la température de spin à la température cinétique du gaz. Ainsi le signal HI-21cm pourra être soit en absorption ou en émission. A cause des multiples diffusions des photons Lyman- α , ceux-ci se concentrent autour des sources, au lieu de parcourir de grandes distances avant d'entrer en résonance avec le gaz inter-galactique. Ainsi nous prédisons un contraste plus grand et plus détectable dans le signal. Les travaux sont exploités dans le cadre du SKA Design Study européen.

3. Résultats en dynamique des systèmes astrophysiques

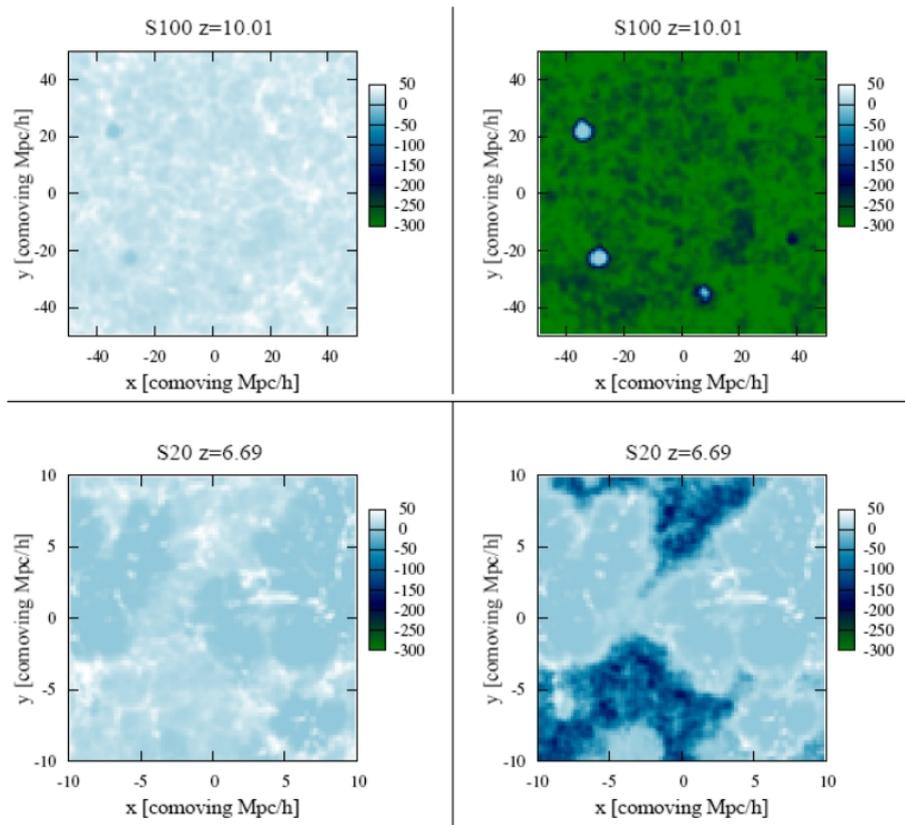


Fig. 3.3.3: Simulations de l'émission du HI-21cm lors de l'Epoque de Réionisation. La palette de couleur à droite de chaque image indique la température de brillance du HI en mK. Deux boîtes de simulations ont été étudiées: $20h^{-1}\text{Mpc} = \text{S20}$ (en bas), et $100h^{-1}\text{Mpc} = \text{S100}$ (en haut). Le degré de réionisation est de 0.5 pour S20 (soit $z=6.69$) et de 1 pour S100 (soit $z=10.01$). A gauche : résultats de l'approximation $T_{\text{spin}} \gg T_{\text{cmb}}$, et à droite $T_{\text{spin}} = T_{\text{gaz}}$ (Baek, di Matteo, Semelin, Combes, & Revaz 2008).

3.3.6. Dynamique galactique dans les amas

Dans les amas de galaxies, les phénomènes d'évolution sont accélérés par la pression dynamique du gaz intra-amas, des interactions de marée entre galaxies, des gradients de forces de l'amas lui-même. La physique des galaxies dépend beaucoup de l'environnement et notamment de la densité moyenne de galaxies. Des simulations hydrodynamiques, utilisant le code SPH, ont été effectuées dans le cadre de la thèse de P. Jachym (en cotutelle avec la république Tchèque), afin de simuler les effets de la pression dynamique et de les comparer aux simples prédictions de la formule globale de Gunn & Gott. D'autre part, les études de galaxies complètement isolées, ont permis de fournir une référence à la dynamique des galaxies en interaction (Jachym et al. 2007).

3.3.7. Modèle de collision pour la morphologie de la galaxie d'Andromède (M 31)

Le satellite Spitzer a mis en évidence la distribution du milieu interstellaire dans le centre de Messier 31, alors que jusqu'à présent le bulbe qui domine en optique masquait la structure du disque jeune dans ces régions (le gaz HI ou CO étant particulièrement pauvre au centre). La structure en anneau décentré qui a ainsi été révélée a permis de mieux comprendre l'origine de la morphologie très particulière de cette galaxie proche. Une simulation de collision de plein fouet avec une petite galaxie compagnon a été proposée, qui permet d'expliquer la formation d'ondes de densité annulaires, et de rendre compte à la fois de l'anneau central, mais aussi de la structure annulaire externe, qui était restée jusqu'à récemment un mystère (Block et al. 2006). Cette structure se superpose à une structure spirale barrée qui pré-existait à la collision, ce qui rend bien compte du battement des ondes dans les parties externes. Ce travail a fait partie de la thèse de F. Bournaud.

3.3.8. Contraintes observationnelles

De nouveaux résultats observationnels ont été obtenus avec les télescopes de l'IRAM : observations de gaz moléculaire dans les galaxies elliptiques de l'échantillon SAURON, alimentation en gaz des AGN de faible luminosité (projet NUGA), cartographie du centre de M81 et décomposition en nuages moléculaires géants afin de faire une étude Viriel, observation de galaxies à flambées d'étoiles à décalage vers le rouge intermédiaire, d'absorbants moléculaires, de galaxies hôtes de supernovae. En particulier, plusieurs publications sont déjà sorties sur des galaxies individuelles du projet NUGA, en relation avec le gaz atomique observé au VLA. Le milieu interstellaire ionisé dans les noyaux de galaxies à flambées d'étoiles, et sa relation avec le milieu moléculaire, ont été également étudiés à partir des raies de recombinaison cm et mm (30m, PdB-IRAM, VLA), en particulier dans M82 et Arp 220 (Rodriguez-Rico et al. 2004 ; 2007).

3.3.9. Projets instrumentaux

L'équipe de J.-M. Lamarre a contribué à la définition et à la réalisation de la mission Planck d'étude du fonds diffus cosmologique et des avant-plans, qui doit être lancée en 2009.

L'équipe de F. Viallefond s'est consacrée à la réalisation de composants logiciels centraux du système de données d'ALMA, en cours d'intégration.

Ces contributions, qui relèvent essentiellement de l'instrumentation, sont décrites dans la section 6 consacrée aux réalisations du laboratoire.

4. Résultats en gravitation, relativité et univers primordial

4.1. Gravitation et Relativité

Ont contribué aux travaux de l'équipe «Gravitation et relativité» entre 2004 et 2008 :

5 chercheurs et enseignants-chercheurs : Marie-Christine Angonin, Cécile Barbachoux, Christian Bordé, Fabrice Debbasch, Philippe Tourrenc(† 2007)

3 ITA et IATOS : Gérard Boudesseul, Gérard Gauron, Béatrice Guibal

3 thèses ont été soutenues : Charles Antoine (2004), Pacôme Delva (2007), Claire Chevalier (2007)

2 visiteurs longue durée : Nilton Oscar Santos, A. Wang

4 chercheurs associés de l'Observatoire de Paris : Gérard Le Denmat, Gilbert Marcihacy, Jérôme Gariel, Nilton Oscar Santos

Publications pendant la période 2004 à mi-2008:

ACL: 51 (38) articles publiés dans une revue à comité de lecture

ACT: 25 (15) communications avec actes dans un congrès international

Au LERMA, le thème Gravitation et Relativité est principalement développé au sein de l'équipe ERGA de l'Université Pierre et Marie Curie (UPMC), implantée sur le site d'Ivry sur Seine, et composée pour l'essentiel d'enseignants-chercheurs de l'Université UPMC. Le bilan présenté ici concerne trois thématiques :

- « Gravitation relativiste et astrophysique »
- « Physique statistique et gravitation »
- « Aspects théoriques de la gravitation expérimentale »

4.1.1. Gravitation relativiste et astrophysique

Personnes concernées : C. Barbachoux, F. Debbasch, J. Gariel (associé), G. Le Denmat (associé), et G. Marcihacy (associé)

Collaborateurs : L. Herrera (Université de Caracas, Venezuela), N.O. Santos (Rio de Janeiro, Brésil), M.A.H. Mac Callum (Queen Mary College, England), R. Colistete (Université de Vitoria, Brésil), A.Wang (Baylor University, Waco, Texas, USA)

9 articles dans des revues à comité de lecture (2004 à juillet 2008)

Trois domaines de la Relativité Générale (RG) ont été étudiés : les métriques axisymétriques, l'effondrement gravitationnel, et l'énergie sombre en cosmologie.

4. Résultats en gravitation, relativité et univers primordial

a) *Les métriques axisymétriques en RG*

Nos travaux concernent l'obtention et l'étude des solutions axisymétriques stationnaires, ainsi que leur sens physique lié à leur comportement asymptotique, en vue de leur application en astrophysique.

a) Par transformation de la solution Kerr-NUT nous obtenons une nouvelle solution avec un bon comportement asymptotique pour toute valeur du NUT- paramètre « l ». La nouvelle solution correspond à une solution de Kerr paramétrisée, le dit « NUT-paramètre » étant lié à la forme de l'ergosphère (Gariel et al, 2004).

b) Nous avons cherché des solutions stationnaires par la méthode de séparation simple des variables en coordonnées de Weyl. Nous trouvons des solutions paramétrisées par une transcendante de Painlevé de type PIII à deux constantes arbitraires (Gariel et al, 2006).

c) Nous utilisons une extension, dite « S-séparation », de la méthode de simple séparation des variables, pour obtenir des solutions transcendantes des équations de champ (Gariel et al, 2008). Ces solutions dépendent de fonctions définies par Painlevé comme solutions d'une équation différentielle du troisième ordre, irréductible à une transcendante de Painlevé usuelle. L'équation satisfait les conditions nécessaires, mais non suffisantes, pour avoir des points critiques fixes.

b) *L'effondrement gravitationnel*

Le but est de construire des modèles d'effondrement gravitationnel (stellaire) de plus en plus réalistes, en tenant compte d'effets dissipatifs et de la charge.

a) La solution générale obtenue pour un fluide radiatif sans cisaillement, en imposant une métrique sphérique non statique conformément plate, est raccordée à une métrique extérieure (radiative) de Vaidya. Nous présentons ensuite un modèle physique simple donnant une solution approchée montrant le rôle des processus de relaxation et le lien étroit entre dissipation et l'inhomogénéité de densité (Herrera et al 2004).

b) Nous avons résolu les équations de champ (avec conditions de régularité et de raccordement requises) décrivant des distributions de matière à symétrie cylindrique raccordées à un espace-temps vide de Levi-Civita (Herrera et al, 2005). Nous avons montré que la solution conformément plate avec mêmes composantes principales des tensions représente un fluide incompressible. Nous avons prouvé aussi que toute source statique cylindrique conformément plate ne peut pas être raccordée via les conditions de Darmois à l'espace-temps de Levi-Civita. En outre des arguments sont avancés pour montrer que quand la masse par unité de longueur newtonienne atteint $\frac{1}{2}$, l'espace-temps a la symétrie plane.

c) Nous avons étudié l'effondrement d'une sphère chargée soumise à des effets dissipatifs sous forme de flux de chaleur, de rayonnement et de viscosité de cisaillement (Di Prisco et al, 2007).

c) *L'énergie sombre ou « Dark Energy » (DE)*

a) Nous avons développé notre modèle thermodynamique liant la DE à l'horizon-événement de l'espace FRW de la Cosmologie (Gariel et al, 2005). Nous l'avons confronté aux résultats donnés par l'observation des SNIae, et comparé, de façon théorique, au modèle holographique de Li. Celui-ci a retrouvé en 2004 de façon indépendante la loi que nous préconisons en 1999 à partir d'arguments thermodynamiques pour l'évolution de la densité d'énergie de la DE. Nos résultats sont en très bon accord avec les observations des SNIae.

b) Nous avons noté une contradiction pour la définition de l'énergie dans certains modèles

utilisant l'horizon apparent, dû à une extension immédiate, sans précaution, de la « first law » des trous noirs au cas cosmologique. Nous défendons l'utilisation de l'horizon évènement dans un modèle holographique et montrons que cela nécessite de remplacer la première loi des trous noirs par une équation de Gibbs associée à la thermodynamique de l'énergie sombre incluant la pression, permettant de supprimer ainsi la contradiction précédente (Barbachoux et al, 2008).

4.1.2. Physique statistique et gravitation

Personnes concernées : F. Debbasch, C. Chevalier (Doctorante, thèse soutenue nov. 2007)

Collaborateurs : Y. Ollivier (UPMA, ENS Lyon), J. P. Rivet (OCA), M. Moreau (LPTMC/P6), M. Brachet (LPS/ENS), W. van Leeuwen (Amsterdam), N. Boustamante (Univ. Warwick)

14 articles dans des revues à comité de lecture (2004 à juillet 2008)

a) **Gravitation relativiste**

Nous avons prouvé qu'il était possible, de manière physiquement réaliste et mathématiquement cohérente de plonger n'importe quel espace-temps courbe de la relativité générale dans un espace-temps plat de dimension supérieure. Il s'agit de la solution d'une controverse vieille de plusieurs dizaines d'années.

La physique statistique intervient sous plusieurs aspects.

Nous avons construit en 2004 une théorie champ moyen de la gravitation relativiste, utile pour prendre en compte les effets de précision finie dans les observations astrophysiques, et indispensable à la cosmologie physique. Des applications à la physique et à l'astrophysique des trous noirs sont développées depuis 2005. On doit à cette théorie la suggestion et la confirmation qu'au moins une partie de l'énergie noire est peut-être la traduction à grande échelle de fluctuations à petites échelles non observables aujourd'hui.

L'étude des milieux continus relativiste est également poursuivie. En ce qui concerne les processus stochastiques, l'étude du processus relativiste Ornstein-Uhlenbeck (ROUP) a été étendue à la relativité générale et appliquée à des diffusions dans l'univers en expansion, avec construction d'un théorème fluctuation-dissipation hors équilibre pour une nouvelle classe de diffusion cosmologique.

L'influence des fluctuations de la géométrie sur des processus stochastiques non relativistes est étudiée à cause de son intérêt pour la diffusion sur des interfaces biologiques et pour préparer aux calculs relativistes qui seront développés pour leur intérêt cosmologique. Une première modélisation stochastique de flux de particules induit par un gradient thermique (effet Ludwig-Sorret) a aussi été obtenue et sera appliquée à la diffusion d'éléments dans les étoiles. Enfin, de nouvelles relations constitutives hydrodynamiques loin de l'équilibre ont été développées.

D'autres travaux récents concernent l'évolution de singularités complexes de l'équation d'Euler, avec mise en évidence d'un nouveau régime asymptotique du système d'Euler permettant la modélisation des écoulements turbulents et, en théorie cinétique relativiste, la première démonstration de l'équation de Boltzman relativiste en espace-temps courbe et la résolution d'une controverse sur la distribution de Jüttner. Notons enfin que nous sommes partie prenante d'un contrat ANR Géométrie Robuste et Espace-temps Fluctuants (GREF) obtenu pour la période 2005-2008 (Coll. Yann Ollivier).

4. Résultats en gravitation, relativité et univers primordial

4.1.3. Aspects théoriques de la gravitation expérimentale

*Personnes concernées : M-C. Angonin, P. Delva (Doctorant, 2007), et Ph. Tourrenc († 2007)
6 articles dans des revues à comité de lecture (2004 à 2007), 6 conférences invitées*

Ce compte-rendu présente notamment des travaux effectués avec M. Varvella et X. Ovido. Ces travaux ont été effectués aussi en collaboration avec plusieurs membres du SYRTE, du LKB et une équipe de l'Institut d'Optique Quantique à Hannover (Allemagne). Le soutien du GdR GREX a été un élément clé dans cette recherche.

