PROGRAMME NATIONAL de l'INSU-AA

PHYSIQUE et CHIMIE DU MILIEU INTERSTELLAIRE

Document de bilan 2009-2012 et de prospective 2013-2016

Présidente: Christine JOBLIN, IRAP (Toulouse)

Directrice: Maryvonne GERIN, LERMA (Paris)

Directeur Adjoint: André CANOSA, IPR (Rennes)

http://www.pcmi.univ-montp2.fr/

Table des Matières

Résumé 2

I Bilan de l'activité 2009-2012 6
I.1 Sélection de Faits Marquants 6
I.2 Communiqués de Presse 13
I.3 Bilan Scientifique 17
I.4 Bilan Herschel et ALMA 27
I.5 Services d'observation Bases de données & Services théoriques 32
I.6 Bibliographie des travaux de recherche 36
I.7 Colloques – Manifestations Scientifiques 37

II Le Bilan en chiffres - Statistiques 39
II.1 Recensement de la communauté 39
II.2 Bilan Financier du programme sur la période 2009-2012 42
II.3 Aperçu des contrats obtenus par ailleurs par la communauté PCMI 48

III Prospective: outils, moyens et approches 49
III.1 Moyens Observationnels: Le paysage sol et espace 49
III.2 Expériences de Laboratoire: moyens et développements 57
III.3 Simulations Numériques: moyens et challenges 63
III.4 PCMI et l'enseignement 66

IV Prospective Scientifique 70
IV.1 Le MIS de la Voie Lactée à l'extragalactique 70
IV.2 Des Nuages Moléculaires aux Systèmes Protoplanétaires 76
IV.3 Origine de la Complexité de la Matière 85

Annexe 1: Fiches Bilan Projets soutenus par PCMI 93
Annexe 2: Fiches Bilan Manifestations Scientifiques soutenues par PCMI 197
Annexe 3: Bibliographie, Janvier 2009 - juin 2012 212

Résumé

La communauté PCMI qui fédère astrophysiciens, physiciens et chimistes s'est construite au cours des années autour d'activités interdisciplinaires liées à l'étude de la matière interstellaire et des milieux associés. C'est une communauté unique avec 300 chercheurs qui ont participé à des projets financés par l'Action sur Projets (AP) PCMI sur la période 2009-2012 (voir Chapitre ***« le Bilan en chiffres »***). Ces chercheurs étaient rattachés pour une bonne moitié à l'INSU suivi de l'INP (~1/4), de l'INC (~1/10) et de l'INSIS et IN2P3 (~1/10). Ces projets regroupent pour la plupart plusieurs équipes et pour un certain nombre des équipes inter-instituts. Le rôle du PCMI dans la formation des jeunes chercheurs à l'interface entre disciplines est important avec une population de 20% d'étudiants en thèse et 15% de post-doctorants sur la période passée. Le colloque bi-annuel (en 2010 à Arles, 2012 à Paris) joue un rôle important pour maintenir les échanges interdisciplinaires, en mêlant grandes questions astrophysiques, nouvelles données observationnelles, nouveaux développements et résultats expérimentaux et théoriques, progrès en modélisation des processus et objets astrophysiques. Concernant les écoles et congrès internationaux (voir chapitre correspondant et ***Annexe 2***) on notera une très forte implication de la communauté PCMI dans l'atelier national de formation *Chemistry in Astrophysical Media* (AstrOHP2010) et dans la conférence internationale *European Conference on Laboratory Astrophysics* (ECLA).

Les résultats scientifiques de ces 4 dernières années reflètent le temps fort de l'ère *Herschel* et *Planck*. Dans le chapitre « ***Faits marquants*** » nous donnons aussi d'autres exemples qui illustrent notre activité PCMI où observations, modélisation et études des propriétés de la matière sont intimement liées. Dans le chapitre ***« Bilan Scientifique »***, un bilan plus complet est ensuite donné avec des regroupements par thème. Il résume les fiches bilan (***Annexe 1***) envoyées par les porteurs de projets financés sur la période 2009-2012 mais prend aussi en compte des activités de la communauté PCMI qui n'ont pas fait l'objet de demande au programme sur cette période, car elles bénéficiaient d'autres financements (ANR etc…). La production scientifique compte plus de 200 publications **par an** dont 60% dans des journaux d'astrophysique et 40% dans des journaux de physico-chimie. Ce chiffre important est en partie lié à l'exploitation d'*Herschel* mais témoigne plus généralement du dynamisme de la communauté PCMI. La liste des publications est donnée en ***Annexe 3***. Notons aussi le nombre de communiqués de presse qui ont été recensés (19 en lien avec *Herschel*, 6 avec *Planck*, et 16 autres, voir chapitre ***« Communiqués de Presse »***).

La période 2009-2012 a été fortement marquée par la mise en opération d'*Herschel* et le soutien exceptionnel accordé par le CNES à notre communauté pour l'exploitation de cette mission. Il faut également signaler l'importance de *Planck* pour l'étude des avant-plans galactiques et le démarrage d'ALMA. L'activité dite d'astrophysique de laboratoire, avec son volet expérimental et théorique, est restée une activité très forte de la communauté PCMI. Une évolution en cours est le renforcement de cette activité autour des très grands instruments de la physique comme le rayonnement synchrotron SOLEIL (en particulier les lignes AILES et DESIRS) et les sources de particules énergétiques (le GANIL; à noter également Tandem d'Orsay). Enfin il faut saluer l'effort de structuration et d'interopérabilité des bases de données de physique atomique et moléculaire et des solides dans le cadre du projet européen VAMDC.

Les études de la communauté PCMI concernent différents environnements astrophysiques qui s'étendent des grandes aux petites échelles en s'appuyant sur une compréhension fine de l'évolution physico-chimique et dynamique de la matière. Cela se reflète dans la prospective scientifique qui est structurée en trois thèmes explicités ci-dessous. Comme décrit dans le chapitre ***« Outils, moyens, et approches »***, cette prospective s'inscrit dans l'ère d'ALMA, la continuation de l'exploitation des données d'*Herschel* et de *Planck*, la préparation des observations sur les moyens à venir à court terme (GAIA, PILOT, NOEMA, MATISSE-VLTI, …) et à plus long terme (JWST, SPICA, E-ELT,…). Elle s'appuie sur une activité d'astrophysique de laboratoire (expériences et théorie) forte et en développement sous l'impulsion des financements de type ANR, ainsi que sur une implication qui devrait encore augmenter sur les grands accélérateurs (synchrotron et faisceaux d'ions) qui offrent des capacités uniques pour la simulation des processus physico-chimiques interstellaires. Enfin, elle met

en jeu des simulations numériques toujours plus ambitieuses couplant processus dynamiques et évolution physico-chimique de la matière.

Le premier thème ***« Milieu interstellaire: de la Voie Lactée à l'extragalactique »*** reflète l'expertise de la communauté PCMI sur notre Galaxie qui s'étend maintenant aux galaxies proches pour lesquelles des observations de plus en plus précises sont disponibles. Les grandes orientations de ce thème concernent l'étude des phases du milieu interstellaire (le *CO-dark gas*, la formation des nuages moléculaires, …), celle de la structure et du bilan énergétique de notre Galaxie et des galaxies proches, l'étude des caractéristiques de la poussière et de son évolution avec les conditions physiques et la métallicité, et enfin celle du champ magnétique interstellaire et de la propagation des rayons cosmiques. Ces études présentent un certain nombre d'interfaces avec le PNCG et le PNHE. Ce thème pose aussi la question de la cascade de l'énergie des grandes vers les petites échelles et des traceurs physico-chimiques des régions de dissipation de la turbulence.

Le second thème ***« Des nuages moléculaires aux systèmes protoplanétaires »*** traite de la formation et de l'évolution des structures moléculaires denses dans les régions de formation stellaire et planétaire: filaments, cœurs froids préstellaires, enveloppes protostellaires et disques protoplanétaires, Il traite aussi des mécanismes de rétroaction stellaire (chocs, irradiation par le rayonnement X et/ou UV, enveloppes d'étoiles évoluées) qui affectent les environnements moléculaires. Un accent fort est mis sur l'interaction entre évolution physico-chimique et dynamique de la matière. Par exemple, l'évolution des propriétés des grains (charge, taille, ionisation) modifie le bilan énergétique et le couplage avec le champ magnétique, et aura donc un impact sur l'effondrement des cœurs denses, sur la structure et l'évolution des disques protoplanétaires et sur la structure des chocs. L'étude de ces petites échelles va encore se renforcer dans les années à venir avec les performances accrues en résolution angulaire des moyens observationnels (ALMA, VLTI, NOEMA). Cette partie de notre prospective présente des interfaces fortes avec le PNPS, et avec le PNP sur la partie des disques.

L'apport des physiciens et des chimistes est un atout majeur pour la communauté PCMI. Les données spectroscopiques, l'étude des processus inélastiques d'excitation et de relaxation collisionnelles, ainsi que des processus réactifs sont indispensables pour l'analyse des observations astronomiques et la caractérisation des conditions physiques et chimiques des milieux observés. L'expertise et les méthodes de pointe développées par ces communautés, aussi bien dans le domaine expérimental que théorique, permettent de s'attaquer aux multiples facettes de la formation et l'évolution de la matière interstellaire et circumstellaire, des atomes aux molécules, des agrégats aux nanograins et aux solides, ainsi qu'aux diagnostics qui permettent de sonder cette matière. En retour physiciens et chimistes bénéficient de l'apport des astrophysiciens qui leur donnent accès à l'Univers comme un laboratoire original et unique. Le troisième thème ***« Origine de la complexité de la matière »*** de notre prospective est dédié à ces questions et s'appuie sur la forte synergie interdisciplinaire, spécifique au PCMI, mettant en jeu observations astronomiques, études expérimentales et théoriques des processus physico-chimiques, simulations expérimentales et modèles astrophysiques. Du point de vue des problématiques astrophysiques, il met plus particulièrement en avant la question de la formation et de l'évolution des grains de poussière et celle de la complexité moléculaire. Les grains sont des acteurs majeurs dans l'évolution de la plupart des environnements astrophysiques mais notre connaissance de leur nature et de leurs propriétés reste encore trop partielle, et la question de leur formation en est à ses prémices. Ces dernières années ont montré l'étendue de la complexité moléculaire dans les régions de formation d'étoiles. L'enjeu est maintenant de maîtriser suffisamment les processus microscopiques pour pouvoir utiliser cette complexité comme traceur de l'évolution de ces environnements. Une des extensions vers l'exobiologie sera de mieux cerner l'héritage interstellaire et celui de la nébuleuse solaire primitive dans la chimie des corps primitifs. Cette partie est à l'interface avec le PNP.

Au delà de ces grandes questions scientifiques, les enjeux des années à venir seront plus que jamais de préserver la richesse interdisciplinaire du PCMI dans un contexte de restriction budgétaire et de cloisonnement en projets de plus en plus préoccupant. L'activité d'astrophysique de laboratoire est une force de la communauté PCMI et elle connaît un développement important en Europe. Une réflexion de la communauté européenne est en cours afin de mettre en place une structure d'harmonisation des objectifs et des programmes de cette activité dans le cadre de l'exploitation des données

astronomiques. Cette activité repose sur des dispositifs expérimentaux couteux dont la période d'exploitation et parfois de développement dépassent le cadre d'un contrat de type ANR. En l'absence de moyens dédiés conséquents au niveau européen actuellement, il est indispensable que le programme PCMI dispose d'un budget suffisant pour maintenir ces travaux sur le long terme au sein d'une communauté française qui est souvent pilote dans le domaine. Il faut souligner que sur la période 2009-2012, l'aide financière accordée par le CNES pour l'exploitation des données d'*Herschel* a permis de soutenir la partie de cette activité qui concerne l'obtention des paramètres spectroscopiques. Un soutien fort des partenaires INP et INC reste nécessaire tant au niveau financier que de celui de la reconnaissance des personnels impliqués (promotions, recrutement,…). Dans les années à venir, nous dédierons un effort supplémentaire afin d'aider les étudiants à valoriser leur activité dans le contexte interdisciplinaire du PCMI.

Enfin, après le succès d'*Herschel*, la communauté PCMI restera présente au plus haut niveau dans l'exploitation des grands télescopes au sol, en particulier ALMA et les radiotélescopes de l'IRAM (NOEMA), et dans la préparation des missions spatiales futures (SPICA,…). Elle continuera à soutenir l'effort de bases de données de physique atomique et moléculaire et des solides et les infrastructures associées (VAMDC), ainsi que les services théoriques indispensables à l'analyse des données d'observation. L'organisation de ces activités en services d'observation est un atout, et la mise en place d'un lien entre leurs structures de pilotage et le conseil scientifique du PCMI est fortement souhaitable. Elle maintiendra son effort de modélisation numérique en s'efforçant de coupler, dans ces modèles, les aspects dynamiques et l'évolution physico-chimique de la matière. La confrontation de ces modèles à des jeux de plus en plus complets de données observationnelles permettra de les tester et d'augmenter leur capacité prédictive, témoin de notre compréhension de ces objets astrophysiques et des processus qui gouvernent leur évolution.

Ce document a été préparé par le conseil scientifique de l'action sur projets PCMI, dont la composition est donnée ci-dessous, en bénéficiant de commentaires et suggestions de membres de la communauté, qui sont remerciés pour leur soutien. Merci à Edith Falgarone et Louis d'Hendecourt pour leurs conseils précieux.

Rafael Bachiller, Observatorio Astronómico Nacional (OAN), Espagne
André Canosa, Institut de Physique de Rennes (IPR), Rennes
Sylvie Cabrit, Laboratoire d'Etudes du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique (LERMA), Paris
Cecilia Ceccarelli, Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble (IPAG), Grenoble
Thierry Chiavassa, Laboratoire de Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires (PIIM), Centre de St-Jérôme Marseille
Emmanuel Dartois, Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS), Orsay
Anne Dutrey, Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux (LAB), Observatoire de Bordeaux.
Alexandre Faure, Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble (IPAG), Grenoble
Jean-Hugues Fillion, Laboratoire de Physique Moléculaire pour l'Atmosphère et l'Astrophysique (LPMAA) Université Pierre et Marie Curie, Paris
Maryvonne Gérin, Laboratoire d'Etudes du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique (LERMA), Paris
Jean-Claude Guillemin, Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Rennes (ENSCR), Chimie Organique et Supramoléculaire, Rennes
Stéphane Guilloteau, Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux (LAB), Observatoire de Bordeaux
Patrick Hennebelle, Astrophysique, Interactions, Multi-échelles (AIM), CEA, Saclay
Christine Joblin, Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie (IRAP), Toulouse
Franck Le Petit, Laboratoire Univers et Théorie (LUTH), Observatoire de Paris-Meudon, Meudon
Marc-Antoine Miville-Deschênes, Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS), Orsay
Thomas Pino, Institut des Sciences Moléculaires d'Orsay (ISMO), Orsay
Isabelle Ristorcelli, Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie (IRAP) Toulouse
Dahbia Talbi, Laboratoire Univers et Particules de Montpellier (LUPM), Montpellier

Les représentants des tutelles du programme (INSU, F. Pajot, INP P. Roubin et CNES O. La Marle) sont invités aux réunions du conseil scientifique. Les membres du bureau sont soulignés.

Fonctionnement du programme :

Le programme est géré par un conseil scientifique où sont invités les représentants des tutelles du programme (INSU, INP et CNES). L'administration est assurée par le bureau (Présidente, directrice et secrétaire scientifique).. La composition du conseil scientifique reflète la diversité des thématiques et des communautés scientifiques réunies autour de PCMI (astrophysique, physique, chimie, activités expérimentales et théoriques, etc.). Le bureau comporte toujours un représentant de l'INP.

Le bureau assure le lien avec les tutelles et la communauté PCMI. Un représentant du bureau est également invité aux réunions d'autres instances de la discipline comme la CSAA (commission spécialisée Astronomie Atrophysique), le groupe thématique « astrophysique » du CNES, et est contacté pour examiner si besoin les demandes d'observation avec les télescopes nationaux.

Le programme publie un appel d'offre annuel en phase avec les appels d'offre de l'INSU. Les orientations en sont discutées en réunion du conseil scientifique. Le texte est rédigé par le bureau et validé par le conseil scientifique. Comme décrit dans le document, le programme soutient financièrement l'organisation d'ateliers et de colloques et participe également à l'animation de la communauté notamment par l'organisation d'ateliers pendant les journées de la SF2A (voir ***Annexe 2*** et chapitre ***« Colloques, Manifestations Scientifiques »***).

La communication des actions du programme est faite par une liste de diffusion, et un site web http://www.pcmi.univ-montp2.fr/. Nous avons également demandé à une société spécialisée de nous proposer un logo, illustré sur la couverture du rapport, pour donner une identité visuelle forte au programme PCMI.

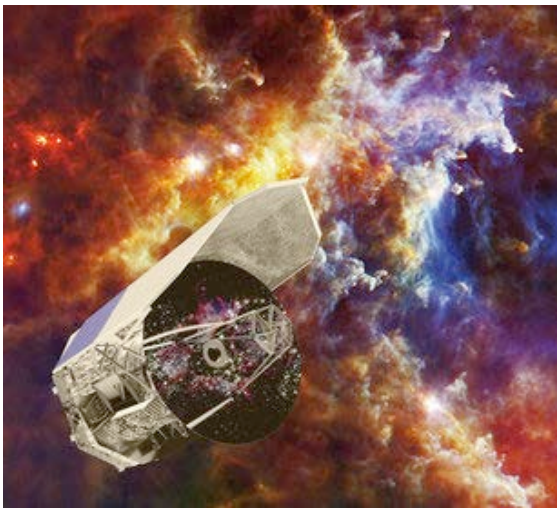
I Bilan de l'activité 2009-2012

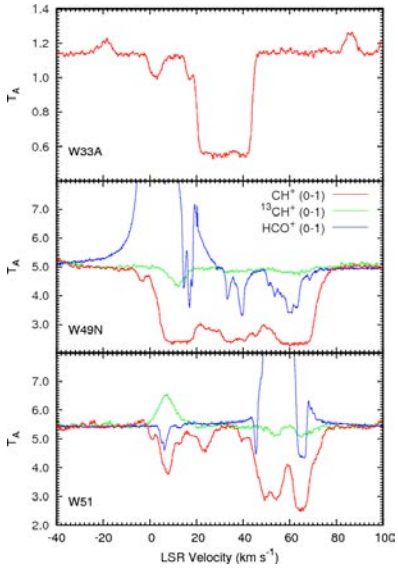
I.1 Sélection de Faits Marquants

La mission *Herschel*: de nouvelles molécules pour sonder l'Univers

La mission *Herschel* qui vient juste de s'achever a réalisé l'exploration complète du domaine spectral de l'infrarouge lointain et submillimétrique.

Grâce à *Herschel*, de nombreux résultats en spectroscopie on été obtenus parmi lesquels : (i) la première détection des ions H_2O^+, H_2Cl^+ et HCl^+ dans le milieu interstellaire[1], qui a révélé la phase de transition entre gaz atomique et moléculaire (~ 5% de H_2). Le taux d'ionisation de cette phase par les rayons cosmiques a pu être mesuré grâce à la combinaison de H_2O^+ avec OH^+. (ii) L'observation des ions moléculaires CH^+, $^{13}CH^+$ et SH^+ sur de très nombreuses composantes en vitesse[2] et leur interprétation grâce à un nouveau modèle de « chimie turbulente »[3], ont apporté une solution à une énigme posée depuis la fin des années 1930. (iii) La première détection de l'eau lourde (HDO et D_2O) dans un choc et dans l'environnement de la proto-étoile IRAS16293-2422 a donné des contraintes sur l'histoire thermique des glaces lors de la formation stellaire[4]. (iv) La mesure, dans les régions de photodissociation (PDR), du spectre rotationnel complet de CO jusqu'à J~25 et de CH^+ excité jusque J=6 a révélé à la fois une phase dense et un gaz beaucoup plus chaud qu'anticipé par les modèles classiques, impliquant la prise en compte du pompage rotationnel des molécules lors de leur formation dans les modèles[5].





A gauche: Image d'artiste du satellite Herschel devant la nébuleuse de la Rosette observée par l'instrument PACS (70, 160 et 250 µm, en bleu, vert et rouge; crédits ESA et F Motte)[6]. A droite : spectres de CH^+ et $^{13}CH^+$ obtenus dans la direction des régions de formation d'étoiles massives W33A, W49N et W51 par HIFI (programme PRISMAS) et spectres HCO^+ obtenus à l'IRAM[2].

L'exploitation de ces observations a bénéficié du travail de longue haleine mené en amont par les spectroscopistes, les physiciens, chimistes et astrophysiciens pour la détermination des paramètres spectroscopiques dans cette gamme de fréquences, le calcul des taux d'excitation collisionnelle, le développement d'outils d'interprétation et de modèles théoriques.

[1] M. Gerin, M. de Luca, J.R. Goicoechea, et al., A&A **518**, L110 (2010). M. de Luca, H. Gupta, D. Neufeld, et al., ApJ **751**, L37 (2012)

[2] E. Falgarone, B. Godard, J. Cernicharo, et al., A&A **521**, L15 (2010)

[3] B. Godard, E. Falgarone, M. Gerin, et al, A&A **540**, A87 (2012); B. Godard, E. Falgarone, G. Pineau Des Forêts, A&A **495**, 847 (2009)

[4] C. Codella, C. Ceccarelli, B. Lefloch, et al., ApJL **757**, L9 (2012); A. Coutens, C. Vastel, S. Cazaux, et al., A&A **553**, A75 (2013); V. Taquet, Peters, P. S., C. Kahane, et al., A&A **550**, 127 (2013)

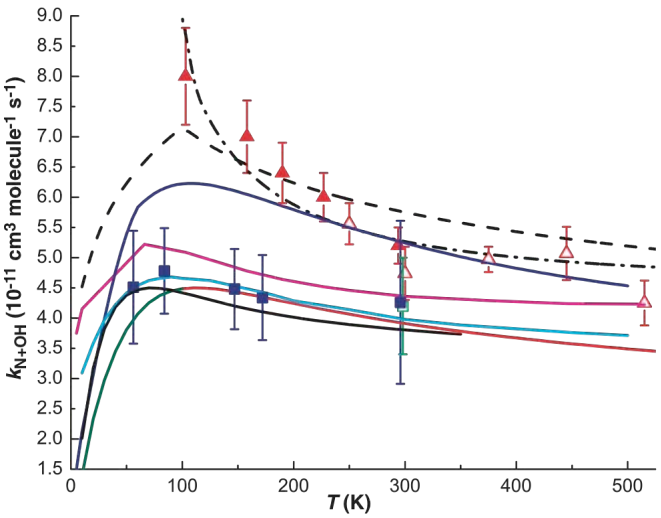
[5] J. Le Bourlot, F. Le Petit, C. Pinto, et al., A&A **541**, A76 (2012); J.R. Goicoechea, C. Joblin, A. Contursi, et al., A&A **530**, L16 (2011) Nagy, F. Van der Tak, F. F. S.; Ossenkopf, V.et al., A&A **750**, A96 (2013)

[6] F. Motte, A. Zavagno, S. Bontemps, et al., A&A **518**, L77 (2010)

Chimie de l'azote

La chimie de l'azote a été particulièrement explorée tant du point de vue observationnel, modélisation, expérimental ou théorique. Les observations avec le spectromètre HIFI d'Herschel apportent de nouvelles informations sur les abondances et le fractionnement isotopique des molécules azotées (notamment les hydrures d'azote). Parallèlement, un effort important de modélisation de la chimie des espèces azotées a été conduit. Un résultat important de ce travail a été de montrer que les rapports d'abondances des hydrures d'azote dépendent fortement du rapport ortho/para de l'hydrogène moléculaire dans le milieu interstellaire froid, un effet qui avait été négligé jusqu'à présent.[1]

Par ailleurs des résultats expérimentaux et théoriques concernant la réactivité de l'azote atomique en phase gazeuse (N + NO, N + OH, N + CN) à basse température[2,3] ont permis de montrer que la fraction d'azote moléculaire dans les nuages denses était beaucoup moins importante que précédemment estimée simplement du fait des faibles taux des réactions impliquées. Les calculs de collisions inélastiques ont par ailleurs montré que l'excitation rotationnelle de HCN et HNC par H_2 est très différente, rendant compte ainsi des anomalies mesurées dans le rapport HNC/HCN et réconciliant les modèles de chimie et les observations.[4] Enfin, l'étude comparative de la recombinaison dissociative de $N_2H^+ + e^-$ pour les deux voies de dissociation $N_2 + H$ et $NH + H$ a confirmé l'hypothèse de la formation majoritaire de N_2, aux basses températures du milieu interstellaire.[5,6] L'ensemble de ces travaux de laboratoire s'appuie sur l'expertise des physico-chimistes et alimente la base KIDA (KInetic Database for Astrochemistry; http://kida.obs.u-bordeaux1.fr) qui devient une base de référence au niveau international pour la modélisation chimique des environnements interstellaires et circumstellaires.[7]



Taux de la réaction N +OH -> NO + H en fonction de la température.
Confrontation entre mesures expérimentales et calculs théoriques: ■ mesures les plus récentes; △ , ▲ anciennes mesures. Les calculs les plus précis (méthode quantique indépendante du temps) sont représentés par la ligne noire pleine.

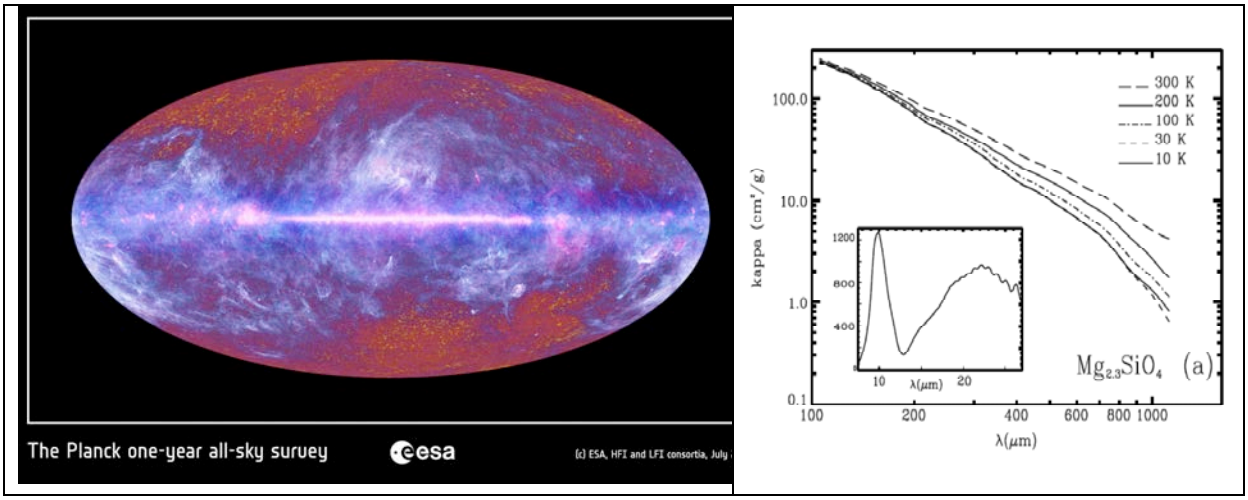
[1] V. Dislaire, P. Hily-Blant, A. Faure, et al. A&A, **537** A20 (2012)
[2] J. Daranlot, U. Hincelin, A. Bergeat, et al., PNAS, **109**, 24 (2012)
[3] J. Daranlot, M. Jorfi, C.J. Xie et al., Science, **334**, 1538 (2011)
[4] E. Sarrasin, D. Ben Abdallah, M. Wernli et al., MNRAS **404,** 518 (2010)
[5] D. Talbi, J. of Phys. Conf. Ser. **192**, 012015 (2009)
[6] D.O. Kashinski, D. Talbi, A.P. Hickman , CPL, **529**, 10 (2012)
[7] V. Wakelam, E. Herbst, J.C. Loison, et al, ApJS, **199**, 21 (2012)

La mission Planck sonde les propriétés et l'évolution des poussières et le *CO-dark gas*

L'analyse des données du satellite Planck, combinées à celles à 21 cm (HI) et moléculaires (CO), a permis de révéler d'importantes variations des propriétés des grains, en particulier dans le voisinage solaire et les galaxies proches comme les nuages de Magellan. Ce travail a mis en évidence des variations de la température des grains dans le milieu diffus, qui confirment l'hypothèse de la coagulation des grains[1], et de fortes variations d'abondance des petits grains dans certains nuages diffus du halo galactique pouvant provenir de la fragmentation des grains, liée à l'histoire dynamique particulière de ces nuages[2]. Les mesures de Planck ont en outre montré l'omniprésence, à grande échelle dans la Galaxie, d'une émission anormale à grandes longueurs d'onde attribuée à des petits grains en rotation (*spinning dust*).[3,4] Elles ont également confirmé un spectre d'émission des poussières extrêmement plat pour le petit nuage de Magellan, ce qui a permis de proposer la présence de grains de poussière d'une nature mécanique ou chimique différente, indiquant des différences du cycle de la poussière dans les milieux de faible metallicité.[6]

L'étude de la distribution de l'émission des poussières dans l'ensemble du voisinage solaire a permis de mesurer de façon précise la quantité de gaz sombre (*CO-dark gas*) invisible avec les traceurs classiques HI et CO dans le voisinage solaire[5]. Il pourrait s'agir de gaz moléculaire ne contenant pas ou peu de CO et dont la masse totale pourrait égaler celle du gaz moléculaire connu jusqu'alors. Parallèlement, le relevé de Planck a permis de détecter la poussière la plus froide dans la Galaxie (jusqu'à 7K), conduisant à la construction d'un catalogue de plus de 10^4 condensations froides, et mettant en évidence une variation d'indice spectral d'émissivité des grains avec la température.[7]

En laboratoire, l'étude détaillée des propriétés spectroscopiques d'analogues de la poussière silicatée dans le domaine IR moyen-submillimétrique montre une dépendance complexe de l'émissivité des grains avec la température et la fréquence.[8] Ces effets sont observés sur des grains de structure amorphe, et analysés en utilisant un modèle de grains reposant sur une description fine de la structure des solides à petite échelle.



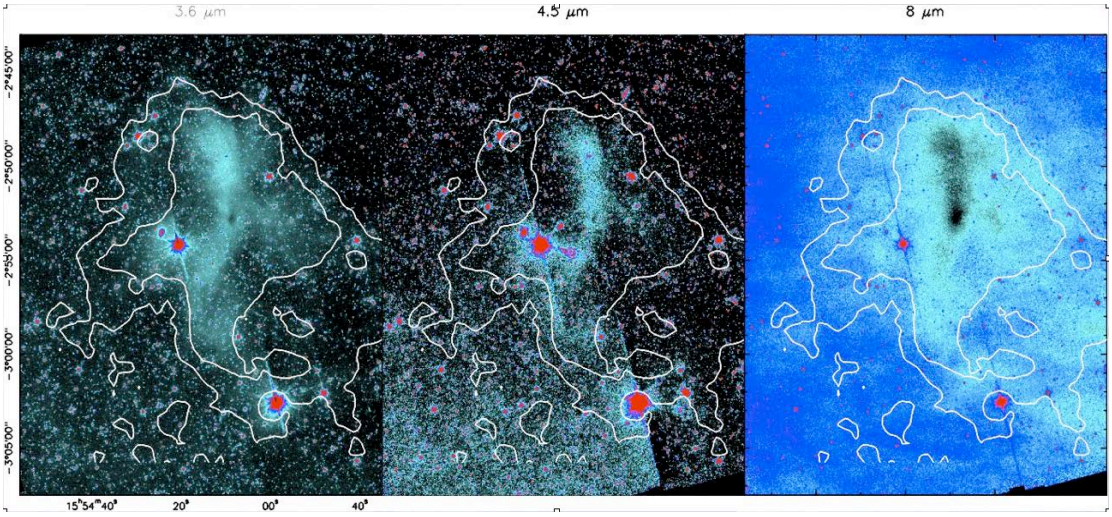
A gauche: image composite multi-fréquences du relevé effectué avec Planck, de 30 à 857 GHz, montrant à la fois les fluctuations du fond diffus cosmologique (fond rouge et jaune) et les émissions d'avant-plan dominées par les composantes de gaz et de poussières de notre Galaxie (communiqué ESA). A droite: mesures du coefficient d'absorption massique de silicates amorphes de type olivine à différentes températures, dans le domaine de longueurs d'onde 8-25 μm et 100-1200 μm.[8]

[1] Planck Collaboration, A&A **536**, A25 (2011) [2] Planck Collaboration, A&A **536**, A24 (2011)
[3] Planck Collaboration, A&A **536**, A20 (2011) [4] Planck Collaboration, A&A **536**, A21 (2011)
[5] Planck Collaboration, A&A **536**, A19 (2011) [6] Planck Collaboration, A&A **536**, A23, A22 (2011)
[7] Planck Collaboration, A&A **536**, A17 (2011) [8] A. Coupeaud, K. Demyk, C. Mény et al, A&A **535**, 124 (2011)

Communiqués de presse: http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=48204
http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Planck/Planck_sees_tapestry_of_cold_dust
http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Planck/Planck_steps_closer_to_the_cosmic_blueprint
http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=48203

La croissance des poussières: l'effet Coreshine

La découverte de l'émission à 3.6 et 4.5 µm provenant des parties denses du coeur L183 (ou *coreshine* - brillance de cœur) est interprétée par la diffusion du rayonnement interstellaire sur des grains de taille micronique. Cette émission diffuse dans l'infrarouge moyen est un phénomène général qui concerne environ la moitié des cœurs étudiés, mais aussi des enveloppes de proto-étoiles de Classe 0, de Classe I, avec ou sans flots. Cette découverte ouvre de nouvelles perspectives à la fois pour l'étude des propriétés des poussières (la diffusion étant très sensible à la distribution en taille des grains) et pour l'étude de la structure des cœurs pré-stellaires et de leur évolution.[1,2]



Cartes Spitzer à 3.6, 4.5 et 8 µm (de gauche à droite) du coeur L183. L'émission vue à 3.6 et 4.5 µm correspond à la zone dense vue en absorption à 8 µm. Les contours correspondent à A_V=5 et 10.[2]

[1] L. Pagani, J. Steinacker, A. Bacmann, A. Stutz, T. Henning, Science **329**, 1622 (2010)
[2] J. Steinacker, L. Pagani, A. Bacmann, S. Guieu, A&A **511**, A9 (2010)

Formation et photodésorption des glaces interstellaires

La première synthèse de molécules d'eau sur une surface froide à partir d'atomes H et O a été réalisée en laboratoire, démontrant une voie particulièrement efficace pour la formation des manteaux de glace dans les nuages denses.[1] Parallèlement, la surprenante grande variabilité des taux de photo-désorption de manteaux de CO, mesurés pour la première fois sur une large gamme de longueurs d'onde à l'aide du rayonnement synchrotron (ligne DESIRS à SOLEIL), met en lumière un processus de désorption non-thermique associé à l'absorption de photons UV sur les couches externes des manteaux de glaces.[2,3]. Les valeurs obtenues pour les taux de désorption permettent de modéliser ce processus dans les modèles astrophysiques, en tenant compte des conditions du rayonnement interstellaire local et en évaluant l'impact sur le bilan chimique en phase gazeuse.

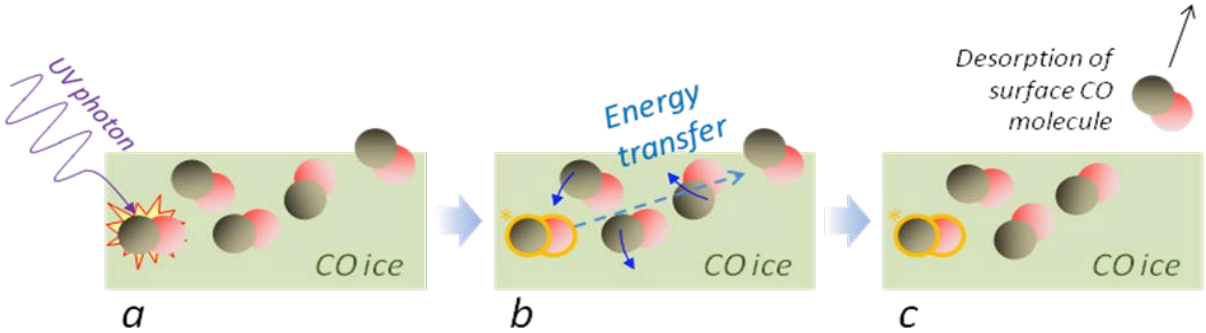


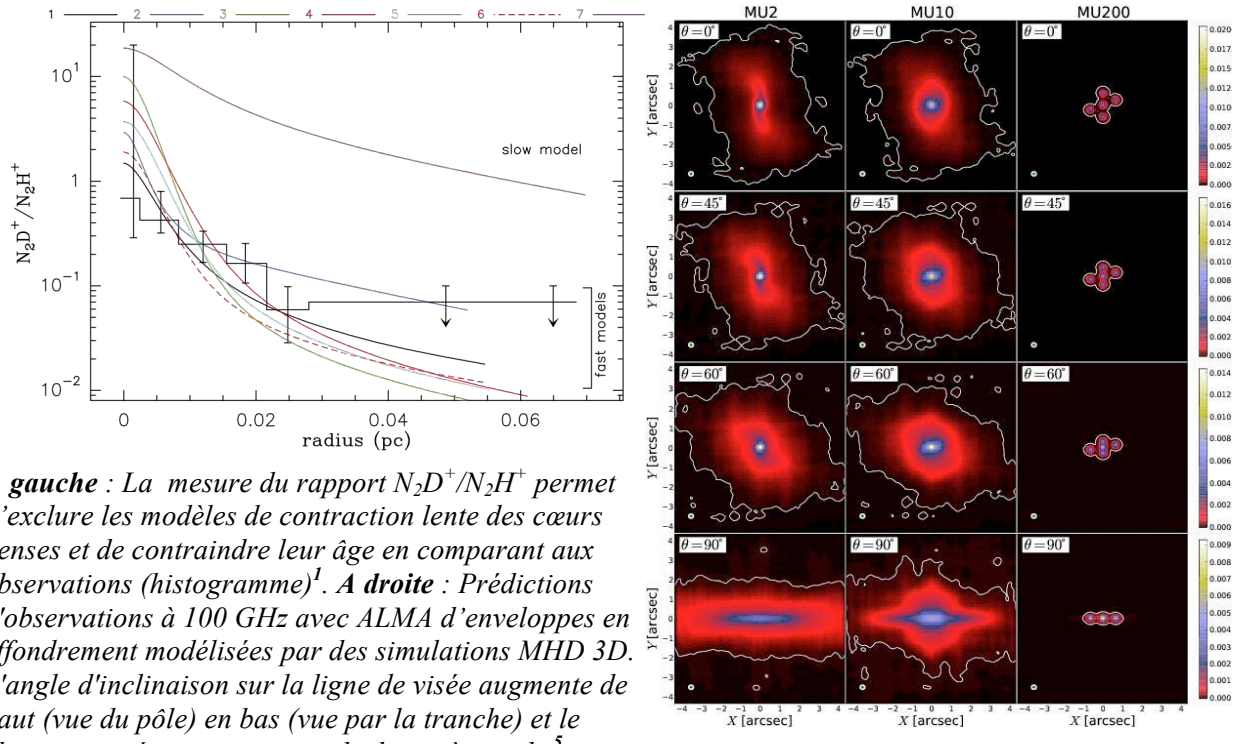
Schéma de principe du mécanisme de photodésorption de CO solide

[1] F. Dulieu, L. Amiaud, E. Congiu et al., A&A, **512** A30 (2010)
[2] M. Bertin, E.C. Fayolle, C. Romanzin, et al., PCCP **14** 9929 (2012)
[3] E. Fayolle, M. Bertin, C. Romanzin et al., ApJ Lett., **739** L36, (2011)

Formation des cœurs denses, des protoétoiles et des disques: La physico-chimie comme diagnostic de la dynamique

Depuis plus de 10 ans, deux scenarios étaient en compétition pour expliquer la formation des cœurs denses : une contraction lente régulée par la diffusion ambipolaire du champ magnétique, ou une contraction ~ 10 fois plus rapide (~ temps de chute libre) induite par la compression turbulente. Grâce à une collaboration[1] impliquant plusieurs équipes de PCMI (LERMA, IC2MP, ICB, IPAG), le couplage de simulations thermo-hydrodynamiques 1D avec un réseau chimique incluant les effets ortho/para sur la deutération des ions a établi une « horloge chimique » capable de distinguer entre ces deux scenarios (voir Figure ci-dessous). Dans le cas du cœur L183, le scenario rapide est nettement favorisé avec un âge de moins de 700 000 ans, et la formation d'hydrogène moléculaire dans le nuage parent doit dater de moins de 4 millions d'années.

Etendre ce type d'études aux phases d'effondrement protostellaire et de formation du disque nécessite la prise en compte des effets 3D dus à la rotation et au champ magnétique, et du chauffage par le choc d'accrétion. La collaboration d'équipes du LERMA, CEA/AIM, et ENS-Lyon a obtenu des progrès remarquables à ce sujet grâce à des simulations numériques lourdes en MHD 3D à maillage adaptatif avec le code RAMSES, dans lequel le transfert de rayonnement a été implémenté. Ces études ont mis en lumière les effets déterminants du champ magnétique et de la turbulence sur la formation ou non d'un disque, de jets, et de sources multiples[2,3,4]. De premières prédictions observationnelles pour ALMA ont été obtenues dans le continu des poussières[5] qui montrent une forte sensibilité au champ magnétique (voir Figure ci-dessous). Des prédictions similaires pour les traceurs chimiques sont en cours, qui affineront les diagnostics et permettront d'étudier de plus près la formation du disque.



***A gauche** : La mesure du rapport N_2D^+/N_2H^+ permet d'exclure les modèles de contraction lente des cœurs denses et de contraindre leur âge en comparant aux observations (histogramme)[1]. **A droite** : Prédictions d'observations à 100 GHz avec ALMA d'enveloppes en effondrement modélisées par des simulations MHD 3D. L'angle d'inclinaison sur la ligne de visée augmente de haut (vue du pôle) en bas (vue par la tranche) et le champ magnétique augmente de droite à gauche[5].*

[1] L. Pagani, P. Lesaffre, M. Jorfi, et al., A&A **551**, A38 (2013)
[2] M. Joos, P. Hennebelle, A. Ciardi, A&A **543**, A128 (2012); M. Joos, P. Hennebelle, A. Ciardi, S. Fromang, A&A **554**, A17 (2013)
[3] A. Ciardi & P. Hennebelle, MNRAS **409**, L39 (2010); P. Hennebelle, B. Commerçon, M. Joos, et al., A&A **528**, A72 (2011)
[4] B. Commerçon, P. Hennebelle, E. Audit, et al., A&A **510**, L3 (2010); B. Commerçon, P. Hennebelle, T. Henning, ApJ **742**, L9 (2011)
[5] B. Commerçon, F. Levrier, A. J. Maury, A&A **548**, A39 (2012)

Les grains comme source de complexité moléculaire

L'étude de la formation de molécules complexes dans les manteaux de glace des grains soit par voie photochimique, soit par voie thermique (réchauffement avant désorption) a permis de proposer une voie de synthèse pour certaines espèces déjà détectées en phase gazeuse (aminoacétonitrile, cyanoformaldéhyde, méthanimine, …)[1], de mesurer les cinétiques de ces réactions en phase solide très utiles pour les modèles chimiques et de prédire la formation de composés divers[2] dont certains ont été observés depuis l'espace (carbodiimide ou cyanométhanimine), mettant ainsi en évidence la pertinence des simulations en laboratoire. La recherche de ces espèces nécessite un travail concerté entre chimie de synthèse, spectroscopie et observations astronomiques. Cette approche a donné un nombre significatif de résultats incluant la détection récente d'isotopomères d'entités présentes (formiate de méthyle, éther diméthylique, …).[3,4]

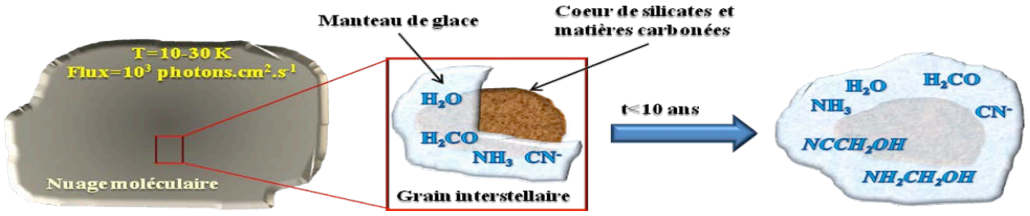


Schéma d'évolution d'un grain interstellaire : des constituants primaires des glaces à la formation de molécules organiques complexes (l'aminométhanol et l'hydroxyacétonitrile)

Les molécules complexes évoquées ci-dessus ne peuvent survivre dans les régions soumises au rayonnement UV, dites régions de photodissociation (PDR) mais l'irradiation UV de très petits grains carbonés amène à la formation dans ces PDR, de grandes molécules polycycliques aromatiques hydrogénées (PAH).[5] La confirmation de la présence du fullerène C_{60} [6] et la détection de C_{60}^+ [7] confirment la présence de grandes molécules carbonées libres dans les PDR. Par ailleurs, les résultats de la modélisation de l'évolution physico-chimique des PAH dans les PDR en lien avec les études de laboratoire ouvrent une voie possible de formation de C_{60} par photodissociation et isomérisation de PAH de grande taille.[8]

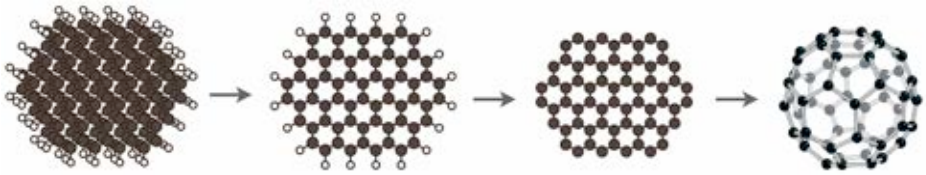
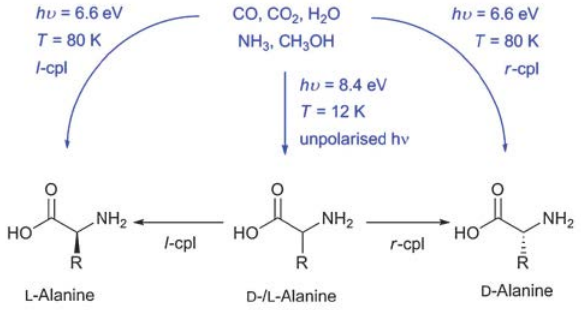


Schéma d'évolution photochimique sous l'action du rayonnement UV dans les PDR: des très petits grains carbonés, aux PAH, PAH déshydrogénés et fullerènes.

[1] F. Borget, G. Danger, F. Duvernay, et al., A&A **541**, A114 (2012)
[2] G. Danger, F. Duvernay, P. Theulé, F. Borget, T. Chiavassa, ApJ **756**, 11 (2012)
[3] B. Tercero, L. Margulès, M. Carvajal, et al., A&A **538**, A119 (2012)
[4] C. Richard, L. Margulès, E. Caux, A&A **552**, A117 (2013)
[5] P. Pilleri, J. Montillaud, O. Berné, C. Joblin, A&A **542**, id.A69 (2012)
[6] K. Sellgren, M. W.Werner, J. G. Ingalls, et al., ApJ Lett **722**, L54 (2010)
[7] O. Berne, G. Mulas, C. Joblin, A&A **550**, id.L4 (2013)
[8] J. Montillaud, C. Joblin D. Toublanc, A&A **552**, A15 (2013)

Chiralité dans l'espace

Des analyses chromatographiques réalisées sur des résidus organiques obtenus après réchauffement d'analogues de glaces interstellaires soumis, sur la ligne DESIRS du synchrotron SOLEIL, à un rayonnement ultra-violet "polarisé circulairement" (UV-CPL), montrent que ces échantillons contiennent un excès énantiomérique significatif d'un acide aminé chiral, l'alanine. Supérieur à 1,3%, cet excès est comparable à celui mesuré dans les météorites primitives. Ces expériences[1] montrent qu'il est ainsi possible de produire, dans des conditions interstellaires, des molécules du "vivant" asymétriques à partir d'un mélange ne contenant pas de substances chirales ce qui rend vraisemblable une origine cosmique de l'homochiralité.



Irradiation par rayonnement UV circulairement polarisé d'analogues de glaces: schéma réactionnel

Ces travaux ont fait l'objet d'un communiqué de presse du CNRS repris par Le Monde et France 2.
http://www2.cnrs.fr/presse/communique/2065.htm

[1] P. de Marcellus, C. Meinert, M. Nuevo et al. ApJ. **727** L27 (2011)

I.2 Communiqués de Presse

I.2.1 Communiqués généraux

Inauguration de l'interferomètre ALMA, le point sur la participation française
(CNRS-INSU, 13 Mars 2013)
http://www.insu.cnrs.fr/node/4287

L'héritage chimique du Système Solaire: zoom sur l'azote
(CNRS-INSU, 4 Mars 2013)
http://www.insu.cnrs.fr/node/4262

Etudier en laboratoire les grains interstellaires grâce à un anneau de stockage électrostatique
(CNRS-INP, 3 Mars 2013)
http://www.cnrs.fr/inp/spip.php?article1509

De la formamide, une molécule clé dans l'apparition de la vie, détectée au voisinage d'un soleil en formation
(CNRS-INSU, 25 Janvier 2013)
http://www.insu.cnrs.fr/node/4147

De grandes molécules carbonées voyagent dans le milieu interstellaire
(CNRS-INSU, 22 Janvier 2013)
http://www.insu.cnrs.fr/node/4121

La découverte d'une nouvelle molécule interstellaire confirme l'existence d'une raffinerie de pétrole au sein de notre galaxie
(CNRS-INSU, 23 Novembre 2012)
http://www.insu.cnrs.fr/node/4018

Des molécules complexes et prébiotiques dans les systèmes planétaires en formation.
(CNRS-INSU, 28 Septembre 2012)
http://www.insu.cnrs.fr/univers/les-exoplanetes/des-molecules-complexes-et-prebiotiques-dans-les-systemes-planetaires-en-for

Des briques moléculaires de la vie primitive découvertes dans une comète artificielle
(CNRS, 12 Mars 2012)
http://www2.cnrs.fr/presse/communique/2517.htm

Naissance turbulente des super amas d'étoiles dans des galaxies en fusion
(CNRS, 9 Février 2012)
http://www2.cnrs.fr/presse/communique/2457.htm

Découverte d'îlots de gaz froid dans notre Galaxie
(CNRS, 13 Février 2012)
http://www2.cnrs.fr/presse/communique/2469.htm

Dans les nuages interstellaires, N et OH réagissent moins vite que prévu
(CNRS-INC, 19 Décembre 2011)
http://www.cnrs.fr/inc/communication/direct_labos/hickson.htm

Une molécule clé pour la chimie prébiotique obtenue en laboratoire
(CNRS-INSU, 21 Novembre 2011)

http://www.insu.cnrs.fr/univers/les-etoiles-et-notre-galaxie/une-molecule-cle-pour-la-chimie-prebiotique-obtenue-en-laborato

Une détermination quantique du taux de conversion entre les formes ortho et para de la molécule d'hydrogène.
(CNRS-INP, 25 Août 2011)
http://www.cnrs.fr/inp/spip.php?article486

Les feux de Bételgeuse
(CNRS-INSU, 23 Juin 2011)
http://www.insu.cnrs.fr/univers/les-etoiles-et-notre-galaxie/les-feux-de-betelgeuse

Origine de la vie sur Terre: l'asymétrie "naturelle" des molécules biologiques viendrait de l'espace
(CNRS, CNRS-INSU, 4 Janvier 2011)
http://www2.cnrs.fr/presse/communique/2065.htm
http://www.insu.cnrs.fr/univers/observer-modeliser/origine-de-la-vie-sur-terre-l-asymetrie-naturelle-des-molecules-biologiqu

Shining Starlight on the Dark Cocoons of Star Birth
(NASA, Spitzer Space Telecope News, 23 Septembre 2010)
http://www.spitzer.caltech.edu/news/1195-feature10-16-Shining-Starlight-on-the-Dark-Cocoons-of-Star-Birth

A quelle vitesse la molécule d'oxygène se forme-t-elle dans les nuages interstellaires."
(CNRS-INP, 18 février 2010)
http://www.cnrs.fr/inp/spip.php?article289

I.2.2 Communiqués en relation avec les observations du satellite *Planck*

Planck steps closer to the cosmic blueprint
(ESA - Space Science News, 13 Février 2012)
http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Planck/Planck_steps_closer_to_the_cosmic_blueprint

Le satellite *PLANCK* livre ses premiers résultats
(CNRS-INSU, 11 Janvier 2011)
http://www.insu.cnrs.fr/univers/extragalactique-et-univers/le-satellite-Planck-livre-ses-premiers-resultats

Planck's new view of the cosmic theatre
(ESA - Space Science News, 11 Janvier 2011)
http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Planck/Planck_s_new_view_of_the_cosmic_theatre

Planck sees new, mysterious components in Milky Way and Magellanic Clouds
(ESA - Space Science News, 11 Janvier 2011)
http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=48204

Planck unveils the Universe – now and then
(ESA - Space Science News, 5 Juillet 2010)
http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Planck/Planck_unveils_the_Universe_now_and_then

Planck sees tapestry of cold dust
(ESA - Space Science News, 17 Mars 2010)

http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Planck/Planck_sees_tapestry_of_cold_dust

I.2.3 Communiqués en relation avec les observations du télescope *Herschel*

Herschel finds hot gas on the menu for Milky Way's black hole
(ESA Space Science News, 7 Mai 2013)
http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Herschel/Herschel_finds_hot_gas_on_the_menu_for_Milky_Way_s_black_hole

Herschel and Hubble see the Horsehead in new light
(ESA Space Science News, also in-depth on ESA SciTech News, 19 Avril 2013)
http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Herschel/Herschel_and_Hubble_see_the_Horsehead_in_new_light

Hunting high-mass stars with *Herschel*
(ESA Space Science News – also in-depth on ESA SciTech News, 27 Mars 2013)
http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Herschel/Hunting_high-mass_stars_with_Herschel

Betelgeuse braces for a collision
(ESA Space Science News, 22 Janvier 2013)
http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Betelgeuse_braces_for_a_collision

A Cradle of Stars
(ESA Space Science - Image of the week, 7 Janvier 2013)
http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/A_cradle_of_stars

Life and death in a star-forming cloud
(ESA Space Science News – also in-depth on ESA SciTech News, 14 Novembre 2012)
http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Herschel/Life_and_death_in_a_star-forming_cloud

Large water reservoirs at the dawn of stellar birth
(ESA Space Science News, 9 Octobre 2012)
http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Herschel/Large_water_reservoirs_at_the_dawn_of_stellar_birth

Flying along the Vela ridge
(ESA Space Science News - also in-depth on ESA SciTech News, 9 Juillet 2012)
http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Herschel/Flying_along_the_Vela_ridge

Cygnus-X: the cool swan glowing in flight
(ESA Space Science News – also in-depth on ESA SciTech News, 10 Mai 2012)
http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Herschel/Cygnus-X_the_cool_swan_glowing_in_flight

Herschel detects abundant water in planet-forming disc
(ESA Space Science News - also in-depth on ESA SciTech News, 20 Octobre 2011)
http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Herschel/Herschel_detects_abundant_water_in_planet-forming_disc

Astronomers searching for oxygen can breathe more easily
(ESA Space Science News - also in-depth on ESA SciTech News, 1 Aout 2011)
http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Herschel/Astronomers_searching_for_oxygen_can_breathe_more_easily

Herschel links star formation to sonic booms
(ESA Space Science News – also in-depth on ESA SciTech News, 13 Avril 2011)
http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Herschel/Herschel_links_star_formation_to_sonic_booms

Herschel and *Planck* win the French Grand Prix
(ESA - Space Science News, 10 Juin 2010)
http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Herschel/Herschel_and_Planck_win_the_French_Grand_Prix

Herschel reveals the hidden side of star birth
(ESA - Press Release, 6 Mai 2010)
http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Herschel/Herschel_reveals_the_hidden_side_of_star_birth

Herschel unveils rare massive stars in the act of forming
(ESA – SciTech News, 6 Mai 2010)
http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=46978

Tracing the Milky Way's hidden reservoirs of gas
(ESA - Space Science News, 6 Mai 2010)
http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Tracing_the_Milky_Way_s_hidden_reservoirs_of_gas

Herschel's HIFI follows the trail of cosmic water
(ESA - SciTech News, 6 Mai 2010)
http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=46983

Baby stars in the Rosette cloud
(ESA - Space Science News, 12 Avril 2010)
http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Herschel/Baby_stars_in_the_Rosette_cloud

Herschel readies itself for the Orion Nebula
(ESA - Space Science News, 19 Janvier 2010)
http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Herschel/Herschel_readies_itself_for_the_Orion_Nebula

I.3 Bilan Scientifique

Nous présentons ici un bilan scientifique plus détaillé que celui du chapitre « Faits marquants » avec une organisation en sujets scientifiques qui suivent les chapitres de prospective. Ce bilan reflète l'activité PCMI globale mais ne peut en aucun cas être une énumération exhaustive de tous les travaux individuels. Des informations supplémentaires sont disponibles dans les fiches qui ont été transmises par les porteurs de projets en ***Annexe 1***.

I.3.1 Dynamique et structure du milieu interstellaire aux grandes échelles: de la voie lactée aux galaxies proches

Sur la période 2009-2012, la combinaison des données *Herschel* avec les données *Planck* (IAS, IRAP, LERMA) nous a permis d'obtenir une meilleure description des différentes phases du milieu diffus: milieu atomique (HI), moléculaire (CO) et phase appelée *CO-dark gas*, une phase déjà mise en évidence par la mission Fermi et probablement riche en H_2 et pauvre en CO. Ces grands relevés nous ont également apporté de nouvelles contraintes sur les propriétés des poussières à grande échelle dans la Galaxie et dans les galaxies proches (fiches Miville-Deschênes et Zavagno; « Faits marquants » La mission Planck…).

Le milieu diffus: longtemps considéré comme relativement simple et homogène, le milieu diffus s'avère riche de surprises, toutes servies par les observations : les **fluctuations de températures et de densité** y sont très grandes et, on le sait depuis peu, une fraction de sa masse n'est pas à l'équilibre thermique. Ce milieu diffus est turbulent donc sa dynamique est hautement dissipative, et même si il n'est que partiellement couplé au champ magnétique, ce couplage est significatif pour sa dynamique. Dans un tel contexte, il n'est pas étonnant d'y observer des phénomènes extrêmes comme l'existence de **différentes populations de poussière coexistant dans des rapports très variables**, même à petite échelle, ou la présence d'espèces moléculaires (par exemple CH^+) avec des abondances incompréhensibles dans le cadre de modèles « classiques » bâtis sur les valeurs moyennes observées du milieu (température, densité, champ de rayonnement UV, flux de rayons cosmiques...). Les observations en absorption réalisées avec *Herschel* ont confirmé la présence de molécules déjà connues, et apporté la **détection de nouvelles espèces** (H_2O^+, H_2Cl^+, HCl^+) (cf « Faits-marquants »). Le rôle des structures dissipatives de la turbulence dans la synthèse des molécules a été modélisé en parallèle (Godard et al. 2009). L'excellent accord entre les observations et les modèles est une confirmation éclatante du **fort couplage entre chimie et dynamique du gaz**, et ce à toutes les échelles spatiales et temporelles (fiche Falgarone). Observée à haute résolution angulaire avec l'interféromètre IRAM-PdBI, l'émission CO est spatialement variable et présente de très forts gradients de vitesse susceptibles d'être les marqueurs des régions de dissipation extrême de la turbulence (Falgarone et al. 2009). Même si elle présente de fortes variations, il semble que l'émission CO de la matière diffuse se comporte de manière très régulière en moyenne, avec un rapport entre émission CO et densité de colonne H_2 sensiblement égal qu'il s'agisse de gaz dense ou de gaz diffus (Pety, Liszt & Lucas 2011). Cette propriété permet de déterminer la masse de H_2 et explique l'ambiguité entre gaz diffus et dense lorsqu'il s'agit d'interpréter les mesures effectuées dans les galaxies extérieures.

Les propriétés et l'évolution des **phases du MIS** sont également renseignées par l'étude de l'émission diffuse de la poussière dans l'infrarouge et le submillimétrique. La couverture complète du ciel par le satellite *Planck* a permis une étude exhaustive de l'émission de la matière neutre, ainsi qu'une cartographie complète de l'émission dans les premières raies rotationnelles de CO. **L'existence de régions présentant un excès d'émission en poussières par rapport aux mesures en HI et CO est confirmée** (Planck collaboration 2011a). Ce CO-*dark gas* (cf. « Faits marquants ») est vraisemblablement du gaz moléculaire assez dense pour que l'hydrogène soit sous forme moléculaire mais trop peu dense pour que la formation de CO soit assez efficace et que son émission soit un bon traceur de la densité de colonne. Il est possible que ce gaz moléculaire diffus soit le même que celui qui est sondé en absorption (dans le visible par CH, dans le submillimétrique par CH ou HF), mais ceci reste à confirmer.

L'existence de ce gaz moléculaire diffus a également été mis en évidence par la comparaison entre l'émission IR et l'émission γ diffuse provenant de l'interaction des particules de haute énergie avec le gaz (Grenier et al. 2005). Les études simultanées dans ces deux domaines (IR-submm et γ) apportent un éclairage unique sur la composition et la structure de l'émission diffuse (CEA, IAS, IRAP). On note également un intérêt grandissant pour l'impact des rayons cosmiques sur le MIS particulièrement concernant son rôle sur l'ionisation du gaz en lien avec les mesures Fermi (IPAG, IAP; fiche Montmerle) et dans l'évolution de la matière solide, associée à des simulations en laboratoire (IAS+ TANDEM/GANIL; fiche Dartois).

Simulations numériques de la formation des nuages moléculaires: le projet Astronet « **Star Format** » (LERMA, LUTH et équipes allemandes), a produit une **base de données théoriques** (compatible *OV-theory*) rendant accessibles à la communauté les résultats de ces **simulations MHD 3D** pour une large grille de paramètres. Afin d'optimiser le retour scientifique, la production de cartes synthétiques dans divers traceurs a fait l'objet d'un effort dédié. Le modèle de PDR stationnaire de l'équipe du LUTH (Le Petit et al. 2006; fiches Le Petit et Le Bourlot) a été couplé avec les profils de densité, vitesse et température issus des simulations numériques MHD, après un calcul de l'atténuation du champ UV diffus en chaque point de la boite. Les cartes de densité de colonne prédites dans différentes espèces sont en assez bon accord avec les observations, tout en révélant les limites de l'hypothèse d'équilibre chimique, par exemple pour CO (Levrier et al. 2012; fiche Falgarone).

Structure et énergétique des galaxies: les observations réalisées avec *Herschel*, et depuis le sol avec par exemple IRAM-PdBI ont également mis en évidence de **nombreuses raies d'émission de la vapeur d'eau y compris dans des galaxies à grand *redshift*** (Omont et al 2013) dont l'interprétation requiert des modèles sophistiqués de transfert de rayonnement combinant pompage radiatif et excitation collisionnelle.
Récemment plusieurs études ont démontré la présence d'émission forte des raies de H_2 dans l'IR moyen dans certaines galaxies en interaction. En général cette émission est trop intense pour être produite dans les régions de photodissociation et on l'attribue donc à la **dissipation d'énergie mécanique associée à des chocs** à grande échelle entre galaxies ou entre une galaxie et le milieu inter-galactique (Guillard et al. 2012, Peterson et al. 2012, Cluver et al. 2013). Cette émission de H_2, qui est aussi observée dans certaines galaxies, permet potentiellement de tracer l'évolution de la matière dense soumise à des chocs dans les galaxies. Dans certains cas, l'observation d'émission intense dans la raie de structure fine de C^+ est indicative de la présence de chocs-C dans un milieu très turbulent. Nous montrons donc que cette raie, traditionnellement utilisée dans l'Univers extragalactique comme un traceur du champ UV donc de la formation d'étoiles, trace également la dissipation d'énergie cinétique (fiche Boulanger).

Poussière et gaz dans les galaxies proches: l'observation des raies du gaz et de l'émission continuum de la poussière permet d'établir le bilan énergétique dans les galaxies proches (de Looze et al. 2012, Cormier et al. 2012, Kamenetzky et al. 2012). Les galaxies de faible metallicité, comme les **nuages de Magellan** (Galliano et al. 2011, Planck Collaboration et al. 2011b), servent de laboratoires privilégiés pour étudier l'évolution de la matière et la formation des étoiles (Bolatto et al. 2011) dans des environnements dont les conditions se rapprochent de celles de l'Univers jeune (Fiches Madden, Galliano et Hony). Ces dernières années plusieurs travaux ont permis de caractériser le spectre d'émission de la poussière permettant de mieux étalonner l'utilisation de l'émission dans le domaine submillimétrique comme estimateur de la masse (Eales et al. 2012, Fritz et al. 2012). Ces travaux ont permis de décrire la forme du spectre d'émission de la poussière ainsi que ses variations dans divers environnements, mettant en évidence des **variations importantes et inexpliquées du rapport gaz-sur-poussière en fonction de la métallicité et des variations spatiales de l'indice spectral de l'émissivité de la poussière** (Bendo et al. 2010, Smith et al. 2012). Ce travail est très semblable à ce qui est fait dans le MIS galactique et il contribue à l'évolution des modèles théoriques de l'émission / absorption de la poussière interstellaire (code DUSTEM IAS/IRAP).

I.3.2 La structuration du milieu interstellaire à petite échelle

Une activité importante de la communauté PCMI concerne la caractérisation des processus qui induisent et accompagnent la condensation du gaz moléculaire, depuis les nuages denses turbulents jusqu'aux cœurs préstellaires et aux enveloppes des protoétoiles.

Herschel et *Planck* ont apporté une moisson de nouveaux résultats sur l'émission des poussières (voir « Faits marquants »). Une avancée majeure a été la révélation de l'ubiquité de la **structure filamentaire** des nuages moléculaires, et le fait que les cœurs préstellaires se forment préférentiellement le long des filaments auto-gravitants (CEA/AIM, André et al. 2010, Arzoumanian et al. 2013). Par ailleurs, un catalogue de 10000 condensations froides distribuées dans toute la Galaxie a été construit à partir du relevé *Planck,* et a confirmé une anticorrélation entre l'indice spectral submm des poussières et la température (IRAP, IAS, LERMA ; fiche Ristorcelli et « Faits marquants »).). Les mesures de laboratoire sur des analogues de silicates interstellaires ont montré des tendances similaires prometteuses pour interpréter ces observations (IRAP ; fiche Demyk et « Faits marquants »). Enfin, l'analyse d'images de cœurs denses obtenues par le satellite *Spitzer* a révélé la **croissance des grains jusqu'au micron** via l'effet « *Coreshine* » (LERMA, IPAG; fiche Bacmann et « Faits marquants »). Une modélisation fine des propriétés optiques des agrégats poreux a prédit une augmentation d'un facteur 2-3 de leur émissivité submm (IAS, Köhler et al. 2011, 2012) à prendre en compte pour l'estimation des densités et masses des coeurs denses à partir des données *Planck* et *Herschel*.

Des progrès majeurs ont également été faits sur la **chimie des cœurs denses et des enveloppes de protoétoiles**. Un relevé spectral complet de sources représentatives des diverses masses et stades évolutifs a été mené avec *Herschel/HIFI* (programme CHESS, Ceccarelli et al. 2010), ainsi que des projets *Herschel* plus ciblés et des études au sol (IRAM, CSO, JCMT). Des résultats nouveaux ont été obtenus en particulier sur les espèces azotées et sur la **deutération de la vapeur d'eau** (IPAG, IRAP ; fiches Maret, Caux, Vastel et « Faits marquants »), et sur la chimie des protoétoiles de masse intermédiaire à forte (IPAG, LAB, LERMA, Kama et al. 2010, 2013, Herpin et al. 2012, van der Wiel et al. 2013). La détection inattendue de molécules complexes dans un cœur à 10 K (IPAG; Bacmann et al. 2012) a démontré l'importance de la désorption non-thermique des manteaux de glace et la nécessité de mieux la caractériser. Des efforts importants ont aussi été investis dans les calculs d'excitation collisionnelle (collaboration IPAG, LERMA, LOMC; fiches Faure et Lique) et dans les expériences et calculs de réactivité à basse température (ISMB, LAB, LUPM; fiches Talbi et Wakelam). Ils ont permis d'améliorer à la fois les modèles et l'interprétation des observations, en particulier pour la **chimie de l'azote** (voir « Faits marquants »). Un ré-examen critique d'une soixantaine de taux de réaction dans le domaine 10 – 300 K est en cours et a commencé à être diffusé à la communauté via la base de données publique KIDA (PI Wakelam). L'effet du **rapport ortho/para de H_2** sur la formation des hydrures d'azotes (IPAG, IAS ; Dislaire et al., 2012) et sur la deutération des ions (LERMA, LUTH, IC2MP, ICB, IPAG ; Pagani et al. 2011, 2013) a aussi été modélisé en détail. Ce dernier effet s'est avéré un **diagnostic d'âge** puissant pour les cœurs denses et les nuages sombres (voir « Faits marquants »).

Enfin, en complément des mesures du champ magnétique de cœurs denses par effet Zeeman de CN (LERMA, Falgarone et al. 2008, Crutcher et al. 2010), un programme ambitieux de simulations MHD 3D à haute résolution a été lancé qui a permis des prédictions plus réalistes de la **structure dynamique de l'enveloppe en effondrement et du protodisque**. Le champ magnétique et la turbulence ont un effet déterminant, et dans certaines configurations la formation d'un disque est inhibée. L'évolution de la composition chimique au cours de l'effondrement a été calculée et un outil de simulation de cartes synthétiques a été mis au point, permettant des diagnostics détaillés à partir des observations IRAM-PdBI et ALMA (LERMA, CEA/AIM, ENS-Lyon; fiche Falgarone et « Faits marquants »).

Environnements circumstellaires et mécanismes de rétroaction :

Lors de l'effondrement gravitationnel, une partie du cœur préstellaire reste en orbite autour de l'étoile dans un **disque circumstellaire de gaz moléculaire et de poussières** qui reste observable pendant

plusieurs millions d'années avant de former des planètes. L'étude de ces systèmes par PCMI a pour objectif de comprendre comment la matière interstellaire y est incorporée, et comment elle évolue jusqu'aux stades initiaux de la formation planétaire. Les observations en IR/FIR/submm ont apporté des contraintes plus précises sur la structure des disques, leur composition, et les propriétés des poussières au sein des disques (croissance, sedimentation). **La couche de surface** irradiée par l'étoile a pu être sondée par *Herschel* (IPAG) et via les raies FUV de H_2 et CO observées avec le HST (LUTH; fiche Roueff). La collaboration internationale mise en place entre le LAB et le MPIA a obtenu plusieurs résultats remarquables avec le PdBI qui préfigurent la révolution d'ALMA, comme la mesure du niveau de **turbulence du gaz et la variation radiale de la distribution en taille des grains**. Ces observations montrent aussi que les modèles doivent être améliorés : la température de la couche moléculaire est plus froide que prédite, et la recherche infructueuse de H_2S nécessite de reconsidérer la chimie des manteaux de glace (fiche Dutrey).

L'analyse de la matière primitive des météorites permet de contraindre **le couplage entre gaz et solides et les processus de transport** à l'œuvre dans la nébuleuse primitive. Ces études interdisciplinaires à l'interface entre sciences de la terre, planétologie et astrophysique, replacées dans le contexte des disques d'accrétion, ont démontré la présence dans le plan médian d'une « zone morte » non turbulente qui subsiste pendant plusieurs millions d'années, lieu privilégié pour la coagulation des poussières. L'existence d'un équilibre stable entre la sédimentation des particules solides, l'ionisation, et la turbulence MHD a aussi été établie (LMCM, LERMA; fiche Gounelle).

Les régions de photodissociation (PDR pour *Photo-Dissociation Regions*) sont le lieu où les photons ultra-violets lointains provenant des étoiles induisent la transition entre la phase atomique et la phase moléculaire du MIS. Les observations de PDRs dans les domaines spectraux de l'IR (ISO, *Spitzer*, AKARI), du sub-mm (*Herschel*) et du mm (IRAM) ont apporté des données plus nombreuses et précises sur leur structure, leur bilan thermique, leur composition chimique et leurs populations de grains (IRAP, IRAM, LERMA, IAS; fiches Joblin et Pety; Arab et al. 2012; Bernard-Salas et al. 2012). Cela a permis une confrontation plus détaillée avec les modèles, en particulier le code PDR de Meudon qui a été amélioré pour inclure une plus grande variété de processus physiques et de diagnostics (LUTH ; fiches Le Petit, Le Bourlot, et Roueff). Des efforts importants ont été investis pour **mettre à disposition sur l'Observatoire Virtuel** plusieurs centaines de résultats précalculés. Cette base de données fait partie du service on-line « Plateforme MIS-jets » récemment labellisé par l'INSU, qui donne aussi un accès aisé au code (http://pdr.obspm.fr).

Dans les **étoiles jeunes**, l'accrétion s'accompagne d'un jet puissant qui produit un choc d'étrave dans le nuage ambiant, entrainant un flot moléculaire. Les premiers relevés spectroscopiques de flots ont été menés avec *Herschel* apportant de nouvelles informations sur la **dynamique des chocs, l'érosion des manteaux,** la production de vapeur d'eau, et l'impact du jet. La modélisation de la composition chimique des jets, et leur observation avec le PdBI, ont apporté des diagnostics plus précis de leur zone de lancement (IPAG, LERMA, IRAM; fiche Falgarone). Pour interpréter ces données, l'IAS et le LERMA ont développé des **modèles de chocs performants** couplant de façon auto-cohérente la thermo-chimie et la dynamique MHD, au prix d'une géométrie simplifiée à une dimension. Un effort particulier a été consacré au calcul de diagnostics spectraux pour *Herschel* tels que H_2O, CO, NH_3, CH_3OH (Flower & Pineau des Forêts 2010, 2012 ; Gusdorf et al. 2011), et à la rétroaction des grains sur la dynamique du choc (Guillet et al. 2009, 2011).

Des observations en rayons X de la nébuleuse d'Orion et de la Carène avec les satellites XMM-*Newton* et *Chandra* ont mis en évidence **l'émission diffuse d'un plasma de 1 MK**, traçant les vents d'étoiles OB**.** Ce plasma chaud est en équilibre de pression avec les nuages moléculaires froids, et le phénomène **d'échange de charge** à l'interface entre les deux phases a été mis en évidence pour la première fois grâce à des raies X spécifiques (IAP, GEPI; fiche Montmerle). Par ailleurs, une **augmentation du taux d'ionisation** d'un facteur 100 semble présente au voisinage du reste de supernova W51C, qui pourrait être due aux cosmiques de basse énergie accélérés *in-situ* (IAP, IPAG; fiche Montmerle).

Les enveloppes d'étoiles évoluées sont une des principales sources de poussières et d'éléments lourds du milieu interstellaire. Comprendre comment la matière est éjectée et finalement incorporée au MIS est donc une question essentielle. Un résultat spectaculaire a été la mise en évidence en HI à 21cm de **traînées de matière** s'étendant sur des fractions de pc autour de géantes rouges à fort mouvement propre, révélant le mélange entre l'enveloppe circumstellaire et le MIS ambiant (LERMA; fiche Le Bertre). L'expansion de l'enveloppe permet aussi de dater les éjections par leur distance à l'étoile ou leur vitesse. Cette propriété a été mise à profit pour retracer **la variation temporelle de l'éjection** sur 10 à 100 000 ans par des cartes en CO et HI, et pour tester les **mécanismes de production des anions** dans IRC+10216 grâce au soutien de calculs d'excitation collisionnelle (LERMA, LOMC, LUTH, IPAG; fiches Guélin et Le Bertre).

I.3.3 Complexité moléculaire, grains, PAH, interactions gaz-grains, collisions réactives et non-réactives, et spectroscopie

Ces mots clés rassemblent l'activité des physico-chimistes de la communauté PCMI en lien étroit avec les problématiques astrophysiques. Un bilan des résultats est donné ci-dessous.

Une étude multidisciplinaire de la formation des **molécules organiques complexes (MOC) dans les régions de formation stellaire** a été menée dans le cadre de l'ANR FORCOMS (*FORmation of Complex Organic Molecules in Space*), une collaboration entre l'IPAG, le PhLAM, et l'IRAP experts en observations et modélisation astronomiques mais aussi en spectroscopie, expériences de laboratoire et calculs de chimie théorique. Cette synergie entre plusieurs expertises a permis d'obtenir plusieurs résultats importants parmi lesquels:

1- La détection de la formamide dans une protoétoile de type solaire (Kahane et al. 2013). La formamide est une molécule clé de la chimie prébiotique et cette découverte confirme l'universalité de la chimie dans l'espace comme sur Terre.

2- La composition des glaces, à partir desquelles se forment vraisemblablement les molécules organiques complexes, évolue avec le temps: l'eau se forme en premier, suivie par le formaldéhyde et enfin par le méthanol (Taquet et al. 2013). L'horloge qui permet de dater les différentes synthèses est fournie par la quantité d'atomes de deutérium contenue dans ces trois molécules. Plus le temps passe et plus cette quantité augmente.

Des observations menées à l'IRAM sur la Tête de Cheval ont montré, des variations d'abondances du méthanol et du formaldéhyde entre le bord du nuage (**région de photodissociation**, PDR) et le cœur dense qui traduisent des processus physiques et chimiques différents sur les grains interstellaires en fonction de la position dans les nuages (LERMA/IRAM; fiche Pety). Afin de modéliser le **couplage entre la chimie en phase gazeuse et celle sur les grains**, un nouveau formalisme a été développé dans le code PDR de Meudon. La description des réseaux chimiques complexes sur les surfaces s'appuie sur les résultats des expériences en laboratoire et sur des travaux de dynamique moléculaire (LUTH; fiche Le Petit). Ce travail a permis de montrer que la **photo-désorption des molécules des manteaux de glaces** peut expliquer la plus forte abondance du méthanol au bord du nuage par rapport au cœur (Guzman et al. 2011). Ces travaux ouvrent des perspectives pour ALMA et NOEMA.

Les travaux menés par différentes équipes en spectroscopie (PhLAM, ISMO/SOLEIL, IRAP; fiches Margulès, Pirali, Walters et Wlodarczak), synthèse de molécules complexes (ENSCR; fiche Guillemin) et développements théoriques (LISA) ont joué un rôle très important dans la recherche de MOC, en commençant par une **identification des raies appartenant aux espèces dominantes (incluant leurs isotopologues)**, ce qui est une étape indispensable à la recherche de nouvelles espèces dans les **relevés spectraux** (IRAM, *Herschel*, ALMA, NOEMA). Une collaboration étroite s'est développée avec les groupes de spectroscopie de JPL et de l'Université de Cologne pour étudier la spectroscopie de MOC, tirant parti de la complémentarité des dispositifs expérimentaux de ces instituts (fiche A Walters).

L'étude des propriétés des MOC rassemble, dans la communauté PCMI, des expérimentateurs, des théoriciens et même des observateurs. Cette synergie a permis d'apporter des éclairages nouveaux sur

les propriétés de ces espèces dans la phase gazeuse ou dans la glace. Combinant calculs de chimie théorique et observations (LCT/IPAG; fiche Pauzat) il a pu être montré que seul **l'isomère le plus stable est observé**. Ce résultat est étonnant pour un milieu généralement considéré comme hors équilibre thermodynamique et est à l'origine du principe d'énergie minimum « PEM ». Ce principe pourrait **expliquer pourquoi la glycine** qui, sous forme neutre n'est pas l'isomère le plus stable thermodynamiquement, **n'a toujours pas été détectée** dans le MIS.

Des expériences de désorption programmée en température combinées à des calculs de chimie théorique (LCT/LPMAA; fiche Pauzat) ont montré que les MOC pouvaient se répartir en 3 catégories selon que leur **énergie d'adsorption** est faible, moyenne ou forte par rapport à l'énergie de sublimation de la glace (~12 kcal/mol) : les espèces volatiles qui désorbent à T<50K (H_2, CO, CO_2, CH_4, ...), celles qui désorbent avant l'eau (CH_3NH_2, CH_3OCH_3, ...) pour des températures entre 50 et 100K et celles qui désorbent avec l'eau (CH_3CH_2OH, CH_3COOH, ...) à T>150K . Ces résultats sont à l'origine d'une étude de plus grande envergure sur différents types de surfaces d'intérêt interstellaire.

La **résistance au rayonnement UV de MOC piégées dans la glace** a été étudiée en utilisant le rayonnement synchrotron (SOLEIL) et des calculs de chimie théorique (LPCMR/LCT; fiche Pauzat). Cette étude montre que la glace ne joue aucun rôle dans l'activation du processus de destruction des MOC ni dans leur protection mais qu'elle se comporte comme un milieu de confinement permettant la recombinaison des fragments formés qui n'ont pas diffusé et favorisant la déshydrogénation par le radical OH et l'hydrogénation par l'hydrogène atomique, processus qu'il faudra prendre dorénavant en compte dans les modèles astrochimiques.

Aux basses températures qui règnent dans le MIS, atomes et molécules s'adsorbent sur les grains, diffusent et se recombinent pour donner naissance à des molécules primitives dites de génération 0. Elles vont constituer le manteau de glace à partir duquel des molécules plus complexes pourront être formées avec ou sans apport d'énergie. Des expériences de laboratoire contribuent à comprendre les **mécanismes conduisant à la formation de ces molécules de génération 0 synthétisées sur des surfaces froides (10K)** d'intérêt astrophysique. Parmi les principaux résultats obtenus (LERMA; fiche Dulieu), de nouvelles voies sont proposées pour expliquer la synthèse de l'eau, du dioxyde de carbone (CO_2) ou de l'hydroxylamine (NH_2OH). Des simulations numériques permettent de clarifier ces mécanismes de quantifier les barrières d'activation (LCT; fiche Pauzat). Le rôle que joue **l'eau en tant que catalyseur ou initiateur de processus spécifiques** constitue un point important de ces études (LADIR/LCT; fiche Pauzat).

L'**apparition de la complexité moléculaire** peut être le fruit de différents processus énergétiques qui affectent aussi bien les glaces interstellaires que les glaces cométaires (voir « Faits marquants » *Les grains comme source de complexité moléculaire*). Ces processus énergétiques désignent des **effets thermiques ou photochimiques** qui vont intervenir tout au long du processus qui conduit les nuages moléculaires à se transformer en disque protoplanétaire puis en système planétaire avec des objets tels que les comètes où les astéroïdes qui peuvent être une source de molécules complexes délivrées à la terre primitive et à partir desquelles une chimie prébiotique peut débuter. Dans les simulations en laboratoire, **deux approches complémentaires**, l'une **mécanistique** (PIIM; fiche Chiavassa) et l'autre **globale** (IAS; fiche d'Hendecourt) sont développées pour comprendre comment la matière peut arriver à se complexifier à partir de molécules de génération 0 trouvées dans le manteau de glace. Des simulations en laboratoire sont réalisées à partir d'analogues de glaces irradiées par des photons VUV puis réchauffés à 300 K. Il en résulte alors la formation d'un **résidu organique** qui contient une grande diversité de molécules d'une importance et d'une qualité jusqu'ici insoupçonnée car la **matière macromoléculaire** qu'elle contient est intégralement soluble dans l'eau. Cette matière peut être comparable à celle trouvée dans les météorites. Parmi les constituants majeurs de ces résidus, le HMT ($C_6H_{12}N_4$), l'hexaméthylènetétramine, et un polymère, le PolyMéthylèneImine (PMI), résultent uniquement d'un processus thermique mettant en jeu les molécules de $H_2CO/NH_3/H_2O$ et HCOOH qui joue un rôle de catalyseur. Le HMT ou le PMI ne peuvent être formées qu'à des températures de l'ordre de 280 K ce qui exclut leur formation et leur détection dans des glaces interstellaires (fiche Chiavassa). Des analyses par GC/MS des résidus issus directement de l'irradiation UV d'analogues de glaces puis du réchauffement à 300 K, ont permis de révéler la présence de nombreux acides aminés et

de molécules comme l'hydantoïne, un catalyseur de la formation d'oligopeptides (qui se forme par condensation d'urée et d'acide glycolique) et montrent ainsi le **potentiel prébiotique** d'une telle substance (fiche d'Hendecourt). Des analyses chromatographiques réalisées sur des résidus organiques obtenus après réchauffement d'analogues de glaces interstellaires soumis, sur la ligne DESIRS du synchrotron SOLEIL, à un rayonnement UV polarisé circulairement, montrent que ces échantillons contiennent un **excès énantiomérique** (voir « Faits marquants » *Chiralité dans l'espace*).

Les **molécules polycycliques aromatiques hydrogénées (PAH)** sont les molécules les plus abondantes après H_2 et CO dans les régions riches en rayonnement UV que sont les PDR. Ces macromolécules carbonées ont été proposées pour rendre compte de l'émission dans les bandes IR entre 3 et ~20 µm (*Aromatic Infrared Bands*, AIB) induite par l'absorption de photons UV grâce au **mécanisme de chauffage impulsionnel**. Toutefois, aucune espèce individuelle n'a pu être détectée et leur nature n'est toujours pas connue. Seules leurs propriétés génériques sont admises grâce aux travaux de laboratoire et aux travaux de modélisation des observables astrophysiques. En résumé les PAH peuvent contenir jusqu'à environ 20 % du carbone cosmique, couvrent une gamme de tailles possibles de quelques dizaines à quelques centaines d'atomes de carbone, et possèdent un squelette carboné essentiellement polyaromatique. C'est un sujet très actif où la France occupe une place importante depuis le papier fondateur de Léger et Puget (1984). Il a donné lieu à l'organisation d'un symposium international en 2010 à Toulouse, *PAHs and the Universe: a symposium to celebrate the 25th anniversary of the PAH hypothesis*, et à la publication d'actes (C. Joblin and A.G.G.M. Tielens Eds, EAS Pub Series, Vol. 46, 2011).

Les questions abordées durant ces dernières années ont porté sur la formation des PAH, leur évolution en fonction des conditions locales et leur lien avec les grains carbonés. L'**analyse du spectre IR des PDR** a permis de montrer que l'état de charge des PAH évolue et qu'ils sont produits dans les PDR par **destruction de très petits grains** (VSG) sous l'action des photons UV (IRAP; fiche Joblin). L'abondance du carbone dans ces VSG peut être utilisée comme traceur du champ UV local (Pilleri et al. 2012). La **détection des fullerènes**, C_{60}^+ qui a suivi celle de C_{60} dans la PDR NGC7023 (IRAP; fiche Joblin, Berné et al. 2013) renforce l'idée de l'existence de grandes molécules carbonées en phase gazeuse, du mécanisme de chauffage impulsionnel, ainsi que de **l'évolution physico-chimique de ces espèces dans les PDR** (voir « Faits marquants » *Les grains comme source de complexité moléculaire*). Un modèle d'évolution physico-chimique des PAH dans les conditions astrophysiques s'appuyant sur les expériences de laboratoire permet de rationaliser l'analyse des observations (Montillaud et al. 2013).

L'identification des PAH passe par leur production et leur étude spectroscopique au laboratoire. **A l'aide d'une flamme, la synthèse en phase gazeuse d'une multitude d'espèces**, allant des PAH de diverses tailles à des nanoparticules hydrocarbonées ou des suies, a pu être réalisée (ISMO; fiche Bréchignac). Le spectromètre de masse à temps de vol couplé à cette flamme permet d'étudier leur spectroscopie en phase gazeuse. Son collecteur d'échantillons solides permet de multiples études *ex situ* : caractérisation, irradiations,… Des progrès ont également été réalisés sur la **mesure en laboratoire du spectre d'émission IR de PAH sous excitation UV**. Un spectromètre original (FIREFLY) a été développé qui repose sur l'utilisation d'un jeu de filtres circulaires variables identique à celui de la caméra ISOCAM. Les premiers résultats ont été obtenus sur des petites molécules aromatiques (fiche Bréchignac). La **spectroscopie des dérivés ioniques et radicalaires des PAH** reste un défi au laboratoire. Des résultats ont été obtenus en utilisant la méthode de l'atome « marqueur » (photodissociation du complexe PAH-argon) et la photodissociation directe d'ions PAH et leurs dérivés déshydrogénés stockés dans un piège à ions refroidi (ISMO, IRAP; fiches Bréchignac et Joblin). Cela ouvre la porte à l'étude de dérivés radicalaires de PAH restées inaccessibles jusqu'à présent. Afin d'accompagner les observations d'*Herschel* (fiche Joblin), le **spectre IR lointain de petits PAH** a été mesuré auprès de la ligne AILES à Soleil, à haute résolution (ISMO/SOLEIL). L'accompagnement par des calculs théoriques permettant de simuler le spectre complètement en incluant l'**anharmonicité** a été réalisé (Martin-Drumel et al. 2013; Pirali et al. 2009). Le couplage de ce spectromètre avec un jet moléculaire pour refroidir ces grosses molécules a pu être validé, aboutissant pour la première fois à une analyse claire de l'anharmonicité dans le naphthalène.

La **croissance en phase gazeuse** des PAH et de leurs agrégats passe soit par une condensation chimique et/ou une accrétion des petites molécules, soit par un mécanisme initié par la formation de dimères de PAH. Il a été montré expérimentalement que cette **dimérisation** ne peut avoir lieu de façon significative au-delà de 235 K pour le pyrène ($C_{16}H_{10}$). Ce résultat remet en cause le modèle de formation de particules carbonées de Frenklach utilisé pour la modélisation des enveloppes circumstellaires (IPR; fiche A. Canosa).

L'activité théorique dans ce domaine (ISMO) est orientée vers la **compréhension des processus intramoléculaires de conversion d'énergie**, de relaxation intramoléculaire (dont les processus d'isomérisation et de dissociation) et de refroidissement radiatif (émission infrarouge notamment) dans les **systèmes complexes excités** (PAH neutres, ionisés, déshydrogénés,...). Les agrégats de PAH ont été proposés comme analogues des très petits grains (Rapacioli et al. 2006; fiches Joblin et Rapacioli). Ce sont de gros systèmes (plusieurs centaines d'atomes) qui peuvent donc difficilement être traités par les méthodes traditionnelles de la chimie quantique comme la *Density Functional Theory* (DFT). En conséquent, une approximation de la DFT, la *Density Functional based Tight-Binding* (DFTB), a été développée afin de décrire la structure électronique de ces objets, avec un effort particulier sur les **agrégats de PAH ionisés** (fiche Rapacioli). Les interactions **Silicium-PAH et Fer-PAH** ont aussi été abordées, et avec l'aide de la dynamique moléculaire leur spectroscopie infrarouge a été caractérisée. La **dynamique moléculaire** permet d'ailleurs de prendre aussi en compte les **effets anharmoniques**, très importants dans ces systèmes (LCPQ; fiche Rapacioli).

Des avancées ont été réalisées sur la **production d'analogues en laboratoire de la matière carbonée du milieu diffus** (IAS, ISMO), notamment sur les grains de **carbone amorphe hydrogéné** (fiche E. Dartois). Cela a permis l'étude de leur **évolution sous irradiation ionique**, leurs propriétés de photoluminescence. Les suies sont aussi apparues comme d'excellents analogues de la poussière porteuse de la classe C des AIB observée dans certains environnements circumstellaires (Peeters et al. 2002), avec un **mélange de carbone aromatique et aliphatique**. La caractérisation de la nanostructuration de ces suies a conduit à une interprétation de la variation des caractéristiques spectrales des AIB (Carpentier et al. 2012). Ces suies ont aussi été altérées par irradiation ionique, afin de comprendre leur évolution dans différents environnements. Il faudra développer dans l'avenir une compréhension intime de la **nanostructuration de ces matériaux carbonés**.

En lien avec les observations *Planck* et *Herschel* de l'émission de la poussière, les **propriétés optiques d'analogues de la poussière silicatée** de type $MgSiO_3$ et Mg_2SiO_4 ont été caractérisées dans le domaine de l'IR moyen au submillimétrique (2 – 1000/1500 µm) et à basse température (300 – 4K). Un modèle physique d'émission des matériaux amorphes a été développé et est incorporé dans le modèle DUSTEM pour l'interprétation des observations (fiche K. Demyk*;* « Faits marquants » *La mission Planck sonde les propriétés et l'évolution des poussières*…).

Dans le cadre des **interactions gaz-grain**, dont le rôle apparaît essentiel dans la compréhension de la distribution d'espèces chimiques observées, des progrès ont été réalisés (LPMAA, LERMA; fiches Michaut, Fillion, Dulieu, Lemaire). La caractérisation des **mécanismes de formation de H_2** sur des surfaces de silicates (fiche Lemaire), les **processus de désorption thermique et non-thermique induit par le rayonnement UV** (fiche Fillion; « Faits marquants » *Formation et photodésorption des glaces interstellaires*) et l'importance de la morphologie des surfaces dans la désorption des espèces ont pu être abordés **grâce à d'importants développements expérimentaux**. Les processus de **conversion de spin de H_2 et D_2 à la surface de la glace** (LERMA, Fiche F. Dulieu) ont aussi été abordés. Ces avancées expérimentales sont accompagnées par un effort important pour **l'implémentation dans le code PDR de Meudon** de la formation de H_2 par le mécanisme de Langmuir-Hinshelwood et celui d'Eley-Rideal en particulier, ainsi que le développement de méthode théorique permettant d'intégrer les processus gaz-grain importants, malgré l'absence de données expérimentales suffisantes. La base KIDA intègre d'ailleurs ces derniers développements.

Depuis les années 2000 les progrès de la chimie quantique ont permis des avancées significatives dans le domaine des **collisions réactives et non-réactives en phase-gazeuse**. En effet, la précision sur les surfaces d'énergie potentielle (SEP) n'est désormais plus limitante, au moins pour les petits systèmes

moléculaires n'impliquant qu'une seule SEP, et seules les limites computationnelles restent un frein aux calculs des sections efficaces de collision. Le réseau européen « *Molecular Universe* » (2004-2008) avait permis de fédérer les équipes françaises et de renouveler les coefficients d'excitation de petites molécules à couche-fermée telles que H_2O et SO_2. La coordination s'est poursuivie au sein du programme PCMI depuis 2009 et ces dernières années ont vu l'arrivée des **premiers coefficients d'excitation pour des petits radicaux** (couche ouverte) comme CN et C_2H, incluant structures fines et hyperfines (LOMC, LERMA, fiches Lique et Faure), mais également **pour des MOC contenant jusqu'à 8 atomes** comme le formiate de méthyle ($HCOOCH_3$, IPAG, fiche Faure). Dans le même temps, les dynamiciens français ont porté leurs efforts sur la **réactivité d'ions réactifs** comme H_2^+ (ICB, Honvault et al. 2011) ou CH^+ (ISM, Turpin et al. 2010), incluant les **sections efficaces d'état-à-état et de conversion ortho⇆para.** De nombreux travaux inter-équipes témoignent également du dynamisme de cette thématique. Enfin, des développements méthodologiques ont été initiés, tant dans le domaine des interactions de van der Waals (MSME, fiche Hochlaf) que dans celui de la dynamique en dimensionnalité réduite (LUPM, fiche Faure). Des progrès restent à accomplir dans la description des excitations vibrationnelles et des processus réactifs non adiabatiques.

L'étude de la **chimie en phase gazeuse** reste une thématique très soutenue du PCMI fédérant expérimentateurs (IPR, IPN, ISM) et théoriciens (ISM, ICB, IPR, LUPM, IPAG) qui se sont souvent associés pour des études complémentaires expérience/théorie. Cela a été le cas (IPR, fiche Canosa/Le Picard) pour l'étude de la réaction de $S(^1D) + H_2$ qui peut jouer un rôle significatif dans la consommation du soufre atomique dans les disques protoplanétaires ou de la réaction $F(^2P) + H_2 \rightarrow HF + H$, une réaction clé dans la chimie du fluor interstellaire en particulier comme source de HF (réservoir principal de F) ou encore (voir « Faits marquants » *Chimie de l'azote*) pour les réactions N + NO, N + OH, N + CN (ICB, LAB, fiches Honvault, Wakelam) qui ont permis de montrer que la fraction d'azote moléculaire dans les nuages denses était beaucoup moins importante que précédemment estimée simplement du fait des faibles taux des réactions impliquées. Dans tous ces cas ces études ont incités développements expérimentaux originaux et développement du nec plus ultra des méthodes de la chimie théorique pour une détermination précise des taux de réactions.

La détermination de rapports de branchements dès que l'on s'intéresse à la réactivité de molécules complexes est un défi que la communauté PCMI travaille à relever. Dans ce domaine, soulignons (IPN, fiche Chabot) les études expérimentales entreprises sur la dissociation des C_n^+, C_nH^+ et $C_3H_2^+$ excités (rayonnements cosmiques, photons UV, électrons de basse énergie) ou les développements en cours (IPR, fiche Canosa/ Le Picard) pour **mesurer les rapports de branchements de réactions ion-molécule et neutre-neutre à basse température**. Pour cette dernière famille de réactions, le développement à Rennes d'une tuyère à gaz pulsé achevée sur la période du contrat, validée et objet d'un dépôt de brevet a ouvert la voie à un nouveau projet visant à coupler un réacteur CRESU transportable au synchrotron SOLEIL afin d'y effectuer des études sur les produits de réactions à basse température. Enfin, des **développements théoriques** ont été entrepris sur les **processus de recombinaison dissociative à voies de dissociations multiples** (LUPM, fiches Talbi et Wakelam).

A signaler que beaucoup des études menées dans la communauté PCMI sur la réactivité chimique se sont fédérées autour de la **base de données KIDA** (*KInetic Database for Astrochemistry*) (LAB et ISM, fiches Wakelam et Loison).

La **spectroscopie** reste **un outil majeur** pour la caractérisation des espèces chimiques et le lien avec les observations astronomiques. Outre les travaux sur les MOC précédemment cités, il est important de mentionner en lien avec l'analyse des données *Herschel,* le développement d'une **source de production d'ions et de radicaux** (décharge à cathode creuse refroidie) qui a permis l'obtention de spectres de radicaux (OH, SH, SO, NH et isotopes, NH_2 et isotopes, CH, CN), de chaines carbonées (C_3), et de petits ions secondaires (H_3^+, HN_2^+, HCO^+) dans l'IR et l'IR lointain (SOLEIL, ISMO, fiche Pirali). Par ailleurs, **l'extension de la gamme de fonctionnement des spectromètres vers les hautes fréquences** (~1 THz; PhLAM, voir chapitre « Expériences de laboratoire » et fiche Margulès) ouvre de nouvelles perspectives en couvrant parfaitement la gamme ALMA. Les sections efficaces de photoabsorption UV des isotopologues de CO ont aussi été obtenues à très haute résolution (fiche Lemaire).

Enfin, les bases de données de physique atomique et moléculaire (voir partie I.5.1 pour la liste de ces bases) sont indispensables à la communauté astrophysique de PCMI pour exploiter les observations. Le programme a donc traditionnellement soutenu toutes les activités liées à ces bases de données comme il a fortement soutenu le projet d'infrastructure **VAMDC** (*Virtual Atomic and Molecular Data Center*; ML Dubernet, and VAMDC Collaboration 2010). Ce projet européen ambitieux (FP7-I3 jusqu'à fin 2012) a été conçu et piloté en France (LPMAA fiche Dubernet). Il permet aux chercheurs d'accéder de façon transparente (protocole OV) aux principales données de physique atomique et moléculaire. Actuellement une vingtaine de bases de données dont 10 hébergées en France sont rattachées à VAMDC, ce qui garantit la réussite de ce projet qu'il faut saluer mais aussi savoir soutenir sur le long terme (voir chapitre « Services d'observation Bases de données & Services théoriques »).

Références

Section 1.3.1

Bendo et al., 2010, MNRAS, 402, 1409
Bolatto et al., 2011, ApJ, 741, 12
Cluver, M.E., et al. 2013, ApJ, 765, 93
Cormier, D., et al., 2012, A&A, 548, A20
de Looze, I., et al., 2012, MNRAS, 427, 2797
Eales et al., 2012, ApJ, 761, 168
Falgarone, E.; Pety, J.; Hily-Blant, P., 2009, A&A, 507, 355
Fritz et al., 2012, A&A, 546, 34
Galliano, F. et al., 2011, A&A, 536, 88
Godard, B.; Falgarone, E.; Pineau Des Forêts, G., 2009, A&A, 495, 847
Grenier, I. A.; Casandjian, J.-M.; Terrier, R. 2005, Science, 307, 1292
Guillard, P., et al. 2012, ApJ, 749, 158
Kamenetzky, J., et al., 2012, ApJ, 753, 70
Le Petit, F.; Nehmé, C.; Le Bourlot, J.; Roueff, E., 2006, ApJS, 164, 506
Levrier, F., et al., 2012, A&A, 544, A22
Omont, A., et al., 2013, A&A, 551, A115
Peterson, B. W., et al., 2012, ApJ, 751, 11
Pety, J.; Liszt, H. S.; Lucas, R., In EAS Publications Series, 2011, p.151
Planck Collaboration, et al., 2011a, A&A, 536, A19
Planck Collaboration, et al., 2011b, A&A, 536, A17
Smith, M. W. L., et al., 2012, ApJ, 756, 40

Section 1.3.2

André, Ph., et al. 2010, A&A 518, L102
Arab, H., et al. 2012, A&A 541, A19
Arzoumanian, D., et al. 2013, A&A 553, A119
Bacmann, A., et al. 2012, A&A 541, L12
Bernard-Salas, J., et al. 2012, A&A 538, A37
Ceccarelli, C., et al. 2010, A&A 521, L22
Crutcher, R.M., et al. 2010, ApJ 725, 466
Dislaire V., et al., 2012, A&A 537, A20
Falgarone, E., et al. 2008, A&A 487, 247
Flower, D., Pineau des Forêts, G., & Rabli, D. 2010, A&A 521, L43
Flower, D.R. & Pineau des Forêts, G., 2012, MNRAS 421, 2786
Guillet, V., Jones, A. P. & Pineau Des Forêts, G. 2009, A&A 497, 145
Guillet, V., Pineau Des Forêts, G. & Jones, A. P. 2011, A&A 527, A123
Gusdorf, A., et al. 2011, A&A 532, A53
Herpin, F., et al. 2012, A&A 542, A76
Kama, M., et al. 2010, A&A 521, L39
Kama, M., et al. 2013, arXiv1305.6421
Köhler M., Guillet, V., & Jones, A. 2011, A&A 528, A96
Köhler, M., et al. 2012, A&A 548, A61
Pagani, L. , Roueff, E., & Lesaffre, P. 2011, ApJ 739, L35
Pagani, L., et al. 2013, A&A 551, A38
van der Wiel, et al. 2013, A&A 553, A1

Section 1.3.3

Berne O., Mulas G., Joblin C., 2013, A&A 550, L4
Carpentier Y., et al., 2012, A&A 548, A40
ML Dubernet, and VAMDC Collaboration, 2010, JQSRT 111, 2151
Guzman V., et al. A&A, 2011, 534, 49
Honvault P., et al., 2011, Phys. Rev. Lett. 107, 023201
Kahane C., Ceccarelli C., Faure A., Caux E., 2013, ApJL 736, L38
Léger A. & Puget J.-L., 1984, A&A 137, L5
Martin-Drumel M.A., et al. 2013, Chem. Phys. Lett. 557, 53
Montillaud, J., Joblin, C., Toublanc, D., 2013, A&A 552, A15
Peeters E., et al., 2002, A&A 390, 1089
Pilleri P., et al., 2012, A&A 542, A69
Pirali O., et al., 2009, Phys. Chem. Chem. Phys. 11, 3443
Rapacioli M., et al., 2006, A&A. 460, 519
Sabbah H., et al., 2010, J. Phys. Chem. Lett. 1, 2962
Taquet V., et al., 2013, ApJL 768, L29
Turpin F., Stoecklin T. & Voronin A., 2010, A&A 511, A28

I.4 Bilan *Herschel* et ALMA

I.4.1 Exploitation des observations d'*Herschel*

PCMI a bénéficié d'un soutien constant du CNES, sous la forme d'un soutien régulier de 40 kEuros/an, combiné à un soutien spécifique pendant la phase d'exploitation scientifique de la mission *Herschel* et des actions conjointes entre *Herschel* et *Planck*. Les actions et projets scientifiques développés dans ce contexte s'insèrent dans une démarche globale, qui va de la détermination des paramètres physiques fondamentaux (spectroscopie, réactivité, processus collisionnels, ..) à la mise en œuvre de bases de données et de modèles, à la préparation et l'exploitation scientifique d'observations réalisées avec les moyens spatiaux.

Dans le cas de la mission *Herschel*, le défi posé par les besoins en spectroscopie dans le domaine THz a été identifié bien avant le lancement ce qui a permis une action concertée au niveau international pour la mesure des spectres dans des gammes de fréquence qui n'étaient pas couvertes précédemment. Il s'agit à la fois d'un défi technologique pour la mise en oeuvre de spectromètres fonctionnant dans la gamme THz, et scientifique pour l'étude d'espèces complexes comme les systèmes à rotation interne, ou très réactives et difficiles à synthétiser. Les laboratoires soutenus par PCMI et notamment le PhLAM, l'ISMO (spectroscopie dans l'infra-rouge lointain avec la ligne AILES du synchrotron Soleil) et l'ENSCR (pour la synthèse) et le LISA (pour les développements théoriques) ont joué un rôle très important dans cet effort, qui est très bien reconnu au niveau international. Les laboratoires se situent au meilleur niveau international. Ces campagnes de mesures ont permis la détection de nouvelles isotopologues dans les relevés spectraux et seront utiles à plus long terme pour l'interprétation des nouvelles données sol (NOEMA/ALMA) et spatiales (SOFIA et exploitation de l'archive *Herschel*).
Une structuration s'est également développée dans le domaine des calculs quantiques, pour déterminer les sections efficaces d'excitation collisionnelle pour les principaux traceurs moléculaires. Comme pour la spectroscopie, l'effort a démarré bien avant le lancement de la mission *Herschel*, et s'est poursuivi jusqu'à aujourd'hui. Il faut noter l'étude exhaustive de l'excitation collisionnelle de la molécule d'eau, incluant des comparaisons entre les calculs théoriques et des mesures qui valident pleinement la qualité des approches théoriques. Les observations réalisées avec *Herschel* ont mis en avant la nécessité de prendre en compte l'excitation par collisions avec les électrons (en particulier dans les régions de photodissociation), ainsi que la prise en compte des états de symétrie de l'hydrogène moléculaire. Un troisième volet s'ouvre avec le besoin de combiner la réactivité chimique et l'excitation pour certaines espèces chimiques.
En effet, les modèles confirment que pour certaines espèces, il faut prendre en compte de manière simultanée la réactivité et l'excitation dans les modèles chimiques et ainsi calculer une chimie « state to state ». Les travaux de modélisation ont été soutenus par PCMI. Les codes développés par la communauté française, notamment le code PDR de Meudon accessible en ligne via la plateforme MIS de l'Observatoire de Paris, sont utilisés par de nombreux chercheurs français et étrangers.
PCMI a également soutenu les travaux visant à mieux comprendre la physique des grains à basse température, menés conjointement par l'IRAP et l'IAS. En effet la connaissance des paramètres optiques des poussières, et leurs variations en fonction de la température et de la longueur d'onde est un point clé pour l'interprétation des données de photométrie. C'est également une question d'intérêt fondamental pour la physique des matériaux amorphes.