Notre équipe a mené une étude systématique et complète du problème de l'amplification gravitationnelle des ondes gravitationnelles. Tout d'abord, il était important de présenter un bilan des caractéristiques des ondes gravitationnelles et des ondes électromagnétiques pour s'assurer que les effets d'amplification gravitationnelle ne diffèrent pas. Puis, nous avons estimé quels effets de diffraction peuvent entrer en jeu dans le phénomène. La conclusion est que l'approximation géométrique est valide, au moins pour les détecteurs terrestres. Les effets de diffraction n'interviennent pas. Cela élimine une grande partie des possibilités de grandes amplifications décrites dans certains articles sur le sujet (Arnaud-Varvella et al., 2004).

Nous avons ensuite estimé le nombre de signaux supplémentaires apportés par la présence d'une lentille gravitationnelle dans le champ d'observation. Plusieurs modélisations ont été explorées ainsi que plusieurs configurations de sources et de lentilles; dans tous les cas, l'accroissement est si faible que la probabilité pour qu'un tel événement se produise peut être considérée comme négligeable. Il est possible de modérer un peu cette conclusion en faisant remarquer que, si un événement de forte amplification gravitationnelle se produit, il sera détecté beaucoup plus facilement que les sources normales, perturbant les statistiques de détection des sources lointaines (Arnaud-Varvella et al., 2004).

Notre équipe s'est aussi attaquée au difficile problème de la modélisation en relativité générale des expériences aussi bien au sol que spatiales. Le formalisme et la philosophie de cette théorie sont incompatibles avec des descriptions expérimentales usuelles ce qui induit des difficultés récurrentes pour déterminer la modélisation relativiste correcte d'une expérience donnée. Des solutions ad-hoc ont été trouvées pour quelques cas particuliers. Nous avons déterminé une méthode systématique pour l'étude des senseurs gravito-inertiels en développant notamment une discussion approfondie sur les choix des métriques, parmi lesquelles la métrique de Fermi dont nous avons particulièrement étudié les conditions d'utilisation (Delva, Thèse 2007 ; Delva et al., 2006 et 2007).

Ces méthodes ont été mises en œuvre pour les calculs liés à deux projets d'expérience : le satellite HYPER dont le but est la mesure de l'effet Lense-Thirring, et la détection des ondes gravitationnelles avec un interféromètre à onde de matière. Dans le premier cas, les calculs obtenus ont donné des contraintes sévères sur la faisabilité d'une telle mission. Le calcul a été étendu à d'autres configurations de mission dans le Système Solaire et a montré que la mesure de l'effet Lense-Thirring par des interféromètres à onde de matière reste dans tous les cas un objectif expérimental extrêmement difficile à réaliser (Tourrenc et al., 2004 ; Angonin et al., 2004 et 2007 ; Delva et al., 2006 et 2007).

Du côté de la détection des ondes gravitationnelles par un interféromètre à onde de matière, nous avons apporté une conclusion à une polémique vive sur le choix de la métrique, en montrant qu'un tel détecteur ne peut rivaliser avec les interféromètres optiques comme Virgo ou LIGO, mais qu'il pourrait être compétitif avec des expériences de type LISA si les

développements technologiques liés à l'augmentation du flux ou de la déviation des atomes avancent suffisamment dans les années à venir. L'avantage d'un tel détecteur est qu'il serait d'une taille de l'ordre du mètre et qu'il pourrait être, par exemple, facilement refroidi à très basse température pour se soustraire de nombreuses sources de bruit (Delva et al., 2006 et 2007).

Enfin, une première approche a été faite pour l'étude des cavités atomiques comme détecteurs d'ondes gravitationnelles. Nous avons considéré des atomes piégés dans un potentiel, et avons trouvé la probabilité pour que la cavité change d'état quantique sous l'effet d'une onde gravitationnelle, qui peut être vue comme un champ classique perturbateur. La probabilité se trouve être très faible, et il y a peu de chance pour qu'un tel détecteur soit un jour assez performant pour concurrencer ceux existants (Delva, Thèse 2007).

4.2. Univers primordial et modèle standard de l'Univers

Ont contribué aux travaux de l'équipe «Univers primordial» entre 2004 et 2008 :

1 chercheur : Norma Sanchez

1 post-doctorant : Francisco Cao

1 visiteur longue durée : Marina Ramon Medrano

1 chercheur associé de l'Observatoire de Paris : Hector de Vega

Publications pendant la période 2004 à mi-2008:

ACL: 53 (21) articles publiés dans une revue à comité de lecture

ACT: 26 (6) communications avec actes dans un congrès international

INV: 8 (5) conférences invitées dans un congrès international

Collaborateurs:

Daniel Boyanovsky, (Univ of Pittsburgh, Etats Unis) , Claudio Destri (INFN Univ Milano-Bicocca, Italie), Maria Cristina Falvella, Herschel-Planck Project Manager, Agence Spatiale Italienne, Rome, Italie

L'équipe, forte de nombreuses collaborations internationales, réunit un ensemble de compétences uniques dans la théorie de l'Univers primordial et sa confrontation aux observations du rayonnement de fond cosmique. L'Ecole Internationale d'Astrophysique Daniel Chalonge qu'elle organise annuellement à l'Observatoire de Paris est un laboratoire d'idées où plusieurs lignes de recherche nouvelles ont vu le jour, produit des résultats nouveaux et formé des jeunes chercheurs. Les résultats suivants ont été trouvés au cours des 4 dernières années.

4.2.1. Théorie effective de l'inflation et contraintes observationnelles

a) Une théorie effective de l'Inflation de l'univers primordial a été construite en rendant explicites les échelles d'énergie physiques relevant du problème: l'échelle d'énergie de

4. Résultats en gravitation, relativité et univers primordial

l'inflation, l'échelle de Planck et l'échelle de Hubble de l'inflation. Le cadre naturel pour d'écrire les résultats du rayonnement de fond cosmique (CMB) + structure à grande échelle (LSS) + énergie noire est une théorie effective de l'inflation avec un potentiel d'une forme universelle bien déterminée (potentiel quartique générique). Cette clarification essentielle permet de simplifier, comprendre et placer l'inflation dans le cadre de la grande unification et en analogie avec d'autres théories physiques effectives, comme la supraconductivité et le modèle de pions et photons (dans l'esprit de Guinsburg-Landau). Plusieurs conséquences de cette théorie ont été calculées pour la première fois.

b) Les corrections quantiques aux observables du CMB montrent un effet nouveau d'amplification infrarouge et des effets ultraviolets liés aux « anomalies de trace » (objets mathématiques observés en physique des particules), que pour la première fois nous avons reliés aux fluctuations CMB observables.

c) Un nouveau régime non-linéaire d'inflation rapide (« fast roll ») précédant l'inflation lente (« slow roll ») est découvert et apporte un éclairage nouveau sur les conditions initiales de l'inflation, et leur influence sur les observables CMB.

d) Une théorie générale de la suppression du quadrupole du CMB, incluant cette phase d'inflation rapide, prédit une suppression de 15 à 20% de leur amplitude.

e) Le rapport r = tenseur/scalaire, la variation de l'indice spectral (« running index »), et l'index spectral scalaire n_s des fluctuations primordiales sont prédits en fonction des paramètres du potentiel.

f) L'analyse des données WMAP par la méthode de Monte-Carlo nous a permis de déterminer la distribution des probabilités de r et n_s pour notre théorie effective de l'inflation, et d'en déduire dans ce cadre conceptuel une limite inférieure au rapport r = tenseur/scalaire (ie. une quantité non nulle d'ondes gravitationnelles primordiales issues de l'inflation).

4.2.2. Matière noire

De nouveaux résultats ont été obtenus en combinant méthodes analytiques, simulations numériques, et analyse des observations :

a) Détermination de l'échelle de masse des particules candidates de la matière noire, à l'échelle du keV. Les WIMPS (« weakly interacting particles » à l'échelle du GeV) en sortent très défavorisés. Explication des petites structures observées dans les halos et coeurs des galaxies.

b) Détermination de la fonction de transfert, de la longueur de « free streaming », de l'influence des conditions initiales, et de la statistique des particules sur la concentration gravitationnelle de la matière noire.

4.2.3. Trous noirs

a) Nous avons travaillé à une unification conceptuelle des trous noirs, des particules élémentaires, et des états primordiaux de l'univers. Les régimes semiclassiques et quantiques ont été décrits, ainsi que leur température et entropie, et la transition de phase d'un régime à l'autre, analogue à celle des systèmes autogravitants.

b) Évaporation des trous noirs : « la fin de l'histoire » : Nous avons décrit l'étape finale de l'évaporation, et son spectre d'émission qui contient la formule de Hawking comme cas particulier. Une transition de phase a été trouvée : il n'y a pas de « paradoxe » ou « perte de

4.2. Univers primordial et modèle standard de l'Univers

l'information » et le trou noir vers sa fin se désintègre comme une corde ou particule quantique, en radiation pure (non thermique) de particules (gravitons).

5. Résultats en instrumentation et télédétection

5.1. Télédétection des atmosphères et surfaces planétaires

Ont contribué aux travaux de l'équipe «Télédétection des atmosphères et surfaces planétaires» entre 2004 et 2008 :

3 chercheurs et enseignants-chercheurs : Eric Defer, Pierre Encrenaz, Catherine Prigent

3 IATOS (CDD) : Naima Houti, Elodie Jaumouille, Carlos-Javier Jimenez Maquedano

2 post-doctorants : Ingo Meirold-Mautner, Fabrice Papa

1 doctorant dont la thèse est actuellement en cours : Alexandra de Lima (cotutelle Brésil CPTEC/FAPESA)

1 thèse a été soutenue : Emmanuel Cordisco (2005)

2 chercheurs associés de l'Observatoire de Paris : Juan Pardo Carrion (CSIC), Filipe Aires (LMD)

Publications pendant la période 2004 à mi-2008:

ACL: 96 (71) articles publiés dans une revue à comité de lecture

ACT: 58 (44) communications avec actes dans un congrès international

INV: 5 (5) conférences invitées dans un congrès international

Principales collaborations :

En France : LSCE, LA, LEGOS, Observatoire de Bordeaux, IPGP, ASTRIUM, ALCATEL, CLS...

En Europe : ECMWF, Univ. Cologne, UK Met Office, Université de Kiruna...

Aux USA : NASA/GISS (W. Rossow), JPL (S. Gulkis), NOAA, AER

Contrats (depuis 2005) :

En France : ANR (1), CNES/TOSCA (1), PNTS (2), ACI cryosphère

En Europe : ESA (6), EUMETSAT (1), UE (1)

Aux US : NASA (1), NSF (1)

L'activité de l'équipe s'articule autour de la radiométrie micro-onde. De nombreux aspects sont abordés, de l'analyse des observations satellitaires à la modélisation du transfert radiatif, en passant par l'instrumentation ou le développement de méthodes d'inversion. Cette thématique dans le laboratoire est issue, à l'origine, des développements instrumentaux du GEMO et lui reste très liée, comme le montrent les projets actuels couplant des développements techniques et scientifiques.

Deux axes de recherche principaux sont explorés : l'analyse des atmosphères claires et

5. Résultats en instrumentation et télédétection

nuageuses, et la caractérisation des surfaces terrestres et planétaires. L'objectif est dans un premier temps de comprendre la physique du milieu et, dans un second temps, d'estimer avec précision les variables atmosphériques ou de surface, à partir des observations satellitaires. La complexité des problèmes à résoudre nous a conduit à privilégier l'exploitation simultanée d'un maximum d'informations issues de satellites, de modèles ou d'observations in situ. Une grande partie des études concerne la Terre. L'implication dans l'analyse d'autres objets du système solaire (i.e., Titan, comètes) est complémentaire, avec des méthodes proches sur des thématiques similaires.

5.1.1. Analyse des atmosphères claires et nuageuses

Par rapport aux domaines visible et infra-rouge, les micro-ondes sont moins perturbées par la présence de nuages et dans une certaine mesure, sondent au travers des nuages. Des données satellites jusqu'à 190 GHz sont maintenant disponibles pour la météorologie (AMSU, SSMI/S, bientôt SAPHIR), pour fournir des profils en température et en vapeur d'eau même par ciel nuageux, mais leur exploitation est toujours très partielle : en effet, jusqu'à présent, les observations microondes étaient essentiellement utilisées au-dessus des océans, par manque d'informations sur les émissivités microondes des surfaces continentales. Dans un premier temps, nous avons estimé les émissivités microondes des terres émergées (voir section suivante) à partir d'observations satellitaires microondes, en nous aidant de données auxiliaires (mesures satellitaires infra-rouges, profils atmosphériques des centres météorologiques) pour soustraire la contribution de l'atmosphère au signal mesuré. Puis, en collaboration avec Filipe Aires du LMD, nous avons mis au point une méthodologie pour inverser les profils atmosphériques au-dessus des terres émergées à partir des observations microondes. Cette méthode est appliquée aux données des instruments satellitaires SSM/I, AMSU et est en cours de développement pour l'instrument Saphir sur le satellite Méga-Tropiques. Elle ouvre la voie à l'exploitation des observations microondes au-dessus des terres dans les centres opérationnels météorologiques.

En ce qui concerne les atmosphères nuageuses, nous nous focalisons sur l'analyse de la phase glace dans les nuages. Les travaux sur la diffusion polarisée au-dessus des nuages ont montré la sensibilité des microondes, non seulement à la quantité de glace dans le nuage, mais aussi à la forme, la taille et l'orientation des particules. L'analyse d'observations simultanées dans les micro-ondes, passives et actives, l'infra-rouge et le visible (détection des éclairs) nous a permis de mettre en évidence des processus microphysiques et électriques dans la convection. D'autre part, en collaboration étroite avec le LA (J.-P. Pinty et J.-P. Chaboureau) et Juan Pardo (IEM, Madrid), nous travaillons à l'évaluation du modèle de nuages Méso-NH. Pour la première fois, des simulations micro-ondes calculées avec un modèle de transfert radiatif (ATM) à partir d'un modèle de nuage (Méso-NH) ont été directement comparées avec succès à des observations satellitaires. De plus, des développements instrumentaux sont en cours dans les domaines millimétrique et sub-millimétrique (entre 200 et 900 GHz), pour fournir des mesures intermédiaires entre les observations microondes et infra-rouges, afin non seulement de permettre une meilleure caractérisation des nuages de glace, mais aussi d'envisager des observations depuis une orbite géostationnaire avec des antennes de taille raisonnable. Nous sommes associés à la préparation de ces projets de mission, à la fois scientifiquement et techniquement en collaboration avec le GEMO. Ces travaux font l'objet de plusieurs contrats (ESA, Eumetsat, CNES).

En ce qui concerne la haute atmosphère, l'implication dans l'analyse des observations du satellite ODIN dans le mode aéronomie se poursuit, ainsi que les études cométaires et planétaires. Ces travaux s'effectuent dans le cadre de collaborations, avec le SA et

l'Observatoire de Bordeaux pour la partie aéronomie et avec le LESIA pour la partie cométaire et planétaire.

5.1.2. Caractérisation des surfaces continentales

Notre activité sur les surfaces continentales terrestres s'est au départ fondée sur l'analyse des observations microondes passives, avant de s'étendre à une large gamme d'observations. Nous avons tout d'abord calculé les émissivités continentales en microondes directement à partir d'observations satellitaires, en nous aidant de données auxiliaires (observations infrarouges et analyses météorologiques) pour retirer la contribution de l'atmosphère et la modulation du signal par la température de la surface. Des atlas d'émissivités microondes ont été mis à disposition de la communauté (<http://geo.obsmp.fr>). Par inversion des observations micro-ondes au-dessus des terres, une fois connues les émissivités micro-ondes, on a montré qu'on pouvait estimer les températures des surfaces quelle que soit la couverture nuageuse, alors que jusqu'à présent les observations infrarouges ne fournissaient que des estimations par ciel clair.

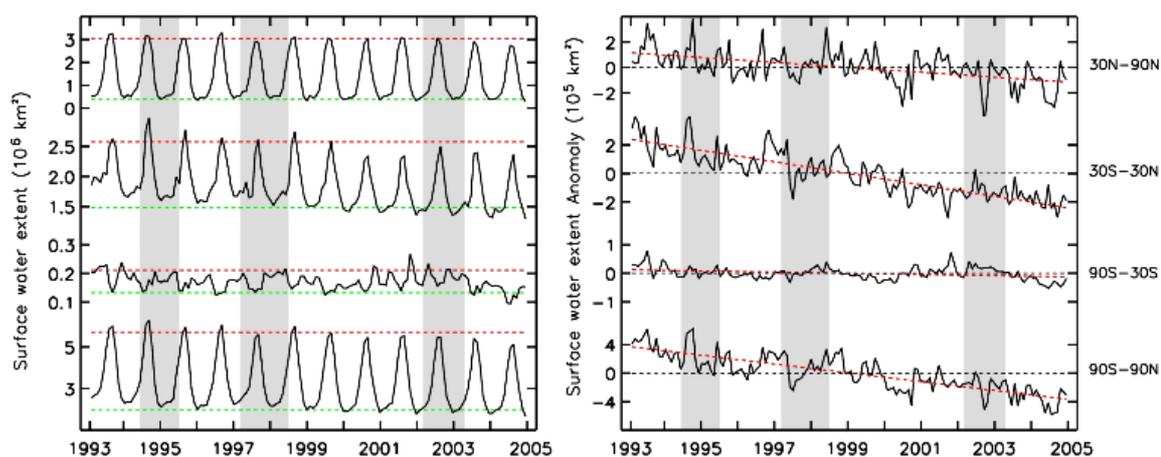


Fig. 5.1.1: Estimation multi-satellite de la surface des zones terrestres inondées (gauche) et de leurs anomalies (droite) pour la période 1993-2005, sur plusieurs intervalles de latitude.

L'abondance et la diversité des observations satellitaires disponibles à l'échelle de notre planète nous permettent maintenant d'évaluer les différentes techniques de télédétection pour leur aptitude à caractériser les surfaces continentales. Nous avons entrepris de systématiquement comparer les sensibilités des observations satellitaires du visible aux micro-ondes aux différentes variables de surface (température, humidité, végétation, flux de chaleur latente et sensible surface) et avons développé des méthodes pour estimer ces variables à partir de combinaisons d'observations satellitaires, à l'échelle du globe. Par exemple, une méthode originale, fondée sur l'utilisation simultanée de différentes observations satellitaires, a été développée pour produire les premières estimations globales des zones inondées sur plusieurs années : ces zones ne couvrent que $\sim 5\%$ du globe, mais leur variabilité joue un rôle clé dans les cycles hydrologiques et biochimiques, tout spécialement dans la production de méthane, puissant gaz à effet de serre. Nous travaillons en collaboration avec les climatologues (LSCE, Météo-France, NASA/GISS) sur ces thématiques. Nous avons un rôle de pionniers dans ces analyses multi-satellites pour la caractérisation des surfaces terrestres.

5. Résultats en instrumentation et télédétection

Nous participons à différents groupes de travail internationaux (par exemple, nous sommes représentants de la problématique « surface » dans le GEWEX Radiation Panel) et distribuons différents produits de surface à la communauté (atlas des émissivités microondes, climatologie des zones inondées, longueur de rugosité dans les régions arides...).

Les travaux sur la surface de Titan combinent eux aussi les différents modes d'observations du radar de Cassini (mode radiométrique, SAR et radar). Ils ont mis en évidence des formations dunaires, de jeunes cratères, et très récemment la présence d'éthane et méthane liquide entre 70° et 80° de latitude Nord. Ces analyses vont se poursuivre, en collaboration avec le JPL, l'Observatoire de Bordeaux (P. Paillou), Paris VII et l'IPGP où ils ont donné lieu à des embauches récentes (S. Rodriguez à Paris VII et E. Heggy à l'IPGP). Ces études sont en phase avec les efforts effectués pour la caractérisation des surfaces arides terrestres, qui reposent aussi sur des observations satellites multiples et complétées par des mesures in situ des propriétés diélectriques des roches et sables au GEMO et au PIOM (G. Ruffié). On signalera aussi la participation à l'étalonnage d'instruments en vol, en utilisant les surfaces des planètes et astéroïdes comme référence. Par exemple, il est prévu d'effectuer un inter-étalonnage des instruments HIFI, PACS et SPIRE à bord du satellite Herschel par cette méthode.

Dans le projet Rosetta, mission pour l'étude de la comète Churyumov-Gerasimenko, le GEMO a participé à la réalisation de l'instrument Miro. Le satellite est parti avec succès en 2004 pour une rencontre de la comète en 2015. Nous prévoyons l'étude de la surface de deux astéroïdes pendant le vol vers la comète, avant l'étude de la comète elle-même.

5.2. Groupe d'étude des micro-ondes (GEMO)

Ont contribué aux travaux de l'équipe «Etudes micro-ondes» entre 2004 et 2008 :

2 chercheurs et enseignants-chercheurs : Alain Maestrini, Morvan Salez

13 ITA et IATOS : Michèle Ba Trung, Gérard Beaudin, Faouzi Boussaha, Frédéric Dauplay, Yan Delorme, André Deschamps, Alexandre Feret, Jean-Michel Krieg, Patrice Landry, Benoît Lecomte, Roland Lefevre, Marie-Claude Lemonnier, Laurent Pelay

1 post-doctorant : Bruno Guillet

5 doctorants dont la thèse est actuellement en cours : Pierre Gellie, Cécile Jung, Wei Miao (co-tutelle Université Paris 6/Observatoire de Purple Mountain (Chine)), Jeanne Treuttel, Hui Wang

2 thèses ont été soutenues : Bertrand Thomas (2004), Jean Baubert (2005 en co-tutelle Université Paris 6/Université Chalmers à Göteborg (Suède))

2 chercheurs associés de l'Observatoire de Paris : Maurice Gheudin, Jean-Marie Munier

Publications pendant la période 2004 à mi-2008:

ACL: 25 (25) articles publiés dans une revue à comité de lecture

ACT: 45 (45) communications avec actes dans un congrès international

INV: 3 (3) conférences invitées dans un congrès international

5.2.1. Généralités sur les activités en R&D et instrumentation du GEMO

Le GEMO (groupe d'étude des micro-ondes) existe depuis 1982. C'est une équipe de recherche technologique et instrumentale dont l'expertise est la détection hétérodyne entre 100 GHz et 3 THz.

Il comprend aujourd'hui 23 personnes dont 16 permanents. Parmi eux: 3 chercheurs instrumentalistes, dont le dernier recruté, en concours CR1 2008, rejoindra effectivement le laboratoire en février 2009, 6 ingénieurs de recherche, tous docteurs, 3 ingénieurs d'études, 2 assistants-ingénieurs, 2 techniciens et 5 doctorants.

La principale réalisation de la période écoulée est celle du premier canal de l'instrument hétérodyne HIFI de l'Observatoire spatial Herschel de l'ESA, dont les modèles ont été livrés au Consortium HIFI en 2005 et 2006. Ce travail est l'aboutissement d'un long investissement en recherche technologique qui a permis de dessiner les détecteurs, réalisés ensuite avec l'IRAM, et de proposer un concept original de mélangeur, dont les performances mesurées font aujourd'hui l'état de l'art. Ces mélangeurs ont été construits, validés et livrés durant cette période. Le laboratoire a aussi fortement contribué à la conception des oscillateurs locaux de HIFI, qui ont été réalisés par le JPL.

Le GEMO s'implique dans la microtechnologie des composants, la simulation électromagnétique de leur implantation dans des circuits de détection, et la réalisation de dispositifs et de systèmes destinés principalement à l'astrophysique et à la géophysique :

- R&D et fabrication de composants et de dispositifs à semiconducteurs Schottky et à supraconducteurs (jonctions supra « SIS », bolomètres à électrons chauds « HEB ») pour la détection hétérodyne en ondes submillimétriques et Thz. Les objectifs principaux sont l'amélioration des performances des composants, et le développement de plans focaux utilisant des composants intégrés, pour l'imagerie.
- participation au développement et à la réalisation d'instruments pour des expériences spatiales en sciences de l'univers, décrits en détail dans la section 6 :
 - astrophysique (canal 1 de l'instrument hétérodyne HIFI du satellite Herschel, études)
 - planétologie (instrument MIRO sur la sonde cométaire Rosetta, ...)
 - télédétection spatiale (instrument SAPHIR sur le satellite Megha –Tropiques)
- collaboration à des expériences de laboratoire (CEA, ENSTA, Ecole polytechnique) : détection du rayonnement de plasmas créés par des lasers de puissance, caractérisation de matériaux supraconducteurs à haute température critique...).

Pour ces activités le GEMO s'appuie sur les moyens technologiques du Pôle Instrumental de l'Observatoire de Paris (OP), géré par le GEPI, en partenariat avec le LERMA pour les moyens de salle blanche, et sur plusieurs centrales technologiques en France et à l'étranger : l'IEF (Institut d'Electronique Fondamentale à Orsay), le LPN (Laboratoire de Photonique et de Nano-structures à Marcoussis), l'IEMN (Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie à Lille), le CEA (Commissariat à l'Energie Atomique à Saclay et Grenoble), le LAAS (Laboratoire d'Architecture et d'Analyse des Systèmes à Toulouse), les Universités de Chalmers (Suède) et de Moscou, le JPL à Pasadena...

Le GEMO ne dispose pas des métiers indispensables pour conduire seul des développements instrumentaux d'envergure : aussi s'insère-t-il plutôt dans les grands projets au niveau de ses moyens humains et de ses capacités d'expertise dans le domaine de la détection hétérodyne à très faible bruit en micro-ondes, ondes mm et submm, pour des applications en astrophysique,

5. Résultats en instrumentation et télédétection

planétologie et observation de la Terre. Les réalisations que le GEMO a conduites, et auxquelles il a contribué durant la période de ce rapport sont décrites dans la section "Réalisations" du présent rapport.

5.2.2. Points forts des activités R&D de la période 2004-2008

Les développements (technologiques et systèmes) de **dispositifs miniaturisés à composants nano-Schottky** performants (matrices de mélangeurs et oscillateurs locaux intégrés) sont destinés à l'instrumentation spatiale pour l'étude des surfaces et des atmosphères planétaires. Une collaboration a démarré en 2006 avec le LPN (Marcoussis) et le RAL (GB) dans le cadre de financements ESA et CNES (ref : Jung et al 2008; Wang H. et al 2008). Cette activité fait l'objet de 3 thèses cofinancées par le CNES et le CNRS qui ont débuté entre fin 2005 et fin 2007 sous la direction d'A. Maestrini et de G. Beaudin (WANG Hui, boursière CNRS- ABmm jusqu'en fin 2008 ; JUNG Cécile, boursière CNES-Astrium jusqu'en fin 2009 ; TREUTTEL Jeanne, boursière CNRS-CNES jusqu'en fin 2010).

La caractérisation d'une **source submm à supraconducteur** de type « Flux-Flow Oscillator » (FFO) à multijonctions SIS en Nb constitue une des étapes clés, car elle permet de lever un verrou théorique important quant à la capacité des multijonctions à produire des signaux submillimétriques exploitables comme source OL (niveau de puissance, largeur de la raie spectrale, stabilité de fréquence). À cet effet, des mesures ont été réalisées en détection directe et en hétérodyne. Les premiers résultats obtenus, qui constituent une première expérimentale, démontrent que les multijonctions sont capables de produire des signaux submillimétriques. Il s'agit de résultats très encourageants qui conduisent à des comparaisons fines avec les modèles théoriques en cours d'élaboration en coopération avec l'Université de Rouen (ref : Boussaha et al 2008; Salez et al.2007).

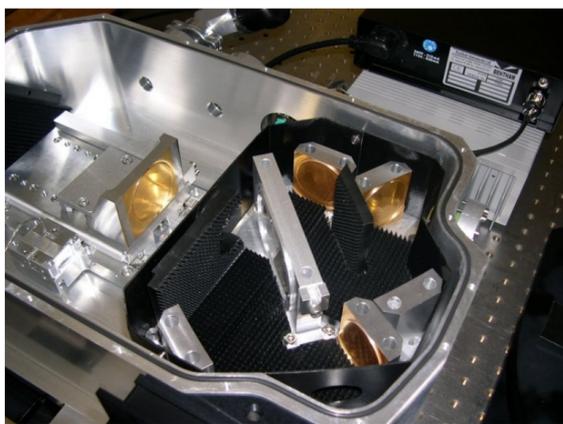


Fig. 5.2.1: Interféromètre du banc de tests FTS submm développé au GEMO.

spectrométrie à transformée de Fourier (FTS) et en sensibilité, s'avèrent très satisfaisants (ref : Cherednichenko et al 2007).

Le développement de **matrices de bolomètres** (caméra THz) pour la détection hétérodyne à supraconducteurs HEB en NbN (ref : Guillet et al 2008) est financé sur contrats de R&D ESA, CNES, CEE Radionet. Nos activités concernent à la fois la simulation, la fabrication des nano-composants et la réalisation des moyens de caractérisation. Des simulations intensives ont été effectuées pour la conception du HEB et ses circuits RF sur membrane. Un procédé de fabrication des micro et nano HEB par lithographie électronique a été développé et mis au point en utilisant les moyens technologiques existants dans la région Ile de France. Les tests des premiers HEB réalisés en réponse « courant-tension », en

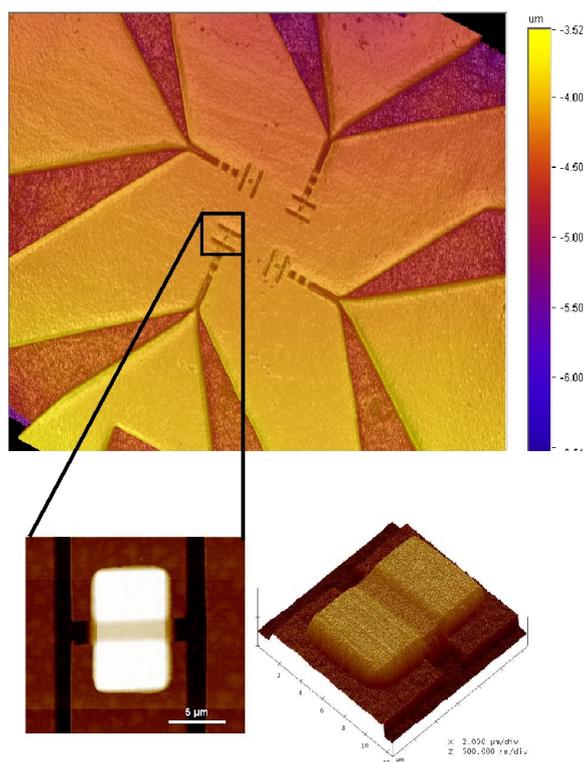


Fig. 5.2.2: (haut) Réseau THz de 4 HEB à antennes planaires doubles fente. (bas) Images AFM en 2D et 3D montrant la définition du HEB par lithographie électronique

SEFIRA d'électronique supraconductrice), en Europe (Radionet) et dans le monde : l'URSI (Union Internationale des Radio Sciences). Cette implication forte dans des structures largement interdisciplinaires permet à l'équipe de maintenir une position avancée dans un domaine technologique en évolution très rapide.

La formation de doctorants⁴ est une priorité du GEMO : depuis 2004, trois thèses ont été soutenues et cinq autres sont en cours sur des sujets technologiques et instrumentaux en ondes submm et THz.

Le GEMO a également mis en place une structure de veille technologique et de communication appelée INFOTEK avec une revue de presse spécialisée de 20 titres, une base de données en techniques, technologies et applications en ondes mm, submm et THz de 14000 références, des études sur l'état de l'art et l'animation du site web du GEMO (<http://gemo.obspm.fr/>) qui diffuse son activité, sa bibliographie et des articles en ligne.