Il est remarquable que plusieurs équipes ont également bénéficié de soutien de l'ANR pour développer et amplifier les projets soutenus par PCMI (voir II.3).

Le tableau ci-dessous, présente le budget alloué aux projets en lien avec les observations d'*Herschel* sur la période 2010-2013 par type d'activité. Même si la part dédiée aux observations est prépondérante, les travaux de préparation et d'accompagnement scientifique de la mission *Herschel* ont nécessité également un budget significatif. Certaines de ces activités se situant dans la continuité des préoccupations PCMI, elles ont été également partiellement financées par les crédits propres du programme.

Soutien aux programmes d'observation	229
Spectroscopie du gaz	140
Spectroscopie des solides	31
Calculs quantiques	27
Modélisation astrophysique	13
Colloque et Ecoles	5
TOTAL	445

Tableau I.4.1: Répartition du financement (k€) des projets en rapport avec *Herschel* par secteur d'activité

I.4.2 Liste des projets *Herschel* et ALMA impliquant la communauté PCMI

Nous dressons ci-dessous l'inventaire des projets *Herschel* et ALMA par ordre alphabétique des coordinateurs (PI) dans lesquels la communauté PCMI est impliquée.

Projets *Herschel* OT1 et OT2:

- "Follow-up spectroscopy of two selected filaments found in the *Herschel* Gould Belt Survey: A turbulent shock origin?" (PI: P. André)
- " A *Herschel* Study of Star Formation Feedback on Cloud Scales " (PI: Hector G. Arce)
- "Probing the unique environment around SgrA*" (PI: T Bell)
- "SPECSO: Spectroscopy of Shocks in Outflows" (PI: Milena Benedettini)
- "A *Herschel* survey of photodissociation regions in proplyds" (PI: O. Berné)
- "*Herschel* observations of the shocked gas in HH54" (PI: Per Bjerkeli)
- "Measuring chlorine depletion in low mass star forming regions" (PI: Sandrine Bottinelli)
- "Constraining the chemistry of water in pre-stellar cores", (PI: P. Caselli)
- "Searching for the onset of energetic particle irradiation in Class 0 protostars", (PI: C. Ceccarelli)
- "Peering into the engine of a jet-driven bowshock : TMC1B1" (PI: C. Ceccarelli)
- " Low gas to dust ratio in proto-planetary disks: the Carbon content of CQ Tau, MWC 758 and MWC 480" (PI: E. Chapillon)
- "Peering into the protostellar shocks: NH3 emission at high-velocities" (PI: Claudio Codella)
- "Where is chlorine in shocked regions?" (PI: Claudio Codella)
- "The role of AGN feedback in increasing the turbulence of the molecular gas : lessons from the warm phase" (PI: K.Dasyra)
- "The *Herschel*/HIFI insight on the CH^+ puzzle in the diffuse medium", (PI: E.Falgarone)
- "Diffuse ISM phases in the inner galaxy" (PI: M Gerin)
- "Search for CH_2D^+ a key reactant in interstellar chemistry" (PI: M.Gerin)
- "Detection of 13CCC in star forming regions" (PI: T.Giesen)

- "Turbulent dissipation in the ISM, its dynamics revealed by combined observations of $^{13}CH^+$ and SH^+" (PI: B.Godard)
- "Line maps of OMC1" (PI: J Goicoechea)
- "Mapping SgrB2 s starburst in the Milky way's galaxy center" (PI: J Goicoechea)
- " Molecular Oxygen in Orion " (PI: Paul Goldsmith)
- "Unveiling the origin and excitation mechanisms of the warm CO OH and CH^+" (PI: E. Habart)
- "A detailed study of the physics and chemistry in the Planetary Nebula NGC 7027" (PI: F. Herpin)
- "The chemistry of nitrogen in dark clouds" (PI: P. Hily-Blant)
- "First detection of ^{15}NH and the determination of the $^{14}N/^{15}N$ in the diffuse Interstellar Medium", (PI: P. Hily-Blant)
- "The physical conditions of star formation at low metallicity: the Magellanic clouds as corner stones" (PI: Sacha Hony)
- "Physics of gas evaporation at PDR edges" (PI: C. Joblin)
- "Far-IR bands of PAHs in the Red Rectangle" (PI: C. Joblin)
- "Disentangling energetic feedback in low-mass protostars with CO 16-15" (PI: Lars Kristensen)
- "Disentangling the water chemistry of the spectacular outflow BHR71" (PI: Lars Kristensen)
- "CI and CII in the circumstellar environment of the carbon-rich AGB star Y CVn" (PI: Yannick Libert)
- "Ammonia as a Tracer of the Earliest Stages of Star Formation", (PI: D. Lis)
- "HCl^+ in the interstellar medium" (PI: M. de Luca)
- "First steps toward star formation: unveiling the atomic to molecular transition in the diffuse interstellar medium " (PI: M.-A. Miville-Deschenes)
- "Studying diffuse interstellar clouds with observations of hydrides" (PI: D.Neufeld)
- "Probing the physics and dynamics of the hidden warm gas in the youngest protostellar outflows", (PI: Brunella Nisini)
- "The origin of H_2O^+ in dense clouds" (PI: V. Ossenkopf)
- "Outflows from evolved Class II sources: an *Herschel*/HIFI insight into the kinematical/physical properties of the atomic and molecular component" (PI: Linda Podio)
- "Characterization of the long wavelength features of interstellar Polycyclic Aromatic Hydrocarbons" (PI: Els Peeters)

- "Investigation of the nitrogen chemistry in diffuse and dense interstellar gas" (PI: C.Persson)
- "Solving the puzzle of water excitation in shocks" (PI: Gina Santangelo)
- "Unveiling the water puzzle in cold PDRS:the horsehead case" (PI: D.Teyssier)
- "Deuterated water chemistry towards high-mass star-forming regions", (PI: C. Vastel)

Programmes-clé *Herschel* (KP) sur le temps garanti :

- "Evolution of interstellar dust" (PI: A. Abergel)
- "Probing the origin of the stellar initial mass function: A wide-field *Herschel* photometric survey of nearby star-forming cloud complexes" (PI: P. André)
- "HEXOS: *Herschel* Observations of EXtra-Ordinary Sources: The Orion and Sgr B2 Star-Forming Regions" (PI: E. Bergin)
- "HIFI Spectral Surveys of Star Forming Regions" (PI: C. Ceccarelli)
- "PRISMAS: PRobing InterStellar Molecules with Absorption line Studies" (PI: M. Gerin)
- "The ISM in Low Metallicity Environments: Bridging the Gap Between Local Universe and Primordial Galaxies" (PI: S. Madden)
- "HOBYS: the *Herschel* imaging survey of OB Young Stellar objects" (PI: F. Motte)
- "The warm and dense ISM" (PI: V. Ossenkopf)

  "Water in Star-forming regions with *Herschel* (WISH)" (PI: E. van Dishoeck)

Programmes-clé *Herschel* (KP) sur le temps ouvert:

- Hi-GAL: "The *Herschel* infrared Galactic Plane Survey"
  PI: S. Molinari, co-I francais: J.Ph Bernard, A.Zavagno, L.Deharveng, D.Marshall, D.Paradis, D.Russeil, C.Meny, L.Montier, I. Ristorcelli, A.Abergel, Ph.Andre, O.Berne, S.Bontemps, F.Boulanger, C.Joblin, G.Lagache, M.A. Miville-Deschenes, F.Motte.
- HERITAGE: "The *Herschel* survey of the Magellanic Clouds"
  PI: M. Meixner, co-I Francais: S.Madden , F.Galliano , M.Sauvage, K. Okumura, M.Galametz, D.Cormier, P.Panuzzo, S.Hony, P.Chanial, J.Ph. Bernard, F. Boulanger, C.Bot
- "Galactic Cold Cores: A *Herschel* survey of the source population revealed by *Planck*"
  PI: M.Juvela, co-I francais: I.Ristorcelli (co-PI) , L.Montier, J.Ph. Bernard, C.Meny, K.Demyk, A.Rivera + D.Marshall, E.Falgarone, L.Pagani, N.Ysard, A.Abergel, L.Verstraete, A.Zavagno, F.Motte.
- "*Herschel* Oxygen Project" PI : P. Goldsmith

Projets ALMA cycles 0 et 1:

- "CN excitation: a challenge to protoplanetary disks models" (PI: E. Chapillon)
- "Dispersal of protoplanetary disks: study of suspected gas-poor dusty-rich sources" (PI: E.Chapillon)
- "The origin of molecular jets: new clues from CO and SiO in HH212" (PI: C. Codella)
- "Probing the SiO content in HH212: a clue to the origin of protostellar jets" (PI: C. Codella)

- "Disk rotation in Th 28: testing the impact of jets on protoplanetary disks" (PI: C. Dougados)
- "GG Tau: the Ringworld revisited by ALMA" (PI: A. Dutrey)
- "GG TAU AB: Studying viscous and tidal effects in the circumbinary disk" (PI: A. Dutrey)
- "Vertical Stratification of Turbulence in Protoplanetary Disks: the CS tool" (PI: S. Guilloteau)
- "Deuterated ammonia in prestellar cores" (PI: D.Lis)
- "Outflow Entrainment in HH 46/47" (PI: Mardones)
- "A survey of strong absorption lines at z=0.89 toward PKS1830-211" (P.I. S.Muller)
- "Inner disc, dust ring and spiral-like structures in the circumstellar disc AB Aurigae" (PI: Y.W Tang)

I.5 Services d'observation Bases de données & Services théoriques

Les activités de recherche de la communauté PCMI ne peuvent être réalisées sans un accès à des données de physique atomique et moléculaire ainsi qu'à des outils numériques de pointe pour l'interprétation des observations. Plusieurs services SO5 visant à diffuser ce type de données et à développer les services associés sont par conséquent des enjeux stratégiques pour le PCMI.

La période 2009-2012 a été particulièrement riche sur le plan du développement de tels services. D'un côté, de nouvelles bases de données ont été développées, par exemple KIDA pour les taux de réaction chimique et STARFORMAT pour les simulations MHD. De l'autre l'e-infrastructure européenne VAMDC (*Virtual Atomic & Molecular Data Center*, FP7) a été mise en place ce qui a permis de structurer la diffusion des données de physique atomique et moléculaire et d'offrir aux utilisateurs un portail unique d'accès à ce type de données. Ces services sont aujourd'hui utilisés par la communauté française et les équipes étrangères et le nombre de bases de données qui rejoignent ces services ne cesse d'augmenter. La France joue un rôle moteur dans le développement de services scientifiques sur ces thématiques.

Le programme PCMI a accompagné le développement de ces services à différents niveaux, soutien financier, incitation, participation active de la communauté. Le PN s'implique dans la réforme des SO de l'INSU compte tenu de l'importance de certains services SO5 pour ses activités.

Dès à présent et dans les prochaines années, le principal enjeu sera de consolider ces services et les infrastructures de diffusion de données sous jacentes. Ceci nécessite en premier lieu d'avoir le soutien adéquat des OSU pour poursuivre le développement des services et assurer leur maintenance sur le long terme. La structuration de ces services SO5 en pôles thématiques nationaux avec un plan de développement stratégique établi en concertation avec les PN pourra également être l'un des éléments pour consolider ces services.

I.5.1 - Services de physique atomique et moléculaire

La production et l'accès aux données de physique atomique, moléculaire et du solide d'intérêt astrophysique sont au cœur des activités du PCMI. L'accès à ces dernières peut ne pas être évident pour des non experts. D'une part elles sont souvent dispersées dans la littérature ce qui peut les rendre difficile à trouver. D'autre part, il est souvent nécessaire d'associer à ces données des références bibliographiques et des critères de qualité établis par des experts du domaine pour que des non experts puissent en tirer le meilleur profit. Afin de répondre à ces difficultés, plusieurs bases de données visant à rassembler et à diffuser ces données ont été développées. Certaines d'entre elles existent depuis de nombreuses années mais on note une augmentation de leur nombre et de leur contenu depuis l'avènement d'*Herschel*; le domaine sub-mm est l'un des plus riches en raies moléculaires et l'analyse des observations ne peut se faire sans accès à des données spectroscopiques fiables. Ces services font aujourd'hui partie intégrante des outils utilisés par la communauté pour préparer et interpréter les observations.

Les services de diffusion de données de physique atomique et moléculaire dans lesquels la communauté PCMI est impliquée sont les suivants :

VAMDC est un projet européen FP7-I3, piloté en France, qui a mis en place une e-infrastructure permettant aux chercheurs d'accéder de façon transparente aux principales données de physique atomique et moléculaire via un portail unique.
Fin 2012, le consortium européen comprenait 22 universités ou instituts. En France, des équipes de 5 observatoires des sciences et de l'univers (OASU, OMP, OP, OSUG, Theta) intègrent leurs services dans VAMDC. Au niveau international, les autres partenaires sont UCL, Open University, Cambridge University, Uppsala University, University of Cologne, Observatoire de Catania, Observatoire de Cagliari, Observatoire de Belgrade, un institut au Venezuela et 4 instituts en Russie.

VAMDC (Virtual Atomic and Molecular Data Center) rassemble actuellement 21 bases de données de physique atomique et moléculaire, dont 10 hébergées en France. L'ensemble de ces bases implémentent les standards de VAMDC ce qui permet de les interroger de façon transparente via un portail unique et de récupérer les données dans des formats standards. Le modèle de données sous-jacent, XSAMS, a été développé par le consortium VAMDC en partenariat avec d'autres organismes comme l'AIEA. L'ensemble des services de physique atomique et moléculaire relevant du PCMI sont ou seront intégrés à l'infrastructure VAMDC.

Ce projet, terminé fin 2012, se poursuit dans le cadre d'un nouveau projet européen, Supp@VAMDC, qui élargit VAMDC à de nouveaux partenaires. L'infrastructure de VAMDC, développée au LPMAA, devrait être maintenue en grande partie par le centre d'expertise SO5 VO-Paris Data Center.
Site web : http://vamdc.eu

BASECOL est une base de données de taux d'excitation collisionnelle. Ce type de données est indispensable pour la modélisation d'objets astrophysiques hors équilibre thermodynamique. BASECOL est la référence la plus complète pour les taux de collisions au niveau international. Les données sont validées avant d'être incluses dans la base et sont exhaustivement référencées. La base contient des données originales non disponibles ailleurs et se structure autour d'experts du domaine. Le service met également à disposition des données spectroscopiques du CDMS, JPL, HITRAN obtenues via les protocoles d'accès VAMDC. La base est compatible avec l'outil SPECTCOL qui permet de croiser les données de spectroscopie avec celles de collision.
Site web : http://basecol.obspm.fr

KIDA (KInetic Database for Astrochemistry) est une base de données de cinétique chimique en phase gazeuse d'intérêt astrophysique et en planétologie. Le service est ouvert depuis mai 2010. Il se base sur le réseau "OSU" (développé par Eric Herbst aux USA) et s'enrichit des nouvelles données déterminées expérimentalement et par la théorie. L'originalité de KIDA par rapport aux autres services de ce type (UMIST, OSU, NIST) tient du fait que les producteurs de données sont directement partie prenante du contenu de la base. Certains d'entre eux participent au comité d'experts de KIDA qui analyse et évalue les nouvelles données publiées dans la littérature. Cette validation des données est une plus-value importante pour les utilisateurs non experts en chimie qui doivent utiliser ce type de données. Grâce à cette organisation, KIDA a le potentiel de devenir l'outil de référence sur les données de cinétique chimique.
Site web : http://kida.obs.u-bordeaux1.fr

GhoSST est une base de données fournissant des propriétés spectroscopiques de solides naturels ou synthétiques (glaces, minéraux, solides et matériaux organiques, météorites, ...) déterminées en laboratoire. Les données sont largement documentées par des références bibliographiques. Elles sont utilisées par les membres du PNP et du PCMI. Le service devrait s'élargir dans les prochaines années à l'infrastructure de base de données SSHADE qui coordonnera au niveau national et européen la diffusion de ce type de données. Le projet a un aspect fédérateur pour les équipes souhaitant diffuser des données sur la phase solide.
Site web : http://ghosst.osug.fr

Theoretical spectral database of polycyclic aromatic hydrocarbons: la base PAH de Cagliari/Toulouse rassemble des données théoriques sur les caractéristiques géométriques, l'énergétique, les fréquences vibrationnelles harmoniques et les sections efficaces de photo-absorption de PAH (et agrégats carbonés).
Site web: http://astrochemistry.ca.astro.it/database/pahs.html

Cosmic PAH analogues: experimental properties and kinetics: cette base permet de rassembler des données expérimentales sur la réactivité, la photodissociation et la spectroscopie, de PAH et espèces dérivées, en lien avec les activités PIRENEA et PAH de l'IRAP. Sa mise en service est prévue fin 2013.

MOLAT fournit des données spectroscopiques dans l'UV de plusieurs atomes et molécules. Ces dernières années, les données initialement diffusées sous forme de fichiers ASCII ont été intégrées à une base de données. Ceci a permis d'intégrer le service dans VAMDC et ainsi d'y accéder via le portail VAMDC et à terme via des outils d'analyse de spectres.
Site web : http://molat.obspm.fr

Sesam est un nouveau service fournissant les données spectroscopiques de diverses transitions électroniques de molécules d'intérêt majeur pour l'astrophysique : H2 et CO (et des isotopes HD et D2).
Site web : http://sesam.obspm.fr

TipTopBase produit des projets internationaux Opacity et Iron, propose des données atomiques radiatives et collisionnelles pour 17 éléments chimiques d'intérêt astrophysique (H, He, C, N, O, Ne, Na, Mg, Al, Si, S, Ar, Ca, Cr, Mn, Fe, Ni). Ces données sont regroupées dans deux bases de données et accessibles via une interface web dédiée. Les données intéressent essentiellement le PNPS. Une partie d'entre elles sont utiles au PCMI.
Site web : http://cdsweb.u-strasbg.fr/topbase/home.html

I.5.2 - Services théoriques

En parallèle à la mise en place de services de diffusion de données de physique atomique et moléculaire, plusieurs outils d'analyse et services théoriques ont été développés. Il s'agit par exemple de **CASSIS**, outil d'analyse et d'interprétation de spectres, de services autour de codes comme **DustEM** et le **code PDR** ou des bases de données diffusant de grandes simulations MHD du gaz interstellaire comme **STARFORMAT**. Ce type de services est aujourd'hui crucial pour la communauté PCMI confrontée à des observations de plus en plus riches qui nécessitent les outils théoriques de pointe pour être interprétées. Certains des codes sous-jacents ont demandé des années pour être développés et il est difficile pour des équipes de redévelopper des codes similaires *ex nihilo*. Il est par conséquent nécessaire de donner accès à ces outils à la communauté.

CASSIS est un outil permettant d'analyser des spectres et de les confronter à des modèles de transfert de rayonnement. Plusieurs bases de données spectroscopiques (JPL, CDMS, NIST) et moléculaires (LAMDA) sont intégrées à CASSIS. Un accès direct à ces données via VAMDC est en cours de développement. Initialement développé en perspective de la très haute résolution spectrale de l'instrument *Herschel*/HIFI, cet outil permet l'analyse de données provenant d'autres observatoires (CSO, IRAM, APEX, JCMT, etc.). L'évolution prévue de CASSIS est de le coupler à d'autres codes comme DustEM (modélisation de la physique des grains) et Nahoon (modèle de chimie en phase gazeuse), et de s'interfacer avec d'autres bases de données (KIDA, bases PAH, GhoSST).
Site web : http://cassis.irap.omp.eu

DustEM est un code permettant de calculer l'extinction et l'émission des poussières interstellaires. Il modélise une physique très détaillée des grains prenant en compte des effets de polarisation, de «spinning dust», ... Le code est public et est celui qui a été utilisé pour corriger les avant-plans de *Planck*. Le code est prévu pour être couplé à d'autres codes comme c'est par exemple le cas avec le code PDR ou prochainement dans CASSIS.
Site web : http://www.ias.u-psud.fr/DUSTEM

Les **services PDR** sont construits autour du code PDR de Meudon (Le Petit et al. 2006), et font partie de la plateforme MIS et jets. Ils ont pour but de fournir les outils pour préparer et interpréter des observations dans le gaz moléculaire soumis au rayonnement. Les services incluent la diffusion du code PDR, l'ajout de données spécifiquement demandées par les utilisateurs, un service de code en ligne avec ressources de calcul (en développement) et un service de diffusion de grilles de modèles pré-calculés avec outils de fouille. Ce service a beaucoup bénéficié du soutien de PCMI.
Site web : http://pdr.obspm.fr

STARFORMAT a pour objectif de diffuser de grandes simulations MHD du gaz interstellaire. Le développement de Starformat a été financé par ASTRONET. Des chercheurs du ZAH à Heidelberg participent également au projet. Le service donne accès à plusieurs types de simulations, coeurs denses, etc., dont il est possible de télécharger les résultats dans différents formats. Un service de post-traitement avec RADMC permet de calculer l'émission des poussières et de plusieurs raies moléculaires. STARFORMAT fait partie du service SO5 «Plateforme MIS & Jets». De nouvelles simulations seront prochainement intégrées à STARFORMAT pour couvrir de nouveaux objets astrophysiques. A terme, les simulations pourront être post-traitées dans le simulateur ALMA pour permettre aux scientifiques de préparer des campagnes d'observations.
Site web : http://starformat.obspm.fr

Afin de répondre aux enjeux, il est nécessaire que de nouveaux services théoriques soient déployés dans les prochains mois / années. Le code de chocs Paris-Durham qui modélise la physico-chimie dans un choc MHD ainsi que le code TDR qui calcule la structure thermique et chimique dans des vortex sont en cours d'intégration à la plateforme MIS & Jets.
Afin de structurer le développement de ces services au niveau national, le service national SO5 «Plateforme MIS & Jets» a été mis en place. On peut prévoir à court terme un élargissement de ce service à l'échelle nationale au sein du pôle thématique GIMOC. PCMI aura un rôle important dans la définition des orientations scientifiques de ce service.

I.5.3 - Evolution des services scientifiques

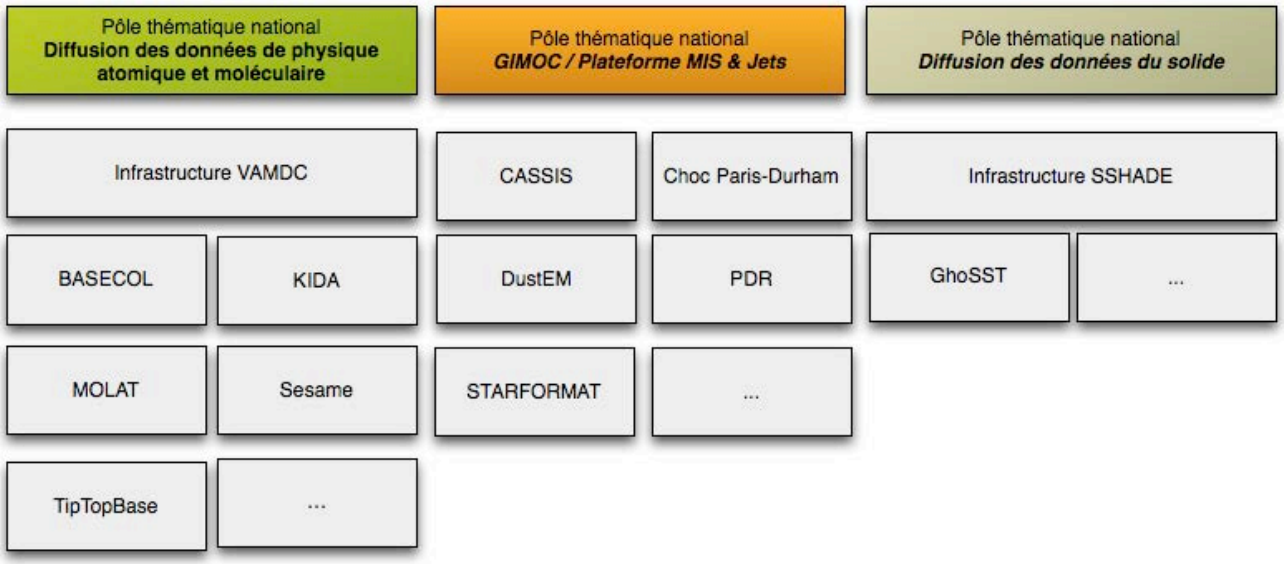


Figure I.5.1: Structuration des services liés à PCMI en 3 services nationaux d'observation.

La plupart des services nécessaires aux activités de recherche de PCMI ont été développés ou sont en cours de construction. L'ensemble de ces services s'intègre et se structure progressivement dans des services nationaux d'observation. On peut souligner le rôle fédérateur qu'apporte VAMDC à la structuration de la diffusion des données de physique atomique et moléculaire. L'un des principaux enjeux pour les années qui viennent sera de consolider ces services et les infrastructures de diffusion sous-jacentes.

Cette consolidation nécessite que les OSU et laboratoires fournissent les moyens adéquats nécessaires au développement des services scientifiques et à leur pérennisation. Ceci est d'autant plus important que certains services clefs ont été développés sur projet (Europe, ANR, ...) et qu'un suivi est nécessaire à l'issue de ces financements.

Le programme national poursuivra sa politique de soutien aux services comme il l'a fait par le passé et continuera à encourager les scientifiques membres du programme ayant des données d'intérêt collectif à diffuser ces dernières via les infrastructures mises en place.

Afin d'orienter au mieux le développement de ces services dans l'intérêt des communautés utilisatrices, il pourrait être envisagé que les services relevant du PCMI soient structurés en 2 grands services nationaux :

- **Pôle national de diffusion de données de physique atomique et moléculaire**

Ce pôle coordonnera la diffusion des données de physique atomique et moléculaire d'intérêt astrophysique. Il repose largement sur les équipes françaises participant à VAMDC. Les services inclus dans le pôle reposeront sur l'infrastructure VAMDC et comprendront les services de données de physique atomique et moléculaire intéressant les différents programmes nationaux, en particulier le PCMI, le PNP et le PNPS dont les travaux de recherche nécessitent l'accès à ce type de données.

- **GIMOC / Plateforme MIS & Jets**

Ce service national coordonnera l'ensemble des services théoriques et outils indispensables à la préparation et à l'interprétation des observations dans le MIS. Actuellement, le service «plateforme MIS & Jets» recouvre les services PDR et STARFORMAT. Les services autour des codes de chocs et TDR sont en cours de développement ou le seront sous peu. Le pôle thématique GIMOC permettrait d'élargir l'ensemble à CASSIS, DustEM ainsi que des méthodes d'analyse de données.

A ces deux grands services nationaux d'observation, viendrait s'ajouter à terme un **pôle de diffusion des données de physique du solide,** qui concerne essentiellement le PNP mais pour lequel le PCMI a également un intérêt certain. Ce nouveau service, dont l'initiateur est le service GhoSST coordonnerait les services de diffusion des données solides.

Cette structuration des services en grands services d'observation nationaux, a débuté dans le cadre de la réforme SO5. Elle permettra de définir à l'échelle nationale une stratégie de développement des services. Il semble donc naturel que des membres du conseil scientifique de PCMI participent aux organes de pilotage de ces pôles thématiques.

I.6 Bibliographie des travaux de recherche

La bibliographie du programme PCMI (en Annexe 3) regroupe l'ensemble des travaux ayant bénéficié d'un soutien financier de la part du programme sur la période janvier 2009 - juin 2012. Cette liste de travaux, n'incluant que les articles à comité de lecture, a été classée par année et par ordre alphabétique des premiers auteurs. Elle a été réalisée initialement à partir de la base de données bibliographiques NASA/ADS (http://adsabs.harvard.edu/abstract_service.html) puis a été validée et complétée par les 63 porteurs de projets.

Au total, 766 articles ont été publiés en 3 ans et demi, soit en moyenne 3.5 articles par an et par porteur de projet. L'année 2010 est la plus productive (304 articles) en raison de l'impact des premiers résultats *Herschel* (et dans une moindre mesure *Planck*), lesquels représentent environ 20% de la production sur la période juin 2010-juin 2012. On notera également que 40% des articles ont été publiés dans des journaux de chimie physique (*Journal of Chemical Physics*, *Chemical Physics Letters*, etc.). Enfin une douzaine d'articles ont été publiés dans des journaux à fort impact (*Nature*, *Science*, *Proceedings of the National Academy of Sciences* et *Physical Review Letters*).

I.7 Colloques – Manifestations Scientifiques

PCMI a participé au financement ou/et à l'organisation de 12 colloques, ateliers ou écoles entre 2010 et 2012. La liste des manifestations soutenues par le programme (hors colloques du programme) est présentée dans le tableau 1.7.1 ci-dessous et un résumé de chaque événement se trouve dans les fiches bilan en ***Annexe 2***. Le caractère pluri-disciplinaire des activités de PCMI transparait complètement dans les thèmes de ces écoles, puisqu'elles couvrent aussi bien des aspects de physique et chimie fondamentale, que des thèmes astrophysiques tels que la formation stellaire et planétaire ou l'interaction matière-rayonnement. On notera aussi que l'astrophysique de laboratoire devient en Europe une discipline à part entière dont le congrès ECLA représente une des premières briques structurantes de ce domaine hautement interdisciplinaire. L'atelier « AstrOHP2010 » n'a pas été soutenu financièrement par le programme car il faisait l'objet d'une action de formation permanente de l'INC. Il est mentionné ici en raison de la très forte implication des membres de la communauté PCMI tant comme orateurs que participants. Enfin des passerelles en direction de l'exobiologie et de l'origine de la vie se construisent à travers l'Atelier « Photochimie en Orbite » et le congrès international « Origins'2011 ».

Outre ces ateliers, PCMI a organisé sa réunion biannuelle à Arles du 18 au 21 Octobre 2010 sous la responsabilité de T. Chiavassa (PIIM Marseille) et D. Talbi (GRAAL Montpellier). Celle-ci a rassemblé 80 participants (le taux de participation ayant souffert d'une forte grève SNCF) qui ont débattu autour des premiers résultats issus des observations du satellite *Herschel* mais aussi autour des récentes avancées sur la compréhension des processus physico-chimiques en lien avec le milieu interstellaire ainsi que sur la caractérisation de l'environnement des objets astrophysiques tels que le milieu diffus ou les disques protoplanétaires.

Le colloque de fin de contrat a eu lieu à Paris du 19 au 21 Novembre 2012 sous la responsabilité de J.H. Fillion (LPMAA, Paris) et a rassemblé 156 participants. Les présentations orales ont été organisées en grands thèmes mettant en avant les activités du programme et soulignant l'implication très grande de notre communauté dans la préparation et l'exploitation des missions spatiales *Herschel* et *Planck* dont les résultats jettent un regard nouveau sur le milieu interstellaire. L'IRAM avec NOEMA à venir et l'interféromètre ALMA qui commence à fonctionner jouent également un rôle important. Le développement d'outils expérimentaux et théoriques pour l'acquisition de données physico-chimiques originales reste un point fort de l'activité interdisciplinaire du PCMI et l'ensemble des présentations (orales et posters) a bien reflété ce dynamisme. Ce colloque a illustré la diversité et la richesse de notre programme et la volonté de maintenir de forts échanges interdisciplinaires autour des grandes questions de l'astrophysique qui motive notre programme. Des informations plus détaillées peuvent être trouvées sur le site web: http://pcmi2012.sciencesconf.org/

Enfin, le programme intervient chaque année dans l'organisation de la réunion annuelle de la SF2A (Société Française d'Astronomie et d'Astrophysique) par l'intermédiaire de conférences présentées par des membres de la communauté ou/et l'organisation de demi-journées thématiques parfois en association avec les autres programmes nationaux en particulier PNPS et PNP (cf. Tableau 1.7.2).

En résumé, le soutien du programme à ces manifestations a pris différentes formes:

- Aide directe forfaitaire à l'organisateur après évaluation par le Conseil Scientifique
- Soutien aux missions de membres de la communauté PCMI participant à la manifestation (PAMO, ORIGINS')
- Organisation d'ateliers thématiques pendant les journées de la SF2A
- Co-organisation de colloques (Arles 2010 ; Paris 2012)

Organisateur	Titre	Financement (k€)
2010		
T. Montmerle	Ecole Evry Schatzman 2010: "Formation stellaire dans l'univers local"	2.0
O. Chesneau	Ecole Internationale Astronomique d'Interférométrie Optique	2.0
J.C. Guillemin	Atelier Photochimie en Orbite	1.5
E. Dartois/ T. Pino	AstrOHP2010	-----
O. Dulieu	PAMO	1.26
2011		
L. D'hendecourt	ECLA: European Conference on Laboratory Astrophysics	7.0
M. Gargaud	Origins'2011	1.0
A. Marcowith	Workshop international "Interaction du rayonnement cosmique et du milieu interstellaire"	4.3
T. Montmerle	Atelier "Charge Exchange Across the Universe"	3.0
2012		
J.C. Augereau	Symposium international *Herschel* sur la formation stellaire et planétaire	4.0
M.L. Dubernet	F-VAMDC = Participation A colloque Final de VAMDC	2.0
P. Hennebelle	Ecole Evry Schatzman 2012: "Rôle et mécanismes de transport du moment cinétique dans la formation et l'évolution précoce des étoiles"	3.0

Tableau I.7.1: Soutien aux Manifestations Scientifiques (Ecoles, Ateliers, Conférences…)

Le tableau ci-dessous précise la nature de la participation de PCMI aux journées annuelles de la SF2A.

2010	**Marseille**	
	Revue	Premiers résultats *Herschel* (E. Caux)
	Atelier	Gas and dust spectroscopy with *Herschel* (avec PNPS et PNP)
2011	**Paris**	
	Revue	Astrochimie: chimie des origines (L. d'Hendecourt)
	Atelier	Stellar and Interstellar physics for the modelling of the Galaxy and its components (avec ASGAIA, SEA, PNPS, PNCG)
	Atelier	Circumstellar matter with ALMA and *HERSCHEL* (avec PNPS, SEA)
	Atelier	Réflexion sur le PCMI de demain
2012	**Nice**	
	Revue	Des galaxies aux planètes : le milieu interstellaire. Comment la simulation numérique nous aide à comprendre la formation des étoiles et des disques protoplanétaires (P. Hennebelle)
	Atelier	Exoplanètes: de l'astrochimie à l'exobiologie (avec SFE, PNP, PNPS)
	Atelier	Réduction, analyse et visualisation de données de spectro-imagerie (avec ASA)
	Atelier	Turbulence dans les plasmas (avec PNST)

Tableau I.7.2: Nature de la participation de PCMI aux journées annuelles de la SF2A

II Le Bilan en chiffres - Statistiques

II.1 Recensement de la communauté

Afin d'évaluer la taille de la communauté travaillant activement sur les thématiques PCMI en France, nous avons lancé en Juillet 2012 un recensement à destination des porteurs de projets financés au cours des dernières années, leur demandant la liste complète de leurs collaborateurs ainsi que leur statut (permanents, post-docs, étudiants) et leur institut principal de rattachement (INSU, INP, INC, INSIS, IN2P3 …).

Les réponses nous ont permis de recenser **304 membres actifs de PCMI en France**, travaillant dans **41 laboratoires**. Comme le montre la carte géographique ci-dessous, ils sont très largement répartis sur l'ensemble du territoire, avec 140 personnes en Ile de France et 164 en province. PCMI joue donc un rôle crucial de fédérateur et de vecteur de communication entre ces équipes.

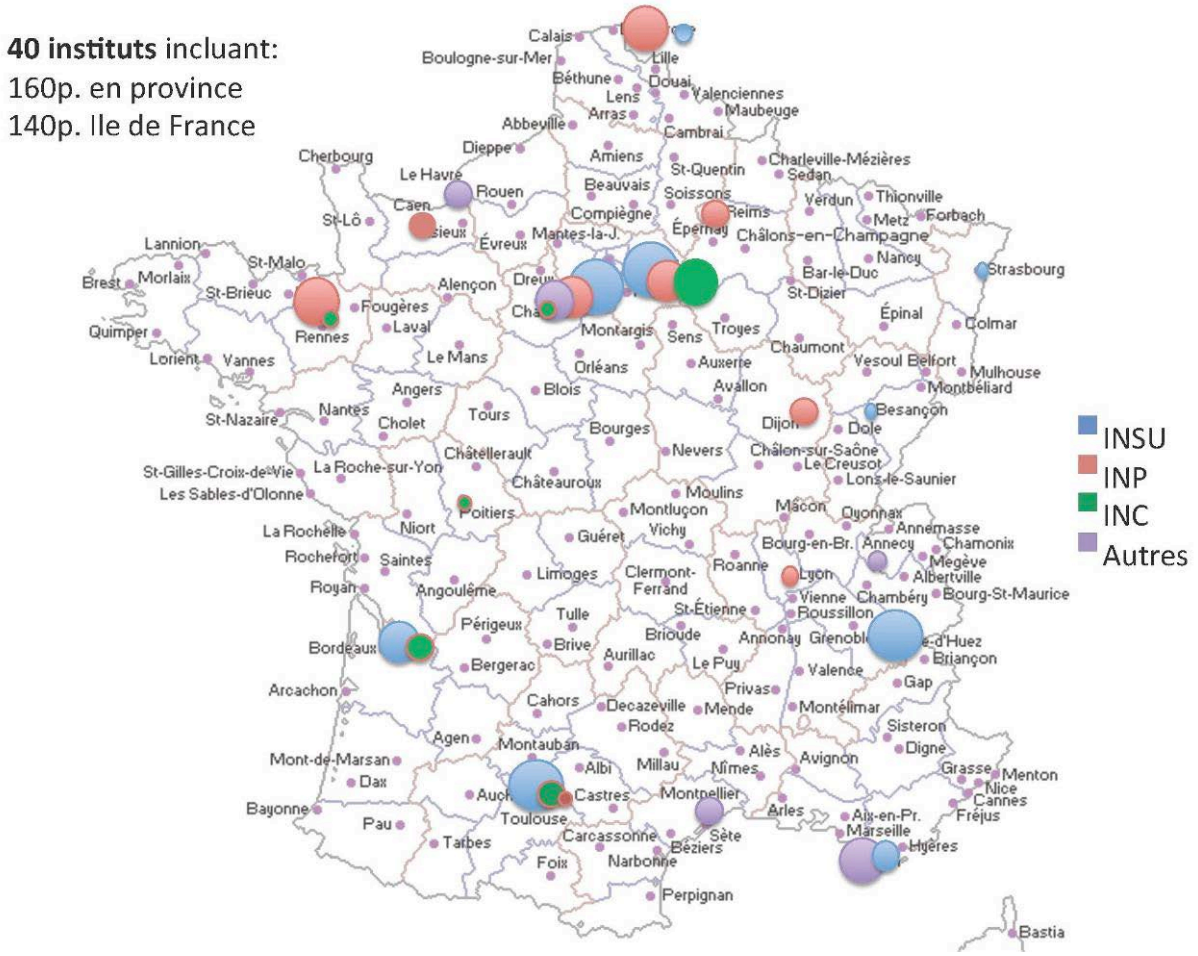


Figure II.1.1: Répartition géographique des chercheurs concernés par l'activité de PCMI avec leur appartenance sectorielle. Le secteur "Autres" regroupe l'INSIS et l'IN2P3.

La répartition des collaborateurs PCMI selon l'institut principal de rattachement de leur laboratoire est illustrée dans le "camembert" ci-dessous. Une grosse moitié (55%) relève de l'INSU, mais 23% sont sous tutelle principale de l'INP, 10% de l'INC, et 12% d'autres instituts (INSIS et IN2P3). Cette répartition illustre clairement la nature pluridisciplinaire de PCMI.

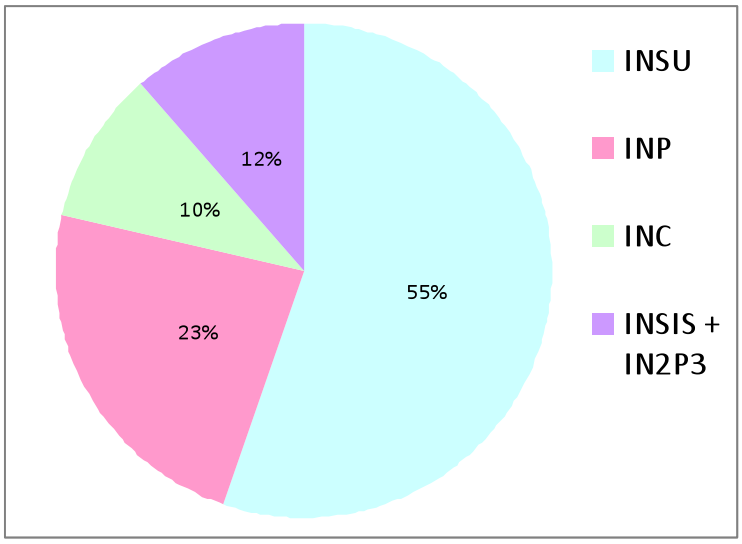


Figure II.1.2: Répartition des collaborateurs PCMI par institut de rattachement de leur laboratoire.

Enfin, la répartition des membres actifs de PCMI selon leur statut est illustrée dans le "camembert" ci-joint. En juillet 2012, on trouve environ 66% de chercheurs permanents, 14% de post-doctorants et 20% d'étudiants en thèse. Le vivier de jeunes attirés par la discipline est donc tout à fait satisfaisant, malgré la "concurrence" de thèmes plus à la mode comme les exoplanètes ou la cosmologie.

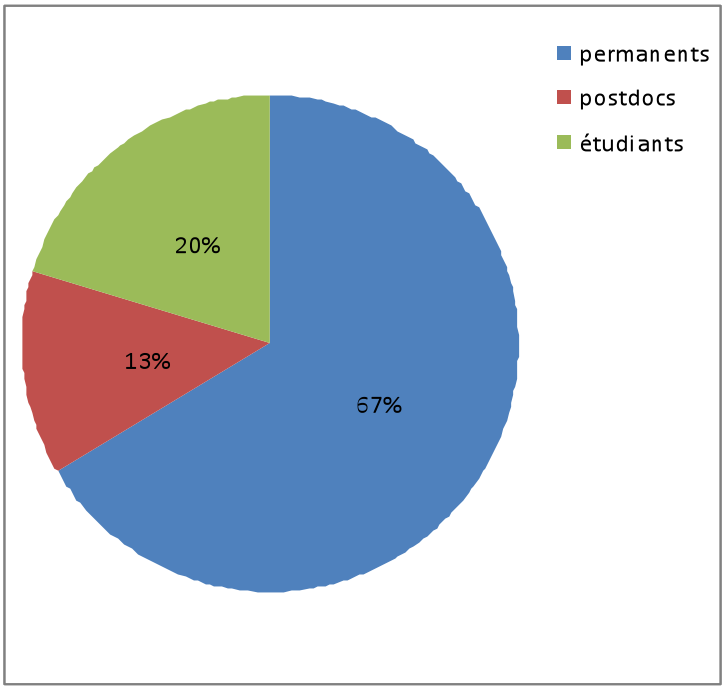


Figure II.1.3: Répartition des collaborateurs PCMI selon leur statut professionnel.

La liste des laboratoires collaborant au programme est donnée dans le tableau ci-dessous ainsi que le nombre de chercheurs impliqués par laboratoire. Le code couleur se réfère à celui du camembert II.1.2 et vise à distinguer les différents instituts d'appartenance.

	Effectif Impliqué	Lieu	IdF	Province	Institut
LERMA	34	Paris/Cergy	34		INSU
LUTH	9	Meudon	9		INSU
GEPI	2	Meudon	2		INSU
IAP	2	Paris	2		INSU
LMCM	2	Paris	2		INSU
LPMAA	10	Paris	10		INP
LCT	10	Paris 6	10		INC
LCPMR	3	Paris 6 `	3		INC
LADIR	4	Paris 6	4		INC
CEA/IAM	23	Saclay	23		INSU
IAS	15	Orsay	15		INSU
LISA	2	Creteil	2		INSU
ISMO	11	Orsay	11		INP
LAC	1	Orsay	1		INP
IPNO	5	Orsay	5		IN2P3
CSNSM	2	Orsay	2		IN2P3
MSME	4	Marne la vallée	4		INSIS
LCP	1	Orsay	1		INC
IPR	16	Rennes		16	INP
ENSCR	1	Rennes		1	INC
LOMC	6	Le Havre		6	INSIS
IC2MP	1	Poitiers		1	INC
LAB	15	Bordeaux		15	INSU
ISM	5	Bordeaux		5	INC
IRAP	29	Toulouse		29	INSU
LCPQ	5	Toulouse		5	INC
LPCNO	1	Toulouse		1	INP
LUPM	4	Montpellier		4	IN2P3
PIIM	13	Marseille		13	INSIS
LAM	3	Marseille		3	INSU
IPAG	19	Grenoble		19	INSU
IRAM	9	Grenoble		9	INSU
LAPP	1	Annecy		1	IN2P3
ILM	1	Lyon/Villeurbanne		1	INP
ICB	4	Dijon		4	INP
UTINAM	1	Besançon		1	INSU
OAS	1	Strasbourg		1	INSU
GSMA	5	Reims		5	INP
PhLAM	13	Lille/villeneuve d'ascq		13	INP
UMET	2	Lille/villeneuve d'ascq		2	INSU
CIMAP	9	Caen		9	INP
Total	304		140	164	

Tableau II.1.1: Répartition par laboratoire des chercheurs ayant participé aux projets financés pendant la période 2009-2012. Les laboratoires rattachés à l'INSU sont en bleu clair pour la région parisienne et bleu plus foncé pour la province

II.2 Bilan Financier du programme sur la période 2009-2012

II.2.1 Budget Total du Programme

Les recettes du programme PCMI proviennent de différentes sources. Outre l'INSU, le CNES soutient de longue date le programme par un financement récurrent et par un financement exceptionnel depuis 2010 lié à la mission *Herschel*. Ce dernier financement sera maintenu encore pour 2013 et 2014 mais à la baisse puisque la mission sera en voie d'achèvement. Il vise à aider les projets de recherche en rapport avec les observations du télescope et les expériences de laboratoire en soutien à ces observations. Le caractère hautement interdisciplinaire du programme permet également d'obtenir le soutien de l'Institut National de Physique (INP) et de l'Institut National de Chimie (INC) du CNRS sur une base renégociée chaque année. Par rapport au contrat précédent, il est à noter que le soutien du CEA a disparu. Celui-ci visait à financer uniquement des projets soumis au programme émanant de laboratoires du CEA.

Le tableau ci-dessous dresse le bilan des financements par entité. Le budget annuel du programme est de l'ordre de celui d'une petite ANR ce qui demeure faible compte tenu du nombre de laboratoires impliqués dans le programme (voir par ailleurs). On notera la forte baisse, ces deux dernières années, du soutien de l'INSU et à un degré moindre de l'INP. Par chance, le soutien exceptionnel du CNES a permis de maintenir un certain niveau de soutien aux activités PCMI. Le tableau montre également le total des demandes financières des porteurs de projet répondant aux appels d'offre annuels ainsi que le facteur de pression de l'ordre de 1.5 typiquement. Ce facteur est plus faible que lors du précédent contrat (~2) mais il reflète le fait que la communauté PCMI a, au fil des années, ajusté ses demandes de financement en adequation avec les moyens du programme ce qui a fait baissé mécaniquement le taux de pression. Un autre point est qu'une partie importante du budget est dédiée au soutien, via le financement CNES, aux programmes d'observation *Herschel* qui sont soumis à une pression moins élevée car déjà évalués par un comité de programme international. Il faut noter un soutien élevé dans les autres pays pour l'exploitation d'*Herschel* (ex: NASA). L'année 2010 correspond à la première année du soutien *Herschel* et à partir de 2011 on note une réaugmentation du facteur de pression liée à la coupure budgétaire du CNRS (INSU et en partie INP).

	2009	**2010**	**2011**	**2012**	**Totaux**
INSU	135.0	135.0	95.0	80.0	445.0
CNES	40.0	40.0	40.0	40.0	160.0
CNES *Herschel*	0.0	111.5	130.0	103.0	344.5
CNRS Physique	50.0	50.0	45.0	40.0	185.0
CNRS Chimie	17.5	20.0	20.0	20.0	77.5
Totaux	242.5	356.5	330.0	283.0	**1212.0**
Crédits sollicités	340.3	424.6	508.7	452.7	
Facteur de Pression	1.40	1.19	1.54	1.60	

Tableau II.2.1: Bilan des recettes (k€) du programme PCMI entre 2009 et 2012

Le tableau suivant présente les dépenses annuelles du programme. Environ 90% de celles-ci sont allouées aux projets de recherche et à l'organisation de manifestations scientifiques (hors colloques du programme). Une petite part d'environ 10 k€ annuel est réservée pour le fonctionnement du programme permettant de payer l'organisation des réunions du conseil scientifique et les missions du bureau. Le programme cofinance significativement ses deux colloques (Arles 2010 et Paris 2012) qui concernent une communauté de plus de 300 personnes et réunissent entre 80 et 150 participants.

	2009	2010	2011	2012	Totaux
Fonctionnement[1]	18.0	37.5	16.8	13.8	86.1
Projets	224.5	318.5	335.8	246.4	**1125.2**
Totaux	242.5	356.0	352.6	260.2	**1211.3**

Tableau II.2.2: Bilan des dépenses (k€) du programme PCMI entre 2009 et 2012

II.2.2 Vue synthétique de la répartition des financements selon les projets retenus

Sur la période qui nous concerne, les quatre appels d'offre du programme ont rassemblé chaque année entre 30 et 40 propositions correspondant à une demande de financement comprise entre 340 et 510 k€ par an. En tout, 69 projets (dont 12 manifestations scientifiques) ont été retenus et financés. Ils émanent de 63 proposants répartis au sein de 26 laboratoires différents. Bon nombre de ces projets sont de long terme et nécessitent de ce fait un soutien sur plusieurs années. Ainsi, 9 projets ont reçu un soutien annuel entre 2009 et 2012. Le programme finance également des projets beaucoup plus ponctuels qui en général ne nécessitent une aide financière que sur une année. Une trentaine de propositions retenues sont dans ce cas.

Les tableaux et graphiques qui suivent visent à présenter les choix de financement du programme sous diverses facettes. Nous avons identifié de *grandes thématiques* et des *secteurs disciplinaires* à partir desquels il est possible de mieux analyser les efforts consentis par le programme

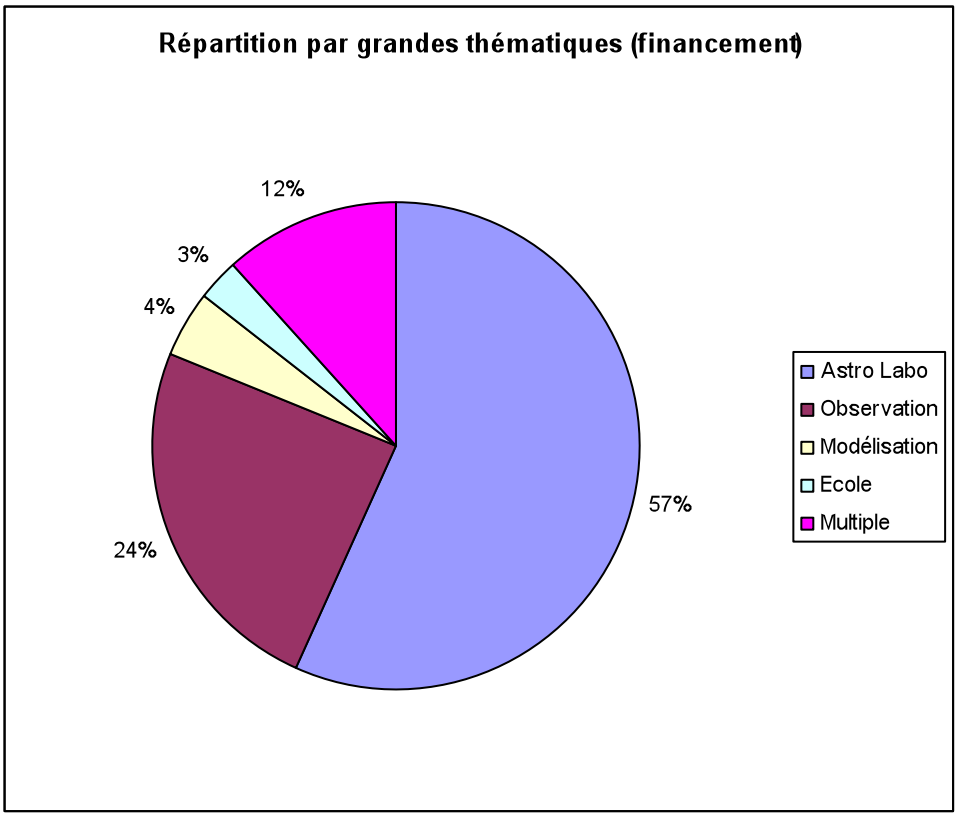
Outre les *observations* qui constituent la pierre angulaire du programme, les travaux de laboratoire (expérimentaux et théoriques) désormais rassemblés sous le vocable "*Astrophysique de laboratoire*" sont indispensables à leur interprétation. De même la *modélisation* de ces environnements (incluant la mise en place de bases de données physico-chimiques) permet d'établir une passerelle entre le laboratoire et l'observation. L'ensemble est d'ailleurs étroitement couplé car toute avancée d'une thématique peut suggérer de nouveaux développements au sein des autres. A ces trois grandes lignes directrices il faut ajouter un secteur transversal résultant de propositions scientifiques à cheval sur plusieurs des trois volets mentionnés ci-dessus. Dans le camembert sectoriel ci-dessous, on le trouvera sous la dénomination "*Multiple*". Enfin une autre activité complètement transversale rassemble les réunions scientifiques de tout type (écoles, ateliers, colloques nationaux ou internationaux) intéressant le programme et que nous avons regroupées sous le terme "*école*".

Le tableau ci-dessous fait le bilan des financements annuels octroyés par thématiques. Une présentation en camembert accompagne ce tableau afin de mieux évaluer la répartition budgétaire entre les thématiques. Ces données font clairement apparaître le poids considérable de l'astrophysique de laboratoire (57%) qui dans bien des cas fait appel à des appareillages sophistiqués dont les coûts de construction, fonctionnement, maintenance et développement requièrent des moyens financiers importants et ceci sur une échelle de temps de plusieurs années (au moins 10 ans par opposition à des financements sur projets de type ANR de 3-4 ans). Par ailleurs, les crédits récurrents accordés par les tutelles aux équipes travaillant dans cette thématique ne permettent pas l'exploitation dans la continuité ni le developpement de nouvelles idées. Les financements PCMI sont tres précieux pour structurer l'activité.

	2009	2010	2011	2012	Totaux
Astro Labo	148.0	163.8	183.0	144.0	638.8
Observation	38.5	96.0	81.5	59.4	275.4
Modélisation	8.0	27.0	8.0	5.0	48.0
Ecole	0.0	6.7	15.3	9.0	31.0
Multiple	30.0	25.0	48.0	29.0	132.0
Totaux	224.5	318.5	335.8	246.4	**1125.2**

Tableau II.2.3: Répartition des financements octroyés par grandes thématiques en k€

[1] Nous incluons ici le soutien du programme à ses deux colloques Arles 2010 et Paris 2012.

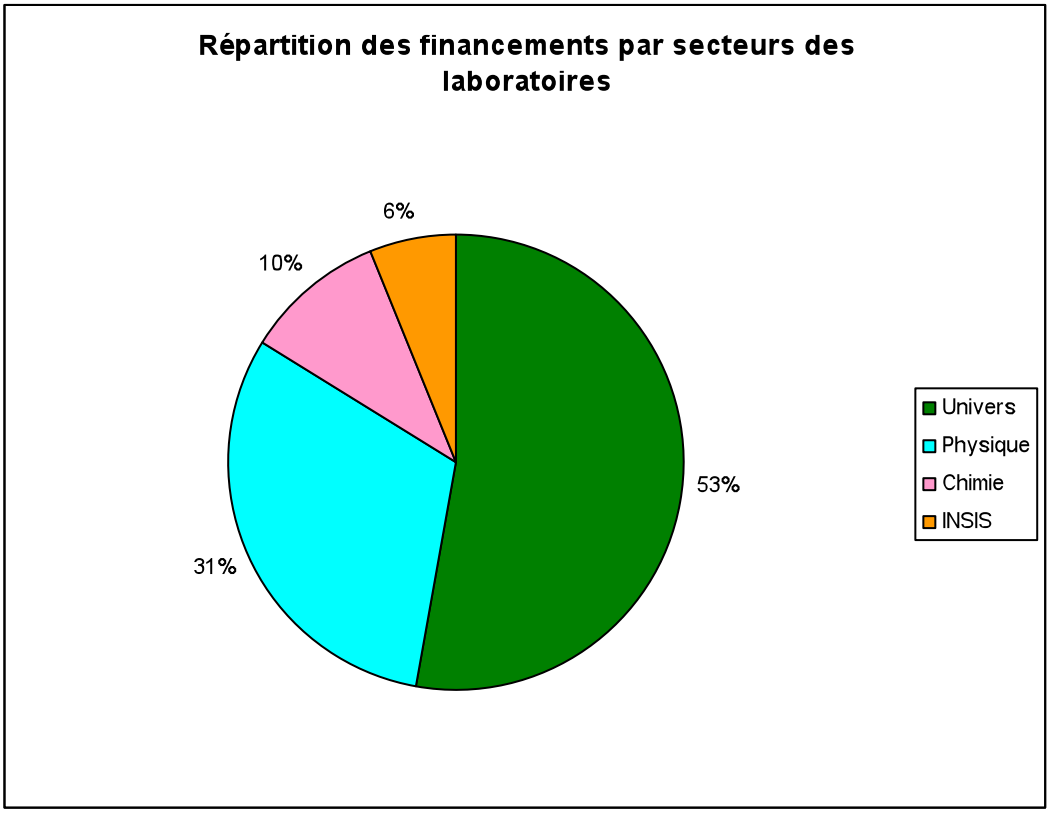


De part le caractère très interdisciplinaire du programme, il est tout aussi intéressant de regarder comment s'effectue la répartition par secteurs disciplinaires. Nous avons choisi ici de présenter ces données en fonction du rattachement (principal) du laboratoire du proposant (INSU, INP, INC ou INSIS)

Le tableau II.2.4 montre cette répartition par année. On y observe que le secteur Univers domine (54%) mais que la physique (30%) et la chimie (11%) ont une place significative et constituent donc des partenaires à part entière dans la réussite des objectifs du programme. La répartition observée s'explique par la nature même du programme et la forte contribution de laboratoires comme l'IRAP à Toulouse, L'IPAG à Grenoble, l'IAS à Orsay et le LERMA à Paris qui à eux quatre représentent environ un tiers des effectifs impliqués dans PCMI (voir Tableau II.1.1). Leur contribution correspond à 29 projets (soit 43% des projets financés) et représente les trois quart du soutien du programme au secteur Univers et environ 40% du budget du programme PCMI.

	2009	2010	2011	2012		Totaux
Univers	100.5	169.8	188.8	135.4		594.5
Physique	69.0	100.2	107.0	74.0		350.2
Chimie	32.0	30.5	27.0	23.0		112.5
INSIS	23.0	18.0	13.0	14.0		68.0
Totaux	224.5	318.5	335.8	246.4		**1125.2**

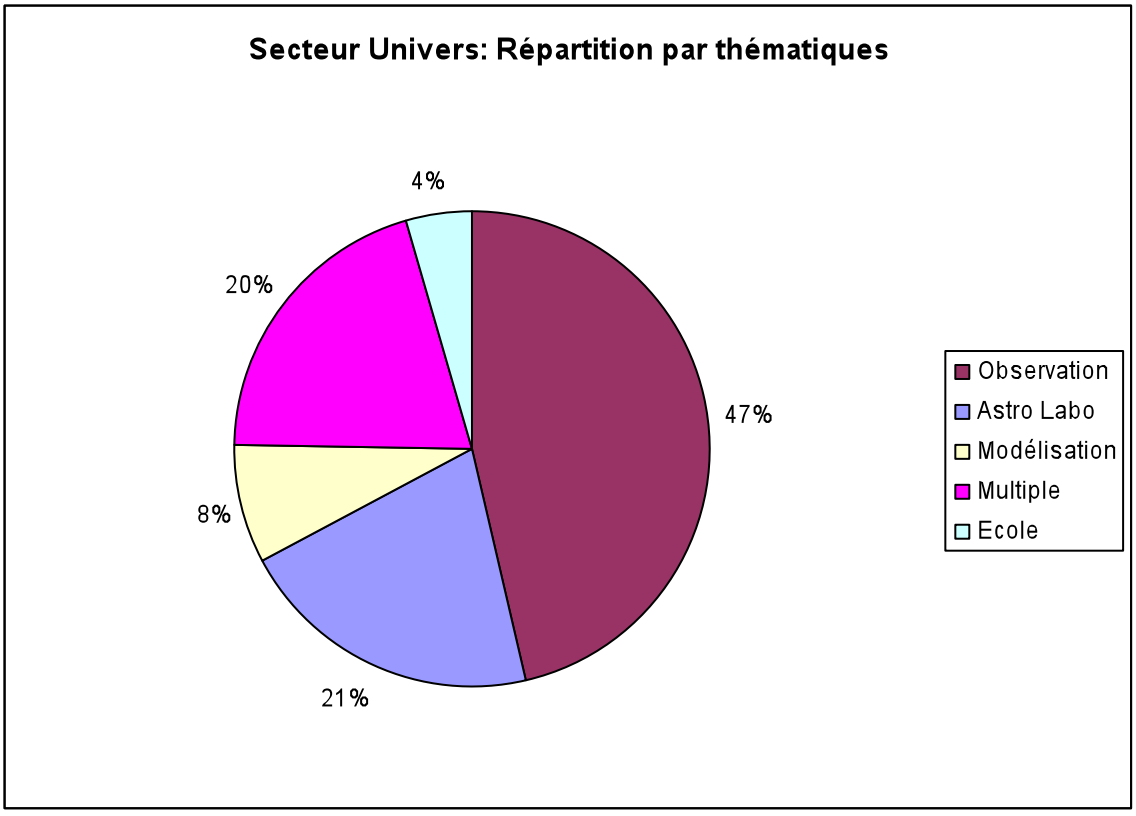
Tableau II.2.4: Répartition des crédits alloués (k€) par secteur disciplinaire des laboratoires



Enfin, il est intéressant de noter que le secteur Univers ne se limite pas à l'*observation* qui ne représente que la moitié environ du soutien en financement. La part de l'*astrophysique de laboratoire* est significative dans ce secteur (21%).

	2009	2010	2011	2012	Totaux
Observation	38.5	96.0	81.5	59.4	275.4
Astro Labo	32.0	20.8	36.0	35.0	123.8
Modélisation	8.0	27.0	8.0	5.0	48.0
Multiple	22.0	22.0	48.0	29.0	121.0
Ecole	0.0	4.0	15.3	7.0	26.3
Totaux	100.5	169.8	188.8	135.4	594.5

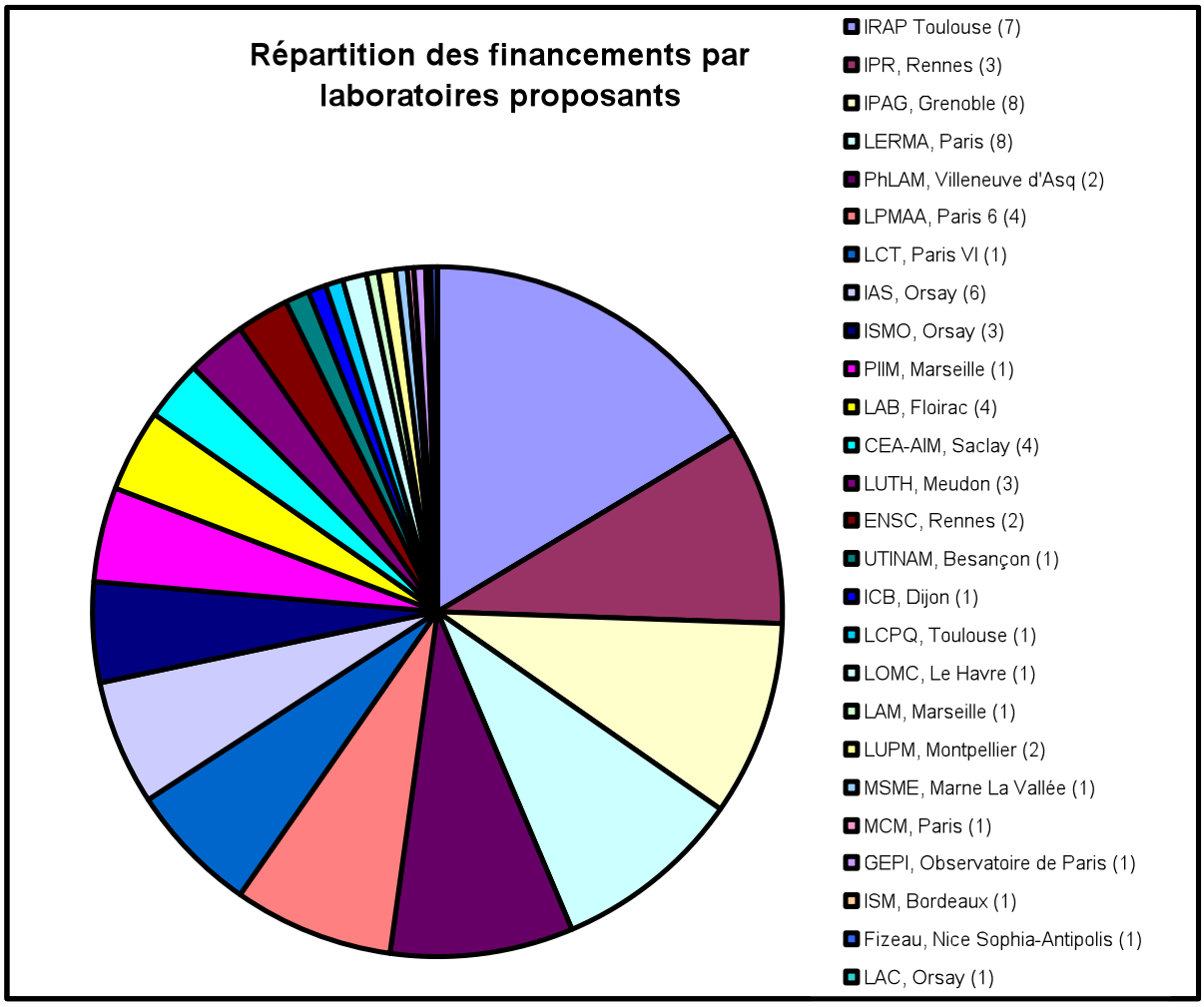
Table II.2.5: Répartition des crédits alloués par grandes thématiques (k€) pour le secteur Univers



Pour terminer, nous présentons la contribution du programme par laboratoire.[2] Le nombre de projets proposés par chaque laboratoire est indiqué entre parenthèses. Outre l'IRAP Toulouse, l'IPAG Grenoble et le LERMA Paris déjà mentionnés pour leur nombre de projets présentés au programme, on notera le financement important octroyé à l'IPR Rennes essentiellement pour la poursuite des développements expérimentaux sur les quatre chambres CRESU dédiées à l'étude de la cinétique chimique ultrafroide en phase gazeuse, et au laboratoire PhLAM de Villeneuve d'Ascq afin d'augmenter progressivement le domaine de fréquences accessibles pour les études de spectroscopie. Ces cinq laboratoires totalisent 52 % du budget du programme et 42 % des projets financés. On notera aussi un fort soutien dévolu au LPMAA Paris en raison de développements expérimentaux récents et

[2] Par ce terme on doit comprendre ici le laboratoire du porteur de projet, étant entendu que certains projets faisaient appels à plusieurs autres laboratoires partenaires.

au LCT Paris. Il s'agit ici d'un projet à trois laboratoires de la fédération SMART (LCT, LADIR, LCPMR) avec des besoins expérimentaux réguliers. Il est d'ailleurs à noter que l'incitation de l'INSU au regroupement des propositions en ensembles cohérents a bien fonctionné et constitue une particularité propre à ce contrat 2009-2012. On citera en exemple le regroupement des théoriciens autour des calculs d'excitation collisionnelle ou de réactivité. Un projet porté par l'IPAG regroupe le LOMC (Le Havre), le MSME (Marne la Vallée), le LERMA (Paris-Meudon) et le LUPM (Montpellier) et concerne quatre instituts nationaux (INSU, INSIS, INC et IN2P3). Un autre projet porté par le LOMC rassemble l'IPAG, l'ICB (Dijon) et le LUPM impliquant les cinq instituts (INSU, INSIS, INP, INC et IN2P3).



La légende du camembert se lit du financement le plus élevé (en haut, IRAP) au financement le plus faible (en bas, LAC). Outre le noyau dur de laboratoires mentionnés précédemment, ce camembert fait aussi apparaître le nombre important de petits financements octroyés par le programme pour des projets ponctuels.

II.3 Aperçu des contrats obtenus par ailleurs par la communauté PCMI

Nous présentons dans le tableau ci-dessous une liste de contrats obtenus ou courants lors de la période 2009-2012 communiqués par les porteurs de projet. Nous ne présentons que les contrats de type ANR et Europe qui ont permis un soutien significatif aux équipes. Ce tableau n'est probablement pas exhaustif mais il montre le dynamisme et la qualité des projets scientifiques portés par la communauté PCMI.

Porteur	Labo	postdoc	thésard	Type	Nom Contrat (années)
Maret, S	IPAG			ANR	CHEMODYN (2012)
Demyk, K	IRAP			ANR	CIMMES (2012-2015)
Jones, A	IAS			ANR	Cold Dust (2008-2012)
Hennebelle, P	LERMA			ANR	COSMIS(2010)
Dartois, E	IAS			ANR	COSMISME (3 ans)
Le Picard, S	IPR			ANR	CRESUSOL (2012-2016)
Commerçon, B	LERMA	1		ANR	FEEBDBACKISM(2011)
Ceccarelli, C	IPAG			ANR	FORCOMS 2009-12
Michaut, X	LPMAA			ANR	GASOSPIN (2009-2013)
Joblin, C	IRAP			ANR	GASPARIM(2010-13)
Faure, A	IPAG			ANR	HYDRIDES (2012)
Pety, J	IRAM			ANR	SCHISM (2010-2014)
Steinacker, J	IPAG	1		ANR	SEED (2012)
André, P	CEA/AIM			ANR	STARFICH (2012-2016)
Lique, F	LOMC			ANR	SUMOSTAI
Madden, S	CEA / IRFU			ANR	SYMPATICO (2011-2015)
Bréchignac, P	LPPM/ISMO			ANR	SYMTEX
Huet, T	PHLAM			ANR	TOPMODEL (2009)
Danger, G	PIIM			ANR	VAHIIA (2013-2015)
Toulouse, J	LCT			ANR	WADEMECOM (07-11)
Wakelam, V	LAB			ANR JC	EMA:INC (2009)
d'Hendecourt, L	IAS			Equipex Andromède	
Hennebelle, P	LERMA			ERC	magmist (5)
André, P	CEA/AIM			ERC	ORISTARS (2012-2017)
Boulanger, F	IAS			ERC	MISTIC (2011-2016)
Hickson, K	ISM			Europe	Reintegration Grant PERG03-GA-2008-230805 (2008-2011)
Dubernet, ML	LPMAA			ASTRONET	CATS
Hennebelle, P	LERMA			ASTRONET	STARFORMAT (2009-2011)
Cassassus, S	LUTH	1		Bourse Marie-Curie	2009-2010
Agundez, M	LUTH	1		Bourse Marie-Curie	2009-2011
Dubernet, ML	LPMAA			Europe infrastrucuture	VAMDC (2009-2012)
Lemaire, JL	LERMA			Europe ITN	LASSIE (2010-2014)
Sims, I	IPR			NSF-CRC	2006-2011

III Prospective: outils, moyens et approches

III.1 Moyens Observationnels: Le paysage sol et espace

III.1.1 Synthèse du paysage sol et espace

Les thèmes scientifiques couverts par PCMI concernent l'étude des processus physiques et chimiques contrôlant l'évolution des objets et environnements astrophysiques contenant de la matière diffuse. Pour comprendre et décrypter ces processus, la plus vaste couverture en longueurs d'onde, en photométrie comme en spectroscopie est nécessaire. En effet, leur grande variété demande de faire appel à des observables situées dans l'ensemble du spectre électromagnétique. La couverture spectrale la plus large des objets astrophysiques est donc souvent nécessaire pour pouvoir dresser un bilan complet des processus en jeu. Il existe cependant des moyens d'observation prioritaires parmi les instruments en opération et les développements attendus dans les années à venir sur lesquels s'appuiera fortement la communauté PCMI. Ces moyens prioritaires ont été classés selon les catégories de projet.

Moyens sol

1/ Grands projets internationaux (coût > 500 M€)

La communauté PCMI est très intéressée par ALMA (spectroscopie du gaz et continuum des grains) et l'E-ELT (notamment pour la spectroscopie dans l'IR du gaz et l'identification des solides par le domaine vibrationnel), deux instruments permettant de sonder l'évolution de la matière solide et la phase gazeuse du milieu interstellaire et leurs interactions.
La communauté PCMI place SKA à un degré de priorité plus bas en raison de la gamme de fréquences couverte dans la première phase du projet qui ne donne accès qu'à un nombre limité de transitions spectrales.
Le classement est le même pour le projet LSST : la communauté PCMI n'est pas motrice même si elle reconnait l'intérêt de ce projet.

2/Projets internationaux de taille moyenne (coût entre 100 et 500 M€)

Dans cette catégorie, la priorité est donnée à l'instrument NOEMA, à la poursuite de l'exploitation du télescope de 30m de l'IRAM, et à la recherche d'une solution pour une participation mineure au projet de télescope submillimétrique CCAT. Ces infrastructures devraient permettre de minimiser l'impact que représente la fermeture des télescopes CSO et JCMT dans les prochaines années, de mener des relevés systématiques, et de donner une meilleure couverture du ciel.
Il faut aussi signaler le fort intérêt pour l'instrument MATISSE sur le VLTI, tant du point de vue du domaine spectral couvert que de la résolution spatiale, ainsi que pour l'instrument ERIS au VLT.
La communauté PCMI est intéressée par les futurs résultats du télescope gamma CTA en continuation des résultats de HESS et HESS2 mais ne participe pas directement au développement de ce projet.
De même la communauté PCMI n'est pas motrice dans la définition des grands relevés sols (e.g. VISTA), qu'il s'agisse de photométrie ou de spectroscopie, même si elle reconnaît l'intérêt que constitueront ces grands ensembles de données pour l'étude de la structure du milieu interstellaire.
Concernant LOFAR, la communauté PCMI suit ce projet en raison de son impact sur la connaissance du champ magnétique mais le nombre d'utilisateurs potentiels est faible pour l'instant.

3/ Par ailleurs, pour des études déterminées, des moyens observationnels d'opportunités s'ouvrent, couvrant des domaines répondant à des questions plus restreintes ou des potentiels à explorer tels que : SITELLE un spectrographe à transformée de Fourier et SPIRou, un spectropolarimètre proche infrarouge sur le CFHT. CanariCAM sur le Gran Telescopio Canarias, un imageur moyen infrarouge (7.5 - 25 micron) avec des capacités spectroscopiques, coronographiques et polarimétriques.

Moyens spatiaux

La communauté PCMI est très intéressée par le JWST qui constituera un gain significatif pour la spectroscopie infrarouge à petite échelle spatiale, et SAFARI/SPICA pour la spectro-imagerie à grand champ pour l'étude du cycle de la poussière dans le MIS.
PCMI est intéressé par les futures missions FIR à plus long terme (*white paper*) : Millimetron, TALC, FIRI.
Dans les moyens à l'interface entre sol et espace, PCMI est intéressé par l'avion SOFIA et les projets ballons PILOT, CIDRE.
Par ailleurs, une partie de la communauté PCMI participera à l'exploitation de GAIA.
PCMI considère d'autres missions, cependant moins prioritaires ou touchant une partie plus restreinte de la communauté PCMI telles que PRISM, FUV ou Euclid

III.1.2 Moyen observationnels en exploitation

Parmi les moyens observationnels en exploitation, et jouant un rôle de première importance pour la communauté PCMI, les instruments couvrants les gammes spectrales allant du proche infrarouge au domaine millimétrique continueront à apporter une moisson de connaissances dans les quatre années à venir.

L'observatoire spatial *Herschel* (***Herschel* Space Observatory, HSO**) a acquis des données jusqu'à fin avril 2013. En support à cette mission, la communauté PCMI a effectué de nombreuses actions de préparation pour enrichir les bases de données de physique fondamentale consacrées à la spectroscopie, les sections efficaces de collision, les constantes de vitesse des réactions, ainsi que pour mettre à disposition des modèles théoriques, et des logiciels d'analyse. Ces actions ont appuyé de nombreux projets d'observations, et conduit à de nombreuses découvertes. Il va sans dire que la grande quantité de données et d'informations recueillies par les instruments à bord de la mission *Herschel* va alimenter des analyses fines de la physico-chimie du milieu interstellaire pendant encore plusieurs années. L'effort sur la caractérisation en laboratoire des spectres des ions et molécules légères doit être maintenu pour être à même de comprendre et exploiter les spectres astrophysiques.

La mission ***Planck***, à vocation cosmologique, a effectué une cartographie sans précédent des avant-plans, de notre Galaxie, et de son contenu en poussière. L'émission de la poussière dans les grandes longueurs d'onde va ainsi pouvoir être mieux caractérisée, ce qui nécessite de la part de notre communauté de s'engager ou de poursuivre des études fondamentales nécessaires à l'analyse des données, via le développement de modèles de physique du solide et la caractérisation en laboratoire d'analogues de grains.

Des retombées significatives sont par ailleurs attendues de l'analyse de l'émission polarisée mesurée avec *Planck*. Ces données permettront tout d'abord de mieux comprendre quelles composantes en poussière contribuent à la polarisation et l'efficacité d'alignement des grains par rapport au champ magnétique dans les différentes phases du MIS. Les mesures de polarisation apporteront également des éléments nouveaux sur les propriétés du champ magnétique, sa géométrie et son intensité à une résolution inégalée. Cela permettra de mieux appréhender dans le futur son rôle dans l'évolution et la structure de la matière.
L'ensemble des cartes en intensité a été rendu public en Avril 2013, les données en polarisation le seront début 2014.

L'Atacama Large millimeter Array (**ALMA**) monte en puissance, avec les premiers cycles d'observations, cycle 0 achevé et cycle 1 en cours, offert pour ce dernier avec 32 antennes de 12m et 9 antennes de 7m. Ce nombre ira bien sûr croissant durant la période de prospective considérée. Les bandes de fréquences accessibles vont également aller vers les hautes fréquences. Les retours scientifiques du cycle 0 sont déjà là.
La compétition internationale forte sur ALMA rend son utilisation difficile, le facteur de pression étant très élevé (8 pour l'Europe), et nécessite une coordination des équipes. Les propositions retenues feront de plus en plus appel aux qualités intrinsèques de cet observatoire en particulier pour la spectroscopie aux hautes fréquences (300 GHz et au delà), l'imagerie à très haute fidélité, la très haute résolution angulaire (qui n'est pas immédiatement accessible), l'imagerie à grande dynamique spatiale, la mesure de la polarisation. Les besoins associés outre la spectroscopie des molécules, leurs isomères et leurs isotopologues, sont la compréhension des phénomènes de polarisation des raies spectrales (facteur de Landé). Le gain en résolution spatiale va permettre de sonder, avec un meilleur contraste différents types de régions et donc révéler différentes familles d'espèces. On peut penser par ex. à toute la diversité chimique dans les enveloppes d'étoiles évoluées entre la photosphère et les couches externes.

Les capacités des instruments de l'**IRAM** ont été l'objet ou sont en cours de renouvellement majeur : récepteur large bande EMIR au 30-m, projet NOEMA au Plateau de Bure, récepteurs multi-faisceaux et caméra bolométrique de nouvelle génération au 30-m. La communauté peut utiliser au mieux ce potentiel renouvelé des instruments de l'IRAM, très complémentaire des potentiels d'ALMA et adapté au suivi post-*Herschel* et *Planck*.
A court terme, EMIR permet l'obtention efficace de relevés spectraux pour un grand nombre d'objets, au lieu des 3 ou 4 sources auparavant étudiées, avec un fort impact sur notre compréhension de la chimie dans des environnements variés. Equipé à plus long terme avec des mosaïques de détecteurs, le télescope de 30m restera un instrument précieux pour PCMI. La grande couverture spectrale combinée à des spectromètres efficaces permet la réalisation d'imagerie multi-spectrale de manière routinière, ce qui ouvre le champ des études exhaustives de caractérisation des propriétés des milieux astrophysiques.
A moyen terme, le projet **NOEMA** est d'un intérêt fondamental pour la communauté PCMI. L'augmentation du nombre d'antennes du Plateau de Bure et l'équipement en détecteurs à très large bande offrira des capacités uniques pour l'étude des composantes les plus froides du MIS (< 10 K), qui ne peuvent être étudiées efficacement que dans le domaine purement millimétrique (< 250 GHz). ALMA ne passera probablement guère plus de 15 % de son temps à observer des fréquences basses à résolution modérée (1-2''), NOEMA offrira la possibilité d'études systématiques simultanées de la distribution spatiale des molécules et de la poussière dans des échantillons significatifs. Par exemple, NOEMA analysera la composition chimique des noyaux de galaxies, qui pourra être étudiée à très haute résolution angulaire au PdB, la chimie des enveloppes circumstellaires, la structure des coeurs pré-stellaires et des enveloppes proto-stellaires, l'évolution chimique dans les premières phases de formation stellaire, et jusqu'à l'étude du MIS dans les galaxies proches. Il faut souligner que la grande bande passante instantanée devrait permettre de réaliser des relevés spectroscopiques rapidement.
Dans sa phase II, le doublement des lignes de base permettra aussi une augmentation de la résolution spatiale.
A long terme, NOEMA pourrait permettre l'utilisation de récepteurs multi-pixels, ce qui (couplé avec le 30-m pour les grandes structures) conduirait à un système plus efficace qu'ALMA pour toutes les

observations à grand champ du MIS. Cet instrument unique serait essentiel pour l'étude de la turbulence et de la structuration du MIS et de leur impact sur la chimie

En plus de ces télescopes clefs, PCMI est aussi utilisateur de télescopes sub-millimétriques (**APEX**, **CSO** et **JCMT**), mais l'accès très limité à ces instruments restreint le type de projets scientifiques possibles. La fermeture de certains télescopes est annoncée dans les prochaines années.
En parallèle, la détection de molécules de plus en plus lourdes ravive l'intérêt du domaine centimétrique. Dans ce domaine, un gain considérable a été apporté par la rénovation du VLA en (J)VLA, accessible à la communauté via la politique « Open Sky » de NRAO. Le GBT est aussi actuellement compétitif en deçà de 100 GHz, pour la spectroscopie dans le domaine centimétrique, ainsi que pour l'étude de l'émission de la poussière à grand champ à 3 mm grâce à la caméra MUSTANG : son avenir est toutefois incertain à moyen terme.
Pour tous ces télescopes, la faible fraction du temps accessible à la communauté PCMI ne permet pas d'envisager des projets de grande ampleur comme pour l'IRAM, mais leur rôle est néanmoins essentiel. L'observatoire stratosphérique SOFIA se place dans le même cadre : son utilisation est envisageable pour des projets scientifiques ponctuels originaux dans l'IR moyen et lointain.

Tant pour ALMA que pour le 30-m et NOEMA, l'exploitation des relevés spectraux complets et spatialement résolus pose de nombreux défis en terme de traitement et d'analyse de données. Le nombre de raies moléculaires détectées a déjà été largement augmenté avec les relevés spectraux effectués par *Herschel* et le 30-m de l'IRAM; on attend un accroissement semblable avec ALMA. Le développement d'outils spécifiques d'interprétation de ces relevés est une priorité (efforts en cours dans la communauté PCMI avec GILDAS, CASSIS, SPECTCOL, …), ainsi que le développement en parallèle des bases de données moléculaires et outils pour y accéder (VAMDC, etc…)

Canaricam est l'instrument IR, sur grantecan, le télescope de 10m aux iles canaries. Il permet l'imagerie à haute résolution angulaire dans l'IR moyen (7.8-24.5 um) à la limite de diffraction du télescope (~0.5"). La spectroscopie long slit est aussi possible (basse résolution pour l'instant R=175 entre 7.4-13.5 μm et 15.7-25.3 μm). La sensibilité est comparable à l'instrument VISIR mais la situation du télescope donne accès à tous les objets de l'hémisphère nord (dont des objets clés comme NGC 7023).

A plus haute énergie, **H.E.S.S.** - The High Energy Stereoscopic Systemis est un système de télescopes à imagerie Cherenkov atmosphérique pour l'étude des rayons gamma entre 100 Giga-électron-volts et quelques tera-électron-volts, récemment étendu à HESS-II équipé d'un miroir de 28 mètres de diamètre, le plus grand télescope gamma jamais construit à ce jour. Ce nouveau géant permet l'abaissement du seuil en énergie à une dizaine de GeV et d'atteindre une meilleure sensibilité. En parallèle, Le **Fermi** Gamma-ray Space Telescope, avec l'instrument principal LAT permet d'observer des rayons gamma de 20 MeV à 300 GeV. Un deuxième instrument, le GBM, est réservé à l'étude des sursauts gamma. Le télescope Fermi a pour objectif l'étude des phénomènes les plus violents observés dans la Galaxie.

III.1.3 Moyens appelés à disparaître

ISAAC puis **NACO**, s'achèvent à la fin de la période 91 d'observation du VLT (2013), privant la communauté de deux instruments sur des télescopes de classe 8m pour l'observation en IR à moyenne résolution spectrale de la phase solide, complémentaire et cruciale pour la comparaison avec le domaine (sub-)millimétrique. Il convient d'assurer un accès à ce type d'instrument.

Le **HST** a un arrêt prévu pour 2018, en lien avec le lancement du JWST.

Les domaines de l'IR lointain et millimétrique semblent donc dans un avenir proche relativement bien couvert pour l'étude des phases denses et diluées du milieu interstellaire. En revanche, l'exploitation scientifique des observations dans le domaine de l'IR vibrationnel, après la mission Spitzer repose essentiellement sur les grands télescopes au sol (ESO/VLT, prospective CFHT) en attendant de nouvelles missions à venir telles que le JWST, pour lesquels la communauté bénéficiera probablement d'un accès plus restreint. PCMI doit poursuivre et développer, avant l'arrivée de MIRI, ses outils

d'étude de l'évolution de la matière et du milieu astrophysique dans lequel elle évolue, pour tirer le meilleur parti de cette mission majeure. Il y a un manque de visibilité à long terme pour l'infrarouge moyen. Ce domaine spectral, qui donne aujourd'hui accès à de nombreuses signatures spectrales, en particulier indispensables pour la caractérisation physico-chimique de la matière solide qui constitue les poussières interstellaires, est essentiel pour la communauté PCMI.

D'autre part, l'absence de projets de télescope observant dans l'UV est également une préoccupation sérieuse compte tenu de la disparition programmée du HST. Un *white paper* à été soumis pour un observatoire européen UV reliant l'optique (EUVO), avec une proposition d'un télescope déployable de 8m segmenté, une imagerie grand champ avec une résolution de 0.01 arcsec, un spectrographe échelle (R=20,000-100,000; 900-2000Å et 2000-4000A), un spectropolarimetre R=100,000, une capacité de spectroscopie intégrale de champ R=500-1000 et spectroscopie longue fente (0.01 arcsec).

La disparition quasi certaine de tous les télescopes sub-mm actuels (CSO, JCMT et APEX) rend essentielle une réflexion sur une participation à CCAT (Cornell CalTech Atacama Telescope), car un grand télescope submillimétrique équipé de caméras grand-champs (bolomètres, mais aussi détecteurs hétérodynes multi-pixels) est un complément nécessaire à l'arrivée d'ALMA dans le paysage. Les contacts sont bien établis avec le projet CCAT mais ne sauraient se concrétiser sans un plan de financement solide.

De même, une réflexion sur l'évolution du domaine centimétrique est indispensable : l'avenir à long terme du GBT n'est pas établi, et si le JVLA offre pour l'instant un progrès majeur, les fréquences supérieures à 5 GHz ne sont pas une priorité de SKA.

III.1.4 Moyens à venir

Moyens Espace

Le Global Astrometric Interferometer for Astrophysics (**GAIA**), avec un lancement en 2013. GAIA va effectuer un recensement de la distance, mouvement et changements de luminosité de milliards d'étoiles. Le retour scientifique prendra de l'ampleur sur la durée (5 ans nominal), du fait de la redondance des observations (les mêmes étoiles étant observées jusqu'à 70 fois durant la mission) nécessaire à l'amélioration de la précision requise par la mission. Le retour scientifique pour la communauté PCMI permettra entre autre d'affiner les corrélations par la mesure indépendante des distances et de l'extinction, permettant par exemple de relier les mesures de colonnes densité de matière aux contenus physico-chimique observés et comparés aux expériences de laboratoire, mais aussi d'étalonner les distances physiques locales réelles pour, par exemple, les disques circumstellaires les plus proches. GAIA permettra d'établir des relations entre les bandes diffuses interstellaires (DIB) observées en absorption dans l'UV-Visible-NIR et l'extinction le long des lignes de visées, apportant de nouvelles contraintes sur la nature des porteurs des DIB et les conditions physiques qui leur sont associées. La précision photométrique atteinte permettra aussi d'étudier la propagation du champ de rayonnement.

PILOT (**P**olarized **I**nstrument for **L**ong wavelength **O**bservation of the **T**enuous interstellar medium*)* est une expérience embarquée en ballon stratosphérique dédiée à la mesure de l'émission polarisée des poussières galactiques dans le submillimétrique : avec 2 bandes photométriques à 240 et 550 microns, une résolution spatiale de 1.5' et 3.5' respectivement. PILOT explorera les propriétés des poussières du milieu diffus avec une grande sensibilité ; l'ensemble du plan galactique ainsi que des champs profonds à haute latitude seront cartographiés en 3 vols. Cet instrument offrira une complémentarité avec *Planck* en longueurs d'onde, résolution angulaire et sensibilité. Le 1er vol de PILOT est programmé mi-2014.

CIDRE (**C**ampagne d'**I**dentification du **D**eutérium par **R**éception h**E**térodyne) est une expérience ballon emportant une caméra hétérodyne opérant dans l'IR lointain (2.4 - 2.8 THz) pour la détection à haute résolution spectrale des transitions fondamentales de raies du gaz telles que HD (112 µm), OH (119µm) … CIDRE devrait permettre de poursuivre les études effectuées par *Herschel*, tout en

permettant la poursuite des développements technologiques sur les systèmes hétérodynes capables d'opérer aux fréquences de quelques THz.

Le *James Webb Space Telescope* (**JWST**), emportera un miroir de 6.5m spatialisé, et une instrumentation couvrant le proche et le moyen infrarouge en spectroscopie et imagerie. Avec un lancement programmé pour 2018, sa préparation scientifique doit être envisagée dès maintenant. Le gain en sensibilité sera de 2 ordres de grandeur par rapport à Spitzer ou n'importe quel grand télescope sol à venir, avec une résolution angulaire limitée dans l'espace par la fonction d'étalement du miroir, 10 fois plus élevée que celles de Spitzer. De plus, sur la gamme de longueurs d'onde 5-28 μm, le spectromètre MIRI donnera accès à des observations spectrales et spatiales simultanées. La résolution spectrale sera de 3000 et la taille des pixels variera de 0.2 à 0.65 arcsec. Ceci constituerait un gain significatif pour la spectroscopie infrarouge à petite échelle spatiale. Dans ce domaine, Spitzer a ouvert des nouveaux champs d'exploration de recherche concernant notamment, la composition et la structure de la matière interstellaire des galaxies dans toute leur diversité, l'étude du cycle de vie de la poussière (formation dans les AGB et SuperNovae, évolution photochimique des très petites particules carbonées dans les PDR, ré-incorporation dans les planètes), les premières phases de formation des étoiles et des disques proto-planétaires, l'évolution des systèmes planétaires ou encore l'atmosphère des exoplanètes.

Le spectro-imageur SpicA FAR-infrared Instrument (**SAFARI**) de la mission Space Infra-Red Telescope for Cosmology and Astrophysics telescope **(SPICA)** de la JAXA. SPICA se profile comme le successeur naturel de *Herschel* avec un télescope spatial de 3.2 m Ritchey-Chrétien mais avec un miroir refroidi permettant un gain notable en sensibilité. Il offrira des opportunités uniques pour l'étude du MIS et des premières étapes de la formation stellaire. Les capacités de l'instrument SAFARI pour la spectro-imagerie à grand champ le rendent essentiel pour l'étude du cycle de la poussière dans le MIS avec la possibilité d'étudier de manière détaillée l'évolution de l'émission spectrale des poussières en lien avec des considérations morphologiques et énergétiques basées sur l'émission dans les raies de N^+, C^+ et O. La mission permettra d'atteindre une sensibilité suffisante pour des études de spectroscopie dans l'IR lointain (FIR) pour des galaxies lointaines mais également pour les régions les plus diffuses de la matière circumstellaire et interstellaire dans notre galaxie qui sont des régions clés pour comprendre l'évolution de la matière et des milieux associés (disques de débris, restes de supernova, couches externes des éjecta stellaires, cirrus à haute latitude galactique,…). Un certain nombre d'études pourront se faire en utilisant également le domaine IR moyen avec l'instrument Mid-infrared Camera and Spectrometer (MCS).
L'accès au domaine IR lointain permettra la caractérisation des variations d'abondance des différentes populations de grains, l'abondance de l'eau sous ses diverses formes (bandes des glaces, raies rotationnelles de la vapeur d'eau) et l'étude du bilan énergétique par les raies principales de refroidissement du gaz, dans des échantillons de sources trop faibles pour *Herschel*. Il devrait permettre également d'avancer dans notre compréhension de la nature de la poussière, par exemple par la recherche de bandes vibrationnelles de pliage à basse fréquence des PAHs.

Dans le cadre de l'appel à missions L2/L3 de l'ESA, un *white paper* a été écrit pour une mission d'observation dans l'IR lointain à haute résolution angulaire.
Le succès des missions *Herschel* et *Planck* illustre l'intérêt de la gamme spectrale de l'IR lointain sur la gamme de 30 à 300 microns environ. Il importe d'améliorer la sensibilité, SPICA étant un premier pas dans cette direction, et la résolution angulaire, limitée au mieux à 10" pour *Herschel* afin de pouvoir combiner ces observations avec les autres domaines spectraux (IR moyen et mm en particulier). Plusieurs concepts sont à l'étude pour atteindre ces objectifs. Une première étape pourrait être un télescope déployable tel que le projet russe **Millimetron** (10m de diamètre dont une région interne de 3.5 m) qui serait équipé de spectromètres hétérodynes dans la gamme de fréquence de 500 GHz à 5THz, permettant éventuellement une opération en mode VLBI avec ALMA. Millimetron pourrait aussi emporter des caméras de bolomètres et/ou un spectromètre large bande à détection directe. Le CEA propose le concept de télescope annulaire **TALC**, qui offre la résolution d'un télescope de 20 m (soit ~1" à 100 μm), au prix d'une surface collectrice réduite à celle d'un télescope de ~ 14m et d'une fonction de réponse spatiale (PSF) complexe.

Enfin, seule l'interférométrie, comme développée dans le projet **FIRI** (**F**ar **I**nfra**R**ed **I**nterferometer), permettrait d'atteindre une résolution angulaire nettement inférieure à la seconde d'arc dans l'IR lointain. Le choix de la mise en œuvre d'une détection directe ou hétérodyne reste ouvert.
Même si les différents concepts instrumentaux doivent être affinés en fonction des objectifs scientifiques prioritaires, c'est une mission que suivra de près notre communauté PCMI car elle ouvre la voie à des avancées importantes dans notre compréhension de la structure et de la dynamique d'un certain nombre d'objets clés tels que les disques protoplanétaires, les premières étapes de la formation stellaire et les processus de feedback. Cette structuration est en lien très étroit avec l'évolution physico-chimique de la matière, le gaz et la poussière, dont l'étude nécessite pour une grande part l'accès au domaine de l'IR lointain.

La mission **PRISM (Polarized Radiation IMaging and Spectroscopy Mission),** dans la continuité de la mission *Planck*, est portée par la communauté cosmologique qui prépare la prochaine mission spatiale pour l'étude du fond diffus cosmologique (CMB) en polarisation dans le cadre de l'appel d'offre de l'ESA pour les missions de classe L. Le projet prévoit, comme *Planck*, un volet important dédié à l'étude des émissions diffuses galactiques guidé par la difficulté à séparer l'émission polarisée du CMB de celle des avant-plans. Dans ce contexte des membres de la communauté PCMI participent à l'élaboration du *white paper*. Équipé d'un plan focal avec un grand nombre de détecteurs large bande permettant d'observer le ciel de 30 GHz à 6 THz, le projet proposé permettrait d'effectuer une relevé complet du ciel de l'émission de la poussière (polarisée ou non) et de certaines raies d'émission telle que CII, CI, CO, NII et H2O avec une résolution angulaire comparable à celle de *Herschel*-SPIRE. PCMI exprime son intérêt pour ce projet qui, en produisant plusieurs relevés complets du ciel sur une très grande gamme de fréquences, permettrait d'obtenir des informations nouvelles sur le bilan énergétique de la matière interstellaire, sur les propriétés de la poussière et sur la structure du champ magnétique à petite échelle.

Parmi les *white paper*, il faut également noter la proposition d'un télescope dans le domaine Visible-UV qui serait un successeur du Hubble Space Telescope (HST) et qui intéresse notre communauté PCMI en particulier pour les études sur H_2 et la courbe d'extinction.

PCMI s'intéresse aussi à l'ouverture progressive de l'astronomie vers les hautes énergies. Les étoiles jeunes rayonnent dans le domaine VUV-X du fait de leur activité d'accrétion. La spectroscopie X permet la caractérisation de la poussière en terme de composition (nature) et d'abondance. L'évolution de la poussière sous rayonnements X intenses, l'influence du rayonnement X sur l'ionisation et la physico-chimie du milieu interstellaire sont autant de thèmes importants pour PCMI. Les rayons X tracent la structure des phases chaudes du milieu interstellaire et les phénomènes aux interfaces avec les phases froides. Ils permettent d'appréhender la physique du gaz dans des conditions extrêmes, par exemple les supernovae, ou l'environnement proche des AGNs.

Moyens Sol

Le **VLTI** (**V**ery **L**arge **T**elescope **I**nterferometer) devrait prochainement s'équiper de l'instrument **MATISSE** (**M**ulti **A**perTure mid-**I**nfrared **S**pectro**S**copic **E**xperiment), qui permettra de couvrir les fenêtres atmosphériques dans l'IR proche et moyen (bandes L, M et N autour de 3.5, 4.5 et 10.5 µm) avec une résolution spatiale pouvant atteindre 10 millisecondes d'arc en bande N. Parmi les objectifs scientifiques rendus accessibles par MATISSE, les plus prometteurs pour PCMI sont la spectroscopie spatialement résolue des régions internes des disques protoplanétaires autour d'étoiles de type T-Tauri, les études des environnements d'étoiles évoluées jusqu'à la phase de nébuleuse planétaire, et des tores de poussière associés aux noyaux actifs de galaxies.

SITELLE (**S**pectromètre **I**mageur à **T**ransformée de Fourier pour l'**E**tude en **L**ong et en **L**arge de raies d'**E**mission) est un instrument prévu pour le CFHT, actuellement en phase B. SITELLE sera un spectro-imageur à transformée de Fourier couvrant la gamme spectrale de 350nm à 950nm dans un champ de vue de 15 minutes d'arc, avec une résolution spectrale allant de R=1 (image panchromatique profonde) à R=10 000 (pour la dynamique du gaz). Ses performances permettront une étude détaillée

du gaz ionisé des régions HII associées aux régions de formation stellaire, étoiles évoluées et restes de supernovae.

SPIROU est un spectro-polarimètre dans l'IR proche (1 à 2.4 microns) proposé comme instrument de nouvelle génération pour le CFHT (première lumière prévue en 2015 (TBC)). Ses principaux objectifs scientifiques sont la détection des planètes telluriques (entre 1 et 10 masses terrestres) autour des étoiles de très faible masse, avec un intérêt particulier pour celles logées dans la zone habitable autour de leurs étoiles hôtes, et la compréhension du rôle du champ magnétique dans les processus de formation stellaire et planétaire. SPIRou devrait notamment permettre d'étudier l'impact du magnétisme sur les phases plus précoces de la formation stellaire ainsi que dans les régions internes des disques d'accrétion.

Relevés sol: avec le développement rapide de grands relevés photométriques et en complément de GAIA, les mesures d'extinction sur de vastes régions du plan galactique et leur inversion pour reconstituer la structure tridimensionnelle de la matière vont être produits de manière systématique, même si l'objectif scientifique initial de ces relevés n'est pas la physique du milieu interstellaire. C'est le cas du relevé PanSTARRS par exemple. On peut s'attendre à de fortes retombées des relevés plus ambitieux en préparation, qu'il s'agisse de LSST (Large Synoptic Survey Telescope), ou de relevés spectroscopiques comme décrits dans le document préparatoire du projet ngCFHT. Le télescope VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy), de 4,1 mètres, est installé à l'observatoire du Cerro Paranal dans le désert d'Atacama, à proximité du Very Large Telescope (VLT) et effectue des relevés photométrique infrarouge (0,85-2,4 µm) couvrant un champ de 0,6 degré carré avec des pixels de 0,34 arcseconde. Six survey sont programmés dans la première phase d'exploitation.

CTA (« Cherenkov Telescope Array ») est le projet européen de grand réseau de télescopes Cherenkov de nouvelle génération en astronomie gamma des très hautes énergies. La génération actuelle des télescopes Cherenkov tels que H.E.S.S. vient d'ouvrir le domaine de l'astronomie gamma au sol dans le domaine d'énergie au-dessus de quelques dizaines de GeV. Le projet suivant, CTA, permettra quant à lui d'explorer en profondeur notre univers en rayons gamma de très hautes énergies et d'étudier pleinement les processus cosmiques non-thermiques en jeu. CTA doit augmenter la sensibilité des détecteurs actuels d'un ordre de magnitude, améliorer les capacités en résolution angulaire et étendre le domaine spectral d'environ 10 GeV jusqu'au delà de 100 TeV.

A moyen terme, **l'E-ELT** (**E**uropean **E**xtremely **L**arge **T**elescope), avec un miroir primaire de 30m de diamètre, devrait marquer le tournant vers les télescopes géants, dans un contexte où d'autres projets sont à l'étude tels que le Giant Magellan Telescope (GMT, Australie, Corée, USA, Chili), le Thirty Meter Telescope (TMT, USA, Canada, Inde, Chine, Japon). Plusieurs laboratoires français font partie des consortia menant les études de R&D et de Phase A pour certains instruments, ainsi que pour le couplage avec les modules intégrés d'optique adaptative. Les phases B des instruments de première lumière sont en cours. Le PCMI est particulièrement sensible à la préparation des cas scientifiques dépendant de l'accès à la physicochimie des milieux avec une résolution spatiale meilleure que le dixième de seconde d'arc. L'E-ELT permettra de sonder les premières unités astronomiques des disques protoplanétaires situés dans les régions de formation stellaire les plus proches. L'E-ELT donnera accès à la chimie des molécules dans les régions internes des disques aux régions d'interfaces où apparaissent dans la phase gazeuse les molécules complexes produites durant des millions d'années dans la phase solide, en particulier les nouvelles molécules organiques issues de la photochimie, de l'interaction avec le rayonnement cosmique ou des réactions de surface impliquant les grains. L'E-ELT permettra notamment d'étudier l'évolution des phases organiques et minéralogiques des grains, observées autour des étoiles jeunes, et le lien avec les jets et vents de ces objets.

III.2 Expériences de Laboratoire: moyens et développements

Une caractéristique importante du programme PCMI est son implication forte dans l'astrophysique de laboratoire avec le développement et l'exploitation de nombreux dispositifs expérimentaux pour l'étude des processus physico-chimiques. Les études théoriques associées font appel à des moyens de calculs qui sont l'objet du chapitre suivant.

Au cours des années, le nombre de dispositifs expérimentaux impliqués dans le programme s'est accru significativement. Alors que le programme s'appuyait sur une dizaine expériences « semi-lourdes » il y a quelques années, les tableaux ci-dessous montrent l'apparition très rapide de nouveaux équipements, en plus de la constante évolution de dispositifs initiés précédemment. Les expériences se sont parfois dédoublées pour être plus polyvalentes et plus sophistiquées que dans la version initiale. On observe aussi une montée en puissance de l'utilisation des grands instruments (sources synchrotron avec le développement de SOLEIL et les accélérateurs d'ions) ainsi qu'une diversification des outils d'analyse et de synthèse des analogues de matière interstellaire.

III.2.1 Etudes en phase gazeuse

Pour ce qui concerne les études en phase gazeuse (tableau 1), on peut noter une évolution importante des équipements de mesure pour **la spectroscopie THz,** stimulée par les besoins dans ce domaine (*Herschel*, ALMA). Le programme PCMI a pu accompagner ces dernières années le développement de nouveaux détecteurs au PhLAM. Le remplacement des tubes carcinotrons par des sources solides associées à des chaînes de multiplication de fréquence a permis d'augmenter la fréquence haute du spectromètre de 0.7 à 1.5 THz. Les développements instrumentaux futurs permettront à plus long terme de **couvrir la gamme 1.5-1.9 THz**.

D'autre part, le programme contribue au développement de plusieurs cellules multi-passage (cf tableaux 1 et 3) dédiées à la **spectroscopie d'absorption à haute résolution dans l'IR lointain de radicaux et petits cations moléculaires, produits par décharge**. L'utilisation de cellules à grand trajet d'absorption ouvre aussi la voie à l'étude de la structure rotationnelle des modes IR et IR lointain de molécules lourdes comme des dérivés du naphtalène et des molécules polycycliques aromatiques hydrogénées (PAH) à 3 ou 4 cycles. L'utilisation du continuum IR lointain par émission synchrotron extrait par la ligne AILES est fondamentale pour ces thématiques car sa brillance permet d'obtenir des spectres avec un S/B rendant possible la détection d'espèces réactives ou condensables. Néanmoins, pour les fréquences inférieures à 30 cm^{-1} (1THz), l'obtention des spectres reste difficile. Récemment, le groupe de P. Roy (ligne AILES du synchrotron SOLEIL) a réussi à trouver des conditions de stockage des paquets d'électrons qui produisent une émission très intense (10^5 fois plus intense que l'émission synchrotron « classique ») et très stable, parfaitement adaptée à la spectroscopie à haute résolution par TF dans la gamme 200 GHz – 1THz. Il devient ainsi possible d'exploiter cette nouvelle source pour enregistrer des spectres à haute résolution des radicaux et ions produits dans des cellules à décharge.