D'autre part l'activité du GEMO ne s'arrête pas là puisqu'il participe à :

- la gestion et à la protection des fréquences radio-scientifiques (A. Deschamps représente la radioastronomie française auprès des agences nationales et internationales des fréquences (ANFR, CRAF) et de l'IUT (Union Internationale de Télécommunication)

4 Tous les doctorants formés au GEMO ont trouvé rapidement des emplois : d'IR au laboratoire ou dans d'autres laboratoires CNRS et universitaires, dans l'industrie (PME et grandes entreprises) ; d'autres ont été recrutés sur des postes de chercheurs CNRS ou de Maîtres de Conférences dans des universités (UPMC, Grenoble, Caen, Le Bourget du Lac). Certains ont été recrutés en post-doc à l'étranger : Université de Delft (NL), RAL (UK), JPL, Caltech (USA).

5. Résultats en instrumentation et télédétection

- la vie des sociétés en radiosciences : URSI, SEE (Société des Electricien et Electroniciens), à l'organisation de colloques de l'IdF (AREMIF), nationaux : JNM (Journées Nationales Micro-ondes), réseau « SEFIRA » sur la supraconductivité... et internationaux : EuMC (Européenne Microwaves Conference) , ISSTT (International Symposium on Space THz Technologies), etc...
- des enseignements (cours, TP, TD) en IUT, IUP, écoles d'ingénieurs, Masters et écoles doctorales d'astrophysique (ED de l'IdF), et à des encadrements de stagiaires
- des formations professionnelles sur les technologies et les applications des ondes submm/THz (stages de formation continue « Euro-SAE » pour ingénieurs et cadres de laboratoires publics ou industriels, co-direction de l'école thématique européenne « NANOTIME », etc...)
- des actions de communication, de vulgarisation et de valorisation.

5.2.4. Annexe: Principaux contrats de recherche R&D du GEMO en 2004 - 2008

Les actions menées en **R&D** sont financées dans un cadre local (BQR/OP, PPF), national (INSU, GIS P2I, ANR, CNES, ...) ou européen (ESA, INTAS, programme cadre UE : Radionet / AMSTAR, ...), parfois en partenariat industriel (ASTRIUM).

Les axes essentiels de la R&D supra en ondes submm/THz sont maintenant tournés vers :

- l'amélioration des performances en sensibilité (tant pour les mélangeurs SIS, que pour les HEB), la très large bande, l'agilité en fréquence,
- l'intégration des fonctions et la miniaturisation des dispositifs,
- l'imagerie à grand nombre de pixels
- la conception de récepteurs hétérodyne numériques à supraconducteurs (RSFQ) ;
- le développement des diodes lasers quantiques (QCL) pour la réalisation de sources THz. L'accent sera mis sur l'optimisation du couplage entre l'élément émissif et le récepteur (bourse de thèse CNRS ; collaboration avec P7 et Thales).

RECAPITULATIF des ACTIVITES de R&D du LERMA :

Intitulé	Nature	Statut 10/2008	Début/Fin	Financement	Partenaires
Cornets corrugués	R&T	Terminé	2004/2006	CNES / 90k€	
Récepteur ENSTA	R&T	Terminé	2004/2005	ENSTA / 10k€	
Caméra HEB	R&T HEB	Terminé	2003/2007	ESA / 35k€	CTH / LAAS /DLR
HEB / Radionet FP6	R&T HEB	Terminé	2004/2007	CEE / 118 k€	CTH / LAAS
High Tc bolometer	R&T	Terminé		CNES/INTAS	Uni. Moscou
Récepteur intégré	R&T Schottky	Terminé	2004/2006	CNES / 30k€	LISIF
ASTRIUM	Transfert de technologie	Terminé	2006	ASTRIUM/30k€	
Schottky UMS	R&T Schottky	En cours	2007 / 2009	CNES / 200 k€	RAL
Schottky ESA	R&T Schottky	En cours	2007 / 2009	ESA / 65 k€	RAL
HEB	R&T HEB	En cours	2007 / 2009	CNES / 200k€	Univ Moscow
Récepteur intégré	R&T SIS	En cours	2007 / 2009	CNES / 145k€	
P2I BSD	R&T supra	En cours	2007/2009	GIS P2I / 100k€	APC, IAS, ...

5.2. Groupe d'étude des micro-ondes (GEMO)

Intitulé	Nature	Statut 10/2008_	Début/Fin	Financement	Partenaires
Nanoschottky	R&T Schottky	soumis	2009 -2011	CNES/ 200k€	LPN
Couplage QCL/HEB		soumis	2009 -2011	CNES/ 200k€	MPQ Paris VII
ANR radiomètre	R&T Schottky	soumis	2009 /2012	400k€	LPN
HEB / Radionet FP7	R&T HEB	soumis	2009/2012	85k€	SRON/KOSMA/ OSO
ESA Schottky 600GHz	R&T Schottky	soumis	2009-2012	ESA / 130k€	

6. Réalisations: outils, instruments et services

Pour servir ses projets de recherche, le LERMA utilise principalement 1/ les diagnostics spectroscopiques des milieux dilués, des processus de condensation, d'accrétion et d'éjection, 2/ la modélisation dynamique et 3/ l'expérimentation. Ces trois méthodes impliquent un investissement important dans l'observation (de la construction d'instruments à la valorisation des données dans l'Observatoire Virtuel (OV)), un engagement dans la production de données de physique atomique et moléculaire indispensables aux diagnostics (mesures en labo et calcul théorique), une activité intense en simulations numériques lourdes (de l'écriture de codes à la valorisation des modèles dans l'OV-théorique), et le développement de simulations expérimentales. Cette section est consacrée à rendre compte des principaux outils développés par le LERMA pour mettre en œuvre ces méthodes, et à leur contribution à la mission de Services d'observation des Observatoires.

Ces activités utilitaires se sont diversifiées au cours du temps, et au contact d'autres disciplines. Elles ont parfois, comme on l'a vu pour la recherche technologique sur les composants sub-millimétriques, atteint une certaine autonomie. Le laboratoire concentre cependant la plus grande partie des moyens mis en œuvre sur ses objectifs scientifiques fondamentaux.

Voici donc l'exposé des principales réalisations instrumentales du LERMA.

6.1. Instrumentation (sub-)millimétrique

Le LERMA (anciennement Laboratoire de radioastronomie millimétrique / DEMIRM) est le principal laboratoire en France "fondateur" de l'IRAM, puis promoteur du développement du télescope spatial submm FIRST (devenu Herschel Space Observatory, lancement 2009) et de l'interféromètre mm/submm ALMA. En cohérence, les services d'observation autour des TGE (SO2 et SO3) dans lesquels le laboratoire est principalement engagé sont liés à l'IRAM (dont le staff a compris et comprend plusieurs chercheurs venant du LERMA), Herschel, Planck, ALMA et SKA.

6.1.1. Réalisations du GEMO

Le Groupe d'études micro-ondes a été présenté dans la section 5.2.

Toutes les forces du LERMA en instrumentation mm/submm hétérodyne sont regroupées au sein du Groupe d'études des micro-ondes (GEMO), l'équipe de recherche technologique et instrumentale dont l'expertise est la détection hétérodyne entre 100 GHz et 3 THz. Le GEMO mobilise la plus grande partie du potentiel technique du laboratoire. Des moyens supplémentaires essentiels sont apportés par le Pôle Instrumental de l'Observatoire, par la Division technique de l'INSU et par les Centrales de technologie d'Ile de France.

La fonction de laboratoire support technique d'IRAM a été peu exploitée pour la fourniture

6. Réalisations: outils, instruments et services

d'instruments, l'IRAM ayant jusqu'à maintenant eu les moyens de quasi-autosuffisance sur ce point. Le LERMA s'est en conséquence reporté sur le développement de chaînes de réception à plus courte longueur d'onde (sub-millimétrique), et sur leur mise en œuvre dans l'espace.

En parallèle les technologies développées ont été appliquées à des projets d'exploration planétaire, et de télédétection, en dehors du périmètre initial du laboratoire (voir aussi la section .5.1).

Le GEMO a été le premier groupe à réaliser un récepteur hétérodyne à technologie supraconducteurs embarqué avec succès dans l'espace (PIROG-8); il a fait progresser l'état de l'art des mélangeurs SIS par les innovations qui ont été mises en œuvre pour la réalisation du premier canal d'Herschel/HIFI, a contribué au développement de chaînes d'oscillateurs THz performantes et intervient régulièrement dans la conception et le développement de radiomètres et spectromètres utilisés pour l'exploration planétaire ou terrestre.

a) Astrophysique :

- Observatoire spatial Herschel (HSO) de l'ESA (et collaboration NASA) pour l'astronomie submillimétrique, lancement prévu en avril 2009. Le GEMO, partenaire de SRON et d'autres laboratoires étrangers pour l'instrument hétérodyne HIFI, a développé et construit avec l'IRAM le mélangeur du canal 480 – 640 GHz (canal 1).

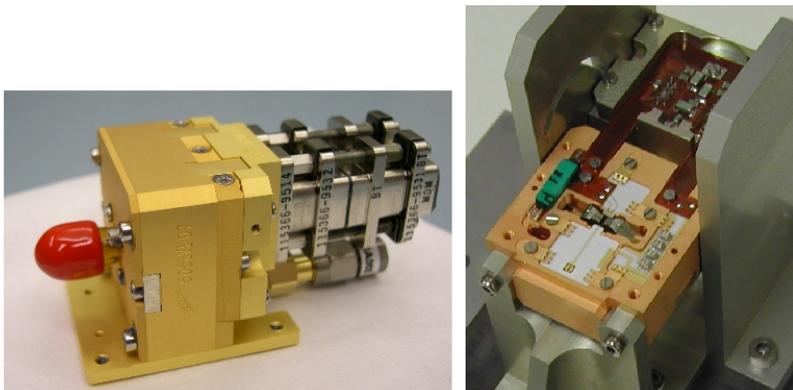


Fig. 6.1.1: Mélangeur supra / Canal 1 HIFI à 480-640 GHz.

- Ce développement du canal 1 de HIFI –HSO fait suite à de nombreuses années de R&T, qui donné lieu à la soutenance de plusieurs thèses, et qui a permis de dessiner les détecteurs, réalisés ensuite avec l'IRAM, et de proposer un concept original de mélangeur, dont les performances mesurées font aujourd'hui l'état de l'art. Ce développement a fait l'objet de l'investissement d'environ 50 FTE pour l'ensemble des études, réalisations et tests (personnel permanent, CDD et supports). Les mélangeurs ont été construits, validés et livrés durant cette période. Ces efforts ont abouti à l'obtention de résultats exceptionnels sur les modèles de qualification, de vol et de rechange, du canal 1. Les performances su canal 1, meilleures que les spécifications initiales. Ce travail a été couronné par le prix d'Abbadie de l'Académie des Sciences et par le prix des ingénieurs 2008), (ref : Delorme et al 2005, ACT-236).
- ALMA : le GEMO a étudié et réalisé dans le cadre d'un contrat ESO un prototype de mélangeur à jonctions supra (SIS) pour le canal 8 (bande 385- 450 GHz), dérivé du mélangeur canal 1 de HIFI-HSO. Les performances obtenues étaient conformes aux

spécifications, mais le développement de ce canal a ensuite été confié au Japon.

- Le GEMO a aussi contribué aux chaînes de multiplicateurs de fréquences des oscillateurs locaux d'Herschel HIFI, jusqu'à 1.9 THz, également fruit de plusieurs années de R&T. Ils mettent en œuvre les idées et les moyens de conception du GEMO (A. Maestrini) avec le LISIF (UPMC) et les moyens de micro-technologies du JPL (Caltech-NASA). (Maestrini A. et al 2008)

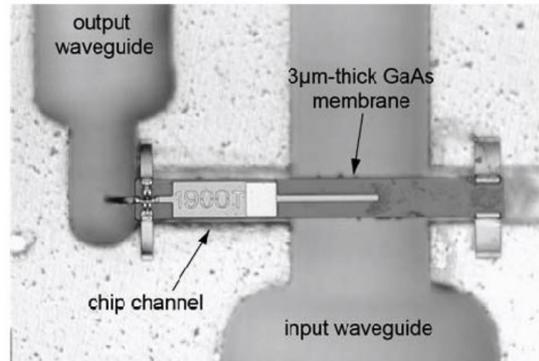


Fig. 6.1.2: Tripleur de fréquences / HIFI canal 6 à 1,9 THz (OP-UPMC-JPL).

b) Planétologie et observation de la Terre

Activité sur les instruments :

- MIRO (radio-spectromètre en ondes mm et sub-mm), instrument proposé et étudié par le GEMO qui a participé, avec le JPL (PI) et le MPAe, à la réalisation, à l'intégration et aux tests de l'instrument pour la sonde cométaire ROSETTA lancée en mars 2004. Les tests en vol sur l'instrument et des observations récentes (sept 08) de l'astéroïde Steins ont été réussis (ref: Gulkis et al 2007). Les observations cométaires (Gerasimenko) auront lieu en 2014–2015, après un 3ème survol de la Terre et le croisement d'un second astéroïde, Philae.
- MAMBO/MEMO (radio-spectromètre en ondes millimétriques destiné à l'atmosphère et la climatologie de Mars pour l'orbiteur martien *MARS Premier* du CNES). Le GEMO a participé à la conception et à l'étude de l'instrument en partenariat avec ASTRIUM, mais la mission n'a pas pu être menée à terme par le CNES.
- SAPHIR (sondeur en ondes millimétriques de la vapeur d'eau atmosphérique terrestre en zone équatoriale pour la météorologie). Le GEMO a proposé et participé à l'étude du sondeur atmosphérique en ondes millimétriques SAPHIR du satellite intertropical franco-indien Megha-Tropiques (coopération IPSL - CNES - ISRO). Il gardé un rôle d'expertise pour le développement, le suivi de la sous-traitance industrielles (ASTRIUM) et les tests de qualification de l'instrument. Cette activité prendra fin avec le lancement par un porteur indien en 2010.

c) Récapitulatif des activités instrumentales du GEMO 2004-2008

Projet	Domaine	Fourniture	Statut	Début/Fin	Durée	Financement	Partenaires	Manpower
MIRO	Sonde planéto	USO + exp. syst.	Terminé	1997-2004	7 ans	CNES/1M€	JPL/MPS	12 FTE
HERSCHEL HIFI	Obs. spatial submm astro (et planéto)	Détecteurs canal 1	Terminé	1998/2008	10 ans	CNES/1,5M€	SRON/IRAM	>50 FTE
Saphir phase C	Sat. atmo Schottky	Expertise/Tests	Terminé	2007/2008	2 ans	CNES / qqes k€	ISRO, IPSL	1 FTE
IRSIS	Projet sat indien IR proche	anamorphoseur	En cours	2006/2011	5 ans	42k€ 2007 / 2M€	ISRO, IAS, LESIA,...	15 FTE
Saphir phase D	Sat. atmo Schottky	Expertise/Tests	En cours		6 ans	CNES	ISRO, IPSL	3 FTE

6. Réalisations: outils, instruments et services

Projet	Domaine	Fourniture	Statut	Début/Fin	Durée	Financement	Partenaires	Manpower
CIDRE	Projet ballonastro	Instrument	Proposition		5 ans	CNES / qqques M€	SSC/MPS/ CESR	50 FTE ?
FIRI	Projet astro CV2+	Participation frontend	Proposition		10 ans	CNES / qqques M€	EU tbd	50 FTE ?
TANDEM	Projet planéto	Récepteur submm	Proposition		10 ans	CNES / qqques M€	LESIA/JPL /MPS ...	50 FTE ?

NB : Les projets d'astronomie IRSIS et CIDRE ne sont, pour le moment, financés par le CNES que dans les phases préparatoires et en R&T (Cidre).

Le Projet SMS sur TANDEM (TSSM), mission présélectionnée pour le programme Cosmic Vision de l'ESA, a été proposé en réponse de l'appel à idées du CNES en 2008 : il n'a encore aucun soutien budgétaire.

FIRI entre aussi dans le cadre du programme Cosmic Vision de l'ESA, et de la réponse à l'appel à idée CNES 2008.

Le projet atmosphérique SMCR est proposé au CNES en réponse à l'appel à idées, mais des actions de R&D sont en cours au GEMO dans le cadre de financements ESA et CNES.