Les études de réactivité chimique en phase gazeuse d'intérêt pour le milieu interstellaire ont considérablement progressé depuis 20 ans en particulier par le développement et l'utilisation de la **méthode CRESU** (conçue à Meudon et améliorée à Rennes) dans plusieurs laboratoires (France, Etats-Unis, Angleterre, Allemagne, Espagne). Les performances actuelles de ces écoulements supersoniques sont parfaitement adaptées aux conditions des nuages froids (jusqu'à 7K) et permettent de faire des études de cinétique chimique en fonction de la température (6K-470K). Il demeure cependant un grand nombre de besoins dans ce domaine et les développements récents effectués sur les appareillages rennais (IPR) et bordelais (ISM) élargissent désormais le champ vers des sujets qui restaient jusqu'à présent inaccessibles. Ainsi, la mise au point à Bordeaux d'une source de radicaux atomiques a permis les premières études sur la réactivité de l'atome d'azote. Des méthodes d'analyse originales ont ouvert la voie aux premières études de réactions radical-radical de façon relative. Ces réactions sont depuis longtemps supposées jouer un rôle très important dans les nuages moléculaires denses du MIS. Outre la poursuite des études de la chimie de l'azote (molécules azotées avec CH, C_2 et

C_2H), les travaux s'orienteront également vers la réactivité de l'oxygène atomique avec des espèces radicalaires (CN, CH, C_2H, OH, C_2N) à basse température. D'autre part, le développement de la **seconde génération d'écoulements CRESU à gaz pulsé** permet désormais l'implantation d'une expérience sur la ligne de lumière DESIRS de SOLEIL associant le rayonnement VUV accordable à un jet supersonique uniforme dont la température pourra descendre jusqu'à 20 K (projet CRESUSOL, ANR blanc IPR/SOLEIL). Il s'agira ici d'étudier les rapports de branchement de réactions radical – neutre afin d'identifier, par spectrométrie de masse à l'aide du rayonnement synchrotron, les produits de réaction et de quantifier les différentes voies de sortie. Enfin, d'autres perspectives concernent **les études de collisions inélastiques**. Dans ce domaine, l'essentiel des données proviennent des calculs théoriques. L'obtention de données expérimentales est donc d'autant plus cruciale pour tester les méthodes théoriques. On peut citer en exemple l'étude théorique et expérimentale en cours des systèmes, CH-He/H_2 et OH-He/H_2 afin de répondre à l'analyse des observations *Herschel* (ANR HYDRIDES, IPAG).

Table III.2.1: Instruments dédiés aux études en phase gazeuse

INSTRUMENT	LABORATOIRE PROPOSANT	THEMATIQUE	Secteur
ICARE Faisceau moléculaire & spectromètre de masse à temps de vol	ISMO, Orsay P. Bréchignac/ T Pino	Spectroscopie électroniques des PAHs neutres et ionisés, et de leurs agrégats	Physique
NANOGRAINS Réacteur à combustion FIREFLY Spectromètre IR	ISMO, Orsay P. Bréchignac/ T. Pino	Synthèse et spectroscopie de PAH et de nanograins interstellaires. Emission infrarouge de PAHs en phase gazeuse	Physique
PIRENEA Piège à Ions refroidi	IRAP, Toulouse C. Joblin	Propriétés spectros-copiques et physico-chimiques des PAH	Univers
CRESU Cinétique de Réaction en écoulement Supersonique Uniforme FALP-MS Jets subsoniques uniformes sur un montage de post-décharge en écoulement	IPR, Rennes A. Canosa/ S. Le Picard	Réactivité à basses températures	Physique
Mini-CRESU	ISM, Bordeaux K. Hickson	Réactivité à basses températures	Chimie
Spectromètres millimétrique-submillimétrique	PhLAM, Villeneuve d'Ascq L. Margules	Spectroscopie micro-onde du millimétrique au sub-millimétrique	Physique
Spectroscopie THz et IR de radicaux et ions moléculaires produits par décharge Couplage avec SOLEIL (AILES)	ISMO/SOLEIL O. Pirali IPR, Rennes A. Bénidar	Spectroscopie d'espèces instables	Physique

L'utilisation d'**anneaux de stockage** permet d'étudier les collisions à basse énergie en phase gazeuse pour des espèces chargées (par exemple les résultats obtenus avec CRYRING à Stockholm). De tels dispositifs ne sont pas disponibles en France, même s'il existe un projet d'anneaux cryogéniques à Caen (COSMOS). Des anneaux cryogéniques sont en cours de développement en Europe (DESIREE à Stockholm, CSR à Heidelberg).

L'étude des **propriétés physico-chimiques et spectroscopiques des grandes molécules carbonées de type PAH** est aussi une activité forte de la communauté PCMI. Les travaux actuels s'inscrivent dans le

projet GASPARIM (ANR blanc, IRAP/LCPQ/ISMO) et mettent en jeu également des mesures sur la ligne DESIRS à SOLEIL. Les grandes questions, qui sont plus que jamais d'actualité, concernent l'identification des PAH interstellaires, leur formation et le lien avec les très petits grains carbonés. Pour aborder ces questions, il faut mener de front des études spectroscopiques multi-longueurs d'onde, des études de réactivité et de photodissociation, et des simulations de l'évolution des matériaux carbonés solides (voir partie III.2.2). Un développement important sur les PAH va concerner la mesure de leur spectre d'émission IR stimulée par des photons UV afin de simuler les spectres interstellaires, ce qui n'a jamais été réalisé.

III.2.2 Etudes en phase solide

Les études en phase solide ont deux grands objectifs. D'une part, mieux cerner la nature et l'évolution des grains dans les milieux astrophysiques et d'évaluer, d'autre part, leur rôle dans les réactions chimiques. Une partie de ces activités consiste en la **synthèse d'analogues de grains,** l'étude de leurs **propriétés spectroscopiques,** et leur **évolution sous l'effet de rayonnement UV/X ou de rayons cosmiques.** Une seconde partie concerne la **chimie hétérogène sur les grains**, en particulier celle associée à la **formation** et l'**évolution chimique des manteaux de glaces**. Ceci implique l'étude de mécanismes élémentaires en phase solide (adsorption, diffusion, réactivité), le couplage avec la phase gazeuse et la connaissance des états excités des molécules produites (mécanismes de désorption thermique /non-thermiques, rapports *ortho/para*).

L'analyse des données d'observation sur la matière solide interstellaire nécessite, pour une interprétation correcte, d'étudier les propriétés d'analogues en laboratoire au plus près des conditions physiques des environnements astrophysiques. Avec les nouvelles données *Planck*, *Herschel* et ALMA, l'étude des propriétés spectroscopiques dans le domaine du (sub)millimétrique prend une place de plus en plus importante. C'est l'objectif du dispositif expérimental ESPOIRS (IRAP), complétée par des mesures sur la ligne AILES de SOLEIL pour accéder aux longueurs d'onde les plus extrêmes (ANR CIMMES). Dans les années à venir, ces mesures qui jusque là concernaient les matériaux à base de silice, devraient s'étendre à l'étude des matériaux carbonés.

Un effort particulier de la communauté PCMI concerne la synthèse, l'évolution et la caractérisation d'analogues de la poussière interstellaire. Différentes voies de synthèse sont utilisées. Certaines visent à produire des échantillons prototype de manière contrôlée, comme les synthèses par voie chimique sol-gel (UMET, LPCNO). D'autres approches cherchent à simuler les conditions de **formation de ces matériaux dans les environnements cosmiques** (IAS, ISMO, PIIM), à comparer ensuite les résultats expérimentaux avec ceux obtenus par les télescopes et/ou avec des matériaux primitifs, météorites micrométéorites, matériaux cométaires. On peut citer en particulier la synthèse d'analogues de matière carbonée des milieux interstellaires ou circumstellaires, par irradiation UV à basse température de glaces moléculaires, par méthodes plasma ou combustion au moyen de flammes (Nanograins, SICAL, Projet COSMISME ANR Blanc IAS/CSNSM/ISMO/IPAG). La caractérisation de ces matériaux s'effectue au moyen de nombreuses techniques disponibles au laboratoire, spectroscopie FTIR et micro-FTIR, Raman, microscopie électronique à transmission haute résolution, microscopie électronique à balayage et analyse dispersive en énergie. L'analyse de la phase moléculaire s'effectue par spectrométrie de masse et par chromatographie.

La **réactivité chimique hétérogène** simulée au laboratoire par **bombardement de sources atomiques** (FORMOLISM, LERMA) **sur des surfaces froides** connaît un nouveau développement avec une nouvelle expérience (VENUS, LERMA) optimisée pour l'utilisation d'atomes H, O, N et C, et ouvre le champ d'investigation pour l'étude des **voies de formation de molécules de première génération, pour des voies jusqu'ici inexplorées sans apport d'énergie extérieure**. Des questions relatives aux anomalies de rapports *ortho-para* dans le milieu interstellaire restent ouvertes. Les instruments originaux développés pour la préparation et la rééquilibration des états de spin nucléaire à l'interface solide-gaz à très basses températures sont en forte progression (CoSpiNu, LPMAA) et devraient apporter de nouvelles données fondamentales sur ces questions difficiles.

Parallèlement, les études de l'évolution thermique et photochimique des constituants primitifs des glaces interstellaires sur les dispositifs RING (PIIM) ou ReMaCry (LADIR) contribuent à la connaissance des **voies de formation de molécules organiques complexes**. Là aussi, une nouvelle expérience AHIAA (PIIM), en cours d'élaboration, sera dédiée à l'analyse des composés volatils issus du réchauffement des glaces primitives (ANR VAHIIA). Ce dispositif permettra d'identifier les traceurs associés aux mécanismes de complexification, contraints au laboratoire, pouvant être détectés dans des environnements d'étoiles jeunes (cœurs chauds) et cométaires.

L'évolution de la matière solide interstellaire est le fruit de différents processus énergétiques qui interviennent dans les régions de formation d'étoiles. Le **bombardement de photons** généralement simulé en laboratoire par des lampes à décharge ou par des lasers VUV utilisés sur nombres d'équipements modifie la composition chimique de la phase solide et tend à augmenter la diversité moléculaire. Le rayonnement synchrotron (Ligne DESIRS, SOLEIL) est désormais utilisé car il offre l'intérêt d'une grande accordabilité, permettant par exemple les premières études de photodésorption de glaces à différentes énergies (SPICES, LPMAA) ou des approches sélectives en polarisation parfaitement contrôlée, telle qu'une photochimie/photophysique asymétrique donnant lieu à des excès énantiomériques sur des espèces chirales telles que des acides aminés (Chiral-MICMOC, IAS). Les **effets du rayonnement VUV sur la matière carbonée** sont également étudiés avec le **rayonnement synchrotron**, depuis la photostabilité de grandes molécules carbonées jusqu'aux transformations de solides carbonés (modification, rupture, restructuration). Ces approches sélectives seront poursuivies, car elles fournissent des informations uniques et originales sur les effets du rayonnement VUV en ambiance interstellaire.

Le rayonnement cosmique qui se combine aux effets thermiques et photochimiques peut-être simulé en laboratoire grâce à de grands accélérateurs tels que le Tandem-IPNO, CSNSM (Orsay) et le GANIL (Caen) qui couvrent des gammes de dépôts d'énergie électronique comparables ou extrapolables au rayonnement cosmique (cf paragraphe C). L'effet de l'irradiation ionique simulée sur la **structure des manteaux de glace**, comme la porosité, peut être exploré et il est possible de contraindre la surface effective accessible aux réactions de surface. Ces études, qui intègrent les effets chimiques interstellaires attendus de l'implantation UV et ionique à basse et haute énergie (keV-GeV), permettent en plus de contraindre les modèles de transfert de rayonnement et seront directement utiles à la communauté astrophysique.

Les effets du **rayonnement X s**ont importants pour les AGN et les étoiles jeunes émettrices de rayons X et méritent certainement d'être explorés à SOLEIL ou à l'ESRF. L'ESRF permet d'étendre l'éventail des outils d'analyse chimique de nanoparticules analogues ou d'échantillons météoritiques, donnant non seulement accès à l'identification chimique, mais également à la structure ou encore à la distribution en taille des nanoparticules (technique de diffusion X). D'autres champs d'investigation pourront aussi être explorés suite aux travaux originaux concernant la photochimie induite par le rayonnement X.

Table III.2.2: Instruments dédiés aux études en phase solide

INSTRUMENT	Sources Externes	LABORATOIRE	THEMATIQUE	Secteur
SICAL SICAL-P, SICAL-X	Tandem d'Orsay	IAS, Orsay E. Dartois	Simulation en laboratoire de la phase solide du MIS et de la nébuleuse protosolaire	Univers
MICMOC Chiral-MICMOC HPCL	SOLEIL	IAS, Orsay L . D'Hendecourt, D. Baklouti	Production de matière organique par photochimie en (asymétrique) phase solide (glaces). Analyse de résidus organiques.	Univers
ESPOIRS		IRAP, Toulouse K. Demyk/ C. Meny	Propriétés optiques d'analogues de grains dans le domaine infrarouge moyen au submillimétrique	Univers
RING AHIIA		PIIM, Marseille Th. Chiavassa	Réactivité thermique et photochimique des grains et glaces interstellaires	INSIS
ReMaCry		LADIR, UPMC L. Krim	Réactivité en matrices cryogéniques	Chimie
CoSpiNu Conversion du Spin nucléaire		LPMAA, Paris X. Michaut	Rapports ortho-para dans les molécules hydrogénées	Physique
SPICES	SOLEIL CLUPS	LPMAA, Paris J.-H. Fillion	Photodesorption d'analogues de glaces interstellaires	Physique
FORMOLISM VENUS		LERMA, Paris	Réactivité hétérogène à basse température	Univers

III.2.3 Utilisation d'instruments ouverts à la communauté

Nombre d'études développées en laboratoire s'appuient de plus en plus sur des grands instruments. Par exemple, presque 35% des projets soumis sur la ligne de lumière DESIRS (SOLEIL) sont liés à l'astrophysique, l'astrochimie ou l'astrobiologie.

Dans le domaine VUV (5-40 eV), la ligne de lumière DESIRS à SOLEIL offre de multiples possibilités de par sa pureté spectrale, le haut flux et tout type de polarisation. En plus de la possibilité de connecter des expériences externes, plusieurs instruments sont utilisés par la communauté (cf. Table III.2.3). On peut mentionner ici l'enceinte à jet moléculaire SAPHIRS à demeure, équipée de son spectromètre d'imagerie de photo-ions et photoélectrons en coïncidence DELICIOUS 3, utilisé par exemple, pour l'étude des propriétés électroniques et de photodissociation de PAHs, de molécules prébiotiques et radicaux carbonés, l'expérience CERISES pour l'étude des réactions ions-molécules et enfin le spectromètre révolutionnaire à transformée de Fourier (FTS) dédié à la spectroscopie d'absorption ultra-haute résolution.

Les instruments sont couplés à des méthodes de production de molécules intéressantes pour le milieu interstellaire : grosses molécules vaporisées ou thermodésorbées à partir d'un aérosol précurseur, jets moléculaires, utilisation de cathodes creuses ou de techniques de pyrolyse pour la production de radicaux, espèces transitoires, petits ions moléculaires. Plusieurs cellules multi-passages couplées à des techniques de production spécifiques sont également disponibles ou en cours de développement pour la spectroscopie d'absorption dans le domaine IR et IR lointain (ligne AILES). Des perspectives importantes pour l'étude de structures rotationnelles de petits PAH se sont ainsi ouvertes. Citons également la ligne DISCO (UV-VUV), pouvant servir à caractériser les constantes optiques d'analogues de poussière interstellaire et à fournir des données pour la modélisation du transfert de

rayonnement, ainsi que la ligne SMIS (1-100 μm) dédiée à la spectro-imagerie à l'échelle micronique de composés solides (météoritiques notamment).

Les accélérateurs de particules (GANIL et Tandem d'Orsay) font aussi partie des grands instruments maintenant largement utilisés par la communauté et permettant de couvrir l'ensemble des conditions d'irradiation pour de nombreux types de matériaux interstellaires, (glaces, suies, matériaux carbonés divers). Les collisions atomiques à haute vitesse (AGAT sur le Tandem d'Orsay et COLIMACON au GANIL) permettent également d'étudier la stabilité de molécules interstellaires en phase gazeuse (chaînes carbonées ou agrégats de PAH). Les techniques de cinématique inverse et de spectrométrie de masse en multicoïncidence conduisent à une bonne connaissance des processus d'ionisation et de fragmentation en lien avec le problème des phases de croissance et de destruction des noyaux de condensation des poussières interstellaires. Les résultats les plus récents permettent d'envisager pour la première fois l'étude des anions en vue de fournir des données fondamentales pour les modèles astrophysique (base de données KIDA).

Table III.2.3: Dispositifs attachés à des grands instruments

INSTRUMENT	Grand Instrument	LABORATOIRE	THEMATIQUE	Secteur
AGAT	Accélérateur Tandem d'Orsay	IPN, Orsay	Fragmentation de petits hydrocarbures.	IN2P3
	AILES	SOLEIL, ISMO	Spectroscopie haute résolution Radicaux et molécules instables. Ions	INP
SAPHIRS chambre d'ionisation DELICIOUS 3 spectromètre en double imagerie de coïncidence électron/ion CERISES, expérience Ions-molécules	DESIRS	SOLEIL LCP	Propriétés photophysiques de molécules complexes, chaines carbonées et PAH Réactivité d'ions sélectionnés en énergie	INP
FTS – Spectromètre par transformée de Fourrier Jet moléculaire et cellules refroidies (80 K, 20 K) et à haute température (1000 K)	DESIRS	SOLEIL	Spectroscopie d'absorption VUV haute résolution	INP
COLIMACON source d'agrégats, de molécule spectromètre de masse par temps de vol à coïncidence ion/ion	GANIL, Caen	CIMAP	Ionisation, fragmentation, et réactivité d'agrégats en phase gazeuse induite par impact d'ions	INP

III.3 Simulations Numériques: moyens et challenges

III.3.1 Moyens de calcul

La communauté PCMI bénéficie d'une infrastructure importante pour le calcul intensif. Cette infrastructure s'organise à trois échelles avec des moyens européens et nationaux (10^5 et à venir 10^6 cœurs), des mésocentres (10^4 cœurs) et des grappes de serveurs locaux (~10^3 cœurs). Les moyens les plus utilisés par la communauté PCMI sont les mésocentres et les moyens nationaux. Ces derniers sont organisés autour du GENCI (Grand Equipement National pour le Calcul Intensif) qui leur assure un financement pérenne et de très bon niveau tant en équipement, logiciel et assistance technique. Vers le haut, ce dispositif est complété à l'échelle européenne par le projet PRACE (*Partnership for Advanced Computing in Europe http://www.prace-ri.eu*) qui vise à équiper l'Europe en moyens de calcul de premier plan mondial. A ce schéma pyramidal viennent s'ajouter les grilles qui en l'état actuel concernent une faible portion de la communauté PCMI

Les mésocentres, font souvent office de centres de calculs «régionaux» ou universitaires. Les méso-centres, permettent des calculs parallèles (sur architecture à mémoire partagée et/ou distribuée). Ce type d'infrastructures permet des traitements numériques de taille importante tout en échappant à la planification que requiert le calcul sur centre national ou international. Ces mésocentres sont également des lieux d'apprentissage et d'accès au calcul parallèle lourd. La liste des mésocentres en France est disponible sur le site suivant : http://calcul.math.cnrs.fr

GENCI est une société civile ayant pour mission de financer les équipements des centres de calculs nationaux (l'IDRIS pour le CNRS, le CINES pour les universités et le CCRT pour le CEA). Ces centres sont équipés de calculateurs de la classe des 100 Tflops voir du Ptflops pour la machine Curie du CCRT. La majorité des applications utilisées exploitent un parallélisme en mémoire partagée et distribuée. Ce type de centres permet également l'accès à des applications (logiciels de chimie payants) ou à du matériel (GPU, FPGA, Cell) dont le coût ou l'originalité ne peut être assumé par des laboratoires ou même des mésocentres. Ils proposent aussi un accueil scientifique pour aider à l'adaptation aux calculateurs hautement parallèles des centres, de codes développés dans des laboratoires. L'utilisation des ressources importantes (10^4-10^5 cœurs) disponibles dans les centres est conditionnée à l'attribution d'heures de calcul après l'examen d'un projet par un comité d'expert.

L'infrastructure PRACE met à disposition de la communauté scientifique française des ordinateurs parmi les plus puissants du monde de la classe des Ptflops. Tout comme pour les centres de calcul nationaux, l'utilisation des ressources de PRACE est conditionnée à une évaluation par un comité d'expertise.

La communauté PCMI est très utilisatrice des grands centres de calcul nationaux (à hauteur de plusieurs centaines de milliers d'heures monoprocesseur par an) et peut disposer des ressources de l'infrastructure PRACE pour des simulations de taille exceptionnelle. Ces moyens lui permettront de rester mondialement compétitive et de relever les défis numériques posés par exemple par les **simulations magnétohydrodynamiques 3D couplées à la chimie** pour l'étude de l'effondrement des nuages moléculaires ou les **calculs de chimie théorique** pour les calculs d'hypersurfaces d'énergie potentielle, de taux de collisions d'états à états, de la formation des molécules complexes (voire briques du vivant) sur/dans les glaces ou les poussières du milieu inter et circumstellaire, et de la spectroscopie IR haute résolution de molécules complexes en vue de l'exploitation des données d'observation d' ALMA.

III.3.2 Méthodes théoriques pour l'étude de la dynamique, de la réactivité et de la spectroscopie de systèmes moléculaires

Dans le cas des petits édifices moléculaires, les simulations de chimie quantique s'avèrent les plus performantes et les plus complètes avec la possibilité de calculer les surfaces de potentiels de l'état fondamental avec une grande précision (méthodes de type *Coupled Cluster*…). Des progrès restent à réaliser pour la description des états électroniques excités. Leur calcul précis, même avec les progrès des approches de type *Interaction de Configurations* (MRCI) ou *Perturbation* (CASPT2) reste plus

difficile en raison de la multi-dimensionnalité des surfaces de potentiel à considérer au-delà des très petites molécules (tétra-atomiques). Mentionnons les difficultés supplémentaires posées par les systèmes radicalaires ou fortement insaturés, pour lesquels les structures électroniques sont difficiles à représenter comme par exemple la structure électronique dégénérée des chaines carbonées détectées dans les nuages moléculaires.

Pour aborder la complexité des grands édifices moléculaires, la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT) s'est imposée, même si des progrès doivent être réalisés sur les fonctionnelles à utiliser afin de prendre en compte à même niveau de précision les interactions fortes et faibles (dispersion en particulier) qui font la cohésion de ces édifices. Pour les édifices moléculaires d'encore de plus grande taille sans périodicité spécifique, l'utilisation des champs de forces offre une alternative efficace même si ceux-ci doivent encore être améliorés: potentiels polarisables performants pour la description des glaces, potentiels réactifs du type REAX ou AIREBO... Ce type d'approche permettrait entre autres de comprendre la dynamique de nucléation et de croissance de ces édifices. En effet, dans ce cas, les approches multi-échelles temporelles sont nécessaires pour coupler la dynamique moléculaire au temps court (<nanoseconde) et des approches statistico-dynamiques basées sur l'algorithme Monte Carlo cinétique pour les temps longs.

Afin de sonder les processus inélastiques en jeu dans les milieux astrophysiques, l'application des méthodes de la dynamique quantique reste restreinte à une dimensionnalité de l'ordre de la dizaine d'atomes. Pour les processus réactifs non adiabatiques sur des systèmes contenant quelques atomes (jusqu'à la dizaine), des méthodes comme MCTDH semblent prometteuses. Au-delà, il faut recourir soit à des études en dimensionnalité réduite, soit à des méthodes semi-classiques, extensibles à des systèmes plus grands. Soulignons également l'intérêt des méthodes de dynamique moléculaire mixte, permettant de traiter de façon quantique certains degrés de liberté et d'autres classiquement, ainsi que les méthodes de dynamique moléculaire dites « à la volée», qui calculent les surfaces et les forces au cours de la dynamique.

La modélisation de l'interaction gaz-solide pose un problème complexe aux théoriciens en raison des aspects nombreux qui doivent être considères: aspects géométriques et électroniques du grain, rôle de la relaxation de surface sur l'adsorption, diffusion et réactivité sur / dans le grain etc. Une compréhension de l'ensemble de ces processus nécessite la combinaison d'approches théoriques de niveau de sophistication différent pour un compromis entre taille de la simulation numérique et description correcte de la propriété physique recherchée. Parmi ces approches citons les approches de type périodique de la physique pour déterminer la géométrie et la structure électronique du grain, les approches de dynamique moléculaire classique pour étudier la relaxation des surfaces ou la diffusion des molécules sur ou dans le grain, les approches de dynamique moléculaire Born Oppenheimer pour l'étude de la réactivité des molécules sur / dans le grain ainsi que de leur désorption et pour terminer les calculs *ab initio* de dimensionnalité réduite, ou seuls les degrés de libertés identifiés par la dynamique Born Oppenheimer comme étant importants pour le processus étudié sont considérés pour la construction de l'hypersurface de potentiel qui servira au calcul du taux de réaction (catalysé) au niveau quantique ou semi classique, seul moyen d'obtenir un taux de réaction fiable.

Les méthodes de la chimie quantique *ab initio* et de la spectroscopie moléculaire théorique permettent aujourd'hui de calculer des spectres de vibrations *anharmoniques*, ce qui est important pour une exploitation astrophysique. Ces méthodes reposent sur la détermination d'une surface de potentiel au moyen des méthodes de la chimie quantique puis sur l'utilisation de cette surface pour construire un Hamiltonien approprié et pour calculer les états propres à partir d'un algorithme adapté, états propres qui servent ensuite à reproduire le spectre synthétique. De même que pour les études de réactivité, les difficultés se posent lorsque l'on s'intéresse à des molécules de grande taille (au-delà de 4 atomes) et ce même pour le calcul des fréquences vibrationnelles fondamentales en raison de nouveau de la multi dimensionnalité des surfaces de potentiel à considérer. Les développements théoriques actuellement entrepris autour des méthodes dites de couplage anharmonique en dimension réduite, ou l'on ne calcule à un haut niveau de théorie que les couplages anharmoniques les plus importants pour la spectroscopie de la molécule étudiée, se révèlent très performants pour décrire l'anharmonicité de systèmes moléculaires à 40 modes normaux de vibrations. Ces développements ont par ailleurs mis en

évidence la possibilité de calculer les spectres anharmoniques de systèmes de grande taille à partir de « points » de la surface de potentiel *ab inito*. Ceci ouvre des perspectives nouvelles sur la spectroscopie vibrationnelle théorique à haute dimensionnalité car elle permettrait désormais d'envisager de traiter des systèmes tels que les PAH pour lesquels les spectres théoriques sont très souvent limités à une description harmonique et de calculer avec précision les fréquences des modes de larges amplitudes, connus pour être très anharmoniques.

III.3.3 Méthodes pour la dynamique et la structure de systèmes à grande échelle

Il est important de caractériser les signatures du couplage entre la dynamique du milieu interstellaire et sa chimie si l'on veut pouvoir contraindre la dynamique des gaz et calculer de manière théorique des observables directement comparables aux observations. Trois approches parallèles sont possibles :

(i)- Il existe à l'heure actuelle une grande variété de modèles qui fonctionnent dans un cadre géométrique simplifié (le plus souvent 1D). Ceux-ci permettent de traiter en détails la grande richesse microphysique du milieu et par conséquent rendent possibles des comparaisons directes avec les observations. Ces modèles, tels que le code PDR-Meudon, les modèles de chocs magnétisés ou non, le modèle TDR, nécessitent des développements permanents pour prendre en compte les avancées récentes en matière de données atomiques et les progrès dans la finesse des observations. Il faut poursuivre l'effort déjà bien engagé de mise à disposition de ces outils via une plate-forme dédiée.

(ii)- Des modèles 3D du milieu interstellaire de plus en plus sophistiqués se mettent en place reposant sur les équations de la MHD. Le code RAMSES, co-développé avec des chercheurs de la communauté PCMI, est l'outil le plus utilisé. Les plus récentes avancées sont la prise en compte de la diffusion ambipolaire et le développement en cours du transfert radiatif.

Ces simulations à l'échelle de quelques dizaines de parsecs obtiennent une réalisation numérique de la structure thermique et dynamique du milieu. L'évolution de ces simulations vers une description plus fine des phénomènes de dissipation rendra possible la caractérisation statistique des phénomènes intermittents qui influencent la chimie et partant une comparaison de plus en plus réaliste avec les observations. Une approche utilisée, car elle est relativement économe en calcul, est la détermination des abondances chimiques par un post-traitement des résultats de simulation, soit dans une hypothèse d'équilibre, soit sur des trajectoires thermodynamiques. Cette approche permet de retrouver certaines propriétés chimiques, mais il faut garder à l'esprit qu'on néglige alors le mélange turbulent et l'intermittence.

(iii)- Finalement on peut espérer à long terme être capable de traiter la chimie du gaz conjointement à sa dynamique 3D. L'approche directe est encore malheureusement trop coûteuse en temps de calcul pour fonctionner de manière réaliste. Il faut donc concentrer les efforts sur les moyens d'optimiser le calcul de la chimie. Plusieurs axes sont possibles: trouver de meilleurs réseaux réduits qui capturent l'essentiel de la chimie, chercher des méthodes 'sous-maille' qui transcrivent fidèlement l'action de la turbulence, ou bien profiter des progrès de l'architecture du hardware. L'approche directe reste toutefois nécessaire ne serait-ce que pour valider ces méthodes.

III.4 PCMI et l'enseignement

Dans la plupart des universités françaises, les formations de licence en Physique et Chimie comprennent des enseignements optionnels d'astrophysique, d'astrochimie et d'astronomie, de la première à la troisième année de licence.
Deux sites universitaires dispensent des diplômes d'Université (DU) dans le cadre de formation à distance sur les thèmes "Fenêtres sur l'Univers", "Astronomie et Mécanique Céleste" (Observatoire de Paris, http://foad.obspm.fr) et "Voie Lactée, Galaxies et Cosmologie" (Observatoire des sciences de l'Univers de Grenoble, http://www.osug.fr/La-Formation/diffusion-des-savoirs).

En master, on recense actuellement 9 sites (Bordeaux, Grenoble, Lyon, Marseille, Montpellier, Nice, Paris, Strasbourg, Toulouse) sur lesquels des enseignements d'astrophysique sont dispensés. L'astrochimie est une discipline qui est quant à elle assez peu enseignée au niveau des masters, mais elle est néanmoins prodiguée sous forme d'enseignement optionnel, au sein de quelques masters de chimie. Des stages M2R d'observation en radioastronomie sont également proposés à l'IRAM.
Une vingtaine de laboratoires du PCMI, dont environ la moitié se situe sur la région parisienne, participe à ces enseignements

Afin de renforcer la visibilité du PCMI vis-à-vis des étudiants de licence et de Master de Physique ou de Chimie, nous proposons de recenser et faire apparaitre sur le site du PCMI, les différentes formations de master en astrophysique et/ou en astronomie s'adossant sur les laboratoires dont les thèmes de recherche sont en relation avec ceux du PCMI. Une proposition serait d'indiquer sur le site du PCMI, tous les sujets de thèse dont le thème relève des activités du PCMI.
Le PCMI joue aussi un rôle fédérateur auprès des jeunes chercheurs (doctorants et post doctorants) en proposant des écoles thématiques dans des domaines comme les méthodes d'observations, la chimie du milieu interstellaire (ex: KIDA, ou des ateliers, comme ceux du savoir proposé par T. Pino et E. Dartois, en 2010, à l'OHP).

L'activité des étudiants de PCMI s'inscrit souvent dans un contexte interdisciplinaire, ce qui est un atout mais peut aussi être un handicap si l'étudiant ne réussit pas à valoriser son activité dans le contexte plus général des grandes questions du PCMI. Afin d'aider les étudiants dans leur formation, nous proposons de mettre en place des journées des doctorants ou seraient présentés leurs travaux avec également des exposés de séniors. Ces rencontres pourraient avoir lieu tous les deux ans (entre chaque colloque PCMI) et pourraient être organisées par les étudiants avec l'aide des membres du comité scientifique du PCMI.

Liste des Formations de Master (Astrophysique/Astrochimie) et laboratoires d'accueil.

Bordeaux : Université Bordeaux 1

Master 2 Recherche : Astrophysique et Physique Corpusculaire
(http://www.obs.u-bordeaux1.fr/Master/index.html)
Responsables pédagogiques Jonathan Braine pour l'Astrophysique

Laboratoires d'accueil
Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux (LAB):
(http://www.oasu.u-bordeaux1.fr/index.php?pg=umrlab&lg=fr)
Institut des Sciences Moléculaires (ISM) : http://www.ism.u-bordeaux1.fr/

Grenoble: Université Joseph Fourier

- Master de Physique M1 **:** M1 Physique
  - UE PHY421F- Astrophysique et Physique Spatiale

- Master de Physique M2R **:** Astrophysique, Plasmas et Planètes (http://ipag.osug.fr/MasterA2P/A2P.html)
  - Responsable pédagogique : Jonathan Ferreira (Jonathan.Ferreira@obs.ujf-grenoble.fr)

Laboratoires d'accueil
Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble (IPAG) : http://ipag.osug.fr/
Institut de radioastronomie millimétrique (IRAM) : http://www.lpma.jussieu.fr/ext/

Lille: Université de Lille 1

Master de Physique (http://master-physique.univ-lille1.fr/)
Une spécialité lumière matière est proposée s'appuyant sur les disciplines de *l'Optique et la Photonique (OP), la Physique de l'Atmosphère et de l'Océan (PA), la Physique Moléculaire (PM)*
- Responsable pédagogique : Thérèse HUET (therese.huet@univ-lille1.fr)

Laboratoire d'accueil
Laboratoire de physique des lasers, atomes et molécules (http://www-phlam.univ-lille1.fr/)

Lyon: École Normale Supérieure de Lyon et Université Claude Bernard Lyon 1

Parcours Astrophysique commun au M2R des Sciences de la Matière de l'École Normale Supérieure de Lyon et au M2R de Physique Fondamentale de l'Université Claude Bernard Lyon 1 (http://www.ens-lyon.fr/MasterSDM/fr/master-2/presentation)
- Responsable pédagogique : Jean-François Gonzalez (Jean-Francois.Gonzalez@ens-lyon.fr) pour le Parcours Astrophysique

---

Marseille: Université d'Aix-Marseille

- Master 2 de Physique théorique et Mathématique, Physique des Particules et Astrophysique (http://marwww.in2p3.fr/Master2-P3TMA/)
  - Contacts astrophysique : Véronique Buat (veronique.buat@oamp.fr) ,Philippe Amram (philippe.amram@oamp.fr)
  - Ce master 2ème année a pour vocation de fournir une formation de haut niveau en Physique ▸ Les cours sont donnés en anglais et il existe une version du site du M2 en anglais.
- Master professionnel, spécialité "Instrumentation Optique et Laser **(IOL)** (http://sites.univ-provence.fr/m2iol/)
  - Responsable pédagogique : Philippe Amram (philippe.amram@oamp.fr)

Laboratoire d'accueil
Laboratoire d'astrophysique de Marseille (LAM) : http://lam.oamp.fr/

- Master 2 de Chimie Informatique et Spectrométrie Analyse (http://www.master-chimie.univ-cezanne.fr/)
  Ce master permet de se former aux enseignements de spectrométries, techniques analytiques et instrumentation. Un cours de photochimie interstellaire est également dispensé.

Laboratoire d'accueil
Laboratoire de Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires (PIIM):
http://sites.univ-provence.fr/piim/
Contact Astrochimie: Thierry Chiavassa (thierry.chiavassa@univ-amu.fr)

Montpellier: Université Montpellier 2

Master Physique et Ingénierie de Montpellier: Parcours : Cosmos, Champs et Particules (http://www.master-physique.univ-montp2.fr/ccp)
- Responsable pédagogique : Cyril Hugonie (cyril.hugonie@um2.fr)

Laboratoire d'accueil
Laboratoire Univers et Particules de Montpellier LUPM http://www.lupm.univ-montp2.fr/
Contact Astrochimie Dahbia Talbi (dahbia.talbi@univ-montp2.fr)

Nice - Sophia Antipolis: Université de Nice - Sophia Antipolis

Master Imagerie et Modélisation Astrophysique, Géophysique, Espace et Environnement, IMAG2E (http://www.imag2e.unice.fr/)
- Responsable pédagogique : Philippe Bendjoya (philippe.bendjoya@unice.fr)

Orléans: Observatoire des sciences de l'Univers - Université d'Orléans

Master International Sciences Terre Univers Environnement Spécialité "Sciences de l'Atmosphère et de l'Espace" (http://www.univ-orleans.fr/osuc/html/Enseignement/)

- Responsable pédagogique : Gilles Poulet (gilles.poulet@cnrs-orleans.fr)

C'est une formation pluridisciplinaire dans les domaines de l'environnement, de l'atmosphère de la Terre aux confins de l'Univers, avec une forte implication dans des projets spatiaux (satellites, ballons), de la conception des instruments à leur réalisation et leur exploitation scientifique.

Paris - Ile de France: Observatoire de Paris

Master première année "Sciences de l'Univers et Technologies Spatiales" (http://master-1.obspm.fr/)
- Responsable pédagogique : Andreas Zech (andreas.zech@obspm.fr) et Christophe Sauty (christophe.sauty@obspm.fr)

Paris - Ile de France: Université Paris-Sud 11 à Orsay

Astrophysique 1 (PhysFA-451A) et Astrophysique 2 (PhysFA-461B) (http://www.ias.u-psud.fr/pperso/hdole/coupole/enseignements.php)
- Responsables pédagogiques : J.-P. Bibring, G. Pineau des Forêts, H. Dole (Herve.Dole@ias.u-psud.fr)

Paris - Ile de France: Pierre et Marie Curie, Denis Diderot, Paris Sud 11, Observatoire de Paris

Master 2 recherche, spécialité Astronomie et Astrophysique (http://master-recherche.obspm.fr/)
- Responsables pédagogiques : Jacqueline Plancy (Jacqueline.Plancy@obspm.fr) ou Agnès Le Guérer (leguerer@iap.fr) (parcours Astrophysique)

Paris - Ile de France: Pierre et Marie Curie, Denis Diderot, Paris Sud 11, Paris 12 Val de Marne, Observatoire de Paris

Master 2 professionnel "Outils & Systèmes de l'Astronomie & de l'Espace" (http://osae.obspm.fr/)
- Responsable pédagogique: Benoît Mosser (benoit.mosser@obspm.fr)

Laboratoires d'accueil :
Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS): http://www.ias.u-psud.fr/
Institut des Sciences Moléculaires d'Orsay (ISMO): http://www.ismo.u-psud.fr/
Laboratoire d'étude du rayonnement et de la matière en astrophysique (LERMA) : http://lerma.obspm.fr/

Laboratoire de physique moléculaire pour l'atmosphère et l'astrophysique (LPMAA) : http://www.lpma.jussieu.fr/ext/
Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales (LATMOS): http://www.uvsq.fr/laboratoire-atmospheres-milieux-observations-spatiales-latmos--43935.kjsp
Laboratoire Galaxies, Etoiles, Physique, Instrumentation (GEPI): http://gepi.obspm.fr/
Laboratoire de l'Univers et Théories (LUTH): http://luth.obspm.fr/
Laboratoire Interuniversitaire des systèmes atmosphériques (LISA): http://www.lisa.univ-paris12.fr/

Rennes: Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Rennes

Master Sciences Technologies, mention Chimie, spécialité Chimie Moléculaire (http://www.ensc-rennes.fr/themes/formations/masters/chimie-moleculaire/)
Laboratoire d'accueil
Institut des Sciences Chimiques de Rennes-ISCR (http://www.scienceschimiques.univ-rennes1.fr/en/home/teams/cpm/)
Contact Astrochimie : Jean Claude Guillemin (jean-claude.guillemin@ensc-rennes.fr)

Rennes: Université de Rennes 1

Master de Physique (https://etudes.univ rennes1.fr/masterphysique/menu/Physiquerecherche/M2)
- Responsable pédagogique : Philippe Rabiller (philippe.rabiller@univ-rennes1.fr)

Laboratoire d'accueil :
Institut de Physique de Rennes-IPR (http://www.ipr.univ-rennes1.fr/wordpress/?page_id=33&mtop=dpt1&lang=fr)
Contact astrochimie expérimentale: Sébastien le Picard (sebastien.le-picard@univ-rennes1.fr)

Strasbourg: Université de Strasbourg

Master mention Physique, spécialité Astrophysique (http://astro.unistra.fr/index.php ?page=master)
- Responsable pédagogique : Ariane Lançon (ariane.lancon@astro.unistra.fr) et Christian Boily (christian.boily@astro.unistra.fr) de l'Observatoire Astronomique de Strasbourg

---

Toulouse: Université Paul Sabatier

Dans le cadre de la mention de Master "Physique et Astrophysique" , l'Université Paul Sabatier propose une formation en 2 ans orientée vers l'Astrophysique et les Techniques Spatiales, incluant un M1 et deux spécialités de M2, l'une orientée recherche et l'autre professionalisante

Master 1ère année, mention Physique et Astrophysique, parcours Astrophysique et techniques spatiales Master "Physique et Astrophysique" (http://www.cesr.fr/ pvb/m1astro/)
- Responsable pédagogique : Pierre Jean (pierre.jean@irap.omp.eu)

Master recherche 2ème année, "Astrophysique, sciences de l'espace et planétoloige" (http://www.obs-mip.fr/asep/)
- Responsable pédagogique : Geneviève Soucail (gsoucail@irap.omp.eu)

Master professionnel 2ème année, "Techniques spatiales et instrumentation (http://www.univ-tlse3.fr/EPPSI0_111/0/fiche___formation/&RH=1237305346255)
- Responsable pédagogique : Christophe Peymirat (christophe.peymirat@irap.omp.eu)

Laboratoire d'accueil
Institut de recherche en Planétologie et en Astrophysique (IRAP) : http://www.irap.omp.eu/

IV Prospective Scientifique

IV.1 Le MIS de la Voie Lactée à l'extragalactique

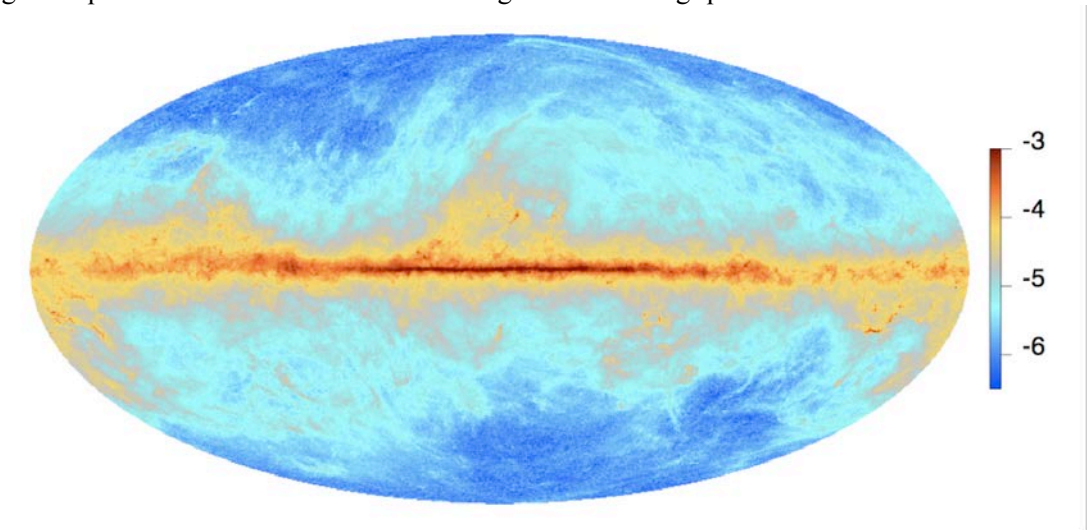
IV.1.1 Contexte général

Le milieu interstellaire (MIS) est un système ouvert et complexe dont l'évolution est régi par l'évolution d'une vaste gamme d'échelles couplées entre elles par la gravité bien sûr, mais aussi le champ magnétique et la turbulence. C'est cette facette du MIS qui fait de la formation d'étoiles un processus si difficile à maîtriser car les échelles ne sont pas réellement séparables. On commence à comprendre que la formation d'étoiles dans un cœur dense est le fruit de l'évolution de ce cœur qui elle-même dépend de l'évolution de son nuage parent, elle-même dépendante de son environnement galactique, la galaxie elle-même évoluant au gré de ses interactions avec d'autres galaxies.

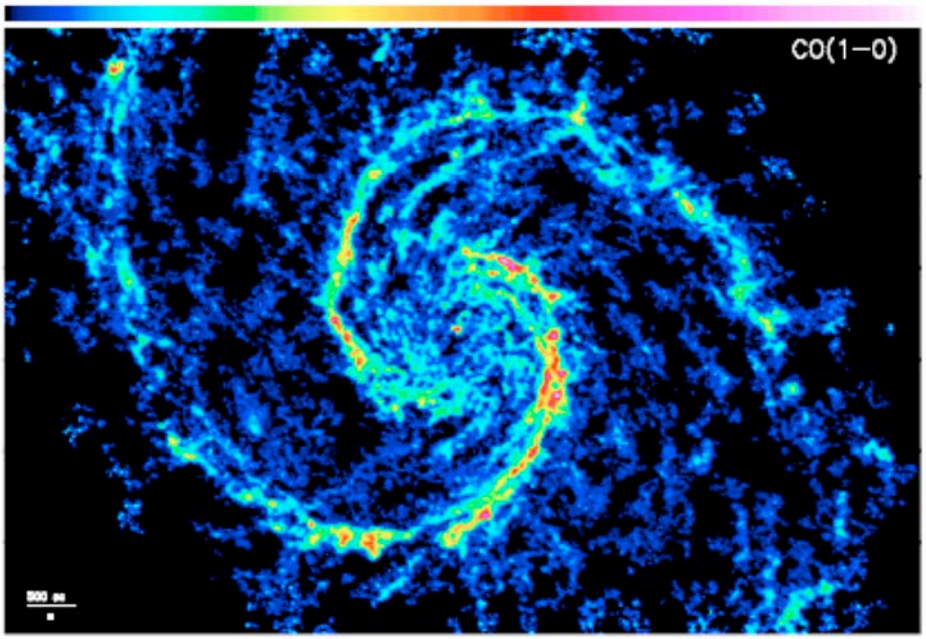
Le MIS est un constituant essentiel des galaxies, car il est à la fois un réservoir de matière pour la formation stellaire et le témoin de l'activité passée, via sa composition en éléments chimiques, (i.e. sa métallicité). L'étude du MIS des galaxies extérieures, ainsi que celle du milieu intergalactique, beaucoup plus ténu, fait appel aux mêmes processus physiques fondamentaux que l'étude du MIS galactique, mais placés dans des environnements extrêmes, en terme de densité, température, champ de rayonnement, flux de particules énergétiques, ainsi que pour la métallicité qui influe de manière encore mal comprise sur la nature des poussières.

La motivation sous-jacente à l'étude du MIS est la compréhension de la formation d'étoiles car elle est le moteur de l'évolution des galaxies. Or la compréhension de la formation d'étoiles s'inscrit dans celle du MIS et passe en particulier par celle de la formation de structures de gaz denses. Quels sont les phénomènes qui leur confèrent leurs propriétés (masse, taille, dispersion de vitesse), quelle est leur durée de vie ? C'est un sujet extrêmement riche, puisqu'il s'agit de comprendre en détail les rôles respectifs de la turbulence, des champs magnétiques, de l'effondrement gravitationnel, de la rétroaction stellaire, de l'environnement à grande échelle, de la turbulence et du refroidissement radiatif.

L'étude de ces processus physiques non-linéaires est au cœur de la recherche sur le MIS. Ces processus sont aussi à l'œuvre dans la formation et l'évolution des galaxies. PCMI propose de projeter les connaissances acquises dans la Voie Lactée au contexte de la formation des galaxies pour explorer une nouvelle dimension de l'évolution de la matière dans l'espace. De plus, la maîtrise des processus à l'œuvre dans la Voie Lactée constitue un point d'ancrage solide pour modéliser les contributions galactiques locales en vue d'extraire des signaux cosmologiques.



Profondeur optique de la poussière à 850 µm construite à partir de la modélisation des données Planck à 350, 550 et 850 µm et des données IRAS à 100 µm. Les unités sont en log(tau 850 µm). Planck collaboration (en préparation).



Observations de la raie ^{12}CO(1-0) obtenues au PdBI de M51 (Schinnerer et al. 2013, Pety et al. 2013). La résolution angulaire permet de révéler les propriétés des nuages moléculaires jusqu'à une échelle de 40pc. L'excellente qualité d'image permet de séparer les nuages moléculaires d'une composante d'émission diffuse qui représente une fraction significative de la masse de gaz moléculaire.

IV.1.2 Les phases du MIS : condensation du gaz, du milieu diffus vers le milieu dense

La transition du diffus atomique au diffus moléculaire

Dans une galaxie comme la Voie Lactée, l'essentiel de la masse du milieu neutre est dans une phase très diluée, irradiée par les photons UV et X et les particules cosmiques, et qui est le siège de phénomènes violents. Le processus de refroidissement et de condensation du gaz vers des phases gravitationnellement liées où s'effectue la formation d'étoiles est complexe. Il est d'une part lié à la dynamique du gaz (chocs, turbulence, instabilités dynamiques) mais aussi à la particularité des mécanismes de chauffage et de refroidissement du MIS qui induisent une transition de phase du gaz tiède (8000 K) vers une phase plus froide (50-100 K). C'est dans cette phase plus froide, mais encore très diluée, qu'apparaissent les premières molécules. Les processus qui permettent aux molécules d'apparaître, et surtout de survivre, dans les phases les plus diluées des galaxies et de leur environnement sont donc au cœur de nos problématiques.

Les modélisations et simulations numériques directes commencent aujourd'hui à maîtriser le couplage non linéaire de plusieurs des processus essentiels à la condensation du gaz, mais ce sont les observations qui dictent la hiérarchie des phénomènes à prendre en compte : le rôle du champ magnétique, des rayons cosmiques et de leur couplage avec la turbulence magnétisée, des phénomènes hors d'équilibre, des chocs et autres singularités du champ de vitesse, sièges de la dissipation d'énergie mécanique et, sans doute également de la transformation rapide de la matière solide... La communauté PCMI voit donc se renforcer les thématiques centrées sur l'évolution du milieu diffus, nourries par l'interaction entre numériciens et théoriciens, d'une part, et observateurs de la dynamique du gaz et des propriétés des grains de poussière et des molécules, d'autre part (équipes LERMA, CEA, IAS, IRAP, LUTH, LAOG, Obs. Strasbourg). Cette évolution est entrée dans une ère nouvelle avec les programmes d'observations réalisés avec les missions Herschel et Planck.

Formation et propriétés des nuages moléculaires : approche numérique

Au cours des 5 dernières années, une étude plus exhaustive de la formation des nuages moléculaires ainsi que des statistiques de la turbulence et des cœurs denses qui s'y forment a été menée à l'aide de simulations numériques (c.f. StarFormat) et de codes de modélisation (c.f. code PDR de Meudon). Des progrès significatifs ont été faits dans notre compréhension du processus de formation des structures denses du MIS et des étoiles mais de nombreux aspects restent à explorer. Par exemple, l'étude de la propagation du rayonnement et des rayons cosmiques dans la structure 3D hautement non uniformes des nuages moléculaires est en cours, notamment pour étudier la validité des traceurs « classiques » du taux d'ionisation dans le MIS tels que H_3^+ ou OH^+. A terme, ce type de simulation permettra de produire des observables synthétiques directement comparables aux observations. Il faut souligner le développement de l'interface avec la communauté des hautes énergies en ce qui concerne les sources et la propagation des rayons cosmiques de faible énergie. Ceux-ci sont les principaux facteurs d'ionisation dans les régions denses et obscures, et contribuent également à l'initiation de la chimie interstellaire. Ceci explique que certains ions moléculaires comme H_3^+, OH^+ ou encore H_3O^+ peuvent être utilisés pour quantifier le flux de rayons cosmiques. Ces études sont appelées à se déployer avec la mise en route d'instruments plus puissants (ALMA, CCAT, NOEMA, VLT, ELT).

IV.1.3 Le champ magnétique interstellaire

Le champ magnétique joue un rôle majeur dans la dynamique de la matière interstellaire. Pourtant nous en avons une connaissance encore limitée et controversée. En particulier, les observations ne permettent pas encore de conclure sur le rôle du champ magnétique dans l'effondrement de la matière et la formation des étoiles. Ce domaine de recherche est donc très actif et vient d'être renouvelé par la mission Planck qui, en produisant une carte de l'émission millimétrique polarisée de tout le ciel pour y rechercher le signal polarisé du CMB prédit par les modèles d'inflation, offre à la communauté celle des émissions polarisées galactiques (thermique des poussières et synchrotron). Nous ne sommes qu'au début de l'exploitation scientifique des données polarisées de Planck qui nous permettront d'élargir significativement notre connaissance de la structure du champ magnétique galactique du milieu diffus aux nuages moléculaires.

L'observation de l'émission polarisée de la poussière sur tout le ciel permet également d'apporter des contraintes nouvelles sur les propriétés des grains. La comparaison du spectre de la poussière en intensité et en polarisation permet de déterminer la composition des grains et de confronter les modèles actuels qui prédisent la présence de deux populations de grains (silicatée et carbonée) ayant des efficacités d'alignement différentes. D'autres hypothèses concernant la présence d'inclusions ferromagnétiques pourront également être testées.

Dans ces domaines, l'expérience sous ballon stratosphérique PILOT, dont le premier vol est prévu en 2014, apportera des données complémentaires à celles de Planck. A plus courte longueur d'onde (240 µm) les mesures devraient atteindre une meilleure sensibilité, ce qui est crucial pour le milieu le plus diffus. Elles permettront également de tester l'éventuelle dépolarisation de l'émission liée à la dépendance en taille de l'alignement des grains. A plus haute résolution, elles permettront de mesurer la structure du champ à des échelles intermédiaires entre celles de Planck et des télescopes au sol. L'analyse préliminaire des données Planck indique que ces aspects seront essentiels pour améliorer notre compréhension des phénomènes d'alignement et de la structure du champ magnétique.

À plus basse fréquence, l'émission synchrotron (polarisée et non-polarisée) permet d'accéder à la fois à l'intensité et à l'orientation du champ magnétique projetée sur le ciel. Les mesures de rotation Faraday sur des lignes de visée croisant des pulsars ou des galaxies radio permettent également de déterminer les propriétés du champ magnétique galactique. Ces deux méthodes sont d'ailleurs celles qui ont été les plus utilisées jusqu'à maintenant pour déterminer les propriétés de la structure du champ magnétique galactique à grande échelle (Men, Ferrière & Han, 2008). Le radio-télescope LOFAR (30 à 250 MHz) va permettre d'augmenter de manière significative le nombre et la fiabilité des mesures de rotation Faraday. Il va permettre également d'effecture des analyses de tomographie Faraday, une méthode qui permet de déterminer la structure du champ magnétique et du milieu ionisé le long de la ligne de visée.

Rappelons que l'interprétation des données polarisées est compliquée par le fait qu'on observe des quantités vectorielles projetées sur le ciel. Il est donc indispensable de recourir à des simulations numériques MHD en trois dimensions pour accompagner l'analyse des données. Un effort important est réalisé dans ce sens par la communauté PCMI.

IV.1.4 Structure galactique : le lien avec l'environnement à grande échelle

Structure à grande échelle et fontaine galactique

Dans le contexte du PN PCMI, l'étude des propriétés à grande échelle de la Voie Lactée est primordiale. En effet, du fait de la cascade d'énergie turbulente et de la gravité, les processus physiques agissant à grandes échelles ont un impact direct sur la physique à plus petite échelle et en particulier sur la formation des nuages et des étoiles. Du point de vue numérique, des efforts importants ont été réalisés ces dernières années pour étudier la formation des nuages interstellaires à l'échelle de quelques dizaines de pc mais peu de simulations numériques l'ont été pour faire le lien avec les échelles galactiques de l'ordre du kpc. Ce type de simulation est en cours de développement au CEA et permettra d'étudier le cycle de la matière, la structure des phases, le rétroaction par les supernovae, l'impact de la structure hydrostatique du disque galactique, la propagation des rayons cosmiques et le couplage avec le champ magnétique.

Du point de vue observationnel, plusieurs études en cours promettent des avancées significatives dans ce domaine. Tout d'abord Planck, avec son relevé complet du ciel, permet de mieux caractériser la structure et la masse de la matière du disque. Avec la polarisation, Planck permettra également de contraindre la structure à grande échelle du champ magnétique galactique, un sujet sur lequel la France est leader (Jaffe et al. 2013). Un important complément à ce travail proviendra de l'analyse de l'émission synchrotron polarisée avec LOFAR.

Concernant la structure de la Voie Lactée PCMI est aussi concerné par le projet GAIA, entre autre par les aspects liés à l'étude de l'extinction et des bandes diffuses interstellaires dans la gamme du spectromètre (GEPI, OCA). Plus généralement les grands relevés de la galaxie pour la détermination des populations stellaires apportent des informations sur la localisation de l'extinction. Combinées avec Planck, ces données permettront de mieux comprendre les propriétés des poussières, la propagation du rayonnement, le lien avec la formation stellaire et la structure galactique. D'autres grands relevés en cours (SDSS, Pan-STARRS) ou à venir (LSST) ont également des potentialités pour la communauté PCMI.

Finalement, la disponibilité de nouveaux relevés du ciel à 21 cm (GASS, EBHIS) avec une résolution angulaire comparable à celle de Planck permettra entre autre de caractériser les nuages du halo de la galaxie et d'étudier plus en détail la fontaine galactique et son rôle dans le cycle de la matière (fragmentation de la poussière, condensation du gaz lors du retour dans le disque...).

Ce domaine de recherche bénéficie donc de perspectives renouvelées par les observations d'une part et les avancées en simulation numérique, d'autre part. Ceci implique la nécessité d'un effort concerté de développement de modèles de la Voie Lactée, de campagnes d'observations préparatoires et de développement de méthodes d'analyse et de simulation.

Le centre galactique

Le centre de notre galaxie est un environnement extrême, pertinent pour l'étude des processus physiques dans des champs de radiation (FUV, X, Gamma, rayons cosmiques …) intenses, mais aussi comme exemple de noyau actif de galaxie. ALMA sera un instrument de choix pour progresser dans la compréhension de la nature du gaz, son organisation spatiale et temporelle, en relation avec la formation stellaire. En progressant depuis SgrA* on rencontre en effet une cavité centrale où le gaz est principalement ionisé en liaison avec l'amas stellaire très dense, puis du gaz moléculaire spiralant vers le centre porté à des températures très élevées (Goicoechea et al 2013). Un peu plus loin, un anneau de nuages moléculaires denses et massifs, où, fait exceptionnel, les poussières sont plus froides que le gaz, rassemble l'essentiel de la masse. La structure de ces nuages turbulents, dont certains semblent incapables de former des étoiles malgré leur masse reste une énigme, que la combinaison d'information acquises par Herschel et ALMA va peut-être résoudre. La zone circumnucléaire contient

également du gaz moléculaire diffus, remarquable par le degré d'excitation de H_3^+ mais aussi de H_3O^+ (données Herschel), et la présence en très forte abondance de CH^+, SH^+ et OH^+. Il reste à comprendre le lien entre ces différentes régions, leur organisation spatiale en liaison avec la barre dans la Voie Lactée, à grande échelle, et éventuellement leur lien avec SgrA* et les amas stellaires massifs proches.

IV.1.5 Application du savoir PCMI aux systèmes extragalactiques

La formation des structures de l'univers est initiée par la gravité responsable de l'assemblage hiérarchique de halos de matière noire. Au cœur de ces halos naissent les amas de galaxies par condensation et effondrement du gaz intergalactique. Le gaz ne suit cependant pas la structuration hiérarchique de la matière noire. Pourquoi ne trouvons nous aujourd'hui dans les galaxies qu'une partie faible du gaz ? Pourquoi la formation des galaxies les plus massives s'arrête-elle sans avoir assemblé toute la matière baryonique disponible ? Pourquoi observons nous une forte déficience de galaxies de petite masse et de galaxies satellites ? Ces questions posées par les observations soulignent notre connaissance incomplète de la physique à l'œuvre au cours de la formation des galaxies. Ces questions sont au cœur des thématiques du PNCG, l'expertise sur la physique du gaz et des poussières de la communauté PCMI y apporte un éclairage nouveau. Par exemple, la nature intermittente, en sursauts, de la formation stellaire et la corrélation en masse entre les galaxies et leur trou noir central sont des indices du rôle joué par la rétroaction des jeunes étoiles et des trous noirs sur leurs environnements, un effet dynamique pour lequel il faut comprendre finement l'interaction matière - rayonnement. En dépit de progrès spectaculaires, les simulations numériques n'intègrent cette physique du gaz qu'à travers des équations phénoménologiques trop simplificatrices.

La spectroscopie des galaxies dans le domaine spectral allant de l'IR au mm ouvre cet espace de recherches à l'observation. Aujourd'hui Spitzer, Herschel, l'IRAM et ALMA, bientôt le JWST puis SPICA permettront de dépasser notre compréhension encore essentiellement empirique de la formation des galaxies en traçant l'évolution du gaz et des poussières au cours de l'histoire cosmique. Ceci est clairement un sujet dans lequel l'expertise de la communauté PCMI peut être mise à profit. L'établissement de diagnostics spectroscopiques des propriétés des objets, pour aller au delà de la mesure de la masse (masse dynamique, masse de gaz) passe par une confrontation entre connaissance des objets (PNCG) et maîtrise des processus physiques et chimiques (PCMI). La communauté PCMI exprime son intérêt de mettre à profit son expertise au delà de la Voie Lactée.

Structure et énergétique des galaxies

Avec le gain en résolution angulaire, en particulier avec ALMA et NOEMA dans le domaine (sub)millimétrique, les régions de formation d'étoiles et les nuages moléculaires géants peuvent maintenant être étudiés dans les galaxies extérieures. Des observations ALMA et VLT de la région d'interaction des galaxies des Antennes donnent accès pour la première fois et simultanément au taux de dissipation de la turbulence (émission H_2) et à la masse de gaz (émission CO) dans ce qu'on pense être un proto-amas d'étoiles de plusieurs millions de masses solaires (Herrera et al. 2012).

L'observation des galaxies commence à révéler un scénario présentant une phase d'éjection d'énergie cinétique liée à l'interaction entre galaxies et/ou à l'effet des noyaux actifs. On observe des raies d'émission fortes provenant de gaz moléculaire choqué, traçant la dissipation de l'énergie turbulente injectée dans le gaz par les processus d'éjection. Ces observations suggèrent que la turbulence, qui est souvent évoquée comme agent régulateur de la formation stellaire, joue peut-être un rôle similaire dans la formation et la croissance des galaxies. Les observations en spectroscopie visible (VLT) et millimétrique (ALMA) permettent maintenant d'étudier les conditions physiques du gaz (amplitude de la turbulence, masse, échelle de temps de dissipation de l'énergie) dans les galaxies et dans le milieu inter-galactique.

Les échelles spatiales, les temps caractéristiques, les densités et la dynamique de ces systèmes sont très différents de ce qui est rencontré dans le MIS galactique. Cela permet d'étendre l'exploration du domaine des paramètres de cette physique complexe et non-linéaire. À titre d'exemple Guillard et al. (2012) ont étudié l'émission du gaz moléculaire (H_2 et CO) provenant d'un choc de 30 kpc de long à l'interface entre deux galaxies dans le Stephan's Quintet. Le gaz moléculaire y est à des températures

de l'ordre de 100-1000 K, sa masse est $5x10^9$ Mo et sa dispersion de vitesse est 1000 km/s. Dans ce type de système, l'hydrogène moléculaire est responsable de l'évacuation d'une grande fraction de l'énergie cinétique de la collision et la luminosité dans les raies de H_2 excède celle en rayons X.

Modélisation du MIS dans les galaxies

L'observation des galaxies proches, notamment avec Herschel, permet d'étudier les propriétés de la poussière, du gaz et de l'activité de formation d'étoiles dans des environnements significativement différents de ceux de la Voie Lactée. Plusieurs travaux récents et les éléments développés dans cette section montrent qu'il est maintenant possible de mener des études de la physique de la matière interstellaire dans les galaxies de manière similaire à ce qui se faisait pour la Voie Lactée il y a quelques décennies, à la différence que l'étude des galaxies extérieures bénéficie aujourd'hui de l'ensemble des connaissances acquises sur les processus physiques à l'œuvre dans le MIS galactique. En effet, l'analyse d'observations d'objects extragalactiques est parfois couplée à l'utilisation de codes de modélisation développés par la communauté du MIS (code PDR-Meudon, code d'émission des poussières DUSTEM, Cloudy, codes de chocs, etc.). Par exemple on commence à voir émerger des études de la dynamique des systèmes extragalactiques par des membres PCMI (Lesaffre et al. 2013).

L'un des enjeux futur de la communauté PCMI est de progresser dans ce domaine et de contribuer de manière significative à l'interprétation des observations du gaz extragalactique, en adéquation avec les progrès constant des moyens observationnels. Par exemple le domaine de l'IR lointain offre des traceurs nouveaux des mécanismes de *feedback* liés à la présence d'un noyau actif ou d'un sursaut de formation d'étoiles particulièrement intense, comme les transitions du radical OH, des ions moléculaires OH^+, H_2O^+, H_3O^+. L'interprétation de l'abondance de ces espèces, ainsi que des profils de raies qui montrent clairement des phénomènes d'expansion largement inconnus avant les observations de Herschel, bénéficiera des développements en modélisation réalisés dans la communauté PCMI. Les perspectives pour la modélisation sont la prise en compte des rayonnements énergétiques et un meilleur traitement de la diversité des conditions rencontrées compte tenu des échelles d'étude (développement de modèles de sous-maille). L'introduction de la physique des X dans le code PDR de Meudon pour interpréter des observations Herschel de galaxies naines ou l'application du code de choc Paris-Durham au Quintet de Stefan vont dans ce sens (Gonzalez-Alfonso et al 2012, 2013; Lesaffre et al. 2013). Ce type de passerelle est sans aucun doute amené à se développer; un grand champ d'action s'ouvre pour PCMI où le savoir acquis sur les processus complexes impliqués dans l'évolution de la matière interstellaire est directement appliqué à l'étude de systèmes extragalactiques.

Références

Goicoechea, J. et al., 2013, ApJ, 769, 13

González-Alfonso, E. et al., 2012, A&A, 541, 4

González-Alfonso, E. et al., 2013, A&A, 550, 25

Guillard, P., et al. 2012, ApJ, 749, 158

Herrera, C. N.; Boulanger, F.; Nesvadba, N. P. H.; Falgarone, E., 2012, A&A, 538, L9

Jaffe, T. R., et al., 2013, MNRAS, 431, 683

Lesaffre, P., et al., 2013, A&A, 550, A106

Men, H.; Ferrière, K.; Han, J. L., 2008, A&A, 486, 819

Omont, A., et al., 2013, A&A, 551, A115

Pety, J. et al., 2013, arXiv1304.1396P

Schinnerer et al., 2013, arXiv1304.1801S

IV.2 Des Nuages Moléculaires aux Systèmes Protoplanétaires

« *Nous sommes des poussières d'étoiles* » (Hubert Reeves)… *Mais qui passe le balai?*

Comprendre les processus dynamiques et physico-chimiques qui gouvernent **la chaîne de condensation de la matière moléculaire**, depuis les nuages denses jusqu'aux constituants initiaux des systèmes protoplanétaires, **et la rétroaction des étoiles sur le milieu moléculaire circumstellaire et interstellaire,** est une thématique centrale de PCMI.

Alors que les nuages moléculaires ont globalement une distribution de densité de colonne log-normale, signature de leur nature turbulente, les régions de formation d'étoiles au sein de ces nuages ont une distribution de densité de colonne distincte, en loi de puissance, interprétée comme une manifestation de leur auto-gravité. Dans ces régions se forment, par un processus qui reste à clarifier, des **cœurs denses** compacts (< 0.1pc) très froids et gravitationnellement instables, dont l'effondrement donne naissance aux étoiles et aux disques protoplanétaires. Pendant les 10 à 100 000 ans que dure cet effondrement, **l'enveloppe protostellaire** poussiéreuse en chute vers l'étoile se réchauffe et l'évaporation des manteaux de glace induit une évolution chimique rapide avec l'apparition de molécules organiques complexes en phase gazeuse, dont les variations de composition entre sources ne sont pas encore comprises. Une partie de cette matière moléculaire est ré-éjectée dans des **jets bipolaires** puissants, probablement d'origine MHD, qui interagissent avec l'enveloppe et contribuent peut-être à ces variations. Une autre partie, dans une proportion qui reste à établir, est incorporée dans un **disque circumstellaire** qui croît en taille. Le disque évolue pendant plusieurs millions d'années et se dissipe lentement. Son evolution est contrôlée par des processus complexes (turbulence, instabilités magnétohydrodynamiques et gravitationnelles, coagulation et sédimentation des grains, etc.) menant à la formation de planétésimaux puis de planètes. A la fin de la vie de l'étoile, une partie de la matière stellaire est réinjectée sous forme **d'enveloppes circumstellaires en expansion** où se forment de nouvelles molécules et grains de poussière, contribuant au renouvellement chimique du MIS. Toutes ces phases du milieu moléculaire dense subissent aussi de forts effets de **rétroaction** de la part des étoiles sous la forme d'**irradiation** UV et X et **d'ondes de chocs** induites par les éjections de matière. Ces effets contribuent, dans une mesure qui reste à quantifier, au brassage turbulent entre les phases atomique et moléculaire, à l'efficacité de leur condensation en étoiles, à l'accélération des rayons cosmiques, et à la photoévaporation ou au balayage de la composante gazeuse des disques protoplanétaires.

Les modélisations menées ces dernières années, en particulier dans la communauté PCMI, ont mis en lumière l'importance cruciale de la **turbulence, du champ magnétique, et du rayonnement** dans ces divers processus. Mais les rôles respectifs de ces agents aux différents stades sont encore incertains. Des complexités supplémentaires, spécifiques aux milieux moléculaires denses, sont que :

1. les champs de vitesse sont généralement **supersoniques voire discontinus** et intrinsèquement 3D (ce qui soulève des défis numériques spécifiques)
2. le **champ magnétique** est dynamiquement important, mais **imparfaitement couplé** à la matière en raison du faible degré d'ionisation des régions denses et sombres.
3. les **grains de poussière jouent un rôle crucial** à de nombreux niveaux : chauffage du gaz par effet photoélectrique, écrantage du flux UV, formation et/ou adsorption des principaux agents refroidissants tels que H_2, H_2O et CO et de traceurs tels que CH_3OH et NH_3 ; et à haute densité : capture de charges et couplage avec le champ magnétique, refroidissement du gaz par collision.
4. les temps caractéristiques d'écoulement, de refroidissement, de réactions chimiques, de dissipation ion-neutre, et d'interaction gaz-grains, sont tous du même ordre de grandeur, induisant des **situations hors-équilibre et un couplage étroit entre dynamique et micro-physique**.

En conséquence, la nature pluri-disciplinaire de PCMI et son expertise des processus micro-physiques sont des **atouts indispensables** pour progresser dans la compréhension de l'évolution du milieu moléculaire dense, et pour faire le lien entre sa modélisation et les diagnostics observationnels.

L'émission des molécules et des grains de poussière est le traceur privilégié des différentes phases de cette évolution. Cela requiert à la fois des études en **spectroscopie haute résolution** pour accéder à leur composition chimique, leur dynamique, leur bilan énergétique et leur magnétisation (via l'effet Zeeman), ainsi qu'une **connaissance fine des propriétés des poussières** pour suivre l'évolution des grains en taille et en température. L'arrivée de moyens d'observation plus puissants dans les domaines infrarouge et sub/mm avec une sensibilité, résolution spatiale, et couverture spectrale fortement accrues et une grande précision en mesures de polarisation (voir Partie « Moyens Observationnels ») va révolutionner l'étude de ces phases denses. En particulier, les **interféromètres (sub)millimétriques** ALMA et NOEMA vont permettre pour la première fois de **résoudre spatialement la structure interne** des enveloppes protostellaires, des disques protoplanétaires, des régions de photodissociation, des enveloppes d'étoiles évoluées, et des zones de chocs dans les jets protostellaires et les restes de supernovae. En parallèle, l'effort de modélisation sera renforcé en s'efforçant de coupler, autant que possible, **les aspects dynamiques et l'évolution physico-chimique** de la matière, un défi qui devient accessible grâce aux progrès en moyens de calcul (voir Partie « Simulations Numériques »). Les progrès théoriques et expérimentaux sur les **interactions gaz-grains-rayonnement** et la **réactivité à basse température** seront cruciaux pour améliorer ces modèles. L'étude des **processus inélastiques d'excitation** collisionnelle sera aussi de première importance dans ce contexte car ces mécanismes jouent un rôle essentiel dans le refroidissement du milieu, et dans l'interprétation des diagnostics spectraux en termes d'abondances, densité, et température. **L'interaction constante entre observateurs, modélisateurs, et expérimentateurs** permise par le programme PCMI sera donc essentielle pour identifier les processus et paramètres clefs qui gouvernent l'évolution du milieu moléculaire dense, interstellaire et circumstellaire.

Dans ce qui suit, nous décrivons les principales perspectives de travail pour les prochaines années à chacun des stades de la chaîne de condensation/rétroaction, et l'illustrons par des observations récentes des différents stades obtenues par des équipes PCMI et qui préfigurent les progrès à venir.

IV.2.1 Des nuages moléculaires aux cœurs denses

Identifier les conditions physico-chimiques et dynamiques qui induisent la condensation du gaz moléculaire en cœurs denses gravitationnellement instables est une problématique majeure du PCMI. Notons que ce domaine présente une interface forte avec PNPS car les propriétés et l'environnement des cœurs préstellaires vont déterminer *in fine* l'efficacité locale de la formation stellaire, son mode (en amas ou isolée, spontanée ou induite), et peut-être même sa fonction initiale de masse (IMF).

Un premier objectif important dans les prochaines années sera de comprendre **l'origine de la sous-structure filamentaire** des nuages moléculaires, où *Herschel* a révélé que se formaient préférentiellement les cœurs préstellaires. En particulier **le rôle respectif de la turbulence, de la gravité, de la pression thermique, et de la diffusion ion-neutre** dans la formation et la taille des filaments. Un effort conjoint d'analyse statistique des filaments et cœurs froids observés par *Herschel* et *Planck,* de leur environnement à plus grande échelle, et de la structure du champ magnétique déduite des données en polarisation désormais disponibles (cf. Sect. « Moyens observationnels ») sera essentiel pour progresser sur ce sujet, en lien étroit avec les simulations numériques MHD de nuages moléculaires turbulents.

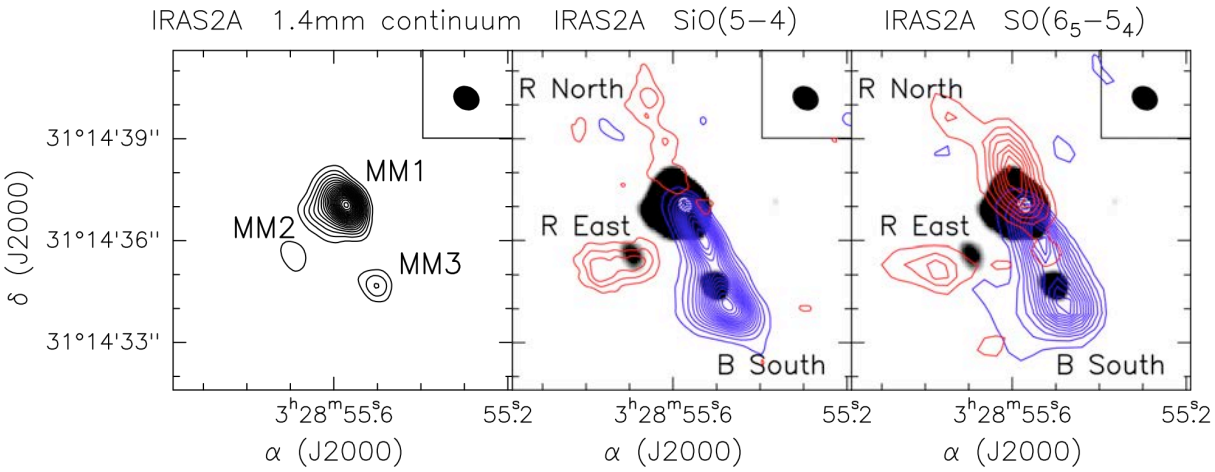
Un deuxième objectif sera de comprendre les processus qui contrôlent **la formation et l'évolution des cœurs préstellaires**. Un effort particulier sera dédié à mieux caractériser les propriétés intrinsèques des cœurs, telles que: leur **masse et leur structure en densité,** par une caractérisation précise de la croissance des grains, de leur émissivité submm, et de l'effet « *coreshine* » (études combinées *Herschel* et *Spitzer,* et à plus long terme avec le JWST) ; leur **magnétisation,** par mesures d'effet Zeeman (SMA, NOEMA, ALMA) ; leur **âge et leur taux d'ionisation par les cosmiques**, par l'étude de traceurs chimiques sensibles à ces paramètres (rapports ortho/para et fractionnement isotopique, désorption non-thermique des manteaux de glace ; *Herschel*, IRAM, APEX, GBT). Ces observations seront comparées aux prédictions de modèles dynamiques MHD 1D et 3D couplés de façon auto-cohérente à la chimie et au transfert radiatif, ainsi qu'à des modèles de pénétration des rayons cosmiques dans les cœurs magnétisés (développements en cours dans le cadre de l'ANR

COSMIS). Cette approche très complète permettra à terme de **discriminer entre les différents scénarios de formation des cœurs denses**.

Plusieurs équipes (CEA/IAM, IAS, IRAP, LERMA) sont déjà en pointe sur ces divers aspects (voir Bilan), et soutenues par l'expertise de notre communauté en modélisation d'agrégats, en taux de réaction à très basse température, et en photodésorption des glaces (voir le chapitre « Origine de la complexité de la matière »).

IV.2.2 Phase d'effondrement gravitationnel et formation des disques protoplanétaires

La phase d'effondrement gravitationnel est une étape clé pour comprendre l'histoire de la matière, depuis le milieu interstellaire jusqu'aux constituants initiaux des systèmes protoplanétaires. Les études récentes ont mis en évidence **l'apparition rapide de molécules complexes** dans les 100 AU centraux des protoétoiles (« *hot corinos* »), mais avec des différences d'abondance surprenantes entre objets très proches. Une problématique fondamentale pour PCMI dans les prochaines années sera **d'en comprendre les causes et les implications sur la physico-chimie et la dynamique de cette phase**. Il faudra pour cela disposer de plus d'observations, ainsi que de modèles détaillés d'effondrement couplant processus macroscopiques et microscopiques. Un enjeu sera de trouver les meilleurs critères physiques et chimiques permettant d'identifier les plus jeunes objets encore en phase de contraction (*First Hydrostatic Cores*) pour lesquels plusieurs candidats ont déjà été proposés. L'expertise PCMI sur la modélisation couplant physique et chimie et l'analyse d'observations multispectrales devrait être un atout précieux pour progresser. Notons ici aussi une interface forte avec PNPS car la fragmentation pendant l'effondrement va déterminer la masse et la multiplicité des étoiles.



Cartes à 0.7'' = 150 AU de résolution de la protoétoile de faible masse NGC1333-IRAS2A obtenues avec l'interféromètre de l'IRAM/PdBI (Large Program CALYPSO ; collaboration CEA/AIM, IPAG, IRAM, IRAP, LERMA). La structure se révèle complexe, avec une source principale (MM1), un compagnon (MM2) source d'un deuxième jet, et une zone de choc (MM3) vue en CH_3OH et réminiscente d'un hot corino. ALMA et NOEMA permettront de dévoiler la structure interne de ces enveloppes et jets, et de résoudre la multiplicité dans les régions plus lointaines où se forment les étoiles de plus forte masse.

NOEMA et ALMA vont permettre de sonder les enveloppes de protoétoiles à une résolution bien meilleure (5-50 AU) et, *via* un éventail de molécules traçant différentes températures et densités, de contraindre **la structure thermo-chimique, le champ B, les propriétés d'éjection, et la taille initiale des disques centrifuges** lors des toutes premières phases d'effondrement. Cela offrira un test capital **de l'origine des *hot corinos*** (évaporation thermique des manteaux de glace ? ou chocs liés à l'éjection?) ainsi que des **modèles MHD d'effondrement**. Des résultats entièrement nouveaux sont à prévoir pour les prochaines années, en particulier dans les sources de masses intermédiaires à fortes, où les observations actuelles indiquent souvent la présence de **sources multiples** mais souffrent encore de la confusion. Grâce à leur grande expertise en interférométrie submm et leurs étroites collaborations

avec les modélisateurs, les équipes françaises sont en excellente position pour mener ces travaux (CEA/AIM, IPAG, IRAM, IRAP, LAB, LERMA).

Du point de vue de la modélisation, notre compréhension des phases d'effondrement a considérablement progressé ces dernières années grâce à un programme exhaustif de simulations numériques lourdes en MHD 3D (voir chapitre « Faits marquants »). Plusieurs aspects intimement liés aux expertises du PCMI restent à explorer. Tout d'abord, le calcul de prédictions synthétiques d'observations **en raies moléculaires** pour NOEMA et ALMA, qui passe nécessairement par le calcul de **l'évolution chimique hors-équilibre** dans l'enveloppe et le (proto)disque. C'est un domaine de recherche très actif au niveau international et la communauté PCMI y est particulièrement bien placée, grâce à ses expertises en physico-chimie, aux outils déjà développés dans le cadre du programme Astronet STARFORMAT, et au soutien de deux ANRs jeunes chercheurs (FEEDBACKISM et CHEMODYN ; LERMA/ENS-Lyon, IPAG). D'autre part, **l'influence sur la dynamique des effets de MHD non idéale**, tels que la diffusion ambipolaire, doit aussi être étudiée. En diminuant l'efficacité du freinage magnétique, cela augmentera la taille des (proto)disques par rapport au cas MHD idéale. De plus, le chauffage par friction ion-neutre pourrait **inhiber la fragmentation et modifier la chimie**. Les travaux menés sur les cœurs denses (voir ci-dessus) seront très utiles pour injecter les « bons » degrés initiaux d'ionisation et tailles de grains dans ces simulations, et pour faire les prédictions observationnelles correspondantes.

IV.2.3 Physico-chimie des disques et conditions initiales de la formation planétaire

Comprendre la formation des systèmes (exo)planétaires, l'origine de leur diversité, et les conditions qui favorisent leur « habitabilité » est un des enjeux majeurs de l'astrophysique du XXIème siècle. L'étude de leurs précurseurs, les **disques protoplanétaires** de gaz et de poussières gravitant autour des étoiles jeunes, est pour cela une étape essentielle. Cette phase représente naturellement **un riche champ d'exploitation des expertises PCMI.** En effet, une fraction significative de la surface des disques protoplanétaires se comporte comme une **région de photo-dissociation** (PDR; voir Partie IV.2.4 ci-dessous), tandis que le plan médian a des caractéristiques proches de celles d'un **cœur moléculaire dense et froid;** c'est dans la zone interne chaude < 10 AU où les manteaux de glace s'évaporent que se forment probablement les planètes telluriques. Dans ces disques très denses, l'évolution physique et chimique de la matière est rapide et régulée par de multiples processus (coagulation et sédimentation des grains, adsorption et (photo)désorption des molécules sur les grains, irradiation UV et X, dissipation de la turbulence MHD, …) qui se reflètent dans l'émission du gaz et des grains. On est ici au cœur des compétences de PCMI, avec une interface forte avec PNP et PNPS.

Les questions majeures où les expertises du PCMI sont particulièrement importantes incluent:

- Sur quelle échelle de temps et dans quelles régions du disque (zone morte, *snow-line*, vortex…) les grains croissent-ils ?
- Quel est l'effet en retour de la croissance / sédimentation des grains sur la structure en température, la chimie, la turbulence ?
- Quelle est la « vraie » masse en gaz des disques protoplanétaires, et sont-ils instables gravitationnellement dans leurs parties externes ?
- En quoi la composition chimique et la structure du disque dépendent-elles des propriétés intrinsèques du système (âge, masse totale du disque, flux UV et X de l'étoile…) ?
- Comment la matière interstellaire est elle incorporée au disque protoplanétaire ? Peut on trouver des traceurs physico-chimiques de cette histoire ?
- Par quels processus (photo-évaporation, accrétion, vent de disque MHD, vent stellaire…) et à quel moment le gaz est-il finalement dispersé?

Dans les années qui viennent, ces questions seront abordées à la fois par la modélisation et par les observations.

Avec la mise en route d'ALMA, **l'observation des disques** protoplanétaires à très haute résolution angulaire (3-20 AU) vient d'entrer dans une ère nouvelle. Celle-ci sera cruciale pour préparer les études futures avec le VLTI, JWST et plus tard l'e-ELT des régions centrales < quelques AU où *Spitzer,* HST et CRIRES/VLT ont révélé l'existence de molécules en abondance (H_2, CO, vapeur d'eau, acétylène, HCN, etc.). L'un des apports majeurs d'ALMA sera la possibilité d'étudier des échantillons significatifs de disques, et pour la première fois de développer une séquence évolutive et d'étudier l'effet des paramètres du système, à la fois sur la poussière et sur la physico-chimie du gaz. Les avancées attendues d'ALMA à ces deux niveaux dans les prochaines années sont décrites ci-dessous.

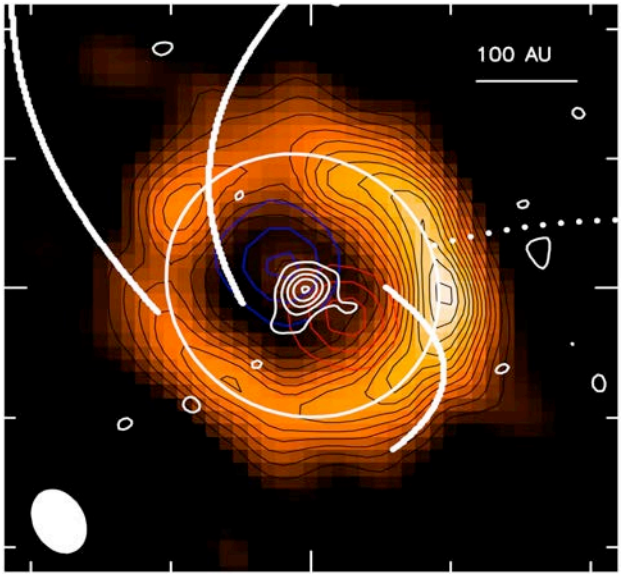
- *Composante de poussières* : En raison de l'opacité des disques, seul le domaine sub-millimétrique permet de sonder les régions proches du plan médian, cruciales pour les processus de coagulation, de sédimentation et plus généralement de ségrégation gaz/grains. Grâce aux observations IRAM/PdBI, CARMA, et VLA, la ségrégation en taille des poussières en fonction du rayon est maintenant établie. ALMA apportera les premières déterminations quantitatives de la **ségrégation verticale** et, grâce à sa grande couverture spectrale, de la **température des gros grains** qui est un test crucial des modèles. ALMA permettra aussi de discerner si les **cavités internes** vues en poussière sont liées à la croissance des grains ou à la présence de planètes ; et de mettre en évidence la présence de **vortex ou d'ondes spirales**, qu'il faudrait alors incorporer aux modèles chimiques.

- *Composante de gaz* : Un enjeu majeur des prochaines années sera de **quantifier la structure thermo-chimique et la masse totale du réservoir de gaz,** concentré dans le plan médian. Ce dernier est trop froid pour émettre en H_2, et difficilement détectable en HD (quelques détections au plus avec *Herschel*). La meilleure méthode reste donc le recours à des traceurs moléculaires indirects, dans le domaine mm/submm. Les mesures de **densité et température du gaz** exigent l'observation de nombreuses transitions d'une même molécule, défi pour lequel seul ALMA offre la couverture spectrale et la sensibilité nécessaires. Une connaissance précise des coefficients d'excitation collisionnelle sera également indispensable, à laquelle PCMI contribue déjà activement (eg. IPAG, LOMC, LERMA). L'ajustement aux modèles (voir ci-dessous) permettra de localiser la zone d'émission de chaque espèce et de reconstruire la **distribution radiale et verticale** de densité et température, avec à terme la première estimation fiable de **la masse en gaz des disques.** ALMA ouvrira aussi de nouveaux domaines, comme **la mesure du champ magnétique** via la polarisation, la physico-chimie du gaz présent à l'intérieur des « cavités » de poussière, et le processus de dissipation du gaz (photo-évaporation vs accrétion turbulente ou éjection MHD…).

En ce qui concerne les modèles de physico-chimie des disques, plusieurs améliorations restent à apporter pour interpréter les observations de façon fiable. Les principaux défis portent sur **la chimie de surface et les processus de désorption non-thermiques** (par les UV, X, cosmiques), qui jouent un rôle fondamental dans les zones froides au-delà de la *snow-line* (rayon > 3-10 AU environ), où la plupart des molécules sont adsorbées sur les manteaux de glace ; les **aspects 3D de la pénétration du rayonnement UV** ; et la prise en compte dans la chimie et le transfert de rayonnement de la **croissance / sédimentation des grains** et de leur **distribution en température** selon leur taille.

Sur un plan plus « dynamique », les temps d'accrétion sont courts et les disques protoplanétaires ont **une chimie hors-équilibre** qui va dépendre des **conditions initiales** considérées. L'évolution chimique pendant la phase d'effondrement est en cours de calcul (voir Partie IV.2.2 ci-dessus), mais l'extension jusqu'aux âges ~ 10^6 ans où les disques protoplanétaires deviennent observables reste à faire. Une autre question majeure à explorer pour des modèles plus réalistes est **l'impact sur la chimie et sur les grains du mélange turbulent et du chauffage intermittent** dûs à l'instabilité magnéto-rotationnelle (MRI) − le processus généralement invoqué pour expliquer l'accrétion.

La communauté PCMI est d'ores et déjà très bien placée dans la compétition internationale sur ce sujet, grâce à ses travaux pionniers effectués avec les instruments de l'IRAM et son implication dans plusieurs projets ALMA « Early Science » (LAB, IRAM), son expertise du couplage entre dynamique, chimie et grains dans les disques (LAB, LERMA, CEA/IAM, LMCM, LUTH), ainsi que la forte synergie entre astrophysiciens et physico-chimistes que PCMI entretient depuis de nombreuses années.



Le disque de l'étoile jeune AB Aur *observé avec l'interféromètre de l'IRAM (Tang et al. 2012) dévoile une structure très complexe : Un anneau de poussière inhomogène (en orange) piqué à un rayon de 145 AU (ellipse blanche), un disque gauchi de CO avec du gaz aussi présent à l'interieur de la cavité (contours bleus et rouge), et des « bras spiraux » à plus grande échelle (arcs blancs épais) qui pourraient tracer l'enveloppe résiduelle en effondrement sur le disque. Un suivi à plus haute résolution avec ALMA « Early Science » est déjà en cours (LAB, IRAM). Les observations ALMA vont révolutionner notre compréhension de la structure et de l'évolution dynamique et physico-chimique de tels systèmes.*

IV.2.4 Mécanismes de rétroaction stellaire (« feedback ») et cycle de la matière interstellaire

Par leur rayonnement UV et X et leurs phénomènes d'éjections de matière, les étoiles exercent une puissante rétroaction sur leur milieu environnant, qui modifie son état thermique, chimique et dynamique jusqu'à des distances de plusieurs parsecs. Cette rétroaction joue un rôle crucial dans **l'enrichissement chimique de la matière interstellaire et dans le renouvellement de sa population de grains** ; elle est aussi une source importante de compression, de chauffage, de turbulence, et d'ionisation qui participe au **brassage continu** entre les phases du MIS. Par ce biais, elle peut en retour influer − en positif ou négatif − le taux de formation stellaire et l'IMF local, ce dernier aspect étant d'un grand intérêt pour le PNPS et le PNCG.

Les recherches menées par PCMI visent à caractériser plus précisément les effets de rétroaction stellaire sur la structure du MIS, via l'observation et la modélisation de diagnostics physico-chimiques approfondis. Les travaux de la communauté PCMI française dans ce domaine portent principalement sur 3 types d'environnements : **les régions de photodissociation, les ondes de choc, et les enveloppes AGB et zones de mélange associées.** Les enjeux principaux pour les prochaines années sont décrits ci-dessous.

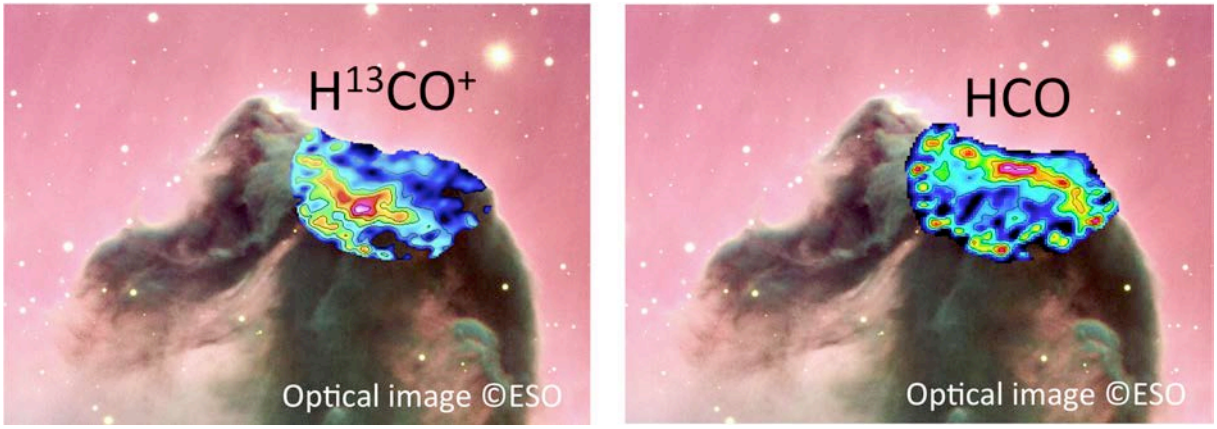
Régions de photodissociation : Les régions de photodissociation (PDR pour *Photo-Dissociation Regions*) sont le lieu où les photons ultra-violets lointains (FUV) provenant des étoiles induisent **la transition entre la phase atomique et la phase moléculaire du MIS**. Elles sont présentes à toutes les échelles, depuis le milieu diffus et les régions de formation d'étoiles massives jusqu'aux surfaces des disques protoplanétaires et aux enveloppes des nébuleuses planétaires. La physico-chimie des PDRs dépend du flux FUV local, de la (sous)structure en densité du milieu irradié, et des propriétés des grains. L'étude des traceurs physico-chimiques des PDRs est donc un moyen puissant de **sonder ces trois paramètres fondamentaux à diverses échelles du MIS**, et représente pour cette raison une activité majeure de PCMI. En particulier le modèle PDR dit « de Meudon » développé au LUTH a acquis une reconnaissance internationale et est fortement sollicité pour interpréter les observations. Il fait partie du service on-line « Plateforme MIS-jets » (http://pdr.obspm.fr), récemment labellisé par l'INSU, qui devrait s'élargir dans les prochaines années pour inclure de nouveaux codes et des outils d'interrogation plus élaborés.

Les grands défis dans ce domaine pour les années à venir sont d'une part une meilleure description des **processus microphysiques et chimiques dans les modèles** (évolution des propriétés des grains sous l'effet du flux UV, taux de formation des molécules sur les grains, effet des rayons X…), et d'autre

part une **caractérisation plus fine de la morphologie, de la dynamique et de l'énergétique** de ces régions. Le premier aspect est développé dans le chapitre « Origine de la complexité de la matière ». Les perspectives de travail sur le deuxième aspect sont décrites ci-dessous.

La **structuration à petite échelle des PDR** sous forme de filaments et de régions denses (10^5 à 10^6 cm^{-3}) au sein d'un milieu plus dilué est un sujet de recherche très actif. Les détections par *Herschel* de transitions rotationnelles de CO jusqu'à J~23 et de OH excité ont confirmé la présence de zones très denses (voir « Faits marquants ») mais **leur morphologie et leur origine** restent à explorer, ainsi que leur **lien avec les phénomènes dynamiques** tels que l'évaporation de la couche chaude de surface (IRAP, Berné et al., en prép.), et la présence d'une cascade turbulente dans le milieu dilué (LERMA, Godard et al. 2012). L'analyse complète des observations *Herschel* et les observations à plus haute résolution avec ALMA et NOEMA permettront de progresser fortement sur ces questions. Ce champ d'étude nécessitera aussi de faire évoluer les modèles PDR 1D vers des **modèles 3D dépendant du temps**. Une approche complémentaire consistera à introduire le transfert de rayonnement UV et la chimie dans des simulations HD ou MHD. Les deux approches constituent des défis auxquels il devient possible de répondre grâce à l'augmentation des capacités de calcul (cf. Chapitre « Simulations Numériques »). Ces modèles plus réalistes pourront aussi être mis à profit pour contraindre la **photoévaporation et la turbulence à la surface des disques protoplanétaires**.

Un autre enjeu sera de dresser un **bilan énergétique fiable des PDR**. Les observations FIR/submm d'*Herschel,* PdBI/NOEMA et ALMA donnent accès à la température et l'émissivité des poussières, et à l'excitation et la cinétique du gaz. Il devient donc possible de mesurer l'efficacité de conversion de l'énergie FUV émise par les étoiles vers d'autres formes d'énergie: thermique du gaz et des grains, interne des molécules (états quantiques excités), mais aussi cinétique (évaporation, turbulence). Ces études poseront des **contraintes extrêmement fortes sur les modèles** et feront avancer significativement la compréhension des processus microscopiques qui gouvernent la structure des PDR.



*Cartes (fausses couleurs) de la **nébuleuse de la « Tête de cheval »** obtenues avec l'interféromètre PdBI (IRAM, LERMA, LUTH). La molécule $H^{13}CO^+$ trace le gaz froid alors que le radical HCO apparaît uniquement dans la face irradiée par les photons UV. ALMA et NOEMA apporteront des informations beaucoup plus fines et complètes de la sous-structure chimique et dynamique de régions de photodissociation comme celle-ci.*

Régions de chocs : Les étoiles produisent de puissantes éjections de matière à haute vitesse > 100 km/s lors de leur phase protostellaire (jets et flots bipolaires) et de leurs phases finales (explosions de Supernovae). Leur interaction avec le MIS moléculaire crée des ondes de choc qui compriment et chauffent le gaz, modifient sa chimie, et peuvent éroder ou fragmenter partiellement les grains de poussière. Le gaz comprimé se refroidit radiativement, et **l'analyse du spectre émis permet en principe de remonter aux paramètres fondamentaux du choc** (densité, vitesse, champ magnétique, âge). Mais un traitement détaillé du **couplage entre dynamique, température et chimie hors-équilibre** est nécessaire pour calculer la structure du choc (eg. la présence ou non d'un précurseur

magnétique où ions et neutres sont découplés) ainsi que les diagnostics spectraux prédits. C'est donc un domaine où l'approche pluri-disciplinaire de PCMI est essentielle.

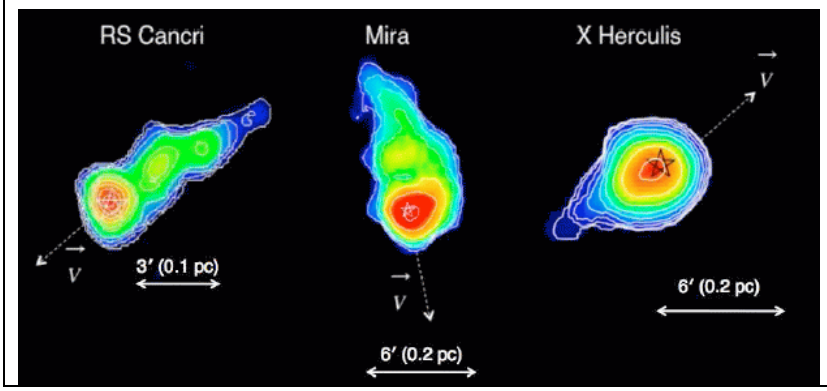
Les enjeux dans ce domaine pour les années à venir sont à la fois théoriques et observationnels. L'interprétation des données *Herschel* exige de nouveaux modèles de choc qui prennent en compte de façon auto-cohérente **l'irradiation par le flux UV de la source, ainsi qu'une distribution de chocs dans le lobe**. Un premier modèle à flux UV moyen a été validé sur les observations *Spitzer* en H_2 du Quintet de Stefan. Il devra être étendu aux flux UV plus intenses pour être appliqué aux régions à la base des jets et aux protoétoiles massives. La photodissociation par le flux Lyα produit *in-situ* dans les chocs dissociatifs devra aussi être considérée. Un effort important sera poursuivi pour mettre à disposition le code de choc développé par l'IAS et le LERMA, via le service labellisé « Plateforme MIS-Jets » qui distribue le code PDR de Meudon. **La modélisation de chocs en 3D** constitue un développement supplémentaire très souhaitable, mais qui pose des défis importants pour résoudre la zone de refroidissement et pour traiter la dynamique MHD multi-fluide du précurseur où ions et neutres sont découplés.

Sur le plan observationnel, le gain en résolution angulaire apporté par ALMA et NOEMA permettra de **clarifier la géométrie et la stratification chimique** des chocs moléculaires, et peut-être de **résoudre le précurseur magnétique** ce qui poserait des contraintes très fortes sur l'intensité du champ B. Appliqué aux jets protostellaires, ce type d'étude pourrait sévèrement en contraindre la zone de lancement et le mécanisme d'éjection, et des projets en ce sens sont déjà en cours sur ALMA « Early Science » (LERMA, IRAM, IPAG). Ces travaux se prolongeront par l'étude à très haute résolution des raies de H_2 avec le JWST puis l'e-ELT. De leur coté, APEX et SOFIA ouvrent des perspectives uniques pour la cartographie complète en CO à haut J et en [OI] des chocs étendus, qui permettra d'**évaluer enfin de façon fiable leur énergétique globale** ; cela sera crucial pour quantifier la rétroaction sur le nuage des flots d'étoiles jeunes (arrêt de l'effondrement du cœur dense, injection de turbulence dans le nuage, production *in-situ* de rayons UV et X…), et pour **tester les modèles d'accélération des rayons cosmiques** dans les restes de supernovae (en complémentarité avec FERMI), une question qui intéresse aussi de près le PNHE. Une fois les paramètres des chocs bien cernés, la confrontation des abondances chimiques prédites et observées permettra de contraindre **la composition du MIS pré-choc et post-choc** (eg. composition des manteaux de glace et des grains) et de **tester les réseaux chimiques à haute température et densité** (plusieurs milliers de K, 10^4-10^7 cm^{-3}), utiles aussi pour les atmosphères de disques protoplanétaires et les enveloppes d'étoiles évoluées.

Enveloppes d'étoiles évoluées et zones de mélange turbulent:

A la fin de leur vie, les étoiles dans leur phase géante rouge (AGB) éjectent des quantités importantes de matière enrichie en produits de nucléosynthèse. Ces enveloppes circumstellaires sont un des sites principaux où se condensent les grains de poussière. Poussée par la pression de rayonnement sur les grains, l'enveloppe atteint des fractions de pc en taille pour finalement se diluer dans le milieu interstellaire, contribuant ainsi à son évolution chimique et au renouvellement de sa population de grains. L'étude de ces objets représente donc un enjeu très important pour PCMI.

La **dynamique des enveloppes AGB** est étudiée principalement dans les raies mm de molécules pour les parties internes, et dans les raies d'hydrogène neutre et de carbone pour les parties externes où les molécules sont photo-dissociées par le champ UV interstellaire. La modélisation des profils de raies et la cartographie à grand champ permettent de contraindre le champ de vitesse et de reconstituer la variabilité de la perte de masse sur les derniers 10 à 100 mille ans (« coquilles »). Ces données servent en retour à contraindre les modèles d'accélération et à **comprendre le processus d'injection de matière stellaire** dans le MIS, ainsi que la **composition chimique du gaz et des grains.**



Traînées turbulentes *découvertes dans les enveloppes d'étoiles géantes rouges en phase de perte de masse intense (symboles étoilés), dans la direction opposée à leur mouvement propre à travers le milieu interstellaire (flèches). Ces images ont été obtenues au VLA dans la raie de l'hydrogène à 21 cm (LERMA ; Libert et al. 2010, Matthews et al. 2008, Matthews et al. 2011).*

Un nouvel enjeu du domaine pour ces prochaines années sera de clarifier la **cinématique et le processus de mélange dans les « trainées turbulentes »** récemment découvertes par une équipe du LERMA, où la matière stellaire est réinjectée dans le milieu interstellaire. Cela se fera en particulier grâce à des études en C, C^+ et HI à 21cm (*Herschel*, VLA, MeerKAT - précurseur de SKA). Un autre objectif majeur sera d'étudier la **structure physico-chimique de l'enveloppe moléculaire interne** à haute résolution angulaire (NOEMA, ALMA, VLTI) pour éclairer le processus de nucléation et croissance des poussières, et pour distinguer l'influence respective sur la chimie de la pénétration du flux UV ambiant, des réactions à la surface des grains, et des chocs induits par les pulsations stellaires. Ces études nécessiteront l'appui de calculs d'excitation ro-vibrationnelle afin de sonder les abondances moléculaires dans les régions internes chaudes et denses de l'enveloppe.

Références

Godard, B., Falgarone, E., Gerin, M., et al. 2012, A&A 540, A87

Libert Y., Winters J.M., Le Bertre T., et al. 2010, A&A 515, A112

Matthews, L. D., Libert, Y., Gérard, E. et al. 2008, ApJ 684, 603

Matthews L.D., Libert Y., Gérard E., et al. 2011, AJ 141, 60

Tang, Y.-W., Guilloteau, S. Piétu, V. , et al. 2012, A&A 547, A84

IV.3 Origine de la Complexité de la Matière

IV.3.1 Contexte

Des enveloppes d'étoiles en fin de vie aux régions de formation d'étoiles et aux systèmes planétaires, la matière subit **différents processus de complexification**. A partir d'éléments atomiques les plus abondants en particulier, se forment des molécules simples comme **H_2 et CO qui jouent un rôle primordial dans l'évolution physique et chimique des objets astrophysiques**. A l'autre bout de la complexification se trouvent **les grains de poussière**, constitués à base de minéraux (silicates, oxydes, sulfures) ou de carbone (carbures, carbones amorphes, PAH, grains mêlant structures aromatiques et aliphatiques, fullerènes, nanodiamants). Ces grains injectés dans le MIS durant les phases de fin de vie des étoiles sont des acteurs majeurs non seulement du cycle de la matière, des plus grandes aux plus petites échelles d'une galaxie mais aussi de formidables catalyseurs pour la formation moléculaire et sont, par exemple, directement **responsables de la formation de H_2,** acteur essentiel des réseaux chimiques en phase gazeuse. Ces grains subissent des modifications physiques et chimiques en fonction des processus auxquels ils sont soumis dans les différents environnements. Les observations de *Spitzer* et d'*Herschel* montrent que **l'évolution des grains sous l'effet du rayonnement UV** contrôle en grande partie la structure des PDR. Dans les régions sombres, l'analyse des données *Planck* et *Herschel* amène à considérer que des **processus de coagulation** (travaux en cours IAS et IRAP) sont à l'oeuvre. Enfin des **manteaux de glaces** (CO, H_2O, CH_3OH, NH_3, …) se forment par condensation et accrétion d'espèces simples et abondantes de la phase gazeuse dans les régions les plus froides, et se modifient considérablement par **photochimie UV et radiolyse des rayons cosmiques**. Cette évolution des propriétés des poussières a des conséquences sur la propagation du rayonnement, le chauffage du gaz par effet photo-électrique, et sur la formation même des molécules via les réactions chimiques à la surface des grains ou dans les manteaux de glace. Il est nécessaire de la prendre en compte dans les modèles et surtout dans les expérimentations et simulations de laboratoire, ce qui nécessite une meilleure connaissance des **processus fondamentaux: effet du rayonnement UV et des rayons cosmiques, coagulation, agrégation, formation des glaces** etc. A travers ces interactions, il existe un lien étroit entre l'évolution des grains et celle de la matière interstellaire, qui mène à la formation des étoiles.

La richesse de la composition chimique des environnements des étoiles jeunes est un indice fort de la capacité à former des molécules organiques complexes dans des environnements naturels, *a priori* hostiles. En sondant la **complexité moléculaire dans les régions de formation stellaire** et les processus mis en jeu, on espère mieux cerner la place qu'occupent ces molécules dans les scénarios de formation d'étoiles et dans l'héritage interstellaire au sein de la nébuleuse solaire primitive. Même si une filiation directe entre **la matière interstellaire et la matière primitive du système solaire** (glaces et grains cométaires, météorites de type chondrites carbonées) n'est pas établie, compte tenu du nombre et de la complexité des processus mis en jeu, il est clair que **des processus ou mécanismes comparables sont responsables de la complexification de la matière organique** dans le système solaire, et par conséquent dans des systèmes exoplanétaires et dans le MIS (successions de cycles de condensation / désorption des molécules, interactions gaz-grain, réactions induites par des phénomènes énergétiques impliquant des photons et des particules, etc…). D'une certaine manière, le passage de la chimie du MIS à celle de na nébuleuse primitive peut être considéré comme un phénomène évolutif qui révèle la continuité de cette évolution moléculaire des molécules simples aux molécules vraiment complexes. Notons que la sensibilité des mesures en radioastronomie permet la detection de nombreux variants isotopiques, portant des atomes de D, ^{13}C, ^{17}O, ^{18}O, ^{15}N etc. Les rapports isotopiques dans les molécules diffèrent des rapports des éléments et peuvent donc être utilisés comme des marqueurs des processus chimiques à l'oeuvre. Cette approche devrait permettre d'aborder la question de la filiation entre la matière interstellaire et la matière des disques, à condition que les mecanismes sous-jacents soient bien compris.

Par les observations en radioastronomie, seules les molécules en phase gazeuse peuvent être révélées. Néanmoins on s'attend à ce que **l'essentiel des molécules complexes se trouvent à la surface et dans les grains**, pouvant contenir des dizaines voire des centaines d'atomes, comme celles présentes dans les météorites primitives. Ceci représente un très **fort biais observationnel** car il n'y a aucun espoir de pouvoir détecter ces molécules en phase solide dans des environnements astrophysiques. Dans ce domaine, les **simulations et expériences en laboratoire jouent un rôle de premier plan** pour mieux quantifier les processus mis en jeu et avancer dans notre compréhension de la nature de la matière complexe qui reste piégée sur les grains. En bout de chaîne, seule la composition chimique des météorites très primitives peut donner accès à l'extraordinaire complexité organique et minérale d'une chimie commencée dans le MIS et qui se poursuit constamment jusqu'à la formation des planètes.

De manière générale, la complexification de la matière et la réponse de ses différentes composantes aux conditions physiques nous renseignent sur **l'histoire de cette matière** et nous permettent de **sonder les objets astrophysiques** (cf. chapitre "Des nuages moléculaires aux systèmes protoplanétaires"). Une compréhension de plus en plus détaillée de ces objets nécessite l'élaboration de modèles physiques et chimiques de plus en plus complexes qui sont en permanence confrontés à des observations de plus en plus précises. **La validité de ces modèles et leur capacité prédictive** reposent en grande partie sur les données physico-chimiques qui sont injectées dans ces modèles, données qui sont produites par des études expérimentales (cf. chapitre "Expériences de Laboratoire") et théoriques (cf. chapitre "Simulations Numériques"), au sein d'une activité d'astrophysique de laboratoire dans laquelle notre communauté PCMI est particulièrement active.

IV.3.2 Formation et évolution des grains

La connaissance de la nature des différentes populations de grains interstellaires est motivée, d'une part, par notre volonté d'utiliser ces grains comme **traceurs de processus** dans les environnements astrophysiques et d'autre part par l'étude de leur **rôle dans l'évolution physique et chimique de ces environnements**, ce qui nécessite des études expérimentales et théoriques ciblées pour lesquelles il est crucial de pouvoir **décrire la composition et la structure de ces grains** de la manière la plus précise possible.

L'exploitation des données obtenues dans le cadre des missions *Herschel*/*Planck* et *Spitzer* va continuer dans les années à venir afin d'avancer dans notre compréhension des **différentes populations de grains interstellaires, leur nature et leur** évolution dans différents types d'environnements. Des premiers résultats ont été obtenus (voir bilan et faits marquants) mais il faut maintenant les approfondir et renforcer les liens avec les études en laboratoire. Par exemple, notre communauté PCMI est impliquée dans l'identification des **molécules polycycliques aromatiques hydrogénées** (PAH) qui sont considérés comme les plus petits grains de poussière et jouent un rôle fondamental dans l'évolution physique et chimique des PDR. Une recherche de **modes de pliage du squelette carboné des PAH** est en cours afin d'identifier ces espèces en lien avec des travaux de modélisation de leurs spectres (IRAP) et des mesures en laboratoire (ISMO, SOLEIL). Bien que ces bandes soient très spécifiques, leur faible intensité rend difficile leur détection dans l'espace et en laboratoire. Il faut donc pousser à leurs limites les analyses des données d'*Herschel* et on peut s'attendre à de nouveaux résultats en lien avec les progrès effectués dans le traitement des données *Herschel*. Dans le domaine de **l'émission de continuum à grandes longueurs d'onde** mesurée avec les missions *Herschel* et *Planck,* l'analyse des observations n'en est qu'à ses débuts. Les travaux de modélisation en cours (code DUSTEM et autres développements à l'IAS et à l'IRAP) sont prometteurs et un des enjeux des années à venir sera de pouvoir utiliser directement les mesures des constantes optiques effectuées en laboratoire sur des analogues de grains interstellaires (IRAP). En effet, la prise en compte de la **variation de l'émissivité des grains en fonction de leur composition, leur structure** et leur température est nécessaire pour obtenir des résultats fiables et précis pour sonder les milieux astrophysiques tels que le MIS, les cœurs pré-stellaires, les galaxies ou encore les avant-plans cosmologiques. L'émission des grains est en effet utilisée directement pour l'estimation de la masse, de

la température (/du champ de rayonnement), l'étude de la formation stellaire et des processus d'effondrement, l'estimation des densités de surface des disques protoplanétaires.

Des simulations en laboratoire sont également en cours (IAS) afin de relier les modifications de la matière solide aux conditions physiques (photons UV et X, rayons cosmiques…). Il reste encore beaucoup à faire dans ce domaine qui est en lien étroit avec l'accès aux grands instruments de la physique (rayonnement synchrotron et accélérateurs d'ions, voir "Expériences de laboratoire").

Les mesures de l'émission polarisée de la poussière effectuées par *Planck* apportent des contraintes nouvelles sur les propriétés de celle-ci, en particulier sur les processus d'alignement des grains avec le champ magnétique local (étoiles en formation) ou à plus grande échelle (champ galactique) et sur le role du rayonnement dans le processus d'alignement. Ce travail en est juste à ses débuts et de nouveaux résultats observationnels sont attendus avec la mission ballon PILOT (voir "Moyens Observationnels"). L'analyse des observations pose également la question du **mécanisme responsable de l'alignement des grains dans le champ magnétique**.

Notre connaissance de la nature et des propriétés des grains reste encore trop partielle, et la question de leur formation en est à ses prémices. D'une part, il existe trop peu d'observations à haute résolution spatiale qui permettent de contraindre cette formation dans les étoiles évoluées. Ceci devrait s'améliorer dans les années à venir avec ALMA et le VLTI. D'autre part, très peu d'expériences de laboratoire s'intéressent à la question de la **formation et** de la **croissance des grains** (efforts en cours sur les nanograins carbonés à l'ISMO et l'IAS). Les données observationnelles à venir devraient motiver de nouvelles études en laboratoire. Des réponses sont à apporter à des questions aussi importantes que la structure de la poussière formée (amorphe/cristalline/poreuse), sa composition, son évolution au sein de l'enveloppe circumstellaire et lors de l'injection dans le MIS (rôle des vents stellaires, des photons…).

IV.3.3 Vers quelle complexité moléculaire

La **diversité de la composition chimique** des divers environnements interstellaires est étonnante en regard des conditions extrêmes où se forment les molécules. L'exploration de cette diversité grâce aux **relevés spectraux**, et la modélisation de ces divers environnements sont en plein essor, bénéficiant du saut quantitatif en sensibilité, résolution angulaire et capacité numérique des nouveaux instruments comme ceux mis en service à l'IRAM et, depuis 2009, *Herschel* (HIFI).

Ces dernières années ont connu un essor important de la recherche de **complexité moléculaire dans les régions de formation des étoiles**. Cette complexité résulte de l'évolution de la matière depuis le cœur dense préstellaire jusqu'à l'environnement circumstellaire des étoiles jeunes (disques proto-planétaires et flots moléculaires). Un scénario possible de molécules complexes consisterait en la séquence suivante : a) formation de glaces de molécules partiellement hydrogénées, comme H_2O, H_2CO, CH_3OH et NH_3 dans la phase préstellaire (dans les cœurs denses et froids) ; b) formation, évaporation et altération de molécules complexes pendant la phase de formation de la protoétoile (plus spécifiquement dans les « hot cores » et « hot corinos ») en raison du chauffage de la matière et de son évaporation partielle des grains; c) condensation de ces molécules complexes dans des glaces dans les régions les plus froides de l'environnement circumstellaire (au sein des disques proto-planétaires) ; le transport de cette matière vers les régions internes chaudes des disques proto-planétaires induit par la dynamique du disque va amener la formation de nouvelles molécules de plus en plus complexes. Néanmoins d'autres scénarios peuvent être mis en jeu. La détection récente de molécules complexes dans un cœur préstellaire froid est inattendue (Bacmann et al. 2012) car elle exclut dans cet objet les mécanismes de formation et de désorption thermiques. Les expériences de laboratoire permettent aussi d'exclure la formation de ces molécules dans la phase gazeuse. Il reste à démontrer quel mécanisme pourrait opérer sur les grains, alors que les réactions entre neutres ont une barrière d'énergie difficilement surmontable. Donc, les voies de formation de ces molécules complexes restent un mystère à élucider et une priorité pour PCMI.

Le nombre de **molécules complexes détectées en phase gazeuse grâce aux radiotélescopes** ne cesse

de croitre (ex. acétate de méthyle, Tercero et al. 2013). Ce progrès est lié à une stratégie d'analyse des surveys spectraux mettant en jeu la soustraction des contributions des espèces connues les plus abondantes et de leurs isotopologues. Ceci nécessite un travail de modélisation qui utilise les paramètres spectroscopiques obtenus par l'expérience et la théorie. Notre communauté PCMI est particulièrement active dans ce domaine avec des activités observationnelles (IPAG, IRAP, LERMA, LAB…), des mesures de spectres en laboratoire (PhLAM, ISMO), des calculs d'excitation collisionnelle (IPAG, LERMA, LOMC, MSME,…) ainsi que des outils de modélisation de spectres comme CASSIS (IRAP) et SPECTCOL (LERMA). Ce travail va se poursuivre dans les années à venir avec l'analyse des surveys spectraux obtenus avec Herschel mais aussi des nouvelles données à l'IRAM et ALMA (voir "Moyens Observationnels").

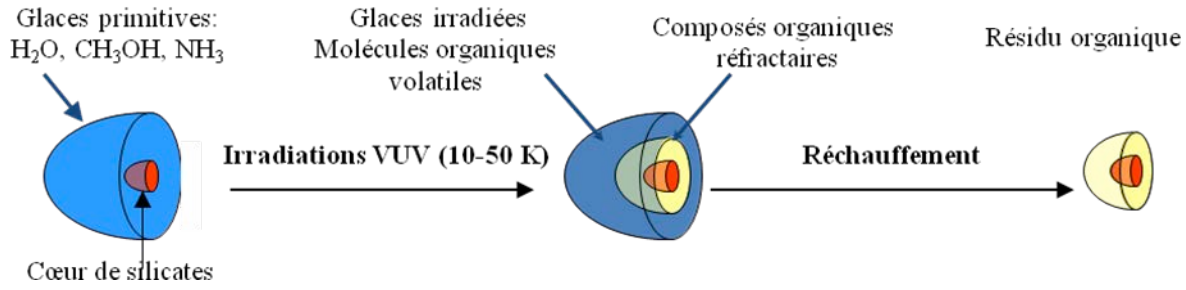


Schéma illustrant les expériences de simulation réalisées en laboratoire sur les glaces

Même si une partie de la complexification chimique peut résulter de réactions chimiques en phase gazeuse (par ex $C^+ + CH_4$, Hassel et al. 2008), on s'attend à ce que cette complexité mette en jeu principalement des **processus sur les grains**. Une approche plus quantitative nécessite le support, essentiel, des expériences de laboratoire et des calculs théoriques. Ces études ouvrent de nouvelles questions. Par exemple, d'un point de vue théorique, la formation de molécules aussi simples que le formaldéhyde ou le méthanol sur la surface des grains n'est toujours pas comprise car les calculs prédisent des barrières d'activation impossibles à surmonter aux températures des grains de poussière des nuages moléculaires. Et pourtant, ces molécules se forment dans les expériences de laboratoire aux mêmes températures. De plus se pose la question de la faible **efficacité de photodésorption** du méthanol des grains. Intervient ensuite la question du **rôle de l'apport d'énergie, par les photons UV et/ou thermique**, qui induit une chimie active avec la formation de ces molécules ainsi que de molécules de plus en plus complexes. Dans les régions sombres, cette photochimie, induite par l'UV secondaire produit par interaction des rayons cosmiques avec l'hydrogène moléculaire, ayant un grand pouvoir de pénétration, apporte un moyen efficace de complexification au sein même de régions autrement jugées protégées. Il faut aussi comprendre comment l'énergie libérée dans les réactions de surface interagit avec le substrat et permet éventuellement la libération dans la phase gazeuse d'une partie des molécules formées. Une première expérience a montré l'importance du phenomène de desorption chimique dans le cas de H_2O (Dulieu et al. 2013).

Les simulations en laboratoire montrent que les **résidus formés lors de l'irradiation UV de glaces** contiennent en fait une très grande diversité moléculaire et que l'analyse de cette diversité ouvre de nouvelles questions en lien avec l'analyse de la matière carbonée des météorites. Notons que les résidus organiques des glaces irradiées sont recouvrés pour analyse à des températures élevées (300 K). On peut donc s'attendre à ce qu'**une partie importante des molécules complexes reste piégée sur les grains interstellaires**. Comprendre la formation des molécules sur les grains est une des activités forte de notre communauté et qui va naturellement se poursuivre dans les années à venir. La communauté PCMI bénéficie sur ce sujet de la forte **synergie Chimie/Astrophysique** qui est indispensable pour progresser sur ce problème. Les années à venir vont voir des progrès dans le

développement de **modèles d'astrochimie** qui permettent de combiner les résultats des études de laboratoire (PIIM, LPMAA, LERMA, LADIR, IAS,…) avec les simulations des conditions interstellaires (IPAG, LAB) pour les comparer aux observations (IPAG, IRAP, LERMA, LAB…). Il faut par ailleurs aussi songer à prendre en compte de plus en plus les instruments de chimie analytique classique (de type GC-MS) et plus sophistiqués (MALDI-TOF, Orbitrap, FT-ICR) et renforcer l'interdisciplinarité avec les communautés voisines qui traitent du problème de la chimie météoritique.

Il reste encore beaucoup à comprendre sur la complexification moléculaire dans l'espace : où, comment et quand sont les trois questions clés. Spécifiquement, quel est le rôle des processus thermiques, des rayons cosmiques et des photons UV dans cette complexification ? Ce rôle est en fait conjoint, tous ces processus opérant en même temps d'où l'**importance des simulations de laboratoire**. Quelle complexité moléculaire est atteinte sur les grains? Quels sont les processus qui forment et détruisent les molécules complexes, limitant ainsi la complexité moléculaire, sur les grains et dans la phase gazeuse? Quelles molécules complexes sont incorporées dans la nébuleuse solaire primitive ? D'un point de vue observationnel, **ALMA** va permettre un nouveau pas dans l'étude de la complexité moléculaire. En sondant les environnements à plus petite échelle, **ALMA** facilitera **l'identification des conditions et des mécanismes de formation et de destruction des molécules.** En permettant également de détecter des molécules plus complexes et/ou moins abondantes, ALMA fera progresser notre compréhension de l'**étendue des réseaux chimiques à développer pour atteindre une description fine des processus en jeu**. Enfin, d'un point de vue expérimental et théorique, les avancées réalisées dans notre connaissance des grains de poussière devraient permettre de **mieux cibler les mécanismes mis en jeu sur les grains** et d'**établir un schéma réactionnel permettant la description de la formation des molécules complexe**s. Rappelons qu'en dehors de notre communauté, la sonde Rosetta et son atterrisseur Philae, mission essentiellement européenne, va évidemment s'intéresser à ces problèmes de complexité et ne manquera pas d'interpeller les acteurs du PCMI qui s'intéressent aux disques avec des outils d'observation tout de même très limités dans leurs possibilités d'analyse de la vraie complexité organique et minérale.

IV.3.4 Processus physico-chimiques: grandes questions

Formation de l'hydrogène moléculaire: l'hydrogène moléculaire H_2 joue un rôle central dans l'évolution physique et chimique des PDR. La compréhension des processus qui contrôlent sa formation, sa destruction ainsi que son excitation est un élément essentiel de la modélisation des PDR. Les travaux récents en laboratoire et calculs théoriques permettent de mieux comprendre les mécanismes de formation de H_2. Il s'agit cependant d'un sujet complexe où beaucoup reste à faire pour déterminer des taux de formation sur les différents types de grains impliqués en tenant compte de l'**effet des défauts de surface et de la porosité sur la réactivité**. Les **très petits grains carbonés et PAH** doivent jouer un rôle dans la formation de H_2 dans le milieu diffus et les régions de photodissociation en général. Une difficulté supplémentaire est notre connaissance encore limitée de la structure des grains interstellaires.

Chimie en phase gazeuse et excitation: les modèles PDR se basent sur des réseaux de réactions chimiques qui, pour la plupart, ne prennent pas en compte l'**influence de l'exothermicité sur l'excitation des espèces**. Les résultats *Herschel* ont montré que pour certaines espèces, notamment mais pas uniquement CH^+, l'énergie libérée lors des réactions a un rôle sur l'excitation observée. L'un des défis futur sera de prendre en compte le couplage entre chimie et excitation dans les modèles.

Dans les régions centrales des cœurs denses, où la température peut-être très basse (~ 7 K), les processus de **fractionnement isotopique** (par ex. deutération) et de conversion ortho/para sont des diagnostics particulièrement sensibles. Le rapport ortho/para de H_2 est aussi un indicateur de l'âge du cœur. A ces basses températures, lorsque les différences d'énergie entre états de symétrie deviennent comparables à la température, les simplifications classiques sur les taux moyens de réactions ne sont plus valides et il faut implémenter un **réseau de chimie "*state to state*",** distinguant chaque état de symétrie des réactants et des produits. Des calculs quantiques pour déterminer les taux de réactions correspondants sont en cours pour les hydrures d'azote (IPAG), qui sont des traceurs importants des

régions centrales des cœurs denses.

Chimie à haute température jusqu'à ~1000K: les nouveaux moyens observationnels à haute résolution angulaire (ALMA, PdBI/NOEMA, VLTI, E-ELT) ouvrent la voie à une observation de plus en plus détaillée des environnements circumstellaires, dans des régions où la chimie à haute température joue un rôle fondamental comme la partie des disques proche de l'étoile ou les enveloppes d'étoiles évoluées. C'est dans ces derniers objets que se produisent la **nucléation et la croissance des grains de poussière** à des températures qui peuvent atteindre 1000 K. Il est donc important de considérer aussi les processus chimiques à haute température. Pour les poussières carbonées, il est souhaitable d'établir des liens plus étroits avec les communautés travaillant sur les milieux réactifs à haute température, comme celle de la combustion qui est particulièrement féconde.

Chimie sur les grains: De nombreuses molécules, H_2O, HCOOH, CH_3OH, ... se forment sur les grains interstellaires. La recherche sur les réactions chimiques à la surface des grains interstellaire n'en est qu'à ses débuts tant les mécanismes en jeu sont complexes. Ils sont cependant critiques à prendre en compte dans les modèles numériques et à confronter à l'efficacité de production de ces espèces par photolyse UV et radiolyse par les rayons cosmiques. L'un des enjeux des années futures sera de mieux contraindre les mécanismes d'adsorption et de réactivité sur les grains via des expériences en laboratoire et des calculs de dynamique moléculaire et de les implémenter dans les modèles astrophysiques des différents types d'environnements (PDR, proto-étoile,…). L'importance des différents mécanismes de désorption (désorption thermique, photo-désorption, désorption chimique, désorption par collision), qui remettent en phase gazeuse des espèces ayant été formées ou modifiées sur les grains, et influençant l'évolution de la phase gazeuse par un apport de matière constant, reste une question ouverte et notre communauté PCMI est bien placée pour faire avancer cette problématique. L'interaction entre les grains et les photons UV ainsi que les rayons cosmiques font partie du problème à résoudre. Des expériences très prometteuses sur SOLEIL portant sur la photo-désorption de CO sur des glaces ont commencé à donner des résultats spectaculaires. Ce type d'étude s'intensifiera dans les années futures car indispensables à une modélisation précise des environnements astrophysiques. L'étude des interactions gaz-grain est également un véritable enjeu pour la théorie car de nombreux aspects doivent être étudiés qui font appel à des méthodes différentes (cf. chapitre "Simulations numériques").

La question de la complexité moléculaire sur les grains est une question fondamentale et essentielle pour la chimie prébiotique qui certes dépasse le domaine du PCMI. Récemment, des études en laboratoire ont montré la richesse moléculaire sous forme d'acides aminés complexes, mais aussi la présence de liaisons peptidiques nécessaires à la formation d'oligopeptides dans les grains eux-mêmes. Protégés par ces grains, il n'y a pas de vraie limite à cette complexité moléculaire car le milieu présente la densité d'un solide et la possibilité d'un nombre très grand de réactions, de phénomènes non linéaires, de branchements, de catalyse, le tout pour amener à ces formations moléculaires complexes révélés par les météorites primitives. Le PCMI ne peut complètement ignorer cette phase terminale de l'évolution de la matière cosmique qui est le but même de la compréhension de nos origines. Cela suppose une réelle interdisciplinarité qui est pour l'instant très embryonnaire et un renforcement de l'interface PCMI/ PNP.

Grains carbonés et PAH: le potentiel des grains carbonés et PAH comme traceur des conditions physiques et chimiques locales repose sur l'identification exacte des porteurs et la compréhension fine des variations spectrales à corréler avec les grandeurs physiques locales (T, densité, flux UV). Ces espèces jouent un rôle prépondérant dans la dynamique et la chimie locales, par l'effet photoélectrique, la formation de H_2, et le transfert de rayonnement. De nombreux allotropes de la matière carbonée sont les porteurs des signatures observées dans les spectres en absorption et en émission dans différentes sources astrophysiques. Afin d'identifier la nature des grains carbonés, l'exploration des signatures spectrales sur l'ensemble de la gamme spectrale est nécessaire. On observe en particulier en absorption les carbones amorphes hydrogénés (HAC ou a-C:H) dans l'infrarouge moyen. Les molécules PAH et petits grains carbonés sont responsables d'une forte transition électronique dans l'UV autour de 217 nm (bump) et participent aux bandes diffuses interstellaires. En émission, les AIB (pour *Aromatic Infrared Bands*), aussi dénommées bandes "PAH" sont observées dans de nombreux objets entre 3 et 20 µm.

Depuis quelques années trois classes d'AIBs ont pu être mises en évidence grâce aux variations de leurs caractéristiques spectrales. La dernière classe d'AIB présente en émission des signatures comparables de certaines vues en absorption dans le milieu diffus et pose la question du lien existant entre ces différentes composantes.

A partir de ces observables, deux grandes populations se dégagent, l'une, les PAHs et les très petits grains (VSG pour *very small grains)*, avec un caractère polyaromatique dominant, et l'autre, carbones amorphes hydrogénés, avec une composante aliphatique importante. Se pose la question du lien entre ces composantes et de l'éventuel passage de l'un à l'autre. Dans ce cadre quel est le rôle de l'irradiation UV, du cumul de plusieurs processus d'altération simultanés (e.g. thermique+UV) ou de la taille nanométrique des grains 1-100 nm (l'évolution et la restructuration sous l'effet de l'irradiation d'un solide sont différentes de celle d'un nanograin). Par exemple, il apparaît de plus en plus clair que les PAH sont formés par irradiation UV de nanograins polyaromatiques dans les PDR, ce qui permet aussi de rendre compte de leur formation là où la croissance en phase gazeuse est difficile. La détection des fullerènes dans les environnements fortement irradiés en UV pose la question de leur formation possible par dissociation et isomérisation de grandes molécules PAH (Berné & Tielens 2012).

L'étude des petits systèmes tels que PAHs et nanograins pose le problème de la définition du concept de stabilité pour un milieu astrophysique: au laboratoire, la stabilité est souvent associée à un équilibre thermodynamique correspondant à une température donnée. Cette notion est plus complexe en astrophysique car si l'UV peut amener à la destruction, les processus de réactivité peuvent amener à la reconstruction de cette espèce. Il est également important que les taux mesurés en laboratoire ou simulés par la théorie soient injectés dans des modèles astrophysiques car eux seuls donnent accès aux échelles de temps pertinentes. Par exemple, Rapacioli et al. (2006) ont montré dans leur étude sur la stabilité des agrégats de PAH l'importance des événements multi-photons. Dans ce cadre, la pluridiscplinarité de PCMI et les liens forts entre chimistes, physiciens et astrophysiciens permet d'aborder la notion d'équilibre pour des édifices moléculaires complexes plongés dans des milieux astrophysiques. La stabilité de certaines signatures spectrales observées dans les environnements astrophysiques suggère que certaines familles d'espèces sont favorisées, alors que l'éventail des structures possibles *a priori* est énorme (environ 20000 isomères jusqu'à seulement 10 cycles aromatiques). Il reste à déterminer quelles familles exactement?

Enfin des progrès dans l'étude de la phase solide carbonée va impliquer de développer dans l'avenir une compréhension intime de la nanostructuration (microtexture) et texture (morphologie : sphère…), au travers des paramètres spectroscopiques. L'impact des défauts structurels et leur caractérisation sont essentiels. Les analyses bénéficieront des avancées issues des matériaux et des nanostructures (graphène, nano-oignons, nanotubes…) et ouvriront en particulier la voie à une meilleure compréhension des grains carbonés désordonnés (ni graphitique, ni amorphe).

IV.3.5 Cadre et interfaces

L'apport des physiciens et des chimistes est un atout majeur pour la communauté PCMI et s'exprime tout particulièrement dans ce chapitre de la prospective scientifique, dédié aux processus physico-chimiques via les études expérimentales et théoriques, les simulations expérimentales et les modèles astrophysiques.. L'expertise et les méthodes de pointe développées par ces communautés sont une garantie de la qualité et de l'originalité des résultats obtenus (cf, chapitres ***« Expériences de laboratoire » et « Simulations numériques »***) et la forte interaction avec les astrophysiciens est une garantie de la pertinence des résultats obtenus pour les problématiques astrophysiques. C'est cette spécificité interdisciplinaire PCMI que nous souhaitons préserver dans les années à venir.

Alors que l'INSU-AA est structuré en programmes, les communautés de physiciens et chimistes sont structurées en Groupements de Recherches (GdR). Nous citerons ici:

- le **GdR 3152 SPECMO** (Spectroscopie moléculaire, fédérant la plupart des activités expérimentales et théoriques de la discipline, ainsi qu'un certain nombre d'activités liées à la spectroscopie moléculaire : atmosphères terrestre et planétaires, astrophysique et astrochimie, chimie quantique, réactivité en phase gazeuse, dynamique et molécules d'intérêt biologique).

- le **GdR 3533 Edifices Moléculaires Isolés et Environnés** (les objets d'étude sont centrés sur les systèmes d'intérêts biologique, atmosphérique et astrophysique. Les études portent non seulement sur la caractérisation structurale, les mécanismes d'agrégation et de nucléation des espèces produites en phase gazeuse, mais aussi sur les processus de relaxation d'énergie et de fragmentation induits par une excitation externe).
- Le projet de **GdR Suies** (porté par Sylvain Picaud, UTINAM) fédérant une grande partie des recherches en France sur ces espèces, y compris l'interface avec l'astrophysique.

En plus des collaborations scientifiques, l'interaction entre ces GdR et le PCMI se concrétise par l'organisation régulière d'écoles ou d'ateliers, par exemple une école prévue en 2014 aux Houches sur le thème *« Les poussières, de la troposphère au milieu interstellaire ».*

Références

Bacmann, A., Taquet, V., Faure, A., et al., 2012, A&A 541, L12

Berné, O., & Tielens, A.G.G.M, 2012, PNAS 109, 401

Dulieu, F., Congiu, E., Noble, J., et al. 2013, Nature Scientific Reports, Volume 3, id. 1338

Hassel, G., Herbst, E., Garrod, R. T., 2008, ApJ 681, 1385

Rapacioli M., Calvo F., Joblin C., et al., 2006, A&A 460, 519

Tercero, B., Kleiner, I., Cernicharo, J., et al., 2013, ApJ 770, L13

Annexe 1:

Fiches Bilan
Projets soutenus par PCMI

Liste des projets soutenus par le programme PCMI

Observation – Modélisation Astrophysique

Vastel, Charlotte "*Soutien aux programmes d'observation temps ouvert d'Herschel*"
Madden, Suzanne "*The Herschel Survey of the Magellanic Clouds: HERITAGE*"
Zavagno, Annie "*Exploitation scientifique du programme Hi-GAL*"
Miville-Deschênes, Marc Antoine "*Analyse et modélisation des émissions interstellaires diffuses des données Planck*"
Ristorcelli, Isabelle "*Galactic Cold Cores: A Herschel survey of the source population revealed by Planck*"
Lallement, Rosine "*Extension de la cartographie 3D du milieu interstellaire proche*"
Guélin, Michel "*Etude de la matière Interstellaire aux longueurs d'onde millimétriques: chimie des anions*"
Bacmann, Aurore "*Etude des grains microniques dans le milieu interstellaire dense*"
Joblin, Christine "*Les PAH interstellaires vus par Herschel: observations OT1 et modélisation*"
Ferrière, Katia "*Polarisation et champ magnétique dans le Milieu Interstellaire*"
Falgarone, Edith "*Couplage chimie-dynamique: turbulence, champ magnétique et jets*"
Pety, Jérôme "*Couplage chimie-dynamique: turbulence, champ magnétique et jets: II - Etude fine de la chimie des PDRs sur un prototype: la nébuleuse de la Tête de Cheval*"
Le Bertre, Thibault "*Environnements circumstellaires et interaction avec le milieu interstellaire*"
Gounelle, Mathieu "*Du milieu interstellaire aux météorites et aux disques protoplanétaires*"
Dutrey Anne & Guilloteau Stéphane "*Physico-Chimie des Disques Protoplanetaires*"
Maret, Sébastien "*Chimie des phases précoces de la formation stellaire*"
Caux, Emmanuel "*Physico-Chimie des régions de formation d'étoiles*"
Hony, Sacha "*The physical conditions of star formation at low metallicity*"
Montmerle, Thierry "*Phénomènes d'irradiation à haute énergie dans les régions de formation d'étoiles*"
Boulanger, François "*La molécule H_2 actrice de la formation des galaxies*"
Galliano, Frédéric "*Photoionisation à Faible Métallicité: Interprétation des Spectres PACS & Spitzer de Galaxies Naines*"
Roueff Evelyne "*Molécules dans l'Univers: Observation et modélisation*"
Le Bourlot, Jacques "*Interprétation des données Herschel et ALMA*"
Le Petit Franck "*Herschel Oxygen Program*"

Physico-Chimie de Laboratoire: Spectroscopie

Bréchignac, Philippe "*Des PAHs aux nanograins interstellaires: signatures spectroscopiques en absorption et en émission*"
Joblin, Christine "*Spectroscopie et physico-chimie des macromolécules et nanograins carbonés. Du laboratoire aux observations*"
Rapacioli, Mathias "*Etude théorique des propriétés structurales, dynamiques et spectroscopiques d'agrégats de PAH neutres et ionisés*"
Pirali, Olivier "*Spectroscopie THz et IR d'ions moléculaires produits par décharge*"
Demyk, Karine & Meny Claude "*Spectroscopie FIR/Submm d'analogues de la poussière interstellaire avec ESPOIRS: Participation à l'interprétation des données Herschel/Planck*"
Walters, Adam "*Spectroscopie de laboratoire (millimétrique, et THz) pour l'exploitation des observations d'HERSCHEL de SOFIA et d'ALMA*"
Guillemin, Jean Claude "*Molécules: de l'interstellaire à la vie*"
Margules, Laurent "*Spectroscopie de laboratoire (centimétrique, millimétrique et submillimétrique) en soutien des projets Herschel, SOFIA et ALMA*"
Wlodarczak, Georges "*Spectroscopie de laboratoire (micro-ondes, millimétrique et submillimétrique) en soutien des projets Herschel, SOFIA et ALMA*"

Physico-Chimie de Laboratoire: Glaces, Grains, Gaz

Pauzat, Françoise "*Molécules et glaces interstellaires : théorie et expériences*"
Chiavassa, Thierry "*Evolution des grains interstellaires dans le milieu interstellaire: Formation de molécules organiques complexes.*"
D'Hendecourt, Louis "*MICMOC/ChiralMICMOC/MICMOS*"
Dartois, Emmanuel "*Simulateur d'Irradiation de Carbones Amorphes en Laboratoire*"
Fillion, Jean Hugues "*Photodésorption de glaces interstellaires*"
Dulieu, François "*Synthèse de molécules complexes sur des surfaces astrophysiques*"
Lemaire, Jean Louis "*Régions de formation stellaire galactiques et extragalactiques ; Spectroscopie VUV de CO et de ses isotopologues ; FORMOLISM: Formation de Molécules dans le Milieu Interstellaire*"
Canosa, André & Le Picard Sébastien "*Etude expérimentale en phase gazeuse de cinétiques de collisions de 6 à 500 K*"
Chabot, Marin & Béroff Karine "*Fragmentation de molécules hydrocarbonées électroniquement excitées*"
Michaut, Xavier "*CoSpiNu (Conversion de Spin Nucléaire en Matrice et en Phase Gazeuse)*"

Théorie des Processus Collisionnels

Faure, Alexandre "*Collisions moléculaires inélastiques : nouvelles perspectives théoriques*"
Lique, François "*Excitation collisionnelle de la molécule CN par He/H_2*"
Loison, Jean Christophe "*La molécule HNC en astrochimie*"
Honvault, Pascal "*Etudes théoriques de processus réactifs mettant en jeu l'oxygène moléculaire interstellaire*"
Hochlaf, Majdi "*Excitation rovibrationnelle des chaînes carbonées par He/H_2*"
Talbi, Dahbia "*Astrochimie Théorique*"

Bases de Données

Wakelam, Valentine "*Améliorations des données de cinétique*"
Dubernet, Marie Lise "*VAMDC et SUP@VAMDC Project*"

Titre du projet: Soutien aux programmes d'observation temps ouvert d'*Herschel*

Nom du porteur :	VASTEL					Prénom:	Charlotte
Courrier électronique	cvastel@irap.omp.eu						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	IRAP, 9 avenue du colonel Roche, BP44346, 31028 Toulouse Cedex 4					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR5277					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)			4				
Financement ANR *							

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	Responsable Projet	Institut CNRS principal
Partenaire Etranger	Responsable Projet	----------

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours...

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

L'eau en phase gazeuse a été détectée dans un grand nombre de sources caractérisées par de très fortes températures mais n'avait jamais été détectée dans des nuages froids avant *Herschel*. La sensibilité ainsi que la résolution spatiale/spectrale de l'instrument HIFI a permis pour la première fois la détection de la transition fondamentale ortho de l'eau (Vastel et al. 2010), en direction de la protoétoile de faible masse IRAS 16293. Les observations du Key Program PRISMAS montrent par ailleurs que de l'eau semi-lourde est présente au sein de toutes les régions de formation d'étoiles massives observées.
Cette demande a permis de financer 1 semaine d'observation au Caltech Submillimeter Observatory (Etats-Unis) pour observer la transition fondamentale de l'eau semi-lourde a 464 GHz, nécessaire (voir l'article de Coutens, Vastel, Caux et al. 2012) pour modéliser les abondances internes et externes d'un grand nombre de régions de formation d'étoiles massives. Ces observations sont couplées à des observations au sol (IRAM-30m) et satellitaires (*Herschel*/HIFI). Plusieurs articles sont en cours d'écriture. Une mission à Leiden a de plus été financée pour participer à un groupe de travail sur l'eau deutérée.

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

5 publications significatives avec titre et référence complète

Coutens, Vastel, Caux et al., "A study of deuterated water in the low-mass protostar IRAS 16293-2422" 2012, A&A 539, 132

Titre du projet: The *Herschel* Survey of the Magellanic Clouds: HERITAGE

Nom du porteur :	Madden					Prénom:	Suzanne
Courrier électronique	Suzanne.madden@cea.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	AIM, bât 709, CEA/Saclay, L'Orme des Merisiers, 91191 Gif-sur-Yvette					Institut Principal de rattachement	INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR 7158					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)		8					
Financement ANR *							

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
AIM, bât 709, CEA/Saclay, L'Orme des Merisiers, 91191 Gif-sur-Yvette	Hony, S., Okumura, K., Sauvage, M.	
AIM	Galliano, F., Panuzzo, P., Chanial, P.,	
AIM	Cormier, D., Galametz, M.,	
CESR	Bernard, J.-P.	
Strasbourg	Bot, C.	
IAS	Boulanger, F.	
	+ 40 additional foreign collaborators	

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

The *Herschel* Open Time Key program, HERITAGE (Meixner, Madden, Hony et al), was awarded 230 hours to Survey the Large and Small Magellanic CLouds (LMC : 9x9 deg ; SMC : 5x5 deg). The year 2010 was the first full year of data treatment, international collaboration and paper writing. December 2009 was the release of the *Herschel* Science Demonstration data to the Heritage team. CEA invested large technical effort into this large program, being responsible for the data treatment for the PACS and SPIRE. Final maps for publication for the Science Demonstration data was the first data treatment effort. The largest part of the PACS and SPIRE data treatment and map-making tests for HERITAGE have been done (and redone) by Pierre Chanial, Pasquale Panuzzo, Koryo Okumura and Marc Sauvage. 12 of the 50+ members of the Heritage consortium are from France and have provided a large part of the expertise in the science surrounding dust SED modelling of the LMC and SMC using Spitzer (SAGE – our large Spitzer program) and *Herschel* (HERITAGE) MIR to submm observations.

Team meetings were held at Space Telescope Science Institute, where the French team participated. Additionally we presented results at the AAS meeting #15. Hony presented results in Toulouse at the PAH meeting. The CEA hosted Margaret Meixner and her student David Riebel, for Margaret's sabbatical.

This first year resulted in a number of our HERITAGE papers in the *Herschel* Special Issue (some listed in the bibliography section below). Some of the first-time highlights included:

1. Discovery of the submm excess in the LMC, beginning at 500 mu. Due to the spatial resolution of *Herschel*, we were able to show for the first time, that the excess is anticorellated with the gas surface density. (Gordon, Galliano et al 2010).

2. We showed that amorphous carbon, not graphite, is a better description of the dust model for the low metallicity galaxies, such as the LMC. This was the first time it was shown, using a low metallicity galaxy, the

LMC, and requiring the submm data from HERITAGE to determine the spatial variations in the dust-to-gas ratios (Meixner, Galliano, Hony et al 2010)

3. First indications of CO-dark molecular gas in the LMC comparing the dust-to-gas ratios of the LMC, determined from the HERITAGE data (Roman-Duval et al 2010).

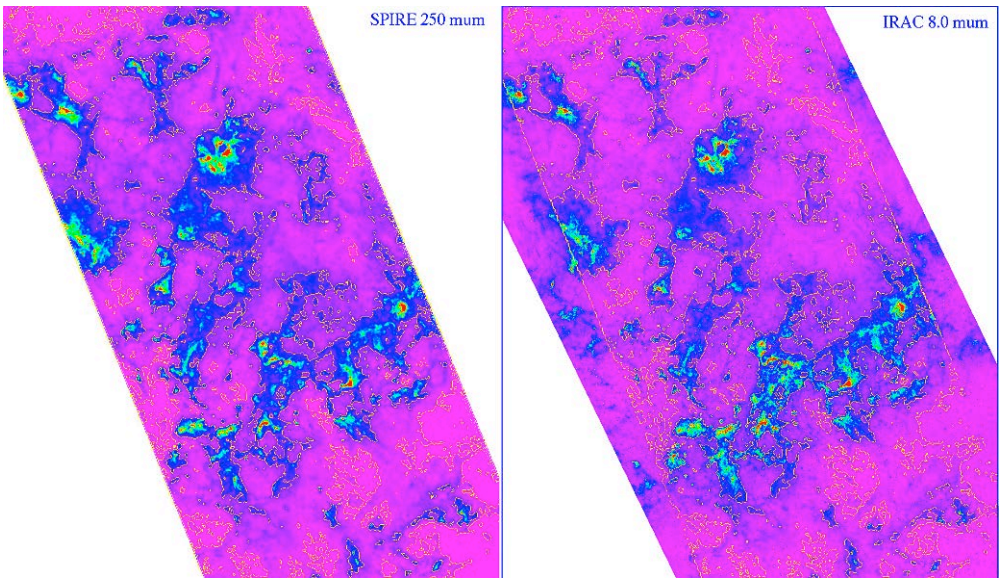


Figure: comparison of the Science Demonstration HERITAGE strip mapped in SPIRE 250 mu (left with the PAHs traced by Spitzer IRAC at 8 mu from our Spitzer SAGE program) (Meixner et al 2010).

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données
The *Herschel* HERITAGE and Spitzer SAGE data base, now public, were used. We are using the Galliano et al. dust SED model and the DustEM SED model.

5 publications significatives <u>avec titre et référence complète</u>

Gordon, K., Galliano, F., Bernard, J.-P., et al. ; Determining dust temperatures and masses in the *Herschel* era ; A&A 518 L89 (2010)
Hony, S., Galliano, F., Madden, S., Panuzzo, P. Meixner, M., et al. ; Unveiling the Morphology of the sites of High mass star formation in N44 and N63 in the LMC ; A&A 518 (2010)
Meixner, M., Galliano, F., Hony, S., et al.; HERshel Inventory of The Agents of Galaxy Evolution (HERITAGE): The LMC dust ; A&A 518 L71 (2010)
Kim, S., Kwon, E., Madden, S., Meixner, M., Hony, S. et al. Cold dust clumps in dynamically hot gas. A&A 518, L75 (2010)
Roman-Duval, J., Israel, F., Bolatto, A., Hughes, A., et al.; Dust/gas correlations from *Herschel* Observations; A&A 518 L74 (2010)

Titre du projet: Exploitation scientifique du programme Hi-GAL

Nom du porteur :	ZAVAGNO					Prénom:	Annie
Courrier électronique	Annie.zavagno@oamp.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	Laboratoire d'Astrophysique de Marseille (LAM) 38 rue F. Joliot-Curie 13388 Marseille CEDEX 13					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR7326					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)		9					
Financement ANR *		x	x	x			

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
JP Bernard, IRAP, Toulouse	***A. Zavagno***	***INSU***
D. Paradis, IRAP, Toulouse		
D. Russeil, LAM, Marseille		
L. Deharveng, LAM, Marseille		
I. Ristorcelli, IRAP, Toulouse		***----------***
D. Marschall, Paris 7		
N. Schneider, LAB, Bordeaux		
S. Bontemps, LAB, Bordeaux		

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

Le programme Hi-GAL est un programme-clé temps ouvert sur *Herschel* qui cartographie le plan de notre Galaxie dans 5 bandes de longueurs d'onde (70, 160, 250, 350 et 500 microns) avec les instruments PACS et SPIRE. Ce programme a une très forte valeur d'héritage et permet de conduire des travaux très variés sur le milieu interstellaire et la formation stellaire dans notre Galaxie. Il est également très utile dans les questions de soustraction d'émission d'avant plan dans les études du fond diffus. Jean-Philippe Bernard et moi sommes les deux représentants français au comité de pilotage de ce programme. Dans le cadre de l'exploitation scientifique des données Hi-GAL, nous co-dirigeons des groupes de travail liés, respectivement, à l'étude du milieu interstellaire et à la formation stellaire. Delphine Russeil coordonne le groupe de travail sur l'estimation des distances et l'étude de la structure galactique.

Concernant la formation stellaire nous avons publié un article montrant, sur une région HII galactique (N49), comment les données Hi-GAL nous permettent d'étudier l'importance de la formation stellaire induite au niveau galactique. Une étude globale est en cours afin de révéler, pour la toute première fois, l'importance de ce mode de formation d'étoiles dans notre galaxie.

Les perspectives à court terme sont très nombreuses, la richesse et l'aspect non-biaisé du sondage offrant la possibilité de nombreux programmes scientifiques. Nous souhaitons concentrer nos effort dans quatre directions principales: la poursuite de l'étude des propriétés du milieu interstellaire (en combinant les données des missions *Planck* et *Herschel*), la relation entre les propriétés des nuages et la formation stellaire (en particulier l'étude du taux d'efficacité de formation stellaire) et l'étude des propriétés globales de la formation stellaire dans le Plan galactique, en suivant la séquence évolutive de formation (des coeurs denses très froids aux étoiles formées), et l'étude des distances et de la structure galactique. Une étude des coeurs froids "sous influence" (situés en bordure ou à proximité d'une région HII) est également envisagée, en étroite collaboration avec I. Ristorcelli, co-PI du programme-clé "cold cores". L'étude des distances, conduite par D. Russeil, est très utile à tous les thèmes énoncés ci-dessus. Cette étude est donc poursuivie et conduira, à plus long terme à une nouvelle connaissance de la structure galactique.

5 publications significatives <u>avec titre et référence complète</u>

1) Paradis, D., Paladini, R., Noriega-Crespo, A., et al., 2012, A&A, 537, A113 Detection and characterization of a 500 µm dust emissivity excess in the Galactic plane using *Herschel*/Hi-GAL observations
2) Paradis, D., Veneziani, M., Noriega-Crespo, A., et al., 2010, A&A, 520, 8 Variations of the spectral index of dust emissivity from Hi-GAL observations of the Galactic plane
3) Zavagno, A., Anderson, L., Russeil, D., Morgan, L. et al., 2010, A&A, 518, L101 Star formation triggered by HII regions in our Galaxy. First results for N49 from the *Herschel* Space Observatory
4) Bernard, JP, Paradis, D., Marshall, D., Montier, L. et al. 2010, A&A, 518, L88 Dust temperature tracing the ISFR intensity in the Galaxy
5) Russeil, D., Pestalozzi, M., Mottram, J., Bontemps, S., et al., 2011, A&A, 526, A151 Giving physical significance to the Hi-GAL data: determining the distance of the cold dusty cores in the Milky way.

Titre du projet: Analyse et modélisation des émissions interstellaires diffuses des données *Planck*

Nom du porteur :	Miville-Deschênes					Prénom:	Marc-Antoine
Courrier électronique	mamd@ias.u-psud.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	Institut d'Astrophysique Spatiale, bâtiment 121, Université Paris-XI, Orsay, 91405					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR 8617					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)	7.5	6	-	-			
Financement ANR *							

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	Responsable Projet	Institut CNRS principal
Laboratoire de Radio-Astronomie, Ecole Normale Supérieure, Paris	P. Hennebelle, F. Levrier	INSU
Laboratoire AstroParticule et Cosmologie, Paris	J. Delabrouille	INSU
Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie, Toulouse	J. P. Bernard	INSU
IRFU/SAp, Saclay	E. Audit	
Partenaire Etranger	Responsable Projet	----------
Caltech, Pasadena, Californie, USA	Olivier Doré	ext
Université Laval, Québec, Canada	Gilles Joncas	ext
Université de Toronto, Canada	Peter G. Martin	ext

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours...

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

Ce projet de recherche a bénéficié d'un financement PCMI de 2005 à 2010. Au cours des deux dernières années le projet s'est poursuivi très activement mais aucun financement PCMI n'a été demandé puisque le porteur principal du projet était en mise à disposition au Canadian Institute for Théoretical Astrophysics de Toronto.

Ce projet de recherche concerne l'étude du milieu interstellaire diffus à haute latitude galactique dans le cadre de l'analyse scientifique des données *Planck*. Le projet se décline autour de trois axes principaux.

1) Modélisation des émissions galactiques diffuses dans le cadre de la séparation des composantes pour *Planck*. Nous travaillons ici à mettre au point un modèle de l'émission du ciel dont l'objectif est de faciliter l'extraction du fond diffus micro-onde sur la plus grande surface possible. Un modèle du ciel obtenu avec des données autres que celles de *Planck* a fait l'objet d'une publication récente (Delabrouille et al. 2012). Ce travail d'analyse des données *Planck* est en plein essors avec la publication des principaux résultats de *Planck* prévue pour le premier semestre 2013. C'est un travail qui se fait surtout avec les collaborateurs du projet à l'IAS, à l'IRAP et à Toronto.

2) Propriétés de la turbulence MHD dans le milieu interstellaire diffus.
Planck a observé l'émission polarisée de la poussière (ainsi que le synchrotron polarisé) sur le ciel entier. Ces cartes du ciel inédites apportent une information nouvelle et très importante pour comprendre la dynamique de la matière interstellaire et bien évidemment le rôle du champ magnétique dans la structuration de la matière et la formation des étoiles. L'analyse de ces données est un travail de longue haleine qui fait écho à celui que nous avions fait sur les données polarisées de WMAP (Miville-Deschênes et al., 2008). Le travail d'analyse des données *Planck* débouchera sur de nombreuses publications en 2013-2014. En parallèle de l'analyse des données, nous travaillons sur le développement d'outils d'analyse et d'interprétation à l'aide de simulations numériques.

Un travail important basé sur l'analyse de simulations numériques a été fait (entre autre par Éléonore Saury, étudiante en thèse de M.-A. Miville-Deschênes) en étroite collaboration avec l'équipe de CITA à Toronto qui a mis à notre disposition leurs centres de calcul. Ce travail permet de mieux comprendre les propriétés de la turbulence hydro-dynamique de milieu interstellaire diffuse neutre qui est thermiquement bi-stable. Deux articles sont en préparation ("The formation of cold atomic gas in the local interstellar medium" et "The structure of the thermally bistable and turbulent atomic gas", les deux signés Saury, Miville-Deschênes, Hennebelle et Audit). La combinaison de la turbulence et de la bistabilité thermique du gaz atomique neutre résulte en une structure en densité très contrastée qui est important de comprendre en détail, entre autre pour analyser les données en polarisation (la pondération de l'émission polarisée sur la ligne de visée dépend fortement de la façon dont la matière est organisée). Ce travail de simulations est donc maintenant étendu par l'addition du champ magnétique (post-doc E. Saury à l'IAS dans le cadre de l'ERC MISTIC de F. Boulanger) dans le cadre de l'analyse des données *Planck*. Il s'insert dans la collaboration déjà établie dans le cadre de ce projet avec François Levrier (ENS) et Peter G. Martin (Toronto). Un article est en cours de rédaction avec nos collaborateurs de Toronto.

3) Emission de la poussière dans le milieu interstellaire proche et dans le halo galactique.
Un des résultats les plus marquants de ce projet a été la publication en 2011 des premiers résultats *Planck* sur l'émission de la poussière à hautes latitudes. Le porteur du projet a été l'auteur principal d'un article *Planck* (*Planck* early results. XXIV. Dust in the diffuse interstellar medium and the Galactic halo. *Planck* Collaboration, 2011, A&A, 536, 24) qui a permis de mettre en évidence une évolution significative de l'émissivité des gros grains, dans le milieu diffus et dans les nuages du halo de la galaxie. Les données *Planck* permettent de confirmer de manière spectaculaire l'évolution de la poussière dans les nuages du halo; ceux-ci ont très clairement une sur-abondance de petits grains probablement liée à leur histoire dynamique particulière. Le résultat le plus étonnant est la mise en évidence de variations significatives de l'émissivité des gros grains dans les nuages du voisinage solaire. Ces variations sont attribuables à une modification de la structure des grains, probablement par coagulation ou fragmentation. Ces effets ont déjà été observés dans les nuages moléculaires mais c'est la première fois qu'ils sont mis en évidence dans les nuages diffus. Ce résultat implique une évolution rapide de la structure de la poussière.

Ce travail n'a été rendu possible que par la combinaison des données *Planck* avec des données à 21 cm obtenues au Green Bank Telescope dans le cadre d'un projet de plusieurs années piloté par Peter G. Martin (Toronto). Les données à 21 cm, grâce à l'information en vitesse, permettent ici de séparer l'émission de la poussière provenant des différents nuages sur la ligne de visée. Ces données permettent donc une modélisation beaucoup plus fine des données, ce qui a été nécessaire pour étudier le spectre de puissance du fond infrarouge cosmologique.

Perspectives à court terme.
Le porteur du projet est de retour à l'IAS (Orsay) depuis juillet 2012. Le travail se poursuivra sur les mêmes trois axes et dans le cadre de la même collaboration encore au moins pour les 2 prochaines années.

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

5 publications significatives avec titre et référence complète

The pre-launch *Planck* Sky Model: a model of sky emission at submillimetre to centimetre wavelengths, Delabrouille, J.; Betoule, M.; Melin, J.-B.; Miville-Deschênes, M.-A. et al., 2012, arXiv1207.3675D

Planck early results. XXV. Thermal dust in nearby molecular clouds, *Planck* Collaboration, 2011, A&A, 536, 25

Planck early results. XXIV. Dust in the diffuse interstellar medium and the Galactic halo. *Planck* Collaboration, 2011, A&A, 536, 24

Planck early results. XVIII. The power spectrum of the cosmic infrared background anisotropies. 2011, A&A, 536, 18

Separation of anomalous and synchrotron emissions using WMAP polarization data, Miville-Deschênes et al., 2008, A&A, 490, 1093

Titre du projet: 'Galactic Cold Cores: A *Herschel* survey of the source population revealed by *Planck*'.

Nom du porteur :	Ristorcelli					Prénom:	Isabelle
Courrier électronique							
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	Institut de Recherche en Astrophysique et Planetologie 14, avenue Ed. Belin, 31400 Toulouse					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR 5277					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)		23	17	10			
Financement ANR *							

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
LERMA, Paris		
IAS, Orsay		
LAOG, Grenoble		
CEA, Saclay		
LAM, Marseille		
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	----------
Helsinki University	M.Juvela	
IPAC, Pasadena	P.McGehee	
Budapest, University	V.Toth	
CITA/Toronto	P.Martin	

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

Ce programme a pour objectif l'étude des propriétés des cœurs froids à grande échelle dans la Galaxie dans le but en particulier de mieux comprendre les conditions initiales de la formation stellaire, en utilisant les capacités uniques (sensibilité, résolution spatiale et couverture spectrale) des instruments PACS et SPIRE d'*Herschel*.

Le point de départ est le relevé complet du ciel avec *Planck*, qui permet pour la première fois d'établir un recensement non-biaisé de la composante froide galactique (cœurs pré-stellaires, globules de Bok, nuages à très basse température (T<6K), avec peut-être la découverte d'une nouvelle classe d'objets). **Les observations avec *Herschel* ont été effectuées sur une sélection d'un échantillon (environ 300) le plus représentatif possible de la population de cœurs froids détectés avec *Planck*.** Plusieurs études statistiques pourront être menées en liaison avec un certain nombre de questions clés sur la formation stellaire (spectre de masse des cœurs froids et relations à l'IMF, distribution spatiale dans la Galaxie et propriétés physiques en fonction de l'environnement galactique, degrés d'évolution, nature et origine des cœurs froids …). La première étape indispensable pour mener à bien ces études sera de caractériser les propriétés des grains (en particulier l'émissivité et l'opacité) et d'étudier leur variation du milieu diffus vers le milieu dense et froid. Les températures déduites et les émissivités seront comparées aux prédictions des modèles de grains, et interprétés en tenant compte des processus liés à ces environnements (formation d'agrégats et de manteaux de glace, transitions basse-énergie par effet two-level-system…). Cette analyse permettra de contraindre en particulier le coefficient d'absorption massique des grains dans ces milieux, paramètre clé a partir duquel est déterminé la masse du cœur froid.

L'objectif sera également de fournir une base de données (catalogues *Planck* et *Herschel*) de cœurs froids galactiques, en complémentarité des autres programmes d'observation *Herschel* sur la formation stellaire.

Description du bilan actuel et des perspectives : le premier relevé complet du ciel realisé par *Planck* a permis la détection de plus de 10 000 condensations froides dans la Galaxie, distribués principalement dans le plan jusqu'à la distance de 7kpc, mais également à haute latitude (cf *Planck* collaboration, A23 2011). Ce catalogue (C3PO-

Cold Cores Catalogue of *Planck* Objects) comprend des sources couvrant une grande variété de propriétés physiques (T de 7 à 19K, pic de distribution à 13K, masses de 0.4 à 3.10^5Mo, tailles de 0.2 à 18pc, densités de 10^2 à 2.10^5 cm^{-3}). Leur taille caractéristique permet de classer ces objets dans la catégorie de 'clump' plutot que de 'cores'.

Les cartes *Herschel* (PACS et SPIRE) effectuées sur un échantillon représentatif d'environ 300 clumps montrent la présence de sous-structures : il s'agit généralement de coeurs plus denses et plus froids (jusqu'à 7K), mais aussi de sources compactes chaudes, probablement de jeunes étoiles en formation encore enfouies dans leur enveloppe froide (cf [1],[3]). Environ 50% des champs présentent principalement des structures en filaments, fragmentés en un certain nombre de cœurs ou clumps. La largeur des filaments (typiquement ~0.2-0.3pc) varie de manière anti-corrélée avec NH, comme le prédisent les modèles de filaments hydrostatiques, isothermes, ou les cœurs gravitationnellement liés enfouis dans les filaments. La question de l'origine des coeurs est donc étroitement liée à celle de la formation et de l'évolution des filaments. Cependant dans un grand nombre de cas, la morphologie des champs révèle une interaction dynamique avec l'environnement, tel que le montrent la présence d'interfaces de transitions abruptes en densité, ou les structures de forme cométaires 'cometary shape globules'. Le catalogue complet permettra d'étudier la distribution spatiale des clumps à l'échelle de la Galaxie, et de rechercher les liens éventuels avec les grandes structures galactiques.

. Les résultats obtenus sur l'émissivité des grains confirment une variation significative de l'indice spectral avec la temperature. Ces résultats pourront etre confrontés aux prédictions des modèles d'émission des grains incluant des processus dépendant de la température (Mény et al. 2007, Paradis et al.2011), ainsi qu'aux mesures récentes en laboratoire sur des analogues de silicates (Coupaud et al.2011). Afin d'investiguer le role possible du transfert radiatif, nous avons modélisé l'émission de filaments de densité variable, chauffés par l'ISRF et en incluant le transfert radiatif et le modèle de grains DustEM. En analysant les spectres intégrés résultants (SED), nous avons montré que les effets de transfert radiatifs seuls ne pouvaient expliquer ni l'augmentation d'émissivité submillimétrique, ni l'anti-corrélation Température – indice spectral observées. Ces variations ont très probablement une origine dans le changement des propriétés intrinsèques des grains dans le milieu dense et seront étudiées plus en détails (5).

5 publications significatives avec titre et référence complète

1- '**Galactic cold cores I. Compact sources in the *Herschel* Science Demonstration Phase fields',** M. Juvela, I. Ristorcelli, L. Montier et al., A&A 518L, 93, 2010

2- 'Galactic cold cores: diffuse dust emission in the *Herschel* Science Demonstration fields', M. Juvela, I. Ristorcelli, L.A. Montier, D.J. Marshall et al. , 2011, A&A 527

3- '***Planck* early results 22: The submillimetre properties of a sample of Galactic cold clumps',** A&A A23, 2011, *Planck* collaboration, corresponding author: I.Ristorcelli.

4- **'Galactic cold cores III. General cloud properties'**, Juvela, M., Ristorcelli, I., Pagani, L., Doi, Y., Pelkonen, V.-M., Marshall, D.J. A&A 2012.

5-'**Modelling the dust emission from dense interstellar clouds: disentangling the effects of radiative transfer and dust properties'**, Ysard, N.; Juvela, M.; Demyk, K.; Guillet, V.; Abergel, A.; Bernard, J.-P.; Malinen, J.; Mény, C.; Montier, L.; Paradis, D., Ristorcelli I., Verstraete L.; A&A 542, 2012.

Titre du projet: Extension de la cartographie 3D du milieu interstellaire proche

Nom du porteur :	Lallement					Prénom:	Rosine
Courrier électronique	rosine.lallement@obspm.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	GEPI					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR 8111					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)				4			
Financement ANR *							

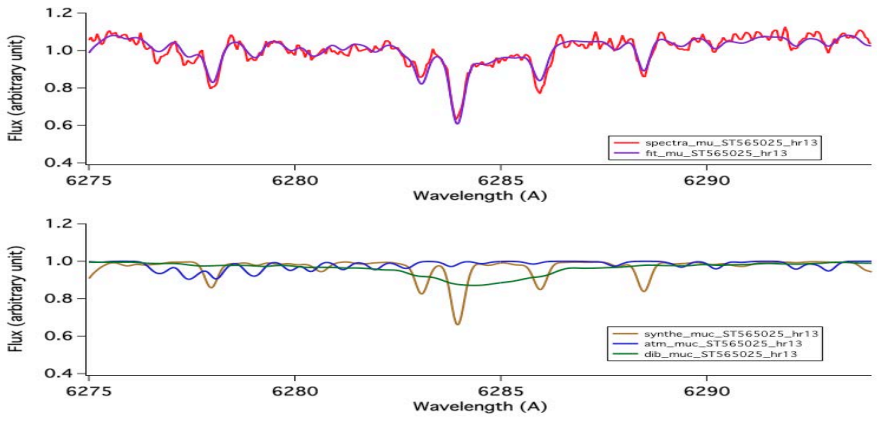
*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	----------

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours...

***Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme*:**

Nous avons concentré nos efforts sur tous les points de la demande, à l'exception des méthodes de détermination des extinctions à partir de la combinaison de la spectroscopie visible et des mesures photométriques visible et IR:
-Nous avons fortement progressé sur la mise au point des méthodes d'analyse des spectres d'étoiles froides pour en extraire les absorptions interstellaires, et sur les tests de ces méthodes. Des résultats relatifs à des observations avec FLAMES/GIRAFFE au VLT sur des étoiles froides du bulbe ont été présentés (Heidelberg, IAU) et un article circule avant soumission très proche (Chen et al). Un exemple d'ajustement d'une combinaison de spectre stellaire synthétique, bande diffuse de forme prédéterminée et absorption atmosphérique est montré dans la figure ci-après.



-Nous avons extrait d'une base de données d'étoiles chaudes (programme ESO sur 2 ans: PI Lallement) les deux DIBs les plus fortes et déduit des relations DIB-extinction et des formes des DIBs. Un des résultats est l'amélioration sensible de la corrélation lorsque l'on shifte les distributions d'étoiles cibles vers les basses températures. Ceci est lié aux très fortes variabilités des DIBS dans les nuages fortement irradiés (Raimond et al, 2012).
-Une méthode automatique d'extraction des largeurs équivalentes a été mise au point par L. Puspatirini et appliquée à une dizaine de DIBS sur ce même jeu de données. Un article est en préparation avec les mesures, et les corrélations avec l'extinction.
-Nous avons analysé des observations d'étoiles de haute latitude galactique Nord (Prog. NARVAL) pour mieux contraindre la distance aux nuages vus en HI dans ces régions. Un article a été publié (Puspitarini & Lallement) et ces données ont été incorporé dans les nouvelles inversions 3D des colonnes de sodium neutre.

-Des tests des méthodes d'inversion avec des distributions 3D simulées sont en cours (thèse L.Puspitarini). Elle a suivi une formation sur les méthodes statistiques (Penn State astrostatistics Course) afin de mieux comprendre et valider les méthodes bayésiennes et travaux sur le 3D.
-Des analyses de spectres du projet ESO-OCA AMBRE ont été réalisées. Un plus grand nombre de données vont être maintenant traitées plus automatiquement.

Utilisation du financement:
Le financement PCMI a été utilisé:
-pour l'école d'astrostatistique (L. Puspitarini)
-un déplacement pour l'IAU Beijing (R. Lallement)
-des missions à Nice pour la SF2A et réunions avec le groupe Gaia de OCA (Lallement, Chen)
-une mission à Heidelberg (présentation travaux DIBs et 3D, R. Lallement)

Poursuite du projet:

Les méthodes développées doivent maintenant être appliquées plus massivement aux observations d'archive AMBRE, mais aussi aux données du relevé ESO-Gaia qui sont déjà disponibles. Nous attendons les publications des paramètres stellaires pour ces dernières.
La cartographie 3D d'extinction, une fois validée par les travaux en cours, sera soumise à publication et analysée en détails (thèse L Puspitarini). Les nouvelles mesures de sodium disponibles seront incoporées à la base existante et inversées.
Le développement des méthodes de détermination des extinctions à partir de la combinaison de la spectroscopie visible et des mesures photométriques visible et IR (SDSS, 2MASS) doivent être repris dès que les autres activités pré-citées seront terminées.

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

5 publications significatives avec titre et référence complète

Articles publiés directement liés à la demande:
-Puspitarini & Lallement, Astron. Astrophys. 545, 21 (2012): "Distance to northern high-latitude HI shells
-Raimond, S.; Lallement, R.; Vergely, J. L.; Babusiaux, C.; Eyer, L., Astron. Astrophys. 544, 136 (2012): A southern hemisphere survey of the 5780 and 6284 Å diffuse interstellar bands: correlation with the extinction
Présentations travaux en cours:
Lallement R., Chen Hui-Chen, Bonifacio P, Babusiaux C., Hill, V, Puspitarini L, Worley C., De Laverny P.: Extracting interstellar lines and diffuse bands in cool star spectra 3D mapping of the ISM, "3D Milky Way, Heidelberg, 2012)
Lallement R., Chen Hui-Chen, Bonifacio P, Babusiaux C., Hill, V, Puspitarini L,: Studies of diffuse interstellar bands in col star spectra, IAU special session"Unexplained phenomena in the Interstellar Medium", Beijing, 2012)

Article en cours de soumission A&A: Chen H., Lallement R., Bonifacio P., Babusiaux C., Hill, V: Extracting interstellar diffuse absorption bands from cool star spectra

Titre du projet: Etude de la matière Interstellaire aux longueurs d'onde millimétriques : chimie des anions

Nom du porteur :	GUELIN					Prénom:	Michel
Courrier électronique	guelin@iram.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	IRAM (UPS2074) 300 rue de la piscine 38406 St Martin d'Hères et LRA-LERMA 24 rue Lhomond 75005 Paris					Institut Principal de rattachement CNRS	IRAM
Code (ex: UMR1111)	UPS2074					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	
Montant Alloué (k€)		3	3				
Financement ANR *							

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
AMOR-LAB 2 rue de l'Observatoire 33271 Floirac	***Didier Despois***	***Observatoire de Bordeaux***
DAPHE	***Marcelino Agundez***	***Obs. Paris-Meudon***
LERMA	***Philippe Salomé***	***Obs. Paris***
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	----------
DAMIR CSIC Calle Serrano Madrid	***J. Cernicharo***	
CFA-Harvard 60 Garden Street Cambridge (MA Etats Unis)	***P. Thaddeus***	
Onsala Space Observatory (Suède)		

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

Grâce à ses radiotélescopes du Plateau de Bure (PdBI) et de Pico Veleta, l'IRAM et son équipe d'astronomes sont engagés dans plusieurs programmes de recherche majeurs. Le présent programme PCMI est focalisé sur la recherche de nouvelles molécules interstellaires, la chimie circumstellaire et interstellaire dépendant du temps et la composition chimique du gaz dans les galaxies primordiales. Le financement obtenu a permis d'effectuer des missions de travail en France, aux Etats Unis et en Espagne qui ont permis de maintenir notre collaboration étroite avec les spectroscopistes de Harvard, les chercheurs du SMA et les chercheurs du CSIC de Madrid impliqués dans *Herschel*-HIFI.

Des avancées remarquables ont été obtenues sur les 3 sujets cités ci-dessus. Notre collaboration de longue date avec le groupe du CFA/Harvard dirigé par le Pr. P. Thaddeus, nous a permis de d'identifier la plupart des anions interstellaires connus à ce jour à partir d'observations à Pico Veleta ; le dernier anion, CN^-, a ainsi été identifié en 2010 (Agundez, Cernicharo, Guélin, 2010). Par ailleurs, nous avons entrepris à l'aide du PdBI l'étude de la distribution spatiale de ces anions dans l'enveloppe circumstellaire IRC+10216, étude qui permet de tester, grâce au mouvement d'expansion de l'enveloppe, les modèles de formation des anions tant en ce qui concerne l'abondance de ces espèces que leur temps caratéristique de formation et de destruction. Les premiers résultats de nos études interférométriques ont fait l'objet d'une présentation orale au Symposium 280 de l'UAI à Tolède (2011, Guélin et al.). Ils révèlent des différences marquées en abondance (jusqu'à 2 ordres de grandeur) et en distribution entre les observations et les prédictions des modèles actuels.

Par ailleurs, nous avons mené à bien plusieurs études sur la formation de HCN et de l'eau dans la région interne d'IRC+10216, études basées sur des observations de *Herschel*-HIFI (e.g. Decin et al. 2010, Nature), ainsi qu'une étude sur la distribution des molécules complexes dans la région KL d'Orion, basée sur des observations au PdBI (Favre et al. 2011).

En ce qui concerne les galaxies jeunes, nous avons détecté au PdBI plusieurs molécules (CO, mais aussi HCN, HNC, CN, HCO^+ et tout dernièrement H_2O, CH et CCH – Guélin et al. 2012) dans des galaxies à grand redshift (z=2-6) et mené avec le PdBI, l'ATCA et, maintenant, ALMA une étude très complète sur la composition chimique du gaz dans le disque de deux galaxies spirales situées à z~1 et interceptant la ligne de visée de deux quasars. Cette étude a permis de détecter en absorption les raies d'une quarantaine d'espèces moléculaires, ainsi que d'étudier la composition isotopique du gaz.

L'étude de la distribution spatiale des molécules dans les enveloppes circumstellaires, notamment IRC+10216, va se poursuivre au PdBI, au SMA et à ALMA. Nous avons cartographié à Pico Veleta l'émission de CO dans IRC+10216 à PV et mis en évidence une succession de coquilles brillantes en expansion. Ces coquilles correspondent à une modulation de la densité dans l'enveloppe et donc de la perte de masse de l'étoile. Elles permettent de retracer l'historique de celle ci au cours de 15000 dernières années. Cette étude se poursuit au PdBI et au SMA, deux instruments complémentaires dont les données seront combinées pour fournir une carte d'une résolution angulaire d'une seconde d'arc (contre 11'' à Pico Veleta) et une résolution temporelle d'une centaine d'années. La connaissance de la distribution de densité dans l'enveloppe et l'historique de la perte de masse permettront de mieux comprendre la chimie des autres espèces moléculaires (notamment des anions) pour lesquelles nous disposons déjà de cartes d'émission, ou sommes en train d'en acquérir.

De même, nous comptons utiliser le PdBI et ALMA pour poursuivre notre étude de la composition chimique du gaz à grand et moyen redshift. Nous avons déjà obtenu des observations sur l'absorption moléculaire à z=0.9 avec ALMA durant le cycle 0 (et demandé du temps pour le cycle 1)

5 publications significatives avec titre et référence complète

Tentative detection of phosphine in IRC +10216: J. Cernicharo, M. Guélin, M. Agundez, M. McCarthy, P. Thaddeus 2009, A&A 485, 33
Astronomical identification of CN⁻, the smallest observed molecular anion: Agúndez, M.; Cernicharo, J.; Guélin, M, P. .; Kahane, C.; Roueff, E.; Kłos, J.; Aoiz, F. J.; Lique, F.; Marcelino, N.; Goicoechea, J. R.; Gottlieb, C.A.; McCarthy, M.; Thaddeus 2010, A&A 517, L2.
Warm water vapour in the sooty outflow from a luminous carbon star: Decin, L.; Agúndez, M.; Barlow, M. J.; et al. 2010, Nature 467, 64.
Molecules at z = 0.89. A 4-mm-rest-frame absorption-line survey toward PKS1830-211: Muller, S.; Beelen, A.; Guélin, M et al. 2011, A&A 535, 103
Molecular abundances in the inner layers of IRC +10216: Agúndez, M.; Fonfría, J. P.; Cernicharo, J.; Kahane, C.; Daniel, F.; Guélin, M. 2012, A&A 543, 48

Titre du projet: Coreshine : Etude des grains microniques dans le milieu interstellaire dense

Nom du porteur :	Bacmann					Prénom:	Aurore
Courrier électronique	aurore.bacmann@obs.ujf-grenoble.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble, BP 53 F-38041 GRENOBLE Cédex 9					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR 5274					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)			4	7			
Financement ANR *							

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
LERMA, Observatoire de Paris, 61 av. de l'Observatoire, 75014 Paris	L. Pagani	INSU
IRAP, 9 av. du Colonel Roche, BP44346, 31028 Toulouse Cedex 4	I. Ristorcelli	INSU
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	----------
IPAC, USA	R. Paladini	
University of Helsinki, Finlande	M. Juvela	
Berkeley University, USA	C. Ormel	

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

Les grains de poussière représentent une composante importante des régions de formation stellaire et sont utilisés très largement comme traceur de la masse des coeurs pré-stellaires. Leurs propriétés dans les régions denses sont cependant mal contraintes, ce qui rend difficile la modélisation des caractéristiques physiques des cœurs denses. Parmi les propriétés fondamentales des grains, la distribution de taille est relativement bien connue dans les régions diffuses, mais reste mal caractérisée dans les régions denses. La détermination de la taille des grains permettrait de réduire les incertitudes sur les masses des nuages et des cœurs, sur la structure physique des cœurs et de mieux contraindre certains processus chimiques mettant en jeu la surface des grains. Par ailleurs, il est important de comprendre l'évolution de la taille des grains de poussière du fait que leur croissance est à l'origine de formation de planétésimaux.

Compte tenu des conditions de températures et de densité qui règnent dans les cœurs denses, il est attendu que les grains de poussières aient tendance à coaguler dans les régions les plus denses. Bien qu'il existe des indications indirectes compatibles avec la présence de gros grains dans ces régions, elles proviennent d'observations en émission dans le submillimétrique ou d'absorption dans l'infra-rouge proche et moyen, qui sont ambigües car elles combinent les propriétés des grains et les variations de densité. Récemment, nous avons découvert de l'émission à 3.6 et 4.5 microns provenant des parties denses du coeur L183, que nous avons appelée "Coreshine" (brillance de cœur). Cette émission ne peut s'interpréter qu'en invoquant la diffusion du rayonnement interstellaire sur des grains de taille micronique. Loin d'être limitée à un cas unique, cette émission diffuse dans l'infra-rouge moyen est un phénomène général qui concerne environ la moitié des cœurs que nous avons étudiés par la suite, mais aussi des enveloppes de Classe 0, de Classe I, avec ou sans flots.

Cette découverte ouvre de nouvelles perspectives à la fois pour l'étude des propriétés des poussières (la diffusion étant très sensible à la distribution en taille des grains) et pour l'étude de la structure des cœurs pré-stellaires. Le but de notre projet est de caractériser les conditions d'apparition de la brillance de Cœur, ainsi qu'à utiliser cette émission pour mieux contraindre les propriétés des poussières et leur coagulation dans le milieu dense et froid.

Ces travaux sont effectués avec nos collègues de Toulouse et de Helsinki (Finlande) avec lesquels nous souhaitons développer nos collaborations pour exploiter les différentes implications de cette découverte.

Résultats

- Conditions d'apparition/de disparition du « Coreshine » : si la brillance de cœur est un phénomène général observé dans les régions de formation d'étoiles (comme le montre notre étude de ~ 100 sources galactiques dans Pagani et al. 2010), il existe une région qui se distingue du fait que la brillance de cœur y est beaucoup plus rare : la nébuleuse de Gum. Dans une étude plus détaillée de cette région, nous avons confirmé qu'une grande majorité d'objets jeunes (cœurs denses ou protoétoiles) de présentent pas de brillance de cœur, au contraire des autres régions galactiques pour lesquelles ~75 % des objets protostellaires montrent le phénomène. Ces constatations mènent à la conclusion que la nébuleuse de Gum est un reste de supernova, et que l'onde de choc a détruit les gros grains et induit la formation de plusieurs protoétoiles.

- Nous avons mis en évidence le fait que la brillance de cœur peut être utilisée comme un traceur de l'historique des cœurs pré-stellaires : nous avons étudié le cœur dense L1506C, remarquable par le fait qu'il est caractérisé à la fois par des déplétions moléculaires importantes (indiquant un stade d'évolution avancé) et une faible densité centrale (indiquant au contraire que le cœur est jeune). La brillance de cœur observée montre que le cœur a dû traverser une phase de plus forte densité au cours de son évolution.

Perspectives à court terme :

- nous avons obtenu du temps Spitzer à 3.6 microns pour étendre l'échantillon de sources d'origine. Les données sont maintenant disponibles et vont être réduites/analysées (coll. IPAC).

- nous avons commencé à étudier la possibilité que la brillance de cœur permette de mesurer la densité de colonne dans les cœurs pré-stellaires et permette ainsi d'avoir un traceur indépendant.

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

5 publications significatives avec titre et référence complète

Absence of coreshine in the Gum/Vela region
Pagani L., Lefèvre C., Bacmann A., Steinacker J., 2012, A&A, 541, A154

The Ubiquity of Micrometer-Sized Dust Grains in the Dense Interstellar Medium
Pagani L., Steinacker J., Bacmann A., Stutz A., Henning T., 2010, Sci, 329, 1622

Direct evidence of dust growth in L183 from mid-infrared light scattering
Steinacker J., Pagani L., Bacmann A., Guieu S., 2010, A&A, 511, A9

Titre du projet: Les PAH interstellaires vus par *Herschel*: observations OT1 et modélisation

Nom du porteur :	Joblin					Prénom:	Christine
Courrier électronique	christine.joblin@irap.omp.eu						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	IRAP 9 Av. du Colonel Roche 31028 Toulouse cedex 4					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR 5277					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)			21	11			
Financement ANR *							

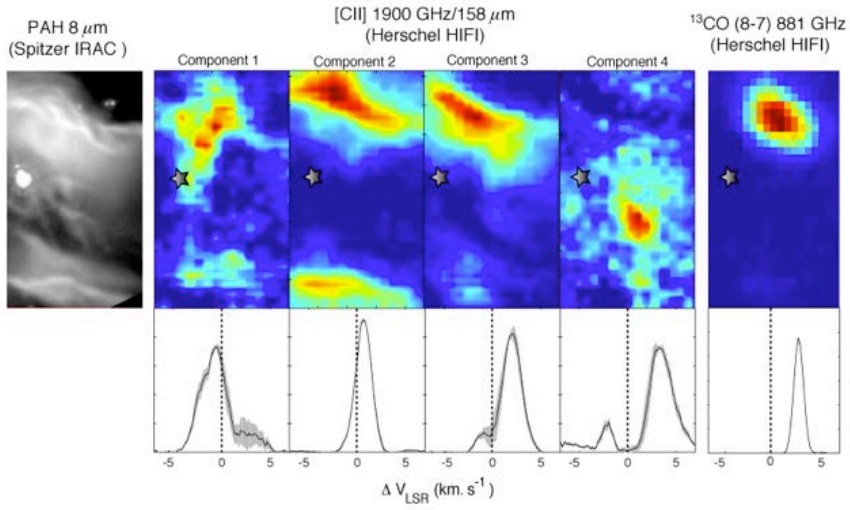
*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
LERMA-UMR8112, Obs Paris, ENS Paris	***M. Gerin***	***INSU***
IAS-UMR8617, Univ. Paris Sud, Orsay	***A. Abergel***	***INSU***
LUTH-UMR8102, Obs Paris, Meudon	***J. Le Bourlot***	***INSU***
IRAM, Grenoble	***J. Pety***	***INSU***
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	**********
Univ. Cologne, Allemagne	***V. Ossenkopf***	
Univ. Michigan, Etats-Unis	***E. Bergin***	
OAN, Madrid	***A. Fuente***	
CAB. INTA-CSIC, Madrid	***J. Cernicharo***	

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme

L'émission dans la raie [CII] à 158 μm observable avec *Herschel* et celle dans les bandes aromatiques IR des PAH observées par Spitzer et ISO sont intimement liées dans les PDR. Les PAH chauffent le milieu par effet photo-électrique qui se refroidit principalement dans les raies de [CII] à 158 μm, [OI] à 63 et 145 μm. D'autre part, ces émissions permettent de tracer les zones intermédiaires entre les milieux atomiques et moléculaires, là où la dynamique associée à l'évaporation de structures denses peut être observée. Des premiers résultats encourageants ont été obtenus dans le cadre du programme clé d'observations (KP) *Warm and Dense Interstellar Medium* (WADI, PI V. Ossenkopf) (Joblin et al. 2010) qui ont motivé la demande dans le cadre du temps ouvert (OT) *Physics of gas evaporation at PDR edges* (PI C. Joblin; cf. Fig.).



Décomposition du cube d'observation avec HIFI de la raie de [CII] dans la PDR NGC 7023 NW en utilisant une méthode NMF couplée à de la classification et une analyse Monte-Carlo.

Les différentes composantes en vitesse extraites sont comparées à l'émission des PAH (à gauche) et du ^{13}CO (8-7) (à droite).

Berné et al. 2012, en prép.

Un autre aspect du travail est de mieux contraindre le rôle des PAH dans le chauffage par effet photoélectrique. L'analyse du rapport ([OI]+[CII]))/ MIR, rapport entre les raies de refroidissement du gaz et l'émission dans l'IR moyen des PAH en fonction du paramètre d'ionisation $\gamma = G_0 T^{1/2}/n_e$ (G_0 : intensité du champ UV, T : température du gaz et n_e : densité électronique) permet de montrer que les PAH dominent l'effet photoélectrique et que leur ionisation impacte l'efficacité du chauffage (Okada et al., 2012, en prép.). L'analyse du relevé spectral avec PACS de la Barre d'Orion obtenu dans le KP *Herschel/HIFI Observations of Extraordinary Objects* (HEXOS, PI E. Bergin) nous a permis d'avancer également sur ces questions. Une première étude (Goicoechea et al., 2011) a montré que l'émission de OH est associée à des condensations de gaz chaud (Tk~200 K) et dense ($n_H \sim 10^6$ cm^{-3}). L'émission dans les raies de CO qui sont observées dans la Barre d'Orion jusqu'à J_{up}=23 ne peut être expliquée par les modèles standard. Elle nécessite des modèles à haute pression (P~1-4 10^8 Kcm^{-3}). Nous avons également testé (Joblin et al., 2012, en prép.) l'effet de l'augmentation du chauffage par effet photoélectrique liée à la production de PAH en bord de PDR qui a été mise en évidence dans l'analyse des données ISO et Spitzer (Berné et al. 2007, A&A; Rapacioli et al. 2005, A&A). Une analyse plus quantitative nécessite le couplage du code PDR de Meudon (Le Petit et al. 2006, ApJS) qui donne une description détaillée de la partie gaz avec le code DUSTEM qui décrit les composantes de la poussière (Compiègne et al. 2011, A&A).

Nous travaillons depuis plusieurs années à l'identification de PAH individuels par leurs signatures spectrales dans l'IR lointain (Joblin et al. 2002, Mol. Phys ; Mulas et al. 2006, A&A). La stratégie avec *Herschel* consiste en l'identification dans les relevés spectraux de PACS et SPIRE de branches Q qui pourront être observées à très haute résolution avec le spectromètre HIFI. Dans le cadre du KP HEXOS, ce travail concerne l'analyse du relevé spectral de la Barre d'Orion. Seule une région est apparue avec une densité spectrale importante et nous avons décidé d'utiliser le spectromètre HIFI pour obtenir un scan profond et à très haute résolution spectrale de ce domaine entre 1615 et 1685 GHz. L'analyse de ce scan est en cours. Dans le cadre du projet OT1 *Far-IR bands of PAHs in the Red Rectangle* (PI C. Joblin), nous réalisons une spectroscopie profonde du Rectangle Rouge avec PACS et SPIRE. Nous travaillons avec les équipes instrumentales pour obtenir le meilleur rapport S/N. Nous sommes à ce jour encore limités par des problèmes instrumentaux : variations d'intensité du continuum dans les données PACS liées au *jitter* du télescope et présence de systématiques (franges) dans les données SPIRE. Quand le meilleur spectre sera obtenu (effort en cours), nous pourrons donner des contraintes fortes sur l'abondance de PAH dans cet objet. *Herschel* permet également la détection de C_3 par son mode ro-vibrationnel $\nu 2$ dont l'origine est vers 1.9 THz (158 µm). Comme dans le cas des hydrocarbures (Pety et al. 2005, A&A) il est intéressant d'explorer le lien entre la formation de C_3 et la photodestruction des PAH dans les PDR (Mookerjea et al. 2012).

L'analyse des données se fait aussi en étroite liaison avec l'étude des propriétés physico-chimiques des PAH (cf. Projet Spectroscopie et physico-chimie des macromolécules et nanograins carbonés).

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

Code PDR de Meudon pour l'analyse des raies du gaz

5 publications significatives avec titre et référence complète

- Mookerjea, B., Hassel, G., Gerin, M., et al., *"The chemistry of C_3 & Carbon Chain Molecules in DR21(OH)"*, **Astron. & Astrophys.,** (2012), in press

- Bernard-Salas, J., Habart, E., Arab, H., Abergel, A., Dartois, E., Martin, P., Bontemp, S., Joblin, C., White, G. J., Bernard, J.-P., and Naylor, D., *"Spatial variation of the cooling lines in the Orion Bar from Herschel/PACS"*, **Astron. & Astrophys. 538** (2012), id.A37

- Goicoechea, J. R., Joblin, C., Contursi, A. et al., *"OH emission from warm and dense gas in the Orion Bar PDR"*, **Astron. & Astrophys. 530** (2011), id.L16

- Joblin, C., Mulas, G., Malloci, G., Bergin, E.A., and the HEXOS consortium, *"Search for far-IR PAH bands with Herschel: modelling and observational approaches"*, in : PAHs and the Universe, C. Joblin and A.G.G.M Tielens Eds, EAS Publications Series vol. 46, 2011, p. 123-130

- Joblin, C., Pilleri, P., Montillaud, J., Fuente, A., Gerin, M., Berné, O., Ossenkopf, V., Le Bourlot, J., Teyssier, D., Goicoechea, J. R., Le Petit, F.; Röllig, M., et al., *"Gas morphology and energetics at the surface of PDRs: new insights with Herschel observations of NGC 7023"*, **Astron. & Astrophys**. **521** (2010), id.L25

Titre du projet: Polarisation et champ magnétique dans le Milieu Interstellaire

Nom du porteur :	Ferrière					Prénom:	Katia
Courrier électronique	katia.ferriere@irap.omp.eu						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie 14, avenue Ed. Belin, 31400 Toulouse					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR 5277					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)				4			
Financement ANR *							

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
LERMA, Paris	Edith Falgarone	INSU
IAS, Orsay	François Boulanger	INSU
IPAG, Grenoble	Juan Macias-Perez	INSU
LAB, Floirac	Stéphane Guilloteau	INSU
LAM/IRAM, St Martin D'Heres	Jérôme Pety	INSU
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	----------
CITA/Toronto	M.A. Miville-Deschênes	
Sao Paulo Univ	A. M. Magalhaes	
Cardiff Univ.	F. Poidevin	
Helsinki Univ	M. Juvela	

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

Avec l'arrivée des données du satellite *Planck* et d'expériences sous ballon stratosphérique comme PILOT, l'étude de l'émission polarisée du milieu interstellaire de l'infrarouge lointain au millimétrique est en passe de faire un bond en avant majeur. Combinées aux mesures du rayonnement synchrotron et de la rotation Faraday dans le domaine radio (auxquelles le radio-télescope basses-fréquences LOFAR contribuera considérablement) et aux mesures de la polarisation en absorption dans le visible et l'infrarouge proche, ces données permettront de contraindre la structure du champ magnétique Galactique de façon inédite, et ouvriront une nouvelle dimension originale de l'étude des propriétés des grains de poussière. Ces études sont d'un intérêt intrinsèque pour notre compréhension de la physique du milieu interstellaire et de la formation des étoiles, en particulier pour l'interprétation des données du satellite *Herschel*. Elles sont également capitales dans la perspective des observations détaillées de galaxies distantes en polarisation, qui deviendront possibles avec le radio-télescope ALMA. Enfin, elles revêtiront une importance majeure pour la compréhension physique des émissions d'avant-plan qui contaminent les cartes du fond diffus cosmologique et dont la soustraction doit se faire de manière extrêmement précise.

A l'automne 2011, nous avons monté une collaboration entre les différents acteurs français (basés principalement à Toulouse, Grenoble et Paris), qui offre une large gamme d'expertises complémentaires, autant observationnelles (*Planck*, LOFAR) que théoriques (modélisation de l'émission des poussières, dynamo Galactique). Pour nous aider à concrétiser cette collaboration, nous avons soumis une première demande au PCMI pour l'année 2012, notre objectif étant d'une part d'organiser des réunions de travail régulières, de façon à fédérer les efforts de notre communauté et à élargir la collaboration, et d'autre part de permettre la participation à deux conférences internationales sur le champ magnétique Galactique.

Le PCMI nous a attribué un soutien de 4 k€ pour l'année 2012. Ce soutien nous a déjà permis de financer une mission de participation au symposium de l'IAU 2012 à Pékin et d'assurer une mission de participation à la prochaine réunion du MKSP de LOFAR. Le reste contribuera à financer une réunion de travail de l'équipe proposante (dispersée entre Paris, Toulouse, Grenoble et Bordeaux), que nous prévoyons dès la rentrée de septembre (à Toulouse ou à Paris). La rentrée sera effectivement un moment propice pour nous réunir, puisque une dynamique vient d'être lancée avec le feu vert donné aux articles sur la polarisation *Planck* HFI, les premiers drafts étant attendus en septembre.

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

5 publications significatives avec titre et référence complète

- Falgarone E., Troland T. H., Crutcher R. M., Paubert G. 2008, A&A 487, 247, « CN Zeeman measurements in star formation regions »
- Ferrière K. 2009, A&A 505, 1183, « Interstellar magnetic fields in the Galactic center region »
- Jaffe T. R., Leahy J. P., Banday A. J., Leach S. M., Lowe S. R., Wilkinson A. 2010, MNRAS 401, 1013, « Modelling the Galactic magnetic field on the plane in two dimensions »
- Miville-Deschênes M.-A., Ysard N., Lavabre A. et al. 2008, A&A 490, 1093, « Separation of anomalous and synchrotron emissions using WMAP polarization data »
- *Planck* Collaboration 2011, A&A 536, 21, « *Planck* Early Results. XXI. Properties of the interstellar medium in the Galactic Plane »

Titre du projet: Couplage chimie-dynamique: turbulence, champ magnétique et jets

Nom du porteur :	Falgarone					Prénom:	Edith
Courrier électronique	edith@lra.ens.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	LERMA 61 av de l'Observatoire 75014 Paris					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR8112					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)	12	12	14	11			
Financement ANR *	X						

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
IAS	***Pineau des Forêts G.***	***INSU***
IPAG	***Hily-Blant P.***	***INSU***
LAB	***Wakelam, V.***	***INSU***
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	***----------***

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours...

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

L'originalité des travaux réalisés dans le cadre de ce projet tient à la conjonction de deux faits: (1) notre capacité à traiter numériquement la chimie hors-équilibre dans les multiples environnements où cela s'avère incontournable, quand les échelles de temps dynamiques deviennent plus courtes que celles de la réactivité chimique et (2) la reconnaissance du fait que la chimie interstellaire peut être formidablement accélérée, voire déclenchée, par la dissipation d'énergie mécanique. Ce dernier point est reconnu depuis longtemps (i.e. chimie dans les chocs à haute vitesse) mais nous avons montré que cela s'étend à des processus dissipatifs beaucoup moins spectaculaires, comme ceux qui régissent la dissipation de la turbulence. Nos résultats essentiels portent sur l'enrichissement en molécules des environnements hostiles aux molécules parce que peu protégés de la radiation UV destructrice, comme le milieu diffus essentiellement atomique, les jets, mais aussi les chocs intergalactiques.

Pour étudier le couplage entre chimie et dynamique, nous nous refusons à faire ce que beaucoup font ailleurs au prix de simplifications drastiques (i.e. "brute-force" approach) et nous limitons à des géométries simples qui peuvent être ramenées au cas monodimensionnel, ce qui permet de garder toute la complexité de la chimie (découplage ions-neutres, chimie sur les grains, très grande disparité des temps de relaxation chimiques...). Dans le cas de la turbulence, nous développons plusieurs axes. Le premier consiste à faire le post-traitement local en 1D avec le code PDR de Meudon de résultats de simulations numériques 3D à très haute résolution de la turbulence magnéto-hydrodynamique en milieu multiphasique (Hennebelle et al. 2008). Cela permet la prise en compte simultanée du champ de densité et du champ de radiation UV local dans le calcul des abondances chimiques. Les résultats, en moyenne, se comparent de façon remarquable aux observations [1] à quelques exceptions près qui sont les molécules dont la formation est très endothermique. Ce sont ces exceptions, ainsi que la détection récente (Ingalls et al. 2011) de l'émission de rotation pure de H_2 dans du gaz diffus, qui sont à l'origine de la deuxième approche. Elle consiste à traiter spécifiquement les régions où la dissipation de la turbulence est concentrée: dans des chocs à basse vitesse (Lesaffre et al. 2013) ou dans des « vortex » de fort cisaillement de vitesse ([3], [4]). Dans le domaine des jets protostellaires, nous avons utilisé un modèle dynamique 2D stationnaire et auto-similaire pour explorer pour la première fois la structure chimique des jets magnéto-centrifuges issus de disques d'accrétion autour d'étoiles jeunes ([2]). Malgré le flux UV et X intense de la source centrale, les molécules de H_2, CO et H_2O peuvent survivre en grande quantité dans le jet grâce aux temps de traversée très courts, dès que l'écrantage par les poussières est suffisant, mettant en lumière le rôle

essentiel de la chimie hors-équilibre dans ce type d'environnement. Ce modèle explique aussi naturellement la tendance observée que l'abondance des molécules décroit et la température du jet augmente lorsque le taux d'accrétion diminue.

En parallèle aux modélisations, de nouvelles observations ont été réalisées: - l'orientation du champ magnétique a été obtenue dans deux des champs où la statistique du champ de vitesse a permis d'identifier des régions de dissipation intense de la turbulence (observations en imagerie de la polarisation de la lumière des étoiles, en visible et IR proche ; Hily-Blant, Falgarone, Clemens et al. , en préparation). - la recherche des non-gaussianités du champ de vitesse, destinée à localiser les régions de dissipation intermittente de la turbulence, se poursuit au CSO et à l'IRAM dans des champs à haute latitude galactique découverts dans les raies de CO par la mission *Planck* (*Planck* collaboration 2013, sous presse, Falgarone & Hily-Blant, en préparation).

La richesse des résultats portant sur les premières étapes de la chimie interstellaire, que cela concerne les hydrures avec *Herschel*/HIFI [e.g. 5,6], et SOFIA/GREAT (Neufeld et al. 2012) ou H_3^+ (Gerin et al. 2012), est telle que de nouvelles voies de recherche sont d'ores et déjà en place concernant le rôle des rayons cosmiques et celui de la diffusion turbulente dans l'enrichissement du gaz diffus.

En ce qui concerne les jets protostellaires et les chocs associés, les observations avec *Herschel* ont également apporté des résultats très novateurs. Une émission intense de H_2O et de CO à haut-J est observée jusqu'à des vitesses de 50 km/s ou plus, en accord avec nos prédictions pour les chocs de type C avec précurseur magnétique (Lefloch et al. 2010). Le très haut signal sur bruit permis par HIFI révèle que les profils de H_2O et CO sont de forme exponentielle, une caractéristique dont le sens physique demeure encore énigmatique (Lefloch et al. 2012). Par ailleurs, le « choc en retour » de type dissociatif a pu être clairement identifié grâce à sa signature en [OI] et OH avec *Herschel*/PACS (Benedettini et al. 2012). Quant au jet lui-même, nos observations PdBI de HH212 révèlent que SiO y représente *au minimum* 10% du silicium total, ce qui pose un défi aux modèles actuels de formation de cette espèce par seul sputtering/shattering des grains dans les chocs (Cabrit et al. 2012).

Enfin, en ce qui concerne les étapes protostellaires, nous avons reconstruit a posteriori l'évolution chimique au cours de l'effondrement de coeurs denses de faible masse (avec rotation solide et champ magnétique) jusqu'à la formation du premier coeur de Larson. L'effondrement gravitationnel a été calculé en 3D avec le code de magnétohydrodynamique RAMSES, dans lequel nous avons introduit des particules "tracer" afin de sauvegarder l'histoire en position, température et densité de particules fluides qui nous servent de données d'entrée pour les calculs de l'évolution chimique. Ainsi, nous avons accès à la répartition spatiale des différentes molécules (en phase gazeuse ou sur les grains) au cours de l'effondrement et de la formation des disques protostellaires. Ces données sont encours d'analyse et serviront à l'établissement de prédictions d'observations de raies moléculaires pour ALMA (Commerçon et al. 2012, Levrier et al. 2013).

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

Codes numériques: RAMSES (MHD), Nautilus (chimie), PDR Meudon et d'autres non publics (celui de Turbulent Dissipation Regions et le code de chocs stationnaires-

5 publications significatives <u>avec titre et référence complète</u>

[1]- Levrier, F.; Le Petit, F.; Hennebelle, P.; Lesaffre, P.; Gerin, M.; Falgarone, E. 2012 A&A 544 A22 "UV-driven chemistry in simulations of the interstellar medium. I. Post-processed chemistry with the Meudon PDR code"
[2] - D. Panoglou, S. Cabrit, G. Pineau des Forêts, P. J. V. Garcia, J. Ferreira, and F. Casse, 2012 A&A 538, A2 "Molecule survival in magnetized protostellar disk winds I. Chemical model and first results"
[3] - Godard, B.; Falgarone, E.; Pineau Des Forêts, G. 2009 A&A 495 847, Models of turbulent dissipation regions in the diffuse interstellar medium
[4] - Godard, B.; Falgarone, E.; Gerin, M. et 8 co-auteurs, 2012 A&A 540 A87 "Comparative study of CH^+ and SH^+ absorption lines observed towards distant star-forming regions"
[5] - Falgarone, E.; Godard, B.; Cernicharo, J.; de Luca, M.; Gerin, M. et 55 co-auteurs, 2010 A&A 521 L15 "CH^+(1-0) and $^{13}CH^+$(1-0) absorption lines in the direction of massive star-forming regions"

Titre du projet: Couplage chimie-dynamique: turbulence, champ magnétique et jets:
II - Etude fine de la chimie des PDRs sur un prototype : la nébuleuse de la Tête de Cheval

Nom du porteur :	Pety					Prénom:	Jérôme
Courrier électronique	pety@iram.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	IRAM					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	UPS 2074					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)							
Financement ANR *	x						

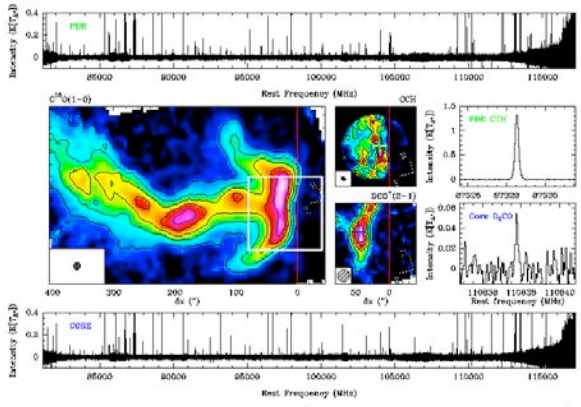
*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
LERMA	***Gerin M***	***INSU***
LUTH	***Le Petit F***	***INSU***
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	**********
CSIC-INTA	***Goicoechea JR***	

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

L'équipe mène depuis plusieurs années un projet d'ampleur visant à caractériser la structure et la composition chimique de la nébuleuse de la tête de cheval, pour en faire un objet prototype où les modèles actuels de régions de photodissociation peuvent être précisément testés et validés. Cette validation inclut non seulement les processus chimiques en phase gazeuse (réseau de réaction, rapports de branchements) mais aussi la compréhension des mécanismes de chauffage et refroidissement, et les interactions entre phases solides et gazeuses. En effet en raison de la complexité des processus à l'oeuvre, il est souvent difficile de comprendre les raisons d'un désaccord entre modèles et observations. Par sa géométrie relativement simple, et la bonne connaissance des conditions d'illumination, la nébuleuse de la tête de cheval est un objet privilégié permettant une comparaison précise des données aux modèles et ainsi de remonter aux sources des désaccords de la meilleure manière possible. L'approche combine des observations spectroscopiques à moyenne résolution avec le télescope de 30m de l'IRAM avec de l'imagerie à haute résolution spectrale de quelques espèces choisies avec les interféromètres (PdBI, prochainement ALMA). Nous avons pu étudier la variation du degré d'ionisation en fonction de la profondeur dans le nuage [2], établi que le radical HCO est un bon traceur des surfaces denses illuminées [1], et montré que le formaldehyde est produit selon deux voies différentes, invoquant la phase solide dans les régions illuminées et la phase gazeuse dans les régions denses [3]. Nous avons récemment obtenu un relevé spectral complet dans la gamme millimétrique de deux positions de cette nébuleuse sondant le milieu dominé par le rayonnement (PDR) et un cœur dense et protégé du rayonnement (CORE) (Figure). L'analyse de ce relevé a nécessité le développement de méthodes de traitement du signal innovantes. Les premiers résultats sont très encourageants, comme le montre la détection des ions CF^+ [4] et l-C_3H^+, un



Two 3mm line surveys in Horsehead (Pety, Guzman, Gratier et al., in prep)

acteur clé de la synthèse des hydrocarbures [5]. La spectroscopie micro-onde de cette dernière espèce n'étant pas connue, les mesures astrophysiques constituent la première détermination de ses paramètres spectroscopiques.

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

IRAM-30m, IRAM-PdBI,....

5 publications significatives avec titre et référence complète

1. Gerin, M.; Goicoechea, J. R.; Pety, J.; Hily-Blant, P., HCO mapping of the Horsehead: tracing the illuminated dense molecular cloud surfaces, , 2009, A&A 494 977
2. Goicoechea, J. R.; Pety, J.; Gerin, M.; Hily-Blant, P.; Le Bourlot, J.,The ionization fraction gradient across the Horsehead edge: an archetype for molecular clouds, 2009, A&A 498 771
3. Guzmán, V.; Pety, J.; Goicoechea, J. R.; Gerin, M.; Roueff, E., H_2CO in the Horsehead PDR: photo-desorption of dust grain ice mantles, 2011 A&A 534 A49
4. Guzmán, V.; Pety, J.; Gratier, P.; Goicoechea, J. R.; Gerin, M.; Roueff, E.; Teyssier, D., The IRAM-30m line survey of the Horsehead PDR. I. CF^+ as a tracer of C^+ and as a measure of the fluorine abundance, 2012, A&A 543 L1
5. Pety J., Gratier P., Guzman V., Roueff E., Gerin M., Goicoechea J.R., Bardeau S., Sievers A., Le Petit F., Le Bourlot J., Belloche A., The IRAM-30m line survey of the Horsehead PDR. II The first detection of the l-C3H+ hydrocarbon cation, 2012, A&A submitted.

Titre du projet: Environnements circumstellaires et interaction avec le milieu interstellaire

Nom du porteur :	Le Bertre					Prénom:	Thibaut
Courrier électronique	thibaut.lebertre@obspm.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	LERMA, Observatoire de Paris 61, av. de l'Observatoire 75014 Paris					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR 8112					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)	2	1.5	0	4			
Financement ANR *							

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
GEPI, 5 pl. J. Janssen, 92195 Meudon Cedex	Eric Gérard	INSU
IRAM, 38406 St. Martin d'Hères Cedex	Jan Martin Winters	INSU
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	----------
MIT Haystack Observatory, MA 01886, USA	*Lynn D. Matthews*	

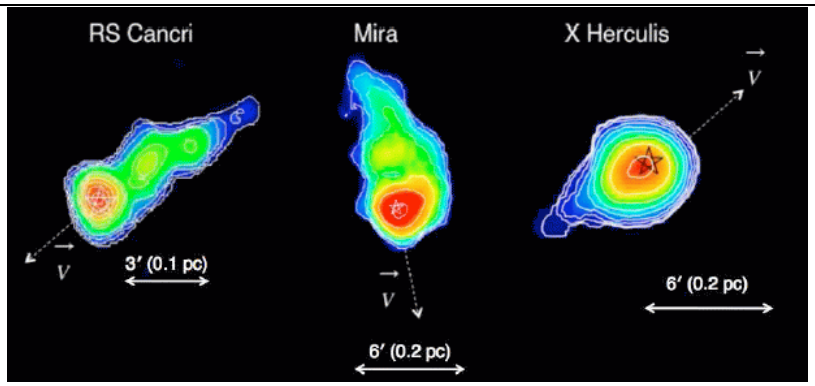
Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

A la fin de leur vie les étoiles éjectent des quantités importantes de matière et s'entourent d'enveloppes circumstellaires, qui s'étendent pour atteindre des grandes tailles et finalement se diluer dans le milieu interstellaire, contribuant ainsi à l'évolution chimique de la Galaxie. Ce phénomène se développe de manière irrégulière avec des échelles de temps qui vont de quelques années à quelques millions d'années.

Nous étudions les enveloppes circumstellaires autour des étoiles géantes rouges à partir d'observations dans les raies radio des molécules, telles que CO ou SiO, et des espèces atomiques, telles que l'hydrogène ou le carbone. La modélisation des profils de ces raies permet de contraindre les conditions physiques dans ces enveloppes, de reconstituer l'historique de la perte de masse autour d'étoiles à différents stades de leur évolution finale, et enfin d'étudier l'injection de matière d'origine stellaire dans le milieu interstellaire.

Un de nos résultats les plus spectaculaires a été la mise en évidence de trainées associées à l'interaction entre le milieu interstellaire et les enveloppes circumstellaires autour d'étoiles géantes rouges ayant un mouvement propre important (cf. figure jointe). C'est dans ces trainées que la matière stellaire est réinjectée dans le milieu interstellaire contribuant ainsi à l'écologie de notre Galaxie.