6.1.2. Equipe Instrumentation pour Planck : bilan

J.M. Lamarre (Planck HFI Instrument scientist, A. Coulais, A. Catalano (thèse soutenue fin 2008), G. Recouvreur

Le projet **Planck** est un satellite de troisième génération d'observation du fond diffus cosmologique (Lamarre 2004, 2005, 2006, 2007, 2008). La précision atteinte avec **Planck** permettra de tester le modèle cosmologique standard de façon approfondie, de contraindre les modèles d'inflation, et d'éclairer plusieurs questions de physique fondamentale. La mesure de la polarisation du rayonnement sera une des nouveautés majeures de Planck rendues possibles par l'amélioration de la sensibilité, due essentiellement à l'instrument HFI développé sous responsabilité française (IAS).

Le LERMA abrite et soutient l'équipe de l'Instrument Scientist de Planck-HFI, c'est-à-dire le garant et le dépositaire des performances de l'instrument, dont le principe a été validé par l'expérience ballon Archeops (Tristram et al 2005, Macias-Perez et al 2007). Cette équipe apporte une expertise indispensable pour analyser les performances de l'instrument, en particulier dans le domaine de l'optique (Yurchenko et al 2004, Yurchenko & Lamarre 2005, Lamarre & Puget 2005) et identifier l'existence et l'origine des « systématiques », signaux inattendus ou réponses "anormales", dont la présence pourrait perturber l'interprétation des mesures. Cette équipe a participé à de nombreux aspects de la définition du projet Planck. Elle a contribué à la calibration des modèles de qualification et de vol (Lamarre 2004, 2005, 2006, 2007, Pajot et al 2008). Elle a mis en évidence la *réponse anormale à basse fréquence des chaînes de détection* qui a un effet majeur sur l'étalonnage des observations. Cet effet est passé inaperçu dans les expériences bolométriques ayant précédé Planck : nous avons pu le mettre en évidence sur le modèle de vol grâce à un examen approfondi de données prises au sol, en éliminant une à une toutes les hypothèses d'artefacts extérieurs, et nous avons pu montrer qu'il était dû aux détecteurs eux-mêmes. Nous avons par ailleurs développé la *théorie de la réponse des bolomètres polarisés par un courant modulé*, résolvant un problème resté sans solution analytique pendant près de vingt ans. Ce modèle permettra pendant la période

d'exploitation de Planck (2009-2012) d'optimiser la gestion de l'instrument HFI en orbite et de faciliter la réduction des données.

6.2. Instrumentation logicielle

Des simulations permettant de dimensionner un futur projet, aux chaînes de traitement des données et aux outils de valorisation d'archives à travers l'Observatoire virtuel, le logiciel a pris une place majeure dans le développement et l'exploitation des instruments modernes. Des chercheurs s'impliquent souvent lourdement dans ces développements, ce qui est indispensable pour un couplage optimal entre objectifs et réalisations. Mais l'intervention de développeurs professionnels est indispensable pour garantir la qualité des produits.

Le LERMA est engagé dans plusieurs projets majeurs, à divers niveaux de la chaîne logicielle:

- simulations lourdes en amont des grands projets : Univers après la recombinaison (projets SKA et LOFAR resp. Sémelin), fusion de galaxies : GALMER / HORIZON (projets ALMA, SKA, ... resp. Combes), effondrement préstellaire : STARFORMAT (projets Herschel, ALMA, resp. Hennebelle), modélisation de l'atmosphère nuageuse et précipitante (projets CIWSIR, GOMAS resp. Prigent)
- simulateurs d'instruments (projets: HIFI/Herschel resp. Rabasse, ALMA resp. Viallefond)
- optimisation des stratégies d'étalonnage (projets HIFI/Herschel resp. Pérault, Planck resp. Lamarre)
- chaînes d'acquisition et de traitement : modèle de données (projet ALMA, resp. Viallefond), segment sol (projet ALMA, resp. Boone, Herschel/HIFI Instrument control center, resp. Pérault),
- analyse, modélisation, et algorithmique de traitement, des réponses instrumentales (projets: HIFI/Herschel resp. Hennebelle, Planck, resp. Lamarre)
- post-traitement et exploitation des archives (projets WetLand et EmiMo resp. Prigent).

En accompagnement de ces projets, le LERMA a investi des moyens significatifs dans 2 lignes d'activité *instrumentales* au sens large, qui s'inscrivent dans les ressources de l'Observatoire virtuel (section 6.3):

- les bases de données de physique atomique et moléculaire (données de laboratoire et calculs théoriques)
- les outils d'interface avec l'OV.

On compte actuellement 2.5 IR et 1 IE informaticiens impliqués dans le logiciel scientifique, plus 2 à 3 ingénieurs sous contrat. Un pôle "instrumentation logicielle" est en cours de mise en place au LERMA. L'ensemble de ces activités ne pourra être consolidé que par le recrutement de 2 IR au moins sur poste stable. Le laboratoire a l'ambition d'être à long terme un acteur majeur dans ce domaine, couvrant l'ensemble de la chaîne qui va de la modélisation des détecteurs aux outils d'interprétation dans l'Observatoire virtuel.

6.2.1. Radioastronomie instrumentale et observationnelle: Etude du milieu interstellaire en synthèse d'ouverture

F. Viallefond, F. Boone, M. Caillat

ALMA est un grand interféromètre dans le domaine millimétrique et sub-millimétrique aux caractéristiques sans précédent. Après une phase de R&D à laquelle François Viallefond a participé, le LERMA a constitué une petite équipe pour participer directement à la phase de construction qui a débuté il y a 5 ans. Cette activité, sous contrat avec l'ESO, concerne le développement de logiciels pour l'utilisation scientifique d'ALMA. Cette équipe, actuellement constituée de deux chercheurs et un ingénieur de recherche, est intégrée dans le « Science Integrated Project Team » ou SIPT et « Computing Integrated Project Team » CIPT d'ALMA: F. Viallefond et M. Caillat (CIPT: sous-système « offline », 0.4 + 1.0 FTE/an), F. Boone (CIPT: sous-système « heuristic pipeline », 0.3FTE/an). F. Viallefond (SIPT, scientifique du sous-système « archive », membre du « science software requirements », responsable « Science Data Model » SDM, 0.5FTE). Le premier contrat avec l'ESO (2004-2007) a été renouvelé pour la période 2007-2010. .

Durant cette phase de construction, l'essentiel du travail a porté sur le « Science Data Model » (SDM): a) proposition avec R. Lucas d'un modèle de données avec la définition de son contenu (SDM): b) définitions du « meta-model » et schéma conceptuel, c) implémentation orienté objet. Le SDM, avec à ce jour environ 600 paramètres, est utilisé par l'ensemble des sous-systèmes du CIPT, en particulier "Control" et "TelCal". Le SDM inclut aussi la définition du format des flots de données (BDF) produits par différents processeurs, en particulier deux corrélateurs (celui pour les 64 antennes et celui, dédié, pour ACA, un réseau compact d'antennes pour mesurer les basses fréquences spatiales). Le SDM est utilisé en temps réel mais aussi au niveau de l'archive et dans un flot qui alimente un pipeline. Durant 2007, une convention a été établie avec NRAO, le SDM devenant un standard pour cet observatoire. De fait il est maintenant aussi utilisé pour l'EVLA (Extended-VLA), le 2ème grand projet de NRAO pour l'interférométrie en ondes décimétriques/centimétriques de la prochaine décennie et le sera très probablement pour Extended-MERLIN (projet en cours de réalisation en Grande-Bretagne).

L'équipe développe aussi des outils de simulation, jusqu'à présent prioritairement pour tester le SDM. F. Boone contribue au développement de l'heuristique pour le pipeline. F. Viallefond et F. Boone contribuent aussi au niveau du développement d'outils pour la réduction et l'analyse scientifique des observations (collaboration avec le MPIfR de Bonn, CSIC Madrid (J. Pardo) et en interne avec F. Levrier (équipe LRA de l'ENS).

6.2.2. Participation à l'Instrument Control Center d'Herschel/HIFI

P. Hennebelle, M. Pérault, J.-F. Rabasse, B. Delforge, M. Gerin, E. Falgarone

Au début du projet Herschel l'équipe ENS du LERMA a défini la stratégie d'étalonnage du spectromètre hétérodyne HIFI (thèse de David Teyssier fin 2002, devenu ensuite calibration and instrument scientist à l'ESA). La participation de l'équipe s'est poursuivie, sur la période de ce rapport par quelques contributions importantes au segment sol.

- réalisation, en collaboration avec l'IAS d'une source spectrale (cellule d'absorption)

- pour les tests d'intégration et d'étalonnage en labo d'HIFI.
- participation à ces campagnes de test, et à leur exploitation
- maintenance du simulateur de données pour l'instrument HIFI, construit avec le groupe de Cologne KOSMA. Ce simulateur, qui intègre une interface avec le système opérationnel, permet de simuler le comportement des chaînes de réception, jusqu'aux spectromètres inclus, et les distorsions introduites par les défauts de l'instrument dans les données. Il permet de tester les méthodes d'analyse développées dans d'autres tâches de l'ICC.
- développement et maintenance d'une interface de données HIFI-CLASS, avec S. Guilloteau, L3AB Bordeaux) permettant l'analyse des données HIFI dans l'environnement CLASS de IRAM.
- analyse des ondes stationnaires dans les tests en labo, développement d'algorithmes de déconvolution des spectres double bande latérale incluant les ondes stationnaires (avec P. Schilke, C. Comito, S. Lord)

Toutes les actions entreprises n'ont cependant pas abouti. En particulier notre initiative de convergence des modèles de données d'ALMA, d'Herschel et d'IRAM sur un standard interopérable n'a malheureusement pas abouti, faute principalement d'une capacité de conviction suffisante pour entraîner les 3 équipes projets, liées par leurs contraintes opérationnelles propres.

L'instrument HIFI a été intégré avec succès sur Herschel en 2008, et son lancement est prévu au printemps 2009.

6.3. *Bases de données et Observatoire virtuel*

Avec l'évolution des cibles électroniques utilisées pour l'observation de l'Univers sur les télescopes astronomiques au sol ou embarqués et le développement d'internet, l'échange de données au sein de la communauté astronomique a connu un essor considérable. En particulier, les observations de provenances diverses peuvent être confrontées afin de réaliser des études multi-fréquences. Néanmoins, la collecte et le reformatage de ces données, archivées dans des bases dispersées prend un temps considérable aux chercheurs. La communauté internationale a décidé de se doter d'un outil général qui permette de rassembler de façon systématique les données pertinentes pour une étude : il s'agit du concept **d'Observatoire Virtuel**. L'architecture de l'OV est divisée en trois parties :

- services sur les données, qui donnent un accès simple aux données (grands relevés ou petites bases)
- services logiciels qui permettent de traiter, visualiser, analyser les données, corrélérer des données de sources et de formats divers
- services sur l'identification des ressources disponibles qui permettent de publier et de découvrir des ressources.

L'ensemble de ces services reposent sur le développement amont de standards pour tous les protocoles d'identification, d'échange, de manipulation des données. L'Observatoire de Paris s'est engagé dans le développement de standards, dans l'utilisation de ces standards pour mettre à disposition ses ressources et dans le développement de services particuliers. In fine l'Observatoire de Paris s'est doté d'une structure fédérative VO-PARIS Data Centre qui

regroupe ses départements, des équipes d'autres instituts et un service central d'ingénieurs rattachés à la Division Informatique de l'Observatoire. URL : <http://vo.obspm.fr/>

6.3.1. Contributions du LERMA à VO-PARIS - Data Centre

Le LERMA a joué un rôle particulièrement moteur dans l'aboutissement du projet Observatoire Virtuel à l'Observatoire de Paris par l'intermédiaire d'un de ses chercheurs (M.L. Dubernet) qui assure depuis 2004 la responsabilité scientifique de VOPARIS Data Centre. Le LERMA a également abordé des projets innovateurs au niveau national et international, en relation avec ses activités traditionnelles de recherche, augmentant ainsi le retour scientifique de ses implications instrumentales ou numériques. L'effort du laboratoire est développé en coopération étroite avec le LUTh. Cette coopération s'étendra au LPMAA dont M.L. Dubernet prend la direction début 2009.

Les activités OV du LERMA se sont articulées autour:

- de l'accès à une base de données de simulation théorique sur la dynamique des galaxies, la base GALMER, dans le cadre du projet HORIZON. L'emploi d'un CDD (I. Chilingarian) a permis la mise en place de la base, la mise au point de son interface d'interrogation ainsi que l'adaptation des protocoles définis par l'International Virtual Observatory Alliance aux modes de sorties, d'interrogation et de visualisation de la base de données. url: <http://galmer.obspm.fr/> et voir Equipe Galaxies et cosmologie, section .
- de l'accès à une base de donnée de simulations de l'effondrement protostellaire (STARFORMAT) par P. Hennebelle et J.-F. Rabasse. Ce développement, qui s'appuie sur une production massive de modèles à destination des observateurs (IRAM, ALMA, Herschel et particulier) a été sélectionné par ASTRONET. Voir section 3.2.
- du développement d'un logiciel pour l'analyse de données (DALIA/MAGIX) par F. Boone et N. Moreau url: <http://dalia.obspm.fr>. Ce développement comprend la définition de standards pour le lancement automatique de codes de simulation et une interface générique pour la comparaison des sorties de simulations aux données réelles. Ces travaux ont été effectués en collaboration avec l'équipe de P. Schilke au MPI für Radioastronomy à Bonn pour le design général et pour l'accès aux données de spectroscopie avec M.L. Dubernet & N. Moreau (LERMA). Ce projet a été sélectionné par ASTRONET.
- du développement de standards pour l'échange des données de physique atomique et moléculaire en liaison avec l'application de ses standards sur des bases de données nécessaires pour les études du milieu interstellaire/circumstellaire en mm, sub-mm: la base sur les processus collisionnels BASECOL et la base de spectroscopie CDMS <http://voparis-molecular.obspm.fr> (M.L. Dubernet, N. Moreau). Une partie de cette activité est incluse dans le projet ASTRONET pré-cité et constitue le coeur d'un projet FP7-I3 déposé en Septembre 2008 par M.L. Dubernet (et sélectionné début 2009). N. Moreau a également appliqué les méthodes développées au LERMA sur les données de H₂ de E. Roueff (LUTh).
- L'objectif du portail MOLAT <http://molat.obspm.fr> est de mettre en ligne rapidement et dans leur diversité des données atomiques et moléculaires obtenues à l'Observatoire, dont nous avons évalué la valeur, avant qu'elles n'intègrent de véritables bases.

6.3.2. Bases de données de physique atomique et moléculaire

Nos travaux en physique atomique et moléculaire, théoriques et expérimentaux, nous conduisent à construire des bases de données fondamentales, et nous permettent de construire une expertise dans l'évaluation critique des données dans ces domaines.

a) Base de données spectroscopiques

Responsable Lydia Tchang-Brillet, url : <http://molat.obspm.fr/>

Nous fournissons une base de données spectroscopiques dans l'ultraviolet du vide que nous obtenons à l'aide du spectrographe de 10 m ou sur le synchrotron Super-ACO. Les développements récents concernent les transitions électroniques et niveaux d'énergie des molécules fondamentales (H₂, D₂, HD, N₂, CO et isotopologues). Les données relatives à H₂ et D₂, de première importance pour l'astrophysique, ont également fourni les données de transitions nécessaires pour calculer les spectres. Ces calculs, réalisés par E. Roueff et al. sont également disponibles sur MOLAT.

Nous avons également mis en ligne les données spectroscopiques (longueurs d'onde, forces d'oscillateurs, énergies des niveaux, facteurs de Landé) des ions de lanthanides et des métaux de transition obtenus sur le spectro VUV de Meudon. Ces données VUV utiles pour les observations menées par différents satellites comme HST, FUSE et SOHO, sont actuellement absentes dans les grandes bases spectroscopiques internationales (HITRAN, NIST, IEAE) et constituent une des spécificités de l'Observatoire.

b) Base de données d'élargissement Stark

Responsable S. Sahal-Bréchet, url : <http://stark-b.obspm.fr/>

En collaboration avec Milan Dimitrijević (Observatoire de Belgrade), nous mettons en ligne une base de données de l'élargissement et du déplacement de raies spectrales atomiques et ioniques, dus aux collisions avec les particules chargées, calculés avec les codes développés au laboratoire. Outre les plasmas astrophysiques, la base est destinée aux plasmas de laboratoire et industriels. Cette base, sous le nom de STARK-B, est actuellement en ligne.

c) Base de données d'excitation rovibrationnelle de molécules

Responsable M.L. Dubernet, url : <http://basecol.obspm.fr/>

Plusieurs chercheurs théoriciens de notre groupe ont calculé des constantes de vitesse d'excitation ro-vibrationnelle de molécules, disponibles dans BASECOL, dans le cadre de la préparation scientifique des missions d'observation Herschel/ALMA.