Exemples de trainées associées à des étoiles de l'AGB, en phase de perte de masse intense et se déplaçant à travers le milieu interstellaire.
Les flèches en pointillé indiquent la direction du mouvement propre de l'étoile.
Les symboles étoilés marquent les positions des étoiles centrales. Ces images ont été obtenues au VLA dans la raie de l'hydrogène à 21 cm : RS Cnc (Libert et al. 2010), Mira (Matthews et al. 2008), et X Her (Matthews et al. 2011).

Le soutien du PCMI a été essentiel en nous permettant plusieurs missions de travail aux USA (CfA + Haystack) et à Grenoble (IRAM). Nous avons pu aussi participer à des conférences où nous avons présenté nos travaux (AGB conference, Vienna, 2009 ; SF2A). En octobre 2012, nous prévoyons une mission de travail aux USA pour travailler sur nos données obtenues au VLA et au GBT, couplée à une conférence (Oct. 3-5, « Radio stars and their lives in the Galaxy »).

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

5 publications significatives avec titre et référence complète

Libert Y., Gérard E., Le Bertre T., Matthews L.D., Thum C., Winters J.M., 2009, "CO and HI observations of an enigmatic interstellar cloud", Astron. Astrophys., 500, 1131

Libert Y., Gérard E., Thum C., Winters J.M., Matthews L.D., Le Bertre T., 2010, "Circumstellar HI and CO around the carbon stars V1942 Sgr and V CrB", Astron. Astrophys., 510, A14

Libert Y., Winters J.M., Le Bertre T., Gérard E., Matthews L.D., 2010, "HI and CO in the circumstellar environment of the S-type star RS Cnc", Astron. Astrophys., 515, A112

Matthews L.D., Libert Y., Gérard E., Le Bertre T., Johnson M.C., Dame T.M., 2011, "HI Observations of the Asymptotic Giant Branch Star X Herculis: Discovery of an Extended Circumstellar Wake Superposed on a Compact High-Velocity Cloud", Astron. J., 141, 60

Le Bertre T., Matthews L.D., Gérard E., Libert Y., 2012, "Discovery of a detached HI gas shell surrounding alpha Orionis", Monthly Notices Roy. Astron. Soc., 422, 3433

Titre du projet: Du milieu interstellaire aux météorites et aux disques protoplanétaires

Nom du porteur :	Gounelle					Prénom:	Matthieu
Courrier électronique	gounelle@mnhn.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	LMCM - UMR7202 Case Postale 52 57, rue Cuvier 75231 Paris Cedex 05, France					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR7202					Section(s) CNRS	
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	35
Montant Alloué (k€)			2.5	2			
Financement ANR *							

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	----------

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

***Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme*:**

Dans le cadre du projet PCMI en 2011 et 2012, nous avons réalisé les projets suivants.

(i) Par des calculs analytiques et semi-analytiques, nous avons montré que la préservation des inclusions réfractaires dans le disque protoplanétaire pendant plusieurs millions d'années avant l'agglomération des chondrites requérait la présence d'une région de faible turbulence, ou zone morte, conformément aux prédictions astrophysiques de Gammie (1996). Le transport efficace des inclusions réfractaires des régions internes du disque vers la périphérie serait alors antérieur à la formation de cette zone morte et peut-être consécutif à l'expansion du disque supposé initialement compact (à l'issue de la phase d'effondrement). C'est l'objet de notre lettre Jacquet et al. (2011a).

(ii) Nous avons revisité, d'un point de vue analytique, le problème de la redistribution aérodynamique des composants chondritiques dans le disque protoplanétaire avant leur agglomération, pour déterminer dans quelle mesure ils pouvaient rendre compte de certains fractionnements observés dans les différents groupes de chondrite. Afin de s'affranchir quelque peu des incertitudes pesant sur les modèles spécifiques de disque (profil en densité, valeur du paramètre α...), nous avons mis en exergue le paramètre de découplage gaz-solide S, rapport du nombre de Stokes et du paramètre α. Si S<1, les solides se comportent comme des traceurs passifs dans le gaz tandis que pour S>1, ils se sédimentent vers le plan médian et dérivent vers le Soleil relativement au gaz. Nous avons conjecturé que les composants chondritiques (hors matrice) avaient S<1 lors de l'accrétion des chondrites carbonées et S>1 pour les autres, conjecture que nous avons fondée sur la proportion d'inclusions réfractaires, de matrice, la complémentarité et la distribution des signatures isotopiques de l'oxygène des chondres. Il s'ensuivrait que les chondrites carbonées se seraient accrétées antérieurement aux chondrites non carbonées, et que dans les premières, les inclusions réfractaires seraient cogénétiques avec une fraction significative de leur hôte. Nous avons publié ces considérations dans Jacquet et al. (2012).

(iii) Nous avons étudié un modèle réduit analytique l'interaction entre la sédimentation de la poussière dans un disque agité de turbulence magnétohydrodynamique, et cette même turbulence qui est contrôlée par le taux d'ionisation, lui-même contrôlé par la concentration de poussière. Nous avons trouvé qu'il existait un équilibre, que nous avons calculé dans un exemple concret, et que cet équilibre était inconditionnellement stable. C'est l'objet de Jacquet & Balbus (2012).

(iv) Nous avons également entrepris d'interpréter la phase linéaire de l'instabilité d'écoulement. Nous proposons que les maxima de pression attirent la poussière qui entraîne le gaz, exacerbant en retour lesdits maxima, créant une boucle de rétroaction positive. Nous trouvons que la dérive gaz/solide initiale et la rotation sont des adjuvants essentiels à l'instabilité, qui ne peut dès lors être capturée par des modèles-jouets unidimensionnels. C'est l'objet de Jacquet et al. (2011b).

(v) Nous avons étudié analytiquement l'équivalent radiatif de la classique instabilité de Rayleigh-Taylor (résultant de la superposition d'un fluide dense au-dessus d'un fluide léger), et ce dans deux limites: la limite optiquement mince, isotherme, où la force de radiation joue le rôle d'une gravité effective, et la limite optiquement épaisse, adiabatique, où elle ne fait effectivement que modifier l'équation d'état du fluide. Quoiqu'éloigné quelque peu du propos central des axes précédents, ce projet y est relié par sa pertinence (dans la limite adiabatique) à l'accrétion des étoiles massives dont certaines ont sans doute fait partie de l'environnement du système solaire primitif sur la foi de certaines radioactivités éteintes. Ces résultats ont été décrits par Jacquet & Krumholz (2011).

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

5 publications significatives <u>avec titre et référence complète</u>

Jacquet E., Gounelle M., Fromang S. (2012), On the aerodynamic redistribution of chondrite components in protoplanetary disks, *Icarus*, 220(1), 162-173.

Jacquet E., Balbus S. (2012), A self-consistent reduced model for dusty magnetorotationally unstable disks, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 423, 437-443.

Jacquet E., Balbus S. A., Latter H. N. (2011b), On linear dust-gas streaming instabilities in protoplanetary discs, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 415, 3591-3598.

Jacquet E., Krumholz M. (2011), Radiative Rayleigh-Taylor instabilities, *The Astrophysical Journal*, 730, 116.

Jacquet E., Fromang S., Gounelle M. (2011a), Radial transport of refractory inclusions and their preservation in the dead zone, *Astronomy & Astrophysics*, 526, L8.

Titre du projet: Physico-Chimie des Disques Protoplanetaires

Nom du porteur :	Dutrey et Guilloteau					Prénom:	Anne / Stéphane
Courrier électronique	Anne.dutrey@obs.u-bordeaux1.fr ; Stephane.Guilloteau@obs.u-bordeaux1.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	UMR4804 , LAB 2 rue de l'observatoire, F-33271 Floirac Cedex					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR5804					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	
Montant Alloué (k€)	10	5	6	5			
Financement ANR *							

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
IRAM	Pietu Vincent	
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	----------
MPIA, Heidelberg, Allemagne	D.Semenov	
ASIAA, Taipei, Taiwan	P.Ho	

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

Notre objectif à terme est la détermination de l'évolution des disques en fonction de l'âge des étoiles et de leur masse (0.5-2.5 Msol). **Nous développons une approche en plusieurs étapes :**

A) «Chemistry In Disks» /CID: En 2004, nous avons mis en place un grand projet en collaboration avec le groupe «formation planétaire» du Max-*Planck* d'Astrophysique de Heidelberg, l'IRAM: le projet CID «Chemistry In Disks» (co PIs : A.Dutrey, Th.Henning). Cette collaboration est devenue internationale en 2011 pour préparer ALMA. Ce projet englobe les trois étapes essentielles (et imbriquées) à la détermination des conditions physiques : observations mm/submm à haute résolution angulaire, modélisation de la chimie et transfert radiatif pour la comparaison aux modèles. 4 projets soumis en cycle 0/ALMA, 1 accepté.

B) «Dust in Circumstellar Environments » /DICE: Fin 2008, nous avons lancé le projet DiCE «Dust in Circumstellar Environments » qui traite des problèmes liés aux poussières, tant côté observations que modélisations. La thèse de Y. Boehler (dir. A. Dutrey), soutenue en décembre 2011, porte sur l'observabilité de la sédimentation avec ALMA (Boehler et al 2012).

C) Disques jeunes : Nous nous intéressons aux premières phases de la formation des disques proto-planétaires dans les enveloppes de protoétoiles de faible masse. Nous étudions en particulier l'évolution de la composition chimique des manteaux de glace à partir du nuage moléculaire. Il s'agit du sujet de la thèse de U. Hincelin (co-dir : V. Wakelam et S. Guilloteau), soutenance octobre 2012.

D) Age des étoiles jeunes : Caractériser l'évolution demande de connaitre l'âge des systèmes. Fin 2009, nous avons commencé une action visant à mieux déterminer l'âge des étoiles jeunes, via une combinaison de mesure de masse (dynamique) et de distance (MAYS, Mass and Age of Young Stars). Une première réunion de travail (consortium international) a eu lieu en Novembre 2010 au LAB.

E) Polarisation et champ magnétique (projet DiMaFi pour « Disks Magnetic Field »): Post-doc de Y.W. Tang au LAB de deux ans (2010-2012) dédié à la compréhension du champ magnétique dans les étoiles jeunes par caractérisation de la polarisation dans le domaine millimétrique.

F) Étude de la dissipation des disques : 1/ dissipation par effets de marée l'anneau circumbinaire de GG Tau (1 projet ALMA/cycle 0 accepté) ; 2/ étude de 3 disques avec un faible rapport (apparent) gaz/poussières par un sondage des raies de 12CO et 13CO (1 projet ALMA Cycle 0 accepté).

G) Physique des disques de débris : imagerie millimétrique à haute dynamique de l'émission des poussières dans les exo-ceintures de Kuiper, recherche de structures en résonance de moyen mouvement avec un système planétaire à l'image du résultat Vega au PdBI (Piétu et al 2011).. Caractérisation spatiale de la distribution de poussières chaudes dans l'IR proche et thermique (données FLUOR et VISIR) autour d'étoiles MS (collab. LESIA-IPAG-Liège et SAp-CEA).

H) Formation Planétaire autour des post-TTauri : recherche de Jupiters chauds autour d'étoiles jeunes (<100Myr) des associations proches, programme PI (di Folco) sur CRIRES, en collaboration avec S. Udry, F. Pepe (Genève) et P. Figueira (Porto).

Dans les 4 années passées, nous avons obtenu les principaux résultats suivants

- Découvertes et analyse multi-longueur d'ondes de cavités en poussières dans HH30 (Guilloteau et al 2008, Madlener et al 2012) et en gaz (GM Aur, Dutrey et al 2008).
- Développement d'un code de chimie avec diffusion (NAUTILUS), et évaluation de l'impact croisé diffusion – photodésorption sur l'abondance de CO (Hersant et al 2009)
- Mesure de masses stellaires (Schaefer et al 2009, Guilloteau et al 2012), projet MAYS
- Possible rotation du flot de CB26 (Lauhnardt et al 2009)
- Structure du disque interne de AB Aur (Di Folco et al 2010).
- Détection de C_2H dans les disques de DM Tau, LkCa15 et MWC480 (Henning et al 2010)
- Limites sur CI dans le disque de CQ Tau (Chapillon et al 2010)
- Benchmarks des codes de chimie (Semenov et al 2010)
- Recherche d'un compagnon sub-stellaire dans le disque de LkCa15 (Bonavita et al 2010)
- Structure du disque interne de MWC758 (Di Folco et al 2010)
- Analyse d'un survey continuum bi-fréquence haute résolution de 20 disques avec première mise en évidence de variations radiales des propriétés des poussières (Guilloteau et al 2011).
- Construction d'un réseau chimique à haute température (Harada, Herbst & Wakelam, 2010)
- Analyse de CN (2-1) et HCN (1-0) (Chapillon et al 2012)
- Chimie du soufre dans les disques protoplanétaires (Dutrey et al. 2011)
- Recherche de H2D+ dans les disques de TW Hya et DM Tau (Chapillon et al 2011).
- Effet de la déplétion de l'oxygène sur la chimie des régions denses (Hincelin et al. 2011)
- Prédictions et simulations de la sédimentation dans les disques (Boehler et al 2012, soumis)
- Détection de HC3N dans 3 disques protoplanétaires (Chapillon et al 2012)
- Analyse de la dynamique des bras spiraux autour de AB Auriga (Tang et al 2012, soumis)

5 publications significatives avec titre et référence complète

- Semenov, D.; Hersant, F.; Wakelam, V.; Dutrey, A.; Chapillon, E.; Guilloteau, St.; Henning, Th.; Launhardt, R.; Piétu, V.; Schreyer, K., 2010 AA, 522, A42
Chemistry in disks. IV. Benchmarking gas-grain chemical models with surface reactions
- Guilloteau, S.; Dutrey, A.; Piétu, V.; Boehler, Y., 2011 AA, 529, A105
A dual-frequency sub-arcsecond study of proto-planetary disks at mm wavelengths: first evidence for radial variations of the dust properties
- Hincelin, U.; Wakelam, V.; Hersant, F.; Guilloteau, S.; Loison, J. C.; Honvault, P.; Troe, J., 2011, AA, 530, A61
Oxygen depletion in dense molecular clouds: a clue to a low O_2 abundance?
- Dutrey, A.; Wakelam, V.; Boehler, Y.; Guilloteau, S.; Hersant, F.; Semenov, D.; Chapillon, E.; Henning, T.; Piétu, V.; Launhardt, R.; and 2 coauthors, 2011, AA, 535, A104
Chemistry in disks. V. Sulfur-bearing molecules in the protoplanetary disks surrounding LkCa15, MWC480, DM Tauri, and GO Tauri
- Chapillon, E., Dutrey, A., Guilloteau, S., Pietu, V., Wakelam, V., Hersant, F., Gueth, F., Henning, T., Launhardt, Schreyer, K., Semenov, D., 2012, Ap J., 756(1) 58, CID: Chemistry In Disks VII. First detection of HC3N in protoplanetary disks.

Titre du projet: Chimie des phases précoces de la formation stellaire

Nom du porteur :	Maret					Prénom:	Sébastien
Courrier électronique	sebastien.maret@obs.ujf-grenoble.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	IPAG, BP 53, 38041 Grenoble cedex 9					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR5274					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)			5	6,4			
Financement ANR *				xx			

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	Responsable Projet	Institut CNRS principal
IAS, Orsay	Guillaume Pineau des Forêts	INSU
LRA, Paris	Patrick Hennebelle	INSU
CEA, Saclay	Philippe André	INSU
Partenaire Etranger	Responsable Projet	----------
U. du Michigan, Ann Arbor (USA)	Edwin Bergin	
OAN, Madrid (Espagne)	Mario Tafalla	

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

Les étoiles de type solaire se forment par effondrement gravitationnel de cœurs pré-stellaires au sein de nuages moléculaire sombres. Dans les premières phases de sa formation, la proto-étoile est entourée d'une enveloppe qui représente la plus grande partie de sa masse, tandis que la matière s'effondre sur l'objet central par l'intermédiaire d'un disque d'accrétion, qui pourra lui-même former un système planétaire. Au cours de ce processus, la composition chimique du gaz change de façon spectaculaire: alors que dans les coeurs pré-stellaires la plupart des molécules sont gelées à la surface des grains, elles s'évaporent dans les parties internes des proto-étoiles, augmentant ainsi la complexité chimique du gaz. L'étude la chimie au cours des phases précoces est importante pour deux raisons. D'une part, comprendre les processus physico-chimiques au cours des premières phases est crucial pour déterminer la composition chimique du gaz qui formera le disque proto-planétaire. D'autre part, la chimie peut être utilisée comme diagnostic des conditions physiques régnant dans les coeurs pré-stellaires et les proto-étoiles (température, degré d'ionisation, cinétique du gaz, etc.) et donc être utilisée comme outil pour comprendre la formation stellaire.

L'objectif du projet est d'étudier la chimie des premières phases du processus de formation stellaire (nuages sombres, cœurs pré-stellaires et proto-étoiles). Ce projet, qui a été initié en 2011 avec le soutien du PCMI et du PNPS, a comporté plusieurs volets. Premièrement, nous avons réalisé une étude détaillée de la chimie dans deux cœurs pré-stellaires, L1498 et L1517B, en utilisant une technique que nous avons développée dans notre étude pilote du cœur Barnard 68. Cette étude a permis d'apporter des contraintes importantes sur la structure physique et chimique de ces deux objets. En particulier, nous avons montré que ces deux objets sont âgés d'une dizaine de millions d'année seulement, ce qui semble exclure une formation via le scénario classique de contraction par

diffusion ambipolaire. Les résultats de cette étude seront publiés dans un article dont la soumission est prévue pour septembre (Maret, Bergin & Tafalla 2012a, en prep.).

Deuxièmement, nous avons étudié en détail la chimie de l'azote dans les conditions typiques des nuages sombres. Jusqu'à présent, les modèles de chimie ne permettait pas d'expliquer les abondances et le fractionnement isotopique des molécules azotés (notamment les hydrures d'azote) observées par l'instrument *Herschel*/HIFI (Hily-Blant et al. 2010, Bacmann et al. 2010). Afin de mieux comprendre ces phénomènes, nous avons réalisé des observations de molécules azotés et de leur isotopologues avec *Herschel*/HIFI (une demande OT1 et une autre OT2, toutes deux acceptées priorité 1). L'analyse de ces données est en cours. Parallèlement, nous avons entrepris un effort important de modélisation de la chimie des espèces azotés. Un résultat important de ce travail a été de montrer que la formation des hydrures d'azotes dépendait fortement du rapport o/p de l'hydrogène moléculaire, un effet qui avait été négligé jusqu'à présent (Dislaire et al., 2012). Ce travail se poursuit à présent dans le cadre de la thèse de Romane Le Gal, financée par une bourse CIBLE de la région Rhône-Alpes (PI Pierre Hily-Blant). Par ailleurs, nous avons obtenu un financement ANR blanc 2012 (projet HYDRURES, PI Alexandre Faure) pour étudier l'excitation collisionnelles d'espèces azotés, notamment NH.

Troisièmement, nous avons étudié la cinématique des enveloppes de la proto-étoile de Classe 0, NGC1333-IRAS2, que nous avons observé dans le cadre d'un large programme avec l'interféromètre du Plateau de Bure (PI Philippe André). L'objectif de ce programme est de sonder les différentes parties des enveloppes grâce à la combinaison de plusieurs traceurs moléculaires. Ces observations devraient donc permettre de reconstruire la cinématique du gaz de l'enveloppe. Un premier résultat de cette étude a été de contraindre la vitesse de rotation de l'enveloppe à une échelle de quelques centaines d'AU seulement (stage de M2 de Cléa Serpollier). L'absence de rotation significative à ces échelles suggère qu'un mécanisme de freinage efficace (probablement magnétique) est à l'oeuvre (Maret et al. 2012b, in prep.). Afin d'interpréter ces observations, nous développons actuellement des modèles couplant la chimie et la dynamique de l'effondrement. Pour cela nous avons obtenu un financement ANR jeune chercheur 2012 (projet Chemodyn, PI Sébastien Maret). Un postdoc sera recruté en 2013 pour travailler sur le projet.

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

5 publications significatives avec titre et référence complète

- P. Hily-Blant, S. Maret, A. Bacmann, S. Bottinelli, B. Parise, et al., Nitrogen hydrides in the cold envelope of IRAS 16293-2422, Astronomy & Astrophysics, L52 (2010)
- A. Bacmann, E. Caux, P. Hily-Blant, B. Parise, L. Pagani, et al., First detection of ND in the solar-mass protostar IRAS16293-2422, Astronomy & Astrophysics, L42 (2010)
- V. Dislaire, P. Hily-Blant, A. Faure, S. Maret, A. Bacmann, and G. Pineau Des Forêts, Nitrogen hydrides and the H2 ortho-to-para ratio in dark clouds, Astronomy and Astrophysics, A20 (2012)
- S. Maret, E.A. Bergin and M. Tafalla, Using chemistry to constrain the evolutionary state of the L1498 and L1517B prestellar cores, Astronomy and Astrophysics, en prep. (2012b)
- S. Maret et al., Kinematics of the NGC1333-IRAS2 enveloppe on 100 AU scales,, Astronomy and Astrophysics, en prep. (2012b)

Titre du projet: Physico-Chimie des régions de formation d'étoiles

Nom du porteur :	Caux					Prénom:	Emmanuel
Courrier électronique	Emmanuel.caux@irap.omp.eu						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	IRAP, BP 44346, 31028 Toulouse Cedex 4, France					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)						Section CNRS	34
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	
Montant Alloué (k€)	0	0	2	0			
Financement ANR *							

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
LERMA	*M. Pérault*	*INSU*
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	----------
Pr René Plume	*Pr René Plume*	
University of Calgary, CA		

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

***Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme*:**

Cette proposition concernait une demande de moyens pour l'exploitation scientifique d'un programme OT1 d'*Herschel* :

"C18O/C17O in Hot Cores". PI: Plume (Calgary), co-I: Bergin, Bell, Caux, Cernicharo, Encrenaz P., Goldsmith, Johnstone, Kaufman, Lis, Lord, Melnick, Menten, Mueller, Ossenkopf, Pérault, Röllig, Schilke, Stutzki, Teyssier, Tolls, van der Tak, Wang.

A ce jour, seule une source de la demande a été observée avec *Herschel* HIFI, et le programme d'observation complémentaire au sol avec le 30m de l'IRAM, accepté depuis l'année dernière mais pas observé à cause du mauvais temps, est reprogrammé du 5 au 7 septembre 2012.

Nous n'avons donc pas encore utilisé les 2 k€ alloués en 2011. Nous comptons utiliser cette allocation pour une mission à Calgary dès la fin des observations HIFI (au plus tard au printemps 2013, puisque la fin de vie de *Herschel* est prévue en février 2013) pour travailler avec le PI, René Plume sur l'analyse et l'interprétation des données recueillies.

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

5 publications significatives avec titre et référence complète

Titre du projet: The physical conditions of star formation at low metallicity

Nom du porteur :	Hony					Prénom:	Sacha
Courrier électronique	Sacha.hony@cea.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	**AIM/CEA-Saclay** **Bat 709, orme des merisiers** **91191 Gif sur Yvette Cedex** **France**					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	**UMR 7158**					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)			5				
Financement ANR *							

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
CESR	***J-Ph Bernard***	
Observatoire de Strasbourg	***C. Bot***	
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	----------

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours...

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

How galaxies convert their gas reservoirs into stars is a stumbling block in understanding galaxy evolution. The far IR and submm cooling lines arising from photodissociation regions (PDRs) are the key diagnostics of the interplay between star formation and the evolving ISM throughout the course of the history of the universe. While effort has been put into physics of PDRs and star formation in the Galaxy and other metal-rich galaxies, little attention has been put into understanding the effects of the lower metal abundance on the these processes.

We have been awarded 79h of *Herschel* time in an Open Time (OT1) program to observe PACS ([CII] 158 µm, [OI] 63 µm, [OI] 145 µm, [OIII] 88 µm, [NII] 122 µm) and SPIRE FTS spectroscopy towards carefully selected star forming sites in the nearest low metallicity galaxies, the Magellanic Clouds (MCs) as a benchmark study to calibrate the primary diagnostics of low metallicity environments which are crucial for ALMA high redshift science. The proximity of the MCs allows *Herschel* to resolve molecular clouds at 3 pc scale. Our targeted regions span a wide diversity of environments, including dense molecular gas and ionised regions. These new data, together with existing IRS spectra, *Herschel* and Spitzer photometry, and a wealth of ground−based data including the MAGMA CO data, will allow us to address important unresolved issues:
1) the amount of molecular gas hidden in a low extinction phase where CO is photodissociated and thus not detected;
2) the dependence of the FIR fine structure lines, CO excitation and gas thermodynamics on environment; and
3) the structure of PDRs at low metallicity.
Our results will be key to interpreting FIR fine structure lines and CO observations of more distant systems. We will produce PDR models tested at low metallicity, a library of CO excitation at low metallicity, and a calibration of the amount of "CO−free" molecular gas as a function of environment. In addition, multi−line maps covering the main coolants of the atomic and molecular gas, represent a data product with lasting legacy value.

The collaboration has let to a number of papers that are listed below.

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

5 publications significatives avec titre et référence complète

The State of the Gas and the Relation between Gas and Star Formation at Low Metallicity: The Small Magellanic Cloud, Bolatto et al., 2011, ApJ, 741, 12

Lebouteiller, V., Cormier, D., Madden, S.C., Galliano, F., Indebetouw, R., Abel, N., et al., « Physical Conditions in the gas phases of the HII region LMC-N11B, unveiled by *Herschel*. I. Prevalence of the extended [CII] and [OIII] diffuse émission », 2012, A&A, 548, A91.

Titre du projet: Phénomènes d'irradiation à haute énergie dans les régions de formation d'étoiles

Nom du porteur :	Montmerle					Prénom:	Thierry
Courrier électronique	montmerle@iap.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	Institut d'Astrophysique de Paris 98bis, Bd Arago 75014 Paris					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR 7095					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)	6	6	6	NA			
Financement ANR *							

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
IPAG – Université Joseph-Fourier-Grenoble	C. Ceccarelli	INSU
LUPM – Université de Montpellier	A. Marcowith	IN2P3
Muséum National d'Histoire Naturelle	M. Gounelle	NA
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	----------
Penn State University, PA (USA)	L. Townsley	

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

Ce thème s'est développé sur trois axes de rétroaction des étoiles massives sur leur environnement (notamment les nuages moléculaires), ayant en commun des phénomènes d'irradiation à haute énergie (X, g, radioactivité): (i) phase dominée par les vents stellaires; (ii) présence des restes de supernova; (iii) traces de ces phénomènes dans les météorites et leurs conséquences sur une vision "moderne" de la formation du système solaire.

(i) La phase "vents stellaires"

La série d'observations X menées depuis quelques années avec les satellites X *XMM-Newton* et *Chandra* (collaboration Penn State University) a permis de découvrir une émission X diffuse dans la nébuleuse d'Orion (2008: Güdel et al., *Science*), ainsi que dans la nébuleuse de la Carène (2009-2011: Townsley et al. 2011, 12 articles dans ApJS: [5]). Cette émission correspond à un plasma ayant une température de l'ordre de 1 MK (~ 1 keV), dont l'existence avait été prévue théoriquement dans les années 1975 (à la suite de la découverte des vents stellaires), mais jamais mise en évidence de façon certaine faute de sensibilité et de résolution angulaire en rayons X. La cartographie et la spectroscopie étendues de ces régions (de 0,25 degrés carrés pour Orion à 1,5 pour la Carène) se sont faites grâce à des mosaïques plus ou moins complexes. Celles-ci montrent clairement que le plasma est ouvert vers l'extérieur, et qu'il est en équilibre de pression avec les nuages moléculaires associés, se frayant un chemin entre les structures denses présentes.

A cette occasion, un nouveau phénomène a pu être mis en évidence dans la Carène (et rétrospectivement dans d'autres régions de formation d'étoiles massives observées en X): il s'agit de *l'échange de charge* à l'interface entre le plasma chaud et les nuages moléculaires froids. Ce phénomène, bien connu dans l'héliosphère, mais pas à cette échelle (~[40 pc]^3), a pu être mis en évidence grâce à la présence de certaines raies X non-thermiques [4].

Un ***atelier international***, réunissant une trentaine de personnes, a été organisé à l'IAP (par T. Montmerle et R. Lallement) et financé par PCMI, pour faire le point sur ce mécanisme, maintenant vu même à l'échelle extragalactique (Montmerle et al. 2012, numéro spécial *d'Astronomische Nachtrichen,* 333, n°4*;* 22 articles).

Perspectives: le phénomène d'échange de charge, tel que vu en X, paraissant "universel" (échelles allant de l'héliosphère aux galaxies), son étude est très prometteuse. Cependant, les observatoires X actuels (*XMM-Newton* et *Chandra*) paraissent à la limite de sensibilité spectrale. Il faudra attendre le lancement du satellite X japonais *Astro-H* en 2014 pour pouvoir progresser observationellement. Des contacts en ce sens ont déjà été pris par TM, tandis que la modélisation progresse [4].

(ii) La phase "restes de supernova"

Les étoiles très massives (> 30-40 M_a) ont une durée de vie suffisamment courte pour qu'elles explosent au sein même de la région de formation d'étoiles où elles sont nées. De façon temporaire (pendant 10^4-10^5 ans), des restes de supernova peuvent donc être présents dans ces régions, et interagir avec les nuages moléculaires associés. Dans la mesure où l'on associe communément l'origine du rayonnement cosmique avec l'accélération de particules par des ondes de choc de restes de supernova, il s'ensuit un phénomène *d'irradiation des nuages moléculaires* par un rayonnement cosmique accéléré *in situ*. Au-delà d'une énergie ~ 1 GeV, l'interaction a une signature bien connue: $p + p \rightarrow \pi^\circ \rightarrow 2\gamma$, les γ ayant des énergies de 100 MeV à 10 GeV voire au-delà, selon le

spectre des protons accélérés. Ce phénomène avait déjà été proposé pour expliquer certaines sources γ découvertes par le satellite *COS-B* (e.g., Montmerle 1979, ApJ).
Le sujet a connu récemment une "nouvelle vie", à la suite de la mise en œuvre du satellite *Fermi* de la NASA, sensible de 1 GeV à 100 GeV environ, lancé en 2008, et surtout du télescope Čerenkov au sol *HESS* en Namibie, sensible au-delà du TeV. La communauté française (incluant notamment des physiciens des particules) est fortement impliquée dans ces deux observatoires. Des avancées décisives ont pu être réalisées notamment par *HESS*, dont la résolution angulaire (~ 0.1°, soit dix fois mieux que COS-B) permet de résoudre spatialement des sources situées à 2-3 kpc, distance typique des régions de formation d'étoiles massives les mieux connues. *HESS* a pu résoudre l'émission g associée à plusieurs régions de formation d'étoiles contenant des restes de supernova. Nous avons pu ainsi participer à des observations *HESS* (TM: Carène, Abramovski et al. 2012: [1]), mais notre démarche a surtout été d'utiliser l'émission g comme traceur d'interaction entre le rayonnement cosmique local à haute énergie et les nuages moléculaires, et d'y rechercher un *excès d'ionisation* produit par la composante à basse énergie (≲ 300 MeV) de ce même rayonnement cosmique.
En substance, le traceur d'ionisation que nous avons utilisé pour démarrer est le rapport DCO^+/HCO^+, mesuré au 30m de l'IRAM, et lié au taux d'ionisation z par le code de chimie de Meudon (Le Petit et al. 2006, A&A). Le programme est en cours d'exécution et de dépouillement, mais d'ores et déjà les résultats semblent très prometteurs. Ainsi, dans la région W51C, associée à une source *HESS/Fermi*, nous avons trouvé au voisinage du choc un rapport $z \sim 10^{-15}$ s^{-1}, soit ~ 100 fois l'ionisation moyenne des nuages moléculaires (Ceccarelli et al. 2011: [2]). Plus récemment, nous avons trouvé une surionisation d'un facteur ~ 20 dans plusieurs endroits de W28, région contenant un reste de supernova et également associée à une source (multiple) *HESS/Fermi* (en cours).
Ce résultat est non seulement intéressant pour la physique de l'accélération du rayonnement cosmique (en contraignant notamment le coefficient de diffusion des particules au voisinage du choc), mais aussi pour la chimie interstellaire (région fortement ionisées: "cosmic-ray dominated", où l'on est semble-t-il dans des conditions proches de la "bistabilité", jamais observée jusqu'à présent).
L'ensemble de la problématique rayonnement cosmique + milieu interstellaire a fait l'objet d'un ***colloque international*** organisé à Montpellier par A. Marcowith et al. en juillet 2011 ("CRISM"), financé en partie par PCMI, et publié dans *Mem.Soc.It*., 84, n°4 (2011).
Perspectives: ce nouveau domaine, à la frontière entre deux domaines où la France est fortement impliquée, apparaît comme très prometteur. De nouvelles observations IRAM (30m) sont prévues pour affiner la méthodologie, mais elles restent limitées en sensibilité. Il est clair que la prochaine étape sera ALMA.
(iii) Le "berceau" du système solaire
Notre programme a aussi inclus un volet concernant l'origine du système solaire, dont la problématique se trouve en fait très liée aux travaux ci-dessus, et qui en a donc bénéficié.
Le lien se fait via les météorites primitives (chondrites carbonées), qui portent les traces de "radioactivité éteintes", qui sont des noyaux radioactifs de courte période (< 1-3 Myr), témoins des toutes premières étapes de la formation du système solaire. Parmi ceux-ci, deux retiennent plus particulièrement l'attention: l'Al-26, produit essentiellement par nucléosynthèse normale des étoiles massives, et le Fe-60, signature de nucléosynthèse explosive produite par les supernovae.
Pour résumer, la présence de ces deux nuclides au moment de la formation du système solaire implique: (i) que l'environnement du Soleil jeune était celui d'une association OB, et (ii) qu'une explosion de supernova a du avoir lieu moins d'un million d'années avant sa formation. Sachant qu'il faut au moins 3 Myr pour que même une étoile de 100 M_a explose, la coïncidence pour que l'explosion de la supernova se fasse à la bonne distance et soit synchrone à mieux que 1 Myr avec la formation du système solaire, est très peu probable. Cette remarque a conduit M. Gounelle et coll. à proposer un scénario jouant sur deux ou trois générations successives d'étoiles, où les vents et les explosions d'au moins une supernova contaminent le nuage moléculaire d'où est issue la génération suivante, dont le système solaire (modèle SPACE; voir Gounelle et Meynet 2012: [3]).
Perspectives: si le scénario proposé rend compte de façon assez satisfaisante de l'abondance du Fe-60 originel, la question de l'Al-26 n'est pas vraiment résolue, et il est prévu de réexaminer la contribution des vents stellaires à ce scénario.

5 publications significatives avec titre et référence complète

[1] Abramovski, A., ..., Montmerle, T. 2012, MNRAS, 424, 128
HESS observations of the Carina nebula and its enigmatic colliding wind binary Eta Carinae
[2] Ceccarelli, C., Hily-Blant, P., Montmerle, T., Dubus, G., Gallant, Y., Fiasson, A. 2011, ApJ, 740, L4
Supernova-enhanced cosmic-ray ionization and induced chemistry in a molecular cloud of W51C
[3] Gounelle, M., Meynet, G., 2012, A&A, 545, A4
Solar system genealogy revealed by extinct short-lived radionuclides in meteorites
[4] Lallement, R. 2012, Astr.Nacht., 333, 347 Charge exchange X-ray emission at hot/cool gas interfaces
[5] Townsley, L., ..., Montmerle, T., et al. 2011, ApJS, 194, A15 The Chandra Carina Complex Project: Deciphering the Enigma of Carina's Diffuse X-ray Emission

Titre du projet: La molécule H_2 actrice de la formation des galaxies

Nom du porteur :	Boulanger					Prénom:	François
Courrier électronique	Francois.boulanger@ias.u-psud.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	Institut d'Astrophysique Spatiale Université Paris-Sud 91405 Orsay Cedex					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR8617					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)		5					
Financement ANR *							

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	----------
Caltech, Pasadena, Etats-Unis	Phil Appleton	

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

La formation des étoiles et des galaxies résulte de la capacité du gaz à dissiper son énergie. Le gaz doit se refroidir pour se condenser et former de nouvelles étoiles, mais la formation de structures, et la rétroaction des étoiles et des trous noirs sur leur environnement libèrent d'énormes quantités d'énergie. Cet antagonisme contribue à réguler le contenu en gaz des galaxies, son état physique et son efficacité à former de nouvelles étoiles. Nous sommes loin de pouvoir décrire cette physique du gaz dans le contexte de la formation des galaxies. C'est même un sujet encore peu exploré. Les observations ne sont que rarement utilisées pour quantifier le refroidissement du gaz car nous ne savons pas encore bien comment nous y prendre. Les simulations numériques elles n'intègrent les processus dissipatifs que de manière schématique, car ils impliquent un transfert d'énergie entre les phases du milieu interstellaire sur une gamme de densité et températures, ainsi que des échelles spatiales et temporelles, non résolues.

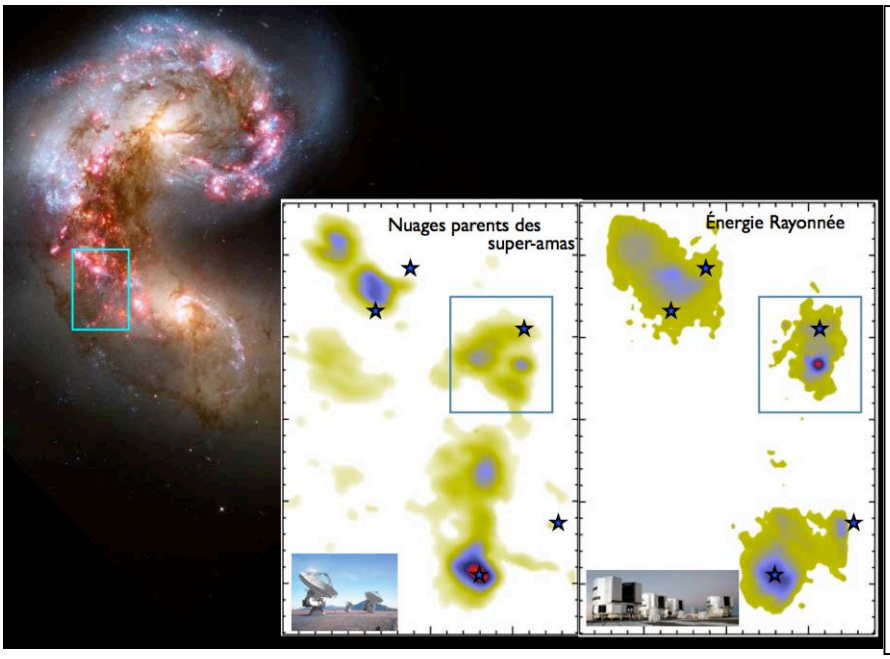
La découverte d'une nouvelle famille de sources extragalactiques avec un spectre dans l'infrarouge moyen dominé par les raies d'émission de H_2 a été un résultat inattendu des observations Spitzer. La faiblesse relative des bandes d'émission des poussières et des raies du gaz ionisé indique la présence de grandes quantités de gaz H_2 (jusqu'à 10^{10} M_o au centre des amas de galaxies) avec peu de formation d'étoiles. Un dénominateur commun de ces phases violentes de l'évolution des galaxies est la libération d'énergie mécanique en quantités suffisantes pour affecter globalement le milieu interstellaire. Les mêmes caractéristiques d'émission H_2 sont observées dans des objets extragalactiques où la source principale d'énergie mécanique est l'interaction entre galaxies, la rétroaction des étoiles massives sur le milieu interstellaire, un noyau actif ou l'accrétion de gaz. Les mêmes mécanismes de dissipation sont à l'œuvre dans toutes les galaxies riches en matière interstellaire, mais l'impact de l'énergie mécanique du gaz sur les observables est particulièrement patent dans les phases violentes de l'évolution des galaxies.

Les observations Spitzer, puis des données obtenues après avec l'IRAM, le VLT, *Herschel* et ALMA, nous ont donné l'opportunité d'ouvrir un nouvel axe de recherche. Ces observations montrent qu'une grande partie de l'énergie libérée dans l'évolution des galaxies n'est pas thermalisée aux échelles où elle est injectée. L'énergie cascade des grandes vers les petites échelles, et entretient des mouvements turbulents dans la phase froide du milieu interstellaire. On observe que la turbulence dans le gaz moléculaire est le principal réservoir d'énergie mécanique et que c'est dans le gaz moléculaire que l'énergie se dissipe car la turbulence y est supersonique. Le gaz moléculaire n'est pas uniquement la matière première de la formation d'étoiles, il joue aussi le rôle d'agent refroidisseur qui permet à la matière de se condenser.

Les simulations numériques montrent que la turbulence régule l'efficacité du gaz moléculaire à former des étoiles. Les observables du milieu interstellaire froid - l'émission infrarouge et millimétrique du gaz et de la poussière - sont depuis longtemps utilisés pour tracer la quantité de matière disponible pour former des étoiles et

le taux de formation d'étoiles. Mais comment peut-on établir le rôle régulateur de la turbulence? Notre travail ces dernières années a contribué à établir que certaines des raies du gaz, à commencer par les raies d'émission de la molécule H_2, mesurent le taux de dissipation de l'énergie turbulente

Nous avons fait nos premiers pas avec Pierre Guillard, Guillaume Pineau des Forêts et Phil Appleton sur une source emblématique le Stephan's Quintet. Nous avons depuis étendu notre travail à d'autres contextes astrophysique pour caractériser le lien physique entre dissipation d'énergie et la formation d'étoiles. Nous cherchons également à mieux caractériser les processus de dissipation d'énergie, l'état physique du gaz et le lien entre les phases. Ces deux dernières années, nos résultats les plus saillants proviennent de l'étude des radiogalaxies avec Nicole Nesvadba, et de la thèse de Cinthya Herrera sur les galaxies des Antennes. Dans les radiogalaxies comme dans le Stephan's Quintet nous observons que l'injection d'énergie entretient une turbulence d'amplitude suffisamment élevée pour empêcher le gaz de former des étoiles. Les observations des Antennes mettent en évidence la dissipation d'énergie associée à la formation des structures de gaz froid dans lesquelles les super amas stellaires se forment. Notre publication associant observations SINFONI et ALMA a été la première publication dans une revue à comité de lecture de données ALMA. Ce travail se poursuit avec l'analyse de données *Herschel* (imagerie et spectroscopie). Nous allons aussi poursuivre notre travail avec ALMA.



Observations des galaxies des Antennes avec ALMA dans le mm et le VLT dans l'IR proche. L'image de gauche montre l'émission du gaz moléculaire dans les raies de CO(3-2) (ALMA) et celle de droite H_2 1-0 S(1) (VLT) dans la région où les deux galaxies se rencontrent.L'émission H_2 trace la dissipation d'énergie associée à la formation des nuages moléculaires dans lesquelles les super amas stellaires (etoiles sur la figure) se forment

5 publications significatives avec titre et référence complète

- Nesvadba, N. P. H., Boulanger, F., Salomé, P. et al. 2010 A&A 521, 65: Energetics of the molecular gas in the H_2 luminous radio galaxy 3C 326: Evidence for negative AGN feedback

- Herrera, C. N., Boulanger, F. & Nesvadba, N. P. H. 2011, A&A 534, 138: From large scale gas compression to cluster formation in the Antennae overlap region

- Nesvadba, N., Boulanger, F., Lehnert, M., Guillard, P. & Salomé, P. 2011, A&A 536, L5 : Dense gas without star formation: The kpc-sized molecular disk in 3C326 N

- Herrera, C. N., Boulanger, F., Nesvadba, N. P. H. & Falgarone, E. 2012, A&A 538, L9: ALMA CO and VLT/SINFONI H2 observations of the Antennae overlap region: mass and energy dissipation

- Guillard, P., Boulanger, F., Pineau des Forêts, G. et al. 2012, ApJ 749, 158 : Turbulent Molecular Gas and Star Formation in the Shocked Intergalactic Medium of Stephan's Quintet

Titre du projet: Photoionisation à Faible Métallicité : Interprétation des Spectres PACS & Spitzer de Galaxies Naines

Nom du porteur :	Galliano					Prénom:	Frédéric
Courrier électronique	frederic.galliano@cea.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	AIM, bât 709, CEA/Saclay, L'Orme des Merisiers, 91191 Gif-sur-Yvette					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR 7158					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)			5				
Financement ANR *							

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	----------

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

Afin d'estimer de manière non biaisée le contenu en gaz de galaxies naines de faible métallicité, nous avons effectué un travail important d'observations, réduction de données, et analyse de traceurs physiques. Le pas suivant, pour lequel nous avons bénéficié de crédits PCMI, consistait à adapter les modèles de transfert de rayonnement existants aux particularités exceptionnelles de ces objets (métallicité, morphologie, flux de photons ionisants, etc.). Pour cela, nous avons collaboré étroitement avec le Dr. Nick Abel (Univ. Cincinnati), et l'avons fait venir à Saclay pour travailler avec nous du 2 au 15 juillet 2011. Cette visite a permis à notre doctorante (Diane Cormier) de modéliser les données de la galaxie naine Haro 11 ; et à notre post-doctorant (Vianney Lebouteiller) de modéliser les observations de la région N11B du grand nuage de Magellan.

Ce travail a donné lieu à deux publications dans A&A (Cormier et al. 2012 ; Lebouteiller et al. 2012).

En ce qui concerne la galaxie naine Haro 11, nous avons montré que les raies de structure fine étaient extrêmement brillantes, et constituaient l'un des mécanismes de refroidissement principal. Par ailleurs, l'intensité de la raie [OIII]88µm indique la prédominance d'une population stellaire très jeune. L'originalité principale de ce travail a permis de montrer qu'un modèle monophasé ne permettait pas de reproduire la complexité des traceurs observés. Il nous a fallu construire un modèle multi-phase, fait de régions HII compactes, PDR denses fragmentées et d'un milieu diffus peu ionisé ou neutre. Ce modèle (le premier du genre) a permis de démontrer en particulier la faiblesse du facteur de remplissage des PDRs dans les environnements de faible métallicité.

Notre étude de N11B, qui est une région de formation massive d'étoiles dans le LMC, nous a permis de cartographier la distribution spatiale des différentes raies du gaz. Grâce à la redondance de nos données, nous avons pu montrer qu'environ la moitié de l'émission du gaz ionisé est éteinte par la poussière. De plus, en modélisant la distribution des étoiles massives ionisantes, nous avons pu contraindre la densité du milieu ionisé, et montré que cette phase était diffuse (avec des densités de l'ordre de ≈10 cm-3). Finalement, nous avons pu quantifier la contribution des différentes phases du milieu interstellaire (PDR dense, milieu neutre diffuse, milieu ionisé) à l'émission de la principale raie de refroidissement du milieu interstellaire ([CII]158µm).

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

Cloudy

5 publications significatives avec titre et référence complète

Cormier, D., Lebouteiller, V., Madden, S.C., Abel, N., Hony, S., Galliano, F., et al., "The nature of the interstellar medium of the starburst low-metallicity galaxy Haro 11: a multi-phase model of the infrared emission" , 2012, A&A, 548, A20

Lebouteiller, V., Cormier, D., Madden, S.C., Galliano, F., Indebetouw, R., Abel, N., et al., "Physical conditions in the gas phases of the giant H II region LMC-N 11 unveiled by *Herschel* I. Diffuse [C II] and [O III] emission in LMC-N 11B" , 2012, A&A, 548, A91

Titre du projet: Molécules dans l'Univers : Observation et modélisation

Nom du porteur :	ROUEFF					Prénom:	Evelyne
Courrier électronique	Evelyne.roueff@obspm.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	Laboratoire Univers et Théories Observatoire de Paris Place J. Jansen, 92190 Meudon					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR8102					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)	8						
Financement ANR *							

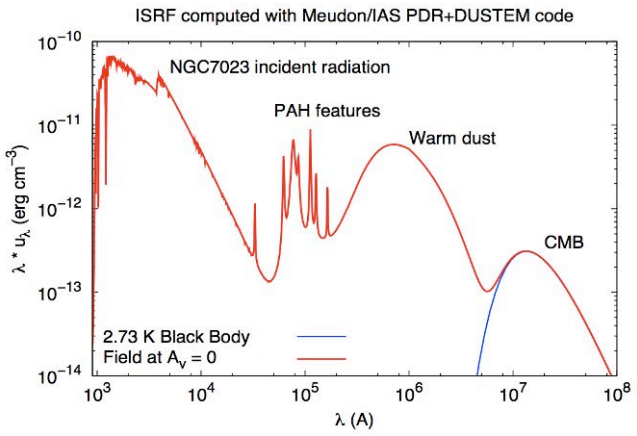
*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	Responsable Projet	Institut CNRS principal
Partenaire Etranger	Responsable Projet	----------
Université hébraïque de Jerusalem	Pr O. BIHAM	Contrat France-Israel

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

Le projet concernait les aspects d'observation des molécules interstellaires et la modélisation associée. Une étape importante a été franchie au cours de la thèse de M. Gonzalez Garcia où le couplage du code DUSTEM de l'IAS et du code PDR de l'équipe de Meudon a été réalisée comme le montre la figure issue de l'un de nos modèles où les bandes des PAHs sont clairement visibles. Ce couplage permet de déterminer plus précisément l'émission I.R. due aux poussières et leur effet sur le pompage des espèces moléculaires (Ref [1])



Nous avons également obtenu des résultats sur le rapport $^{14}N/^{15}N$ de NH2D en relation avec les valeurs dans les environnements cométaires (Ref [2]). Ce travail se poursuit sur d'autre molécules azotées et a fait l'objet d'un

programme de temps ouvert sur *Herschel* dans une collaboration avec le groupe de Grenoble (PI : P. Hily-Blant) et les spectroscopistes du laboratoire de spectroscopie hertzienne de Lille.

La détection des isomères de HNCO (HCNO et HOCN) (Ref [3]) ainsi que de la molécule de propylène a été l'occasion de réfléchir aux mécanismes chimiques à l'œuvre dans les nuages moléculaires (Ref [4]. Ces études sont toujours d'actualité en ce qui concerne le propylène avec des résultats des expériences de laboratoire du groupe de V. Bierbaum à Boulder.

Le projet mentionnait également la demande d'observations HST de l'Hydrogène moléculaire en émission dans les disques circumstellaires dont le P.I. est G. Herzceg. Cette demande a été acceptée et de nombreux résultats ont été obtenus dans cette collaboration, qui permet de commencer une étude statistique de ces objets. L'excitation de l'Hydrogène peut être due aux électrons ou au rayonnement Lyman alpha (Ref [5]). Citons également la découverte de CO en émission VUV et en absorption avec un rapport CO/H2 proche de 1. Ces études se poursuivent toujours et notre participation est principalement motivée par notre expertise sur la spectroscopie VUV de H_2.

Enfin, de gros efforts ont été développés sur la mise à disposition du modèle PDR grâce aux outils de l'observatoire virtuel. Nous avons développé une base de données permettant de diffuser des résultats du code PDR. Cette base de données donne actuellement accès à plusieurs centaines de modèles de régions de formation d'étoiles. Les principales quantités physiques pouvant intéresser les utilisateurs sont disponibles en ligne et il est possible de télécharger le résultat complet de la simulation pour un accès à toutes les quantités physiques calculées par le code. Cette base de données est intégrée à l'OV d'une part car elle est l'un des cas tests à la définition des standards VO-Theory à l'IVOA et d'autre part car elle est interconnectée via le protocole SAMP aux outils de l'OV.

Les perspectives à terme sont de fournir un plus grand nombre de modèles via cette base de données de façon à couvrir une large gamme d'objets astrophysique (MIS local, extragalactiques, ...). Une version du code PDR en ligne suivant les standards OV est en cours de développement.

Les crédits PCMI ont permis, entre autres, l'achat de licence de TOTALview, un outil professionnel de débuggage et d'optimisation de codes numériques qui nous a été très utile pour améliorer notre outil numérique. Ils ont également servi à financer le serveur pour la base de données.

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

- Le code PDR de Meudon est public. Son code source est téléchargeable sur notre site web. Il est régulièrement mis à jour via l'implémentation de nouveaux processus physiques afin de mieux répondre aux besoins des utilisateurs compte tenu des nouvelles générations d'instruments.
- De plus, nous commençons à fournir des grilles de modèles précalculés couvrant différents types de milieux afin de faciliter l'interprétation et la préparation d'observations.

Le code PDR ainsi que la base de données, PDRDB, sont accessibles sur le site http://pdr.obspm.fr

5 publications significatives avec titre et référence complète

[1] Gonzalez-Garcia M., Le Bourlot J., Le Petit F., Roueff E., A&A, 485, 127, «Radiative transfer revisited for emission lines in photon dominated regions»

[2] Lis D., Wootten A., Gerin M. Roueff E., ApJ 710, L49 : "Nitrogen isotopic fractionation in interstellar ammonia"

[3] Marcelino N., Brünken S., Cernicharo J., Quan D., Roueff E., Herbst E., Thaddeus P., A&A 516, 105, 2010 : "The puzzling behavious of HNCO isomers in molecular clouds"

[4] Herbst E., Roueff E., Talbi D., Molec. Phys. 108, 2171, 2010 "Radiative association and the formation of interstellar propylene"

[5] Ingleby L. et al., ApJ 703, L137, 2009 : "Far ultraviolet H_2 emission from circumstellar disks"

Titre du projet: *Herschel* Oxygen Program

Nom du porteur :	Le Petit					Prénom:	Franck
Courrier électronique	Franck.LePetit@obspm.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	LUTH - Observatoire de Paris					Institut Principal de rattachement CNRS	Observatoire de Paris
Code (ex: UMR1111)	UMR 8102					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)			17				
Financement ANR *	131					SCHISM	

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	Responsable Projet	Institut CNRS principal
LERMA - Observatoire de Paris, CNRS, ENS	Maryvonne Gerin	INSU
IRAM	Jérome Pety	INSU
Partenaire Etranger	Responsable Projet	----------
Université de Jérusalem	O. Biham	

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

Il est aujourd'hui acquis que la chimie sur les surfaces des grains doit être modélisée en détail dans les codes pour permettre l'interprétation des observations. Les observations les plus récentes montrent que c'est en particulier le cas pour la chimie de l'oxygène. La faible abondance de O_2 dans le gaz interstellaire observée par ODIN (Pagani et al., A&A, 2003) ou *Herschel* (Melnick et aL, ApJ, 2012) est en contradiction avec des modèles de chimie en phase gazeuse pure. Les observations IRAM dans la Tête de Cheval ont montré, grâce à leur résolution spatiale, des variations d'abondances du méthanol et du formaldéhyde entre le bord du nuage (la PDR) et le coeur dense qui traduisent des processus physiques et chimiques différents sur les grains interstellaire en fonction de la position dans les nuages - Ref [1].

Afin de disposer d'un modèle PDR permettant de modéliser le couplage entre la chimie en phase gazeuse et celle sur les grains, nous avons développé un nouveau formalisme pour intégrer dans le code des réseaux chimiques complexes sur les surfaces qui se base sur les résultats des expériences en laboratoire et sur des travaux en dynamique moléculaire.

Pour rappel, le code PDR de Meudon permet de modéliser la physique et la chimie d'une tranche de gaz et de poussières 1D hors équilibre thermodynamique plan-parallèle et stationnaire. Il résout de façon couplée le transfert de rayonnement depuis l'UV lointain jusqu'au sub-mm en tenant compte de l'absorption / émission par les poussières et les raies des atomes et molécules, les processus de chauffage et de refroidissement individuels (effet photo-électrique, ionisation par les rayons cosmiques ou photons UV, émission par les espèces chimiques, ...) et la chimie d'une centaine d'espèce reliées par un millier de réactions. Le code est très versatile et peut être utilisé pour une large gamme de densités allant des nuages interstellaires diffus aux coeurs denses, voir le bord des disques circumplanétaires - Ref [2].

Le nouveau formalisme que nous avons mis au point prend en compte la formation de manteaux et les réactions en surface. Les espèces légères peuvent s'adsorber sur des sites de physisorption ou de chimiesorption. Les désorptions thermiques et photo-désorptions sont prises en compte. La chimie du carbone, de l'oxygène ainsi que celle des hydrures ont été implémentées. Par rapport à d'autres modèles, le code PDR de Meudon prenant en compte une distribution de grains, il permet de rendre compte plus précisément des observations, en particulier

dans les régions de formation d'étoiles où les très petits grains et les gros grains ont des températures significativement différentes.

L'exploitation de cette nouvelle version du code ne fait que commencer. Elle a déjà permis l'interprétation avec succès d'observations d'hydrure, comme HCl, avec *Herschel* - Ref [3]. Elle a aussi été utilisée pour montrer que dans la Tête de Cheval, la photo-désorption est sans doute responsable de la plus forte abondance du méthanol au bord du nuage par rapport au coeur Ref - [1].

Beaucoup reste à faire car il s'agit d'un domaine où nous manquons cruellement de données de physique fiables à introduire dans le code. La plupart des barrières d'énergie des réactions chimiques sur les grains et celles de désorptions thermiques sont peu connues. Il ne sera possible d'améliorer ce type de modèles, indispensables à l'interprétation des observations, que si les réseaux chimiques sur les surfaces sont mieux contraints grâce à des expériences en laboratoire et des calculs théoriques.

La description de ce nouveau modèle et la mise à disposition de la communauté du code sont en cours [4].

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

- Le code PDR de Meudon est public. Son code source est téléchargeable sur notre site web. Il est régulièrement mis à jour via l'implémentation de nouveaux processus physiques afin de mieux répondre aux besoins des utilisateurs compte tenu des nouvelles générations d'instruments.

- Des grilles de modèles pré-calculés couvrant différents types de milieux sont publiées dans la base de données du code PDR dans l'objectif de faciliter l'interprétation et la préparation d'observations.

Le code PDR ainsi que la base de données, PDRDB, sont accessibles sur le site http://pdr.obspm.fr

5 publications significatives avec titre et référence complète

[1] "H2CO in the Horsehead PDR: photo-desorption of dust grain ice mantles", Guzman V et al. A&A, 2011, 534, 49

[2] "A Model for Atomic and Molecular Interstellar Gas: The Meudon PDR Code", Le Petit F., Nhemé C., Le Bourlot J., Roueff E., ApJS, 2006, 164, 506

[2] "*Herschel* Observations of Interstellar Chloronium", Neufeld D., Roueff E., et al., ApJ, 2012, 748, 37

[3] "*Herschel* Measurements of Molecular Oxygen in Orion", Goldsmith et al., ApJ, 2011, 737, 96

[4] "Surface chemistry in the Interstellar Medium. III: Carbon and Oxygen surface chemistry", Le Bourlot J et al., en préparation

Titre du projet: Interprétation des données *Herschel* et ALMA

Nom du porteur :	Le Bourlot					Prénom:	Jacques
Courrier électronique	Jacques.Lebourlot@obspm.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	LUTH, Observatoire de Paris					Institut Principal de rattachement CNRS	Observatoire de Paris
Code (ex: UMR1111)	UMR8102					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)	0	0	0	5			
Financement ANR *	131					SCHISM	

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	Responsable Projet	Institut CNRS principal
Partenaire Etranger	Responsable Projet	----------
Université de Jérusalem	O. Biham	

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

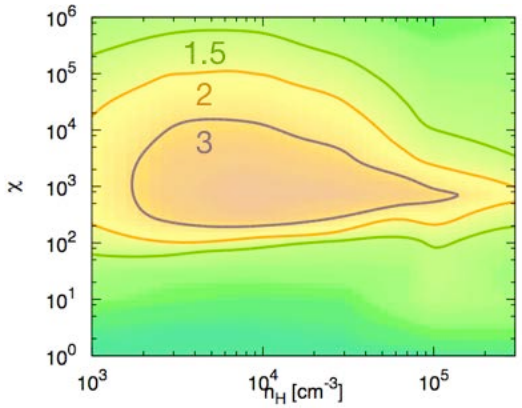
Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

La sensibilité des instruments sur *Herschel* et désormais ALMA permettent de détecter des molécules traces dont l'abondance et les états d'excitation sont des diagnostics des conditions physiques et des processus physiques se déroulant dans le gaz interstellaire. L'interprétation de telles observations nécessite souvent une étape de modélisation numérique par des codes «PDR». Les codes PDR sont les codes qui modélisent de façon détaillée et cohérente la chimie du gaz interstellaire, le transfert de rayonnement et le bilan thermique dans un milieu hors équilibre thermodynamique. L'un des enjeux majeurs de ces dernières années était d'être en mesure de modéliser encore plus en détail les processus physiques microscopiques et la chimie dans ce type de codes afin de pouvoir interpréter les observations des nouveaux instruments.
Le projet a permis d'implémenter des processus clefs dans le code PDR de Meudon (http://pdr.obspm.fr) et de rendre public à la communauté cette nouvelle version afin de mieux préparer et d'interpréter les observations sur les grands instruments que sont *Herschel* et ALMA.

De nombreux nouveaux processus physiques ont été implémentés. L'effort principal a été porté sur la modélisation détaillée de la formation de H_2. En effet, cette molécule contrôle directement ou indirectement une grande partie de la structure atomique et moléculaire des nuages interstellaires. Par exemple, en fonction de la position de la transition H/H_2 dans les nuages, la formation des autres molécules a lieu dans un milieu plus ou moins chaud ce qui impacte leur excitation et leur contribution au refroidissement. Or, le détail des mécanismes de la formation de H_2 sur les grains n'est pas encore suffisamment compris pour obtenir un bon accord entre modèles et observations. Par exemple, les observations ISO et *Spitzer* (Habart et al. A&A, 2005, 2011), ont montré la présence de H_2 dans des régions où les grains sont chauds (> 20 K) alors que plusieurs expériences en laboratoire (Katz et al. 1999) montrent que l'hydrogène moléculaire ne peut être formé efficacement par des mécanismes de physisorption que dans une étroite gamme de température des grains (10 - 20K pour des carbones amorphes).

Nous avons entrepris de revoir le formalisme de la formation de H_2 en prenant en compte les plus récentes avancées provenant de calculs théoriques en dynamique moléculaire et des expériences en laboratoire - Ref [2].
Le plus récent formalisme introduit permet de tenir compte de la formation de H_2 par le mécanisme de Langmuir-Hinshelwood et celui d'Eley-Rideal. Il prend également en compte l'excitation de H_2 à sa formation dans des états vibrationnellement excités. Ces travaux ont permis de montrer que dans des PDR fortement éclairées et denses, comme par exemple certaines régions d'Orion, la formation de H_2 peut devenir l'un des principaux mécanismes de chauffage du gaz. Ce nouveau formalisme a également permis de réconcilier modèles

et observations concernant l'émission I.R. de H_2. De plus, le décalage de la transition H/H_2 vers le bord extérieur des nuages, donc des régions plus chaudes, influence fortement l'excitation et l'émission d'autres espèces comme CO observée par *Herschel*. Ceci a été mis à profit au sein du key program *Herschel* WADI pour



déterminer à partir des observations CO les caractéristiques physiques de PDR telles que la barre d'Orion et NGC 7023 - Ref [3].
Figure : Rapport de l'intensité de la raie 0-0 S(2) de H_2 entre des modèles où la formation de H_2 est modélisée par un taux de formation standard et des modèles tenant compte des mécanismes de Langmuir-Hinshelwood et d'Eley-Rideal. Dans l'espace des paramètres densité et intensité du flux UV, on voit qu'un traitement détaillé peut conduire à une estimation de l'intensité de cette raie trois fois plus grande.

En parallèle, nous avons entrepris de développer un formalisme encore plus détaillé permettant de tenir compte des phénomènes stochastiques sur les grains qui contrôlent leur température et le taux de formation de H_2. Ces travaux sont en cours de publication - Ref [4]

Le nouveau modèle a été rendu public. Pour faciliter l'interprétation des observations, une grille de modèles PDR pré-calculés a été réalisée sur la grille européenne EGI et le mésocentre MESOPSL. Les résultats sont accessibles via la base de données associée au code PDR - http://pdr.obspm.fr.

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

- Le code PDR de Meudon est public. Son code source est téléchargeable sur notre site web. Il est régulièrement mis à jour via l'implémentation de nouveaux processus physiques afin de mieux répondre aux besoins des utilisateurs compte tenu des nouvelles générations d'instruments.
- De plus, nous commençons à fournir des grilles de modèles précalculés couvrant différents types de milieux afin de faciliter l'interprétation et la préparation d'observations.

Le code PDR ainsi que la base de données, PDRDB, sont accessibles sur le site http://pdr.obspm.fr

5 publications significatives avec titre et référence complète

[1] "A Model for Atomic and Molecular Interstellar Gas: The Meudon PDR Code", Le Petit F., Nhemé C., Le Bourlot J., Roueff E., ApJS, 2006, 164, 506

[2] "Incorporation of stochastic chemistry on dust grains in the Meudon PDR code using moment equations. I. Application to the formation of H_2 and HD", Le Petit F., Barzel B, Biham O., Roueff E., Le Bourlot J., A&A, 2009, 505, 1153

[3] "Surface chemistry in the interstellar medium. I. H_2 formation by Langmuir-Hinshelwood and Eley-Rideal mechanisms", Le Bourlot J, Le Petit F., Pinto C., Roueff E., Roy F., A&A, 2012, 541, 76

[4] "Surface chemistry in the Interstellar Medium. II: H_2 formation on dust with random temperature fluctuations", Bron E, Le Bourlot J, Le Petit F, à soumettre

Titre du projet: Des PAHs aux nanograins interstellaires : signatures spectroscopiques en absorption et en émission

Nom du porteur :	BRECHIGNAC					Prénom:	Philippe
Courrier électronique	philippe.brechignac@u-psud.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	LPPM (UPR 3361) puis ISMO (UMR8214) Bât. 210 Centre universitaire 91405 ORSAY cedex					Institut Principal de rattachement CNRS	INP
Code (ex: UMR1111)	UMR8214					Section(s) CNRS	04
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	30
Montant Alloué (k€)	5	9					
Financement ANR *		x x					

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
IAS *Centre universitaire d'Orsay, Bât. 121*	*DARTOIS Emmanuel*	***INSU***
IPNO *Centre universitaire d'Orsay, Bât. 100*	*CHABOT Marin*	***IN2P3***
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	**********
School of Chemistry	Schmidt T. W	***Univ Sydney (Austr)***
Osservatorio Astrofisico di Catania	Strazzulla G.	***INAF (Italie)***

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

L'étude des différentes formes de la matière carbonée, des agrégats de carbone aux particules solides, est essentielle pour la compréhension de la matière interstellaire en général et de la distribution de ses composants et leur évolution en particulier. Au travers de ce projet, en collaboration avec l'équipe Astrochimie Expérimentale de l'IAS et une équipe du Tandem de l'IPNO, nous étudions cette matière dans sa forme moléculaire et dans sa forme solide.

L'originalité de ce projet, dont le volet principal est de nature expérimentale, est d'être enrichi par un volet théorique qui se construit au contact direct des expériences.

L'activité expérimentale exploite ou développe trois dispositifs :

- ICARE est un faisceau moléculaire équipé d'un spectromètre de masse à temps de vol, dédié à la mesure des spectres électroniques de cations PAH.

- NANOGRAINS est un réacteur de combustion (flamme riche d'hydrocarbure à basse pression) permettant de synthétiser en phase gazeuse une multitude d'espèces, allant des PAHs de diverses tailles à des nanoparticules hydrocarbonées ou des suies. Son spectromètre de masse à temps de vol permet la spectroscopie des espèces en phase gazeuse. Son collecteur d'échantillons solides permet de multiples études ex-situ : caractérisation, irradiations,…

- FIREFLY est un spectromètre original sans élément dispersif dédié à l'analyse de l'émission infrarouge des PAHs. Il repose sur l'utilisation d'un jeu de filtres circulaires variables identique à celui de la caméra ISOCAM, permettant d'atteindre une excellente transmission de l'ensemble du dispositif.

L'activité théorique est orientée vers la compréhension des processus intramoléculaires de conversion d'énergie, de relaxation intramoléculaire (dont les processus d'isomérisation et de dissociation) et de refroidissement radiatif (émission infrarouge notamment) dans les systèmes complexes excités (PAH neutres, ionisés, déshydrogénés,...).

Une nouvelle configuration du dispositif ICARE consistant à ioniser les espèces de type PAH dans la détente supersonique (avant extraction du faisceau moléculaire) a été mise au point : elle permet à présent d'enregistrer les spectres électroniques de cations pour des PAHs ou des agrégats de PAHs de taille très supérieure à celle accessible avec la configuration précédente.

L'enregistrement des spectres UV des nombreuses espèces produites dans la flamme (NANOGRAINS) et mesurées simultanément par REMPI dans la région 220-320 nm grâce au spectromètre de masse en ligne a pu être mené à bien. L'analyse de ces spectres, qui permet de caractériser la composition de la flamme en fonction de la distance au brûleur, met notamment en évidence la présence de PAH substitués par des groupements aliphatiques.

La composante solide des matériaux produits dans la flamme est essentiellement constituée de suies, dont des échantillons peuvent collectés sur une lame optique. L'analyse des mêmes échantillons par microspectroscopie infrarouge et Raman, ainsi que par microscopie électronique par transmission en haute résolution a permis d'acquérir une meilleure compréhension de la structuration des unités polyaromatiques et de leur agencement dans ces suies.
De plus des études de l'évolution des propriétés de ces échantillons sous irradiation ionique (simulant les rayons cosmiques) ont été conduites à Catane [He^+ à 200 keV, diagnostic Raman] et au Tandem de l'IPNO à Orsay [H^+ à 10 MeV, C^{5+} à 50 MeV, Si^{7+} à 85 MeV et Ni^{9+} à 100 MeV, diagnostic IR]. Elles mettent principalement en évidence l'amorphisation progressive du matériau. Les résultats ont été interprétés par comparaison avec des études similaires menées sur des échantillons de carbone amorphe hydrogéné (produites à l'IAS) et des échantillons carbonés collectés d'origine extraterrestre.

Les premières études en émission infrarouge (FIREFLY) ont porté sur l'analyse spectro-temporelle de l'émission du benzène en cellule à basse pression, ainsi que celle de plusieurs dérivés substitués. La prochaine étape consistera à faire fonctionner l'instrument à la température de l'azote liquide.

Les travaux théoriques, au cours desquels des méthodes nouvelles, originales, ont été développées, ont permis d'élucider finement l'influence de l'anharmonicité des surfaces de potentiel mutidimensionnelles des PAHs neutres ou ionisés sur les propriétés spectro-temporelles de ces espèces : vitesses de fragmentation, durées de vie, spectres d'émission infrarouge et leur évolution au cours du temps.

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

Dispositifs **ICARE, NANOGRAINS, FIREFLY**

5 publications significatives avec titre et référence complète

1. T. Pino, E. Dartois, A.-T. Cao, Y. Carpentier, Th. Chamaillé, R. Vasquez, A. P. Jones, L. d'Hendecourt & Ph. Bréchignac; *Astron. & Astrophys*. **490**, 665-672 (2008)
"*The 6.2 μm band position in laboratory and astrophysical spectra: a tracer of the aliphatic to aromatic evolution of interstellar carbonaceous dust"*
2. Basire M., Parneix P., Calvo F., Pino T., Bréchignac Ph.; *Journal of Physical Chemistry A* **113**, 6947 (2009) "*Temperature and Anharmonic Effects on the Infrared Absorption Spectrum from a Quantum Statistical Approach: Application to Naphthalene"*
3. R. Brunetto, T. Pino, E. Dartois, A.-T. Cao, L. d'Hendecourt, G. Strazzulla, et Ph. Bréchignac; *ICARUS* **200**, 323 (2009)
"Comparison of the Raman spectra of ion irradiated soot and collected extraterrestrial carbon"
4. M. Godard, G. Féraud, M. Chabot, Y. Carpentier, T. Pino, R. Brunetto, J. Duprat, C. Engrand, Ph. Bréchignac, L. d'Hendecourt, and E. Dartois; *Astron. & Astroph.* **529**, A146 (2011)
"*Ion irradiation of carbonaceous interstellar analogues - Effects of cosmic rays on the 3.4 μm interstellar absorption band"*
5. T. Pino, Y. Carpentier, G. Feraud, H. Friha, D.L. Kokkin, T.P. Troy, N. Chalyavi, Ph. Bréchignac, T.W. Schmidt; PAHS AND THE UNIVERSE: A SYMPOSIUM TO CELEBRATE THE 25TH ANNIVERSARY OF THE PAH HYPOTHESIS, Book Series: EAS Public. Series **46**, 355-371 (2011)
"Electronic spectroscopy of PAHs"

Titre du projet: Spectroscopie et physico-chimie des macromolécules et nanograins carbonés. Du laboratoire aux observations

Nom du porteur :	Joblin					Prénom:	Christine
Courrier électronique	christine.joblin@irap.omp.eu						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	IRAP 9 Av. du Colonel Roche 31028 Toulouse cedex 4					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR 5277					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)	22	12	-	-			
Financement ANR *		X					

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
LCPQ-IRSAMC, UMR5626, Univ. Toulouse	***F. Spiegelman***	***INC***
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	***----------***
Observatoire de Cagliari	***G. Mulas***	

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

Les macromolécules polycycliques aromatiques hydrogénées (PAH) et les nanograins carbonés sont des acteurs majeurs dans l'évolution physique et chimique des galaxies. Cependant, leur nature et leurs propriétés sont très mal connues. Ce projet a pour objectif d'avancer sur ces questions en étudiant les propriétés physico-chimiques d'analogues en laboratoire de ces espèces. Les expériences menées sont guidées par notre analyse des bandes aromatiques infrarouges (AIB) qui sont observées dans les milieux astrophysiques avec les missions ISO, Spitzer et AKARI. Les AIB sont attribuées à des espèces de type PAH. Nous avons montré que l'état de charge des PAH évolue et qu'ils sont produits dans les régions de photodissociation (PDR) par évaporation de très petits grains (eVSG) sous l'action des photons UV (Rapacioli et al. 2005 A&A, Berné et al. 2007 A&A, Pilleri et al. 2012, A&A). Nous avons mis à disposition de la communauté l'outil PAHTAT de décomposition des spectres IR moyen qui permet d'extraire les composantes PAH^0, PAH^+ et eVSG. L'abondance du carbone dans les eVSG peut alors être utilisée comme traceur du champ UV local (P. Pilleri thèse 18/11/2010; Pilleri et al. 2012). Un autre résultat concerne la confirmation de la détection de la molécule partiellement aromatique de fullerène C_{60} dans les PDR et notre analyse de son émission qui suggère que ces molécules sont en phase gazeuse et excitées par les photons UV des étoiles comme le sont les PAH (Sellgren et al. 2010 A&A).

L'analyse des observations suscite le développement de deux types de modèles, un modèle de photophysique décrivant la relaxation de PAH excités par des photons UV (Mulas et al. 2006, A&A) et un modèle physico-chimique décrivant l'évolution chimique de ces espèces avec les conditions physiques: champ de rayonnement UV, densité du gaz et des électrons. Ces modèles nécessitent l'étude des propriétés spectroscopiques et physico-chimiques des PAH et espèces associées. Pour étudier ces systèmes dans des conditions proches de celles du milieu interstellaire, nous développons à l'IRAP le dispositif expérimental PIRENEA. Une collaboration étroite a été mise en place avec les théoriciens : le groupe du LCPQ pour l'étude des agrégats de PAH (M. Rapacioli) et des complexes PAH-Fe/Si (A. Simon) et G. Mulas de l'Observatoire de Cagliari pour les études théoriques sur les PAH et la modélisation des spectres infrarouges. Cette collaboration s'est formalisée par un PICS 4260 *Croissance et destruction des macromolécules carbonées interstellaires* sur la période 2008-2010. Depuis la fin 2010, les études expérimentales et théoriques menées sur les systèmes PAH s'inscrivent dans le cadre du projet ANR *Gas-phase PAH research for the interstellar medium* (GASPARIM, ANR- 2010-BLAN-0501; 2010-2013) qui implique l'équipe PIRENEA et des physiciens et physico-chimistes du LCPQ (équipe de F. Spiegelman) et de l'ISMO-UMR8214-Orsay (équipe de P. Bréchignac).

PIRENEA permet de produire des espèces difficiles à maitriser par d'autres techniques comme des PAH déshydrogénés. Les transitions électroniques de ces espèces peuvent être caractérisées par dissociation multiphotonique avec un laser OPO (F. Useli-Bacchitta thèse 19/11/2009; Useli-Bacchitta et al. 2010). Néanmoins nous avons vu que la technique utilisée génère des bandes chaudes qui affectent le profil de bande par rapport à celui d'ions froids. Des progrès sont en cours grâce au refroidissement des ions avec un gaz tampon à environ 40 K et à une technique de spectroscopie à deux couleurs. Notre objectif est de mieux quantifier la température des ions et d'améliorer la confrontation avec les observations des bandes interstellaires diffuses.

Une autre étude consiste à explorer la possibilité que les eVSG soient des agrégats de PAH ou des agrégats de PAH avec des atomes de Fe ou Si. Des premières études ont été menées sur la production et la photodissociation d'espèces Fe-PAH (Simon & Joblin 2009). La mise au point d'un four à vapeur de PAH a permis de mener des expériences sur la réactivité de Si^+ avec le coronène ($C_{24}H_{12}$). Une première analyse théorique a été faite dans le cadre de la thèse de B. Joalland (21/03/2011) discutant l'isomérisation de la forme π à la forme σ des complexes $[Si\text{-}C_{24}H_{12}]^+$. Des résultats ont été obtenus sur la réactivité de $C_{24}H_{12}^+$ avec $C_{24}H_{12}$. Des mesures de photodissociation et spectroscopie du dimère $[C_{24}H_{12}]_2^+$sont en cours en lien avec des mesures de coïncidences électrons/ions avec le spectromètre DELICIOUS sur la ligne VUV DESIRS à SOLEIL (projet ANR GASPARIM). Des résultats théoriques sur la spectroscopie des espèces Fe-PAH et Si-PAH ont été publiés (Simon & Joblin 2010; Joalland et al. 2010, JPCA; voir Fiche M. Rapacioli).

Les études menées avec PIRENEA permettent également d'alimenter un modèle d'évolution physico-chimique des PAH dans les conditions astrophysiques, modèle qui a été développé dans le cadre de la thèse de J. Montillaud (3/11/2011). Il s'agit en particulier des données de photodissociation des espèces $C_{24}H_p^+$ (p=[1,12]), données partiellement publiées, et des expériences de réactivité de H_2 avec ces espèces (stage M1 en 2010). Le modèle et ses résultats dans la nébuleuse NGC7023 sont en cours de publication (Montillaud et al. 2013).

Enfin, un développement instrumental conséquent en cours sur PIRENEA est l'implantation d'un dispositif de mesure de l'émission IR des ions piégés, qui permettra une comparaison directe avec les observations astronomiques (les AIB).

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

PIRENEA : dispositif expérimental maison de type FT-ICR MS avec environnement cryogénique.
PAHTAT : logiciel d'analyse des observations IR; http://userpages.irap.omp.eu/~cjoblin/PAHTAT
Theoretical PAH spectral database : base de données Toulouse-Cagliari; http://astrochemistry.ca.astro.it/database/) et mise en place d'une base de données expérimentales
Mise à disposition des bases dans le cadre de l'Observatoire Virtuel (**VAMDC**)

5 publications significatives avec titre et référence complète

- Montillaud, J., Joblin, C., Toublanc, D., *"Evolution of PAHs in photodissociation regions. Hydrogenation and charge states"*, **Astron. & Astrophys**. **552** (2013), id.A15

- Pilleri P., Montillaud J., Berné O., and Joblin C., *"Evaporating Very Small Grains as tracers of the UV radiation field in Photo-dissociation Regions"*, **Astron. & Astrophys**. **542**, (2012), id.A69

- Useli-Bacchitta F., Bonnamy A., Malloci G., Mulas G., Toublanc D., Joblin C., *"Visible photodissociation spectroscopy of PAH cations and derivatives in the PIRENEA experiment"*, **Chem. Phys. 371** (2010), 16-23

- Simon A. and Joblin C., *"The computed infrared spectra of a variety of [FePAH]+ complexes: mid- and far-infrared features"*, **Astrophys. J. 712** (2010), 69-77

- Simon A. and Joblin C., *"Photodissociation of $[Fe_x(C_{24}H_{12})_y]^+$ complexes in the PIRENEA set-up : iron-PAH clusters as good candidates for interstellar very small grains"*, **J. Phys. Chem. A 113** (2009), 4878-4888

Titre du projet: Etude théorique des propriétés structurales, dynamiques et spectroscopiques d'agrégats de PAH neutres et ionisés

Nom du porteur :	Rapacioli					Prénom:	Mathias
Courrier électronique	mathias.rapacioli@irsamc.ups-tlse.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	Laboratoire Chimie et Physique Quantique Université Paul Sabatier - Bât. 3R1b4, 118 route de Narbonne 31062 Toulouse Cedex 09, France					Institut Principal de rattachement CNRS	INC
Code (ex: UMR1111)	UMR5626					Section(s) CNRS	4 – 13
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	30 -31
Montant Alloué (k€)							
Financement ANR *			X				

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
LPPM / ISMO	***P. Parneix***	***INP***
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	**********

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

La matière carbonée dans le MIS se présente sous forme moléculaire, mais également sous forme d'agrégats ou grains. Au delà des petites molécules carbonées, les spectres infra-rouge (IR) mettent en évidence l'existence de composés aromatiques, les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP). Les observations suggèrent que ces PAH se forment par photo-évaporation de très petits grains. Les agrégats de PAH purs ou contenant des hétéro-atomes (Fe, Si) sont les candidats actuellement envisagés pour ces grains. Au sein du MIS, les systèmes ionisés jouent un rôle majeur dans la genèse moléculaire car les forces de polarisation à longue portée favorisent le rapprochement des molécules du gaz dilué. D'autre part les éléments comme le Fer et le Silicium sont sous abondants dans la phase gazeuse et pourraient être piégés dans ce type de grains.
La recherche sur ce thème s'articule autour de trois volets : (i) les observations spatiales, (ii) les expériences de laboratoire, et (iii) la simulation. Notre projet vise à la compréhension des mécanismes fondamentaux, permettant de caractériser les propriétés de ces agrégats de PAH et complexes de PAH avec des hétéroatomes par des études théoriques en étroites collaborations avec des groupes expérimentaux.

Les agrégats de PAH sont de gros systèmes (plusieurs centaines d'atomes), ils peuvent difficilement être traités par les méthodes traditionnelles de la chimie quantique comme la Density Functional Theory (DFT). En conséquent, une méthode comme la Density Functional based Tight-Binding (DFTB), une approximation de la DFT avec un temps de calcul bien plus intéressant, est particulièrement adaptée pour traiter ces systèmes. Lors de ce projet, nous avons été amenés à réaliser plusieurs développements méthodologiques afin de traiter les agrégats et complexes de PAH avec la DFTB :
- Introduction d'un terme de dispersion pour les agrégats de van der Waals.
- Corrections du potentiel coulombien par un calcul différent des charges atomiques.
- Combinaison de la DFTB avec une approche de type interaction de configurations afin de traiter correctement la délocalisation de la charge dans les agrégats ionisés.
- Modifications des paramètres DFTB pour décrire les interactions Silicium-PAH et Fer-PAH.

Nous avons ensuite réalisé une série de validation de ces développements à partir de calculs de références (le plus souvent en DFT en comparant des coupes dans les surfaces d'énergies potentielles mais aussi les énergies relatives de configurations stables) ou bien à partir de résultats expérimentaux (comme les énergies de liaisons d'agrégats de benzène ionisés).

En ce qui concerne les applications, nous avons réalisé des applications de dynamique moléculaire sur les complexes de PAH avec du Fer et du Silicium afin de caractériser la spectroscopie infrarouge. La dynamique moléculaire permet de prendre en compte les effets anharmoniques qui sont très importants dans ces systèmes. En particulier, nous avons montrés que les atomes Si ou Fe restent localisés au dessus d'un cycle du PAH à basse température et se déplacent au dessus de la surface du PAH lorsque la température augmente. Ce processus se traduit dans les spectres par des signatures spectrales distinctes qui se mélangent lorsque la température augmente.

Concernant les agrégats de PAH ionisés, nous avons étudié d'une part les fils moléculaires (empilements de PAH) qui ont également un intérêt en physique du solide (notamment les propriétés de conductance) ainsi que les agrégats en phase gaz. Pour ces derniers nous avons développé un algorithme de recherche Monte Carlo (dans sa version avec échanges de températures) afin de réaliser l'exploration globale de la surface d'énergie potentielle. Nous avons caractérisé les propriétés de ces systèmes, en particulier les énergies de liaisons, les potentiels d'ionisations verticaux et adiabatiques ainsi que la spectroscopie électronique.

A l'avenir, nous souhaitons d'une part poursuivre les études sur les agrégats de PAH ionisés, notamment en réalisant de la dynamique dans les états excités, en implémentant des techniques de type sauts de surfaces, afin de caractériser leurs rôles lors des collisions et de l'évaporation. En ce qui concerne la spectroscopie IR nous souhaitons inclure les effets quantiques en couplant la DFTB avec des approches de type intégrales de chemin où chaque noyau est remplacé par plusieurs répliques se déplaçant classiquement lors d'une dynamique afin de simuler la délocalisation de ces derniers. Enfin, des simulations d'agrégats de PAH avec des molécules d'eau ont montré que la DFTB permettait de décrire correctement ces systèmes, ce qui ouvre la porte à leurs études pour des problématiques à la fois astrophysiques mais aussi environnementales.

5 publications significatives avec titre et référence complète

M. Rapacioli, F. Spiegelman, D. Talbi, T. Mineva, A. Goursot, T. Heine, and G. Seifert. Correction for dispersion and coulombic interactions in molecular clusters with density functional derived methods: Application to polycyclic aromatic hydrocarbon clusters. J. Chem. Phys., 130, 244304 (2009)

B. Joalland, M. Rapacioli, A. Simon, C. Joblin, C. J. Marsden, and F. Spiegelman. Molecular dynamics simulations of anharmonic infrared spectra of [sipah pi-complexes. J. Phys. Chem.A, 114, 5846 (2010)

M. Rapacioli, F. Spiegelman, A. Scemama, and A. Mirtschink. Modeling charge resonance in cationic molecular clusters: Combining dft-tight binding with configuration interaction. J. Chem. Theor. Comput., 7, 44 (2011)

A. Simon, M. Rapacioli, M. Lanza, B. Joalland, and F. Spiegelman. Molecular dynamics simulations on [fepah]+ [small pi]-complexes of astrophysical interest: anharmonic infrared spectroscopy. Phys. Chem. Chem. Phys., 13, 3359 (2011)

M. Rapacioli, A. Simon, L. Dontot, and F. Spiegelman. Extensions of DFTB to investigate molecular complexes and clusters. physica status solidi (b), 249, 2, 245 (2012)

Titre du projet: Spectroscopie THz et IR d'ions moléculaires produits par décharge

Nom du porteur :	Pirali					Prénom:	Olivier
Courrier électronique	Olivier.pirali@synchrotron-soleil.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	Institut des Sciences Moléculaires d'Orsay. CNRS-Université Paris-Sud 91405 Orsay Cedex					Institut Principal de rattachement CNRS	INP
Code (ex: UMR1111)	UMR8214					Section(s) CNRS	4
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	
Montant Alloué (k€)			22	10			
Financement ANR *							

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
Institut de Physique de Rennes UMR 6251 du CNRS Université de RENNES 1 Campus de Beaulieu, 35042 Rennes	A. Benidar	INP
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	----------

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

Ce projet associant les laboratoires ISMO et IPR a pour objectif l'acquisition et l'analyse de spectres infrarouge (IR) et infrarouge lointain (IRL) de radicaux et d'ions moléculaires d'intérêt astrophysique dans une large gamme spectrale. Les montages sont basés sur deux techniques de production des ions différentes et complémentaires : une décharge à cathode creuse refroidie à l'azote liquide développée par l'ISMO pour une utilisation sur la ligne AILES de SOLEIL et l'adaptation d'une cellule multipassage à grand parcours optique pour l'étude d'une post-décharge micro-onde développée par le groupe de l'IPR. L'investissement temporel des chercheurs pour le développement et l'optimisation de ces techniques originales est important et grâce aux allocations PCMI obtenues lors des AO 2011 et 2012, nous avons terminé la production des deux dispositifs expérimentaux et effectué les premiers tests sur les interféromètres à haute résolution de la ligne AILES et de l'IPR. Récemment nous avons obtenus les spectres de radicaux (OH, SH, SO_2, NH et isotopes, NH_2 et isotopes, CH, CN), chaines carbonés (C_3), et petits ions secondaires (H_3^+, HN_2^+, HCO^+) dans l'IR et l'IRL. Nos spectres complètent les bases de données expérimentales, les publications des résultats sont en préparation.

Le dispositif «cathode creuse» développé par le groupe ISMO de la ligne AILES est mis à disposition d'utilisateurs externes pour l'acquisition de spectres IRL en utilisant le continuum d'émission synchrotron extrait par la ligne AILES du synchrotron SOLEIL. La cellule multipassage à grand parcours optique de l'IPR à été adaptée pour la production et l'analyse des espèces chargées et radicalaires de deux manières. D'une part, la cellule a été équipée de deux electrodes planaires (2x(L=130cm, l=16cm)) installées le long parallèlement à son axe et espacées de 20 cm. L'ensemble électrodes et parois de la cuve peuvent être refroidies à l'azote liquide et permettent de produire une décharge luminescente stable et controlée dans un très grand volume (90 litres). D'autre part, la cellule a été equipée à son entrée d'une source microonde (Générateur MO + Surfatron) afin de l'utiliser pour sonder en écoulement continu la région post-décharge micro-onde. Les premiers tests de décharge continue dans le méthane permettent de produire de nombreuses espèces radicalaires et ioniques dont l'analyse spectroscopique est en cours.

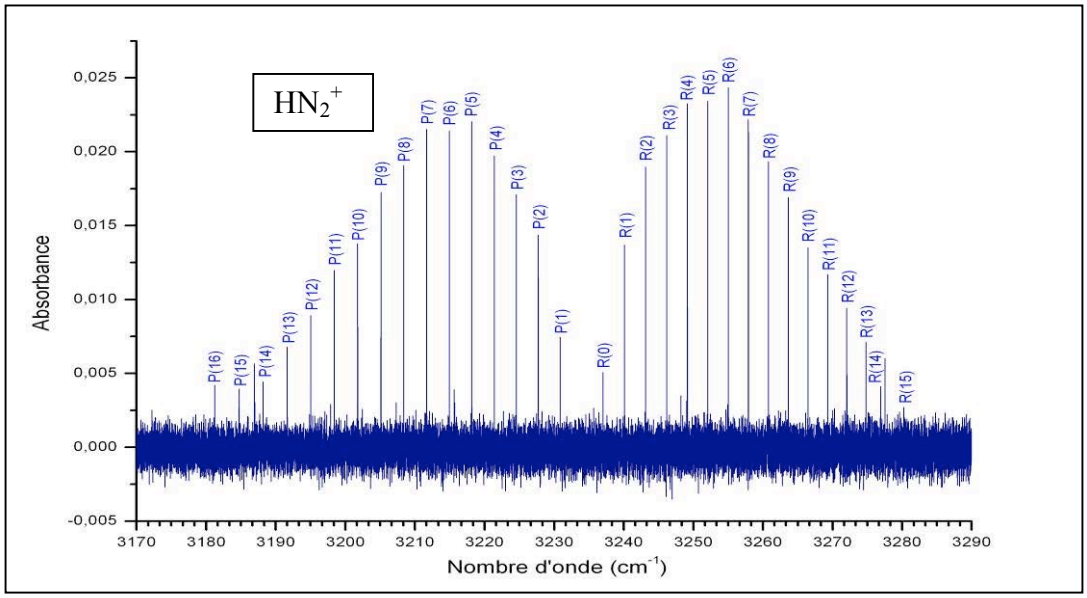


Fig. 1 Spectroscopie d'absorption à haute résolution du mode d'étirement symétrique du cation secondaire HN_2^+ produit dans la décharge à cathode creuse refroidie à l'azote liquide (ISMO/AILES). L'analyse du spectre nous a permis de déterminer la température rotationnelle (180 K) de HN_2^+ ainsi que les constantes rotationnelles de l'état fondamental et de l'état excité. La prochaine étape est l'acquisition du spectre de rotation pure qui présente de nombreuses transitions dans la gamme HIFI de *Herschel*.

5 publications significatives <u>avec titre et référence complète</u>

1) S. Bailleux; M.A. Martin-Drumel; L. Margules; O. Pirali; G. Wlodarczak; P. Roy; E. Roueff ; M. Gerin; A. Faure; P. Hily-Blant, "High-resolution terahertz spectroscopy of the ^{15}NH radical $X\ ^3\Sigma^-$, A&A, 538, A135 (2012)"

2) M.A. Martin-Drumel; O. Pirali; D. Balcon; Ph. Brechignac; P. Roy; M. Vervloet, High resolution far-infrared Fourier transform spectroscopy of radicals at the AILES beamline of SOLEIL synchrotron facility, Rev. Sci. Instrum., 82, 113106 (2011)

3) S.S. Yu ; J.C. Pearson; B.J. Drouin; K. Sung; O. Pirali; M. Vervloet; M.A. Martin;C.P. Endres; T. Shiraishi; K. Kobayashi; F. Matsushima; « Submillimeter-wave and far-infrared spectroscopy of high-*J* transitions of the ground and ν_2 =1 states of ammonia", J. Chem. Phys, 133, 174317 (2010)

Titre du projet: Spectroscopie FIR/Submm d'analogues de la poussière interstellaire avec ESPOIRS: Participation à l'interprétation des données *Herschel*/*Planck*

Nom du porteur :	DEMYK / MENY					Prénom:	Karine / Claude
Courrier électronique	Karine.demyk@irap.omp.eu / claude.meny@irap.omp.eu						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	IRAP 9 avenue du Colonel Roche BP 44346 – 310028 Toulouse cedex 4					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR 5277					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)			21	11			
Financement ANR *				x			

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
IAS, Centre universitaire d'Orsay Bât 120 – 121, 91405 ORSAY CEDEX	A. ABERGEL	INSU
LPCNO, INSA135 avenue de Rangueil, 31077 TOULOUSE CEDEX 4	C. NAYRAL	INP
UMET, Université Lille1, Bâtiment C6 59655 Villeneuve d'Ascq	H. LEROUX	INC
Partenaire Etranger	Responsable Projet	----------
Space Research Institut, 84/32 Profsoyuznaya Str, Moscou, Russie	V. GROMOV	

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

Résumé du projet : Ce projet a pour objectif de mieux comprendre l'émission submillimétrique de la poussière observée dans le milieu interstellaire (MIS) par les instruments à bord des satellites *Herschel* et *Planck* mais aussi par les radiotélescopes sol. Cette émission est due aux grains de grande taille (~100 nm) en équilibre thermodynamique avec le rayonnement ambiant. Elle est généralement modélisée par une loi de corps noir modifié dans laquelle les caractéristiques spectroscopiques de la poussière dans le domaine infrarouge lointain et submillimétrique sont décrites par un paramètre, l'indice spectral β, constant sur tout le domaine spectral et indépendant de la température des grains. Or plusieurs éléments remettent en question ce modèle. D'une part, un nombre croissant d'observations montre qu'il ne permet pas de reproduire correctement les données et que la valeur de β déduite des observations varie avec la température; d'autre part des mesures expérimentales ont montré que les caractéristiques spectroscopiques d'analogues de la poussière sont complexes et que leur description à l'aide du simple paramètre β est inadaptée. Ce projet comprend trois volets en interaction permanente:

1. un volet expérimental dont le but est de caractériser les propriétés optiques d'analogues de grains dans le domaine de l'infrarouge moyen au submillimétrique (2 – 1000/1500 μm) à basse température (300 – 4K). Cet aspect du projet regroupe les activités de synthèse et de caractérisations structurales et morphologiques, et les mesures de spectroscopie infrarouge et submillimétrique en transmission de nanograins analogues de la poussière interstellaire.

Résultats volet expérimental: Une étude détaillée des propriétés spectroscopiques d'analogues de la poussière silicatée de type $MgSiO_3$ et Mg_2SiO_4 (dont les synthèses et caractérisations ont été réalisées par nos collaborateurs du LPCNO et de l'UMET) a donnée lieu à plusieurs publications et présentations à des conférences internationales (Coupeaud et al 2010, 2011). L'étude sur des échantillons silicatés riches en fer est en cours. Ces travaux ont donné lieu à 3 campagnes de mesures sur la ligne AILES du synchrotron SOLEIL (juin 2010, novembre 2010, juin 2012).

2. un volet modélisation dont le but est (i) de développer un modèle physique d'émission de grain basé sur des propriétés intrinsèques des matériaux amorphes connues de la physique du solide et proposé par l'IRAP pour rendre compte des faits observationnels précités et (ii) de coupler ce modèle au modèle astrophysique d'émission du milieu interstellaire DustEM.

3. un volet observationnel dont le but est de tester les prévisions du modèle dans divers environnements du MIS, notamment les régions froides (T<15K) et chaudes (T>50K) et qui repose sur l'interprétation des données *Herschel* et *Planck*.

Résultats Volet modélisation et observationel: A l'occasion de visite de notre collaborateur V. Gromov (novembre 2010 et mars-mai 2011, prof. invité, Univ. Paul Sabatier), une nouvelle version du modèle TLS (qui constitue une alternative à la modélisation de l'émission de la poussière par une loi de corps noir modifiée), adoptant une description plus fine des processus physiques, est en cours de développement. La première version du modèle a été couplée au modèle DustEM développé par l'IAS et l'IRAP. Le modèle TLS a été utilisé avec succès pour interpréter l'émission de la poussière dans différents environnements galactiques mais aussi pour prédire l'émission de la poussière en fonction de la température des grains (Paradis et al. 2011a, 2011b).

Perspectives:
Nous souhaitons poursuivre l'étude expérimentale sur des analogues de grains carbonés et de grains composites silicate/carbone. Ces travaux sont motivés par les récentes modélisations de l'émission du milieu diffus à l'aide grains carbonés dont les propriétés spectroscopiques sont peu connues dans le domaine submm et à basse température. Le développement du modèle TLS se poursuit ainsi que son utilisation pour l'analyse des données *Herschel*/*Planck*.

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

Dispositif expérimental ESPOIRS – Modèle DustEM, modèle TLS

5 publications significatives avec titre et référence complète

- Modelling the dust emission from dense interstellar clouds: disentangling the effects of radiative transfer and dust properties, 2012, Ysard, N.; Juvela, M.; Demyk, K.; Guillet, V.; Abergel, A.; Bernard, J.-P.; Malinen, J.; Mény, C.; Montier, L.; Paradis, D.; Ristorcelli, I.; Verstraete, L., A&A, 542, A21
- Low-temperature FIR and submillimetre mass absorption coefficient of interstellar silicate dust analogues, Coupeaud, A.; Demyk, K.; Meny, C.; Nayral, C.; Delpech, F.; Leroux, H.; Depecker, C.; Creff, G.; Brubach, J.-B.; Roy, P., 2011, A&A, 535, A124
- Far-infrared to millimeter astrophysical dust emission. II. Comparison of the two-level systems (TLS) model with astronomical , Paradis, D.; Bernard, J.-P.; Mény, C.; Gromov, V., 2011a, A&A, 534, A118
- Detection and characterization of a 500 μm dust emissivity excess in the Galactic plane using *Herschel*/Hi-GAL observations, Paradis, D.; Paladini, R.; Noriega-Crespo, A.; Mény, C.; Piacentini, F.; Thompson, M. A.; Marshall, D. J.; Veneziani, M.; Bernard, J.-P.; Molinari, S., 2011b, A&A, 537, A113
- Dust silicate emission in FIR, Coupeaud, A.; Demyk, K.; Mény, C.; Nayral, C., 2010, SF2A-2010: Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics. Eds.: S. Boissier, M. Heydari-Malayeri, R. Samadi and D. Valls-Gabaud, p.205

Titre du projet: Astrospec : Spectroscopie de laboratoire (millimétrique, et THz) pour l'exploitation des observations d'*HERSCHEL* de SOFIA et d'ALMA

Nom du porteur :	Walters					Prénom:	Adam
Courrier électronique	awalters@irap.omp.eu						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	IRAP, 9, avenue du Colonel Roche, BP 44346, 31028 Toulouse Cedex 4					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR 5277					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)	2	8	6	7			
Financement ANR *	x						

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
Laboratoire PhLAM, Bât. P5 – Université de Lille 1, 59655 Villeneuve d'Ascq cedex	Laurent MARGULES	INP
IPAG, BP 53, F-38041 Grenoble Cédex 9	Cecilia CECCARELLI	INSU
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	----------
I. Physikalisches Institut, Université de Cologne	Stephan Schlemmer	
Jet Propulsion Laboratory, Californie	John PEARSON	

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme

L'exploitation des nouveaux instruments radio-astronomiques pour l'étude du milieu interstellaire : l'observatoire spatial *HERSCHEL*, le télescope embarqué sur avion SOFIA, l'interféromètre international ALMA et celui du Plateau de Bure, nécessite des données spectroscopiques obtenues par des expériences de laboratoire. D'une part, l'ouverture de nouvelles bandes de fréquence requiert des mesures dans la gamme du THz. D'autre part, la grande sensibilité et résolution spatiale des interféromètres rend probable la détection de nouvelles espèces qui doivent au préalable être caractérisées au laboratoire. Notre projet interdisciplinaire concerne : (1) Un recensement des besoins émanant des observations astrophysiques en cours (quelles espèces, quel domaine de fréquences, quelles conditions …). (2) Un travail collaboratif avec les laboratoires de spectroscopie moléculaire pour contribuer à la mesure des spectres des espèces prioritaires. Notre contribution est résumée dans le tableau ci-dessous. (3) L'analyse des spectres mesurés. (4) La mise en disponibilité de toutes les données spectroscopiques nécessaires à l'interprétation des observations astrophysiques des molécules étudiées. Nous participons également au travail de compilation et de standardisation de bases de données spectroscopiques pour l'astrophysique dans le cadre d'*Herschel*, d'ALMA et du projet VAMDC. (5) Pour certaines des espèces, un suivi observationnel.

Notre travail s'est focalisé sur les molécules complexes organiques (MCO) à cause de leur intérêt pour l'étude des régions de formation d'étoiles. Compte tenu des espèces déjà détectées dans ces régions nous avons choisi de nouvelles espèces pour explorer les limites de la complexité moléculaire. Nous avons également mesuré des isotopologues ^{13}C et deutérés de MCO déjà détectées. En effet, une comparaison des abondances des molécules avec des substitutions isotopiques différentes pourrait aider à élucider les chemins de formation des MCO fabriqués en même temps que les étoiles et les planètes. Les évidences suggèrent que ces MCO ont pu constituer les «briques chimiques» qui sont à l'origine des molécules prébiotiques qui ont donné naissance à la vie. Notre objectif actuel est d'effectuer un suivi observationnel (Sandrine Bottinelli, *thèse fléchée* Aurélia Bouchez) des espèces étudiées au laboratoire : recherches des raies dans les grands relevés spectraux, demandes d'observations (y compris ALMA), analyses des observations effectuées (en cours), calculs de limites d'abondance.

Actuellement nous travaillons sur les mesures d'éthanol deutéré qui viennent compléter le travail sur l'éthanol ^{13}C avec la perspective d'une étude compréhensive de cette espèce, et dans le laboratoire et dans le milieu interstellaire. Les mesures sur l'acétonitrile deutéré (Linh Nguyen *et al*) vont être soumises pour publication bientôt et une première recherche du spectre des deux isotopologues dans les relevés astrophysiques est en cours. Nous prévoyons également de nouvelles mesures de laboratoire : (1) molécules plus complexes en se basant sur les espèces déjà détectées, (2) isotopologues pour contraindre les modèles de chimie, (3) espèces réactives non-identifiées. Ceci toujours avec l'idée d'effectuer des études liées : spectroscopie / astrochimie.

Résumée du travail effectué 2009-2012 :

Acétylène : C_2D_2	Mesures au JPL.	Publié 2009
Formiate de méthyle : $HCOO^{13}CH_3$	Contribution aux mesures à Lille.	Publié 2009
Ether diéthylique : $C_2H_5OC_2H_5$ aa- et ag-	Mesures et analyses en collaboration avec Cologne (isomère anti-anti et anti-gauche).	Publié 2009
Isobutyronitrile : $(CH_3)_2CHCN$	Mesures et analyses en collaboration avec Cologne	Publié 2011
Eau : $H_2{}^{17}O$, $H_2{}^{18}O$	Mesures (THz) et analyses en collaboration avec le JPL	En cours
Ethanol : $CH_3{}^{13}CH_2OH$, $^{13}CH_3CH_2OH$	(1) Mesures et analyses en collaboration avec Cologne. (2) Suivi observationnel	(1) Publié 2012 (2) En cours
Glycoaldéhyde : CH_2OD-CHO, CHDOH-CHO, CH_2OH-CDO, CHDOH-CDO	(1) Mesures et analyses en collaboration avec Lille. (2) Suivi observationnel	(1) Publiée 2012 (2) En cours
Pentanenitrile : $CH_3(CH_2)_3CN$	Mesures et analyses en collaboration avec Cologne	Publié 2012
Acétonitrile: CH_2DCN, CHD_2CN	(1) Mesures à Lille. Analyses à l'IRAP. (2) Suivi observationnel ?	(1) Prêt pour soumission
Ethanol : CH_2DCH_2OH, CH_3CHDOH, CH_3CHDOH	(1) Mesures et analyses en collaboration avec Cologne. (2) Suivi observationnel ?	(1) En cours

5 publications significatives <u>avec titre et référence complète</u>

"Millimetre-wave spectrum of anti- $^{13}C_1$ and $^{13}C_2$ isotopologues of ethanol", A. Bouchez, A. Walters, H.S.P. Müller, M. Ordu, F. Lewen, M. Koerber, S. Bottinelli, C.P. Endres, S. Schlemmer, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 113 1148-1154 (2012).

"The submillimeter spectrum of deuterated glycolaldehydes" A. Bouchez, L. Margulès, R.A. Motiyenko, J-C. Guillemin, A. Walters, S. Bottinelli, C. Ceccarelli, and C. Kahane, Astron. Astrophys. 540 A51 (2012).

"Rotational spectroscopy, dipole moment and ^{14}N nuclear hyperfine structure of iso-propyl cyanide", H.S.P. Müller, A. Coutens, A. Walters, J-U. Grabow, S. Schlemmer, J. Mol Spectrosc. 267, 100-107 (2011).

"Terahertz spectroscopy and global analysis of the bending vibrations of acetylene $^{12}C_2D_2$", S. Yu, B.J. Drouin, J.C. Pearson, H.M. Pickett, V. Lattanzi, A. Walters, Ap.J. 698, 2114-2120 (2009).

Submillimeter-wave spectrum of anti-anti and anti-gauche diethyl ether, A. Walters, H. S. P. Müller, F. Lewen, S. Schlemmer, J. Mol Spectrosc. 257, 24-28 (2009).

Titre du projet: Molécules: de l'interstellaire à la vie

Nom du porteur :	GUILLEMIN					Prénom:	JEAN-CLAUDE
Courrier électronique	Jean-clause.guillemin@ensc-rennes.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	Institut des Sciences Chimiques de Rennes					Institut Principal de rattachement CNRS	INC
Code (ex: UMR1111)	UMR 6226					Section(s) CNRS	12
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	32
Montant Alloué (k€)	8	8	8	9			
Financement ANR *							

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
IPR, Université de Rennes 1, 35042 Rennes.	Dr. Abdessamad Benidar	INP
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	----------
Université d'Oslo	Pr. Harald Möllendal	Département de Chimie

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

Environ 160 molécules ont été détectées dans le milieu interstellaire (MIS). Les missions *Herschel*, Alma et Sofia ont ou doivent conduire à la détection de nouvelles molécules dans un proche avenir. Quelles autres molécules peuvent être présentes dans le MIS ? Pourquoi ? Comment se forment-elles ? A partir de quels composés ? Quels produits forment-elles par irradiation photochimique ? De plus pourquoi retrouve-t-on certains de ces composants dans d'autres milieux (comètes, atmosphères planétaires et peut-être Terre Primitive) et quel lien existe-t-il entre leur présence dans le MIS et dans ces milieux ?
La relation entre molécules interstellaires et chimie prébiotique se place essentiellement dans le fait que les composés de ces milieux sont souvent thermodynamiquement très stables mais présentent une stabilité cinétique (réactivité chimique) très dépendante du milieu où elles se trouvent. Le nombre de molécules par cm^3 et la température dans le MIS permet la stabilisation d'entités dont la détection est peu envisageable dans les atmosphères planétaires. La compréhension de cette fascinante chimie du MIS doit nous permettre de cibler de plus en plus quels autres composés pourraient être présents dans ce milieu.

Nous avons entrepris des études portant sur des petites molécules (entre 5 et 12 atomes) et qui mettent en jeu plusieurs collaborations. Notre équipe de chimistes (J.-C. Guillemin, DR CNRS, et Y. Trolez, MdC, Rennes) se consacre à la partie synthèse et le Dr. A. Bénidar (Institut de Physique de Rennes) étudie les spectres de ces molécules par infra-rouge en phase gazeuse. Sont aussi développées des collaborations en spectroscopie de microonde, (avec les Prs H. Möllendal à Oslo et L. Margulès à Lille) et en infrarouge sur matrice avec irradiation des systèmes (Prs T. Chiavassa à Marseille et R. Kolos à Varsovie).
Les composés étudiés sont principalement des nitriles, isonitriles et leurs dérivés : aminonitriles, imines, amides, acides aminés, acides carboxyliques…. De très nombreuses synthèses ont été effectuées, les spectres infrarouges et de microonde des composés ont été enregistrés. A ces études s'ajoutent la synthèse et l'étude spectroscopique d'isotopomères. Par ailleurs, les réactions de photolyse sur matrice, parfois à partir d'isotopomères pour préciser la nature des produits formés, ont permis de préciser une chimie possible pour ces composés sur les grains interstellaires.
Peuvent être cités : l'enregistrement des spectres de microonde et/ou infrarouge de l'allénylisonitrile ($H_2C{=}C{=}CHNC$), du bisisocyanométhane ($CNCH_2NC$), du cyanoacétaldéhyde ($NCCH_2CHO$, adduit de l'eau sur le cyanoacétylène), des mercapto- et amino-2-propènenitrile, adduits respectifs de H_2S et NH_3 sur le

cyanocétylène, de l'aminopropionitrile, la synthèse de cyanopolyynes, les études sur la formation photochimique ou thermique de l'aminoacétonitrile sur les grains interstellaires, …
Nous nous sommes aussi intéressés à la synthèse et l'enregistrement des spectres de microonde associés à des tentatives de détection de composés assez sophistiqués : les molécules chirales, ceci dans la logique de notre démarche de « l'interstellaire à la vie ». La première étude a porté sur l'aminopropionitrile, par analogie avec la détection en 2008 de l'homologue inférieur, l'aminoacétonitrile (dont nous avions d'ailleurs publié le spectre de microonde en 1990 avec le laboratoire de spectroscopie de Lille).
Un certain nombre d'isotopomères de molécules interstellaires ont été détectés grâce à ces études, en particulier ceux du formiate de méthyle. Ces dernières années ont permis d'établir des liens entre notre groupe, les spectroscopistes de Lille ou Oslo et les groupes de Menten en Allemagne, Cernicharo en Espagne, Ceccarelli en France, ce qui nous permet enfin d'aller de la synthèse des molécules à l'enregistrement de leurs spectres et aux tentatives de détection dans le MIS.
Un autre volet de ces études fait appel à la chimie théorique (en particulier avec les Prs H. Möllendal (Univ. Oslo) et M. Yanez (UA Madrid) pour comprendre, par exemple, comment l'eau ou l'ammoniac peut réagir sur le cyanocétylène dans les conditions du MIS, pour déterminer l'acidité ou la basicité des systèmes étudiés en phase gazeuse, comment ces composés se comportent vis-à-vis d'un cation métallique, …

Nos travaux se développent vers de multiples autres composés : hydroxyacétonitrile ($HOCH_2CN$, adduit de l'acide cyanhydrique sur le formaldéhyde), isocyanoacétonitrile ($CNCH_2CN$), la synthèse préparative et la chimie de l'isocyanoacétylène (HCC-NC, détecté dans le MIS et isomère du très abondant cyanoacétylène), de composés chiraux (methylglycolaldéhyde, méthylallènenitrile, …), homologues supérieurs de molécules détectées dans le MIS. Autant que cela sera possible, nous tenterons d'associer les spectroscopistes (infrarouge et microonde) et les astrophysiciens pour maintenir cette chaîne allant de la synthèse de composés interstellaires possibles à l'enregistrement de leurs spectres et à leur détection dans le MIS.

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

5 publications significatives <u>avec titre et référence complète</u>

- M. Lattelais, Y. Ellinger, A. Matrane, J-C. Guillemin, Looking for heteroaromatic rings and related isomers as interstellar candidates. *PhysChemChemPhys*, **2010**, 12, 4165-4171. DOI:10.1039/B924574J

- Benidar, Abdessamad; Georges, Robert; Guillemin, Jean-Claude; Mo, Otilia; Yáñez, M. Infrared Spectra of a Species of Potential Prebiotic and Astrochemical Interest: Cyanoethenethiol. *J. Phys. Chem. A*, **2010**, *114*, 9583-9588.

- Møllendal, H. ; Samdal, S. ; Matrane, A. ; Guillemin, J.-C. Synthesis, Microwave Spectrum, and Dipole Moment of Allenylisocyanide (H_2C=C=CHNC), a Compound of Potential Astrochemical Interest, *J. Phys. Chem. A*. **2011**, *115*, 7978-7983.

- G. Danger, F. Borget, M. Chomat, F. Duvernay, P. Theulé, J-C Guillemin, L. d'Hendecourt, T. Chiavassa Experimental investigation of 2-aminoacetonitrile formation through the Strecker synthesis in astrophysical like conditions: reactivity of methanimine (CH_2NH), ammonia (NH_3) and hydrogen cyanide (HCN). *Astronomy & Astrophysics*, **2011**, *535*, A47.

- Møllendal, H. ; Margules, L. ; Belloche, A. ; Motiyenko, R. A. ; Konovalov, A. ; Menten, K. M. ; Guillemin, J.-C. Rotational spectrum of a chiral amino acid precursor, 2-aminopropionitrile, and its searches in Sagittarius B2(N). *Astron. Astrophys*. **2012**, *538*, A51.

Titre du projet: Spectroscopie de laboratoire (centimétrique, millimétrique et submillimétrique) en soutien des projets *Herschel*, SOFIA et ALMA

Nom du porteur :	MARGULES					Prénom:	LAURENT
Courrier électronique	laurent.margules@univ-lille1.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	Laboratoire PhLAM, UFR de Physique, Université Lille 1, Bâtiment P5, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.					Institut Principal de rattachement CNRS	
Code (ex: UMR1111)	UMR 8523					Section(s) CNRS	INP
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	30
Montant Alloué (k€)		33	31	10			
Financement ANR *	X						

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
Institut des Sciences Chimiques de Rennes, UMR 6226 CNRS – ENSCR, Avenue du Général Leclerc, CS 50837, 35708 Rennes Cedex 7, France	***J. C. Guillemin***	
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	----------
Centre for Theoretical and Computational Chemistry (CTCC), Department of Chemistry, University of Oslo, PO Box 1033, Blindern, 0315 Oslo, Norway	***H. Møllendal***	
Centro de Astrobiología (CSIC-INTA). Laboratory of Molecular Astrophysics. Department of Astrophysics. Ctra de Ajalvir, Km 4, 28850 Torrejón de Ardoz, Madrid, Spain	***J. Cernicharo***	

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

***Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme*:**

De nouveaux radiotélescopes fonctionnant dans le domaine submillimétrique, et couvrant le domaine de fréquences compris entre 0,3 et 5 THz sont opérationnels depuis 2009. Les trois projets principaux sont le projet satellitaire *HERSCHEL* (http://*Herschel*.esac.esa.int/), le projet aéroporté SOFIA (http://www.sofia.usra.edu/) et le projet sol ALMA (http://www.eso.org/projects/alma/) au Chili.

Tout le travail d'analyse de ces données ne sera pleinement efficace que si des études en amont sont réalisées en laboratoire avec une résolution et une précision suffisante (1 MHz). C'est la seule manière d'assurer la détection sans ambiguïté d'une molécule dans le milieu interstellaire

Des études dans le domaine submillimétrique sont indispensables, car les prévisions extrapolées à partir des seules données millimétriques ne sont pas assez précises (modélisation pour des nombres quantiques élevés), compte tenu de la densité spectrale observée dans des sources telles qu'Orion ou SgrB2

Les études ont concerné 3 types de molécules :

1) les espèces isotopiques des molécules organiques complexes. Ces données sont très importantes. D'une part les ratios isotopiques permettent de faire évoluer les modèles de chimie interstellaires. Et d'autre part, il est nécessaire de « nettoyer » les spectres du milieu interstellaire des transitions des molécules les plus abondantes (weeds) pour découvrir d'autres molécules

2) des molécules potentiellement détectables mais peu ou pas étudiées car elles ne sont pas stables dans les conditions du laboratoire. Il fallait donc faire la synthèse in situ (2-Amino-propionitrile, di-isocynamethane)

3) des isotopologues des radicaux les plus abondants (^{15}NH, CH_2D)

Un autre point très important concerne les développements expérimentaux ces dernières années. Grâce à des financements PCMI-CNES-ANR, le spectromètre a été complètement renouvelé. Les anciennes sources, des tubes « carcinotron » très délicats à utiliser et nécessitant des tensions et courants importants (jusque 5 kV et 40

A pour l'electro-aimant), ont été remplacés par des sources solides. De plus la gamme a été étendue de 650 à 990 GHz. Nous couvrons donc parfaitement la gamme ALMA et la gamme basse *HERSCHEL*.

Des développements sont en cours pour augmenter la gamme jusque 1.5 THz. Ce qui sera particulièrement intéressant pour les molécules légères (radicaux et ions) mais aussi pour étudier les états de vibration et torsion excités des molécules organiques complexes dont les données sont peu nombreuses.

Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet ont données lieu à 10 publications pour la période du financement 2010-2012.

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

5 publications significatives <u>avec titre et référence complète</u>

***** L. Margulès, T. R. Huet, J. Demaison, M. Carvajal, I. Kleiner, H. Møllendal, B. Tercero, N. Marcelino, and J. Cernicharo. "Rotational Spectrum and first détection of $DCOOCH_3$–methyl formate in Orion". *Astrop. J.* **714,** 1120-1132 (2010)

***** H. Ozeki, S. Bailleux and G. Wlodarczak. "Terahertz Spectroscopy of the CHD Radical (X 3A")". *A&A* **527**, A64 (2011)

***** S. Bailleux, M. A. Martin-Drumel, L. Margulès, O. Pirali, G. Wlodarczak, P. Roy, E. Roueff, M. Gerin, A. Faure and P. Hily-Blant. " High-resolution Terahertz Spectroscopy of the 15NH radical (X 3Σ–)" *A&A* **538**, A135(2012)

***** H. Møllendal, L. Margulès, A. Belloche, R. A. Motiyenko, A. Konovalov, K. M. Menten, and J. C. Guillemin. "Rotational spectrum of a chiral amino acid precursor, 2-aminopropionitrile, and its searches in Sagittarius B2(N)" *A&A* **538**, A51 (2012)

***** B. Tercero, L. Margulès, M. Carvajal, R. A. Motiyenko, T. R. Huet, E. A. ALekseev, I. Kleiner, J.-C. Guillemin, H. Møllendal, and J. Cernicharo. " Microwave and sub-mm spectroscopy and first ISM detection of 18O methyl formate" *A&A* **538**, A119 (2012)

Titre du projet: Spectroscopie de laboratoire (micro-ondes, millimétrique et submillimétrique) en soutien des projets *Herschel*, SOFIA et ALMA

Nom du porteur :	Wlodarczak					Prénom:	Georges
Courrier électronique	georges.wlodarczak@univ-lille1.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	PHLAM, Université Lille 1 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex					Institut Principal de rattachement CNRS	INP
Code (ex: UMR1111)	UMR8523					Section(s) CNRS	04
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	30
Montant Alloué (k€)	23						
Financement ANR *	x						

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
CESR-Toulouse, UMR5277	A. Walters	INSU
LISA-UMR7583	I. Kleiner	INSU
ENSCR-UMR6226	J-C Guillemin	INC
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	----------
CSIC-Madrid	J. Cernicharo	
Oslo	H. Mollendal	

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

Les résultats principaux ont concerné la spectroscopie de molécules organiques complexes et principalement de leurs variétés isotopiques deutérées, en ^{13}C ou en ^{15}N. Le travail a principalement porté sur le formiate de méthyle et le propionitrile. Ce travail s'est poursuivi en 2010-12 dans le cadre d'un autre projet PCMI (piloté par L. Margulès) et dans le cadre du projet ANR FORCOMS (2009-2012) piloté par C. Ceccarelli.
Concernant les espèces instables la caractérisation des espèces deutérées de l'ion CH_3^+ s'est révélée infructueuse, malgré une recherche intensive.

L'automatisation du spectromètre et l'extension de sa gamme spectrale ont été poursuivies en 2009 et sont encore en cours d'évolution, grâce au soutien du PCMI, du CNES et à des contrats divers, dont l'ANR TOPMODEL (pilotée par Th. Huet) et le contrat de projet état-région IRENI.

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

Spectromètre THz

5 publications significatives <u>avec titre et référence complète</u>

The microwave spectrum of the mono deuterated species of methyl formate $HCOOCH_2D$
L. Margulès, L. H. Coudert, H. Møllendal, J. -C. Guillemin, T. R. Huet, R. Janečkovà
J. Mol. Spectrosc. **254** 55-68 (2009)

Rotational Spectrum of deuterated and ^{15}N ethyl cyanide : CH_3CH_2CN and CH_2DCH_2CN and of $CH_3CH_2C^{15}N$
L. Margulès, R. Motiyenko, K. Demyk, B. Tercero, J. Cernicaro, M. Sheng, M. Weidman, J. Gripp, H. Mäder, and J. Demaison
A&A **493** 565-569 (2009)

Rotational spectrum of $^{13}C2$-methyl formate ($HCOO^{13}CH_3$) and detection of the two ^{13}C-methyl formate in Orion
M. Carvajal, L. Margulès, B. Tercero, K. Demyk, I. Kleiner, J. C. Guillemin, V. Lattanzi, A. Walters, J. Demaison, G. Wlodarczak, T. R. Huet, H. Møllendal, V. V. Ilyushin, and J. Cernicharo
A&A **500** 1109-1118 (2009)

Influence of the geometry of a hydrogen bond on conformational stability: a theoretical and experimental study of ethyl carbamate
M. Goubet, R. A. Motiyenko, F. Réal, L. Margulès, T. R. Huet, P. Asselin, P. Soulard, A. Krasnicki, Z. Kisiel and E. A. Alekseev
Phys. Chem. Chem. Phys. **11** 1719-1728 (2009)

Rotational Spectrum and first detection of $DCOOCH_3$–methyl formate in Orion
L. Margulès, T. R. Huet, J. Demaison, M. Carvajal, I. Kleiner, H. Møllendal, B. Tercero, N. Marcelino, and J. Cernicharo
Astrophys. J **714** 1120-1132 (2010)

Titre du projet: Molécules et glaces interstellaires : théorie et expériences

Nom du porteur :	PAUZAT					Prénom:	Françoise
Courrier électronique	pauzat@lct.jussieu.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	Laboratoire de Chimie Théorique Université Pierre et Marie Curie 4 place Jussieu, 75005 Paris					Institut Principal de rattachement CNRS	INC
Code (ex: UMR1111)	UMR7616					Section(s) CNRS	13 (17)
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	31
Montant Alloué (k€)	19	21	20	10			
Financement ANR *							

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
UMR 7075 LADIR - UPMC campus Jussieu	Lahouari KRIM	INC
UMR 7614 LCPMR - UPMC campus Curie-Ulm	Philippe PARENT	INC
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	----------
Universidad de Valladolid	Pilar Redondo	

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

Molécules et glaces interstellaires : théorie et expériences

Le but principal de ce projet, alliant approche computationnelle (LCT) et approche expérimentale (LADIR, LCPMR), est la clarification de mécanismes élémentaires mis en jeu dans les différentes étapes de la chimie sur les grains interstellaires. En particulier, l'eau à l'état solide peut avoir plusieurs rôles : simple paroi froide, qui augmente la probabilité de rencontre entre réactifs, catalyseur qui facilite les réactions mais également initiateur de processus spécifiques du fait des radicaux H et OH qui y sont créés par le rayonnement.
En raison de la complexité de ce rôle, il nous a paru fondamental d'essayer de le clarifier et en particulier de résoudre les incohérences présentes dans la littérature entre des expériences qui montrent la faisabilité des réactions à un niveau macroscopique en présence de glace d'eau ou de glace mixte dite « sale » et les simulations théoriques au niveau microscopique qui indiquent des barrières d'activation difficilement franchissables en présence de petits agrégats d'eau.

Percées expérimentales: technique d'isolation en matrice cryogénique et production contrôlée de radicaux OH. (LADIR)

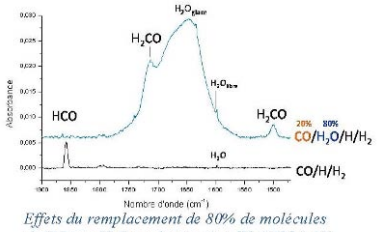
Au cours des quatre dernières années la plus grande partie de notre travail a été dédiée à la chimie radicalaire aux températures cryogéniques où les réactifs sont préparés à l'état fondamental pour simuler les réactions qui peuvent avoir lieu à la surface des grains interstellaires. Pour ce faire, nous avons développé une approche expérimentale originale qui s'affranchit de l'effet d'environnement en isolant les réactions élémentaires types dans un milieu inerte à très basse température (isolation cryogénique en matrice de Néon). Pour élucider le rôle catalytique de l'eau solide, il nous est aujourd'hui possible d'étudier les réactions isolées en l'absence de molécule d'eau puis en faisant varier progressivement le nombre de molécules d'eau autour des réactifs jusqu'à converger vers l'étude de la réaction en phase hétérogène c'est-à-dire dans la glace d'eau.
A l'incitation de PCMI, nous avons également développé une nouvelle méthode permettant de former, caractériser et isoler des radicaux OH. Pour cela, nous soumettons un mélange H_2O/GR : 10/100 (GR = He, Ne ou Ar) à une décharge micro-onde. Les radicaux OH formés par dissociation de l'eau sont isolés les uns des autres par les atomes de gaz rare, ce qui limite leur recombinaison. Le protocole expérimental est totalement original et sa mise au point constitue aujourd'hui une expérience unique dans la communauté internationale.

Réaction d'hydrogénation de CO à basse température (3K et 10K) avec et sans glace d'eau. (LADIR/LCT)

La réaction d'hydrogénation de CO, molécule la plus abondante de l'Univers après H_2 :

$$CO \xrightarrow{1} HCO \xrightarrow{2} HCO \xrightarrow{3} H_2CO \xrightarrow{4} H_3CO/CH_2OH \xrightarrow{5} H_3COH$$

est un processus majeur de la chimie conduisant aux molécules organiques complexes (COM).



Effets du remplacement de 80% de molécules de CO par H_2O sur la réaction [H+CO] à 3K

En couplant la méthode d'isolation en matrice cryogénique de néon avec la technique de co-injection des réactifs (H+CO), nous avons mis en évidence qu'une très basse température (3 K) semblait à la fois favoriser la production et isoler le radical éphémère HCO au sein d'un environnement mixte constitué de monoxyde de carbone et d'hydrogène moléculaire. Parallèlement, une surface de potentiel MRCISD (interaction de configuration multi référence) et QMC (Monte Carlo quantique)) est en cours de calcul en vue d'un traitement collisionnel quantique afin d'évaluer numériquement les possibilités de passage par effet tunnel. Nous avons également mis en évidence le caractère catalytique des molécules d'eau sur la réaction [H+CO] à 3 et 10 K, en observant une augmentation du taux de réaction et une cinétique réactionnelle dépendante de la concentration en eau. Parallèlement, les calculs effectués au niveau de "l'état de l'art" en simulant la glace, soit par un continuum polarisable, soit par une micro solvatation de CO par quelques molécules d'eau avant l'attaque par l'atome d'hydrogène, ne montrent aucun effacement de la barrière de potentiel.
En revanche, si l'on considère que l'hydrogène atomique est lié à la glace avant l'attaque de CO, nos premiers résultats suggèrent que la réaction est alors "immédiate". Dans ce cas, expérience et théorie concordent sur la poursuite de l'hydrogénation jusqu'à formation du méthanol. L'étude théorique des produits et intermédiaires de réaction montrent que les signatures infrarouge des nouveaux composés observés peuvent être reliées à des dérivés complexes formés par réaction du radical HCO avec son environnement.

Réactivité du radical OH en matrice de néon et dans la glace d'eau. (LADIR/LCT)

L'irradiation des glaces par le rayonnement cosmique peut conduire à sa dissociation, produisant des radicaux extrêmement réactifs, H et OH, susceptibles de réagir avec de nombreuses espèces présentes alentour dans les manteaux glacés. La maîtrise acquise de la technique de

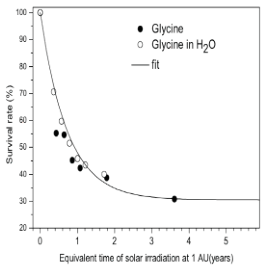
de production de OH en rend aujourd'hui l'étude possible. Ainsi les réactions de OH avec OH, CO, CO_2, NO et CH_4 ont déjà été considérées. La première réaction est particulièrement intéressante car elle pourrait être, entre autres, à l'origine de la formation de la couche glacée dont on sait qu'elle ne peut provenir de la simple condensation de l'eau de la phase gazeuse. Après l'addition de H sur O pour former OH (**a**), le radical hydroxyle formé peut réagir avec un second H (**b**), ou avec H_2 (**c**) ou avec un second radical OH (**d**) pour former H_2O :

$$H+O \rightarrow OH \quad (\mathbf{a}) \; ; \; OH+H \rightarrow H_2O \quad (\mathbf{b}) \; ; \; OH + H_2 \rightarrow H_2O + H \quad (\mathbf{c}) \; ; \; OH+OH \rightarrow H_2O + O \quad (\mathbf{d}) \; ;$$

L'étude de la réaction (**d**) par une approche parallèle à la démarche expérimentale (addition progressive de molécules de H_2O jusqu'à la formation d'une couche de glace) montre que la présence de la glace fait disparaître les barrières de la phase gaz. Quant à la réaction (**c**), elle apparaît favorisée par l'adsorption préalable de H_2 sur la couche de glace préexistante. Afin de confirmer ces résultats fondamentaux pour la compréhension de la construction des manteaux de glaces interstellaires, une approche périodique en ondes planes (VASP) est actuellement en cours pour intégrer la dimension infinie du support par rapport au site réactionnel.

Résistance des molécules organiques complexes au rayonnement (LCPMR/LCT)

L'agent de destruction majeur des manteaux glacés étant le rayonnement stellaire, nous avons étudié la résistance aux radiations des COM piégées dans la glace. Le plus simple des acides aminés, la glycine H_2NCH_2COOH, a été étudié sur le plan expérimental (Expériences NEXAFS au synchrotron SOLEIL) et sur le plan théorique en envisageant systématiquement toutes les fragmentations possibles.



Le résultat fondamental est qu'il semble que 30% de la glycine survit à l'irradiation à 30K, la fraction détruite conduisant à la formation de CO_2 et CH_3NH_2, en accord avec les simulations numériques.

La glace ne joue aucun rôle dans le processus, ni protection, ni activation mais se comporte comme un milieu de confinement permettant la recombinaison des fragments formés qui n'ont pas diffusé. Par contre, les radicaux OH créés par l'irradiation de la glace peuvent conduire à des réactions de déshydrogénation par abstraction de H (et reconstitution de H_2O). Ainsi, théorie et expériences ont montré que CH_3NH_2 conduit à HCN et CH_3OH a tendance à redonner CO.

D'une manière générale, la glace joue un double jeu, à la fois favorisant l'hydrogénation par l'hydrogène atomique et la déshydrogénation par le radical OH, ce qui n'est pas pris en compte actuellement dans les modèles astrochimiques. Ces réactions sont actuellement à l'étude sur la paire d'isomères CH_3CN, CH_3NC.

Recherches parallèles d'intérêt PCMI

Adsorption des molécules organiques complexes. (LCT/LPMAA)

Les études de réactivité nous ont montré le rôle parfois déterminant de l'adsorption des réactifs. Le manque de données concernant cette étape préliminaire de la réactivité nous a conduits à développer une étude systématique de l'adsorption des molécules interstellaires, en commençant par H_2 et en poursuivant par des espèces présentant les groupements fonctionnels les plus répandus (-COOH, -OH, NH_2, CN...). L'approche théorique repose sur des calculs périodiques en ondes planes (VASP).

Pour cette étude nous avons collaboré avec l'équipe Fillion du LPMAA qui a effectué en parallèle des expériences de désorption programmée en température (TPD). Nous avons ainsi montré que les COM se répartissent en 3 catégories selon que leur énergie d'adsorption est faible, moyenne ou forte par rapport à l'énergie de sublimation de la glace (~12 kcal/mol). On trouve ainsi les espèces volatiles (H_2, CO, CO_2, CH_4, ...), celles qui désorbent avant l'eau (CH_3NH_2, CH_3OCH_3, ...) et celles qui désorbent avec l'eau (CH_3CH_2OH, CH_3COOH, ...), soit à des températures respectives T<50K, 50<T<100K et T>150K. Une étude à grande échelle sur plusieurs types de surfaces interstellaires a débuté en septembre 2012 dans le cadre d'un projet de thèse.

Recherche des molécules organiques complexes et principe d'énergie minimum « PEM ». (LCT/IPAG)

Une étude thermodynamique systématique des 14 espèces effectivement observées dans le MIS sous la forme de 32 isomères différents a été réalisée. La confrontation de ces calculs avec les observations recensées par C. Ceccarelli de l'IPAG, a montré que, sans exception, l'isomère le plus stable avait été observé à chaque fois que plusieurs isomères avaient été identifiés. De plus, à quelques rares exceptions près, l'isomère le plus stable est le plus abondant. Nous avons proposé de regrouper ces propriétés, étonnantes pour un milieu généralement considéré hors équilibre thermodynamique, sous le vocable de *« principe d'énergie minimum »*.

Molécule neutre	ΔE(kcal/mol)
H_2N-CH_2-COOH	10.6
CH_3-O-C(NH_2)=O	4.7
CH_3-NH-COOH	0.0

Energies relatives des isomères de glycine

L'exemple le plus spectaculaire d'application du PEM est celui de la glycine qui, sous forme neutre *n'est pas l'isomère le plus stable thermodynamiquement,* ce qui expliquerait logiquement l'échec prolongé de sa détection. Les carbamates plus stables, seraient de meilleures cibles pour une détection dans le MIS.

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

Montage ReMaCry (LADIR), Montage SUMO (LCPMR), Cluster dédié Sirius (LCT)

5 publications significatives avec titre et référence complète

Interstellar Complex Organic Molecules and the Minimum Energy Principle, M. Lattelais, F. Pauzat, Y. Ellinger, C. Ceccarelli, *The Astrophysical Journal*, **696**, L133 (2009)

Preliminary study of the influence of environment conditions on the successive hydrogenations of CO, C. Pirim, L. Krim, C. Laffon, Ph. Parent, F. Pauzat, J. Pilmé, Y. Ellinger, *Journal of Physical Chemistry A*, **114**, 3320-3328 (2010)

Differential adsorption of complex organic molecules isomers at interstellar ice surfaces, M. Lattelais, M. Bertin, H. Mokrane, C. Romanzin, X. Michaut, P. Jeseck, JH. Fillion, H. Chaabouni, E. Congiu, F. Dulieu, S. Baouche, JL. Lemaire, F. Pauzat, J. Pilmé, C. Minot, Y. Ellinger, *Astronomy and Astrophysics*, **532**, A12 (2011)

The survival of glycine in interstellar ices: a coupled investigation using NEXAFS experiments and theoretical calculations, M. Lattelais, O. Risset, J. Pilmé, F. Pauzat, Y. Ellinger, F. Sirotti, M. Silly, Ph. Parent, C. Laffon, *International Journal of Quantum Chemistry*, **111**, 1163-1171 (2011)

Production and isolation of OH radicals in water ice, E. Zins, P. Joshi, L. Krim, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **415**, 3107-3111 (2011)

Titre du projet: Evolution des grains interstellaires dans le milieu interstellaire : Formation de molécules organiques complexes.

Nom du porteur :	CHIAVASSA					Prénom:	Thierry
Courrier électronique	thierry.chiavassa@univ-amu.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	Laboratoire de Physique des Interactions Ioniques et moléculaires, Université d'Aix Marseille, Service 252, Centre de St Jérôme, 13397 Marseille					Institut Principal de rattachement CNRS	INSIS
Code (ex: UMR1111)	UMR 7345					Section(s) CNRS	13
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	31
Montant Alloué (k€)	12	14	13.6	14			
Financement ANR *				x			

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
IAS	***Louis d'Hendecourt***	***INSU***
ENSC Rennes	***Jean Claude Guillemin***	***INC***
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	----------

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

Notre projet consiste à simuler l'évolution d'analogues de glaces interstellaires ou cométaires soumis à des processus d'hydrogénation ou à des processus énergétiques tels que des effets thermiques ou des irradiations par des photons VUV (λ>120 nm).
Nous utilisons la spectrométrie infrarouge pour caractériser les molécules organiques complexes produites à différents stades de l'évolution du grain et déterminons ensuite leurs mécanismes de formation. Les espèces délivrées en phase gazeuse au cours du réchauffement de l'échantillon sont caractérisées en spectrométrie de masse. Ces molécules peuvent être détectées dans les environnements de protoétoiles ou dans les comètes. Les résidus réfractaires obtenus, sont des sources de molécules prébiotiques qui peuvent être analysés en spectrométrie infrarouge et en spectrométrie de masse ultra-haute résolution (Voir Figure 1).

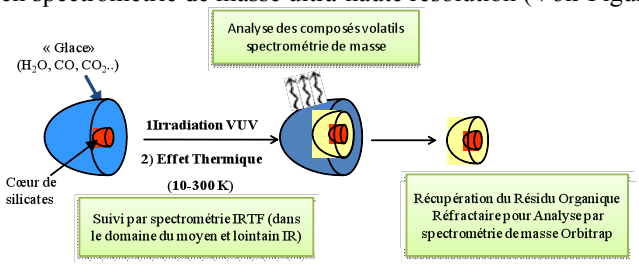


Figure 1 : Schéma illustrant les expériences de simulation réalisées sur le dispositif « RING »

Résultats : Dans ce projet, nous nous sommes intéressés à la réactivité thermique et photochimique de mélanges primitifs constitués de H_2CO ou CH_3CHO, NH_3 et H_2O qui sont des constituants des glaces interstellaires. Nous avons montré que le réchauffement de ces glaces conduisait à la formation d'aminoalcool tels que l'aminométhanol (NH_2CH_2OH) ou l'alpha-aminoéthanol ($NH_2CH(CH_3)OH$) présentant un centre de chiralité (Bossa et al, ApJ, 2009). Le résultat de nos études cinétiques montrent que la recherche et l'identification de l'alpha-aminoéthanol dans les glaces de sources protostellaires ou dans les cœurs chauds, peut s'avérer fructueuse (Duvernay et al, A§A, 2010). En présence d'un acide (HCOOH), l'aminométhanol produit la méthanimine, CH_2=NH, détectée dans le milieu interstellaire, qui évolue vers la formation de HMT ($C_6H_{12}N_4$), l'hexaméthylènetétramine, et d'un polymère, le PolyMéthylèneImine (PMI), qui sont des constituants majeurs des résidus obtenus (Vinogradoff et al, A§A, 2011). Ces molécules ne se forment qu'à des températures de l'ordre de 280 K ce qui exclut leur formation et leur détection dans des glaces interstellaires. En présence de HCN, cette imine conduit aussi à la formation de l'aminoacétonitrile (NH_2CH_2CN) dont la détection est impossible dans les grains (Borget el al, A§A, 2012) mais qui peut être détectée après sublimation du grain, dans les cœurs chauds (Danger, et al, A§A, 2011). A ce jour ce processus constitue la voie de formation privilégiée pour cette molécule dans de tels environnements. L'aminoacétonitrile peut par hydrolyse

en milieu acide conduire à la formation de glycine, le plus simple des acides aminés. Il existe une autre voie de formation de la glycine, dans les grains interstellaires, à partir de CH_3NH_2, résultant de l'hydrogénation de HCN sur les grains (Theule et al, A§A, 2011) et CO_2. Cette réaction conduit à un carbamate d'ammonium ($CH_3NH_3^+$, CH_3NHCOO^-) qui par irradiation VUV produit le sel de glycine (Bossa et al, A§A, 2009).
Nous nous sommes également intéressés à la formation de l'ion OCN^- et nous avons pu expliquer la non détection de HNCO dans les grains (Mispelaer, A§A, 2012) à partir de la faible barrière d'activation mesurée (0,5 kJ.mol^{-1}) pour le système $HNCO/NH_3$

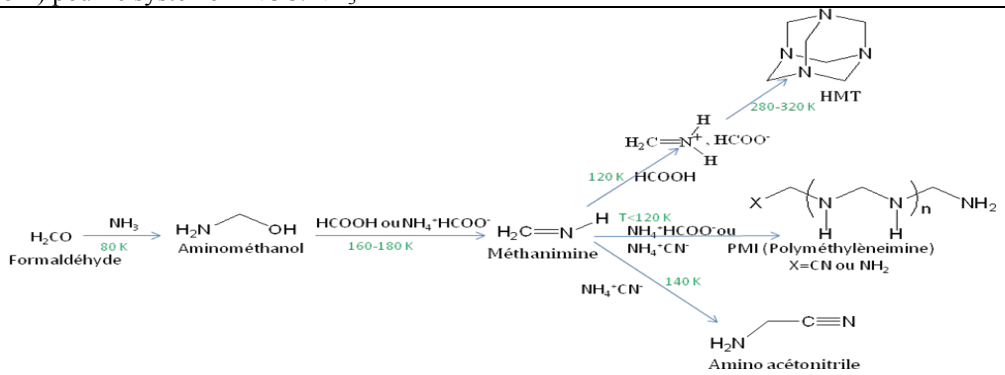


Figure 3 : Un Réseau de réactions illustrant la complexité moléculaire dans les grains interstellaires

Perspectives: Nous nous intéresserons à la formation de molécules comme l'hydroxyacétonitrile, une source d'hydroxyacide détectée dans les météorites, de glycolaldéhyde/méthylformate/éthylèneglycol à partir de la simple hydrogénation de CO/H_2CO…

Nous travaillons également sur l'élaboration d'un modèle de grains appliqué à différents types d'environnement, en faisant varier la composition, la température et le flux de Photons. Parallèlement, des mesures des coefficients de diffusion de HNCO, NH_3, H_2CO à l'intérieur de glaces d'eau seront réalisées pour prendre en compte ce processus qui peut avoir une influence sur la réactivité et sur la composition du milieu. Cette étude se fera en collaboration avec D. Talbi et P. Ghéquierre de l'Université de Montpellier.

Enfin, dans le cadre de l'ANR VAHIIA (Volatile Analysis from Heating of Interstellar Ice Analogues), nous caractériserons en GC/MS, les molécules qui peuvent être délivrées en phase gazeuse à partir de l'irradiation et du réchauffement d'analogues de glaces. De cette étude, découlera des tests observationnels de molécules à réaliser en radioastronomie (cœurs chauds et comètes), mais aussi dans les noyaux cométaires en soutien à la mission spatiale Rosetta.

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données
Noms du dispositif expérimental: RING (Reactivity in INterstellar Grains)

5 publications significatives avec titre et référence complète

" Chiral molecule formation in interstellar ice analogs: alpha-aminoethanol $NH_2CH(CH_3)OH$"
F. Duvernay,V. Dufauret, G. Danger, P. Theulé, F. Borget, T. Chiavassa
Astrononomy & Astrophysics, 523, (**2010**), A79

"New insight on HMT formation mechanism in interstellar ice analogs"
V. Vinogradoff, F. Duvernay, G. Danger, P. Theulé, T. Chiavassa,
Astrononomy & Astrophysics. 530, **(2011)**, A128.

"Hydrogenation of solid hydrogen cyanide HCN and methanimine CH_2NH at 15 K"
P. Theule, F. Borget, F. Mispelaer, G. Danger, F. Duvernay, J.C. Guillemin, T. Chiavassa
Astronomy & Astrophysics, 534, (2011), A64

"Experimental investigation of aminoacetonitrile formation through the Strecker synthesis in astrophysical like conditions: reactivity of methanimine (CH2NH), ammonia (NH3) and hydrogen cyanide (HCN)."
G. Danger, F. Borget, M . Chomat, F. Duvernay, P. Theule, J.C. Guillemin, L. d'Hendecourt, T. Chiavassa
Astrononomy & Astrophysics, 535, (2011), A47

"Aminoacetonitrile characterization in astrophysical like conditions."
F. Borget, G. Danger, F. Duvernay, M. Chomat, V. Vinogradoff, P. Theulé, T. Chiavassa,
Astronomy and Astrophysics, 541, (2012), A114

Titre du projet: MICMOC/ChiralMICMOC/MICMOS

Nom du porteur :	d'Hendecourt					Prénom:	Louis
Courrier électronique	ldh@ias.u-psud.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	IAS-CNRS Campus d'Orsay, bat 121 91405 Orsay, cedex					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)						Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)	10	8	10	8			
Financement ANR *			10				

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	----------

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

Le projet MICMOC a pour but de comprendre l'apparition de la complexité moléculaire par le biais de la photochimie sur les glaces en laboratoire, simulant les glaces interstellaires/précométaires/cométaires. L'importance des glaces de fait de leur abondance et de leur contenu moléculaire n'est plus à démontrer. Ces glaces sont observées dans les objets protostellaires qui, en s'effondrant vont donner naissance aux systèmes planétaires après passage par une phase « nébuleuse solaire » ou disque, là où les planètes se forment. Les débris de cette formation, astéroïdes et comètes constituent la matière primitive, riche en eau et matière organique, présumées nécessaire pour l'apparition de processus prébiotique à la surface de planètes telluriques, la Terre en particulier, seul exemple connu à ce jour de la manifestation de ces processus ayant permis finalement l'apparition de la vie.

A la base, la spectroscopie infrarouge des glaces et une partie de leur évolution photochimique, aisément simulable en laboratoire avait permis de comprendre certains processus à l'œuvre dans les glaces (formation de molécules telles que CO_2, H_2CO, et quelques détections de type formamide et urée, formation de complexes moléculaires révélant leur degré de mélange, évaporation… Les observations ISO et Spitzer permettaient de confronter les résultats expérimentaux aux observations et d'aider en particulier à préciser les abondances moléculaires dans ces glaces.

Toutefois, il est apparu de plus en plus évident, au cours de ces simulations de photochimie, que le réchauffement final du support de l'échantillon (de fait à 300 K) donne naissance à la formation d'un résidu organique extrêmement complexe qui contient une richesse moléculaire d'une importance et d'une qualité jusqu'ici insoupçonnées. L'étude de ce résidu organique (OR), semi-réfractaire, est donc devenue l'objet majeur de notre activité qui se décline désormais sous le nom de MICMOC/Chiral-MICMOC et MICMOS. Le premier nom générique consiste en l'étude la matière organique, le second réfère au problème de l'asymétrie chirale potentiellement contenue (ou non) dans ces résidus, le dernier terme réfère la matière organique soluble de cet OR sur laquelle nous insistons ci-dessous.

Nos expériences (Thèse de Michel Nuevo, 2005, puis de Pierre de Marcellus, 2010 et maintenant de Paola Modica, prévue en 2013) montrent que cet OR consiste en fait en une matière macromoléculaire intégralement soluble dans l'eau (ce qui en fait un atout considérable pour les propriétés de prébioticité), avec par exemple la mise en évidence de macromolécules de masse très élevée (m/z de l'ordre de 2600), toujours soluble dans l'eau.

Nous avons suivi des voies d'étude classiques pour comprendre la signification de ces OR à savoir leur analyse par GC-MS pour des molécules définies (ex, l'urée, l'acide glycolique et quelques autres et l'hydantoïne, un catalyseur de la formation d'oligopeptides (qui se forme par condensation d'urée et d'acide glycolique) montrant ainsi le potentiel prébiotique d'une telle substance. Une autre technique consiste à hydrolyser à l'acide (HCl à 100°C) l'OR pour en quelque sorte casser les liaisons (de type peptidiques ?) pour pouvoir en détecter plus facilement les sous unités moléculaires de cette matière. La technique utilisée grâce à notre collaboration avec U. Meierhenrich, Nice) a donné des résultats très probants à savoir la mise en évidence d'une vingtaine d'acides

aminés, 5 di amino acides et un nombre important de molécules non élucidées à ce jour. Ce type d'analyse chimique a évidemment des limites (nécessité de standards de calibration pour identifier les molécules).

Très clairement ; il est absolument nécessaire de changer maintenant de technique analytique, ce qui a été proposé par **Donia Baklouti**, MCF dans notre équipe, à savoir utiliser une technique de chromatographie en phase liquide (HPLC) pour essayer de comprendre la structure moléculaire des macromolécules présentes. Nous avons acquis (par un contrat université PXI et le soutien du CNES) une HPLC séparative avec une détection par barrette de diodes UV placée sous la responsabilité de Donia Baklouti. Ce moyen séparatif sera ensuite couplé à d'autres moyens plus « analytiques » (spectrométrie de masse) avec des collaborations ciblées (LETIAM à Orsay, IPN à Orsay). Notre prospective court/moyen terme est tout d'abord de bien comprendre les protocoles d'extraction de l'OR (en fonction des solvants) puis d'optimiser notre HPLC pour en tirer le meilleur partie. La production de l'OR est de la responsabilité du porteur du projet (**LdH**) et c'est la partie la plus directement financée par PCMI.

Les buts scientifiques/astrochimiques sont de préciser la nature et l'origine de la matière organique dans le système solaire, de la produire et de l'analyser en laboratoire, d'observer son évolution en fonction de certaines données météoritiques (présence d'effets thermiques et aqueux au sein des corps parents), puis d'en examiner, en collaboration avec des chimistes prébioticiens, quelles sont les évolutions possibles de cette matière. Une partie de ce projet a par ailleurs été soutenu par le programme EPOV, considérant qu'il faisait bien partie de la thématique « conditions de l'origine des systèmes vivants »). Cet aspect est bien évidemment de plus long terme.

Finalement, chiral-MICMOC a adressé le problème des excès énantiomériques possibles que l'on peu fabriquer dans ces résidus organiques en montant MICMOC sur le ligne DESIRS à SOLEIL pour irradier nos glaces achirales par une lumière UV-CPL. Cette lumière agit bien évidemment en photochimie et une phase prochirale apparaît alors après un certain temps d'irradiation. La mise en évidence d'excès énantiomériques dans l'alanine a été possible et considérée comme significative. Des développements sont en cours sur cette expérience puisque nous avons régulièrement du temps de faisceau sur SOLEIL (une petite dizaine de jours/an).

En marge de MICMOC, une certaine activité aussi existe pour comparer notre matière organique avec celle issue des météorites (la MOS) afin de valider un scénario astrophysique pour l'apparition et l'ensemencement de planètes telluriques en matériaux organiques propices au développement nécessaire de la chimie prébiotique (molécules complexes, autocatalyse et autoréplication, hétérotrophie).

Au sein de l'équipe « Astrochimie et Origines » de l'IAS, le PCMI a en outre financé l'expérience SICAL (porteur Emmanuel Dartois, rapport séparé). Les crédits PCMI donnés dans le tableau se sont répartis sur ces deux expériences, avec en partie une mutualisation des moyens dans notre équipe.

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

MICMOC

5 publications significatives avec titre et référence complète

Nuevo, Michel; Bredehöft, Jan Hendrik; Meierhenrich, Uwe J.; d'Hendecourt, Louis; Thiemann, Wolfram H.-P., *Urea, Glycolic Acid, and Glycerol in an Organic Residue Produced by Ultraviolet Irradiation of Interstellar/Pre-Cometary Ice Analogs* , 2010, AsBio.**10**.245

Danger, G.; Bossa, J.-B.; de Marcellus, P.; Borget, F.; Duvernay, F.; Theulé, P.; Chiavassa, T.; D'Hendecourt, L., *Experimental investigation of nitrile formation from VUV photochemistry of interstellar ices analogs: acetonitrile and amino acetonitrile*, 2011, A&A.**525**.30

de Marcellus, Pierre; Meinert, Cornelia; Nuevo, Michel; Filippi, Jean-Jacques; Danger, Grégoire; Deboffle, Dominique; Nahon, Laurent; Le Sergeant d'Hendecourt, Louis; Meierhenrich, Uwe J., *Non-racemic Amino Acid Production by Ultraviolet Irradiation of Achiral Interstellar Ice Analogs with Circularly Polarized Light*, 2011, ApJ.**727**, L27

de Marcellus, Pierre; Bertrand, Marylène; Nuevo, Michel; Westall, Frances; Le Sergeant D'Hendecourt, Louis, *Prebiotic Significance of Extraterrestrial Ice Photochemistry: Detection of Hydantoin in Organic Residues*, 2011, AsBio. 2011, AsBio.11, 847

Meinert, C., Filippi, J.J., de Marcellus, P., Le Sergeant d'Hendecourt, L., Meierhenrich, U.W., N-(2-Aminoethylglycine and amino acids from interstellar ice analogues, 2012, ChemPlusChem, **77**, 186

Note 1 : 3 de ces résultats ont donné lieu à 2 communiqués de presse CNRS et 1 à l'INSU. Les deux CP CNRS ont été repris par divers médias nationaux dont le journal Le Monde et le JT de France 2.

Note 2 : en souligné les noms des membres (ou ex membres) de l'équipe **A&O de l'IAS**

Titre du projet: Simulateur d'Irradiation de Carbones Amorphes en Laboratoire

Nom du porteur :	DARTOIS					Prénom:	Emmanuel
Courrier électronique	emmanuel.dartois@ias.u-psud.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	Institut d'Astrophysique Spatiale, Bat 121, Campus de l'Université Paris XI, 91405, ORSAY					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR8617					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)	5						
Financement ANR *			x				

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	Responsable Projet	Institut CNRS principal
ISMO (UMR 8214)	Thomas Pino	INSU
IPNO (UMR8608)	Marin Chabot	IN2P3
CSNSM (UMR8609)	Jean Duprat	IN2P3
Partenaire Etranger	Responsable Projet	----------
CAB, CSIC-INTA Madrid	Guillermo Muñoz Caro	
Hawaii	Tom Geballe	

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de T

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

Mots Clés : Analogues de laboratoire, spectroscopie, spectrométrie de masse, MIS, environnement interstellaire et nébuleuse solaire, observations.

Les simulations de la phase solide du MIS et de la nébuleuse proto-solaire et de leur évolution peuvent être effectuées en laboratoire. Celles-ci, au travers de différentes méthodes d'analyse, permettent d'éclairer les interactions complexes entre les processus physiques et chimiques agissant dans le milieu interstellaire diffus, durant la phase de nébuleuse solaire primitive et par la suite les processus affectant la matière libérée par les corps parents contemporains.

La production d'analogues de la matière carbonée interstellaire produite auparavant à l'IAS reposait sur la photochimie d'un précurseur aliphatique. La photolyse à basse température suivie de la recombinaison des radicaux produits s'effectue sous une irradiation continue de faible flux, relativement douce, correspondant à des photons d'énergie inférieure à 10eV. Le milieu diffus contient également des particules à plus hautes énergies qui auront un impact différent sur la structure des analogues formés par de tel processus. Tandis que les photons < 10 eV permettent essentiellement la dissociation des liaisons chimiques, des ions à plus haute énergie vont avoir un effet différent, rompant également des liaisons mais ionisant localement le matériau.

SICAL à l'IAS produit des analogues à la matière, en particulier carbonée, observée dans le milieu diffus Galactique. Le succès, meilleur analogue actuel, de la production photochimique par irradiation UV (SICAL-X) ou plasma (SICAL-P) à basse température sous vide des matériaux responsables des bandes d'absorption observées en direction du centre Galactique et dans les milieux diffus, à la fois aromatique et aliphatique, nous a poussé à engager des expériences avec d'autres sources d'irradiation incluant UV et ions.

L'un des objectifs de SICAL est la fabrication (SICAL-P) et l'étude (SICAL-X) d'analogues carbonés amorphes ayant des couvertures en hydrogène contrôlées, la caractérisation par spectroscopie infrarouge (in situ par FTIR et ex situ avec un micro-FTIR), puis l'étude des effets chimiques de l'implantation UV et ionique à basse énergie et haute énergie (keV-GeV) dans ces carbones amorphes. Dans le cadre de la réalisation d'expériences futures, l'utilisation d'hydrogène permettrait aussi de comparer les effets chimiques associés et d'effectuer de l'implantation au cœur de matériaux préparés auparavant (comme par exemple la photochimie UV, ou le plasma

d'un précurseur). D'autre part, nous entreprendrons de déduire de ces spectres les constantes optiques associées aux matériaux produits, qui rentrent en compte dans les modèles de transfert de rayonnement et servent à la communauté astrophysique.

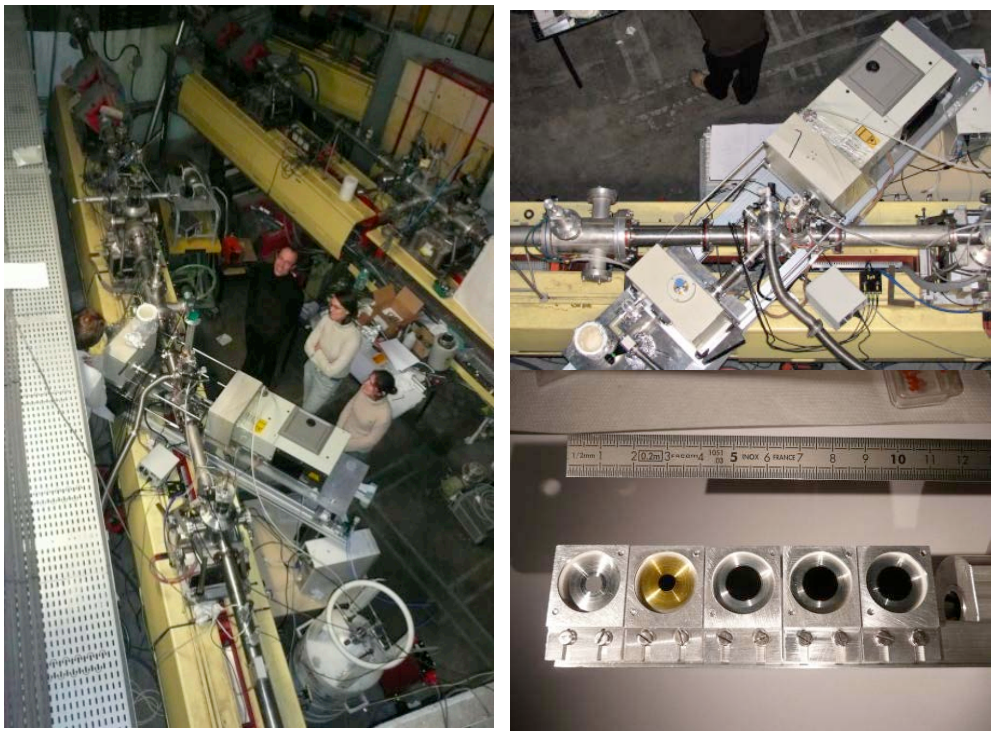


Fig.1. *Montage expérimental sur l'accélérateur Tandem/IPNO pour l'irradiation de carbones amorphes hydrogénés et de suies, simulant les irradiations par des rayons cosmiques de haute énergie.*

Les perspectives à court terme incluent l'analyse d'analogues de laboratoire synthétiques pertinents pour l'élaboration des empreintes spectrales liées à leur organisation structurelle sous jacente, continuer à sonder les chemins chimiques induits par les rayonnements comme l'UV ou les ions simulant les rayons cosmiques, pour la synthèse de nouveaux matériaux et pour leur adéquation avec les environnements radiatifs rencontrés dans l'espace et sonder les effets de chauffage thermique.

nom du dispositif expérimental : SICAL-P (plasma) et SICAL-X (experiment)

5 publications significatives <u>avec titre et référence complète</u>

- Godard, M., Geballe, T.R., Dartois, E., Muñoz Caro, G. M. 2012. *"The deep 3.4 μm interstellar absorption feature toward the IRAS 18511+0146 cluster".* Astronomy and Astrophysics 537, A27.
- Godard, M., Féraud, G., Chabot, M., Carpentier, Y., Pino, T., Brunetto, R., Duprat, J., Engrand, C., Bréchignac, P., D'Hendecourt, L. and Dartois, E. 2011. *"Ion irradiation of carbonaceous interstellar analogues. Effects of cosmic rays on the 3.4 μm interstellar absorption band".* Astronomy and Astrophysics 529, A146.
- Godard, M., Dartois, E. 2010. *"Photoluminescence of hydrogenated amorphous carbons. Wavelength-dependent yield and implications for the extended red emission".* Astronomy and Astrophysics 519, A39.
- Brunetto, R., Pino, T., Dartois, E., Cao, A.-T., D'Hendecourt, L., Strazzulla, G., Bréchignac, P. 2009. *"Comparison of the Raman spectra of ion irradiated soot and collected extraterrestrial carbon".* Icarus 200, 323-337.
- Muñoz Caro, G. M., Dartois, E. 2009. *"A tracer of organic matter of prebiotic interest in space, made from UV and thermal processing of ice mantles".* Astronomy and Astrophysics 494, 109-115.

Titre du projet: Photodésorption de glaces interstellaires

Nom du porteur :	FILLION					Prénom:	Jean-Hugues
Courrier électronique	Jean-hugues.fillion@upmc.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	Laboratoire de Physique Moléculaire pour l'Atmosphère et l'Astrophysique, boîte 76, 4 place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05					Institut Principal de rattachement CNRS	INP
Code	UMR 7092					Section(s) CNRS	04
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	30
Montant Alloué (k€)		26	20	18			
Financement ANR *							

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	----------
Sackler Laboratory Leiden Observatory, University of Leiden, PO Box 9513 2300 Leiden, Pays-bas	LINNARTZ Harold	

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

Ce projet concerne l'étude expérimentale des interactions gaz-surface au laboratoire. Il porte sur la simulation expérimentale de glaces moléculaires de type interstellaire et sur l'étude des processus de désorption thermique et non-thermique induits par le rayonnement UV. Dans les régions les plus froides du milieu interstellaire, la désorption thermique devient négligeable et le processus de photodésorption (non-thermique) peut jouer un rôle pour expliquer l'abondance de certaines molécules en phase gazeuse, à des températures pourtant bien inférieures à leur température de condensation sur les grains. Longtemps estimés comme négligeables dans les conditions astrophysiques, les rendements mesurés ces dernières années à partir de sources UV large bande (lampes à décharges) pour quelques glaces modèles ont révélés des taux de photodésorption de plusieurs ordre de grandeurs supérieurs aux estimations (quelques 10^{-3} molécules/photon). Ce processus pourrait donc jouer un rôle non négligeable dans de nombreuses régions du milieu interstellaire (PDRs, disques protoplanétaires, bord des nuages denses, etc…).

Dans ce projet, nous abordons une étude plus approfondie de ce processus de photodésorption UV par une approche à longueur d'onde variable. Le premier objectif est de mieux caractériser à l'échelle moléculaire le processus de photodésorption. Le second objectif est de déterminer des taux de photodésorption absolu à toute longueur d'onde, permettant sa quantification dans des régions du MIS très différentes. L'étude s'appuie en premier lieu sur la nouvelle expérience de laboratoire sous ultravide *SPICES (Surface Processes and ICES)* dont le développement a été fortement soutenu par PCMI à partir de 2010. De plus, les études à énergie variable sont devenues possibles grâce la brillance exceptionnelle de la ligne de lumière DESIRS dans l'UV (4-40 eV) du centre synchrotron de 3ème génération SOLEIL (St Aubin, France), sur laquelle nous couplons l'ensemble du dispositif SPICES (3 périodes de temps alloués sur SOLEIL depuis 2010 soit environ 350 heures d'utilisation).

Les premières études réalisées avec le dispositif SPICES ont d'abord porté sur la désorption thermique de quelques molécules organiques sur une surface de glace H_2O grâce à l'exploitation simultanée de la ligne la spectroscopie infrarouge de surface (IRTF-RAIRS) sondant la phase solide et la spectroscopie de masse sondant la phase gazeuse. L'étude de la désorption thermique d'isomères de $H_4C_2O_2$ et de H_6C_2O adsorbés sur une glace d'eau amorphe a montré une forte disparité entre les énergies d'adsorption de l'acide acétique CH_3COOH /formiate de méthyle $HCOOCH_3$ (Bertin 2011) et de l'éthanol CH2OCH3OH / dimethyl ether CH_3OCH_3 (col. LERMA, Univ. Cergy). Cet effet s'explique par des géométries différentes de chaque isomère à la surface de l'eau, donnant lieu a différentes liaisons hydrogènes (col LCT, UPMC, Lattelais 2011).

L'expérience *SPICES* ainsi validée a ensuite été exploitée de manière différente pour l'étude de la photodésorption. La mesure des taux de photodésorption engagée en 2010 sur la glace de CO au synchrotron SOLEIL a révélé une très forte variabilité avec la longueur d'onde, l'efficacité variant sur deux ordres de grandeurs entre 7 et 14 eV. Le taux de photodésorption est apparu très faible à 10.2 eV (émission H Lyman-α dominante dans les études précédentes), mais en contrepartie très élevée ($5\ 10^{-3}$ molécule/photon) entre 7 et 9 eV (Fayolle 2011). La progression vibrationnelle dans le spectre de photodésorption prouve que le processus est induit par une transition électronique. Par la suite, le financement par PCMI d'un manipulateur sous vide a permis de tester plusieurs substrats (graphite, or) et d'étudier les effets d'épaisseurs à partir d'échantillons $^{12}CO/^{13}CO$. Ces mesures permettent de conclure que le processus est un processus de « surface » impliquant les couches moléculaires supérieures de l'échantillon (2 à 3) mais que les molécules photodésorbées ne sont pas nécessairement celles ayant absorbées le rayonnement (Bertin 2012). Nous avons mis en évidence le même type de désorption induite par relaxation électronique dans N_2 au dessus de 12 eV (Fillion et al. article en préparation). Les études de glaces mixtes CO/N_2 confirment très clairement le phénomène de transfert d'énergie vibrationnelle aux molécules voisines, démontrant l'importance du rôle de l'environnement moléculaire. En particulier, nous avons découvert que le transfert d'énergie vers le substrat peut être favorisé pour CO (sub-monocouche) adsorbée sur un substrat épais de H_2O, ce qui éteint totalement la photodésorption (Bertin 2011). D'autres campagnes de mesures ont porté sur des mécanismes de désorption impliquant la dissociation moléculaire comme pour O_2 ou H_2O. Plus complexe, cette étude mérite d'être complétée, mais on peut dire que les taux de photodésorption sont plus faibles que ceux déterminés pour CO et N_2, ce qui contredit les études pionnières par lampe à décharge.

A court terme, nous poursuivrons et étendrons l'étude de ces mécanismes pour les systèmes fortement dissociatifs comme H_2O, O_2, CO_2, CH_3OH à l'aide du rayonnement synchrotron. Nous compléterons les études synchrotron par des mesures LASER VUV+UV afin de caractériser l'état quantique et l'énergie des molécules photodésorbées, ce qui est indispensable à la caractérisation complète du processsus. Le financement de PCMI en 2012 a permis déjà de s'engager fortement dans cette voie. Nous espérons ainsi à terme pouvoir dégager les mécanismes principaux et les taux de photodésorption associés pour les glaces interstellaires les plus abondantes.

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

SPICES « Surface Processes and ICES » Dispositif expérimental

5 publications significatives avec titre et référence complète

M. Bertin, E.C. Fayolle, C. Romanzin, K.I. Öberg, X. Michaut, A. Moudens, L. Philippe, P. Jeseck, H. Linnartz, and J.-H. Fillion
"UV photodesorption of interstellar CO ice analogues: from subsurface excitation to surface desorption" Phys. Chem. Chem. Phys. 14, p. 9929-9935 (2012).

E. Fayolle, M. Bertin, C. Romanzin, X. Michaut, K. I. Oeberg, H. Linnartz, and J.-H. Fillion
"CO Ice photodesorption: a wavelength-dependent study"
Astrophysical Journal Letters 739, L36, (2011).

M. Bertin, C. Romanzin, X. Michaut, P. Jeseck , and J.H. Fillion
"*Adsorption of organic isomers on water ice surface: study of acetic acid and methyl formate"*
Journal of Physical Chemistry C 115, p. 12920-12928, (2011). Doi 10.1021/jp201487u

M. Lattelais, M. Bertin, H. Mokrane, C. Romanzin,X. Michaut, ,P. Jeseck , J.-H. Fillion, H. Chaabouni , E. Congiu, F. Dulieu, S. Baouche, J.-L. Lemaire, F. Pauzat, J. Pilmé, C. Minot, and Y. Ellinger
"*Differential adsorption of complex organic molecules isomers at interstellar ice surfaces*"
Astronomy & Astrophysics 532, A12, (2011).

E.C. Fayolle, M. Bertin, C. Romanzin, X. Michaut, K.I. Oberg, H. Linnartz, J.-H. Fillion
"Photodesorption from CO interstellar analogues : a wavelength dependent study
HIGHLIGHTS SOLEIL 2012, p70-71.

Titre du projet: Synthèse de molécules complexes sur des surfaces astrophysiques

Nom du porteur :	Dulieu					Prénom:	Francois
Courrier électronique	Francois.dulieu@obspm.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	LERMA					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	8112					Section(s) CNRS	17 - 04
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	28-30-34
Montant Alloué (k€)		5	7	9			
Financement ANR *							

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
PIIM (CNRS Univ de Provence) (2012)	Theulé P.	***INSIS INP INC***
LPCMR (CNRS UPMC) (2012)	Parent P.	***INC INP***
LPMAA (2010)	Fillion J.H.	***INP***
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	**********
U. Di Catania	***V. Pirronello***	
U. of Strathclyde	***H. Fraser***	

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours...

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

Notre équipe d'astrophysique expérimentale cherche à répondre à la question suivante, **"Jusqu'où peut-on faire croitre la complexité moléculaire, sans apport extérieur d'énergie ?"**
et s'inscrit au cœur de la communauté PCMI, en particulier la thématique « *Spectroscopie et processus physico-chimiques* ».

Pour ce faire nous avons développé depuis une dizaine d'années, un dispositif expérimental unique (FORMOLISM) dédié à la problématique de catalyse hétérogène sur des surfaces à très basse température. Durant la période 2009-2012, nous avons réalisé, avec le soutien de PCMI, les progrès technologiques suivants :
i) la maîtrise de la spectroscopie infrarouge sur les surfaces
ii) le contrôle des jets atomiques et moléculaires : O, O_3 et N.
ii) nous avons également diversifié les surfaces d'études ajoutant à la glace d'eau, les silicates amorphes et le graphite.

Dans les 3 dernières années, notre équipe a participé à l'essor international de la discipline. Le nombre de molécules synthétisées sur des surfaces froides d'intérêt astrophysique dépasse la vingtaine alors qu'il n'était que d'un il y a dix ans, et trois il y a cinq ans. En particuliers nous avons été pionniers dans la découverte de la synthèse de l'eau (F. Dulieu et al. 2010) et avons contribué au débat sur la formation du dioxyde de carbone (Noble et al. 2011) et proposé la synthèse de l'hydroxyle amine (Congiu et al. 2012), entre autres molécules parmi lesquelles H_2, O_2, O_3, NO_2, N_2O...

Mais si l'on veut contrôler les cinétiques pour favoriser certaines des voies réactionnelles, c'est l'ensemble de la microphysique de ces systèmes qu'il faut étudier en détail. Les avancées rapides et la découvertes de nouvelles molécules « étapes finales » comme le méthanol, aboutissement de l'hydrogénation du CO, ne mèneront pas plus loin, si l'on ne sait pas identifier les « puits chimiques », et si l'on ne comprend pas pourquoi et comment les contourner, toujours en prenant garde à le faire en respectant les contraintes liées aux conditions astrophysiques.
Notre objectif scientifique est donc, au delà de la synthèse de nouvelles molécules, de tenter d'isoler l'importance de chacun des mécanismes physico-chimiques qui peuvent jouer un rôle sur les surfaces froides, notamment la diffusion qui a une influence directe sur les cinétiques de réaction (Noble et al. 2012) , la désorption, les

échanges isotopiques et la conversion de spin nucléaire (Chehrouri et al 2011) qui sont autant de contraintes à appliquer aux observations.
Les points suivants ont en particuliers été l'objet d'au moins une publication dans la période 2009-2012 :

- Les effets isotopiques et isomériques sur la désorption des molécules (2 articles)
- Les processus de conversion de spin de H_2 et D_2 à la surface de la glace (1 article, 1 soumis)
- Le rôle de la diffusion en surface et en volume (1 article, 1 soumis)
- L'importance de la morphologie des surfaces dans la désorption des espèces (3 articles)
- Les mécanismes de formations et notamment les processus de diffusion-réaction et de désorption chimique (2 articles et un soumis)
- Le collage de l'hydrogène sur des surfaces de glace et de silicates (2 articles)
- L'impact sur la morphologie de la glace de l'énergie chimique libérée (1 article, 1 soumis)

Nous sommes en train de développer un second dispositif expérimental (VENUS) complémentaire au premier, qui devrait nous permettre de proposer des expériences impliquant des mélanges à 3 et même 4 réactifs. Nous espérons, après avoir séparément étudié la chimie de H, O seuls, de O et H, de N et O, de C et O, mélanger les espèces pour obtenir des espèces organiques complexes.

Avec 4 équipes (2 à l'UPMC, 1 à Marseille) participants à cette thématique émergente, la communauté PCMI a été l'un des contributeurs majeur sur le plan international au cours de ces 3 dernières années.

Nom de l'expérience: FORMOLISM, pour Formation of Molecules in the Interstellar Medium

5 publications significatives avec titre et référence complète

Chehrouri, M. et al., 2011. Nuclear spin conversion of molecular hydrogen on amorphous solid water in the presence of O-2 traces. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 13(6), p.2172-2178.

Congiu, Emanuele et al., 2012. NO ICE HYDROGENATION: A SOLID PATHWAY TO NH2OH FORMATION IN SPACE. *The Astrophysical Journal*, 750(1), p.L12.

Dulieu, F. et al., 2010. Experimental evidence for water formation on interstellar dust grains by hydrogen and oxygen atoms. *Astronomy & Astrophysics*, 512.

Noble, J.A. et al., 2011. CO_2 FORMATION IN QUIESCENT CLOUDS: AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE CO plus. *Astrophysical Journal*, 735(2).

Noble, J.A. et al., 2012. The desorption of H_2CO from interstellar grains analogues. *Astronomy & Astrophysics*, 543, p.A5.

Titres des projets: Regions de Formation Stellaire Galactiques et Extragalactiques ; Spectroscopie VUV de CO et de ses Isotopologues ; FORMOLISM: Formation De Molecules Dans Le Milieu Interstellaire

Nom du porteur :	LEMAIRE					Prénom:	Jean Louis
Courrier électronique	Jean-louis.lemaire@obspm.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	**LERMA Observatoire de Paris**					Institut Principal de rattachement CNRS	**Observatoire de PARIS**
Code (ex: UMR1111)	**UMR 8112**					Section(s) CNRS	**17**
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	**34**
Montant Alloué (k€)	**1**		**2**				
Financement ANR *	**2007**	**X**	**X**				

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant aux projets (Noms et Adresses)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
Spectroscopie de CO UPMC, Paris 06 and CNRS	**PI: JL Lemaire**	UMR 7092
Partenaires Etrangers	*Responsable Projet*	----------
Spectroscopie de CO University of Toledo, USA; , Wellesley College, USA; UPMC, Paris 06 and CNRS, UMR 7092; UCLA, USA; Harvard, USA; Synchrotron SOLEIL (DESIRS)	**PI: JL Lemaire**	
FORMOLISM University of Syracuse, USA; "LASSIE"* European contract	**PI: JL Lemaire**	
Observation de H2 dans l'ISM University of Syracuse, USA ; University of Aahrus, DK; "LASSIE"* European contract	**PI: JL Lemaire**	

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours...

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

Photoabsorption Cross Sections of CO Isotopologues for Astrophysical Purposes

The photochemistry of CO and its isotopologues plays a fundamental role in proto-stellar environments, photon-dominated regions of interstellar clouds, circumstellar shells surrounding stars nearing the end of their lives, planetary nebulae, circumstellar disks around young stars, and comets. One of the key processes controlling the CO abundance and the ratios of its isotopologues is photodissociation. Theoretical models of interstellar regions (e.g., van Dishoeck 1988; Sternberg 1995; Visser 2009) incorporate basic quantitative spectroscopic data on CO transitions to extract physical conditions. The precision and scope of recent far UV observations with the Hubble Space Telescope (e.g., Burgh 2007, Sonnentrucker 2007, Sheffer 2007, 2008) and of infrared observations (Smith 2009) require significantly improved spectroscopic models for their interpretation. A wealth of new information is now coming from the STIS-COS instruments installed aboard the HST mission.

Accurate oscillator strengths for dissociating transitions (Federman 2001, Sheffer 2003, Eidelsberg 2004, 2006) and accurate predissociation rates for Rydberg transitions are needed for modelling the photodissociation process. Isotopic variations in line strengths and line widths have to be carefully studied as they may lead to shielding effects that could modify the penetration of the radiation inside a molecular cloud. The present proposal continues the collaboration started in 2009 by our two research teams: the Paris-Meudon/Toledo group and the Wellesley/UCLA/Harvard/ANU group. Our collaboration has included joint measurements on the DESIRS beamline in 2009 and 2010 as well as an ongoing joint analysis effort. Our goal is to produce a comprehensive CO database – composed of f-values and predissociation rates, and their rotational dependences, for the dipole-allowed bands in the 90–115 nm region for all relevant CO isotopologues – that will inform the interpretation of astrophysical observations and models. Our measurements also have a wider applicability in that they are critical inputs to the development of molecular modelling efforts aimed at unraveling the complex spectroscopy of CO. All the data obtained will be compiled in public databases which provide VUV spectra of small molecules, allowing the calculation of synthetic spectra starting from line lists and from molecular models.

To date, we have measured high resolution absorption spectra of $^{12}C^{16}O$, $^{12}C^{18}O$, $^{13}C^{16}O$ and $^{13}C^{18}O$ throughout the 90–115 nm region. The bands in this region display a wide range of strengths, line widths, and rotational contours. At the longest wavelengths, transitions to low-v vibrational levels of three Rydberg states ($B^1\Sigma^+$, $C^1\Sigma^+$, $E^1\Pi$) are prominent. Below 100 nm, the spectrum becomes progressively more congested and complex as additional excited electronic states are accessed. There are striking variations in line widths from band to band, with some bands exhibiting unusually diffuse structures and others appearing sharp at the highest spectral resolutions studied in the laboratory. Line strengths and line widths are strongly affected by isotopic substitution throughout this spectral region. Our measurements have been tailored to capture as much of the varied spectroscopic information as possible, and for the above isotopologues are now nearing completion. In the next proposal we identify three remaining tasks.

We also describe a set of complementary measurements of selected $^{13}C^{16}O$ A–X bands (v=0 to 9; 130-150 nm range) that will be soon ready for publication.

FORMOLISM

L'objet scientifique principal prévu pour achever les contrats ANR (2011) et SESAME (2013) est l'étude de la formation de molécules sur des surfaces sèches (c'est-à-dire non couvertes de glaces) de matière silicée (silicates de différents types et nature ainsi que silicène) ou carbonée (de type graphite et graphène). La poursuite de ces objectifs nécessite bien, outre la fabrication de ces surfaces, leur caractérisation précise (composition stœchiométrique, nature cristalline ou amorphe, état de surface ….) par différents diagnostics de la physique des solides (AFM, STM, PES, LEED, Auger …).

L'objectif de fabrication est réalisé dans le cadre de coopérations "**LASSIE**"* avec des laboratoires spécialisés dans ce domaine. C'est ainsi que nous avons une collaboration déjà active avec le Prof. C Jäger du laboratoire MPG (Max *Planck* Gesellschaft) de Jena (Allemagne) pour l'élaboration de deux types de silicates, chacun sous forme amorphe et cristalline. Pour l'un de ces échantillons la forme cristalline a été traitée par une collaboration avec un laboratoire universitaire japonais. En ce qui concerne les diagnostics, certains peuvent être effectués à Jena, mais d'autres devront être réalisés par nos propres moyens (AFM, TPD ….) ainsi qu'en collaboration avec le laboratoire ISMO à Orsay (STM, LEED, Auger …), qui gère également un des 4 doctorants ESR **LASSIE** (M. Tchalala, co-dir. thèse H Oughaddou), d'une part aussitôt après la fabrication mais également à intervalles de temps réguliers pour suivre l'évolution éventuelle des surfaces après les expériences. Appel devra aussi être fait au rayonnement synchrotron (PES) dans le cadre de demandes de temps machine communs. Le Prof. Brucato, qui a déjà collaboré par le passé avec le Prof. Vidali, du laboratoire d'Arcetri (Florence, Italie) est également impliqué dans la fabrication d'échantillons de silicates par un procédé différent du procédé allemand.

Le programme scientifique principal porte sur la formation de la molécule d'hydrogène (H_2) sur ces différentes surfaces de silicates. C'est là qu'intervient notre collaboration avec le Prof. Vidali que nous souhaitons inviter à nouveau sur la période 2012-2013. Cela est facilité d'une part par le fait qu'il vient de bénéficier d'une autorisation d'absence pour période sabbatique et d'autre part parce qu'il apprécie à sa juste valeur les potentialités quasi uniques au monde du dispositif expérimental FORMOLISM que j'ai créé à l'université de Cergy-Pontoise. Trois mois d'invitation (et de financement) seront nécessaires pour accueillir le Prof. Vidali. Il est également prévu que soit impliquée pour ces travaux, par échange de bon procédé, la doctorante **LASSIE** de Jena.

Nos travaux sur les silicates ont deux implications complémentaires. L'une, sur laquelle une autre équipe liée à PCMI a la compétence requise pour comprendre et interpréter nos résultats expérimentaux, porte sur la modélisation théorique des interactions entre les atomes (et les molécules) avec des surfaces modélisées de silicates, grâce aux méthodes de chimie quantique. Ce travail a débuté dans le cadre d'une collaboration entre les théoriciens de l'Observatoire de Paris-Meudon (Dr. A Spielfiedel et Dr. N Feautrier), l'université Paris VI (Prof. L Tchang-Brillet) et l'université de Tunis (co-dir. thèse B Kerkeni) avec la participation en cotutelle d'une doctorante ESR du contrat **LASSIE** (I. Oueslati). Des théoriciens du laboratoire ISMO (qui étaient aussi nos partenaires dans le cadre du contrat ANR précité et aussi participants PCMI) ont également commencé à s'intéresser à ces problèmes théoriques par d'autres méthodes. Nous serons aussi impliqués dans ces travaux qui viennent en support de nos expériences.

Du temps obtenu en 2011 sur le synchrotron SOLEIL pour tester la possibilité de sonder les états quantiques rovibrationnellement excités de H_2(v",J") à l'aide du rayonnement synchrotron au lieu du rayonnement laser utilisé jusqu'à présent au laboratoire (2 ans d'expérience avec le laser seraient possibles en 2 mois au synchrotron!) a été perdu suite à une panne du détecteur du dispositif annexe utilisé. Du temps obtenu à nouveau en 2012 a été gâché "grâce" à l'interdiction qui m'a été faite (par F Dulieu et le directeur du LERMA) d'utiliser à nouveau ce matériel que j'avais construit il y a quelques années à Meudon et qui est complètement indépendant de FORMOLISM.

Ce thème restera en plein développement pour autant que je ne sois pas exclu (ainsi que mon étudiante et donc tous les collaborateurs annoncés) de l'accès au dispositif expérimental FORMOLISM que j'ai pourtant imaginé, construit puis amélioré après avoir obtenu les financements nécessaires, financements qui sont pourtant maintenant en partie détournés de leurs objectifs initiaux.

* **LASSIE**: *Laboratory Astrochemistry Surface Science In Europe, FP7-ITN Marie Curie grant agreement #238258 (2010-2014) incluant 13 laboratoires de 9 pays). PI: M. McCoustra (UK). CoI pour l'Observatoire de Paris: JL Lemaire*

H_2 in the ISM

Les expériences de laboratoire réalisées dans des conditions très simplifiées avec FORMOLISM sont complétées par des observations astronomiques, en particulier celles des régions où est observée l'émission de l'hydrogène moléculaire rovibrationnellement excité. La compréhension des observations passe en effet par des modélisations nécessitant des données physico-chimiques de base.

Ainsi je viens d'obtenir (en collaboration internationale avec D. Field, G. Vidali et L. Gavilan -ESR-PhD **LASSIE**) du temps en 2012 sur un des télescopes VLT (ESO Chili) pour observer des régions particulières dans lesquelles l'émission de H_2 est supposée, par des travaux de modélisation théorique du milieu interstellaire, ne résulter que du seul processus de formation de H_2 dans un état excité à la surface des grains interstellaires. En effet dans les régions de formation stellaire, cette émission est de manière générale le résultat combiné de l'excitation par des chocs, de l'effet du rayonnement UV de l'étoile naissante et de la formation sur les grains, ce dernier processus étant souvent caché par les 2 premiers. La présence de rayonnement X dans les nébuleuses planétaires pourrait jouer un rôle dans le processus de dissociation/formation de H_2.

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

FORMOLISM, Synchrotron SOLEIL, VLT (UT3, UT4)….

5 publications significatives avec titre et référence complète

M. Eidelsberg, J. L. Lemaire, S. R. Federman, G. Stark, A. N. Heays, Y. Sheffer, L. Gavilan, J.-H. Fillion, F. Rostas, J. R. Lyons, P. L. Smith, N. de Oliveira, D. Joyeux, M. Roudjane, and L. Nahon
High-resolution study of oscillator strengths and predissociation rates for $^{12}C^{16}O$: W-X bands and Rydberg complexes between 92.9 and 93.4 nm **Astronomy & Astrophysics, (2012) 543, A69**

L. Gavilan, J. L. Lemaire and G. Vidali, *Are molecule-covered dust grains efficient catalysts of H2 formation in the cold ISM?* **Mon. Not. R. Astron. Soc., (2012) 424, 2961**

E. Congiu, G. Fedoseev, S. Ioppolo, F. Dulieu, H. Chaabouni, S. Baouche, J. L. Lemaire, C. Laffon, Ph. Parent, T. Lamberts, H. M. Cuppen, and H. Linnartz, *NO-ice hydrogenation: a solid pathway to NH_2OH formation in space* **The Astrophysical Journal Letters, (2012) 750, L12**

J. L. Lemaire, G. Vidali, S. Baouche, M. Chehrouri, H. Chaabouni, and H. Mokrane, *Competing mechanisms of molecular hydrogen formation in conditions relevant to the interstellar medium,* **The Astrophysical Journal Letters, (2010) 725, L156**

G. TESTOR, J.L. LEMAIRE, M. HEYDARI-MALAYERI, L.E. KRISTENSEN, S. DIANA, D. FIELD, *VLT/NACO near-infrared imaging and spectroscopy of N88A in the SMC,* **Astronomy & Astrophysics, (2010) 510, 95**

Titre du projet: Etude expérimentale en phase gazeuse de cinétiques de collisions de 6 à 500 K

Nom du porteur :	CANOSA / LE PICARD					Prénom:	André / Sébastien
Courrier électronique	andre.canosa@univ-rennes1.fr --- sebastien.le-picard@univ-rennes1.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	Institut de Physique de Rennes Campus de Beaulieu – Bât 11C Univ. Rennes 1, 35042 RENNES Cedex					Institut Principal de rattachement CNRS	INP
Code (ex: UMR1111)	UMR6251					Section(s) CNRS	4
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	30
Montant Alloué (k€)	23	28	28	22			
Financement ANR *				x			

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
Ec. Nat. Sup. de Chimie de Rennes	*J.C. Guillemin*	*INC*
Inst. Sc. Molec., Univ. de Bordeaux	*M. Costes*	*INC*
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	----------
Université de Perugia	*P. Casavecchia*	
Université Hawaii	*R. Kaiser*	
Université de Floride	*A. Mebel*	
Université Argonne	*S. Klippenstein*	

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

La compréhension des abondances des molécules observées dans le milieu interstellaire (MIS) passe par la connaissance des processus réactionnels sur une large gamme de températures (7 K - > 1000 K). Grâce à des techniques expérimentales originales nous effectuons des études de cinétique de collisions réactives ou inélastiques en phase gazeuse entre 15 et 500 K. Entre 2009 et 2012, les travaux d'intérêt astrophysique ont concerné les réactions radical-molécule, les processus de dimérisation et les réactions anion-molécule.

Un certain nombre de travaux effectués sur la période précédente ont été publiés à partir de 2009. Tout d'abord, une étude sur la **nucléation** du pyrène (60 K – 235 K) et de l'anthracène (60 et 80 K); (Sabbah et al. *J. Phys. Chem. Lett.* 1(17) 2962 (2010); L. Biennier *et al.*, *A&A,* 532, A40 (2011)). Ce travail, soutenu par des calculs théoriques de S. Klippenstein, indique que la dimérisation ne peut avoir lieu de façon significative au-delà de 235 K pour le pyrène. Il est important de noter que ce résultat remet en cause le modèle de formation de particules carbonées de Frenklach utilisé pour la modélisation des enveloppes circumstellaires.

Les travaux sur **C_4H** réalisés en 2006 ont fait l'objet de 2 publications supplémentaires en collaboration avec N. Balucani (Univ Perugia, It.). La première porte sur les hydrocarbures saturés et la seconde traite d'hydrocarbures insaturés ((Berteloite et al. *PCCP*, 12, (15), 3666 (2010) et *PCCP*, 12, (15), 3677 (2010)). Outre les dépendances en température des coefficients de vitesse, nous y discutons des voies de sortie les plus probables.

Les travaux sur la réactivité de **CN** avec différents hydrocarbures du commerce (1,3 butadiène et butyne (C_4H_6), propène (C_3H_6), propane (C_3H_8), phénylacétylène (C_6H_5CCH) ont fait l'objet de 3 publications (C.J. Bennett, et al. *PCCP,* 12[31], 8737 (2010), S. Morales et al. *Faraday Discuss.,* 147, 155 (2010) et *Ap J.,* 742[1], 26 (2011). Dans tous les cas la réactivité demeure rapide. Cependant une faible barrière d'activation est observée pour le 1,3 butadiène. En complément, des études en faisceaux moléculaires par R. Kaiser (Univ. Hawaï) et des calculs de dynamique moléculaire par A. Mebel (Univ. Floride) ont permis de déterminer les voies de sortie: $C_5H_5N + H$ où deux isomères sont possibles: le 1-cyano-1,3-butadiène (>94%) et la pyridine (0.1-6%). Concernant le but-1-yne aucune dépendance en température n'est observée. La réaction impliquant le propène augmente avec la température indiquant un mécanisme sans barrière d'activation. Enfin la cinétique du propane présente un minimum réactif autour de la température ambiante. Un tel comportement pourrait s'expliquer par la présence d'une barrière de potentiel submergée dans la partie courte portée de la surface de potentiel.

L'étude de réactifs à synthétiser a également commencé récemment. Il s'agit des réactions CN ; **C_2H** + HC_3N et C_4H_2. Leur synthèse a pu s'effectuer avec l'aide de J.C. Guillemin (ENSC Rennes). Les travaux ont été menés entre 23 et 300 K. Plusieurs articles sont en préparation.

Nous avons étudié la réaction **$S(^1D) + H_2$** qui peut jouer un rôle significatif dans les disques protoplanétaires au sein desquels $S(^1D)$ peut avoir une durée de vie radiative suffisante pour que sa disparition se fasse plutôt par réaction avec H_2. Nos mesures ont montré que la vitesse de disparition de $S(^1D)$ est rapide sur la gamme 6 – 300 K. Des travaux complémentaires en faisceaux croisés à Bordeaux et des calculs théoriques effectués par JM Launay à Rennes s'avèrent en bon accord avec nos observations (Berteloite et al., *PRL*, 105[20], 203201 (2010)).

La découverte récente des premiers anions dans l'espace interstellaire et dans l'atmosphère de Titan a suscité une forte excitation dans la communauté astrophysique. En utilisant la chambre FALP-MS (écoulement de post décharge) nous avons mesuré le coefficient de vitesse de la réaction de **CN^-** en présence de cyanoacétylène HC_3N à 300 K. Notre résultat, $k=4.8\times10^{-9}$ $cm^3molec^{-1}s^{-1}$ est en excellent accord avec les calculs de Su et Chesnavitch. (Carles et al., *Icarus,* 211[1], 901 (2011)). L'étude cinétique de cette réaction et celle avec NH_3 sont en cours à partir du réacteur CRESU (résultats préliminaires entre 50 et 200 K). Une source d'ions est en cours de conception; elle permettra notamment de nous donner accès aux rapports de branchements des réactions ion-molecule à basse température, données cruciales et très souvent inexistantes.

La réaction **$F(^2P) + H_2 \rightarrow HF + H$**, est une réaction clé dans la chimie du fluor dans le milieu interstellaire en particulier comme source de HF (réservoir principal de F). Elle est aussi étudiée très activement par les théoriciens en raison de la très faible barrière d'énergie que comporte sa surface de potentiel. Expérimentalement, l'originalité consiste ici à suivre l'apparition du produit (H). Les atomes H sont détectés par fluorescence induite à partir de leur excitation à 121.6 nm. Les expériences ont été réalisées entre 295 K et 6 K et sont en très bon accord avec des calculs quantiques de haut niveau réalisés par F. Lique, M. Alexander et leurs collaborateurs. Une publication est en cours de rédaction.

Un travail est en cours afin de mesurer entre 20 et 500 K, le coefficient de vitesse de **dimérisation de l'eau**, $H_2O + H_2O + M \leftrightarrows (H_2O)_2 + M$, ainsi que la cinétique des premières étapes de sa nucléation homogène en phase gazeuse, et cela sur une gamme de températures s'étendant de 20 à 500 K. Outre l'intérêt fondamental d'une telle étude, elle pourra trouver des applications dans les modèles de chimie des disques protoplanétaires.

Sur la période, le développement de la tuyère à gaz pulsé a été achevé, validé et fait l'objet d'un dépôt de brevet. Cette avancée technologique a ouvert la voie à un nouveau projet visant à coupler un réacteur CRESU transportable au synchrotron SOLEIL afin d'y effectuer des études sur les produits de réactions à basse température (projet soutenu par l'ANR; CRESUSOL, 2012-2015). Nous venons d'obtenir une seconde ANR (HYDRIDES) en collaboration avec nos collègues de Grenoble, du Havre et de Bordeaux, qui porte sur la réactivité et les transferts d'énergie par collision des hydrures. Elle a commencé fin 2012 pour 4 ans. Dans le cadre d'une étude d'intérêt atmosphérique ($OH + O_2 \leftrightarrows HO_3$), nous avons aussi développé une tuyère de Laval à température variable opérant entre 50 et 100 K dans un mélange Ar/N_2 dont le rapport de mélange détermine la température de fonctionnement. Enfin une cellule cryogénique a été construite pour des études concernant les réactions lentes inabordables en écoulement CRESU. Utilisée pour l'instant pour des applications atmosphériques, elle peut néanmoins permettre des études radical–H_2.

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

Dispositif Expérimental **CRESU** (**C**inétique de **R**éaction en **E**coulement **S**upersonique **U**niforme)

5 publications significatives avec titre et référence complète

C. Berteloite, M. Lara, A. Bergeat, S.D. Le Picard, F. Dayou, K.M. Hickson, A. Canosa, C. Naulin, J.M. Launay, I.R. Sims, and M. Costes "*Kinetics and dynamics of the $S(^1D_2) + H_2$ reaction at very low temperatures and collision energies*" Phys. Rev. Lett., 105[20], 203201 (2010).

H. Sabbah, L. Biennier, I.R. Sims, B.R. Rowe, and S.J. Klippenstein "*Exploring the role of PAHs in the formation of soot: pyrene dimerization*" Journal of Physical Chemistry Letter, 1[17], 2962-2967 (2010).

C. Berteloite, S.D. Le Picard, N. Balucani, A. Canosa, and I.R. Sims "*Low Temperature Rate Coefficients for Reactions of the Butadiynyl Radical, C_4H, with Various Hydrocarbons. Part II: Reactions with Alkenes (ethylene, propene, 1-butene), Dienes (allene, 1,3-butadiene) and Alkynes (acetylene, propyne and 1-butyne)*" PCCP, 12[15], 3677-3689 (2010).

S. Carles, F. Adjali, C. Monnerie, J.C. Guillemin, and J.L. Le Garrec "*Kinetic studies at room temperature on the cyanide anions CN^- with cyanoacethylene (HC_3N) reaction*" Icarus, 211[1], 901-905 (2011).

S. Morales, C.J. Bennett, S.D. Le Picard, A. Canosa, I.R. Sims, B.J. Sun, P.H. Chen, A.H.H. Chang, V.V. Kislov, A.M. Mebel, X. Gu, F. Zhang, P. Maksyutenko, and R.I. Kaiser "*A Crossed Molecular Beams, Low Temperature Kinetics, and Theoretical Investigation of the Reaction of the Cyano Radical (CN) with 1,3-Butadiene (C_4H_6) - A Route to Complex Nitrogen-Bearing Molecules in Low Temperature Extraterrestrial Environments*" Astrophys. J., 742[1], 26 (2011).

Titre du projet: Fragmentation de molécules hydrocarbonées électroniquement excitées

Nom du porteur :	CHABOT					Prénom:	Marin
Courrier électronique	chabot@ipno.in2p3.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	Institut de Physique Nucléaire Université Paris Sud 91406 ORSAY cedex					Institut Principal de rattachement CNRS	IN2P3
Code (ex: UMR1111)	UMR8608					Section(s) CNRS	01
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	
Montant Alloué (k€)				5			
Financement ANR *							

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
Institut des Sciences Moléculaires d'Orsay	Karine BEROFF	INP
Institut de recherche en Astrophysique et Planétologie Toulouse	Arnaud LePadellec	INSU
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	----------

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

Fragmentation de molécules hydrocarbonées électroniquement excitées.

La chimie dans le milieu interstellaire est partiellement gouvernée par la création de molécules électroniquement excitées. Notre projet concerne l'étude du devenir de ces états excités, en particulier le processus de fragmentation. Il s'inscrit dans les efforts menés par la communauté d'astrochimie pour se doter de données fiables en ce qui concerne les rapports de branchement de dissociation des molécules excitées, en relation avec la base de données KIDA (KInetic Data Base for Astrochemistry) à la constitution de laquelle l'équipe contribue [Wakelam et al ApJ (2012)].

Le dispositif expérimental est le dispositif AGAT, installé à demeure à l'accélérateur Tandem d'Orsay. Ce dispositif dédié repose sur l'utilisation de la cinématique inverse (l'objet d'étude est l'objet accéléré). Après collision sur une cible atomique au repos la molécule incidente électroniquement excitée fragmente et l'ensemble des fragments sont récoltés et identifiés [Martinet et al PRL (2004)]. Ce dispositif est en constante évolution, en particulier au niveau de la détection. Les détecteurs « à reconnaissance de forme » permettent une identification de la masse des fragments incidents ; nous avons récemment utilisé sur certains fragments des détecteurs sensibles en position, galettes pour le fragment H+ [Béroff et al PRA (2011)] et surtout caméra CCD pour les fragments neutres. Cette caméra, commercialisée par Hamamatsu pour la détection de rayons X, a été ici utilisée pour la détection de particules lourdes (fragments) avec un grand succès [Chabot et al RSI (2012)]. Cette caméra a été financée en partie par le programme CSAA INSU-CNRS en 2010. En 2012 des crédits (5kE) ont été demandés à PCMI et obtenus pour le trigger de cette caméra. Des tests auront lieu prochainement.

Résultats :
La fragmentation de petits hydrocarbures $C_nH(+)$ (n=1-4) et $C_3H_2(+)$ a été mesurée [Tuna et al JCP (2008)] ainsi que, plus récemment, l'énergie cinétique du fragment H+ émis lors de la dissociation [Béroff et al PRA (2011)].

Modèle statistique :

Alors que les mesures sur AGAT simulent le rôle des cosmiques, nous avons pu observer que les rapports de branchement obtenus étaient très proches de ceux obtenus en photodissociation ou en recombinaison dissociative [Tuna et al Mol.in Space and Laboratory (2007)]. Ceci s'explique par une fragmentation statistique et des dépôts d'énergie induits par ces différents rayonnements proches. Des rapports de branchement de dissociation pour les $C_n(+)$, $C_nH(+)$ et $C_3H_2(+)$ excités par ces différents rayonnements (cosmiques, photons UV et électrons de basse énergie) ont été proposés et leur introduction dans les modèles d'évolution de différents milieux astrophysiques (PDR, nuages denses et froids) étudiés [Chabot et al A&A (2010)]. Ces rapports de branchement ont été par ailleurs expertisés et intégrés dans la base KIDA.
Plus récemment nous travaillons à la prédiction de rapports de branchement de dissociation statistique pour de nombreux autres processus (ion-molécule, neutre-neutre) associés à un dépôt d'énergie quelconque (en cours).

Perspectives:
Après les $C_nH(+)$ nous souhaitons mesurer la série des $C_nH_2(+)$. Par ailleurs des mesures de recombinaison dissociative utilisant nos détecteurs auprès de l'anneau de stockage Langzhou (Chine) sont prévues. Toutes ces mesures permettront de compléter les bases et d'affiner nos modèles

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

Dispositif expérimental AGAT

5 publications significatives <u>avec titre et référence complète</u>

1-Statistical universal branching ratios for cosmic ray dissociation, photodissociation, and dissociative recombination of the $C_{n=2-10}$, $C_{n=2-4}H$ and C_3H_2 neutral and cationic species
M.Chabot, T.Tuna, K.Béroff et al, A&A 524, A39 (2010)

2-Fragmentation of multiply charged hydrocarbon molecules C_nH^{q+} (n<5, q<10) produced in high-velocity collisions: branching ratios and kinetic energy release of the H^+ fragment
K.Béroff, N.T.Van-Oanh, M.Chabot et al PRA 84, 032705 (2011)

3-Detection of atomic and molecular mega-electron-volt projectiles using an X-ray charged coupled device camera
M.Chabot, G.Martinet, K.Béroff et al Review of Scient. Instr. 82, 103301 (2011)

4-A Kinetic Database for Astrochemistry (KIDA)
V.Wakelam, E.Herbst, JC.Loison et al
The Astrophysical Journal Supplement Series 199 :21, March (2012)

Titre du projet: CoSpiNu

Nom du porteur :	MICHAUT					Prénom:	Xavier
Courrier électronique	Xavier.Michaut@upmc.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	LPMAA, Université Pierre et Marie Curie, Barre 32-33 3ème étage, Case courrier 76, 4 Pl. Jussieu 75252 Paris					Institut Principal de rattachement CNRS	INP
Code (ex: UMR1111)	UMR7092					Section(s) CNRS	04
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	30
Montant Alloué (k€)	8**						
Financement ANR *	x						

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

**: + 8 k€ du PNP

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
LABORATOIRE PHLAM UMR CNRS 8523 USTL Bât. P5 59655 Villeneuve d'Ascq cedex	***Patrice Cacciani***	***INP***
LABORATOIRE PIIM UMR CNRS 7345 Université Aix Marseille 1 Centre de St-Jérôme case 242 Avenue Escadrille Normandie-Niémen 13397 Marseille cedex 20	***Céline Martin***	***INSIS***
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	**********

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme

L'année 2009 a marqué la fin du financement par les programmes PCMI et PNP du projet CoSpiNu engagé en 2004. Ce projet concernait l'étude de la conversion de spin nucléaire à basse température de petites molécules hydrogénées d'intérêt astrophysique (H_2O, H_2CO, NH_3,…) en vue d'apporter des éléments d'explication aux déséquilibres observés dans les coma de comètes et le milieu interstellaire.
La dernière année de ce projet a permis d'initier une collaboration tripartite entre le LPMAA-Paris, le PhLAM-Lille et le PIIM-Marseille qui s'est cristallisée depuis dans le cadre du projet ANR GASOSPIN (09-BLAN-0066-01).

Notre objectif était de déterminer les conditions physiques et les temps caractéristiques de rééquilibration des états de spin nucléaires de petites molécules hydrogénées dans des conditions de températures et de pressions proches des milieux astrophysiques. Pour ces études, il est nécessaire d'avoir des outils de diagnostics des populations des états de spin nucléaire en phase gazeuse ou l'interface solide-gaz. Dans ce sens, nous avons développé des mesures par spectroscopie infrarouge par transformée de Fourier (IRTF) au LPMAA et au PIIM et par diode laser (CEAS) au PhLAM. Ces diagnostics sont utilisés pour caractériser le comportement des molécules dans des chambres de mesures sous vide couplées à un ensemble cryogénique ou dans des expériences dédiées à la création de déséquilibres en phase vapeur.

Le financement de PCMI a permis d'implémenter des diagnostics sur les expériences au LPMAA, de compléter l'équipement laser du PhLAM et de favoriser les missions au sein du consortium LPMAA-PhLAM-PIIM et à l'étranger. Le dispositif CoSpiNu du LPMAA permet de caractériser la dynamique de rééquilibration des états de spin nucléaire de molécules hydrogénées dans des matrices de gaz rare entre 4 et 20 K et des mesures de spectroscopie en phase gazeuse. Le dispositif diode laser du PhLAM qui permet de faire des mesures rapides dans une gamme spectrale étroite a été couplé à une cellule multi-passage refroidie jusqu'à 12 K.

A partir de ces différents équipements financés en partie par PCMI et l'ANR, nous avons pu améliorer notre compréhension des mécanismes de conversion de spin nucléaire de molécules piégées dans des matrices de gaz

rare (Thèse Pardanaud 2004-2007, Thèse Lekic 2007-2011, article [1].) Ces systèmes ont permis de mettre en évidence l'importance des mécanismes de relaxation d'énergie au sein de l'environnement cristallin sur la dynamique de conversion à très basse température. Dans le même temps, nous avons pu caractériser l'influence des interactions magnétiques intermoléculaires. L'observation d'effets de rééquilibration rapides en phase condensée (article [1]) est cohérente avec les effets de conversion rapides prévus en phase gazeuse (articles [2] et [3]). Nous travaillons actuellement au PIIM et au LPMAA à la caractérisation de l'influence du rayonnement IR ou UV sur ces effets de conversion dans ces milieux modèles.

En vue de comprendre ces mécanismes dans des environnements proches de ceux rencontrés dans l'espace, nous nous sommes orientés vers deux approches. La première consiste à déterminer l'évolution des rapports de populations de spin nucléaire à l'équilibre solide-gaz pour des températures inférieures à 50 K. Cette mesure est rendue très difficile par le fait que les pressions de vapeur saturante des molécules pertinentes (CH_4, NH_3, H_2O,…) chutent brutalement d'où la nécessité de développer des techniques de spectroscopies en phase gazeuse à très haute résolution et avec des longueurs de parcours importantes. Deux techniques sont utilisées : la technique diode laser qui a été développée la première par l'équipe du PhLAM-Lille (article [5]) et la technique par transformée de Fourier qui est en cours de développement au LPMAA. La deuxième approche consiste à mesurer les populations de spin nucléaire au dessus d'une surface de glace au moment de la désorption. Nous avons effectué une première série d'expériences sur le dispositif *FORMOLISM* (collaboration avec le LERMA, équipe astrophysique de laboratoire). Nous avons démontré pour la première fois que le temps caractéristique de conversion de spin de l'hydrogène moléculaire de H_2 sur une surface de glace dépend beaucoup des impuretés présentes en surface et en particulier de la présence de l'oxygène moléculaire [4]. Les temps caractéristiques mesurés sont bien supérieurs aux temps pris dans les modèles pour simuler les régions du milieu interstellaire dominés par les photons. Nous travaillons maintenant à la mesure des états quantiques de spin de H_2 directement sur la glace sur le dispositif SPICES développé depuis 2010 pour la mesure des effets de photodésorption UV (voir fiche bilan projet « Photo-désorption des glaces interstellaires » porteur : J.H. Fillion). La technique REMPI qui a été utilisée avec succès sur H_2 est en cours d'implémentation sur SPICES pour le sondage des molécules comme H_2O ou CH_4 au moment de la désorption induite par effet thermique ou sous irradiation.

Dans le même temps, nous avons montré que les techniques d'enrichissement en une des espèces de spin par pompage optique ou par chromatographie en phase gazeuse étaient peu efficaces pour les molécules qui nous intéressent. Afin de suivre l'évolution d'un déséquilibre lors de cycles de refroidissement-sublimation, nous développons de nouvelles collaborations avec l'université de Sherbrook ou le FOM à Amsterdam pour la mise en place de méthodes d'enrichissement dans des lentilles magnétiques ou électriques qui seront couplées aux dispositifs SPICES ou CoSpiNu.

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

Dispositif CoSpiNu (Conversion de Spin Nucléaire en Matrice et en Phase Gazeuse) du LPMAA

Dispositif diode laser du PhLAM

5 publications significatives avec titre et référence complète

1- L. Abouaf-Marguin A.M. Vasserot C. Pardanaud, and X. Michaut ; Nuclear spin conversion of H2O trapped in solid xenon at 4.2K: a new assignment of ν_2 rovibrational lines ; *Chemical Physics Letters* **480** , 82-85 (2009)

2- Cacciani, P.; Cosleou, J.; Khelkhal, M.; Tudorie, M.; Puzzarini, C.; Pracna, P. ; Nuclear spin conversion in NH_3 Physical Review A **80 ,** 042507 (2009)

3- P. Cacciani; Cosleou, J.; Khelkhal, M. ; Nuclear spin conversion in H_2O, Physical Review A **85** , 012521 (2012)

4- M. Chehrouri, J.-H. Fillion, H. Chaabouni, H. Mokrane, E. Congiu, F. Dulieu, E. Matar, X. Michaut, and J.L. Lemaire ; Nuclear Spin Conversion of Molecular Hydrogen on Amorphous Solid Water in the presence of O_2 traces ;Physical Chemistry Chemical Physics **13**, 2172-2178 (2011).

5- P. Cacciani, P. Cermak, J. Cosleou, M. Khelkhal, P. Jeseck, and X. Michaut "New progress in spectroscopy of ammonia in the infrared 1.5_m range using evolution of spectra from 296K down to 120 K." JQSRT **113**,1084-1091 (2012)

Titre du projet: Collisions moléculaires inélastiques : nouvelles perspectives théoriques

Nom du porteur :	FAURE					Prénom:	Alexandre
Courrier électronique	afaure@obs.ujf-grenoble.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	IPAG – CNRS BP 53 38041 Grenoble Cédex 9					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR 5274					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	
Montant Alloué (k€)	6	10**	17***	18***			
Financement ANR *				x			

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat
** : Financement commun Meudon/Grenoble (Meudon PI)
*** : Financement commun Grenoble/Le Havre/Marne-la-Vallée /Meudon (Grenoble PI)

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
Laboratoire ondes et milieux complexes, le Havre	François Lique	INP
Laboratoire de Modélisation et Simulation Multi Echelle, Marne-la-Vallée	Majdi Hochlaf	INC
LERMA, Observatoire de Paris/Meudon	Nicole Feautrier	INSU
Partenaire Etranger	Responsable Projet	----------
LSAMA, Université de Tunis	Dris ben Abdallah	
Université du Maryland	Millard Alexander	
CSIC Madrid	Maria-Luisa Senent	
UCL, London	Jonathan Tennyson	

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

L'étude des collisions inélastiques moléculaires pour l'astrophysique a connu un renouveau important ces dix dernières années avec, notamment, le financement du projet européen *Molecular Universe* (2004-2008) qui a permis de renouveler les coefficients de collision de petites molécules clés telles que H_2O, NH_3, etc. Ces coefficients sont indispensables à l'interprétation des observations spectroscopiques radio et (sub)millimétrique. Avec l'arrivée des données *HERSCHEL* et ALMA, les besoins en calculs collisionnels s'étendent naturellement vers les plus hautes énergies (fréquences au delà du THz) mais également vers de nouvelles espèces telles que des hydrures, des radicaux, des anions, etc. Du point de vue collisionnel, cela implique de nouveaux développements méthodologiques ainsi que l'utilisation de moyens de calculs de plus en plus lourds.

En regroupant les demandes des principaux groupes français travaillant sur le sujet, l'objectif de notre projet depuis 2010 a été de s'attaquer à la fois à de nouveaux systèmes et à de nouveaux processus tels que l'excitation rotationnelle de molécules lourdes, l'excitation des structures fines et hyperfines de radicaux ou encore l'excitation vibrationnelle de molécules polyatomiques. Le soutien de PCMI nous a permis d'une part de renforcer les liens entre les groupes de chimistes quanticiens - spécialistes des calculs de surface d'énergie potentielle (SEP) - et les experts en dynamique moléculaire et d'autre part de mutualiser les efforts de développement méthodologique. Les résultats théoriques ont par ailleurs suscité des travaux expérimentaux qui ont permis de valider la précision et la fiabilité des calculs, depuis les surfaces de potentiel jusqu'aux coefficients de collision. Le soutien de PCMI a permis de poursuivre les avancées, de faciliter les échanges, d'élargir les compétences acquises dans chaque groupe et de consolider l'avance de la communauté française dans le domaine, désormais reconnue internationalement.

Parmi les résultats marquants, nous citerons en particulier :

1/Les premiers coefficients de collision pour des radicaux avec structure fine et hyperfine (CN et C_2H avec He et H_2)

2/ Les premiers coefficients de collision pour une molécule asymétrique avec 4 atomes lourds (le formiate de méthyle, HCOOCH3 avec He, cf. Figure 1 ci-dessous)

3/ Les premiers coefficients de collision pour deux anions (CN^- et C_2H^- avec He et H_2)

4/ La prédiction et l'observation d'un anti-maser de SO_2 à 12 GHz

Nous soulignons également que sur la période janvier 2011-juin 2012, **20 articles** ont été publiés sur le sujet des collisions inélastiques moléculaire, dans le cadre du projet PCMI.