6.4. Outils de calcul

Les *expériences* numériques sont devenues un outil indispensable en physique, a fortiori en

6. Réalisations: outils, instruments et services

astrophysique. La puissance de calcul accessible aujourd'hui permet d'aborder l'étude de systèmes complexes tout en investiguant les limites liées à la résolution finie ou au choix des algorithmes.

Le LERMA calcule sur les moyens nationaux depuis ~30 ans. Avec la montée en puissance des centres nationaux, les équipes du LERMA ont accès à des capacités de production de plusieurs millions d'heure-processeurs par an qui sont largement exploitées.

A la recherche développée par F. Combes en dynamique des galaxies (section) s'est ajoutée il y a quelques années une composante très active en dynamique des fluides astro- et géophysiques magnétisés, le CEMAG (resp. Balbus et Pérault), qui a pu se doter d'un ordinateur dit haute performance dédié (4 noeuds de 64 cœurs de calcul en mémoire partagée, 2 TFlops crête, 60 To de capacité de stockage). Ce méso-centre fait l'objet d'un partenariat ENS-OP-IPGP. Les thématiques abordées aujourd'hui sont principalement : écoulements turbulents, croissance et dissipation du champ magnétique, écoulements réactifs, instabilités dans les disques d'accrétion, formation des nuages, effondrement pré-stellaire (resp. Hennebelle, Lesaffre, Dormy). Une thématique supplémentaire aborde aussi le calcul lourd : la formation, l'accélération et le développement des jets protostellaires (resp. Cabrit), et de leurs analogues en labo (resp. Stehle).

La charge technique vient principalement de la programmation (algorithmes, écriture des codes, optimisation sur architecture parallèle, gestion des projets et des données) et de l'exploitation du méso-centre (gestion de queue atypique privilégiant les plus gros calculs, maintenance, ...). Le LERMA ne dispose aujourd'hui du support que de ½ IR sur ces tâches (JF Rabasse).

CEMAG : le CEMAG a bénéficié du financement de chaire d'excellence de S.Balbus et d'un contrat SESAME pour équiper un méso-centre de calcul haute performance installé dans le département de physique de l'ENS en 2006-7, dédié à la simulation d'écoulements MHD astrophysiques (et géophysiques). L'exploitation de ce méso-centre est couverte jusqu'en 2010 par le contrat initial. Au-delà une action prioritaire a été demandée à l'ENS pour assurer l'évolution et le fonctionnement de cet équipement, qui est encore aujourd'hui une plateforme de production performante (gros nœuds en mémoire partagée de 200 Go chacun), un levier puissant pour l'accès à une large capacité de production sur les nouvelles machines nationales, et un élément décisif de mobilisation et de formation à l'ENS. Un soutien complémentaire de l'INSU est souhaité.

6.5. Services d'observation

La collecte de données systématiques et pérennes, mission fondamentale des Observatoires des sciences de l'univers, est un aspect important de l'engagement du laboratoire. La plupart de ces activités sont conduites dans le cadre des services labellisés de l'INSU SO2, SO3, SO4 et SO5.

6.5.1. Instruments équipant les grands télescopes et missions (SO2)

Herschel Space Observatory (HSO) : Après la participation du GEMO au front-end de HIFI (résultats exceptionnels obtenus sur les mélangeurs SIS du canal 1 et contribution à la conception des chaînes d'OL) ainsi qu'aux étalonnages de l'instrument complet (LRA à l'ENS), le LERMA contribue à l'analyse et au traitement des données à travers sa

participation à l'*Instrument control center (ICC)*, et à la fourniture d'outils indispensables à l'exploitation scientifique, incluant les données de physique moléculaire mises à disposition sur des bases de données publiques, et à travers l'Observatoire virtuel / OP (section 6.3.1), et les développements en cours de modèles "intégraux" (modèles dynamiques à physique élaborée observables par des outils OV) dans le cadre des projets ASTRONET StarFormat et CATS.

Planck : L'activité du groupe au LERMA autour de l'Instrument-Scientist de Planck-HFI concerne les modélisations instrumentales : développement de modèles de la réponse de l'instrument (statique et dynamique) et l'application des modèles sol et vol (réglage de l'instrument en vol, diagnostic fin de l'instrument au cours des deux ans de mission, aide à l'inversion des données et à l'exploitation).

Le lancement joint de Planck et Herschel est programmé en avril 2009. Les activités de modélisation de réponse sont vraisemblablement nécessaires jusqu'à fin 2011 et l'analyse des données jusqu'en 2013.

ALMA : Le GEMO a étudié et développé un prototype du canal 8 d'ALMA pour l'ESO, dont le concept a été retenu car il remplissait largement les spécifications. Mais la réalisation en a été confiée au Japon pour équilibrer les contributions nationales à ce gigantesque projet. La contribution active du LERMA s'est centrée, dans un cadre contractuel avec l'ESO, sur la définition de la structure de données produite par l'instrument, la responsabilité de développements logiciels temps réel implémentant cette structure et sur le traitement off-line des données d'ALMA. Le volume des données à traiter quotidiennement et l'ambition de fournir des résultats immédiatement exploitables font de cette activité un des points critiques du projet : deux chercheurs et un ingénieur s'y consacrent presque à temps plein au laboratoire.

Les efforts développés sur les outils d'interprétation pour Herschel seront directement valorisables pour ALMA.

SKA : Ce projet intéresse fortement les équipes scientifiques du LERMA, même s'il n'entre pas directement dans le domaine d'expertise technique du laboratoire. Une participation significative à l'étude SKA-DS est fournie par l'implication de l'équipe de F.Combes aux simulations scientifiques amont (extension du programme Horizon) et par la participation de F.Levrier au simulateur scientifique de SKA.

Le développement de récepteurs numériques dans le domaine cm est en forte synergie avec celui des corrélateurs large bande devenus nécessaires comme analyseurs spectraux à plus haute fréquence. Par ailleurs l'expertise développée en interférométrie cohérente (synthèse d'ouverture) doit être au moins partiellement mutualisée sur l'ensemble des très grands interféromètres radio en développement ou en projet (ALMA, IRAM-NOEMA, LOFAR, SKA) : le LERMA y contribuera.

Planétologie et atmosphère :

MIRO est un instrument hétérodyne en ondes millimétriques et submillimétriques embarqué sur la sonde cométaire **Rosetta** de l'ASE. Développé au JPL et au MPAE avec une participation substantielle du GEMO (conception, développement du front-end, oscillateur ultrastable), cet instrument a été réalisé, testé, intégré sur le satellite. La participation du GEMO est très réduite depuis son intégration à partir de 2003 et du lancement en 2004. Un suivi un peu plus important sera nécessaire lors des phases d'approche et d'observation de la comète vers 2013 –2015.

SAPHIR est un instrument de sondage atmosphérique en zone équatoriale. Il est actuellement

6. Réalisations: outils, instruments et services

mené en phase D dans un cadre franco-indien (**Megha-Tropiques**) avec l'IPSL maître d'œuvre (CETP, LMD). Après avoir participé à la conception des instruments micro-ondes, le GEMO apporte son expertise dans le développement de la tête de réception hétérodyne en ondes millimétriques et le suivi d'études et de réalisations industrielles. Cette activité prendra fin prochainement pour un lancement prévu aujourd'hui en 2011.

6.5.2. Observatoires (SO3)

L'IRAM est encore pour plusieurs années l'Observatoire de référence aux longueurs d'onde millimétriques. Le LERMA, laboratoire fondateur a fourni à l'IRAM un nombre important de ses cadres. Durant la période de ce bilan, le LERMA a mis à disposition de l'IRAM l'un de ses jeunes astronomes-adjoints, J. Pety, aujourd'hui détaché. Le laboratoire a également formé 3 doctorants qui sont ou ont été récemment post-docs à l'IRAM et fortement impliqués dans les développements des capacités d'observation de ses télescopes.

6.5.3. Grands relevés (SO4)

Avec J.-M. Lamarre, project scientist de Planck/HFI, le LERMA est entré dans le consortium Planck. Il a contribué au développement du projet, à hauteur d'environ 2 ETP, et continuera à s'investir fortement dans la phase prochaine d'exploitation. Plusieurs chercheurs du laboratoire seront également impliqués dans l'analyse des avant-plans.

6.5.4. Observatoire virtuel (SO5)

PARIS-VO / Data center : le LERMA a joué un rôle moteur dans la mise en place des activités Observatoire virtuel à l'Observatoire de Paris. Plusieurs des services aujourd'hui disponibles ont été construits au laboratoire (voir section 6.3.1).

VAMDC : un projet d'I3 a été soumis à l'Union européenne dans le cadre FP7 pour fédérer les outils d'accès aux données fondamentales en physique atomique et moléculaire. Ce projet ambitieux, piloté par M.-L. Dubernet, vient de passer avec succès la première phase d'évaluation. Le CNRS fédère la participation de plusieurs laboratoires français à ce projet, dont une contribution majeure de laboratoires INSU.

Il est d'importance critique que la collecte et la mise à disposition de données fondamentales de physique atomique et moléculaire trouve un cadre de service approprié pour continuer à se développer: elles répondent à un besoin essentiel de nombreuses communautés d'utilisateurs, et devraient faire l'objet d'un service public bien identifié et pérenne (comme par exemple le NIST aux Etats-Unis).

7. Fonctionnement de l'unité

7.1. Organisation

7.1.1. Données générales

Le LERMA est une Unité mixte de recherche du CNRS sous contrat avec quatre établissements d'enseignement supérieur, deux universités (Paris-6 l'Université Pierre et Marie Curie et l'Université de Cergy-Pontoise) et deux grands établissements (l'Observatoire de Paris et l'École normale supérieure). Son implantation dans ces quatre établissements, aujourd'hui encore sur cinq sites assez distants, impose un fonctionnement en 5 entités ayant une assez grande indépendance, qui permet à chacune de bien s'adapter à leur environnement proche de recherche, de développer des liens locaux étroits, et de participer activement à la vie locale. L'équipe de gestion est également en partie répartie, pour garantir aussi une bonne intégration dans le fonctionnement administratif local. L'organigramme fonctionnel du laboratoire est rappelé ci-dessous (Fig. 7.1.1).

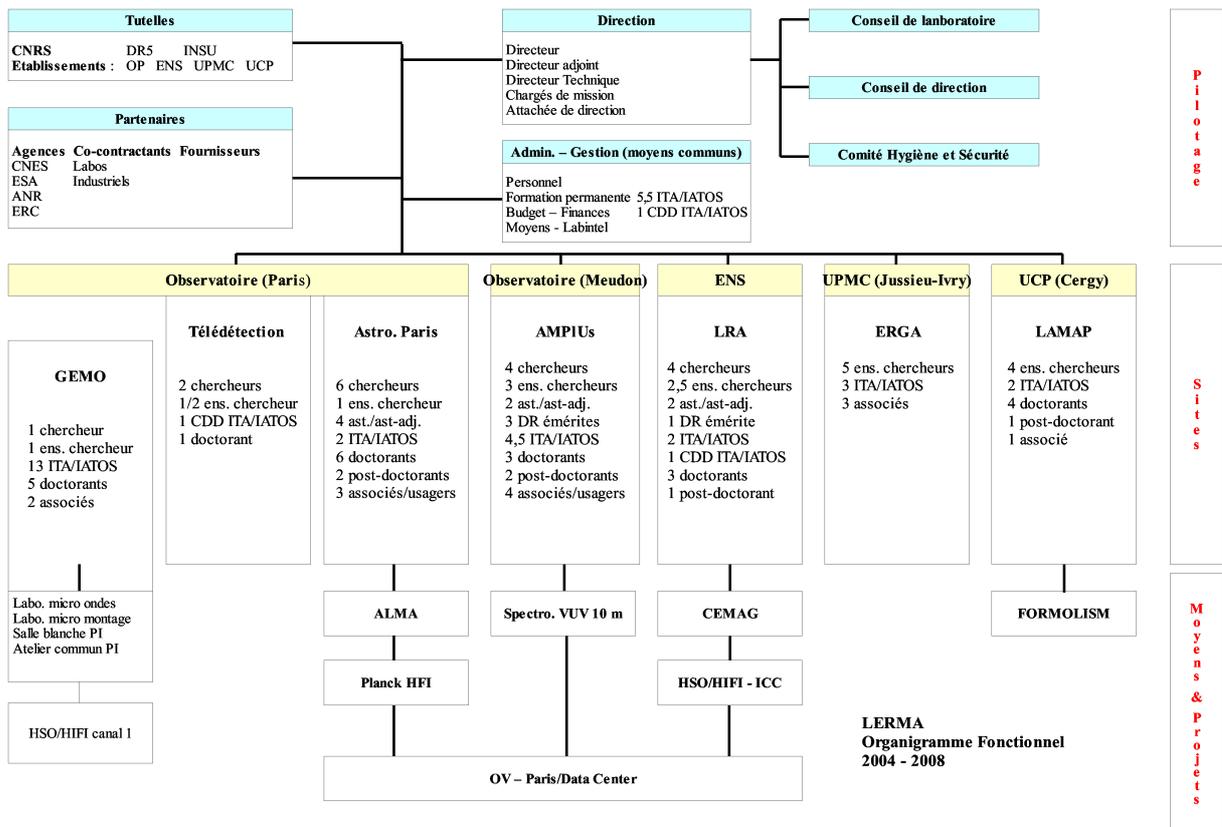


Fig. 7.1.1: Organigramme fonctionnel du LERMA, distinguant la couche de pilotage, les équipes, et les moyens et grands projets

Chacune de ces 5 entités géographiques est elle-même sub-divisée, en fonction de la nature

7. Fonctionnement de l'unité

des activités : sur le site parisien de l'Observatoire ont été définies, dès la création du LERMA, deux équipes fonctionnelles distinctes, l'équipe d'astrophysique, dirigée par F. Combes, et le groupe d'études micro-ondes, dirigé par G. Beaudin. S'en est plus récemment détachée, pour lui donner une meilleure visibilité en Sciences de la Terre, une troisième petite équipe fonctionnelle, spécialisée dans la télédétection des atmosphères et surfaces planétaires, dirigée par C. Prigent. Sur l'ensemble des sites les équipes sont sous-structurées en fonction des activités ou des projets, mais cela n'apparaît pas dans l'organigramme général du laboratoire : groupes Galaxie et Cosmologie (resp. F. Combes), Etoiles et environnements stellaires (resp. M. Heydari), Univers primordial (N. Sanchez) au sein de l'équipe Astro-Paris, équipe théorique et équipe expérimentale à Meudon, activités expérimentales et observationnelles à Cergy, activités théoriques et observationnelles à l'ENS. Cette structure plus fine apparaît essentiellement dans l'organisation du travail quotidien, et dans la mise en place des projets.

7.1.2. Pilotage du laboratoire

Le LERMA se présente comme une fédération de 5 entités géographiques, chacune des entités menant une activité largement autonome, en synergie avec ses partenaires locaux et son établissement. Mais comme expliqué en introduction, et comme cela a pu apparaître dans la présentation scientifique et dans l'exposé des réalisations du laboratoire, les liens entre ces entités sont nombreux et variés, les intérêts largement convergents, l'animation scientifique est développée aussi à l'échelle du laboratoire (séminaire, journées thématiques, formation doctorale, prospective, engagement dans les grands projets), et les moyens, dans une large mesure sont demandés et gérés par le laboratoire. Il s'agit donc bien d'une unité opérationnelle, solidaire et non facilement divisible. La dualité d'approche centralisme / autonomie est familière : la réalité est plus complexe qu'une fédération, et moins simple qu'une unité. La mise en œuvre de cette réalité au LERMA est certes difficile, mais source d'une riche dynamique.