Parmi les perspectives à court-terme nous citerons le démarrage de l'ANR « HYDRIDES » (porteur Grenoble) à la rentrée 2012 sur l'excitation et la chimie des hydrures, ces briques fondamentales de la chimie interstellaire. Ce projet sera mené en collaboration entre Grenoble, Le Havre, Rennes et Bordeaux. Dans le cadre des prochaines demandes PCMI, l'accent sera mis sur l'excitation rotationnelle à haut moment angulaire (e.g. SiO, SO_2), sur l'excitation des modes vibrationnels (e.g. CO, C_3) et sur l'excitation de cations et anions moléculaires avec H_2 (e.g. HCO^+, N_2H^+, C_4H^-).

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

Mise à disposition des données dans les bases BASECOL (http://basecol.obspm.fr/) et LAMDA (http://home.strw.leidenuniv.nl/~moldata/)

5 publications significatives avec titre et référence complète

Spielfiedel A, Feautrier N, Najar F, Ben Abdallah D, Senent M.L., F. Lique ; Fine and hyperfine excitation of C_2H by collision with He at low temperature ; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 421 1891 (2012)

Kalugina Y., Lique F., Klos J.; Hyperfine collisional rate coefficients of CN with H_2(j= 0); Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 422 812 (2012)

Cernicharo J., Spielfiedel A., Balança C., Dayou F., Senent M.-L., Feautrier N., Faure A., Cressiot-Vincent L., Wiesenfeld L., Pardo J. R.; Collisional excitation of sulfur dioxide in cold molecular clouds; Astronomy and Astrophysics 531 A103 (2011)

Faure A., Szalewicz K., Wiesenfeld L.; Potential energy surface and rotational cross sections for methyl formate colliding with helium; Journal of Chemical Physics 135 024301 (2011)

Wiesenfeld L., Scribano Y., Faure A.; Rotational quenching of monodeuterated water by hydrogen molecules; Physical Chemistry Chemical Physics 13 8230 (2011)

Titre du projet: Excitation collisionnelle de la molécule CN par He/H_2

Nom du porteur :	LIQUE					Prénom:	François
Courrier électronique	Francois.lique@univ-lehavre.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	LOMC – Université du Havre 25 rue Philippe Lebon 76600 Le Havre					Institut Principal de rattachement CNRS	INSIS
Code (ex: UMR1111)	UMR6294					Section(s) CNRS	9-10
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	30
Montant Alloué (k€)	6	4					
Financement ANR *	X	X	X	X			

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
LERMA – Observatoire de Meudon Place Jules Janssen, F-92195 Meudon	***N. Feautrier***	***INSU***
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	----------
Université du Maryland	***M. Alexander***	

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

Nous avons étudié l'excitation collisionnelle de la molécule CN (entre niveaux de structure hyperfine) par collisions avec He et H_2. Bien que la molécule CN fasse partie des molécules les plus fréquemment observées, il n'existait aucune donnée collisionnelle fiable pour cette molécule avant nos travaux. En l'absence de données, les astrophysiciens avait coutume d'utiliser les taux de collisions de la molécule CS pour l'interprétation d'observation de CN. Cela conduisait naturellement à des imprécisions dans la détermination de l'abondance de CN dans le MIS. Il était donc important d'obtenir rapidement des taux de collisions pour cette molécule. De plus, compte tenu des possibilités d'analyse polarimétrique d'ALMA, il était aussi intéressant d'aborder le problème de dépolarisation par collisions isotropes de CN puisque cette molécule est un excellent traceur du champ magnétique interstellaire.

Nous avons donc étudié, dans un premier temps, les collisions impliquant la molécule CN et l'atome d'Hélium. L'étude des collisions $CN(^2\Sigma)$-He ne fut pas trop complexe car les collisions $^2\Sigma$ atome sans structure sont implémentées dans des codes en libre accès. La prise en compte de la structure hyperfine a été réalisée à l'aide d'une méthode de recouplage sur les matrices S de diffusion obtenues lors du traitement quantique de la dynamique n'incluant pas la structure hyperfine (Implémentation de la méthode dans le Code de dynamique moléculaire Hibridon). Cette méthode a donné des résultats très précis car la levée de dégénérescence est faible, dans le cas de la molécule CN. Dans un second temps, nous avons étudié les collisions entre les molécules CN et H_2 (para et ortho-H_2). Ce fut un problème plus complexe que l'étude des collisions avec He, et relativement coûteux en terme de temps de calculs. C'est pourquoi, afin de fournir des taux de collisions rapidement, Nous nous sommes focalisé d'abord sur l'étude des collisions entre CN et para-H_2(j=0), espèce majoritaire dans le MIS froid, puisque les collisions avec H_2(j=0) sont équivalentes aux collisions avec un atome sans structure et que la stratégie pour l'étude de l'excitation collisionnelle de ces petites molécules avec un atome sans structure est une chose bien connue. Actuellement, nous nous intéressons aux collisions avec para et ortho-H_2. Nous pourrons nous appuyer sur les études des collisions entre CN^- et SiS avec H_2 que nous avons récemment menées pour pouvoir étudier les collisions de CN avec H_2. Là aussi, la prise en compte de la structure hyperfine se fera à l'aide d'une méthode de recouplage.

Il est à noter que l'étude des collisions CN-H_2 présente une particularité intéressante. A haute énergie de collisions (> 700K), le système collisionnel devient réactif et on a la possibilité de former les molécules HCN et HNC. Ceci amène donc à un problème astrophysique très intéressant puisqu'il touche à l'abondance des molécules HCN et HNC. Nous avons donc aussi étudié les collisions entre les molécules HCN et HNC avec He et H_2. Nos travaux de recherche ont ainsi permis de résoudre le problème interstellaire du rapport HCN/HNC. Nous avons pu constater que l'utilisation de nouvelles données collisionnelles HNC pouvait complètement modifier la détermination de l'abondance de cette molécule et proposait donc une solution au problème du rapport HNC/HCN dans le milieu interstellaire. En effet, pour un nuage froid de densité $n(H_2)=10^4$ cm^{-3} et de température T = 10K, l'abondance de la molécule HNC est 2.5 fois plus faible que ce qui était précédemment déterminé avec les taux de collisions de HCN. Le rapport HNC/HCN est donc ≈ 1, valeur plus en accord avec les modèles de chimie du milieu interstellaire.

Contribution au code de dynamique moléculaire Hibridon :

(http://www2.chem.umd.edu/groups/alexander/hibridon/hib43/)

5 publications significatives avec titre et référence complète

Rotational excitation of CN($X^2\Sigma^+$) by He : theory and comparison with experiments
F. Lique, A. Spielfiedel, N. Feautrier, I. F. Schneider, J. Kłos and M. H. Alexander
Journal of Chemical Physics **132**, 024303 (2010)

The rotational excitation of HCN and HNC by He: New insights on the HCN/HNC abundance ratio in molecular clouds
E. Sarrasin, D. Ben Abdallah, M. Wernli, A. Faure, J. Cernicharo and F. Lique
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **404,** 518 (2010)

The rotational excitation of HCN and HNC by He: Temperature dépendance of the collisional rate coefficients
F. Dumouchel, A. Faure and F. Lique
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **406**, 2488 (2010)

Hyperfine excitation of CN by He
F. Lique and J. Kłos
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Letters **413,** L20 (2011)

Hyperfine collisional rate coefficients of CN with H_2(j=0)
Y. Kalugina, F. Lique and J. Kłos
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Letters, **422**, 812 (2012)

Titre du projet: La molécule HNC en astrochimie

Nom du porteur :	Loison					Prénom:	Jean-Christophe
Courrier électronique	jc.loison@ism.u-bordeaux1.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	Institut des sciences moléculaires, 33405 Talence Cedex					Institut Principal de rattachement CNRS	Chimie
Code (ex: UMR1111)	5255					Section(s) CNRS	13
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	31
Montant Alloué (k€)				3.5			
Financement ANR *							

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux BP 89, 33271 Floirac Cedex	Valentine Wakelam Michel Dobrijevic	INSU
Laboratoire Univers Particules de Montpellier Université de Montpellier II Place Eugène Bataillon - CC 72 34095 Montpellier Cedex 05 FRANCE	Dahbia Talbi	Chimie

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours...

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

Ce projet mixte PCMI/PNP porte principalement sur l'établissement d'un réseau fiable de réactions chimiques pour la modélisation de l'abondance des molécules HNC et HCN en astrochimie (nuages moléculaires et atmosphère de Titan). Il porte aussi sur de nouveaux calculs d'excitation rotationnelle par collision avec He et H_2, en complément de ceux de l'équipe du Havre. La molécule HNC et le rapport HCN/HNC sont l'objet d'un regain d'intérêt en astrochimie. En effet, de nouveaux calculs des taux d'excitation rotationnelle par collision entre HNC, He et H_2 (E. Sarrasin *et al*, MNRAS 404 (2010) 518-26, F. Dumouchel *et al.*, MNRAS 406 (2010) 2488-92, F Dumouchel *et al.*, Phys. Chem. Chem. Phys. 13 (2011) 8204-12) devraient permettre une nouvelle estimation de l'abondance détectée de HNC et donc du rapport HCN/HNC sujet à de nombreuses interrogations. De plus, HNC vient d'être détectée dans l'atmosphère de Titan (R Moreno *et al*, BAAS 42, 61.03 (2010) 1088) alors que cette molécule n'est pas présente dans les modèles actuels. Il faut donc construire le réseau chimique impliquant cette molécule. L'ensemble de ce travail sera effectué en collaboration étroite avec le Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux (LAB) pour la modélisation (nuage moléculaire et atmosphère de Titan) et l'équipe d'Astrophysique du Laboratoire Univers et Particule de Montpellier (LUPM) pour une partie des calculs *ab-initio*. Le résultat de ce travail sera implémenté dans la base de données KIDA (http://kida.obs.u-bordeaux1.fr/), ce qui permettra de la compléter et d'améliorer les données existantes.

Les financements obtenus par le biais de PCMI ont permis de financer des missions pour assister à des colloques internationaux, des collaborations à l'étranger (notamment aux USA) et en France.

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

KInetic Database for Astrochemistry (KIDA)

5 publications significatives avec titre et référence complète

1) E. Hébrard, M. Dobrijevic, J. C. Loison, A. Bergeat, K. M. Hickson, Neutral production of hydrogen isocyanide (HNC) and hydrogen cyanide (HCN) in Titan's upper atmosphere, A&A, 2012 (541) A21

Titre du projet: Etudes théoriques de processus réactifs mettant en jeu l'oxygène moléculaire interstellaire

Nom du porteur :	HONVAULT					Prénom:	Pascal
Courrier électronique	pascal.honvault@univ-fcomte.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB), UMR 5209 CNRS/UB, Faculté des Sciences Mirande, BP 47870 – 21078 DIJON Cedex – France					Institut Principal de rattachement CNRS	INP
Code (ex: UMR1111)	UMR 6303					Section(s) CNRS	4, 14, 8, 2
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	30, 28, 31, 32
Montant Alloué (k€)			4	7			
Financement ANR *							

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
Laboratoire Ondes et Milieux Complexes (LOMC), UMR 6294 CNRS-Université du Havre, 25 rue Philippe Lebon, 76058 Le Havre Cedex	François LIQUE	INSIS
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	----------

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

L'étude théorique de la réactivité chimique en phase gazeuse constitue le principal volet de ce projet. Très peu de données fiables (théoriques ou expérimentales) existent pour les réactions se produisant dans le milieu interstellaire alors que la connaissance de ces réactions est une des clés de la compréhension de l'évolution de la matière dans ce milieu.
A ce jour, l'étude quantique de collisions réactives aboutissant à la résolution d'état à état est très complexe. Pour les systèmes triatomiques, les méthodes les plus précises même aux basses températures sont les méthodes quantiques indépendantes du temps de type équations couplées. Nous avons appliqué ces méthodes à l'étude des réactions OH + atome et $H^+ + H_2$. L'étude des réactions atome + O_2 est encore en cours (surfaces d'énergie potentielle à déterminer).
Les résultats obtenus permettront d'avoir une meilleure connaissance de ces réactions et les constantes de vitesse nouvellement déterminées pourront être utilisées dans les modèles astrophysiques.
Pour le futur proche, nous comptons continuer l'étude des réactions mettant en jeu les espèces OH, H_2, H, H^+ et leurs variantes isotopiques.

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

5 publications significatives <u>avec titre et référence complète</u>

- Lique F., Jorfi M., Honvault P., Halvick P., Lin S.Y., Guo H., Xie D., Dagdigian P.J., Klos J., Alexander M.H.,
O + OH --> O_2 + H: A key reaction for interstellar chemistry. New theoretical results and comparison with experiment,
J. Chem. Phys., Communication 131, 221104 (2009).

- Daranlot J., Jorfi M., Xie C., Bergeat A., Costes M., Caubet P., Xie D., Guo H., Honvault P., Hickson K.M.,
Revealing Atom-Radical Reactivity at Low Temperature Through the N + OH Reaction,
Science 334, 1538 (2011).

- Hincelin U., Wakelam V., Hersant F., Guilloteau S., Loison J. C., Honvault P., Troe J.;
Oxygen depletion in dense molecular clouds: a clue to a low O_2 abundance?,
Astronomy and Astrophysics 530 A61 (2011).

- Honvault P., Jorfi M., González-Lezana T., Faure A., Pagani L.;
Ortho-Para H_2 Conversion by Proton Exchange at Low Temperature: An Accurate Quantum Mechanical Study,
Physical Review Letters 107 023201 (2011).

- Lique F., Honvault P., Faure A.,
Ortho–para-H_2 conversion by hydrogen exchange: comparison of theory and experiment,
Journal of Chemical Physics 137(15) 154303 (2012).

Titre du projet: Excitation rovibrationnelle des chaînes carbonées par He/H2

Nom du porteur :	Hochlaf					Prénom:	Majdi
Courrier électronique							
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	Université Paris-Est, Laboratoire Modélisation et Simulation Multi Echelle, MSME UMR 8208 CNRS. 5 bd Descartes, 77454 Marne-la-Vallée, France					Institut Principal de rattachement CNRS	INC
Code (ex: UMR1111)	UMR 8208					Section(s) CNRS	13
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	31
Montant Alloué (k€)	5	2	**	**			
Financement ANR *							

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat
**: Financement commun Grenoble/Le Havre/Marne-la-Vallée /Meudon (Grenoble PI)

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
Gilberte Chambaud		
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	----------
Driss Ben Abdallah		
Maria Luisa Senent Diaz		

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours...

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

Présentation du projet :
La modélisation astrophysique des nuages moléculaires requiert les taux de collisions des molécules interstellaires avec les espèces les plus abondantes que sont He et H_2 car les processus de collisions contribuent, en compétition avec les processus radiatifs, à l'excitation et la désexcitation des molécules. La détermination de taux de collisions (moyenne de Boltzmann des sections efficaces d'excitation collisionnelle) pour l'ensemble des molécules interstellaires était et est toujours un enjeu majeur notamment dans le cadre de la mission spatiale *HERSCHEL* : des données de physique moléculaire suffisamment précises sont nécessaires pour interpréter les futures observations qui seront d'une qualité jusque-là inégalée. La prise en compte de tous les degrés de liberté mis en jeu dans les collisions avec H_2 représente encore aujourd'hui un défi au niveau théorique, et les collisions avec He, plus faciles à traiter, sont souvent considérées comme un modèle des collisions H_2. Les chaînes carbonées neutres ainsi que leurs espèces chargées ($C^{n-/0/+}$) sont très importantes du point de vue astrophysique car elles sont très présentes dans le milieu interstellaire et sont d'excellents traceurs des zones de chocs, des régions de formations d'étoiles ou des nuages froids. Le but de ce projet est de déterminer les taux de collisions entre les chaînes carbonées et He/H_2. Cependant, il a été établi que les chaînes carbonées sont relativement flexibles et qu'elles possèdent des modes de vibration de pliage très bas en énergie (entre 60-200 cm^{-1}) [1].
Deux cas sont envisagés : 1) Collisions froides (Température < 30 K) où seule l'excitation rotationnelle est possible. Au cours du traitement, la chaîne carbonée est considérée comme rigide. 2) Collisions thermiques (Température du milieu > 30 K) où les collisions vont induire en plus de l'excitation rotationnelle, de l'excitation rovibrationnelle.

Etat d'avancement :
En suivant les recommandations du comité de sélection du PCMI, nous nous sommes rapprochés de la communauté des Astrophysiciens et de la communauté des modélisateurs des sections efficaces de collisions réactives et non réactives pour l'Astrophysique en France (discussions avec A. Faure, A. Spielfiedel, P. Honvault), en Espagne (collaborations avec M.-L. Senent et collaborateurs du CSIC Madrid) et en Tunisie (Equipe de Z. Ben Lakhdar, Tunis) et des Astrophysiciens (au CSIC Madrid et à l'Observatoire de Grenade). Nous essayons également de nous rapprocher des astrophysiciens français à travers la participation aux rencontres nationales organisées à cet effet.
Notre projet a été retenu par le comité du PCMI en 2008 et il a été renouvelé en 2009. Les calculs se font en deux temps : calcul des surfaces de potentiel d'interaction puis les calculs dynamiques. Nous en déduisons les sections efficaces d'excitation rovibrationelle. Au cours de ces deux premières années, nous avons traité les collisions non

réactives ultra froides entre He et C_3, He/H_2 et C_2. Dans le dernier cas, nous avons montré que les taux de collisions entre C_2-H_2 diffèrent de ceux de C_2-He. Ainsi, nous avons montré que He n'est pas forcément un très bon "remplaçant" de H_2 pour les modèles astrophysiques. Ces travaux ont fait l'objet de deux publications dans ApJ et J. Chem. Phys [2,3,4]. Ces résultats sont d'une grande utilité pour sonder les milieux froids de notre Univers et pour interpréter les résultats qui pourront être obtenus avec les missions *HERSCHEL* et ALMA dans un futur proche.
Le travail sur l'excitation rovibrationnelle de C_3 par He se poursuit. Nous avons déjà généré la surface de potentiel d'interaction C_3-He en incluant les degrés de liberté de pliage. Un nouveau code de calcul de sections efficaces d'excitation rovibrationnelle dédié à cet effet est en cours d'élaboration, en collaboration avec nos collègues Tunisiens et Espagnols.
Le traitement des chaînes carbonées plus longues neutres ou chargées ($C_n^{-/0/+}$, n> 3) nécessite d'abord la caractérisation de ces molécules et la détermination de leurs propriétés structurales et spectroscopiques : isomères, géométries d'équilibre, constantes rotationnelles, spectre vibrationel. En effet, très peu de données sont disponibles dans la littérature concernant ces molécules. De plus, nous avons montré que ces molécules présentent plusieurs isomères stables dont seule la forme linéaire est connue. Pour C_4, C_4^- et C_4^+, nous avons caractérisé donc leurs isomères et leurs états électroniques les plus bas avant de traiter leurs collisions réactives avec H et leurs collisions non réactives avec He ou H_2. Ce travail se poursuit à l'heure actuelle pour traiter les molécules neutres C_4H et C_6H, ainsi que leurs anions qui sont d'une grande importance pour le milieu interstellaires. Nous envisageons également étudier la formation de ces molécules après collisions réactives entre H ou H_2 avec les chaines carbonées correspondantes.

1. Hinkle, K. W.; Keady, J. J.; Bernath et P. F. Science 1988, 241, 1319. Weltner, W. et Vanzee, R. J. Chem. Rev. 1989, 89, 1713.
2. D. Ben Abdallah, K. Hammami, F. Najar, N. Jaidane, Z. Ben Lakhdar, M. L. Senent, G. Chambaud et M. Hochlaf. Astrophysical Journal 686, 379 (2008)..
3. F. Najar, D. Ben Abdallah, N. Jaidane, Z. Ben Lakhdar, G. Chambaud et M. Hochlaf. J. Chem. Phys. 130, 204305 (2009).
4. F. Najar, D. Ben Abdallah, N. Jaidane et Z. Ben Lakhdar. Chem. Phys. Letters 460, 31 (2008).

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

Mise à disposition des données dans les bases BASECOL (http://basecol.obspm.fr/) et LAMDA (http://home.strw.leidenuniv.nl/~moldata/)

5 publications significatives avec titre et référence complète

1. F. Najar, D. Ben Abdallah, N. Jaidane, Z. Ben Lakhdar, G. Chambaud et M. Hochlaf*. "Rotational excitation and de-excitation of C2 (X1Σg+) by para-H2 (j=0)". J. Chem. Phys. 130, 204305 (2009).

2. F. Lique, J. Klos et M. Hochlaf*. "Benchmarks for the generation of interaction potentials for scattering calculations: Applications to rotationally inelastic collisions of C4 ($X^3\Sigma_g^-$) with He ". Phys. Chem. Chem. Phys. 12, 15672 (2010). Article invité : Themed issue Quantum Molecular Dynamics and Control. Sélectionné par les Editeurs pour la couverture du volume.

3. D. Hammoutène, M. Hochlaf* et M. L. Senent. "Structure and electronic spectra of the C6- anion". Monthly Notices of the Royal Society, (2012), 424(2) 1224-1231.

Titre du projet: Astrochimie théorique

Nom du porteur :	TALBI					Prénom:	DAHBIA
Courrier électronique	dahbia.talbi@univ-montp2.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	Groupe de Recherche en Astronomie et Astrophysique du Languedoc Laboratoire Univers et Particules de Montpellier **depuis 01/2011**					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU IN2P3 / INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR5024 **en 2009** UMR5299 depuis 01/2011					Section(s) CNRS	17 13 (pour DT)
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	
Montant Alloué (k€)	3						
Financement ANR *							

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	----------
University of Lehigh (USA)	Peet Hickman	
University of Cambridge (UK)	Ian Smith	
University of Virginia (USA)	Eric Herbst	

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

Il est maintenant admis que les outils de la chimie théorique (calculs électroniques et dynamique des noyaux) sont très utiles pour comprendre la faisabilité des réactions entrant dans les modèles astrochimiques (en phase gazeuse ou à l'interface du grain ou de la glace) et obtenir les constantes de vitesse associées et les rapports de branchement nécessaires à ces modèles. Ces calculs théoriques sont complémentaires à l'expérience voir incontournables quand celle-ci n'est pas possible.

Les projets de D. Talbi autour de ces calculs de chimie théorique ont toujours été soutenus par le PCMI. Elle en a été le porteur jusque 2009. A partir de 2010, conformément à la politique du PCMI sur le regroupement des demandes D. Talbi a intégré la demande portant sur KIDA et portée par V. Wakelam.

En 2009, D. Talbi a poursuivi ses études entreprises sur l'étude de processus de RED. Etudes de longue haleine nécessitant aussi des développements méthodologiques pour aborder des systèmes complexes. L'étude de la recombinaison dissociative de N_2H^+ pour les deux voies de dissociation N_2 + H et N + NH a été poursuivie. Celles de c-$C_3H_3^+$ (isomère cyclique) et l-$C_3H_3^+$ (isomère linaire) a montrée que l'ion cyclique devrait se recombiner plus rapidement que l'ion linéaire pour les basses températures du milieu interstellaire. L'étude théorique de la réaction de CN avec NH_3 a été finalisée montrant que via cette réaction HCN se formait comme postulé dans les modèles astrochimiques mais pas $NCNH_2$. Le rapport de branchement utilisé dans KIDA de 50% pour la voie H + HCN et 50% pour la voie H + $NCNH_2$ a été corrigé suite à cette étude. La dépendance en température de la constante de vitesse mesurée expérimentalement pour cette réaction a pu être reproduite ce qui a validé le taux utilisé dans KIDA pour la réaction CN + NH_3. C'est aussi au cours de cette année 2009 que le taux de réaction pour la formation de H_2O par association radiative O + H_2 a été calculé. L'étude de la formation des chaînes carbonées C_n dans les enveloppes d'étoiles commencée les années précédentes a été poursuivie

5 publications significatives avec titre et référence complète

-A Theoretical Analysis of the Reaction between CN Radicals and NH3, D. Talbi and I.W.M Smith, *Physical Chemistry Chemical Physics* **11**, 8477 (2009)

-A sensitivity study of the neutral-neutral réactions C + C_3 and C+C_5 in cold dense clouds, V. Wakelam, JC Loison, E. Herbst, D.Talbi et al. *Astronmy and Astrophysics* **495**, 513 (2009)

-A quantum chemical study of the N2H+ + e- -> N + NH reaction , Talbi, D. *J. of Phys. Conf. Ser.* **192**, 012015 (2009)

-A Comparative study of the DR reactions of c-C3H3+ and l-C3H3+: preliminary theoretical studies, Talbi, D., Hickman, A.P., Kashinski, D., Malenda, R.F., Redondo P. , *J. of Phys. Conf. Ser.* **192**, 012014 (2009)

- The formation of H_2O from the radiative association of O and H_2, Talbi D., Bacchus-Montabonel M.C., *Chemical Physics Letters* **485**, 56 (2010)

Titre du projet: Améliorations des données de cinétique

Nom du porteur :	Wakelam					Prénom:	Valentine
Courrier électronique	wakelam@obs.u-bordeaux1.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux BP 89, 33271 Floirac Cedex					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	5804					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)		10	8				
Financement ANR *	x	x	x	x			

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

Autre UR participant au projet (Nom et Adresse)	*Responsable Projet*	*Institut CNRS principal*
Institut des Sciences Moléculaires de Bordeaux Bâtiment A12, 351 cours de la libération 33405 TALENCE cedex	***Jean-Christophe Loison***	***Institut de Chimie***
Laboratoire Univers Particules de Montpellier Université de Montpellier II Place Eugène Bataillon - CC 72 34095 Montpellier Cédex 05 FRANCE	***Dahbia Talbi***	***IN2P3/INSU***
Partenaire Etranger	*Responsable Projet*	----------
University of Cambridge (UK)	*Ian Smith*	
University of Virginia (USA)	*Eric Herbst*	
Argonne National Laboratory (USA)	*Stephen Klippenstein*	
University of Stockolm (Suède)	*Wolf Geppert*	
University of Lehigh (USA)	*Peet Hickman*	

Obs : Si l'unité de recherche (UR) n'est pas associée au CNRS, indiquer son code et dans la 3ème colonne indiquer « ext » ou le nom de l'établissement : ex : Univ. de Tours…

Résumé du projet et des résultats. Perspectives à court terme:

En 2010 et 2011, nous avons fais une demande conjointe PCMI afin de soutenir les activités de notre groupe sur les données de cinétique en phase gazeuse pour l'astrochimie autour de la base de données KIDA. KIDA (pour KInetic Database for Astrochemistry) est une base de données en ligne et ouverte qui centralise les réactions chimiques, ainsi que leurs paramètres permettant de déterminer la vitesse des réactions en fonction de la température et leur incertitude associée. Un article à ApJS de présentation de KIDA a été publié en 2012 (Wakelam et al. 2012). La base de données en ligne depuis mai 2010, après plusieurs années de concertations entre astrophysiciens et physico-chimistes, est maintenant régulièrement mise à jour. Pour ces mises à jour, un travail de fond sur les données de cinétique est nécessaire. Un certain nombre de réactions ont été identifiées comme importantes et ont fait l'objet d'études théoriques et/ou expérimentales. Les études ayant déjà donné lieu à une concrétisation par une publication sont les suivantes :

- Mesures expérimentales de N + OH et N + CN à basse température (Daranlot et al. 2011, 2012) : Il s'agit là d'un projet bénéficiant également d'un financement ANR Jeune Chercheur (EMA : INC, PI : V. Wakelam) et d'un financement de la région Aquitaine. Un nouveau protocole expérimental original avait été mis en place en 2009 et permis la mesure de N + NO (Bergeat et al. 2009). En se basant sur cette mesure, la réactivité des deux autres systèmes a été étudiée. Les résultats pour N + OH ont été publiés dans Science et ceux de N + CN avec un impact sur les prédictions des modèles chimiques dans PNAS. Dans ce dernier papier, nous avons montré que la fraction d'azote moléculaire dans les nuages denses était beaucoup moins importante que précédemment estimé simplement du fait de la faible réactivité des réactions impliquées (et ce sans avoir besoin de jouer sur les conditions initiales).

- Production de OCS en phase gazeuse (Loison et al. 2012) : Une revue d'un certain nombre de réactions impliqué dans la production et la destruction de la molécule de OCS en phase gazeuse a été publié dans MNRAS. Nous avons montré que la voie majoritaire de formation de OCS en phase gazeuse (CO + S -> OCS + Photon) était très largement surestimée et que les modèles ne reproduisaient donc pas les abondances observées dans les nuages moléculaires.

- Rédaction de datasheets : Une activité du groupe a été de participer à la rédaction de datasheets (documents pdf de synthèse suivant le format IUPAC) afin de donner des recommandations sur les taux de réactions à utiliser sur la gamme de température 10 – 300 K. Depuis 2010, plus d'une soixantaine de datasheets ont été écrits (tous ne sont pas encore sur le site) avec des recommandations qui pour la pluspart ont changé les taux précédemment utilisés. Le dernier en date étant pour la recombinaison dissociative $N_2H^+ + e^-$, réaction très importante pour N_2 et N_2H^+ mais polémique.

- Application à la chimie de l'oxygène dans les nuages denses : Une application de ces travaux a été réalisée par Hincelin et al. (2011) qui a montré qu'en associant un rapport élémentaire C/O plus grand que 1 (suggéré par des observations récentes dans les milieux diffus), une chimie de l'oxygène plus précise et un modèle gaz-grain, on ne produisait qu'une abondance faible de O_2 en phase gazeuse, en accord avec les observations.

- Echange de charge $C^+ + S$: L'étude par les méthodes de la chimie théorique de la réaction de transfert de charge $C^+ + S$ a montré que le taux utilisé dans les modèles, pour cette réaction, était probablement surestimé d'au moins un ordre de grandeur (Chenel et al. 2010, Wakelam et al. 2010).

- Recombinaison dissociative de N_2H^+ :
L'étude comparative de la recombinaison dissociative de $N_2H^+ + e^-$ pour les deux voies dissociation $N_2 + H$ et $NH + H$ a confirmé l'hypothèse de la formation majoritaire de N_2, aux basses températures du milieu interstellaire. Des voies de formation en phase gazeuse, pour le propylène interstellaire, ont été recherchées par des méthodes de la chimie théorique.

Les financements obtenus par le biais de PCMI ont permis de financer des missions pour assister à des colloques internationaux, des collaborations à l'étranger (notamment aux USA) et en France (entre les membres du groupe et avec d'autres groupes comme celui de Rennes) et un atelier KIDA en octobre 2011.

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

KInetic Database for Astrochemistry (KIDA)

5 publications significatives <u>avec titre et référence complète</u>

1) Elemental nitrogen partitionning in dense interstellar clouds, Daranlot, Hincelin, Bergeat, Costes, Loison, Wakelam, Hickson 2012, Proceedings of the National Academy of Sciences, 109, 24

2) A KInetic Database for Astrochemistry (KIDA), Wakelam, Herbst, Loison, Smith, Chandrasekaran, Pavone,Adams, Bacchus-Montabonel, Bergeat, Béroff, Bierbaum, Chabot, Dalgarno, van Dishoeck, Faure, Geppert, Gerlich, Galli, Hébrard, Hersant, Hickson, Honvault, Klippenstein, Le Picard, Nyman, Pernot, Schlemmer, Selsis, Sims, Talbi, Tennyson, Troe, Wester, Wiesenfeld 2012, ApJS, 199, 21

3) Review of OCS gas-phase reactions in dark cloud chemical models, Loison, Halvick, Bergeat, Hickson, Wakelam 2012, MNRAS 421, 1476

4) Revealing Atom-Radical Reactivity at Low Temperature Through the N + OH Reaction, Daranlot, Jorfi, Xie, Bergeat, Costes, Caubet, Xie, Guo, Honvault, Hickson 2011, Science, 334, 1538

5) Ab initio calculations of autoionizing states using block diagonalization: Collinear diabatic states for dissociative recombination of electrons with N2H+, Kashinski D. O.; Talbi D.; Hickman A. P. 2012 Chemical physics letters, 529, 1

Titre du projet: VAMDC et SUP@VAMDC Project

Nom du porteur :	DUBERNET					Prénom:	Marie Lise
Courrier électronique	Marie-lise.dubernet@obspm.fr et marie-lise.dubernet-tuckey@upmc.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	LPMAA, 4 Place Jussieu, UPMC, Paris et LUTH, Observatoire de Paris					Institut Principal de rattachement CNRS	INP et INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR7092, UMR8102					Section(s) CNRS	30 et 34
Année:	2009	2010	2011	2012	2014	Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)	9	4		2			
Financement Européen VAMDC (FP7-I3 e-science)	TOTAL France : 898k€ en requested cost (incluant les overheads) sur cette période						
Financement SUP@VAMDC (FP7-CSA)				164k€ Obs de Paris			

*: Si tout ou partie du projet a bénéficié par la suite d'un soutien ANR, mettre un "x" dans la case de l'année de démarrage du contrat

French Participants under CNRS (Partner 1)			
Name of the French Partners	**CNRS**	**Third Party**	**Scientific Contact Person**
LPMAA, UMR7092 - INP	DR2	Université Pierre et Marie Curie	M.L. Dubernet (PI)
LUTH, UMR8102 - INSU	DR5	Observatoire de Paris	E. Roueff
LERMA, UMR8112 - INSU	DR5	Observatoire de Paris	S. Sahal-Bréchot& C. Zeippen
VOPARIS Data Centre, UMS 2201 - INSU	DR5	Observatoire de Paris	P. Le Sidaner
LAB, UMR5804 - INSU	DR15	Université de Bordeaux I	V. Wakelam
IPAG, UMR5274 -INSU	DR11	Université Joseph Fourier	B. Schmitt
ICB, UMR6303 - INP	DR6	Université de Bourgogne	V. Boudon
GSMA, UMR7331 - INP	DR6	Université Champagne-Ardenne	V. Tyuterev
IRAP, UMR5277 - INSU	DR14	Université Paul Sabatier	C. Joblin

Tous les partenaires de VAMDC

Beneficiary Number	**Beneficiary name**	**Beneficiary short name**	**Key People**
1(coordinator)*	Centre National de la Recherche Scientifique	CNRS	See List Above
2	The Chancellor, Masters and Scholars of the University of Cambridge	CMSUC	**N. Walton**, G. Rixon, A. Akram, G. Del Zanna, H. Mason, E. Gonzalez-Solares, J. Lewis
3	University College London	UCL	**J. Tennyson**, L. Culhane, D. Witherick, P. Yuen, K. Benson, C. Hill, M. Down, S. Harrison
4	Open University	OU	**N. Mason**, B. Sivaraman, B.J. Harker
5	Universitaet Wien	UNIVIE	**F. Kupka**, W.W. Weiss, T. Lueftinger, C. Stuetz
6	Uppsala Universitet	UU	**N. Piskunov**, E. Stempels, (K. Eriksson), S. Regandell, T. Marquart, (B. Edvardsson,) Ulrike Heiter
7	Universitaet zu Koeln	KOLN	**S. Schlemmer**, T. Giesen, H. Mueller, Baum, C. Endres, D. Herberth
8	Istituto Nazionale di Astrofisica	INAF	A. Costa, A. Giufrida, F. Spinella, **G. Mulas**, S. Casu, (A. Poddighe,) **G.**

			Leto, M.-E. Palumbo, A. Saba, G. Malloci
9	Queen's University Belfast	QUB	**T. Millar**, K. Smith
10	Astronomska opservatorija	AOB	**M. Dimitrijevic**, L. Popovic, Z. Simic, (E. Bon,) N. Milovanovic, A. Kovacevic, Darko Jevremovic
11	Institute for Spectroscopy RAS	ISRAN	**A. Ryabtsev**, R. Kildiyarova
12	Russian Federal Nuclear Centre All-Russian Institute of Technical Physics	RFNC-VNIITF	**P.A. Loboda**, S.A. Gagarin; S. V. Morozov, V.V. Popova, L. Talantova
13	Institute of Atmospheric Optics	IAO	**V.I. Perevalov**, A.Z. Fazliev, S.A. Taskun, R.V. Kochanov, A.I. Privesentsev, N.A. Lavrentiev, A. (Yu. Aklyostin,) A.V. Kozodoev, S.N. Mikhailenko
14	Corporacion Parque Tecnologico de Merida	CPTM	**C. Mendoza**, J. Gonzalez, L. Nunez
15	Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences	INASAN	**T. Ryabchikova**, Y. Pakhomov

Partenaires de SUP@VAMDC
1 OBSERVATOIRE DE PARIS OBSPARIS France
2 THE CHANCELLOR, MASTERS AND SCHOLARS OF THE UNIVERSITY OF CAMBRIDGE UCAM United Kingdom
3 UPPSALA UNIVERSITET UU Sweden
4 THE OPEN UNIVERSITY OU United Kingdom
5 UNIVERSITAET ZU KOELN KOELN Germany
6 UNIVERSITY COLLEGE LONDON UCL United Kingdom
7 KOREA ATOMIC ENERGY RESEARCH INSTITUTE KAERI Korea (Republic of)
8 UNIVERSITY OF SOUTH AFRICA UNISA South Africa
9 TATA INSTITUTE OF FUNDAMENTAL RESEARCH*TIFR TIFR India

External Partners de VAMDC + de SUP@VAMDC

1) **The Atomic Spectroscopy Group** from NIST (Gaitherburg, USA) where high quality evaluated data are available in the Atomic Spectroscopic Database (evaluation is made by a dedicated group of specialists) and where the scientist in charge (**Dr. Yuri Ralchenko**) is a specialist on development of standards for atomic and molecular data with a long-lasting collaboration with OBSPARIS on XML schema for atomic and molecular data. This group has a strong link with IAEA and will provide opportunties for SUP@VAMDC to engage with other USA partners in atomic physics and related applied fields.
2) **The Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics** (Cambridge MA, USA) where the HITRAN/HITEMP databases are currently maintained by **Dr. Larry Rothman.** HITRAN is an international standard database for use in atmospheric and planetology applications, and many teams from the EU contribute to providing data for input in this database. This group has a strong link with UCL since UCL had taken charge of including HITRAN in VAMDC e-infrastructure; it provides an entry in the USA towards the atmospheric users.
3) **Jet Propulsion Laboratory** from NASA, where the JPL microwave, millimeter and submillimeter catalog is currently managed by **Dr Brian Drouin**. The JPL microwave, millimeter and submillimeter catalog is an extensive listing of molecular spectra that are generally observable in the atmospheres of earth, planetary objects and astrophysical objects. JPL is linked to KOELN as the CDMS database from KOELN is similar to JPL, provides an entry in the USA towards the astrophysical users.
4) **The Chemical and Biochemical Reference Data Division**, from NIST (Gaithersburg, USA) where experimental, theoretical, and computational research is performed on the identity and reactivity of chemical species (including small molecules, aerosols, proteins, nanoparticles and biomolecules),

emphasizing data, information and protocols for the identification of chemical and biochemical species; validation, implementation and innovation of computational chemistry tools and techniques; experimental, theoretical, and computational studies of the thermochemistry, kinetics and mechanisms of chemical reactions in the gas and liquid phases and at interfaces; develops. Our contact, **Dr. Carlos Gonzalez** is a quantum chemist by training and the Chief of the Division in charge of overseeing the design, implementation and validation of all data products within the Division, including NIST Chemistry WebBook (one of NIST's most popular data product), the NIST-EPA Mass Spectrometry Data Library, the Computational Chemistry Comparison and Benchmark Database, and NIST Chemical Kinetics Database. The inclusion of this external partner is of primary importance for the study of interoperability with other A+M schemes, involving fields on the scale of A+M data, i.e. chemistry and biology.

5) **KAERI (Korea)** is described in detail in the partner section.
6) The **Atomic and Molecular Physics Laboratories** at the Australian National University, Canberra, Australia, are the host Node for the Australian Research Council's CENTRE FOR ANTIMATTER-MATTER STUDIES (CAMS) which is directed by **Prof. Stephen Buckman**. CAMS is a collaboration between 6 Australian Universities and the Australian Nuclear Science and Technology Organisation and, amongst other activities, the participants carry out experimental and theoretical studies of POSITRON and ELECTRON interactions with atoms, molecules, and surfaces. A wide array of scattering processes are studied, and cross sections for elastic, total, vibrational, electronic, ionization and positronium formation are measured and/or calculated. is the Center Research Director of CAMS this Institute. They are also members of the APAN network.
7) The **Electron Scattering and Modelling group** at **FLINDERS UNIVERSITY**, Adelaide, is one of the nodes of the Australian Research Council's CENTRE for ANTIMATTER-MATTER STUDIES (CAMS) and **Prof. Michael Brunger** is Node Director and Chief Investigator of CAMS at Flinders. A wide array of scattering processes, for a range of atomic, molecular and radical targets, are experimentally investigated and the electron impact cross sections so-determined are applied in our statistical equilibrium code in order to model the role of electron-driven processes in planetary atmospheres and comets. This work is conducted in close collaboration with Sophia University, Japan. Through our collaboration with the ANU and the University of Trento (Italy), we also study positron impact phenomena. Through further collaboration with other European colleagues, that positron data (and the electron data) is used to model charged-particle tracks in matter for medical applications. They are members of the APAN network.
8) The Atomic and Molecular Process Research Group, in Fusion Systems Research Division, Department of Helical Plasma Research, National Institute for Fusion Science (**NIFS**) hosts the NIFS Atomic Database directed by **Dr Izumi Murakami**. This group is part of the DCN organised by the IAEA and their interest is to collate spectroscopic data (wavelengths) and chemical reaction data with collision data to provide more information for spectroscopic diagnostics and on study of atomic and molecular processes in fusion plasmas.
9) The group of atomic and molecular Physics, directed by **Prof. Milton M. Fujimoto**, develops researches in chaos in atomic physics and molecular collisions; electron/positron-molecule modelling and electron transport in organic molecular systems. This group is part the Departamento de Fisica of Universidade Federal do Parana (Brazil).

Associate Partners: who will participate but won't be funded by the SUP@VAMDC project include;

1) The International **Atomic and Molecular Data Centres Network (DCN)** related to fusion research are coordinated by the **IAEA Atomic and Molecular Data Unit,** headed by **Dr Bas Braams**.

Résumé du projet et des résultat. Perspectives à court terme:

The Virtual Atomic and Molecular Data Centre (VAMDC) is a major new European initiative now building a unified, secure, documented, flexible and interoperable e-science environment-based interface to 20 existing A+M databases (http://portal.vamdc.eu et http://www.vamdc.eu). **The VAMDC Project is about to become a sustainable VAMDC International Consortium and SUP@VAMDC will help towards that goal.**

The SUP@VAMDC (Support at VAMDC) aims at building upon the VAMDC e-infrastructure, supporting different studies and actions linked to the VAMDC e-infrastructure that will in accord with the mission of INFRA-2012-3.3 :

• Provide operational, legal and technological support for studies aimed at developing a sustainable open scientific data e- infrastructure in Atomic and Molecular Data.

• Provide the support and medium for including authentication, authorisation and accounting (AAA) as well as licensing and tools within the VAMDC brand
• Promote and fashions future interoperability (technical, semantic, reference architecture, etc) across A&M data community through the promotion, monitoring and adoption of common standards.
• Provide support for dissemination actions aimed at raising the visibility of the VAMDC e-infrastructure towards wider audiences such as other domains which could use the VAMDC e-infrastructure for their own science or for their own dissemination of data, such as students and/or citizen-scientists. This programme includes the development of education-related tools linking VAMDC's scientific repositories and research data infrastructures, including establishing a free open access repository containing all peer-reviewed articles resulting from the VAMDC programme.
• Provide support in developing a globally connected and interoperable VAMDC e-infrastructure between EU and the rest of the world, including Brazil, South Africa, Asia, Australia, India through hosting workshops and supporting dialogue between such synergistic structures.
• Analyse and evaluate possible business models for supporting an Open Science model (OPEN VAMDC) whilst assessing the impact of such a modeling in achieving financial sustainability.

Si approprié, préciser nom du dispositif expérimental/ code numérique/ base de données

VAMDC : http://www.vamdc.eu ;

http://portal.obspm.fr for access to databases (KIDA, BASECOL, PAH, TipTopBase, Stark-B, Ghosst, Methane, Ethylene, SM&PO for French databases)

http://www.vamdc.eu/usersupport for support material

Flyer for SUP@VAMDC is attached with this document

5 publications significatives avec titre et référence complète

ML Dubernet, and VAMDC Collaboration, JQSRT, 2010, Volume 111, pages 2151-2159 "Virtual atomic and molecular data centre"

N. Walton, ML Dubernet, N. Mason, N. Piskunov, G. Rixon and VAMDC Collaboration - ASTRONOMICAL DATA ANALYSIS SOFTWARE AND SYSTEMS XX, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, **2011**, Volume 442, Pages 89-92 – "VAMDC: The Virtual Atomic and Molecular Data Center" (20th Annual Conference on Astronomical Data Analysis Software and Systems, Seaport World Trade Ctr, Boston, MA, NOV 07-11, 2010).

G. Rixon, ML Dubernet, N. Piskunov, N. Walton, and VAMDC Collaboration - 7TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATOMIC AND MOLECULAR DATA AND THEIR APPLICATIONS ICAMDATA-2010, AIP Conference Proceedings, **2011**, Volume 1344, pages 107-115 "VAMDC - The Virtual Atomic and Molecular Data Centre - A New Way to Disseminate Atomic and Molecular Data - VAMDC Level 1 Release" (7th International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Applications - ICAMDATA-2010, Vilnius, LITHUANIA, SEP 21-24, 2010.

M. Doronin, M.L. Dubernet and VAMDC Collaborators, "Virtual Atomic and Molecular Centre" and Astrophysics: Level 2 Release » 2012, in ADASS XXI, edited by P. Ballester, D. Egret, & N. P. F. Lorente, vol. ??? of ASP Conf. Ser., p 327

M.L. Dubernet, N. Nenadovic, M. Doronin, "SPECTCOL: A New Software to Combine Spectroscopic Data and Collisional Data within VAMDC », 2012, in ADASS XXI, edited by P. Ballester, D. Egret, & N. P. F. Lorente, vol. ??? of ASP Conf. Ser., p 331

Annexe 2:

Fiches Bilan
Manifestations Scientifiques soutenues par PCMI

Titre de la Manifestation: Ecole Internationale Astronomique d'Interférométrie Optique
Dates: 17- 28 Avril 2010 Lieu: Centre Igesa, Porquerolle, France

Nom du porteur :	Chesneau					Prénom:	Olivier
Courrier électronique							
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	UMR 7293 Lagrange Boulevard de l'Observatoire B.P. 4229 F-06304 NICE Cedex 4					Institut Principal de rattachement CNRS	Obs. Côte d'Azur
Code (ex: UMR1111)	UMR 7293					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)		2					

Organisateurs	*O. Chesneau*
Type de Manifestation	*Ecole*
Audience	*Internationale*
Nombre de participants	*40*
Nombre de pays représentés	*17*

: supprimer les mentions inutiles

Résumé de la manifestation :

With the advent of large and multi-telescope arrays in the past years, interferometry has reached a new stage. Interferometric facilities are becoming more and more open to non-specialist astronomers, and the Very Large Telescope Interferometer (VLTI) is a good example as the interferometric facility is fully open.

However the scientific outcome will be at the same level as the VLTI performance only if astronomers get prepared to interferometric observations and to the use of interferometric data and if the specialists in interferometry transmit their knowledge to the European astronomical community. With this objective in mind, we organized a school to train astronomers to the use of the VLTI (and other facilities) current generation of instruments.

The next VLTI training school was held in the Centre IGESA, Porquerolles Island, Côte d'Azur, France in 17th-28th April 2010. Any student wishing to deepen his (her) knowledge on optical interferometry was welcome to attend the school. The School was recognized as a European Erasmus Intensive Program (http://ec.europa.eu/education/erasmus/doc900_en.htm). This means that the students from the University partners of the program recognized the school as part of their studies, and that special funding was available for them.

The school was planned for 40 students, but the Iceland Volcano Eyjafjallajök perturbed strongly their venue. Only 26 out the 40 registered could attend finally the school.

Site web: **http://www.european-interferometry.eu/training/2010**

Titre de la Manifestation: PAHs and the Universe
Dates: 31 Mai - 4 Juin 2010 Lieu: Toulouse

Nom du porteur :	Joblin					Prénom:	Christine
Courrier électronique	christine.joblin@irap.omp.eu						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	IRAP (ex: CESR), 9 Av. du Colonel Roche, 31028 Toulouse cedex 4					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR5277					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)							

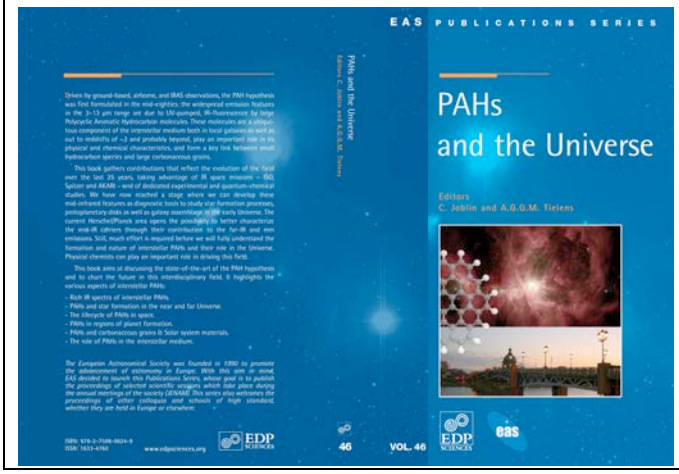
Organisateurs	*Chairs: C. Joblin (IRAP), A.G.G.M. Tielens (Leiden Observatory)* *LOC: C. Joblin (IRAP), F. Spiegelman (LCPQ)*
Type de Manifestation	*Symposium*
Audience	*Internationale*
Nombre de participants	*133*
Nombre de pays représentés	*17*

: supprimer les mentions inutiles

Résumé de la manifestation:

La manifestation "*PAHs and the Universe: a Symposium to celebrate the 25th anniversary of the PAH hypothesis*" est un ymposium anniversaire, premier du type 25 ans après les travaux fondateurs. Il a été une occasion spéciale de faire le point sur notre connaissance des molécules polycycliques aromatiques hydrogénées (PAH) interstellaires et de leur rôle fondamental dans la physique et la chimie des milieux astrophysiques. L'objectif a été atteint avec un programme scientifique particulièrement complet comprenant 22 conférences invitées, 30 autres contributions orales, plus de 60 communications par affiches et une table ronde. Ce programme a couvert l'étude des PAH interstellaires de la cosmologie aux disques protoplanétaires et à notre Système Solaire, mais également les efforts expérimentaux et théoriques qui sont menés par la communauté de physico-chimie.

Le Symposium a permis de réunir des scientifiques de renommée internationale incluant les pères du sujet avec un hommage spécial à Alain Léger (IAS) et Louis Allamandola (NASA Ames). C'est un sujet dans lequel la communauté PCMI a toujours joué un rôle moteur depuis le modèle PAH proposé par A. Léger et J.-L. Puget en 1984. Aucun financement direct n'a été sollicité au PCMI mais la manifestation a largement mobilisé notre communauté. Les résultats du Symposium ont donné lieu à l'édition d'un numéro spécial "PAHs and the Universe", C. Joblin and A.G.G.M Tielens Eds, EAS Publications Series vol. 46, 2011. Ce numéro spécial rassemble 48 articles (455 pages) qui sont accessibles librement en ligne.



Titre de la Manifestation: PAMO – JSM 2010
Dates: 29 Juin – 2 Juillet 2010 Lieu: Orsay

Nom du porteur :	Dulieu					Prénom:	Olivier
Courrier électronique	Olivier.dulieu@u-psud.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	Laboratoire Aimé Cotton, bât 505, Campus d'Orsay, 91405 Orsay					Institut Principal de rattachement CNRS	INP
Code (ex: UMR1111)	UPR3321					Section(s) CNRS	04
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	30
Montant Alloué (k€)		1,26					

Organisateurs	*Olivier Dulieu, Anna Dacosta*
Type de Manifestation	*Colloque*
Audience	*Nationale*
Nombre de participants	*290*
Nombre de pays représentés	*6*

: supprimer les mentions inutiles

Résumé de la manifestation:

L'objectif majeur de ce colloque est de réunir la communauté francophone des chercheurs en physique atomique, moléculaire, et en optique, offrant ainsi un panorama complet du domaine autour des axes fondateurs de la division PAMO de la SFP. Les thèmes abordés couvriront tous les développements récents du domaine, comme la manipulation et le contrôle par la lumière de particules uniques, le refroidissement d'atomes, d'ions ou de molécules, les lasers à atomes, la spectroscopie ultrarapide, la physique de l'atmosphère, l'astrophysique, mais aussi les systèmes complexes, à l'interface avec les disciplines voisines, biophysique, physique des plasmas, chimie physique... L'ambition affichée du colloque est ainsi d'encourager l'interdisciplinarité au sein de notre communauté, comme l'illustre par exemple la composition du comité d'organisation.

L'accent est mis sur la participation la plus massive possible des jeunes chercheurs de notre communauté, qui y trouvent souvent la première occasion de présenter leurs travaux dans une conférence majeure. Une attention particulière sera apportée aux relations avec le monde économique, avec l'implication du service d'insertion professionnelle de l'Université Paris-Sud, et la sollicitation d'acteurs industriels régionaux dans le cadre d'un forum « Métiers ».

Site web: **http://www.pamojsm2010.fr/**

Titre de la Manifestation: AstrOHP2010
Dates: 22 - 24 Sept. 2010 Lieu: Observatoire de Haute-Provence

Nom du porteur :	Pino					Prénom:	Thomas
Courrier électronique	Thomas.pino@u-psud.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	Institut des Sciences Moléculaires d'Orsay					Institut Principal de rattachement CNRS	INP
Code (ex: UMR1111)	UMR8214					Section(s) CNRS	04, 13
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	30, 31
Montant Alloué (k€)							

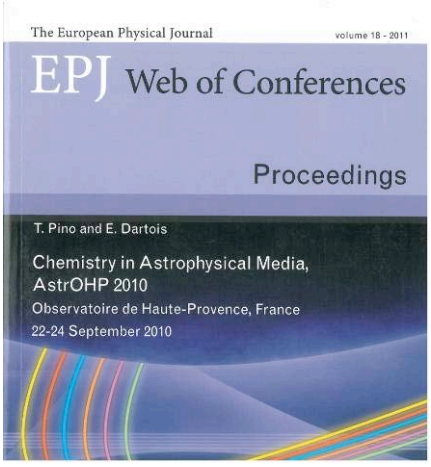
Organisateurs	*Thomas Pino, Emmanuel Dartois*
Type de Manifestation	*Atelier national de formation (financé par l'INC)*
Audience	*Nationale*
Nombre de participants	*65*
Nombre de pays représentés	*1*

: supprimer les mentions inutiles

Résumé de la manifestation:

La matière interstellaire, poussée par les vents stellaires et disséminée par les supernovae, passe de régions denses localisées au voisinage des étoiles à des phases plus diffuses et à plus grandes échelles pour ensuite se concentrer à nouveau dans les nuages moléculaires. Au cours de ce cycle, des grains de poussières submicroniques se condensent dans les éjecta d'étoiles évoluées puis, dans les régions denses, croissent par coagulation et finissent par constituer les corps solides des systèmes protoplanétaires. Ces grains évoluent au cours de leur cycle de vie et sont fortement couplés au gaz. Ce gaz possède une diversité étonnante dans sa composition chimique, au regard des conditions extrêmes qui règnent dans les divers environnements interstellaires. La présence de molécules très réactives dans certaines régions souligne une chimie en phase gazeuse très active, mais le rôle de la chimie hétérogène est lui aussi crucial.

L'exploration de cette diversité et la modélisation des divers environnements sont des enjeux majeurs. Sur ce sujet fortement interdisciplinaire qu'est l'astrochimie, il s'agira de rapprocher les communautés de chimistes, physico-chimistes, physiciens et astrophysiciens intéressés par la chimie en phase gazeuse et la chimie hétérogène à l'œuvre dans les milieux astrophysiques mais aussi dans d'autres milieux réactifs (flammes, atmosphères), et aussi la physico-chimie des petits corps du système solaire abritant en leur sein de la matière primitive. Cet atelier devrait donc contribuer à faire dialoguer ces communautés afin de favoriser l'émergence de nouvelles approches pour aborder la complexification de la matière interstellaire, puis de la matière primitive des systèmes planétaires et du système solaire en particulier.



www.epj-conferences.org/AstrOHP2010

Titre de la Manifestation: Formation Stellaire dans l'Univers Local
Dates: 26 Sept - 1 Oct. 2010 Lieu: Aussois

Nom du porteur :	Montmerle					Prénom:	Thierry
Courrier électronique	montmerle@iap.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	Institut d'Astrophysique de Paris 98 bis, Bd Arago 75017 Paris					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR7095					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	
Montant Alloué (k€)		2					

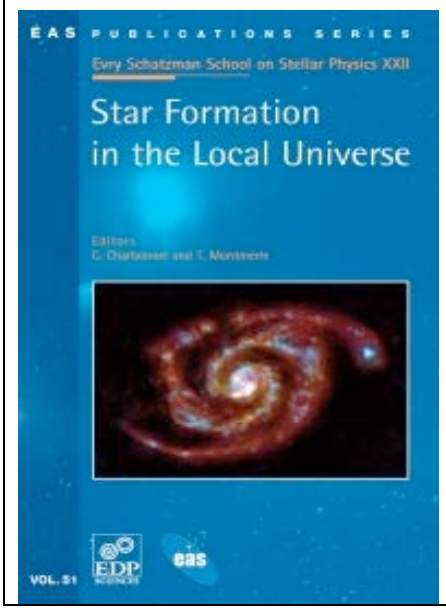
Organisateurs	*T. Montmerle et C. Charbonnel*
Type de Manifestation	*Ecole Evry Schatzman 2010*
Audience	*Internationale*
Nombre de participants	*40*
Nombre de pays représentés	*Allemagne, Chili, Espagne, Italie, Suisse, UK, USA*

: supprimer les mentions inutiles

Résumé de la manifestation (20 lignes maxi):

Cette école s'est déroulée à Aussois du 27 septembre au 1er octobre 2010. Elle a réuni quarante participants, pour moitié thésards (15) et post-doctorants (5), pour moitié chercheurs ou enseignants chercheurs en poste (CNRS et Universités). À noter une participation significative d'étudiants étrangers (Espagne, Chili, Suisse) en raison de l'intérêt pour le thème des observations avec les télescopes de l'IRAM, et de la prochaine entrée en service de l'interféromètre ALMA au Chili,

Le but de l'école était d'expliquer les liens existant entre la formation des étoiles à toutes les échelles, depuis les régions localisées de notre Galaxie jusqu'aux galaxies proches, pour lesquelles nous disposons ou allons disposer d'observations de plus en plus précises grâce aux progrès instrumentaux au sol et dans l'espace (Spitzer, JWST, ALMA...). Cette école, pilotée par le PNPS, était donc à la frontière entre PNPS (étoiles), PNCG (galaxies) et PCMI (sites de formation stellaire), et de fait a été cofinancée par ces trois programmes. Des astrophysiciens de ces différentes communautés ont effectivement participé à cette formation interdisciplinaire



Star Formation in the Local Universe - EES2010. Edited by C. Charbonnel and T. Montmerle. EAS Publications Series, Vol. 51. EDP Sciences, 2011

Site web: http://aussois2010.obs.ujf-grenoble.fr/

Titre de la Manifestation: CRISM Cosmic Rays and their interstellar medium environment
Dates: 26-06/01-07 2011 Lieu: Montpellier Polytech

Nom du porteur :	Marcowith					Prénom:	Alexandre
Courrier électronique	Alexandre.Marcowith@univ-montp2.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	LUPM Université Montpellier II Place E.Bataillon cc072 34095 Montpellier					Institut Principal de rattachement CNRS	IN2P3
Code (ex: UMR1111)						Section(s) CNRS	3
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)			4,7				

Organisateurs	*A.Marcowith, A.Bykov, K.Ferrière, Y.Gallant, D.Galli, P.Hennebelle, T.Montmerle.*
Type de Manifestation	*Workshop*
Audience	*Internationale*
Nombre de participants	*80*
Nombre de pays représentés	*16*

: supprimer les mentions inutiles

Résumé de la manifestation :

CRISM est un workshop international organisé à Montpellier en 2011. L'objectif de ce workshop était de réunir des chercheurs de plusieurs disciplines du milieu interstellaire afin de discuter du rôle du rayonnement cosmique dans la dynamique du milieu interstellaire des échelles galactiques à l'échelle du climat terrestre.
Les thèmes abordés furent les suivants : 1/ Observations multi-longueurs d'onde des sources galactiques du rayonnement cosmique (radio aux rayons gamma) 2/ théorie de l'accélération et de la propagation rayonnement cosmique dans le milieu interstellaire 3/ les propriétés du milieu interstellaire : champ magnétique, turbulence 3/ effets du rayonnement cosmique de basse énergie : ionisation et chimie induite, spallation, rôle dynamique sur les instabilités dans les nuages moléculaires 4/ effet éventuel du rayonnement cosmique sur le climat terrestre. En parallèle une réunion grand public a été organisée rassemblant environ 150 personnes sur le rôle du rayonnement cosmique sur le climat terrestre (orateur E.Bard collège de France). CRISM est le deuxième workshop d'une série que nous voudrions pérenniser, le prochain workshop de ce type est prévu en 2014.

Les actes du workshop ont été publiés au "*Memorie della Società Astronomica Italiana*" Vol.82 n.4 2011.

http://sait.oat.ts.astro.it/MSAIt820411/index.html

Site web: https://indico.in2p3.fr/conferenceDisplay.py?confId=4083

Titre de la Manifestation: ORIGINS 2011- ISSOL and Bioastronomy International Conference
Dates: 3-8 juillet 2011 Lieu: Montpellier

Nom du porteur :	Gargaud					Prénom:	Muriel
Courrier électronique	gargaud@obs.u-bordeaux1.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR 3804					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)			1				

Organisateurs	*M.Gargaud, R.Pascal*
Type de Manifestation	*International Conference*
Audience	*Internationale*
Nombre de participants	*486*
Nombre de pays représentés	*48*

: supprimer les mentions inutiles

Résumé de la manifestation:

Origins 2011 (premier congrès international co-organisé sous l'égide de deux sociétés savantes: l'ISSOL – the International Astrobiology Society et la Commission 51 (Bioastronomy) de l'Union Astronomique Internationale) a réuni à Montpellier, en juillet 2011, 486 participants appartenant à des communautés extrêmement variées (allant de l'astronomie à la biologie, en passant par la chimie, la géologie et l'épistémologie) s'intéressant à l'étude des origines de la vie sur Terre et de sa possible présence ailleurs dans l'Univers.

Pour les Sciences de l'Univers, étaient présents les chercheurs s'intéressant i) au contexte astronomique permettant l'émergence de conditions favorables au vivant (chimie du milieu interstellaire, formation stellaire, formation de systèmes planétaires), ii) à la recherche de traces de vie existante ou passée dans le Système Solaire (origine du système solaire, environnements primitifs des planètes) et à sa détection à distance sur des exoplanètes.

Ada Yonath, Prix Nobel de Chimie 2009 et Jack Shostack, Prix Nobel de Médecine 2009 ont participé à cette conférence, qui par ailleurs a reçu les labels de l'Année Internationale de la Chimie et du centenaire du prix Nobel de chimie attribué à Marie Curie.

PCMI a permis la participation de 2 chercheurs français relevant de la thématique PCMI en allouant à chacun 500€

Site web: **http://www.origins2011.univ-montp2.fr**

Titre de la Manifestation: ECLA : European Conference on Laboratory Astrophysics
Dates: 26 - 30 Sept. 2011 Lieu: Paris

Nom du porteur :	d'Hendecourt					Prénom:	Louis
Courrier électronique	Louis.DHendecourt@ias.u-psud.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	Institut d'Astrophysique Spatiale Campus d'Orsay Bat 121, 91405 Orsay Cedex					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR 8617					Section(s) CNRS	Section 17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	
Montant Alloué (k€)			4				

Organisateurs	*C. Stehlé, C. Joblin, L. d'Hendecourt*
Type de Manifestation	*Conférence*
Audience	*Internationale*
Nombre de participants	*Environ 150 participants*
Nombre de pays représentés	*Europe : France, UK, Allemagne, Italie, Espagne, Pays-Bas, Danemark, …*

: supprimer les mentions inutiles

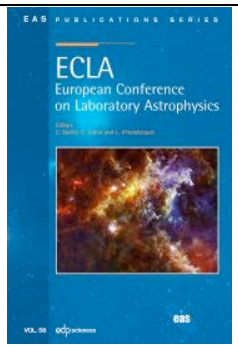
Résumé de la manifestation:

L'objectif était de réunir pour la première fois en Europe, les acteurs de l'astrophysique de laboratoire. L'originalité de cette conférence était de couvrir des domaines très différents de l'astrophysique, planètes, milieu interstellaire, étoiles, soleil, objets compacts et processus de haute énergie, domaines au moins partiellement accessibles à une démarche expérimentale reconnue sous le nom "Astrophysique de Laboratoire", Cette approche générale est d'ailleurs aussi considérée aux USA où une division de l'AAS, "Laboratory Astrophysics" vient d'être créée. Il s'agit donc d'un domaine en fort développement, d'une grande richesse interdisciplinaire avec de nombreuses retombées potentielles en astrophysique. Notre manifestation a montré la richesse de cette communauté autour de l'étude de processus physiques d'importance fondamentale permettant de comprendre la structure, la dynamique et la chimie de nombreux environnements astrophysiques, tels que le milieu interstellaire, les disques circumstellaires, les phénomènes de type MHD dans les plasmas en lien avec la rotation des disques et la formation des planètes, les jets dans les étoiles jeunes, les études d'opacité pour la physique stellaire, les rayons cosmiques… De l'avis général, cette conférence a été un succès et la suivante est déjà prévue en Allemagne en 2014.

Les actes de la conférence sont en ligne sur http://www.eas-journal.org/action/displayIssue?iid=8838005. Ils ont fait l'objet d'un livre publié par EAS fin 2012.

En ce qui concerne PCMI, les présentations relatives au milieu interstellaire et aux environnements stellaires ont été très nombreuses et de très bonne qualité. Soulignons les papiers de revue de Jose Cernicharo (*The Molecular Universe*), Thomas Henning (*Dust in protoplanetary disks : observations and laboratory astrophysics*) et de Tom Ray (*Outflows from Young stars : the Rosetta sone of astrophysical jets*) , ainsi que de nombreux papiers invités français et européens avec une bonne représentation de la communauté PCMI. La position française dans ce domaine est très forte.

Notons enfin que cette conférence servira de base à la "task force européenne, ETFLA", qui se met en place et vise à structurer cette communauté au niveau européen http://www.labastro.eu/



Site web: http://ecla.obspm.fr/

Titre de la Manifestation: Atelier photochimie en orbite
Dates 8 novembre 2011 Lieu: Salle de l'Espace au CNES, Paris

Nom du porteur :	Guillemin					Prénom:	Jean-Claude
Courrier électronique	Jean-claude.guillemin@ensc-rennes.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	Institut des Sciences Chimiques de Rennes Univ Rennes 1, Campus de Beaulieu 35042 Rennes Cedex					Institut Principal de rattachement CNRS	INC
Code (ex: UMR1111)	UMR CNRS 6226					Section(s) CNRS	12
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	32
Montant Alloué (k€)		1.5					

Organisateurs	*Jean-Claude Guillemin, Grégoire Danger*
Type de Manifestation	*Atelier*
Audience	*Nationale*
Nombre de participants	*100*
Nombre de pays représentés	*1*

: supprimer les mentions inutiles

Résumé de la manifestation:

L'atelier intitulé "Photochimie en orbite" s'est déroulé Salle de l'Espace au CNES le 8 novembre 2011 et a eu pour objectif de rassembler la communauté scientifique concernée par le développement de missions spatiales pour l'étude de processus photochimiques et biochimiques en orbite. Cet atelier a été organisé à la demande de Michel Viso, directeur du programme Exobiologie du CNES, et de la cellule Exobiologie. Le but était de demander à la communauté scientifique intéressée par cette thématique de réfléchir aux avantages et inconvénients scientifiques de telles expérimentations et à leur potentialité pour de futures missions. Cet atelier a été financé par le CNES et le Programme PCMI.

L'irradiation de matière organique dans la gamme UV est primordiale pour l'activation, et l'évolution de celle-ci au sein d'environnements très variables allant des nuages moléculaires, jusqu'au sein des systèmes planétaires comme dans le cas des comètes ou des astéroïdes, ainsi qu'au sein d'atmosphères planétaires. L'atelier s'est déroulé en trois parties.

Dans un premier temps, un état des lieux a été effectué sur les expériences en laboratoire permettant de simuler la réactivité chimique induite par la photochimie au sein d'environnements astrophysiques ou planétaires.

La seconde partie de l'atelier a permis de faire un état des lieux des différentes missions spatiales d'astrochimie en orbite effectuées ou en cours. La plupart de ces missions ont consisté à étudier l'évolution de molécules organiques spécifiques soumises à l'irradiation solaire et autres rayonnements (acides aminés, base nucléique…)

La troisième et dernière partie de l'atelier a consisté en une table ronde centrée autour de la question de l'intérêt scientifique d'effectuer de telles expérimentations en orbite. Pour une partie des personnes présentes, il ressort que les simulations en laboratoire doivent être un préalable à toute mission spatiale. Il a été noté qu'actuellement les apports scientifiques de telles missions sont faibles par rapport aux coûts qu'elles engendrent, surtout en comparaison des expérimentations en laboratoire. Enfin, pour ce qui est des différents systèmes chimiques à étudier et expériences à effectuer, il ressort de la première partie de cet atelier, que nombre de réactions, et notamment d'intérêt exobiologique, peuvent être proposées à partir des expérimentations déjà effectuées en laboratoire.

La complémentarité des expérimentations en orbite et en laboratoire a été particulièrement mise en évidence.

Site web: http://08112012photchimie.free.fr/Atelier_photochimie_CNES/Bienvenue.html

Titre de la Manifestation: Charge Exchange Across the Universe
Dates: 16-17 Nov. 2011 Lieu: IAP (Paris)

Nom du porteur :	Montmerle					Prénom:	Thierry
Courrier électronique	montmerle@iap.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	Institut d'Astrophysique de Paris 98 bis, Bd Arago 75017 Paris					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR7095					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	
Montant Alloué (k€)			3				

Organisateurs	*T. Montmerle et R. Lallement*
Type de Manifestation	*Atelier International*
Audience	*Internationale*
Nombre de participants	*25*
Nombre de pays représentés	*8 (France, Italie, Royaume-Uni, Espagne; Etats-Unis, Chine, Japon, Russie)*

: supprimer les mentions inutiles

Résumé de la manifestation:

There has never been any meeting dedicated to the full range of "astrophysics of charge exchange" on a large scale, a process at play in regions where hot astrophysical plasma comes into contact with neutral gas. Yet, in recent years charge exchange has been invoked, and/or shown to exist, especially from X-ray data, in objects of extremely different scales, from comets and planetary exospheres in the solar system (where the mechanism was first established in an astrophysical context), to the entire heliosphere, interstellar clouds in the halo, massive star-forming regions, outer parts of supernovae remnants, active galaxies such as M82, and even clusters of galaxies. Because charge-exchange X-rays are not generated by hot electrons, but by ions picking up electrons from cold gas at the hot/cool interfaces, they are seen superimposed on hot gas emission itself. We think this is an important new mechanism, of wide interest, to understand the interface between cold and hot phases of the interstellar medium and its analogs, and its role in very different environments. We are organizing a 2-3 day workshop at Institut d'Astrophysique in Paris, to discuss these issues.

Les comptes-rendus de cet atelier (23 articles) ont été publiés dans un numéro spécial de la revue "*Astronomische Nachtrichten*" (N°4, 2012).

Titre de la Manifestation: From Atoms to Pebbles: *Herschel*'s view of Star and Planet Formation
Dates: 20 - 23 Mars 2012 Lieu: Grenoble

Nom du porteur :	Augereau					Prénom:	Jean-Charles
Courrier électronique	augereau@obs.ujf-grenoble.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	IPAG BP 53 38041 Grenoble Cedex 9					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	UMR 5274					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)				4			

Organisateurs	*CNES (représentant : M. Rouzé) et IPAG (représentant : J.-C. Augereau)*
Type de Manifestation	*Symposium*
Audience	*Internationale*
Nombre de participants	*222*
Nombre de pays représentés	*23*

: supprimer les mentions inutiles

Résumé de la manifestation :

À l'approche du troisième anniversaire du lancement de l'observatoire spatial *Herschel*, le CNES et l'IPAG ont organisé un Symposium international exceptionnel intitulé **From Atoms to Pebbles: *Herschel*'s view of Star and Planet Formation**. Cet événement s'est déroulé sur 3,5 jours du 20 au 23 mars 2012, à Grenoble, au cœur des Alpes françaises (http://www.*Herschel*2012.com).

Ce symposium a obtenu un fort succès. Il a rassemblé plus de 220 personnes de 23 pays différents sur la thématique de la formation stellaire et planétaire, avec forte représentation française et la participation de très nombreux jeunes chercheurs qui ont eu l'occasion de montrer leurs travaux, parfois pour le première fois. Les résultats ont été présentés sous la forme de 53 contributions orales, dont 14 revues invitées, et 114 posters qui ont fait l'objet pour environ la moitié d'entre eux d'une contribution orale « blitz » d'une minute avant les pauses café.

Les thèmes scientifiques du symposium ont gravité autour de l'évolution physique et chimique du gaz et de la poussière dans les environnements de formation stellaire et planétaire, et de l'impact des processus de formation stellaire autour des étoiles de faibles et fortes masses sur leurs environnements. Des sessions spécifiques ont été dédiées à la phase pré-effondrement, à la phase proto-stellaire, aux disques proto-planétaires ainsi qu'aux disques de débris et leur connexion avec les exo-planètes.

Les précédentes conférences *Herschel* sur cette thématique datant de l'automne 2010, cette manifestation a été l'occasion de partager les tous derniers résultats obtenus avec *Herschel*, de mesurer leur apport pour la connaissance en formation stellaire et planétaire ainsi que pour préparer l'exploitation de futurs instruments tels ALMA. Enfin, ce symposium a été l'occasion de stimuler de nouveaux efforts de modélisation et simulation, en particulier au travers de questions « provocantes » préparées par les chairmen/women à chaque fin de session et qui ont fait l'objet de débats parfois animés.

Ce symposium ne donne pas lieu à la publication d'actes. Les présentations orales ont été mises à la disposition de l'ESA pour archivage sur leur site *Herschel* et mise en ligne prochaine, avec référencement prévu dans ADS.

Site web: http://www.*Herschel*2012.com

Titre de la Manifestation: Rôle et Mécanismes de Transport du Moment Cinétique dans la Formation et l'Evolution Précoce des Etoiles

Dates: 24-29 Septembre 2012 Lieu: Aussois

Nom du porteur :	Hennebelle					Prénom:	Patrick
Courrier électronique	Patrick.hennebelle@ens.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	LERMA					Institut Principal de rattachement CNRS	INSU
Code (ex: UMR1111)	8812					Section(s) CNRS	17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	34
Montant Alloué (k€)				3			

Organisateurs	*P. Hennebelle et C. Charbonnel*
Type de Manifestation	*Ecole Evry Schatzman 2012*
Audience	*Internationale*
Nombre de participants	*45*
Nombre de pays représentés	*3*

: supprimer les mentions inutiles

Résumé de la manifestation:

L'objectif de l'école a été de faire le point d'une part sur les observations montrant la présence de rotation dans les systèmes astrophysiques que sont les cœurs denses préstellaires, les disques d'accrétion, les jets et les étoiles, et d'autre part de faire le point sur les mécanismes responsables de son transport ainsi que sur ses différents effets. La très prochaine mise en service des grands interféromètres, que sont ALMA et NOEMA, rendent particulièrement opportunes la sensibilisation et la formation des jeunes chercheurs à cette problématique centrale et trans-disciplinaire. En effet, le pouvoir de résolution spatial que vont apporter ces nouveaux instruments, va permettre de sonder des échelles, jusqu'alors inaccessibles, pour lesquelles les mécanismes de transport de moment cinétique jouent un rôle déterminant.

À cet égard, la synthèse que représentera l'école proposée facilitera d'une part l'interprétation physique et astrophysique de ces nouvelles données et d'autre part la préparation aux futures campagnes observationnelles au moyen d'instruments auxquels l'accès sera très compétitif. Par ailleurs, le rapprochement de différentes communautés d'astrophysiciens, induit par le regroupement autour d'un mécanisme physique plutôt qu'autour d'un type d'objets, comme c'est habituellement le cas, favorisera l'émergence de nouvelles collaborations.

Site web: **http://ees2012.ens.fr**

Titre de la Manifestation: Colloque Final de VAMDC (Virtual Atomic and Molecular Data Centre)
Dates: 14 – 16 Novembre 2012 Lieu: Observatoire de Paris, Site de Meudon

Nom du porteur :	Dubernet					Prénom:	Marie-Lise
Courrier électronique	Marie-lise.dubernet@obspm.fr						
Unité de Recherche (Nom et Adresse)	LPMAA, Université Pierre et Marie Curie, Paris					Institut Principal de rattachement CNRS	INP
Code (ex: UMR1111)	UMR7092					Section(s) CNRS	04 - 17
Année:	2009	2010	2011	2012		Section(s) CNU	30- 34
Montant Alloué (k€)				2			

Organisateurs	*M.L. Dubernet*
Type de Manifestation	*Workshop*
Audience	*Internationale*
Nombre de participants	*60*
Nombre de pays représentés	*12*

: supprimer les mentions inutiles

Résumé de la manifestation:

The final VAMDC meeting was held in Observatoire de Meudon November 14-16. Half a day was dedicated to VAMDC achievements, 2 sessions were dedicated to users and PCMI support was partly used to invite an astronomer who presented the CASSIS Tool used for spectral analysis. The objectives of those user sessions were to strengthen the connection between VAMDC and users. One session of the meeting included presentation by potential data providers of the VAMDC database in particular the developing RADAM database, NIST and members of the Plasma community. The second session featured members of the data provider community and reviewed methodologies for data evaluation, this included review of data evaluation techniques currently used by VAMDC databases (KIDA and HITRAN, CDMS) and the emerging project by IAEA to coordinate worldwide atomic and molecular data evaluation. A Special session was arranged with publishers during which ideas of further dissemination of the VAMDC project were discussed (special issue & review articles) and the open access model of VAMDC reviewed. At outreach session was also organised including presentation form the Hands on Universe project.

The total cost of meeting was 12kEuros.

VAMDC Consortium = http://www.vamdc.eu

Site web: **http://voparis-twiki.obspm.fr/twiki/bin/view/VAMDC/PmCycleFour**
http://vamdcmeeting.sciencesconf.org

Annexe 3

Bibliographie

Janvier 2009 - juin 2012

2009

1. Abouaf-Marguin L., Vasserot A.-M., Pardanaud C., Michaut X.; Nuclear spin conversion of H2O trapped in solid xenon at 4.2 K: A new assignment of v2 rovibrational lines; Chemical Physics Letters 480 82 (2009)
2. Abouaf-Marguin L., Vasserot A.M., Lekic A.; FTIR study of nuclear spin conversion of solid normal hydrogen at 4.2K, doped with H2O, CH3F, CH4 and double doped with O2. Evidence of ortho-H2 catalyzed conversion by CH3F; Chemical Physics Letters 470 228 (2009)
3. Abouaf-Marguin L., Vasserot A.-M., Pardanaud C. ; Simulation of the time dependent infrared ν2 mode absorptions of (oH2)n:H2O clusters in O2 doped solid hydrogen at 4.2 K; Journal of Chemical Physics 130, 054503 (2009)
4. Alonso-Albi T., Fuente A., Bachiller R., Neri R., Planesas P., Testi L., Berné O., Joblin C.; Circumstellar disks around Herbig Be stars; Astronomy and Astrophysics 497 117 (2009)
5. Baes M., Madden S. C., Wilson C. D., Lundgren A. A., Breuck C. D.; A new view on the ISM of galaxies: Far-infrared and submillimetre spectroscopy with *Herschel*; New Astronomy Reviews 53 108 (2009)
6. Banerjee R., Vázquez-Semadeni E., Hennebelle P., Klessen R. S.; Clump morphology and evolution in MHD simulations of molecular cloud formation; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 398 1082 (2009)
7. Barstow M. A., Boyce D. D., Barstow J. K., Forbes A. E., Welsh B. Y., Lallement R.; O VI in the local interstellar medium; Astrophysics and Space Science 320 91 (2009)
8. Barstow M. A., Burleigh M. R., Bannister N. J., Lapington J. S., Kowalski M. P., Cruddace R. G., Wood K. S., Auchere F., Bode M. F., Bromage G. E., Gibson B., Collier Cameron A., Cassatella A., Delmotte F., Ravet M.-F., Doyle J. G., Jeffery C. S., Gaensicke B., Jordan C., Kappelmann N., Werner K., Lallement R., de Martino D., Matthews S. A., Phillips K. J. H., Del Zanna G., Orio M., Pace E., Pagano I., Schmitt J. H. M. M., Welsh B. Y.; Stellar and galactic environment survey (SAGE); Astrophysics and Space Science 320 231 (2009)
9. Barstow M. A., Kowalski M. P., Cruddace R. G., Wood K. S., Auchere F., Bannister N. J., Bode M. F., Bromage G. E., Burleigh M. R., Collier Cameron A., Cassatella A., Delmotte F., Doyle J. G., Gaensicke B., Gibson B., Jeffery C. S., Jordan C., Kappelmann N., Lallement R., Lapington J. S., de Martino D., Matthews S. A., Orio M., Pace E., Pagano I., Phillips K. J. H., Ravet M.-F., Schmitt J. H. M. M., Welsh B. Y., Werner K., Del Zanna G.; Stellar And Galactic Environment survey (SAGE); Experimental Astronomy 23 169 (2009)
10. Basire M., Parneix P., Calvo F., Pino T., Bréchignac Ph.; Temperature and Anharmonic Effects on the Infrared Absorption Spectrum from a Quantum Statistical Approach: Application to Naphthalene ; Journal of Physical Chemistry A 113 6947 (2009)
11. Bauerecker S., Dartois E.; Ethane aerosol phase evolution in Titan's atmosphere; Icarus 199 564 (2009)
12. Belhout A., Kiener J., Coc A., Duprat J., Engrand C., Fitoussi C., Gounelle M., Lefebvre-Schuhl A., Séréville N. D., Tatischeff V., Thibaud J.-P., Chabot M., Hammache F., Benhabiles-Mezhoud H.; Erratum: γ-ray production by proton and α-particle induced reactions on C12, O16, Mg24, and Fe [Phys. Rev. C 76, 034607 (2007)]; Physical Review C 80 029902 (2009)
13. Ben Abdallah D., Najar F., Jaidane N., Ben Lakhdar Z., Feautrier N., Spielfiedel A., Lique F.; Ab initio potential energy surfaces for the 1A'; and 3A'; states of the MgH($X^2\sum^+$) + H(^{2}S) system; Chemical Physics Letters 473 39 (2009)
14. Ben Yaghlane S., Hochlaf M.; Theoretical study of the spectroscopy and the metastability of the NS^+ cation; J. Phys. B. 42, 015101 (2009)
15. Bergeat A., Hickson K. M., Daugey N., Caubet P., Costes M. A low temperature investigation of the N(^{4}S°) + NO reaction; Physical Chemistry Chemical Physics 11 8149 (2009)
16. Berné O., Fuente A., Goicoechea J. R., Pilleri P., González-García M., Joblin C.; Mid-Infrared Polycyclic Aromatic Hydrocarbon and H2 Emission as a Probe of Physical Conditions in Extreme Photodissociation Regions; The Astrophysical Journal 706 L160 (2009)
17. Berné O., Joblin C., Fuente A., Ménard F.; What can we learn about protoplanetary disks from analysis of mid-infrared carbonaceous dust emission?; Astronomy and Astrophysics 495 827 (2009)
18. Béroff K., Chabot M., Mezdari F., Martinet G., Tuna T., Désesquelles P., Lepadellec A., Barat M.; Fragmentation of small carbon clusters, a review; Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 267 866 (2009)
19. Bertin M., Martin I., Duvernay F., Theule P., Bossa J. B., Borget F., Illenberger E., Lafosse A., Chiavassa T., Azria R.; Chemistry induced by low-energy electrons in condensed multilayers of ammonia and carbon dioxide; Physical Chemistry Chemical Physics (Incorporating Faraday Transactions) 11 1838 (2009)
20. Bjerkeli P., Liseau R., Olberg M., Falgarone E., Frisk U., Hjalmarson A., Klotz A., Larsson B., Olofsson A. O. H., Olofsson G., Ristorcelli I., Sandqvist A.; Odin observations of water in molecular outflows and shocks; Astronomy and Astrophysics 507 1455 (2009)
21. Boissé P., Rollinde E., Hily-Blant P., Pety J., Federman S. R., Sheffer Y., Pineau Des Forêts G., Roueff E., Andersson B.-G., Hébrard G.; CO emission and variable CH and CH+ absorption towards HD 34078: evidence for a nascent bow shock?; Astronomy and Astrophysics 501 221 (2009)
22. Bossa J. B., Theule P., Duvernay F., Chiavassa T.; NH2CH2OH Thermal Formation in Interstellar Ices Contribution to the 5-8 μm Region Toward Embedded Protostars; The Astrophysical Journal 707 1524 (2009)
23. Bossa J.-B., Duvernay F., Theulé P., Borget F., D'Hendecourt L., Chiavassa T.; Methylammonium methylcarbamate thermal formation in interstellar ice analogs: a glycine salt precursor in protostellar environments; Astronomy and Astrophysics 506 601 (2009)
24. Bot C., Helou G., Boulanger F., Lagache G., Miville-Deschenes M.-A., Draine B., Martin P.; Serendipity Observations of Far Infrared Cirrus Emission in the Spitzer Infrared Nearby Galaxies Survey: Analysis of Far-Infrared Correlations; The Astrophysical Journal 695 469 (2009)
25. Boulanger F., Maillard J. P., Appleton P., Falgarone E., Lagache G., Schulz B., Wakker B. P., Bressan A., Cernicharo J., Charmandaris V., Drissen L., Helou G., Henning T., Lim T. L., Valentjin E. A., Abergel A., Bourlot J. L., Bouzit M., Cabrit S., Combes F., Deharveng J. M., Desmet P., Dole H., Dumesnil C., Dutrey A., Fourmond J. J., Gavila E., Grangé R., Gry C., Guillard P., Guilloteau S., Habart E., Huet B., Joblin C., Langer M., Longval Y., Madden S. C., Martin C., Miville-Deschênes M. A., Pineau Des Forêts G., Pointecouteau E., Roussel H., Tresse L., Verstraete L., Viallefond F., Bertoldi F., Jorgensen J., Bouwman J., Carmona A., Krause O., Baruffolo A., Bonoli C., Bortoletto F., Danese L., Granato G. L., Pernechele C., Rampazzo R., Silva L., Zotti G. D., Pardo J., Spaans M., van der Tak F. F. S., Wild W., Ferlet M. J., Ramsay Howat S. K., Smith M. D., Swinyard B., Wright G. S., Joncas G., Martin P. G., Davis C. J., Draine B. T., Goldsmith P. F., Mainzer A. K., Ogle P., Rinehart S. A., Stacey G. J., Tielens A. G. G. M.; The molecular hydrogen

explorer H2EX; Experimental Astronomy 23 277 (2009)
26. Brites V., Chambaud G., Hochlaf M., Kočišek J., Cayao Diaz J. L., Matejčík Š., Krčma F.; Ionic chemistry of Tetravinylsilane cation (TVS^+) formed by electron impact: theory and experiment; J. Phys. Chem. A 113, 6531 (2009)
27. Brites V., Hochlaf M.; Theoretical treatment of N2H++; Chemical Physics Letters 477 48 (2009)
28. Brites V., Hochlaf M.; Titan's Ionic Species: Theoretical Treatment of N2H+ and Related Ions; Journal of Physical Chemistry A 113 11107 (2009)
29. Brunetto R., Pino T., Dartois E., Cao A.-T., D'Hendecourt L., Strazzulla G., Bréchignac P.; Comparison of the Raman spectra of ion irradiated soot and collected extraterrestrial carbon; Icarus 200 323 (2009)
30. Brunetto R., Rotundi A., Borg J., Baratta G. A., Brucato J. R., Colangeli L., Della Corte V., D'Hendecourt L., Dartois E., Djouadi Z., Mennella V., Palumbo M. E., Palumbo P.; Combined Non Destructive Analyses Applied to Grains from the Stardust Track C2103,10; Meteoritics and Planetary Science Supplement 72 5043 (2009)
31. Bryans P., Kreckel H., Roueff E., Wakelam V., Savin D. W.; Molecular Cloud Chemistry and the Importance of Dielectronic Recombination; The Astrophysical Journal 694 286 (2009)
32. Bulut N., Zanchet A., Honvault P., Bussery-Honvault B., Bañares L.; Time-dependent wave packet and quasiclassical trajectory study of the C(3P)+OH(X 2Π)-->CO(X 1Σ+)+H(2S) reaction at the state-to-state level; Journal of Chemical Physics 130 194303 (2009)
33. Bussery-Honvault B., Dayou F.; Si(3P) + OH(X2Π) Interaction: Long-Range Multipolar Potentials of the Eighteen Spin-Orbit States; Journal of Physical Chemistry A 113 14961 (2009)
34. Cacciani P., Cosleou J., Khelkhal M., Tudorie M., Puzzarini C., Pracna P.; Nuclear spin conversion in NH_3; Physical Review A 80 042507 (2009)
35. Cami J., Sloan G. C., Markwick-Kemper A. J., Zijlstra A. A., Bauschlicher C. W., Matsuura M., Decin L., Hony S.; The Detection of Infrared SiS Bands in Spectra of S Stars; The Astrophysical Journal 690 L122 (2009)
36. Carey S. J., Noriega-Crespo A., Mizuno D. R., Shenoy S., Paladini R., Kraemer K. E., Price S. D., Flagey N., Ryan E., Ingalls J. G., Kuchar T. A., Pinheiro Gonçalves D., Indebetouw R., Billot N., Marleau F. R., Padgett D. L., Rebull L. M., Bressert E., Ali B., Molinari S., Martin P. G., Berriman G. B., Boulanger F., Latter W. B., Miville-Deschenes M. A., Shipman R., Testi L.; MIPSGAL: A Survey of the Inner Galactic Plane at 24 and 70 μm; Publications of the Astronomical Society of the Pacific 121 76 (2009)
37. Carvajal M., Margulès L., Tercero B., Demyk K., Kleiner I., Guillemin J. C., Lattanzi V., Walters A., Demaison J., Wlodarczak G., Huet T. R., Moellendal H., Ilyushin V. V., Cernicharo J.; Rotational spectrum of 13C{2}-methyl formate (HCOO13CH{3}) and detection of the two 13C-methyl formate in Orion; Astronomy and Astrophysics 500 1109 (2009)
38. Cernicharo J., Ceccarelli C., Ménard F., Pinte C., Fuente A.; The Foggy Disks Surrounding Herbig Ae Stars: A Theoretical Study of the H2O Line Spectra; The Astrophysical Journal 703 L123 (2009)
39. Chrostowska, A. ; Mai Nguyen, T. X. ; Alain Dargelos, A. ; Khayar, S. ; Graciaa, A. ; Guillemin, J.-C. ; a,b-Heterosubstituted Acrylonitriles - Electronic Structure Study by UV-Photoelectron Spectroscopy and Quantum Chemical Calculations ; Journal of Physical Chemistry A 113 2387 (2009)
40. Congiu E., Matar E., Kristensen L. E., Dulieu F., Lemaire J. L.; Laboratory evidence for the non-detection of excited nascent H2 in dark clouds; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 397 L96 (2009)
41. Coudert L. H., Roueff E.; Erratum: Linelists for NH3, NH2D, ND2H, and ND3 with quadrupole coupling hyperfine components; Astronomy and Astrophysics 499 347 (2009)
42. Dartois E., Schmitt B.; Carbon dioxide clathrate hydrate FTIR spectrum. Near infrared combination modes for astrophysical remote detection; Astronomy and Astrophysics 504 869 (2009)
43. Dayou F., Larrégaray P., Bonnet L., Rayez J.-C., Arenas P. N., González-Lezana T.; Erratum: ``A comparative study of the Si+O2-->SiO+O reaction dynamics from quasiclassical trajectory and statistical based methods'' [J. Chem. Phys. 128, 174307 (2008)]; Journal of Chemical Physics 130 049901 (2009)
44. Defazio P., Petrongolo C., Bussery-Honvault B., Honvault P.; Born-Oppenheimer quantum dynamics of the C(1D)+H2 reaction on the CH2 a~ 1A1 and b~ 1B1 surfaces; Journal of Chemical Physics 131 114303 (2009)
45. Deharveng L., Zavagno A., Schuller F., Caplan J., Pomarès M., De Breuck C.; Star formation around RCW 120, the perfect bubble; Astronomy and Astrophysics 496 177 (2009)
46. Demaison J., Moellendal H., Guillemin J.-C.; Equilibrium CAs and CSb bond lengths; Journal of Molecular Structure 930 21 (2009)
47. di Folco E., Dutrey A., Chesneau O., Wolf S., Schegerer A., Leinert C., Lopez B.; The flared inner disk of the Herbig Ae star AB Aurigae revealed by VLTI/MIDI in the N-band; Astronomy and Astrophysics 500 1065 (2009)
48. Djouadi Z., Borg J., D'Hendecourt L., Deboffle D., Baklouti D., Depecker C., Leroux H.; Gas-Surface Interaction in the Solar Nebula: Contribution of the PRONEXT Instrument; Meteoritics and Planetary Science Supplement 72 5046 (2009)
49. Dubernet M.-L., Daniel F., Grosjean A., Lin C. Y.; Rotational excitation of ortho-H{2}O by para-H{2} (j{2} = 0, 2, 4, 6, 8) at high temperature; Astronomy and Astrophysics 497 911 (2009)
50. Falgarone E., Pety J., Hily-Blant P.; Intermittency of interstellar turbulence: extreme velocity-shears and CO emission on milliparsec scale; Astronomy and Astrophysics 507 355 (2009)
51. Faure A., Tennyson J., Kokoouline V., Greene C. H.; Rotational excitation of interstellar molecular ions by electrons; Journal of Physics Conference Series 192 012016 (2009)
52. Ferrière K.; Interstellar magnetic fields in the Galactic center region; Astronomy and Astrophysics 505 1183 (2009)
53. Fillion J.-H., Amiaud L., Congiu E., Dulieu F., Momeni A., Lemaire J.-L.; D2 desorption kinetics on amorphous solid water: from compact to porous ice films; Physical Chemistry Chemical Physics (Incorporating Faraday Transactions) 11 4396 (2009)
54. Flagey N., Noriega-Crespo A., Boulanger F., Carey S. J., Brooke T. Y., Falgarone E., Huard T. L., McCabe C. E., Miville-Deschênes M. A., Padgett D. L., Paladini R., Rebull L. M.; Evidence for Dust Evolution Within the Taurus Complex from Spitzer Images; The Astrophysical Journal 701 1450 (2009)
55. Gabriel O., van den Dungen J. J. A., Roueff E., Abgrall H., Engeln R.; Lyman transitions of high rovibrationally excited H2, HD and D2 molecules; Journal of Molecular Spectroscopy 253 64 (2009)
56. Gerin M., Goicoechea J. R., Pety J., Hily-Blant P.; HCO mapping of the Horsehead: tracing the illuminated dense molecular cloud surfaces; Astronomy and Astrophysics 494 977 (2009)
57. Gerin M., Marcelino N., Biver N., Roueff E., Coudert L. H., Elkeurti M., Lis D. C., Bockelée-Morvan D.; Detection of 15NH{2}D in dense cores: a new tool for measuring the 14N/15N ratio in the cold ISM; Astronomy and Astrophysics 498 L9 (2009)

58. Godard B., Falgarone E., Pineau Des Forêts G.; Models of turbulent dissipation regions in the diffuse interstellar medium; Astronomy and Astrophysics 495 847 (2009)
59. Goicoechea J. R., Pety J., Gerin M., Hily-Blant P., Le Bourlot J.; The ionization fraction gradient across the Horsehead edge: an archetype for molecular clouds; Astronomy and Astrophysics 498 771 (2009)
60. González-Lezana T., Honvault P., Jambrina P. G., Aoiz F. J., Launay J.-M.; Effects of the rotational excitation of D2 and of the potential energy surface on the H++D2-->HD+D+ reaction; Journal of Chemical Physics 131 044315 (2009)
61. Gordon K. D., Bot C., Muller E., Misselt K. A., Bolatto A., Bernard J.-P., Reach W., Engelbracht C. W., Babler B., Bracker S., Block M., Clayton G. C., Hora J., Indebetouw R., Israel F. P., Li A., Madden S., Meade M., Meixner M., Sewilo M., Shiao B., Smith L. J., van Loon J. T., Whitney B. A.; The Dust-to-Gas Ratio in the Small Magellanic Cloud Tail; The Astrophysical Journal 690 L76 (2009)
62. Goubet M., Motiyenko R. A., Réal F., Margulès L., Huet T. R., Asselin P., Soulard P., Krasnicki A., Kisiel Z., Alekseev E. A.; Influence of the geometry of a hydrogen bond on conformational stability: a theoretical and experimental study of ethyl carbamate; Physical Chemistry Chemical Physics (Incorporating Faraday Transactions) 11 1719 (2009)
63. Grady C. A., Schneider G., Sitko M. L., Williger G. M., Hamaguchi K., Brittain S. D., Ablordeppey K., Apai D., Beerman L., Carpenter W. J., Collins K. A., Fukagawa M., Hammel H. B., Henning T., Hines D., Kimes R., Lynch D. K., Ménard F., Pearson R., Russell R. W., Silverstone M., Smith P. S., Troutman M., Wilner D., Woodgate B., Clampin M.; Revealing the Structure of a Pre-Transitional Disk: The Case of the Herbig F Star SAO 206462 (HD 135344B); The Astrophysical Journal 699 1822 (2009)
64. Guillard P., Boulanger F., Pineau Des Forêts G., Appleton P. N.; H2 formation and excitation in the Stephan's Quintet galaxy-wide collision; Astronomy and Astrophysics 502 515 (2009)
65. Gupta A., Galeazzi M., Koutroumpa D., Smith R., Lallement R.; Properties of the Diffuse X-ray Background toward MBM20 with Suzaku; The Astrophysical Journal 707 644 (2009)
66. Hébrard E., Dobrijevic M., Pernot P., Carrasco N., Bergeat A., Hickson K. M., Canosa A., Le Picard S. D., Sims I. R.; How Measurements of Rate Coefficients at Low Temperature Increase the Predictivity of Photochemical Models of Titan's Atmosphere; Journal of Physical Chemistry A 113 11227 (2009)
67. Hennebelle P., Chabrier G.; Analytical Theory for the Initial Mass Function. II. Properties of the Flow; The Astrophysical Journal 702 1428 (2009)
68. Hennebelle P., Ciardi A.; Disk formation during collapse of magnetized protostellar cores; Astronomy and Astrophysics 506 L29 (2009)
69. Herpin F., Marseille M., Wakelam V., Bontemps S., Lis D. C.; S-bearing molecules in massive dense cores; Astronomy and Astrophysics 504 853 (2009)
70. Hersant F., Wakelam V., Dutrey A., Guilloteau S., Herbst E.; Cold CO in circumstellar disks. On the effects of photodesorption and vertical mixing; Astronomy and Astrophysics 493 L49 (2009)
71. Hily-Blant P., Falgarone E.; Intermittency of interstellar turbulence: parsec-scale coherent structure of intense, velocity shear; Astronomy and Astrophysics 500 L29 (2009)
72. Hony S., Heras A. M., Molster F. J., Smolders K.; An ISO/SWS study of the dust composition around S stars. A novel view of S-star dust; Astronomy and Astrophysics 501 609 (2009)
73. Hurtado, M. ; Yanez, M. ; Guillemin, J.-C. ; Enhanced acidity of cyclopenta-2,4-dienylborane and its Al and Ga analogues. The role of aromatization ; Physical Chemistry and Chemical Physics, 11, 8759 (2009)
74. Ingleby L., Calvet N., Bergin E., Yerasi A., Espaillat C., Herczeg G., Roueff E., Abgrall H., Hernández J., Briceño C., Pascucci I., Miller J., Fogel J., Hartmann L., Meyer M., Carpenter J., Crockett N., McClure M.; Far-Ultraviolet H2 Emission from Circumstellar Disks; The Astrophysical Journal 703 L137 (2009)
75. Jean P., Gillard W., Marcowith A., Ferrière K.; Positron transport in the interstellar medium; Astronomy and Astrophysics 508 1099 (2009)
76. Joalland B., Simon A., Marsden C. J., Joblin C.; Signature of [SiPAH]+ π-complexes in the interstellar medium; Astronomy and Astrophysics 494 969 (2009)
77. Jorfi M., Honvault P., Bargueño P., González-Lezana T., Larrégaray P., Bonnet L., Halvick P.; On the statistical behavior of the O+OH-->H+O2 reaction: A comparison between quasiclassical trajectory, quantum scattering, and statistical calculations; Journal of Chemical Physics 130 184301 (2009)
78. Jorfi M., Honvault P., Halvick P.; Quasi-classical determination of integral cross-sections and rate constants for the N+OH→NO+H reaction; Chemical Physics Letters 471 65 (2009)
79. Jorfi M., Honvault P., Halvick P.; Quasiclassical trajectory calculations of differential cross sections and product energy distributions for the N+OH → NO+H reaction; Journal of Chemical Physics 131 094302 (2009)
80. Jorfi M., Honvault P.; State-to-State Quantum Reactive Scattering Calculations and Rate Constant for Nitrogen Atoms in Collision with NO Radicals at Low Temperatures; Journal of Physical Chemistry A 113 10648 (2009)
81. Krim, L., Lasne, J., Laffon, C., Parent Ph.; Influence of Water in the UV-Induced Chemistry of Methanol in the Solid Phase; Journal of Physical Chemistry A 113 8979 (2009)
82. Klos J., Lique F., Alexander M. H.; Temperature dependence of rotational excitation rate coefficients of SH(X2Π) in collision with He; Chemical Physics Letters 476 135 (2009)
83. Koutroumpa D., Collier M. R., Kuntz K. D., Lallement R., Snowden S. L.; Solar Wind Charge Exchange Emission from the Helium Focusing Cone: Model to Data Comparison; The Astrophysical Journal 697 1214 (2009)
84. Koutroumpa D., Lallement R., Kharchenko V., Dalgarno A.; The Solar Wind Charge-eXchange Contribution to the Local Soft X-ray Background. Model to Data Comparison in the 0.1-1.0 keV Band; Space Science Reviews 143 217 (2009)
85. Koutroumpa D., Lallement R., Raymond J. C., Kharchenko V.; The Solar Wind Charge-Transfer X-Ray Emission in the 1/4 keV Energy Range: Inferences on Local Bubble Hot Gas at Low Z; The Astrophysical Journal 696 1517 (2009)
86. Lagadec E., Zijlstra A. A., Sloan G. C., Wood P. R., Matsuura M., Bernard-Salas J., Blommaert J. A. D. L., Cioni M.-R. L., Feast M. W., Groenewegen M. A. T., Hony S., Menzies J. W., van Loon J. T., Whitelock P. A.; Metal-rich carbon stars in the Sagittarius dwarf spheroidal galaxy; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 396 598 (2009)
87. Lallement R.; Some Observations Related to the Origin and Evolution of the Local Bubble/Local ISM; Space Science Reviews 143 427 (2009)
88. Lattelais M., Pauzat F., Ellinger Y., Ceccarelli C.; Interstellar Complex Organic Molecules and the Minimum Energy Principle; The Astrophysical Journal 696 L133 (2009)
89. Launhardt R., Pavlyuchenkov Y., Gueth F., Chen X., Dutrey A., Guilloteau S., Henning T., Piétu V., Schreyer K., Semenov D.; Rotating molecular outflows: the young T Tauri star in CB 26; Astronomy and Astrophysics 494 147 (2009)