L'équi

pe de direction du laboratoire, conduite jusqu'au 31/12/2007 par Jean-Michel Lamarre, est composée depuis le 1/1/2008 du nouveau directeur, M. Pérault, du directeur adjoint, L. Pagani qui a succédé à V. Bommier, du directeur technique, G. Beaudin, et de la fonction d'administrateur, initialement occupée par C. Jouan, et dédoublée aujourd'hui entre une responsable administrative (et attachée de direction, V. Audon) et un responsable financier (L. Giro). L'administrateur est épaulé par l'équipe administrative (3,5 ETP). L'équipe exécutive, qui comprend donc 5 personnes est assistée des conseils d'une chargée de mission permanente, S. Cabrit, plus particulièrement impliquée dans l'élaboration de la politique scientifique du laboratoire.

Le Conseil de laboratoire est l'assemblée statutaire consultative de l'unité. Il se réunit en principe au moins 3 fois par an, en pratique entre 2 et 4 fois. C'est un organe important pour construire la politique scientifique du laboratoire, à long terme, et un lieu indispensable d'échanges et de discussions sur les modalités ou les règles de fonctionnement, les priorités de recrutement, et tous les problèmes liés à la vie et à l'activité du laboratoire.

Des comités, dont les responsables sont clairement identifiés, sont chargés de certaines des missions organiques de l'unité: hygiène et sécurité, formation permanente, communication.

Pour la conduite du laboratoire, la direction s'appuie sur le Conseil de direction, qui réunit les 7 chefs des équipes fonctionnelles. Ce conseil est pleinement impliqué dans les décisions importantes accompagnant la mise en œuvre de la politique scientifique du laboratoire. Il ne

se réunit qu'un nombre limité de fois dans l'année, à l'occasion d'échéances importantes, mais communique régulièrement avec la direction (liste equipes.lerma sur le serveur de l'Observatoire).

Pour les dossiers les plus importants le directeur nomme des chargés de mission. Les missions actuelles incluent : l'enseignement et les relations avec les universités (N. Feautrier, remplacée fin 2008 par P. Encrenaz), la communication (F. Combes), les systèmes d'information (J.-F. Rabasse), l'accueil des arrivants (C. Jouan).

La direction du laboratoire répond de la gestion des ressources humaines et financières, mises à disposition du laboratoire, et s'assure de la conformité des conditions de travail avec les règlements. Elle assure les relations avec les établissements qui hébergent l'unité et avec l'organisme de tutelle (CNRS), le cas échéant avec les agences de financement (CNES, ANR). Elle intervient en amont des projets par des incitations à prises d'initiatives et par des propositions d'actions, elle intervient ensuite, de façon limitée, dans l'instruction des projets, en confrontant les priorités, et en s'assurant de l'adéquation des moyens aux objectifs, puis dans leur mise en œuvre par le suivi des moyens d'accompagnement, et des relations partenariales ou contractuelles. L'équipe de direction doit aussi conduire la réflexion sur les évolutions du laboratoire à moyen terme, de ses structures, de ses moyens, et de sa politique de recrutement, afin d'accompagner la mise en œuvre des objectifs scientifiques définis en commun.

L'équipe de direction travaille en configuration rapprochée à l'Observatoire, site parisien : elle tient souvent de courtes réunions des acteurs impliqués sur un dossier, essaie d'être réactive aux demandes internes, et aux innombrables requêtes des établissements, qui émettent de fréquentes demandes d'information, a fortiori dans l'actuelle période de transformation. La direction du laboratoire est en revanche peu présente sur les autres sites, mais s'efforce d'être disponible pour les chefs d'équipes et tout membre du laboratoire qui en fait la demande.

La communication électronique est abondamment utilisée pour assurer les indispensables échanges d'information au sein du laboratoire : mode de communication facile, certes imparfait, que nous essaierons de compléter et remplacer en partie par la mise en place d'un intranet du laboratoire couvrant l'ensemble des activités, et par l'utilisation plus fréquentes de télé- et de visio-conférences, qui permettent une meilleure qualité de dialogue que le courrier électronique.

7.2. Personnels

A l'heure de remettre ce bilan (octobre 2008), le LERMA est composé de 73 personnels permanents et 11 personnels sous contrat, auxquels s'ajoutent 20 doctorants.

Une brève analyse est donnée à partir de trois informations qui nous ont semblé importantes, la distribution des effectifs de personnels permanents en fonction des tranches d'âge et du corps d'appartenance, le bilan des mouvements sur 4 ans, et l'extrapolation à 2014 en l'absence de nouveaux recrutements, et le suivi des doctorants ayant soutenu leur thèse au LERMA pendant les 8 dernières années.

La pyramide des âges globale (Fig. 7.3.1) est plutôt plate, tous corps confondus, ce qui est une manifestation du renouveau permanent du laboratoire. Les deux dernières tranches d'âges des ITA/IATOS sont assez peuplées, laissant craindre un risque de diminution notable des effectifs dans la décennie à venir. Il faudra donc en particulier veiller à pérenniser par des recrutements le savoir-faire unique présent dans le GEMO.

7. Fonctionnement de l'unité

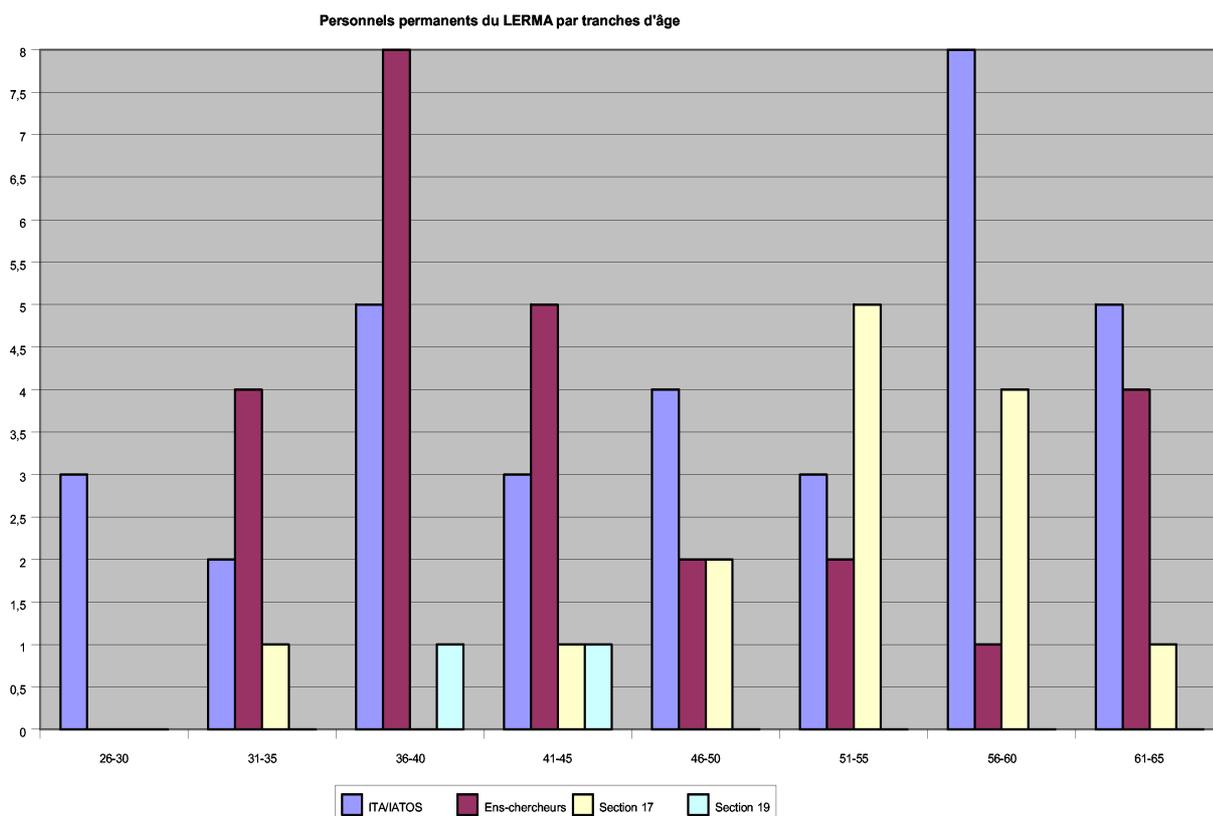


Fig. 7.2.1: Pyramide des âges des différents types de personnels permanents du LERMA au 01/10/2008

Evolution des personnels permanents et CDD du LERMA entre 2004 et 2008 et projection au 01/01/2014

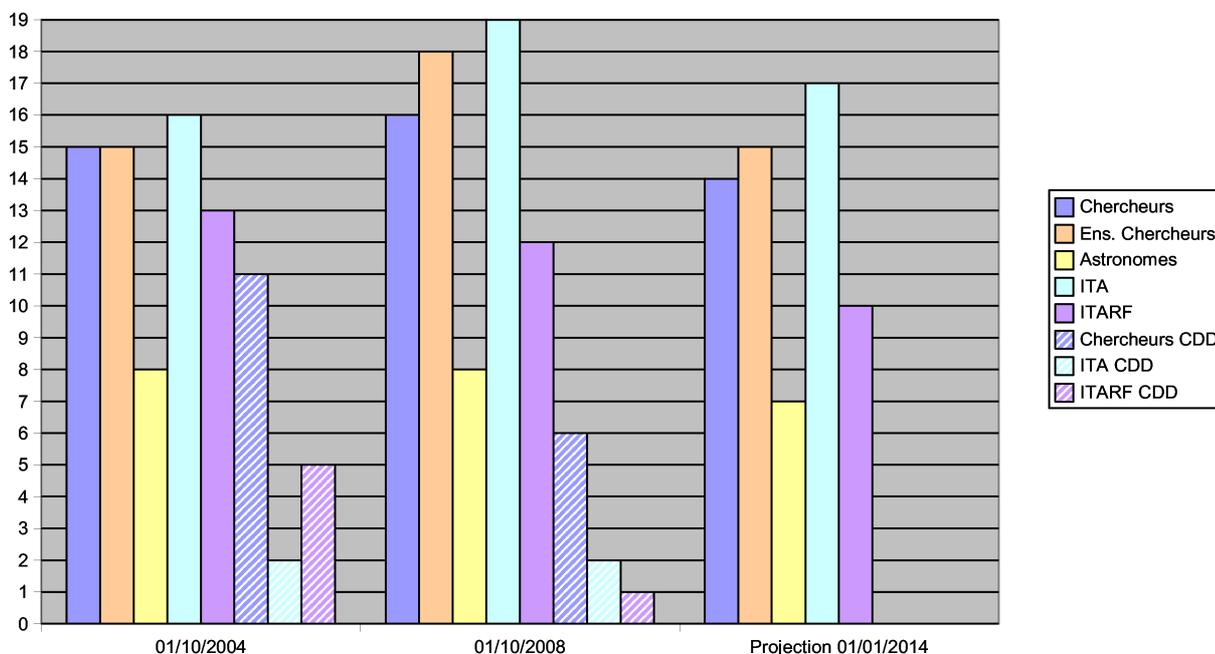


Fig. 7.2.2: Evolution sur 4 ans des effectifs LERMA permanents et contractuels

En revanche la pyramide des chercheurs et enseignant-chercheurs a son pic dans la tranche

36-40 ans ce qui assure au laboratoire d'importantes forces jeunes. On peut cependant remarquer que ce pic est presque entièrement dû aux enseignants-chercheurs, la distribution des chercheurs présentant, elle, un profil très âgé (même en ne tenant pas compte des 4 chercheurs émérites du laboratoire, non inclus dans ce graphe).

La figure suivante (Fig. 7.2.3) montre les variations d'effectifs sur 4 ans, par type de personnels, permanents et contractuels. On remarque que les départs, surtout dus aux départs en retraite, mais aussi à la mobilité de plus jeunes vers d'autres laboratoires, ont été amplement compensés durant le dernier quadriennal par les arrivées qui sont, dans une large mesure, des recrutements. La perte de 2 personnels de l'Observatoire partis en retraite durant la période, est partiellement masquée par l'accrétion de personnels IATOS universitaires, qui n'ont pas remplacé les fonctions perdues (traitement de données et instrumentation).

Le tableau récapitulatif le devenir des 41 doctorants qui ont soutenu leur thèse au LERMA entre 2000 et 2008 est instructif à plus d'un titre.

Moins de la moitié des financements provient du MESR (20), 5 ont été financées entièrement ou partiellement par le CNES, 4 l'ont été par l'étranger ou le MAE et 2 ont été un cofinancement avec l'industrie (Astrium, France Telecom).

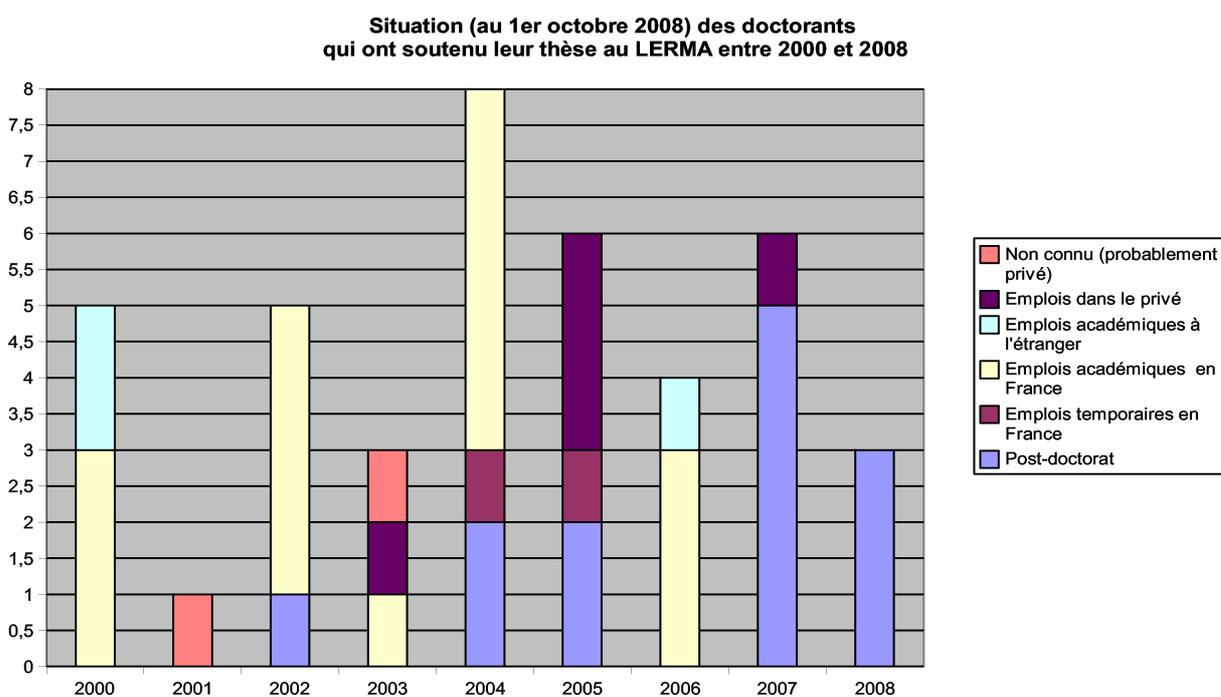


Fig. 7.2.3: Situation fin 2008 des doctorants LERMA 2000-2008

Comme le montre la figure Fig. 7.3.2, sur ces 41 jeunes docteurs seul un est encore en position post-doctorale au bout de six ans, 2 sont sur des CDDs, alors que près de la moitié (19) ont des postes académiques en France ou à l'étranger, ou dans des organismes internationaux et 5 ont des emplois stables dans le privé. Les autres sont en post-doc depuis moins de quatre ans, une situation courante en astrophysique.

7.3. Budget et répartition des ressources

Le budget du LERMA peut être présenté à 3 niveaux différents :

- le budget directement géré par le laboratoire
- le budget consolidé, incluant une évaluation de la masse salariale non imputée sur le budget du laboratoire
- le budget environnementé, incluant en outre une estimation des coûts d'infrastructure et des coûts de l'ensemble des services extérieurs à l'unité mobilisés pour son activité (par exemple les coûts de siège). Le CNRS avait estimé un facteur d'environnement de 1.8 pour ses laboratoires, le CNES récemment proposait 1.6. Ces estimations sont moyennes, et probablement très approximatives.

7.3.1. Budget géré par le laboratoire

Les ressources du laboratoire (voir les tableaux récapitulatifs 2006 et 2007 et) proviennent de :

- versements récurrents du CNRS, et du Ministère de la Recherche et de l'enseignement supérieur (à travers les contrats quadriennaux établis avec les établissements d'enseignement supérieur d'implantation). La dotation récurrente du LERMA est passée de 336 k€ TTC en 2006, à 322 k€ en 2007, puis 288 k€ en 2008, et 260 k€ attendus en 2009. La cause principale de cette dégradation est la diminution importante des moyens dont dispose le CNRS pour ses laboratoires depuis quelques années (dotation de fonctionnement passée de 170 k€ à
- crédits sur appels d'offre (par exemple BQR, programmes nationaux) pour un montant à peu près constant de 280 k€ par an sauf en 2008 où il est tombé à 220 k€ et
- contrats : nationaux (ANR, CNS, région), européens (UE : réseaux et infrastructures de recherche) et internationaux (ESO, ESA, ...). Les contrats ont représenté un total de 1,7 M€ en 2006, 2M€ en 2007, 560 k€ en 2008 et 1M€ prévus en 2009.

La part d'origine internationale (contrats européens) varie de 0 (2008) à 400 k€

Rubriques du quadriennal	TTC	
	Dot.de base	Dot.spécifique
Etablis.Ens.Sup.& de recherche support : OBS.Paris	94 800	119 185
Etablis.Ens.Sup. et de recherche: UCP	23 000	16 000
Etablis.Ens.Sup. et de recherche : P6 - UPMC	23 000	4 707
Etablis.Ens.Sup. et de recherche : ENS	25 500	0
Organisme de recherche : CNRS-INSU	169 832	142 922
Autres	0	0
Total	336 132	282 814
Programmes internationaux		0
Communauté européenne		83 326
Ministères hors Enseignement Supérieur & Recherche		362 269
Appels à projets ANR		319 200
Institut Carnot		
Pôles de compétitivité		
Collectivités territoriales		880 560
RTRA - RTRS		
Fondation, association		
Contrats de recherche privés		0
Licences d'exploitation des brevets et COV		
Prestations d'expertise		
Autres OBS		26 544
Autres CNRS		11 968
Total		1 683 868

Fig. 7.3.1: Budget 2006

Rubriques du quadriennal	TTC	
	Dot.de base	Dot.spécifique
Etablis.Ens.Sup.& de recherche support : OBS.Paris	93 800	104 350
Etablis.Ens.Sup. et de recherche: UCP	23 000	16 000
Etablis.Ens.Sup. et de recherche : P6 - UPMC	23 000	1 000
Etablis.Ens.Sup. et de recherche : ENS	25 500	10 000
Organisme de recherche : CNRS-INSU	156 676	152 490
Autres	0	0
Total	321 976	283 840
Programmes internationaux		245 936
Communauté européenne		166 766
Ministères hors Enseignement Supérieur & Recherche		810 767
Appels à projets ANR		437 204
Institut Carnot		
Pôles de compétitivité		
Collectivités territoriales		406 640
RTRA - RTRS		
Fondation, association		
Contrats de recherche privés		0
Licences d'exploitation des brevets et COV		
Prestations d'expertise		
Autres OBS		7 348
Autres CNRS		0
Total		2 074 661

Fig. 7.3.2: Budget 2007

(2007). Les montants des contrats sont donnés pour l'année de signature, mais ils sont réalisés sur plusieurs années. En moyenne, le montant des contrats représente 1,3 M€ par an, soit le double du soutien de base et des crédits sur programme réunis. Au total, le budget est en moyenne sur la durée du quadriennal en cours est de 1,9 M€ par an.

Certaines activités du laboratoire sont les principales consommatrices de ces crédits (astrophysique de laboratoire, GEMO, calcul). La mise en place d'un méso-centre de calcul à l'ENS a représenté un investissement ponctuel très supérieur aux dépenses habituelles pour les moyens de calcul.

Les crédits de fonctionnement (permettant de régler la partie imputée au laboratoire des fluides fournis par l'établissement : téléphone, accès réseau, ...) et les dépenses courantes (petits équipements, missions, ...) sont répartis à 80% au prorata des personnels de chaque site. Des ajustements permettent de tenir compte de particularités locales d'imputation des charges. L'enveloppe restante est utilisée pour les dépenses concernant l'ensemble du laboratoire, pour assurer une mutualisation des risques, de pannes par exemple, et pour engager quelques actions incitatives ponctuelles.

7.3.2. Coût consolidé

Bien que les unités de recherche n'aient aucun contrôle de la masse salariale des personnels qui leur sont affectés, en dehors, dans des limites étroites des ingénieurs sous contrat et chercheurs postdoctorants, il est intéressant d'en estimer le coût approximatif. Avec un coût salarial unitaire moyen de 60 k€ par an pour 100 personnes rémunérées au titre de leur appartenance au LERMA, le budget consolidé moyen annuel s'élève à 7,9 M€ par an. Les salaires représentant alors plus des $\frac{3}{4}$ du budget consolidé.

Avec un coût d'environnement estimé par le CNRS à un facteur de 1.8 sur la masse salariale le coût environné du laboratoire s'élève à 12.7 M€ par an.

Les grands équipements (télescopes au sol ou dans l'espace, calculateurs nationaux) ne sont pas inclus dans le facteur d'environnement CNRS. L'astronomie opère de grands équipements, dont il est également intéressant d'essayer de chiffrer l'utilisation par le laboratoire. Sur la base d'un coût horaire de télescope de 2,5 k€ (c'est le chiffre auquel on arrive pour l'un des instruments de l'IRAM avec 4000 heures d'observations utiles par an et en retenant un coût total annuel de 20 M€, amortissements sur 10 ans inclus), et de 500 heures d'observations sur l'ensemble des projets d'observation ayant un PI au LERMA, le coût effectif d'utilisation des TGE s'élève à 1,25 M€. Ce montant donne au mieux un ordre de grandeur, très approximatif : la variation annuelle, selon les programmes acceptés et les instruments utilisés, est considérable.

Ces chiffres, certes imprécis, donnent à la publication de rang A cosignée par le LERMA un coût total estimé moyen inférieur à 100 k€. Si on ne considère que la dotation de base le coût n'est plus que de 2 k€ TTC. Cette dotation, bien que minime dans la dépense, est un apport indispensable pour un fonctionnement efficace du laboratoire: hélas cette dotation diminue systématiquement depuis 4 ans.

7.4. Le LERMA dans le contexte national et international

Les tableaux de données complémentaires du chap.5 du présent bilan scientifique (p. 259 *et seq.*) donnent un aperçu des divers engagements des membres du laboratoire dans le système de recherche et d'enseignement supérieur national, et des contributions du laboratoire à la recherche en astrophysique internationale. Quelques éléments d'analyse sont présentés dans cette section.

7.4.1. Engagements nationaux

Le LERMA a fondé la radioastronomie millimétrique et submillimétrique en France, et a significativement contribué au développement de la physique atomique et moléculaire pour l'astrophysique (programme national de physico-chimie du milieu interstellaire), puis au développement de l'astrophysique numérique. De nombreux chercheurs du laboratoire ou formés au laboratoire se sont engagés dans le développement de l'IRAM et d'autres laboratoires (IAS, LAOG, LPMA, ...). Plusieurs ont pris en charge des responsabilités variées dans notre système de recherche : au cours des dernières années le LERMA a fourni une DSA astronomie de l'INSU, devenue depuis responsable des programmes d'exploration de l'Univers au CNES, une chargée de mission INSU ayant aussi temporairement fait fonction de DSA, une chargée de mission astronomie au MESR (MSTP), puis déléguée scientifique adjointe à l'AERES. D'autres ont participé à la Commission de spécialistes en astronomie et astrophysique de l'INSU (CSAA), au comité ANR Programme blanc, au Comité national de la recherche scientifique (section 17), au Conseil national des astronomes et physiciens du globe (section astronomie), à la direction du programme national Galaxies (PNG), et aux conseils scientifiques des programmes physico-chimie du milieu interstellaire (PCMI), physique stellaire (PNPS), soleil-terre (PNST), télédétection spatiale (PNTS), origine des planètes et de la vie (OPV, co-direction), à la création de l'action spécifique ALMA (ASA), à celle du GDR Radiométrie atmosphérique (direction), aux groupes spécialisés du CNES (astronomie et physique fondamentale), et à plusieurs autres comités nationaux (Conseil scientifique de défense, Conseil supérieur de la recherche et de la technologie), et institutions et sociétés savantes (Académie des sciences : 2 membres, Société française de physique, Comité national français d'astronomie, Société française d'astronomie et astrophysique (présidente, trésorier), CNFRS (pdt commission J, vice-pdt). Moins visible que les charges officielles, mais non moins importante, est l'implication fréquente de membres du laboratoire pour des expertises variées.

Les membres du laboratoire assument également, ou ont assumé des responsabilités importantes dans les établissements d'enseignement supérieur où le laboratoire est présent et où il s'investit fortement : direction d'UFR, d'une Ecole doctorale, direction de parcours de master à l'UPMC et à l'ENS, vice-présidence scientifique de l'Observatoire, coordination recherche du PRES Universud-Paris. L'implantation d'une équipe du LERMA à l'ENS est un relais important de l'astrophysique auprès des élèves de physique (récemment l'astrophysique est passée en tête des orientations d'élèves de master). Comme exposé Par ailleurs deux initiatives importantes pour la diffusion de la science auprès des jeunes ont été prises par des membres du laboratoire: la participation française à l'*Univers à portée de main*, et la création de *Sciences à l'école*. Le LERMA joue aussi un rôle central en France dans le dispositif *Année mondiale de l'astronomie 2009*. On peut également mentionner le rôle d'éditeur des *Images de la physique* (CNRS).

Par l'ensemble de ces engagements, régulièrement renouvelés, le LERMA participe intensément au développement de la recherche en astrophysique et en sciences de l'univers en France, et à sa diffusion.

7.4.2. Positionnement international

Le LERMA est aussi largement impliqué dans l'astrophysique internationale : rôle historique dans la fondation de l'IRAM et la promotion d'un observatoire spatial sub-mm (initialement FIRST, devenu Herschel, l'un des mission scientists appartient au LERMA), association à la mission Planck Surveyor (HFI instrument scientist), participation à Miro/Rosetta, et à ODIN, engagement significatif pour le développement des interféromètres géants ALMA puis SKA. Les travaux conduits au laboratoire le sont aussi, dans une très large mesure, en collaboration internationale : le LERMA anime ou participe à de nombreux réseaux ou projets internationaux.

a) *Les grands moyens d'observation internationaux*

Cette implication se poursuit aujourd'hui par l'engagement de plusieurs chercheurs du laboratoire dans la construction et l'exploitation des très grands équipements (TGE) : IRAM (personnel mis à disposition puis détaché, comité des programmes, conseil scientifique), Observatoire spatial Herschel (Mission scientist, fournitures HIFI, programmes-clés), ALMA (responsabilité de la définition du modèle de données, et du simulateur de données), SKA (engagement scientifique dans la phase d'étude - design study), COLUMBUS/expériences EXPOSE, Planck Surveyor (HFI instrument scientist), Hubble et Spitzer Space Telescopes (comité des programmes), Submm Array (SMA, comité des programmes), mais aussi THEMIS (conseil d'administration, conseil scientifique), ESO (Observing Program Committee).

Les observateurs du laboratoire ont bien sûr accès régulièrement aux grands télescopes internationaux. Les principaux programmes conduits durant la période de ce bilan sont listés en annexe section 1

b) *La recherche européenne et mondiale en réseaux*

Les chercheurs du laboratoire participent à plusieurs réseaux européens, parfois comme coordinateurs : FP6 puis FP7 (PCRD) RTN JETSET (coordination scientifique), Molecular Universe (co-coordination), Constellation, I3 EGEE (resp. française astro), Radionet/AMSTAR, nouveaux projets : VAMDC (coordination), Radionet/AMSTAR+, programme intensif ERASMUS : *supercomputing in Astrophysics Fluid Flow* (co-PI).

Parmi les autres activités en réseaux internationaux, on peut citer : ARENA (Astronomie en antarctique), LaserLab (réseau européens de grands lasers), ASTRONET (Roadmap 2008: chair panel D, calcul), projets labellisés ASTRONET: StarFormat (PI) et CATS, et participation à plusieurs PICS, International Virtual Observatory Alliance (IVOA).

Les engagements internationaux se traduisent aussi par l'appartenance à divers comités et sociétés internationaux : European astronomic society (EAS), Union astronomique internationale (IAU) : commissions 14, 28 (pdt), 34, ..., Radio Spectrum Policy Group (RSPG), Committee on Radio Astronomy Frequency (CRAF), Union Internationale des Télécommunications (UIT) à l'ONU, Union radio scientifique internationale (URSI), ainsi que par l'appartenance à quelques sociétés étrangères (comme l'AAS).

Les initiatives prises au laboratoire pour la diffusion de la culture scientifique se prolongent à

7. Fonctionnement de l'unité

l'international : coordination pour la France du projet *Hands on Universe*, organisation de la conférence d'ouverture de l'Année mondiale de l'astronomie (UNESCO, IYA-2009).

Comme en France, plusieurs membres du laboratoire sont occasionnellement sollicités pour des expertises par des agences étrangères (ex: NASA) ou internationales (ex: ESA).

c) *Vie scientifique internationale*

Le laboratoire a eu la chance de pouvoir inviter régulièrement des chercheurs ou professeurs étrangers, d'accueillir une demi-douzaine au moins de postdocs étrangers, et plus exceptionnellement de pouvoir recruter un étranger. Réciproquement plusieurs chercheurs du LERMA sont régulièrement invités à l'étranger.

Le laboratoire participe chaque année à l'organisation de plusieurs conférences internationales. Ont été recensées, parmi les conférences pour lesquelles un membre du laboratoire a présidé ou co-présidé un comité d'organisation : conférence internationale *Spectral Line Shapes* (2004-2006-2008), Atelier international *Polarized Solar Molecules II*, Observatoire de Paris, décembre 2004, conférence *Hunt for Molecules* Paris 2005, ISSTT 2006, conférence *Conditions for the Emergence of Life on the Early Earth*, Royal Society, Londres, 2006, Conférence *Physics and chemistry of complex molecules: the laboratory approach*, Aarhus, 2006, Colloque international *Solar Magnetism and Dynamics & THEMIS Users Meeting*, Observatoire de Paris, novembre 2006, Ecole internationale *Astronomy with the Herschel Space Observatory* les Houches 2007, Conférence IAU *Molecules in Space and Laboratory* Paris 2007, Atelier exploratoire ESF *eXtreme laboratory Astrophysics*, Paris, septembre 2008, Journée commune SF2A/ RAS 2008, et chaque année colloques internationaux de l'Ecole Daniel Chalonge.

Pour compléter le panorama mentionnons également une participation à l'édition scientifique internationale (éditeur *Astronomy and Astrophysics*).

Enfin, témoignage d'un fonctionnement largement international, durant la période de ce bilan on compte 18 thèses ont été co-dirigées avec un laboratoire étranger : J. Baubert (Suède, 2005), P. Jachym (Rép. tchèque, 2006), V. Casasola (Italie, 2008), F. Daniel (Espagne, 2007), S. Leygnac (USA), T. Islam (2007, USA), C. Combet (UK), A. Marocchino (UK, 2009), J. Štěpán (Rép. tchèque, 2008), H. Elabidi (Tunisie), H. Ben Chaouacha (Tunisie), W. Mahmoud (Tunisie), D. Panoglou (2008, Portugal), A. Zonca (2008, Italie), L. Vincent (Espagne, 2009), P. Pilleri (Italie), M. Kazmierczak (Pologne), M. Wang (Chine).

Ce rapide panorama des activités internationales du LERMA montre que notre laboratoire est très présent dans les structures de recherche internationales, dans le développement et l'exploitation des grandes infrastructures, nécessairement internationales, voire mondiale, dans la recherche sur ses principales thématiques, et dans la diffusion des connaissances.