90. Lauvergnat D., Hochlaf M.; Theoretical spectroscopy of trans-HNNH+ and isotopomers; Journal of Chemical Physics 130 224312 (2009)
91. Lawrence J. S., Ashley M. C. B., Bailey J., Barrado y Navascues D., Bedding T. R., Bland-Hawthorn J., Bond I., Boulanger F., Bouwens R., Bruntt H., Bunker A., Burgarella D., Burton M. G., Busso M., Coward D., Cioni M.-R., Durand G., Eiroa C., Epchtein N., Gehrels N., Gillingham P., Glazebrook K., Haynes R., Kiss L., Lagage P. O., Le Bertre T., Mackay C., Maillard J. P., McGrath A., Minier V., Mora A., Olsen K., Persi P., Pimbblet K., Quimby R., Saunders W., Schmidt B., Stello D., Storey J. W. V., Tinney C., Tremblin P., Wheeler J. C., Yock P.; The Science Case for PILOT I: Summary and Overview; Publications of the Astronomical Society of Australia 26 379 (2009)
92. Le Petit F., Barzel B., Biham O., Roueff E., Le Bourlot J.; Incorporation of stochastic chemistry on dust grains in the Meudon PDR code using moment equations. I. Application to the formation of H{2} and HD; Astronomy and Astrophysics 505 1153 (2009)
93. Leonori F., Petrucci R., Balucani N., Casavecchia P., Rosi M., Berteloite C., Le Picard S. D., Canosa A., Sims I. R.; Observation of organosulfur products (thiovinoxy, thioketene and thioformyl) in crossed-beam experiments and low temperature rate coefficients for the reaction S(1D) + C2H4; Physical Chemistry Chemical Physics (Incorporating Faraday Transactions) 11 4701 (2009)
94. Leonori F., Petrucci R., Balucani N., Casavecchia P., Rosi M., Skouteris D., Berteloite C., Le Picard S. D., Canosa A., Sims I. R.; Crossed-Beam Dynamics, Low-Temperature Kinetics, and Theoretical Studies of the Reaction S(1D) + C2H4; Journal of Physical Chemistry A 113 15328 (2009)
95. Libert Y., Gérard E., Le Bertre T., Matthews L., Thum C., Winters J. M.; CO and H I observations of an enigmatic interstellar cloud; Astronomy and Astrophysics 500 1131 (2009)
96. Lique F., Jorfi M., Honvault P., Halvick P., Lin S. Y., Guo H., Xie D. Q., Dagdigian P. J., Kłos J., Alexander M. H.; O+OH-->O2+H: A key reaction for interstellar chemistry. New theoretical results and comparison with experiment; Journal of Chemical Physics 131 221104 (2009)
97. Lique F., van der Tak F. F. S., Kłos J., Bulthuis J., Alexander M. H.; The importance of non-LTE models for the interpretation of observations of interstellar NO; Astronomy and Astrophysics 493 557 (2009)
98. Loison J.-C., Bergeat A.; Rate constants and the H atom branching ratio of the reactions of the methylidyne CH(X2Π) radical with C2H2, C2H4, C3H4 (methylacetylene and allene), C3H6 (propene) and C4H8 (trans-butene); Physical Chemistry Chemical Physics (Incorporating Faraday Transactions) 11 655 (2009)
99. Moellendal H., Konovalov A., Guillemin J.-C.; Synthesis and Microwave Spectrum of (2-Chloroethyl)phosphine (ClCH2CH2PH2); Journal of Physical Chemistry A 113 12904 (2009)
100. Manset N., Bastien P., Ménard F., Bertout C., Le van Suu A., Boivin L.; Photometric and polarimetric clues to the circumstellar environment of RY Lupi; Astronomy and Astrophysics 499 137 (2009)
101. Marcelino N., Cernicharo J., Tercero B., Roueff E.; Discovery of Fulminic Acid, HCNO, in Dark Clouds; The Astrophysical Journal 690 L27 (2009)
102. Marchal R., Bégué D., Pouchan C., Guillemin J.-C., Benidar A.; Vibrational spectra of vinylarsine: A joint IR experimental and anharmonic theoretical study; Chemical Physics Letters 480 31 (2009)
103. Maret S., Bergin E. A., Neufeld D. A., Green J. D., Watson D. M., Harwit M. O., Kristensen L. E., Melnick G. J., Sonnentrucker P., Tolls V., Werner M. W., Willacy K., Yuan Y.; Spitzer Mapping of Molecular Hydrogen Pure Rotational Lines in NGC 1333: A Detailed Study of Feedback in Star Formation; The Astrophysical Journal 698 1244 (2009)
104. Maret S., Faure A., Scifoni E., Wiesenfeld L.; On the robustness of the ammonia thermometer; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 399 425 (2009)
105. Margulès L., Coudert L. H., Moellendal H., Guillemin J.-C., Huet T. R., Janeckovà R.; The microwave spectrum of the mono deuterated species of methyl formate HCOOCHD; Journal of Molecular Spectroscopy 254 55 (2009)
106. Margulès L., Motiyenko R., Demyk K., Tercero B., Cernicharo J., Sheng M., Weidmann M., Gripp J., Mäder H., Demaison J.; Rotational spectrum of deuterated and 15N ethyl cyanides: CH_3CHDCN and CH_2DCH_2CN and of CH_3CH_2C15N; Astronomy and Astrophysics 493 565 (2009)
107. Margulès L., Perrin A., Janeckovà R., Bailleux S., Endres C. P., Giesen T. F., Schlemmer S.; Rotational transitions within the 21, 31, 41, and 61states of formaldehyde H212C16O This article is part of a Special Issue on Spectroscopy at the University of New Brunswick in honour of Colan Linton and Ron Lees.; Canadian Journal of Physics 87 425 (2009)
108. Marouani S., Koussa H., Bahri M., Hochlaf M., Batis H ; Ab initio calculation on the rate constants of the reaction H_2O_2 + Cl; J. Mol. Structure THEOCHEM 905, 70 (2009).
109. Martin-Zaïdi C., Habart E., Augereau J.-C., Ménard F., Lagage P.-. O., Pantin E., Olofsson J.; Molecular Hydrogen in the Disk of the Herbig Ae Star HD 97048; The Astrophysical Journal 695 1302 (2009)
110. Minier V., André P., Bergman P., Motte F., Wyrowski F., Le Pennec J., Rodriguez L., Boulade O., Doumayrou E., Dubreuil D., Gallais P., Hamon G., Lagage P.-O., Lortholary M., Martignac J., Revéret V., Roussel H., Talvard M., Willmann G., Olofsson H.; Evidence of triggered star formation in G327.3-0.6. Dust-continuum mapping of an infrared dark cloud with P-ArTéMiS; Astronomy and Astrophysics 501 L1 (2009)
111. Møllendal, H. ; Khater, B. ; Guillemin, J.-C. Synthesis, Microwave Spectrum and Conformational Equilibrium of Propa-1,2-dienethiol (H_2C=C=CHSH) ; Journal of Physical Chemistry A 113, 5906 (2009)
112. Mokrane H., Chaabouni H., Accolla M., Congiu E., Dulieu F., Chehrouri M., Lemaire J. L.; Experimental Evidence for Water Formation Via Ozone Hydrogenation on Dust Grains at 10 K; The Astrophysical Journal 705 L195 (2009)
113. Moreno R., Lellouch E., Forget F., Encrenaz T., Guilloteau S., Millour E.; Wind measurements in Mars' middle atmosphere: IRAM Plateau de Bure interferometric CO observations; Icarus 201 549 (2009)
114. Muñoz Caro G. M., Dartois E.; A tracer of organic matter of prebiotic interest in space, made from UV and thermal processing of ice mantles; Astronomy and Astrophysics 494 109 (2009)
115. Muñoz Caro G. M., Dartois E.; Is the Carbon Bulk of Cometary Stardust Grains a Direct Product from Uv-Photoprocessing of Icy Grain Mantles?; Advances in Geosciences, Volume 15: Planetary Science (PS) 15 197 (2009)
116. Najar F., Ben Abdallah D., Jaidane N., Ben Lakhdar Z., Chambaud G., Hochlaf M.; Rotational excitation and de-excitation of C2(X 1Σg+) by para-H2(j=0); Journal of Chemical Physics 130 204305 (2009)
117. Ndome H., Hochlaf M.; Ionospheric chemistry: Theoretical treatment of ONOO+ and of NO3+; Journal of Chemical Physics 130 204301 (2009)
118. Nesvadba N. P. H., Neri R., De Breuck C., Lehnert M. D., Downes D., Walter F., Omont A., Boulanger F., Seymour N.; CO line emission in the halo of a radio galaxy at z = 2.6; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 395 L16 (2009)

119. Neufeld D. A., Nisini B., Giannini T., Melnick G. J., Bergin E. A., Yuan Y., Maret S., Tolls V., Güsten R., Kaufman M. J.; Spitzer Spectral Line Mapping of Protostellar Outflows. I. Basic Data and Outflow Energetics; The Astrophysical Journal 706 170 (2009)
120. Noble-Eddy, R. ; Masters, S. L. ; Rankin, D. W. H. ; Wann, D. A. ; Robertson, H. E. ; Khater, B. ; Guillemin, J.-C. ; Molecular structures and bonding trends in primary phosphines studied by gas-phase electron diffraction and quantum-chemical calculations ; Inorganic Chemistry 48, 8603 (2009)
121. Nsangou M., Senent M. L., Hochlaf M.; Theoretical investigations of the cyanogen anion; Chemical Physics 355 164 (2009)
122. Oliveira J. M., van Loon J. T., Chen C.-H. R., Tielens A. G. G. M., Sloan G. C., Woods P. M., Kemper F., Indebetouw R., Gordon K. D., Boyer M. L., Shiao B., Madden S., Speck A. K., Meixner M., Marengo M.; Ice Chemistry in Embedded Young Stellar Objects in the Large Magellanic Cloud; The Astrophysical Journal 707 1269 (2009)
123. Pagani L., Daniel F., Dubernet M.-L.; On the frequency of N{_2}H+ and N{_2}D{^+}; Astronomy and Astrophysics 494 719 (2009)
124. Pagani L., Vastel C., Hugo E., Kokoouline V., Greene C. H., Bacmann A., Bayet E., Ceccarelli C., Peng R., Schlemmer S.; Chemical modeling of L183(L134N): an estimate of the ortho/para H_2 ratio; Astronomy and Astrophysics 494 623 (2009)
125. Parise B., Leurini S., Schilke P., Roueff E., Thorwirth S., Lis D. C.; Deuterium chemistry in the <ASTROBJ>Orion Bar</ASTROBJ> PDR. ``Warm'' chemistry starring CH{2}D^+; Astronomy and Astrophysics 508 737 (2009)
126. Pilleri P., Herberth D., Giesen T. F., Gerin M., Joblin C., Mulas G., Malloci G., Grabow J.-U., Brünken S., Surin L., Steinberg B. D., Curtis K. R., Scott L. T.; Search for corannulene (C20H10) in the Red Rectangle; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 397 1053 (2009)
127. Pinte C., Harries T. J., Min M., Watson A. M., Dullemond C. P., Woitke P., Ménard F., Durán-Rojas M. C.; Benchmark problems for continuum radiative transfer. High optical depths, anisotropic scattering, and polarisation; Astronomy and Astrophysics 498 967 (2009)
128. Pirali O., Vervloet M., Mulas G., Malloci G., Joblin C.; High-resolution infrared absorption spectroscopy of thermally excited naphthalene. Measurements and calculations of anharmonic parameters and vibrational interactions; Physical Chemistry Chemical Physics (Incorporating Faraday Transactions) 11 3443 (2009)
129. Pomarès M., Zavagno A., Deharveng L., Cunningham M., Jones P., Kurtz S., Russeil D., Caplan J., Comerón F.; Triggered star formation on the borders of the Galactic Hii region RCW 82; Astronomy and Astrophysics 494 987 (2009)
130. Puga E., Hony S., Neiner C., Lenorzer A., Hubert A.-M., Waters L. B. F. M., Cusano F., Ripepi V.; Spitzer/IRAC view of Sh 2-284. Searching for evidence of triggered star formation in an isolated region in the outer Milky Way; Astronomy and Astrophysics 503 107 (2009)
131. Purcell C. R., Minier V., Longmore S. N., André P., Walsh A. J., Jones P., Herpin F., Hill T., Cunningham M. R., Burton M. G.; Multi-generation massive star-formation in NGC 3576; Astronomy and Astrophysics 504 139 (2009)
132. Rapacioli M., Spiegelman F., Talbi D., Mineva T., Goursot A., Heine T., Seifert G.; Correction for dispersion and Coulombic interactions in molecular clusters with density functional derived methods: Application to polycyclic aromatic hydrocarbon clusters; Journal of Chemical Physics 130 244304 (2009)
133. Rapacioli M., Spiegelman F.; Modelling singly ionized coronene clusters; European Physical Journal D 52 55 (2009)
134. Roueff E., Herbst E.; Molecular ions in astrophysics; Journal of Physics Conference Series 192 012008 (2009)
135. Rubin D., Hony S., Madden S. C., Tielens A. G. G. M., Meixner M., Indebetouw R., Reach W., Ginsburg A., Kim S., Mochizuki K., Babler B., Block M., Bracker S. B., Engelbracht C. W., For B.-Q., Gordon K., Hora J. L., Leitherer C., Meade M., Misselt K., Sewilo M., Vijh U., Whitney B.; A spatially resolved study of photoelectric heating and [C II] cooling in the LMC. Comparison with dust emission as seen by SAGE; Astronomy and Astrophysics 494 647 (2009)
136. Sauter J., Wolf S., Launhardt R., Padgett D. L., Stapelfeldt K. R., Pinte C., Duchêne G., Ménard F., McCabe C.-E., Pontoppidan K., Dunham M., Bourke T. L., Chen J.-H.; The circumstellar disc in the Bok globule CB 26. Multi-wavelength observations and modelling of the dust disc and envelope; Astronomy and Astrophysics 505 1167 (2009)
137. Schaefer G. H., Dutrey A., Guilloteau S., Simon M., White R. J.; A Millimeter-wave Interferometric Study of Dust and CO Disks Around Late Spectral Type Stars in Taurus-Auriga; The Astrophysical Journal 701 698 (2009)
138. Schmidt T. W., Pino T., Bréchignac Ph. ; The C-H Stretch Intensities of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Cations. Origins and Astrophysical Implications ; Journal of Physical Chemistry A 113 3535 (2009)
139. Seperuelo Duarte E., Boduch P., Rothard H., Been T., Dartois E., Farenzena L. S., da Silveira E. F.; Heavy ion irradiation of condensed CO2: sputtering and molecule formation; Astronomy and Astrophysics 502 599 (2009)
140. Shafir D., Novotny S., Buhr H., Altevogt S., Faure A., Grieser M., Harvey A. G., Heber O., Hoffmann J., Kreckel H., Lammich L., Nevo I., Pedersen H. B., Rubinstein H., Schneider I. F., Schwalm D., Tennyson J., Wolf A., Zajfman D.; Rotational Cooling of HD+ Molecular Ions by Superelastic Collisions with Electrons; Physical Review Letters 102 223202 (2009)
141. Simon A. and Joblin C., Photodissociation of [Fex(C24H12)y]+ complexes in the PIRENEA set-up : iron-PAH clusters as good candidates for interstellar very small grains, J. Phys. Chem. A 113 (2009), 4878-4888
142. Spielfiedel A., Senent M.-L., Dayou F., Balança C., Cressiot-Vincent L., Faure A., Wiesenfeld L., Feautrier N.; A five-dimensional potential-energy surface for the rotational excitation of SO2 by H2 at low temperatures; Journal of Chemical Physics 131 014305 (2009)
143. Swinyard B., Nakagawa T., Merken P., Royer P., Souverijns T., Vandenbussche B., Waelkens C., Davis P., Di Francesco J., Halpern M., Houde M., Johnstone D., Joncas G., Naylor D., Plume R., Scott D., Abergel A., Bensammar S., Braine J., Buat V., Burgarella D., Cais P., Dole H., Duband L., Elbaz D., Gerin M., Giard M., Goicoechea J., Joblin C., Jones A., Kneib J. P., Lagache G., Madden S., Pons R., Pajot F., Rambaud D., Ravera L., Ristorcelli I., Rodriguez L., Vives S., Zavagno A., Geis N., Krause O., Lutz D., Poglitsch A., Raab W., Stegmaier J., Sturm E., Tuffs R., Lee H. M., Koo B.-C., Im M., Pak S., Han W., Park J.-H., Nam U.-W., Jin H., Lee D.-H., Yuk I.-S., Lee S., Aikawa Y., Arimoto N., Doi Y., Enya K., Fukagawa M., Furusho R., Hasegawa S., Hayashi M., Honda Kanagawa M., Ida S., Imanishi, Masatoshi, Inutsuka S.-i., Izumiura H., Kamaya H., Kaneda H., Kasuga T., Kataza H., Kawabata K., Kawada M., Kawakita H., Kii T., Koda J., Kodama T., Kokubo E., Komatsu, Keiji, Matsuhara H., Matsumoto T., Matsuura S., Miyata T., Miyata M., Hiroshi, Nagata H., Nagata T., Nakajima T., Naoto K., Nishi R., Noda A., Okamoto A., Okamoto Y. K., Omukai K., Onaka T., Ootsubo T., Ouchi M., Saito H., Sato Y., Sako S., Sekiguchi T., Shibai H., Sugita H., Sugitani K., Susa H., Pyo T.-s., Tamura M., Ueda Y., Ueno M., Wada T., Watanabe J., Yamada T., Yamamura I., Yoshida N., Yoshimi K., Yui Y., Benedettini M., Cerulli R., Di Giorgio A., Molinari S., Orfei R., Pezzuto S., Piazzo L., Saraceno P.,

Spinoglio L., de Graauw T., de Korte P., Helmich F., Hoevers H., Huisman R., Shipman R., van der Tak F., van der Werf P., Wild W., Acosta-Pulido J., Cernicharo J., Herreros J., Martin-Pintado J., Najarro F., Perez-Fourmon I., Ramon Pardo J., Gomez F., Castro Rodriguez N., Ade P., Barlow M., Clements D., Ferlet M., Fraser H., Griffin D., Griffin M., Hargrave P., Isaak K., Ivison R., Mansour M., Laniesse J., Mauskopf P., Morozov D., Oliver S., Orlando A., Page M., Popescu C., Serjeant S., Sudiwala R., Rigopoulou D., Walker I., White G., Viti S., Winter B., Bock J., Bradford M., Harwit M., Holmes W.; The space infrared telescope for cosmology and astrophysics: SPICA A joint mission between JAXA and ESA; Experimental Astronomy 23 193 (2009)

144. Talbi D., Hickman A. P., Kashinski D., Malenda R. F., Redondo P.; A comparative study of the DR reactions of c-C3H+3 and l-C3H+3: Preliminary theoretical studies; Journal of Physics Conference Series 192 012014 (2009)
145. Talbi D., Smith I. W. M.; A theoretical analysis of the reaction between CN radicals and NH3; Physical Chemistry Chemical Physics (Incorporating Faraday Transactions) 11 8477 (2009)
146. Talbi D.; A quantum chemical study of the N2H+ + e-→NH + N reaction; Journal of Physics Conference Series 192 012015 (2009)
147. Terebey S., Fich M., Noriega-Crespo A., Padgett D. L., Fukagawa M., Audard M., Brooke T., Carey S., Evans N. J., II, Guedel M., Hines D., Huard T., Knapp G. R., McCabe C.-E., Menard F., Monin J.-L., Rebull L.; Far-Infrared Observations of the Very Low Luminosity Embedded Source L1521F-IRS in the Taurus Star-Forming Region; The Astrophysical Journal 696 1918 (2009)
148. Troscompt N., Faure A., Maret S., Ceccarelli C., Hily-Blant P., Wiesenfeld L.; Constraining the ortho-to-para ratio of H2 with anomalous H_2CO absorption; Astronomy and Astrophysics 506 1243 (2009)
149. Troscompt N., Faure A., Wiesenfeld L., Ceccarelli C., Valiron P.; Rotational excitation of formaldehyde by hydrogen molecules: ortho-H_2CO at low temperature; Astronomy and Astrophysics 493 687 (2009)
150. Varambhia H. N., Gupta M., Faure A., Baluja K. L., Tennyson J.; Electron collision with the silicon monoxide (SiO) molecule using the R-matrix method; Journal of Physics B Atomic Molecular Physics 42 095204 (2009)
151. Verhoelst T., van der Zypen N., Hony S., Decin L., Cami J., Eriksson K.; The dust condensation sequence in red supergiant stars; Astronomy and Astrophysics 498 127 (2009)
152. Wakelam V., Loison J.-C., Herbst E., Talbi D., Quan D., Caralp F.; A sensitivity study of the neutral-neutral reactions C + C{3} and C + C{5} in cold dense interstellar clouds; Astronomy and Astrophysics 495 513 (2009)
153. Walters A., Müller H. S. P., Lewen F., Schlemmer S.; Submillimeter-wave spectrum of anti-anti and anti-gauche diethyl ether; Journal of Molecular Spectroscopy 257 24 (2009)
154. Welsh B. Y., Wheatley J., Lallement R.; High-Resolution Na I and Ca II Absorption Observations toward M13, M15, and M33; Publications of the Astronomical Society of the Pacific 121 606 (2009)
155. Yu S., Drouin B. J., Pearson J. C., Pickett H. M., Lattanzi V., Walters A.; Terahertz Spectroscopy and Global Analysis of the Bending Vibrations of Acetylene 12C2D2; The Astrophysical Journal 698 2114 (2009)
156. Zanchet A., Bussery-Honvault B., Jorfi M., Honvault P.; Study of the C(3P) + OH(X2Π) → CO(a3Π) + H(2S) reaction: fully global ab initio potential energy surfaces of the 12A' and 14A' excited states and non adiabatic couplings; Physical Chemistry Chemical Physics (Incorporating Faraday Transactions) 11 6182 (2009)
157. Zhang R., Faure A., Tennyson J.; Electron and positron collisions with polar molecules: studies with the benchmark water molecule; Physica Scripta 80 015301 (2009)

2010

1. Abergel A., Arab H., Compiègne M., Kirk J. M., Ade P., Anderson L. D., André P., Baluteau J.-P., Bernard J.-P., Blagrave K., Bontemps S., Boulanger F., Cohen M., Cox P., Dartois E., Davis G., Emery R., Fulton T., Gry C., Habart E., Huang M., Joblin C., Jones S. C., Lagache G., Lim T., Madden S., Makiwa G., Martin P., Miville-Deschênes M.-A., Molinari S., Moseley H., Motte F., Naylor D., Okumura K., Pinheiro Gonçalves D., Polehampton E., Rodon J., Russeil D., Saraceno P., Sauvage M., Sidher S., Spencer L., Swinyard B., Ward-Thompson D., White G. J., Zavagno A.; Evolution of interstellar dust with *Herschel*. First results in the photodissociation regions of NGC 7023; Astronomy and Astrophysics 518 L96 (2010)
2. Ade P. A. R., Savini G., Sudiwala R., Tucker C., Catalano A., Church S., Colgan R., Desert F. X., Gleeson E., Jones W. C., Lamarre J.-M., Lange A., Longval Y., Maffei B., Murphy J. A., Noviello F., Pajot F., Puget J.-L., Ristorcelli I., Woodcraft A., Yurchenko V.; *Planck* pre-launch status: The optical architecture of the HFI; Astronomy and Astrophysics 520 A11 (2010)
3. Agúndez M., Cernicharo J., Guélin M., Kahane C., Roueff E., Kłos J., Aoiz F. J., Lique F., Marcelino N., Goicoechea J. R., González García M., Gottlieb C. A., McCarthy M. C., Thaddeus P.; Astronomical identification of CN-, the smallest observed molecular anion; Astronomy and Astrophysics 517 L2 (2010)
4. Agúndez M., Cernicharo J., Guélin M.; Photochemistry in the Inner Layers of Clumpy Circumstellar Envelopes: Formation of Water in C-rich Objects and of C-bearing Molecules in O-rich Objects; The Astrophysical Journal 724 L133 (2010)
5. Al Mogren M. M., El-Azhary A A., Alkiali W. Z., Hochlaf M.; A G3 study of the structure of Carbon-Nitrogen Nanoclusters. J. Phys. Chem. A 114, 12258 (2010)
6. Alvaro Galué H., Pirali O., Oomens J.; Gas-phase infrared spectra of cationized nitrogen-substituted polycyclic aromatic hydrocarbons; Astronomy and Astrophysics 517 A15 (2010)
7. Anderson L. D., Zavagno A., Rodón J. A., Russeil D., Abergel A., Ade P., André P., Arab H., Baluteau J.-P., Bernard J.-P., Blagrave K., Bontemps S., Boulanger F., Cohen M., Compiègne M., Cox P., Dartois E., Davis G., Emery R., Fulton T., Gry C., Habart E., Huang M., Joblin C., Jones S. C., Kirk J. M., Lagache G., Lim T., Madden S., Makiwa G., Martin P., Miville-Deschênes M.-A., Molinari S., Moseley H., Motte F., Naylor D. A., Okumura K., Pinheiro Gonçalves D., Polehampton E., Saraceno P., Sauvage M., Sidher S., Spencer L., Swinyard B., Ward-Thompson D., White G. J.; The physical properties of the dust in the RCW 120 H II region as seen by *Herschel*; Astronomy and Astrophysics 518 L99 (2010)
8. André P., Men'shchikov A., Bontemps S., Könyves V., Motte F., Schneider N., Didelon P., Minier V., Saraceno P., Ward-Thompson D., di Francesco J., White G., Molinari S., Testi L., Abergel A., Griffin M., Henning T., Royer P., Merín B., Vavrek R., Attard M., Arzoumanian D., Wilson C. D., Ade P., Aussel H., Baluteau J.-P., Benedettini M., Bernard J.-P., Blommaert J. A. D. L., Cambrésy L., Cox P., di Giorgio A., Hargrave P., Hennemann M., Huang M., Kirk J., Krause O., Launhardt R., Leeks S., Le Pennec J., Li J. Z., Martin P. G., Maury A., Olofsson G., Omont A., Peretto N., Pezzuto S., Prusti T., Roussel H., Russeil D., Sauvage M., Sibthorpe B., Sicilia-Aguilar A., Spinoglio L., Waelkens C., Woodcraft A., Zavagno A.; From filamentary clouds to prestellar cores to the stellar IMF: Initial highlights from the *Herschel* Gould Belt Survey; Astronomy and Astrophysics 518 L102 (2010)
9. Audit E., Hennebelle P.; On the structure of the turbulent interstellar clouds . Influence of the equation of state on the dynamics of 3D compressible flows; Astronomy and Astrophysics 511 A76 (2010)
10. Aumont J., Conversi L., Thum C., Wiesemeyer H., Falgarone E., Macías-Pérez J. F., Piacentini F., Pointecouteau E., Ponthieu N., Puget J. L., Rosset C., Tauber J. A., Tristram M.; Measurement of the Crab nebula polarization at 90 GHz as a calibrator for CMB experiments; Astronomy and Astrophysics 514 A70 (2010)
11. Bacmann A., Caux E., Hily-Blant P., Parise B., Pagani L., Bottinelli S., Maret S., Vastel C., Ceccarelli C., Cernicharo J., Henning T., Castets A., Coutens A., Bergin E. A., Blake G. A., Crimier N., Demyk K., Dominik C., Gerin M., Hennebelle P., Kahane C., Klotz A., Melnick G., Schilke P., Walters V., Walters A., Baudry A., Bell T., Benedettini M., Boogert A., Cabrit S., Caselli P., Codella C., Comito C., Encrenaz P., Falgarone E., Fuente A., Goldsmith P. F., Helmich F., Herbst E., Jacq T., Kama M., Langer W., Lefloch B., Lis D., Lord S., Lorenzani A., Neufeld D., Nisini B., Pacheco S., Pearson J., Phillips T., Salez M., Saraceno P., Schuster K., Tielens X., van der Tak F. F. S., van der Wiel M. H. D., Viti S., Wyrowski F., Yorke H., Faure A., Benz A., Coeur-Joly O., Cros A., Güsten R., Ravera L.; First detection of ND in the solar-mass protostar IRAS16293-2422; Astronomy and Astrophysics 521 L42 (2010)
12. Baes M., Clemens M., Xilouris E. M., Fritz J., Cotton W. D., Davies J. I., Bendo G. J., Bianchi S., Cortese L., de Looze I., Pohlen M., Verstappen J., Böhringer H., Bomans D. J., Boselli A., Corbelli E., Dariush A., di Serego Alighieri S., Fadda D., Garcia-Appadoo D. A., Gavazzi G., Giovanardi C., Grossi M., Hughes T. M., Hunt L. K., Jones A. P., Madden S., Pierini D., Sabatini S., Smith M. W. L., Vlahakis C., Zibetti S.; The *Herschel* Virgo Cluster Survey . VI. The far-infrared view of M 87; Astronomy and Astrophysics 518 L53 (2010)
13. Bally J., Anderson L. D., Battersby C., Calzoletti L., Digiorgio A. M., Faustini F., Ginsburg A., Li J. Z., Nguyen Luong Q., Molinari S., Motte F., Pestalozzi M., Plume R., Rodon J., Schilke P., Schlingman W., Schneider-Bontemps N., Shirley Y., Stringfellow G. S., Testi L., Traficante A., Veneziani M., Zavagno A.; *Herschel* observations of the W43 ``mini-starburst''; Astronomy and Astrophysics 518 L90 (2010)
14. Balucani N., Casavecchia P., Aoiz F. J., Bañares L., Launay J.-M., Bussery-Honvault B., Honvault P.; Dynamics of the C(1D)+H2reaction: A comparison of crossed molecular beam experiments with quantum mechanical and quasiclassical trajectory calculations on the first two singlet (11A' and 11A″) potential energy surfaces; Molecular Physics 108 373 (2010)
15. Barriault L., Joncas G., Falgarone E., Marshall D. J., Heyer M., Boulanger F., Foster T., Brunt C., Miville-Deschênes M.-A., Blagrave K., Kothes R., Landecker T. L., Martin P. G., Scott D., Stil J. M., Taylor A. R.; Multiwavelength observations of cirrus clouds in the North Celestial Loop: the transition from atomic to molecular gas; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 406 2713 (2010)
16. Barstow M. A., Boyce D. D., Welsh B. Y., Lallement R., Barstow J. K., Forbes A. E., Preval S.; O VI in the Local Interstellar Medium; The Astrophysical Journal 723 1762 (2010)
17. Basire M., Parneix P., Calvo F. ; Finite-Temperature IR Spectroscopy of Polyatomic Molecules: A Theoretical Assessment of Scaling Factors ; Journal of Physical Chemistry A 114 3139 (2010)
18. Begum A., Stanimirović S., Goss W. M., Heiles C., Pavkovich A. S., Hennebelle P.; The Thermally Unstable Warm Neutral Medium: Key for Modeling the Interstellar Medium; The Astrophysical Journal 725 1779 (2010)

19. Bellec, A. ; Guillemin, J.-C. A Simple Explanation of the Enhancement or Depletion of the Enantiomeric Excess in the Partial Sublimation of Enantiomerically Enriched Amino Acids ; Chemical Communications 46 1482 (2010)
20. Belpassi L., Reca M.L., Tarantelli F., Rocaratti L.F., Pirani F., Cappelletti D., Faure A., Scribano Y., Journal of American Chemical Society 132 13046 (2010)
21. Ben Yaghlane S., Eddine Jaidane N., Franzreb K., Hochlaf M.; Identification and theoretical investigation of the SiO2+ dication; Chemical Physics Letters 486 16 (2010)
22. Bendo G. J., Wilson C. D., Pohlen M., Sauvage M., Auld R., Baes M., Barlow M. J., Bock J. J., Boselli A., Bradford M., Buat V., Castro-Rodriguez N., Chanial P., Charlot S., Ciesla L., Clements D. L., Cooray A., Cormier D., Cortese L., Davies J. I., Dwek E., Eales S. A., Elbaz D., Galametz M., Galliano F., Gear W. K., Glenn J., Gomez H. L., Griffin M., Hony S., Isaak K. G., Levenson L. R., Lu N., Madden S., O'Halloran B., Okumura K., Oliver S., Page M. J., Panuzzo P., Papageorgiou A., Parkin T. J., Perez-Fournon I., Rangwala N., Rigby E. E., Roussel H., Rykala A., Sacchi N., Schulz B., Schirm M. R. P., Smith M. W. L., Spinoglio L., Stevens J. A., Sundar S., Symeonidis M., Trichas M., Vaccari M., Vigroux L., Wozniak H., Wright G. S., Zeilinger W. W.; The *Herschel* Space Observatory view of dust in M81; Astronomy and Astrophysics 518 L65 (2010)
23. Benidar, A.; Georges, R.; Guillemin, J.-C.; Mo, O.; Yáñez, M. ; Infrared Spectra of a Species of Potential Prebiotic and Astrochemical Interest: Cyanoethenethiol ; Journal of Physical Chemistry A 114 9583 (2010)
24. Benisty M., Tatulli E., Ménard F., Swain M. R.; The complex structure of the disk around HD 100546. The inner few astronomical units; Astronomy and Astrophysics 511 A75 (2010)
25. Bennett C. J., Morales S. B., Le Picard S. D., Canosa A., Sims I. R., Shih Y. H., Chang A. H. H., Gu X., Zhang F., Kaiser R. I.; A chemical dynamics, kinetics, and theoretical study on the reaction of the cyano radical (CN; $X^2\Sigma^+$) with phenylacetylene (C6H5CCH; X1A1); Physical Chemistry Chemical Physics (Incorporating Faraday Transactions) 12 8737 (2010)
26. Bergin E. A., Phillips T. G., Comito C., Crockett N. R., Lis D. C., Schilke P., Wang S., Bell T. A., Blake G. A., Bumble B., Caux E., Cabrit S., Ceccarelli C., Cernicharo J., Daniel F., de Graauw T., Dubernet M.-L., Emprechtinger M., Encrenaz P., Falgarone E., Gerin M., Giesen T. F., Goicoechea J. R., Goldsmith P. F., Gupta H., Hartogh P., Helmich F. P., Herbst E., Joblin C., Johnstone D., Kawamura J. H., Langer W. D., Latter W. B., Lord S. D., Maret S., Martin P. G., Melnick G. J., Menten K. M., Morris P., Müller H. S. P., Murphy J. A., Neufeld D. A., Ossenkopf V., Pagani L., Pearson J. C., Pérault M., Plume R., Roelfsema P., Qin S.-L., Salez M., Schlemmer S., Stutzki J., Tielens A. G. G. M., Trappe N., van der Tak F. F. S., Vastel C., Yorke H. W., Yu S., Zmuidzinas J.; *Herschel* observations of EXtra-Ordinary Sources (HEXOS): The present and future of spectral surveys with *Herschel*/HIFI; Astronomy and Astrophysics 521 L20 (2010)
27. Bernard J.-P., Paradis D., Marshall D. J., Montier L., Lagache G., Paladini R., Veneziani M., Brunt C. M., Mottram J. C., Martin P., Ristorcelli I., Noriega-Crespo A., Compiègne M., Flagey N., Anderson L. D., Popescu C. C., Tuffs R., Reach W., White G., Benedetti M., Calzoletti L., Digiorgio A. M., Faustini F., Juvela M., Joblin C., Joncas G., Miville-Deschenes M.-A., Olmi L., Traficante A., Piacentini F., Zavagno A., Molinari S.; Dust temperature tracing the ISRF intensity in the Galaxy; Astronomy and Astrophysics 518 L88 (2010)
28. Berteloite C., Lara M., Bergeat A., Le Picard S. D., Dayou F., Hickson K. M., Canosa A., Naulin C., Launay J.-M., Sims I. R., Costes M.; Kinetics and Dynamics of the S(D21)+H2→SH+H Reaction at Very Low Temperatures and Collision Energies; Physical Review Letters 105 203201 (2010)
29. Berteloite C., Le Picard S. D., Balucani N., Canosa A., Sims I. R.; Low temperature rate coefficients for reactions of the butadiynyl radical, C4H, with various hydrocarbons. Part II: reactions with alkenes (ethylene, propene, 1-butene), dienes (allene, 1,3-butadiene) and alkynes (acetylene, propyne and 1-butyne); Physical Chemistry Chemical Physics (Incorporating Faraday Transactions) 12 3677 (2010)
30. Berteloite C., Le Picard S. D., Balucani N., Canosa A., Sims I. R.; Low temperature rate coefficients for reactions of the butadiynyl radical, C4H, with various hydrocarbons. Part I: reactions with alkanes (CH4, C2H6, C3H8, C4H10); Physical Chemistry Chemical Physics (Incorporating Faraday Transactions) 12 3666 (2010)
31. Bonavita M., Chauvin G., Boccaletti A., Pietu V., Baudoz P., Beuzit J. L., Dutrey A., Guilloteau S., Lagrange A. M., Mouillet D., Niccolini G.; Searching for the sub-stellar companions in the LkCa15 proto-planetary disk; Astronomy and Astrophysics 522 A2 (2010)
32. Bontemps S., André P., Könyves V., Men'shchikov A., Schneider N., Maury A., Peretto N., Arzoumanian D., Attard M., Motte F., Minier V., Didelon P., Saraceno P., Abergel A., Baluteau J.-P., Bernard J.-P., Cambrésy L., Cox P., di Francesco J., di Giorgo A. M., Griffin M., Hargrave P., Huang M., Kirk J., Li J., Martin P., Merín B., Molinari S., Olofsson G., Pezzuto S., Prusti T., Roussel H., Russeil D., Sauvage M., Sibthorpe B., Spinoglio L., Testi L., Vavrek R., Ward-Thompson D., White G., Wilson C., Woodcraft A., Zavagno A.; The *Herschel* first look at protostars in the Aquila rift; Astronomy and Astrophysics 518 L85 (2010)
33. Boquien M., Duc P.-A., Galliano F., Braine J., Lisenfeld U., Charmandaris V., Appleton P. N.; Star Formation in Collision Debris: Insights from the Modeling of Their Spectral Energy Distribution; The Astronomical Journal 140 2124 (2010)
34. Borg J., Rotundi A., Brunetto R., Baratta G. A., Dartois E., Brucato J. R., Della Corte V., D'Hendecourt L., Djouadi Z., Colangeli L., Mennella V., Palumbo M. E., Palumbo P.; Spectroscopic Investigation of Grains from Track 134 IN Stardust Tile C2103; Meteoritics and Planetary Science Supplement 73 5006 (2010)
35. Boselli A., Ciesla L., Buat V., Cortese L., Auld R., Baes M., Bendo G. J., Bianchi S., Bock J., Bomans D. J., Bradford M., Castro-Rodriguez N., Chanial P., Charlot S., Clemens M., Clements D., Corbelli E., Cooray A., Cormier D., Dariush A., Davies J., de Looze I., di Serego Alighieri S., Dwek E., Eales S., Elbaz D., Fadda D., Fritz J., Galametz M., Galliano F., Garcia-Appadoo D. A., Gavazzi G., Gear W., Giovanardi C., Glenn J., Gomez H., Griffin M., Grossi M., Hony S., Hughes T. M., Hunt L., Isaak K., Jones A., Levenson L., Lu N., Madden S. C., O'Halloran B., Okumura K., Oliver S., Page M., Panuzzo P., Papageorgiou A., Parkin T., Perez-Fournon I., Pierini D., Pohlen M., Rangwala N., Rigby E., Roussel H., Rykala A., Sabatini S., Sacchi N., Sauvage M., Schulz B., Schirm M., Smith M. W. L., Spinoglio L., Stevens J., Sundar S., Symeonidis M., Trichas M., Vaccari M., Verstappen J., Vigroux L., Vlahakis C., Wilson C., Wozniak H., Wright G., Xilouris E. M., Zeilinger W., Zibetti S.; FIR colours and SEDs of nearby galaxies observed with *Herschel*; Astronomy and Astrophysics 518 L61 (2010)
36. Boselli A., Eales S., Cortese L., Bendo G., Chanial P., Buat V., Davies J., Auld R., Rigby E., Baes M., Barlow M., Bock J., Bradford M., Castro-Rodriguez N., Charlot S., Clements D., Cormier D., Dwek E., Elbaz D., Galametz M., Galliano F., Gear W., Glenn J., Gomez H., Griffin M., Hony S., Isaak K., Levenson L., Lu N., Madden S., O'Halloran B., Okamura K., Oliver S., Page M., Panuzzo P., Papageorgiou A., Parkin T., Perez-Fournon I., Pohlen M., Rangwala N., Roussel H.,

Rykala A., Sacchi N., Sauvage M., Schulz B., Schirm M., Smith M. W. L., Spinoglio L., Stevens J., Symeonidis M., Vaccari M., Vigroux L., Wilson C., Wozniak H., Wright G., Zeilinger W.; The *Herschel* Reference Survey; Publications of the Astronomical Society of the Pacific 122 261 (2010)

37. Bossa J. B., Borget F., Duvernay F., Theule P., Chiavassa T., How a usual carbamate can become an unusual intermediate : a new chemical pathway to form glycinate in the interstellar medium ; Journal of Physical Organic Chemistry, 23 333-339 (2010)
38. Bot C., Rubio M., Boulanger F., Albrecht M., Leroy A., Bolatto A. D., Bertoldi F., Gordon K., Engelbracht C., Block M., Misselt K.; LABOCA observations of giant molecular clouds in the southwest region of the Small Magellanic Cloud; Astronomy and Astrophysics 524 A52 (2010)
39. Boudon V., Pirali O., Roy P., Brubach J.-B., Manceron L., Vander Auwera J.; The high-resolution far-infrared spectrum of methane at the SOLEIL synchrotron; Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 111 1117 (2010)
40. Boyer M. L., Sargent B., van Loon J. T., Srinivasan S., Clayton G. C., Kemper F., Smith L. J., Matsuura M., Woods P. M., Marengo M., Meixner M., Engelbracht C., Gordon K. D., Hony S., Indebetouw R., Misselt K., Okumura K., Panuzzo P., Riebel D., Roman-Duval J., Sauvage M., Sloan G. C.; Cold dust in three massive evolved stars in the LMC; Astronomy and Astrophysics 518 L142 (2010)
41. Briani G., Morbidelli A., Gounelle M.; Dynamical Simulations for the Origin of Carbonaceous Microxenoliths Support Asteroids-Comets Continuum; Meteoritics and Planetary Science Supplement 73 5241 (2010)
42. Briani G., Quirico E., Gounelle M., Montagnac G., Charon E., Rouzaud J.-N.; Multiwavelength Raman Spectroscopy of Organic Matter in Isheyevo Microxenoliths; Meteoritics and Planetary Science Supplement 73 5247 (2010)
43. Briani G., Quirico E., Gounelle M., Paulhiac-Pison M., Montagnac G., Bonal L., Beck P.; Thermal Metamorphism Effects in CR Chondrites; Meteoritics and Planetary Science Supplement 73 5234 (2010)
44. Brisbin D., Harwit M., Altieri B., Amblard A., Arumugam V., Aussel H., Babbedge T., Blain A., Bock J., Boselli A., Buat V., Castro-Rodríguez N., Cava A., Chanial P., Clements D. L., Conley A., Conversi L., Cooray A., Dowell C. D., Dwek E., Eales S., Elbaz D., Fox M., Franceschini A., Gear W., Glenn J., Griffin M., Halpern M., Hatziminaoglou E., Ibar E., Isaak K., Ivison R. J., Lagache G., Levenson L., Lonsdale C. J., Lu N., Madden S., Maffei B., Mainetti G., Marchetti L., Morrison G. E., Nguyen H. T., O'Halloran B., Oliver S. J., Omont A., Owen F. N., Pannella M., Panuzzo P., Papageorgiou A., Pearson C. P., Pérez-Fournon I., Pohlen M., Rizzo D., Roseboom I. G., Rowan-Robinson M., Portal M. S., Schulz B., Seymour N., Shupe D. L., Smith A. J., Stevens J. A., Strazzullo V., Symeonidis M., Trichas M., Tugwell K. E., Vaccari M., Valtchanov I., Vigroux L., Wang L., Ward R., Wright G., Xu C. K., Zemcov M.; The Deep SPIRE HerMES Survey: spectral energy distributions and their astrophysical indications at high redshift; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 409 66 (2010)
45. Bruderer S., Benz A. O., van Dishoeck E. F., Melchior M., Doty S. D., van der Tak F., Stauber P., Wampfler S. F., Dedes C., Yildiz U. A., Pagani L., Giannini T., de Graauw T., Whyborn N., Teyssier D., Jellema W., Shipman R., Schieder R., Honingh N., Caux E., Bächtold W., Csillaghy A., Monstein C., Bachiller R., Baudry A., Benedettini M., Bergin E., Bjerkeli P., Blake G. A., Bontemps S., Braine J., Caselli P., Cernicharo J., Codella C., Daniel F., di Giorgio A. M., Dominik C., Encrenaz P., Fich M., Fuente A., Goicoechea J. R., Helmich F., Herczeg G. J., Herpin F., Hogerheijde M. R., Jacq T., Johnstone D., Joergensen J. K., Kristensen L. E., Larsson B., Lis D., Liseau R., Marseille M., McCoey C., Melnick G., Neufeld D., Nisini B., Olberg M., Parise B., Pearson J. C., Plume R., Risacher C., Santiago-García J., Saraceno P., Shipman R., Tafalla M., van Kempen T. A., Visser R., Wyrowski F.; *Herschel*/HIFI detections of hydrides towards AFGL 2591. Envelope emission versus tenuous cloud absorption; Astronomy and Astrophysics 521 L44 (2010)
46. Buat V., Giovannoli E., Burgarella D., Altieri B., Amblard A., Arumugam V., Aussel H., Babbedge T., Blain A., Bock J., Boselli A., Castro-Rodríguez N., Cava A., Chanial P., Clements D. L., Conley A., Conversi L., Cooray A., Dowell C. D., Dwek E., Eales S., Elbaz D., Fox M., Franceschini A., Gear W., Glenn J., Griffin M., Halpern M., Hatziminaoglou E., Heinis S., Ibar E., Isaak K., Ivison R. J., Lagache G., Levenson L., Lonsdale C. J., Lu N., Madden S., Maffei B., Magdis G., Mainetti G., Marchetti L., Morrison G. E., Nguyen H. T., O'Halloran B., Oliver S. J., Omont A., Owen F. N., Page M. J., Pannella M., Panuzzo P., Papageorgiou A., Pearson C. P., Pérez-Fournon I., Pohlen M., Rigopoulou D., Rizzo D., Roseboom I. G., Rowan-Robinson M., Sánchez Portal M., Schulz B., Seymour N., Shupe D. L., Smith A. J., Stevens J. A., Strazzullo V., Symeonidis M., Trichas M., Tugwell K. E., Vaccari M., Valiante E., Valtchanov I., Vigroux L., Wang L., Ward R., Wright G., Xu C. K., Zemcov M.; Measures of star formation rates from infrared (*Herschel*) and UV (GALEX) emissions of galaxies in the HerMES fields; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 409 L1 (2010)
47. Buenzli E., Thalmann C., Vigan A., Boccaletti A., Chauvin G., Augereau J. C., Meyer M. R., Ménard F., Desidera S., Messina S., Henning T., Carson J., Montagnier G., Beuzit J. L., Bonavita M., Eggenberger A., Lagrange A. M., Mesa D., Mouillet D., Quanz S. P.; Dissecting the Moth: discovery of an off-centered ring in the HD 61005 debris disk with high-resolution imaging; Astronomy and Astrophysics 524 L1 (2010)
48. Bullock E. S., McKeegan K. D., Gounelle M., Grady M. M., Russell S. S.; Sulfur isotopic composition of Fe-Ni sulfide grains in CI and CM carbonaceous chondrites; Meteoritics and Planetary Science 45 885 (2010)
49. Calvo F., Basire M., Parneix P., Van-Oanh N. –T. ; Finite-temperature infrared spectroscopy of polycyclic aromatic hydrocarbon molecules: Path-integral molecular dynamics ; Journal of Chemical Physics 132 124308 (2010)
50. Calvo F., Basire M., Parneix P., Van-Oanh N. –T. ; Finite-temperature infrared spectroscopy of polycyclic aromatic hydrocarbon molecules. II. Principal mode analysis and self-consistent phonons ; Journal of Chemical Physics 133 074303 (2010)
51. Cazaux, S.; Cobut, V.; Marseille, M.; Spaans, M.; Caselli, P. Water formation on bare grains: When the chemistry on dust impacts interstellar gas Astronomy & & Astrophysics 522 (2010) 74
52. Ceccarelli C., Cernicharo J., Ménard F., Pinte C.; The Foggy Disks Surrounding AeBe Stars: A Theoretical Study of The HDO Lines; The Astrophysical Journal 725 L135 (2010)
53. Ceccarelli C., Bacmann A., Boogert A., Caux E., Dominik C., Lefloch B., Lis D., Schilke P., van der Tak F., Caselli P., Cernicharo J., Codella C., Comito C., Fuente A., Baudry A., Bell T., Benedettini M., Bergin E. A., Blake G. A., Bottinelli S., Cabrit S., Castets A., Coutens A., Crimier N., Demyk K., Encrenaz P., Falgarone E., Gerin M., Goldsmith P. F., Helmich F., Hennebelle P., Henning T., Herbst E., Hily-Blant P., Jacq T., Kahane C., Kama M., Klotz A., Langer W., Lord S., Lorenzani A., Maret S., Melnick G., Neufeld D., Nisini B., Pacheco S., Pagani L., Parise B., Pearson J., Phillips T., Salez M., Saraceno P., Schuster K., Tielens X., van der Wiel M. H. D., Vastel C., Viti S., Walters V., Walters A., Wyrowski F., Yorke H., Liseau R., Olberg M., Szczerba R., Benz A. O., Melchior M.; *Herschel* spectral surveys of star-forming regions. Overview of the 555-636 GHz range; Astronomy and Astrophysics 521 L22 (2010)
54. Cernicharo J., Goicoechea J. R., Daniel F., Agúndez M., Caux E., de Graauw T., de Jonge A., Kester D., Leduc H. G.,

Steinmetz E., Stutzki J., Ward J. S.; The 35Cl/37Cl isotopic ratio in dense molecular clouds: HIFI observations of hydrogen chloride towards W3 A; Astronomy and Astrophysics 518 L115 (2010)
55. Chabot M., Mezdari F., Béroff K., Martinet G., Hervieux P.-A.; Scaling Law for the Partitioning of Energy in Fragmenting Multicharged Carbon Clusters; Physical Review Letters 104 043401 (2010)
56. Chabot M., Tuna T., Béroff K., Pino T., Le Padellec A., Désequelles P., Martinet G., Nguyen-Thi V. O., Carpentier Y., Le Petit F., Roueff E., Wakelam V.; Statistical universal branching ratios for cosmic ray dissociation, photodissociation, and dissociative recombination of the Cn = 2-10, Cn = 2-4H and C3H2 neutral and cationic species; Astronomy and Astrophysics 524 A39 (2010)
57. Chabrier G., Hennebelle P.; Star Formation: Statistical Measure of the Correlation between the Prestellar Core Mass Function and the Stellar Initial Mass Function; The Astrophysical Journal 725 L79 (2010)
58. Chapillon E., Parise B., Guilloteau S., Dutrey A., Wakelam V.; C I observations in the CQ Tauri proto-planetary disk: evidence of a very low gas-to-dust ratio ?; Astronomy and Astrophysics 520 A61 (2010)
59. Chen, C.-H. R; Indebetouw, R; Chu, Y-H; Gruendl, R A.; Testor, G; Heitsch, F; Seale, J P.; Meixner, M; Sewilo, M; Spitzer View of "Young Massive Stars in the Large Magellanic Cloud H II Complexes. II. N 159 ; The Astrophysical Journal 721 1206 (2010)
60. Chenel A., Mangaud E., Justum Y., Talbi D., Bacchus-Montabonel M.-C., Desouter-Lecomte M.; Quantum dynamics of the charge transfer in C^+ + S at low collision energies; Journal of Physics B Atomic Molecular Physics 43 245701 (2010)
61. Ciardi A., Hennebelle P.; Outflows and mass accretion in collapsing dense cores with misaligned rotation axis and magnetic field; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 409 L39 (2010)
62. Clayton G. C., Sargent B., Boyer M. L., Whitney B. A., van Loon J. T., Meixner M., Tisserand P., Engelbracht C., Hony S., Indebetouw R., Misselt K. A., Okumura K., Panuzzo P., Roman-Duval J., Sauvage M., Oliveira J. M., Sewilstrok;o M., Churchwell E.; *Herschel* Observations of a Newly Discovered UX Ori Star in the Large Magellanic Cloud; The Astrophysical Journal 722 1131 (2010)
63. Clemens M. S., Jones A. P., Bressan A., Baes M., Bendo G. J., Bianchi S., Bomans D. J., Boselli A., Corbelli E., Cortese L., Dariush A., Davies J. I., de Looze I., di Serego Alighieri S., Fadda D., Fritz J., Garcia-Appadoo D. A., Gavazzi G., Giovanardi C., Grossi M., Hughes T. M., Hunt L. K., Madden S., Pierini D., Pohlen M., Sabatini S., Smith M. W. L., Verstappen J., Vlahakis C., Xilouris E. M., Zibetti S.; The *Herschel* Virgo Cluster Survey. III. A constraint on dust grain lifetime in early-type galaxies; Astronomy and Astrophysics 518 L50 (2010)
64. Cluver M. E., Appleton P. N., Boulanger F., Guillard P., Ogle P., Duc P.-A., Lu N., Rasmussen J., Reach W. T., Smith J. D., Tuffs R., Xu C. K., Yun M. S.; Powerful H2 Line Cooling in Stephan's Quintet. I. Mapping the Significant Cooling Pathways in Group-wide Shocks; The Astrophysical Journal 710 248 (2010)
65. Codella C., Lefloch B., Ceccarelli C., Cernicharo J., Caux E., Lorenzani A., Viti S., Hily-Blant P., Parise B., Maret S., Nisini B., Caselli P., Cabrit S., Pagani L., Benedettini M., Boogert A., Gueth F., Melnick G., Neufeld D., Pacheco S., Salez M., Schuster K., Bacmann A., Baudry A., Bell T., Bergin E. A., Blake G., Bottinelli S., Castets A., Comito C., Coutens A., Crimier N., Dominik C., Demyk K., Encrenaz P., Falgarone E., Fuente A., Gerin M., Goldsmith P., Helmich F., Hennebelle P., Henning T., Herbst E., Jacq T., Kahane C., Kama M., Klotz A., Langer W., Lis D., Lord S., Pearson J., Phillips T., Saraceno P., SchilkeP., Tielens X., van der Tak F., van der Wiel M., Vastel C., Walters V., Walters A., Wyrowski F., Yorke H., Borys C., Delorme Y., Kramer C., Larsson B., Mehdi I., Ossenkopf V., Stutzki J.; The CHESS spectral survey of star forming regions: Peering into the protostellar shock L1157-B1. I. Shock chemical complexity; Astronomy and Astrophysics 518 L112 (2010)
66. Comito C., Schilke P., Rolffs R., Lis D. C., Belloche A., Bergin E. A., Phillips T. G., Bell T. A., Crockett N. R., Wang S., Blake G. A., Caux E., Ceccarelli C., Cernicharo J., Daniel F., Dubernet M.-L., Emprechtinger M., Encrenaz P., Gerin M., Giesen T. F., Goicoechea J. R., Goldsmith P. F., Gupta H., Herbst E., Joblin C., Johnstone D., Langer W. D., Latter W. D., Lord S. D., Maret S., Martin P. G., Melnick G. J., Menten K. M., Morris P., Müller H. S. P., Murphy J. A., Neufeld D. A., Ossenkopf V., Pearson J. C., Pérault M., Plume R., Qin S.-L., Schlemmer S., Stutzki J., Trappe N., van der Tak F. F. S., Vastel C., Yorke H. W., Yu S., Olberg M., Szczerba R., Larsson B., Liseau R., Lin R. H., Samoska L. A., Schlecht E.; *Herschel* observations of deuterated water towards Sgr B2(M); Astronomy and Astrophysics 521 L38 (2010)
67. Commerçon B., Hennebelle P., Audit E., Chabrier G., Teyssier R.; Protostellar collapse: radiative and magnetic feedbacks on small-scale fragmentation; Astronomy and Astrophysics 510 L3 (2010)
68. Cooray A., Amblard A., Wang L., Arumugam V., Auld R., Aussel H., Babbedge T., Blain A., Bock J., Boselli A., Buat V., Burgarella D., Castro-Rodriguez N., Cava A., Chanial P., Clements D. L., Conley A., Conversi L., Dowell C. D., Dwek E., Eales S., Elbaz D., Farrah D., Fox M., Franceschini A., Gear W., Glenn J., Griffin M., Halpern M., Hatziminaoglou E., Ibar E., Isaak K., Ivison R. J., Khostovan A. A., Lagache G., Levenson L., Lu N., Madden S., Maffei B., Mainetti G., Marchetti L., Marsden G., Mitchell-Wynne K., Mortier A. M. J., Nguyen H. T., O'Halloran B., Oliver S. J., Omont A., Page M. J., Panuzzo P., Papageorgiou A., Pearson C. P., Perez Fournon I., Pohlen M., Rawlings J. I., Raymond G., Rigopoulou D., Rizzo D., Roseboom I. G., Rowan-Robinson M., Schulz B., Scott D., Serra P., Seymour N., Shupe D. L., Smith A. J., Stevens J. A., Symeonidis M., Trichas M., Tugwell K. E., Vaccari M., Valtchanov I., Vieira J. D., Vigroux L., Ward R., Wright G., Xu C. K., Zemcov M.; HerMES: Halo occupation number and bias properties of dusty galaxies from angular clustering measurements; Astronomy and Astrophysics 518 L22 (2010)
69. Cormier D., Madden S. C., Hony S., Contursi A., Poglitsch A., Galliano F., Sturm E., Doublier V., Feuchtgruber H., Galametz M., Geis N., de Jong J., Okumura K., Panuzzo P., Sauvage M.; The effects of star formation on the low-metallicity ISM: NGC 4214 mapped with *Herschel*/PACS spectroscopy; Astronomy and Astrophysics 518 L57 (2010)
70. Cortese L., Bendo G. J., Boselli A., Davies J. I., Gomez H. L., Pohlen M., Auld R., Baes M., Bock J. J., Bradford M., Buat V., Castro-Rodriguez N., Chanial P., Charlot S., Ciesla L., Clements D. L., Cooray A., Cormier D., Dwek E., Eales S. A., Elbaz D., Galametz M., Galliano F., Gear W. K., Glenn J., Griffin M., Hony S., Isaak K. G., Levenson L. R., Lu N., Madden S., O'Halloran B., Okumura K., Oliver S., Page M. J., Panuzzo P., Papageorgiou A., Parkin T. J., Perez-Fournon I., Rangwala N., Rigby E. E., Roussel H., Rykala A., Sacchi N., Sauvage M., Schulz B., Schirm M. R. P., Smith M. W. L., Spinoglio L., Stevens J. A., Srinivasan S., Symeonidis M., Trichas M., Vaccari M., Vigroux L., Wilson C. D., Wozniak H., Wright G. S., Zeilinger W. W.; *Herschel*-SPIRE observations of the disturbed galaxy NGC 4438; Astronomy and Astrophysics 518 L63 (2010)
71. Cortese L., Davies J. I., Pohlen M., Baes M., Bendo G. J., Bianchi S., Boselli A., de Looze I., Fritz J., Verstappen J., Bomans D. J., Clemens M., Corbelli E., Dariush A., di Serego Alighieri S., Fadda D., Garcia-Appadoo D. A., Gavazzi G., Giovanardi C., Grossi M., Hughes T. M., Hunt L. K., Jones A. P., Madden S., Pierini D., Sabatini S., Smith M. W. L.,

Vlahakis C., Xilouris E. M., Zibetti S.; The *Herschel* Virgo Cluster Survey . II. Truncated dust disks in H I-deficient spirals; Astronomy and Astrophysics 518 L49 (2010)
72. Crimier N., Ceccarelli C., Maret S., Bottinelli S., Caux E., Kahane C., Lis D. C., Olofsson J.; The solar type protostar IRAS16293-2422: new constraints on the physical structure; Astronomy and Astrophysics 519 A65 (2010)
73. Crockett N. R., Bergin E. A., Wang S., Lis D. C., Bell T. A., Blake G. A., Boogert A., Bumble B., Cabrit S., Caux E., Ceccarelli C., Cernicharo J., Comito C., Daniel F., Dubernet M.-L., Emprechtinger M., Encrenaz P., Falgarone E., Gerin M., Giesen T. F., Goicoechea J. R., Goldsmith P. F., Gupta H., Güsten R., Hartogh P., Helmich F., Herbst E., Honingh N., Joblin C., Johnstone D., Karpov A., Kawamura J. H., Kooi J., Krieg J.-M., Langer W. D., Latter W. D., Lord S. D., Maret S., Martin P. G., Melnick G. J., Menten K. M., Morris P., Müller H. S. P., Murphy J. A., Neufeld D. A., Ossenkopf V., Pearson J. C., Pérault M., Phillips T. G., Plume R., Qin S.-L., Roelfsema P., Schieder R., Schilke P., Schlemmer S., Stutzki J., van der Tak F. F. S., Tielens A., Trappe N., Vastel C., Yorke H. W., Yu S., Zmuidzinas J.; *Herschel* observations of EXtra-Ordinary Sources (HEXOS): The Terahertz spectrum of Orion KL seen at high spectral resolution; Astronomy and Astrophysics 521 L21 (2010)
74. Crutcher R. M., Wandelt B., Heiles C., Falgarone E., Troland T. H.; Magnetic Fields in Interstellar Clouds from Zeeman Observations: Inference of Total Field Strengths by Bayesian Analysis; The Astrophysical Journal 725 466 (2010)
75. Daniel F., Dubernet M.-L., Pacaud F., Grosjean A.; Rotational excitation of 20 levels of para-H2O by ortho-H2 (j2 = 1, 3, 5, 7) at high temperature; Astronomy and Astrophysics 517 A13 (2010)
76. Dartois E., Deboffle D., Bouzit M.; Methane clathrate hydrate infrared spectrum. II. Near-infrared overtones, combination modes and cages assignments; Astronomy and Astrophysics 514 A49 (2010)
77. Dartois E.; Clathrates hydrates FTIR spectroscopy: infrared signatures and their astrophysical significance; Molecular Physics 108 2273 (2010)
78. Davies J. I., Baes M., Bendo G. J., Bianchi S., Bomans D. J., Boselli A., Clemens M., Corbelli E., Cortese L., Dariush A., de Looze I., di Serego Alighieri S., Fadda D., Fritz J., Garcia-Appadoo D. A., Gavazzi G., Giovanardi C., Grossi M., Hughes T. M., Hunt L. K., Jones A. P., Madden S., Pierini D., Pohlen M., Sabatini S., Smith M. W. L., Verstappen J., Vlahakis C., Xilouris E. M., Zibetti S.; The *Herschel* Virgo Cluster Survey. I. Luminosity function; Astronomy and Astrophysics 518 L48 (2010)
79. Davies J. I., Wilson C. D., Auld R., Baes M., Barlow M. J., Bendo G. J., Bock J. J., Boselli A., Bradford M., Buat V., Castro-Rodriguez N., Chanial P., Charlot S., Ciesla L., Clements D. L., Cooray A., Cormier D., Cortese L., Dwek E., Eales S. A., Elbaz D., Galametz M., Galliano F., Gear W. K., Glenn J., Gomez H. L., Griffin M., Hony S., Isaak K. G., Levenson L. R., Lu N., Madden S., O'Halloran B., Okumura K., Oliver S., Page M. J., Panuzzo P., Papageorgiou A., Parkin T. J., Perez-Fournon I., Pohlen M., Rangwala N., Rigby E. E., Roussel H., Rykala A., Sacchi N., Sauvage M., Schulz B., Schirm M. R. P., Smith M. W. L., Spinoglio L., Stevens J. A., Srinivasan S., Symeonidis M., Trichas M., Vaccari M., Vigroux L., Wozniak H., Wright G. S., Zeilinger W. W.; On the origin of M81 group extended dust emission; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 409 102 (2010)
80. Dayou F., Hernández M. I., Campos-Martínez J., Hernández-Lamoneda R.; Nonadiabatic couplings in the collisional removal of O2(b 1Σg+,v) by O2; Journal of Chemical Physics 132 044313 (2010)
81. de Graauw T., Helmich F. P., Phillips T. G., Stutzki J., Caux E., Whyborn N. D., Dieleman P., Roelfsema P. R., Aarts H., Assendorp R., Bachiller R., Baechtold W., Barcia A., Beintema D. A., Belitsky V., Benz A. O., Bieber R., Boogert A., Borys C., Bumble B., Caïs P., Caris M., Cerulli-Irelli P., Chattopadhyay G., Cherednichenko S., Ciechanowicz M., Coeur-Joly O., Comito C., Cros A., de Jonge A., de Lange G., Delforges B., Delorme Y., den Boggende T., Desbat J.-M., Diez-González C., di Giorgio A. M., Dubbeldam L., Edwards K., Eggens M., Erickson N., Evers J., Fich M., Finn T., Franke B., Gaier T., Gal C., Gao J. R., Gallego J.-D., Gauffre S., Gill J. J., Glenz S., Golstein H., Goulooze H., Gunsing T., Güsten R., Hartogh P., Hatch W. A., Higgins R., Honingh E. C., Huisman R., Jackson B. D., Jacobs H., Jacobs K., Jarchow C., Javadi H., Jellema W., Justen M., Karpov A., Kasemann C., Kawamura J., Keizer G., Kester D., Klapwijk T. M., Klein T., Kollberg E., Kooi J., Kooiman P.-P., Kopf B., Krause M., Krieg J.-M., Kramer C., Kruizenga B., Kuhn T., Laauwen W., Lai R., Larsson B., Leduc H. G., Leinz C., Lin R. H., Liseau R., Liu G. S., Loose A., López-Fernandez I., Lord S., Luinge W., Marston A., Martín-Pintado J., Maestrini A., Maiwald F. W., McCoey C., Mehdi I., Megej A., Melchior M., Meinsma L., Merkel H., Michalska M., Monstein C., Moratschke D., Morris P., Muller H., Murphy J. A., Naber A., Natale E., Nowosielski W., Nuzzolo F., Olberg M., Olbrich M., Orfei R., Orleanski P., Ossenkopf V., Peacock T., Pearson J. C., Peron I., Phillip-May S., Piazzo L., Planesas P., Rataj M., Ravera L., Risacher C., Salez M., Samoska L. A., Saraceno P., Schieder R., Schlecht E., Schlöder F., Schmülling F., Schultz M., Schuster K., Siebertz O., Smit H., Szczerba R., Shipman R., Steinmetz E., Stern J. A., Stokroos M., Teipen R., Teyssier D., Tils T., Trappe N., van Baaren C., van Leeuwen B.-J., van de Stadt H., Visser H., Wildeman K. J., Wafelbakker C. K., Ward J. S., Wesselius P., Wild W., Wulff S., Wunsch H.-J., Tielens X., Zaal P., Zirath H., Zmuidzinas J., Zwart F.; The *Herschel*-Heterodyne Instrument for the Far-Infrared (HIFI); Astronomy and Astrophysics 518 L6 (2010)
82. de Looze I., Baes M., Zibetti S., Fritz J., Cortese L., Davies J. I., Verstappen J., Bendo G. J., Bianchi S., Clemens M., Bomans D. J., Boselli A., Corbelli E., Dariush A., di Serego Alighieri S., Fadda D., Garcia-Appadoo D. A., Gavazzi G., Giovanardi C., Grossi M., Hughes T. M., Hunt L. K., Jones A. P., Madden S., Pierini D., Pohlen M., Sabatini S., Smith M. W. L., Vlahakis C., Xilouris E. M.; The *Herschel* Virgo Cluster Survey . VII. Dust in cluster dwarf elliptical galaxies; Astronomy and Astrophysics 518 L54 (2010)
83. Decin L., Agúndez M., Barlow M. J., Daniel F., Cernicharo J., Lombaert R., De Beck E., Royer P., Vandenbussche B., Wesson R., Polehampton E. T., Blommaert J. A. D. L., De Meester W., Exter K., Feuchtgruber H., Gear W. K., Gomez H. L., Groenewegen M. A. T., Guélin M., Hargrave P. C., Huygen R., Imhof P., Ivison R. J., Jean C., Kahane C., Kerschbaum F., Leeks S. J., Lim T., Matsuura M., Olofsson G., Posch T., Regibo S., Savini G., Sibthorpe B., Swinyard B. M., Yates J. A., Waelkens C.; Warm water vapour in the sooty outflow from a luminous carbon star; Nature 467 64 (2010)
84. Decin L., Justtanont K., De Beck E., Lombaert R., de Koter A., Waters L. B. F. M., Marston A. P., Teyssier D., Schöier F. L., Bujarrabal V., Alcolea J., Cernicharo J., Dominik C., Melnick G., Menten K., Neufeld D. A., Olofsson H., Planesas P., Schmidt M., Szczerba R., de Graauw T., Helmich F., Roelfsema P., Dieleman P., Morris P., Gallego J. D., Díez-González M. C., Caux E.; Water content and wind acceleration in the envelope around the oxygen-rich AGB star IK Tauri as seen by *Herschel*/HIFI; Astronomy and Astrophysics 521 L4 (2010)
85. Dedes C., Röllig M., Mookerjea B., Okada Y., Ossenkopf V., Bruderer S., Benz A. O., Melchior M., Kramer C., Gerin M., Güsten R., Akyilmaz M., Berne O., Boulanger F., de Lange G., Dubbeldam L., France K., Fuente A., Goicoechea J. R., Harris A., Huisman R., Jellema W., Joblin C., Klein T., Le Petit F., Lord S., Martin P., Martin-Pintado

J., Neufeld D. A., Philipp S., Phillips T., Pilleri P., Rizzo J. R., Salez M., Schieder R., Simon R., Siebertz O., Stutzki J., van der Tak F., Teyssier D., Yorke H.; The origin of the [C II] emission in the S140 photon-dominated regions. New insights from HIFI; Astronomy and Astrophysics 521 L24 (2010)

86. Defazio P., Gamallo P., González M., Akpinar S., Bussery-Honvault B., Honvault P., Petrongolo C.; Quantum dynamics of the C(1D)+HD and C(1D)+n-D2 reactions on the a~ 1A' and b~ 1A'' surfaces; Journal of Chemical Physics 132 104306 (2010)
87. Deharveng L., Schuller F., Anderson L. D., Zavagno A., Wyrowski F., Menten K. M., Bronfman L., Testi L., Walmsley C. M., Wienen M.; A gallery of bubbles. The nature of the bubbles observed by Spitzer and what ATLASGAL tells us about the surrounding neutral material; Astronomy and Astrophysics 523 A6 (2010)
88. Demaison J., Margulès L., Kleiner I., Császár A. G.; Equilibrium structure in the presence of internal rotation: A case study of cis-methyl formate; Journal of Molecular Spectroscopy 259 70 (2010)
89. di Francesco J., Sadavoy S., Motte F., Schneider N., Hennemann M., Csengeri T., Bontemps S., Balog Z., Zavagno A., André P., Saraceno P., Griffin M., Men'shchikov A., Abergel A., Baluteau J.-P., Bernard J.-P., Cox P., Deharveng L., Didelon P., di Giorgio A.-M., Hargrave P., Huang M., Kirk J., Leeks S., Li J. Z., Marston A., Martin P., Minier V., Molinari S., Olofsson G., Persi P., Pezzuto S., Russeil D., Sauvage M., Sibthorpe B., Spinoglio L., Testi L., Teyssier D., Vavrek R., Ward-Thompson D., White G., Wilson C., Woodcraft A.; Small-scale structure in the Rosette molecular cloud revealed by *Herschel*; Astronomy and Astrophysics 518 L91 (2010)
90. Dib S., Hennebelle P., Pineda J. E., Csengeri T., Bontemps S., Audit E., Goodman A. A.; The Angular Momentum of Magnetized Molecular Cloud Cores: A Two-dimensional-Three-dimensional Comparison; The Astrophysical Journal 723 425 (2010)
91. Djouadi Z., Robert F., Mostefaoui S., D'Hendecourt L., Leroux H., Borg J.; Hydroxyl Radicals in Silicates Induced by Proton Irradiation; Meteoritics and Planetary Science Supplement 73 5048 (2010)
92. Dobrica E., Engrand C., Duprat J., Gounelle M.; A Statistical Overview of CONCORDIA Antarctic Micrometeorites; Meteoritics and Planetary Science Supplement 73 5213 (2010)
93. Domaracka A., Seperuelo Duarte E., Boduch P., Rothard H., Ramillon J. M., Dartois E., Pilling S., Farenzena L. S., da Silveira E. F.; Infrared study of astrophysical ice analogues irradiated by swift nickel ions; Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 268 2960 (2010)
94. Donati J.-F., Skelly M. B., Bouvier J., Gregory S. G., Grankin K. N., Jardine M. M., Hussain G. A. J., Ménard F., Dougados C., Unruh Y., Mohanty S., Aurière M., Morin J., Farès R., MAPP Collaboration; Magnetospheric accretion and spin-down of the prototypical classical T Tauri star AA Tau; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 409 1347 (2010)
95. Donati J.-F., Skelly M. B., Bouvier J., Jardine M. M., Gregory S. G., Morin J., Hussain G. A. J., Dougados C., Ménard F., Unruh Y.; Complex magnetic topology and strong differential rotation on the low-mass T Tauri star V2247 Oph; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 402 1426 (2010)
96. Dubernet M. L., Boudon V., Culhane J. L., Dimitrijevic M. S., Fazliev A. Z., Joblin C., Kupka F., Leto G., Le Sidaner P., Loboda P. A., Mason H. E., Mason N. J., Mendoza C., Mulas G., Millar T. J., Nuñez L. A., Perevalov V. I., Piskunov N., Ralchenko Y., Rixon G., Rothman L. S., Roueff E., Ryabchikova T. A., Ryabtsev A., Sahal-Bréchot S., Schmitt B., Schlemmer S., Tennyson J., Tyuterev V. G., Walton N. A., Wakelam V., Zeippen C. J.; Virtual atomic and molecular data centre; Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 111 2151 (2010)
97. Duchêne G., McCabe C., Pinte C., Stapelfeldt K. R., Ménard F., Duvert G., Ghez A. M., Maness H. L., Bouy H., Barrado y Navascués D., Morales-Calderón M., Wolf S., Padgett D. L., Brooke T. Y., Noriega-Crespo A.; Panchromatic Observations and Modeling of the HV Tau C Edge-on Disk; The Astrophysical Journal 712 112 (2010)
98. Dulieu F., Amiaud L., Congiu E., Fillion J.-H., Matar E., Momeni A., Pirronello V., Lemaire J. L.; Experimental evidence for water formation on interstellar dust grains by hydrogen and oxygen atoms; Astronomy and Astrophysics 512 A30 (2010)
99. Dumouchel F., Faure A., Lique F.; The rotational excitation of HCN and HNC by He: temperature dependence of the collisional rate coefficients; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 406 2488 (2010)
100. Duprat J., Dobrica E., Engrand C., Aléon J., Marrocchi Y., Mostefaoui S., Meibom A., Leroux H., Rouzaud J.-N., Gounelle M., Robert F.; Extreme Deuterium Excesses in Ultracarbonaceous Micrometeorites from Central Antarctic Snow; Science 328 742 (2010)
101. Duvernay F., DuFauret V., Danger G., Theulé P., Borget F., Chiavassa T.; Chiral molecule formation in interstellar ice analogs: alpha-aminoethanol NH2CH(CH3)OH; Astronomy and Astrophysics 523 A79 (2010)
102. Eales S. A., Raymond G., Roseboom I. G., Altieri B., Amblard A., Arumugam V., Auld R., Aussel H., Babbedge T., Blain A., Bock J., Boselli A., Brisbin D., Buat V., Burgarella D., Castro-Rodríguez N., Cava A., Chanial P., Clements D. L., Conley A., Conversi L., Cooray A., Dowell C. D., Dwek E., Dye S., Elbaz D., Farrah D., Fox M., Franceschini A., Gear W., Glenn J., González Solares E. A., Griffin M., Harwit M., Hatziminaoglou E., Huang J., Ibar E., Isaak K., Ivison R. J., Lagache G., Levenson L., Lonsdale C. J., Lu N., Madden S., Maffei B., Mainetti G., Marchetti L., Morrison G. E., Mortier A. M. J., Nguyen H. T., O'Halloran B., Oliver S. J., Omont A., Owen F. N., Page M. J., Pannella M., Panuzzo P., Papageorgiou A., Pearson C. P., Pérez-Fournon I., Pohlen M., Rawlings J. I., Rigopoulou D., Rizzo D., Rowan-Robinson M., Sánchez Portal M., Schulz B., Scott D., Seymour N., Shupe D. L., Smith A. J., Stevens J. A., Strazzullo V., Symeonidis M., Trichas M., Tugwell K. E., Vaccari M., Valtchanov I., Vigroux L., Wang L., Ward R., Wright G., Xu C. K., Zemcov M.; First results from HerMES on the evolution of the submillimetre luminosity function; Astronomy and Astrophysics 518 L23 (2010)
103. Eales S. A., Smith M. W. L., Wilson C. D., Bendo G. J., Cortese L., Pohlen M., Boselli A., Gomez H. L., Auld R., Baes M., Barlow M. J., Bock J. J., Bradford M., Buat V., Castro-Rodríguez N., Chanial P., Charlot S., Ciesla L., Clements D. L., Cooray A., Cormier D., Davies J. I., Dwek E., Elbaz D., Galametz M., Galliano F., Gear W. K., Glenn J., Griffin M., Hony S., Isaak K. G., Levenson L. R., Lu N., Madden S., O'Halloran B., Okumura K., Oliver S., Page M. J., Panuzzo P., Papageorgiou A., Parkin T. J., Pérez-Fournon I., Rangwala N., Rigby E. E., Roussel H., Rykala A., Sacchi N., Sauvage M., Schulz B., Schirm M. R. P., Spinoglio L., Srinivasan S., Stevens J. A., Symeonidis M., Trichas M., Vaccari M., Vigroux L., Wozniak H., Wright G. S., Zeilinger W. W.; Mapping the interstellar medium in galaxies with *Herschel*/SPIRE; Astronomy and Astrophysics 518 L62 (2010)
104. Eland J. H. D., Hochlaf M., Linusson P., Andersson E., Hedin L., Feifel R.; Triple ionization spectra by coincidence measurements of double Auger decay: The case of OCS; Journal of Chemical Physics 132 014311 (2010)
105. Elbaz D., Hwang H. S., Magnelli B., Daddi E., Aussel H., Altieri B., Amblard A., Andreani P., Arumugam V., Auld R.,

Babbedge T., Berta S., Blain A., Bock J., Bongiovanni A., Boselli A., Buat V., Burgarella D., Castro-Rodriguez N., Cava A., Cepa J., Chanial P., Chary R.-R., Cimatti A., Clements D. L., Conley A., Conversi L., Cooray A., Dickinson M., Dominguez H., Dowell C. D., Dunlop J. S., Dwek E., Eales S., Farrah D., Förster Schreiber N., Fox M., Franceschini A., Gear W., Genzel R., Glenn J., Griffin M., Gruppioni C., Halpern M., Hatziminaoglou E., Ibar E., Isaak K., Ivison R. J., Lagache G., Le Borgne D., Le Floc'h E., Levenson L., Lu N., Lutz D., Madden S., Maffei B., Magdis G., Mainetti G., Maiolino R., Marchetti L., Mortier A. M. J., Nguyen H. T., Nordon R., O'Halloran B., Okumura K., Oliver S. J., Omont A., Page M. J., Panuzzo P., Papageorgiou A., Pearson C. P., Perez Fournon I., Pérez García A. M., Poglitsch A., Pohlen M., Popesso P., Pozzi F., Rawlings J. I., Rigopoulou D., Riguccini L., Rizzo D., Rodighiero G., Roseboom I. G., Rowan-Robinson M., Saintonge A., Sanchez Portal M., Santini P., Sauvage M., Schulz B., Scott D., Seymour N., Shao L., Shupe D. L., Smith A. J., Stevens J. A., Sturm E., Symeonidis M., Tacconi L., Trichas M., Tugwell K. E., Vaccari M., Valtchanov I., Vieira J., Vigroux L., Wang L., Ward R., Wright G., Xu C. K., Zemcov M.; *Herschel* unveils a puzzling uniformity of distant dusty galaxies; Astronomy and Astrophysics 518 L29 (2010)

106. Elkeurti M., Coudert L. H., Orphal J., Wlodarczak G., Fellows C. E., Toumi S.; Corrigendum to “The inversion splitting of 15NH2D and 15ND2H as obtained from their microwave and FIR Spectra” [J. Mol. Spectrosc. 251 (2008) 90-101]; Journal of Molecular Spectroscopy 260 139 (2010)
107. Emprechtinger M., Lis D. C., Bell T., Phillips T. G., Schilke P., Comito C., Rolffs R., van der Tak F., Ceccarelli C., Aarts H., Bacmann A., Baudry A., Benedettini M., Bergin E. A., Blake G., Boogert A., Bottinelli S., Cabrit S., Caselli P., Castets A., Caux E., Cernicharo J., Codella C., Coutens A., Crimier N., Demyk K., Dominik C., Encrenaz P., Falgarone E., Fuente A., Gerin M., Goldsmith P., Helmich F., Hennebelle P., Henning T., Herbst E., Hily-Blant P., Jacq T., Kahane C., Kama M., Klotz A., Kooi J., Langer W., Lefloch B., Loose A., Lord S., Lorenzani A., Maret S., Melnick G., Neufeld D., Nisini B., Ossenkopf V., Pacheco S., Pagani L., Parise B., Pearson J., Risacher C., Salez M., Saraceno P., Schuster K., Stutzki J., Tielens X., van der Wiel M., Vastel C., Viti S., Walters V., Walters A., Wyrowski F., Yorke H.; The distribution of water in the high-mass star-forming region NGC 6334 I; Astronomy and Astrophysics 521 L28 (2010)
108. Falgarone E., Godard B., Cernicharo J., de Luca M., Gerin M., Phillips T. G., Black J. H., Lis D. C., Bell T. A., Boulanger F., Coutens A., Dartois E., Encrenaz P., Giesen T., Goicoechea J. R., Goldsmith P. F., Gupta H., Gry C., Hennebelle P., Herbst E., Hily-Blant P., Joblin C., Kaźmierczak M., Kołos R., Krełowski J., Martin-Pintado J., Monje R., Mookerjea B., Neufeld D. A., Perault M., Pearson J. C., Persson C., Plume R., Salez M., Schmidt M., Sonnentrucker P., Stutzki J., Teyssier D., Vastel C., Yu S., Menten K., Geballe T. R., Schlemmer S., Shipman R., Tielens A. G. G. M., Philipp S., Cros A., Zmuidzinas J., Samoska L. A., Klein K., Lorenzani A., Szczerba R., Péron I., Cais P., Gaufre P., Cros A., Ravera L., Morris P., Lord S., Planesas P.; CH+(1-0) and 13CH+(1-0) absorption lines in the direction of massive star-forming regions; Astronomy and Astrophysics 521 L15 (2010)
109. Falgarone E., Ossenkopf V., Gerin M., Lesaffre P., Godard B., Pearson J., Cabrit S., Joblin C., Benz A. O., Boulanger F., Fuente A., Güsten R., Harris A., Klein T., Kramer C., Lord S., Martin P., Martin-Pintado J., Neufeld D., Phillips T. G., Röllig M., Simon R., Stutzki J., van der Tak F., Teyssier D., Yorke H., Erickson N., Fich M., Jellema W., Marston A., Risacher C., Salez M., Schmülling F.; Strong CH+ J = 1-0 emission and absorption in DR21; Astronomy and Astrophysics 518 L118 (2010)
110. Ferrière K.; The interstellar magnetic field near the Galactic center; Astronomische Nachrichten 331 27 (2010)
111. Fiolet N., Omont A., Lagache G., Bertincourt B., Fadda D., Baker A. J., Beelen A., Berta S., Boulanger F., Farrah D., Kovács A., Lonsdale C., Owen F., Polletta M., Shupe D., Yan L.; Mid-infrared spectroscopy of Spitzer-selected ultra-luminous starbursts at z ~ 2; Astronomy and Astrophysics 524 A33 (2010)
112. Fischer W. J., Megeath S. T., Ali B., Tobin J. J., Osorio M., Allen L. E., Kryukova E., Stanke T., Stutz A. M., Bergin E., Calvet N., di Francesco J., Furlan E., Hartmann L., Henning T., Krause O., Manoj P., Maret S., Muzerolle J., Myers P., Neufeld D., Pontoppidan K., Poteet C. A., Watson D. M., Wilson T.; *Herschel*-PACS imaging of protostars in the HH 1-2 outflow complex; Astronomy and Astrophysics 518 L122 (2010)
113. Friesen R. K., Di Francesco J., Myers P. C., Belloche A., Shirley Y. L., Bourke T. L., André P.; The Initial Conditions of Clustered Star Formation. III. The Deuterium Fractionation of the Ophiuchus B2 Core; The Astrophysical Journal 718 666 (2010)
114. Fuente A., Berné O., Cernicharo J., Rizzo J. R., González-García M., Goicoechea J. R., Pilleri P., Ossenkopf V., Gerin M., Güsten R., Akyilmaz M., Benz A. O., Boulanger F., Bruderer S., Dedes C., France K., García-Burillo S., Harris A., Joblin C., Klein T., Kramer C., Le Petit F., Lord S. D., Martin P. G., Martín-Pintado J., Mookerjea B., Neufeld D. A., Okada Y., Pety J., Phillips T. G., Röllig M., Simon R., Stutzki J., van der Tak F., Teyssier D., Usero A., Yorke H., Schuster K., Melchior M., Lorenzani A., Szczerba R., Fich M., McCoey C., Pearson J., Dieleman P.; *Herschel* observations in the ultracompact HII region Mon R2. Water in dense photon-dominated regions (PDRs); Astronomy and Astrophysics 521 L23 (2010)
115. Galametz M., Madden S. C., Galliano F., Hony S., Sauvage M., Pohlen M., Bendo G. J., Auld R., Baes M., Barlow M. J., Bock J. J., Boselli A., Bradford M., Buat V., Castro-Rodríguez N., Chanial P., Charlot S., Ciesla L., Clements D. L., Cooray A., Cormier D., Cortese L., Davies J. I., Dwek E., Eales S. A., Elbaz D., Gear W. K., Glenn J., Gomez H. L., Griffin M., Isaak K. G., Levenson L. R., Lu N., O'Halloran B., Okumura K., Oliver S., Page M. J., Panuzzo P., Papageorgiou A., Parkin T. J., Pérez-Fournon I., Rangwala N., Rigby E. E., Roussel H., Rykala A., Sacchi N., Schulz B., Schirm M. R. P., Smith M. W. L., Spinoglio L., Stevens J. A., Sundar S., Symeonidis M., Trichas M., Vaccari M., Vigroux L., Wilson C. D., Wozniak H., Wright G. S., Zeilinger W. W.; *Herschel* photometric observations of the nearby low metallicity irregular galaxy NGC 6822; Astronomy and Astrophysics 518 L55 (2010)
116. Gerin M., de Luca M., Black J., Goicoechea J. R., Herbst E., Neufeld D. A., Falgarone E., Godard B., Pearson J. C., Lis D. C., Phillips T. G., Bell T. A., Sonnentrucker P., Boulanger F., Cernicharo J., Coutens A., Dartois E., Encrenaz P., Giesen T., Goldsmith P. F., Gupta H., Gry C., Hennebelle P., Hily-Blant P., Joblin C., Kazmierczak M., Kolos R., Krelowski J., Martin-Pintado J., Monje R., Mookerjea B., Perault M., Persson C., Plume R., Rimmer P. B., Salez M., Schmidt M., Stutzki J., Teyssier D., Vastel C., Yu S., Contursi A., Menten K., Geballe T., Schlemmer S., Shipman R., Tielens A. G. G. M., Philipp-May S., Cros A., Zmuidzinas J., Samoska L. A., Klein K., Lorenzani A.; Interstellar OH+, H2O+ and H3O+ along the sight-line to G10.6-0.4; Astronomy and Astrophysics 518 L110 (2010)
117. Gerin M., de Luca M., Goicoechea J. R., Herbst E., Falgarone E., Godard B., Bell T. A., Coutens A., Kaźmierczak M., Sonnentrucker P., Black J. H., Neufeld D. A., Phillips T. G., Pearson J., Rimmer P. B., Hassel G., Lis D. C., Vastel C., Boulanger F., Cernicharo J., Dartois E., Encrenaz P., Giesen T., Goldsmith P. F., Gupta H., Gry C., Hennebelle P., Hily-Blant P., Joblin C., Kołos R., Krełowski J., Martín-Pintado J., Monje R., Mookerjea B., Perault M., Persson C., Plume R., Salez M., Schmidt M., Stutzki J., Teyssier D., Yu S., Contursi A., Menten K., Geballe T. R., Schlemmer S.,

Morris P., Hatch W. A., Imram M., Ward J. S., Caux E., Güsten R., Klein T., Roelfsema P., Dieleman P., Schieder R., Honingh N., Zmuidzinas J.; Interstellar CH absorption in the diffuse interstellar medium along the sight-lines to G10.6-0.4 (W31C), W49N, and W51; Astronomy and Astrophysics 521 L16 (2010)

118. Glenn J., Conley A., Béthermin M., Altieri B., Amblard A., Arumugam V., Aussel H., Babbedge T., Blain A., Bock J., Boselli A., Buat V., Castro-Rodríguez N., Cava A., Chanial P., Clements D. L., Conversi L., Cooray A., Dowell C. D., Dwek E., Eales S., Elbaz D., Ellsworth-Bowers T. P., Fox M., Franceschini A., Gear W., Griffin M., Halpern M., Hatziminaoglou E., Ibar E., Isaak K., Ivison R. J., Lagache G., Laurent G., Levenson L., Lu N., Madden S., Maffei B., Mainetti G., Marchetti L., Marsden G., Nguyen H. T., O'Halloran B., Oliver S. J., Omont A., Page M. J., Panuzzo P., Papageorgiou A., Pearson C. P., Pérez-Fournon I., Pohlen M., Rigopoulou D., Rizzo D., Roseboom I. G., Rowan-Robinson M., Portal M. S., Schulz B., Scott D., Seymour N., Shupe D. L., Smith A. J., Stevens J. A., Symeonidis M., Trichas M., Tugwell K. E., Vaccari M., Valtchanov I., Vieira J. D., Vigroux L., Wang L., Ward R., Wright G., Xu C. K., Zemcov M.; HerMES: deep galaxy number counts from a P(D) fluctuation analysis of SPIRE Science Demonstration Phase observations; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 409 109 (2010)
119. Godard B., Falgarone E., Gerin M., Hily-Blant P., de Luca M.; Molecular absorption lines toward star-forming regions: a comparative study of HCO+, HNC, HCN, and CN; Astronomy and Astrophysics 520 A20 (2010)
120. Godard M., Dartois E.; Photoluminescence of hydrogenated amorphous carbons. Wavelength-dependent yield and implications for the extended red emission; Astronomy and Astrophysics 519 A39 (2010)
121. Gomez H. L., Baes M., Cortese L., Smith M. W. L., Boselli A., Ciesla L., Bendo G. J., Pohlen M., di Serego Alighieri S., Auld R., Barlow M. J., Bock J. J., Bradford M., Buat V., Castro-Rodriguez N., Chanial P., Charlot S., Clements D. L., Cooray A., Cormier D., Davies J. I., Dwek E., Eales S., Elbaz D., Galametz M., Galliano F., Gear W. K., Glenn J., Griffin M., Hony S., Isaak K. G., Levenson L. R., Lu N., Madden S., O'Halloran B., Okumura K., Oliver S., Page M. J., Panuzzo P., Papageorgiou A., Parkin T. J., Perez-Fournon I., Rangwala N., Rigby E. E., Roussel H., Rykala A., Sacchi N., Sauvage M., Schirm M. R. P., Schulz B., Spinoglio L., Srinivasan S., Stevens J. A., Symeonidis M., Trichas M., Vaccari M., Vigroux L., Wilson C. D., Wozniak H., Wright G. S., Zeilinger W. W.; The dust morphology of the elliptical Galaxy M 86 with SPIRE; Astronomy and Astrophysics 518 L45 (2010)
122. Gordon K. D., Galliano F., Hony S., Bernard J.-P., Bolatto A., Bot C., Engelbracht C., Hughes A., Israel F. P., Kemper F., Kim S., Li A., Madden S. C., Matsuura M., Meixner M., Misselt K., Okumura K., Panuzzo P., Rubio M., Reach W. T., Roman-Duval J., Sauvage M., Skibba R., Tielens A. G. G. M.; Determining dust temperatures and masses in the *Herschel* era: The importance of observations longward of 200 micron; Astronomy and Astrophysics 518 L89 (2010)
123. Gounelle M., Chaussidon M., Rollion-Bard C.; The Boron Isotopic Composition of Isheyevo (CH/CB) Calcium-, Aluminium-rich Inclusions; Meteoritics and Planetary Science Supplement 73 5224 (2010)
124. Grady C. A., Hamaguchi K., Schneider G., Stecklum B., Woodgate B. E., McCleary J. E., Williger G. M., Sitko M. L., Ménard F., Henning T., Brittain S., Troutmann M., Donehew B., Hines D., Wisniewski J. P., Lynch D. K., Russell R. W., Rudy R. J., Day A. N., Shenoy A., Wilner D., Silverstone M., Bouret J.-C., Meusinger H., Clampin M., Kim S., Petre R., Sahu M., Endres M., Collins K. A.; Locating the Accretion Footprint on a Herbig Ae Star: MWC 480; The Astrophysical Journal 719 1565 (2010)
125. Griffin M. J., Abergel A., Abreu A., Ade P. A. R., André P., Augueres J.-L., Babbedge T., Bae Y., Baillie T., Baluteau J.-P., Barlow M. J., Bendo G., Benielli D., Bock J. J., Bonhomme P., Brisbin D., Brockley-Blatt C., Caldwell M., Cara C., Castro-Rodriguez N., Cerulli R., Chanial P., Chen S., Clark E., Clements D. L., Clerc L., Coker J., Communal D., Conversi L., Cox P., Crumb D., Cunningham C., Daly F., Davis G. R., de Antoni P., Delderfield J., Devin N., di Giorgio A., Didschuns I., Dohlen K., Donati M., Dowell A., Dowell C. D., Duband L., Dumaye L., Emery R. J., Ferlet M., Ferrand D., Fontignie J., Fox M., Franceschini A., Frerking M., Fulton T., Garcia J., Gastaud R., Gear W. K., Glenn J., Goizel A., Griffin D. K., Grundy T., Guest S., Guillemet L., Hargrave P. C., Harwit M., Hastings P., Hatziminaoglou E., Herman M., Hinde B., Hristov V., Huang M., Imhof P., Isaak K. J., Israelsson U., Ivison R. J., Jennings D., Kiernan B., King K. J., Lange A. E., Latter W., Laurent G., Laurent P., Leeks S. J., Lellouch E., Levenson L., Li B., Li J., Lilienthal J., Lim T., Liu S. J., Lu N., Madden S., Mainetti G., Marliani P., McKay D., Mercier K., Molinari S., Morris H., Moseley H., Mulder J., Mur M., Naylor D. A., Nguyen H., O'Halloran B., Oliver S., Olofsson G., Olofsson H.-G., Orfei R., Page M. J., Pain I., Panuzzo P., Papageorgiou A., Parks G., Parr-Burman P., Pearce A., Pearson C., Pérez-Fournon I., Pinsard F., Pisano G., Podosek J., Pohlen M., Polehampton E. T., Pouliquen D., Rigopoulou D., Rizzo D., Roseboom I. G., Roussel H., Rowan-Robinson M., Rownd B., Saraceno P., Sauvage M., Savage R., Savini G., Sawyer E., Scharmberg C., Schmitt D., Schneider N., Schulz B., Schwartz A., Shafer R., Shupe D. L., Sibthorpe B., Sidher S., Smith A., Smith A. J., Smith D., Spencer L., Stobie B., Sudiwala R., Sukhatme K., Surace C., Stevens J. A., Swinyard B. M., Trichas M., Tourette T., Triou H., Tseng S., Tucker C., Turner A., Vaccari M., Valtchanov I., Vigroux L., Virique E., Voellmer G., Walker H., Ward R., Waskett T., Weilert M., Wesson R., White G. J., Whitehouse N., Wilson C. D., Winter B., Woodcraft A. L., Wright G. S., Xu C. K., Zavagno A., Zemcov M., Zhang L., Zonca E.; The *Herschel*-SPIRE instrument and its in-flight performance; Astronomy and Astrophysics 518 L3 (2010)
126. Grossi M., Hunt L. K., Madden S., Vlahakis C., Bomans D. J., Baes M., Bendo G. J., Bianchi S., Boselli A., Clemens M., Corbelli E., Cortese L., Dariush A., Davies J. I., de Looze I., di Serego Alighieri S., Fadda D., Fritz J., Garcia-Appadoo D. A., Gavazzi G., Giovanardi C., Hughes T. M., Jones A. P., Pierini D., Pohlen M., Sabatini S., Smith M. W. L., Verstappen J., Xilouris E. M., Zibetti S.; The *Herschel* Virgo Cluster Survey. V. Star-forming dwarf galaxies - dust in metal-poor environments; Astronomy and Astrophysics 518 L52 (2010)
127. Guillard P., Boulanger F., Cluver M. E., Appleton P. N., Pineau Des Forêts G., Ogle P.; Observations and modeling of the dust emission from the H2-bright galaxy-wide shock in Stephan's Quintet; Astronomy and Astrophysics 518 A59 (2010)
128. Guitou M., Spielfiedel A., Feautrier N.; Accurate potential energy functions and non-adiabatic couplings in the Mg + H system; Chemical Physics Letters 488 145 (2010)
129. Gupta H., Rimmer P., Pearson J. C., Yu S., Herbst E., Harada N., Bergin E. A., Neufeld D. A., Melnick G. J., Bachiller R., Baechtold W., Bell T. A., Blake G. A., Caux E., Ceccarelli C., Cernicharo J., Chattopadhyay G., Comito C., Cabrit S., Crockett N. R., Daniel F., Falgarone E., Diez-Gonzalez M. C., Dubernet M.-L., Erickson N., Emprechtinger M., Encrenaz P., Gerin M., Gill J. J., Giesen T. F., Goicoechea J. R., Goldsmith P. F., Joblin C., Johnstone D., Langer W. D., Larsson B., Latter W. B., Lin R. H., Lis D. C., Liseau R., Lord S. D., Maiwald F. W., Maret S., Martin P. G., Martin-Pintado J., Menten K. M., Morris P., Müller H. S. P., Murphy J. A., Nordh L. H., Olberg M., Ossenkopf V., Pagani L., Pérault M., Phillips T. G., Plume R., Qin S.-L., Salez M., Samoska L. A., Schilke P., Schlecht E., Schlemmer S., Szczerba R., Stutzki J., Trappe N., van der Tak F. F. S., Vastel C., Wang S., Yorke H. W., Zmuidzinas J., Boogert A., Güsten

R., Hartogh P., Honingh N., Karpov A., Kooi J., Krieg J.-M., Schieder R., Zaal P.; Detection of OH+ and H2O+ towards Orion KL; Astronomy and Astrophysics 521 L47 (2010)
130. Habart E., Dartois E., Abergel A., Baluteau J.-P., Naylor D., Polehampton E., Joblin C., Ade P., Anderson L. D., André P., Arab H., Bernard J.-P., Blagrave K., Bontemps S., Boulanger F., Cohen M., Compiegne M., Cox P., Davis G., Emery R., Fulton T., Gry C., Huang M., Jones S. C., Kirk J., Lagache G., Lim T., Madden S., Makiwa G., Martin P., Miville-Deschênes M.-A., Molinari S., Moseley H., Motte F., Okumura K., Pinheiro Gonçalves D., Rodon J., Russeil D., Saraceno P., Sidher S., Spencer L., Swinyard B., Ward-Thompson D., White G. J., Zavagno A.; SPIRE spectroscopy of the prototypical Orion Bar photodissociation region; Astronomy and Astrophysics 518 L116 (2010)
131. Hammami K., Jaidane N., Feautrier N., Spielfiedel A., Lique F.; Tensor cross sections and collisional depolarization of MgH by He atoms; Chemical Physics Letters 484 148 (2010)
132. Hammoutène D., Hochlaf M., Ciofini I., Adamo C.; Electronic spectrum of 2-pyridone+: Ab initio and time-dependent density functional calculations; International Journal of Quantum Chemistry 110 498 (2010)
133. Harada N., Herbst E., Wakelam V.; A New Network for Higher-temperature Gas-phase Chemistry. I. A Preliminary Study of Accretion Disks in Active Galactic Nuclei; The Astrophysical Journal 721 1570 (2010)
134. Hatziminaoglou E., Omont A., Stevens J. A., Amblard A., Arumugam V., Auld R., Aussel H., Babbedge T., Blain A., Bock J., Boselli A., Buat V., Burgarella D., Castro-Rodríguez N., Cava A., Chanial P., Clements D. L., Conley A., Conversi L., Cooray A., Dowell C. D., Dwek E., Dye S., Eales S., Elbaz D., Farrah D., Fox M., Franceschini A., Gear W., Glenn J., González Solares E. A., Griffin M., Halpern M., Ibar E., Isaak K., Ivison R. J., Lagache G., Levenson L., Lu N., Madden S., Maffei B., Mainetti G., Marchetti L., Mortier A. M. J., Nguyen H. T., O'Halloran B., Oliver S. J., Page M. J., Panuzzo P., Papageorgiou A., Pearson C. P., Pérez-Fournon I., Pohlen M., Rawlings J. I., Rigopoulou D., Rizzo D., Roseboom I. G., Rowan-Robinson M., Sanchez Portal M., Schulz B., Scott D., Seymour N., Shupe D. L., Smith A. J., Symeonidis M., Trichas M., Tugwell K. E., Vaccari M., Valtchanov I., Vigroux L., Wang L., Ward R., Wright G., Xu C. K., Zemcov M.; HerMES: Far infrared properties of known AGN in the HerMES fields; Astronomy and Astrophysics 518 L33 (2010)
135. Hennemann M., Motte F., Bontemps S., Schneider N., Csengeri T., Balog Z., di Francesco J., Zavagno A., André P., Men'shchikov A., Abergel A., Ali B., Baluteau J.-P., Bernard J.-P., Cox P., Didelon P., di Giorgio A.-M., Griffin M., Hargrave P., Hill T., Horeau B., Huang M., Kirk J., Leeks S., Li J. Z., Marston A., Martin P., Molinari S., Nguyen Luong Q., Olofsson G., Persi P., Pezzuto S., Russeil D., Saraceno P., Sauvage M., Sibthorpe B., Spinoglio L., Testi L., Ward-Thompson D., White G., Wilson C., Woodcraft A.; *Herschel* observations of embedded protostellar clusters in the Rosette molecular cloud; Astronomy and Astrophysics 518 L84 (2010)
136. Henning T., Semenov D., Guilloteau S., Dutrey A., Hersant F., Wakelam V., Chapillon E., Launhardt R., Piétu V., Schreyer K.; Chemistry in Disks. III. Photochemistry and X-ray Driven Chemistry Probed by the Ethynyl Radical (CCH) in DM Tau, LkCa 15, and MWC 480; The Astrophysical Journal 714 1511 (2010)
137. Herbst E., Roueff E., Talbi D.; Radiative association and the formation of interstellar propylene; Molecular Physics 108 2171 (2010)
138. Hickson K. M., Bergeat A., Costes, M.; A low temperature study of the reactions of atomic chlorine with simple alkanes.; Journal of Physical Chemistry A 114 3038 (2010)
139. Hily-Blant P., Walmsley M., Pineau Des Forêts G., Flower D.; Nitrogen chemistry and depletion in starless cores; Astronomy and Astrophysics 513 A41 (2010)
140. Hily-Blant P., Maret S., Bacmann A., Bottinelli S., Parise B., Caux E., Faure A., Bergin E. A., Blake G. A., Castets A., Ceccarelli C., Cernicharo J., Coutens A., Crimier N., Demyk K., Dominik C., Gerin M., Hennebelle P., Henning T., Kahane C., Klotz A., Melnick G., Pagani L., Schilke P., Vastel C., Walters V., Walters A., Baudry A., Bell T., Benedettini M., Boogert A., Cabrit S., Caselli P., Codella C., Comito C., Encrenaz P., Falgarone E., Fuente A., Goldsmith P. F., Helmich F., Herbst E., Jacq T., Kama M., Langer W., Lefloch B., Lis D., Lord S., Lorenzani A., Neufeld D., Nisini B., Pacheco S., Phillips T., Salez M., Saraceno P., Schuster K., Tielens X., van der Tak F., van der Wiel M. H. D., Viti S., Wyrowski F., Yorke H.; Nitrogen hydrides in the cold envelope of IRAS 16293- 2422; Astronomy and Astrophysics 521 L52 (2010)
141. Hochlaf M., Chambaud G., Senent M. L.; H2NSi radical: structures, isomerization pathways and electronic states characterization; Molecular Physics 108 1277 (2010)
142. Hochlaf M., Ndome H., Hammoutène D., Vervloet M.; Valence-Rydberg electronic states of N2: spectroscopy and spin-orbit couplings; Journal of Physics B Atomic Molecular Physics 43 245101 (2010)
143. Hochlaf M., Ndome H., Hammoutène D.; Quintet electronic states of N2; Journal of Chemical Physics 132 104310 (2010)
144. Hony S., Galliano F., Madden S. C., Panuzzo P., Meixner M., Engelbracht C., Misselt K., Galametz M., Sauvage M., Roman-Duval J., Gordon K., Lawton B., Bernard J.-P., Bolatto A., Okumura K., Chen C.-H. R., Indebetouw R., Israel F. P., Kwon E., Li A., Kemper F., Oey M. S., Rubio M., Triou H. E.; The *Herschel* revolution: Unveiling the morphology of the high-mass star-formation sites N44 and N63 in the LMC; Astronomy and Astrophysics 518 L76 (2010)
145. Huélamo N., Bouy H., Pinte C., Ménard F., Duchêne G., Comerón F., Fernández M., Barrado D., Bayo A., de Gregorio-Monsalvo I., Olofsson J.; Multi-wavelength study of the disk around the very low-mass star Par-Lup3-4; Astronomy and Astrophysics 523 A42 (2010)
146. Hwang H. S., Elbaz D., Magdis G., Daddi E., Symeonidis M., Altieri B., Amblard A., Andreani P., Arumugam V., Auld R., Aussel H., Babbedge T., Berta S., Blain A., Bock J., Bongiovanni A., Boselli A., Buat V., Burgarella D., Castro-Rodríguez N., Cava A., Cepa J., Chanial P., Chapin E., Chary R.-R., Cimatti A., Clements D. L., Conley A., Conversi L., Cooray A., Dannerbauer H., Dickinson M., Dominguez H., Dowell C. D., Dunlop J. S., Dwek E., Eales S., Farrah D., Schreiber N. F., Fox M., Franceschini A., Gear W., Genzel R., Glenn J., Griffin M., Gruppioni C., Halpern M., Hatziminaoglou E., Ibar E., Isaak K., Ivison R. J., Jeong W.-S., Lagache G., Le Borgne D., Le Floc'h E., Lee H. M., Lee J. C., Lee M. G., Levenson L., Lu N., Lutz D., Madden S., Maffei B., Magnelli B., Mainetti G., Maiolino R., Marchetti L., Mortier A. M. J., Nguyen H. T., Nordon R., O'Halloran B., Okumura K., Oliver S. J., Omont A., Page M. J., Panuzzo P., Papageorgiou A., Pearson C. P., Pérez-Fournon I., García A. M. P., Poglitsch A., Pohlen M., Popesso P., Pozzi F., Rawlings J. I., Rigopoulou D., Riguccini L., Rizzo D., Rodighiero G., Roseboom I. G., Rowan-Robinson M., Saintonge A., Portal M. S., Santini P., Sauvage M., Schulz B., Scott D., Seymour N., Shao L., Shupe D. L., Smith A. J., Stevens J. A., Sturm E., Tacconi L., Trichas M., Tugwell K. E., Vaccari M., Valtchanov I., Vieira J. D., Vigroux L., Wang L., Ward R., Wright G., Xu C. K., Zemcov M.; Evolution of dust temperature of galaxies through cosmic time as seen by *Herschel*; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 409 75 (2010)

147. Ivison R. J., Magnelli B., Ibar E., Andreani P., Elbaz D., Altieri B., Amblard A., Arumugam V., Auld R., Aussel H., Babbedge T., Berta S., Blain A., Bock J., Bongiovanni A., Boselli A., Buat V., Burgarella D., Castro-Rodríguez N., Cava A., Cepa J., Chanial P., Cimatti A., Cirasuolo M., Clements D. L., Conley A., Conversi L., Cooray A., Daddi E., Dominguez H., Dowell C. D., Dwek E., Eales S., Farrah D., Förster Schreiber N., Fox M., Franceschini A., Gear W., Genzel R., Glenn J., Griffin M., Gruppioni C., Halpern M., Hatziminaoglou E., Isaak K., Lagache G., Levenson L., Lu N., Lutz D., Madden S., Maffei B., Magdis G., Mainetti G., Maiolino R., Marchetti L., Morrison G. E., Mortier A. M. J., Nguyen H. T., Nordon R., O'Halloran B., Oliver S. J., Omont A., Owen F. N., Page M. J., Panuzzo P., Papageorgiou A., Pearson C. P., Pérez-Fournon I., Pérez García A. M., Poglitsch A., Pohlen M., Popesso P., Pozzi F., Rawlings J. I., Raymond G., Rigopoulou D., Riguccini L., Rizzo D., Rodighiero G., Roseboom I. G., Rowan-Robinson M., Saintonge A., Sanchez Portal M., Santini P., Schulz B., Scott D., Seymour N., Shao L., Shupe D. L., Smith A. J., Stevens J. A., Sturm E., Symeonidis M., Tacconi L., Trichas M., Tugwell K. E., Vaccari M., Valtchanov I., Vieira J., Vigroux L., Wang L., Ward R., Wright G., Xu C. K., Zemcov M.; The far-infrared/radio correlation as probed by *Herschel*; Astronomy and Astrophysics 518 L31 (2010)

148. Joalland B. Rapacioli M., Simon A., Joblin C., Marsden C. J. , Spiegelman F.; Molecular dynamics simulations of anharmonic infrared spectra of Si-ipah pi-complexes ; Journal Physical Chemistry A 114 5846 (2010)

149. Joblin C., Pilleri P., Montillaud J., Fuente A., Gerin M., Berné O., Ossenkopf V., Le Bourlot J., Teyssier D., Goicoechea J. R., Le Petit F., Röllig M., Akyilmaz M., Benz A. O., Boulanger F., Bruderer S., Dedes C., France K., Gusten R., Harris A., Klein T., Kramer C., Lord S. D., Martin P. G., Martin-Pintado J., Mookerjea B., Okada Y., Phillips T. G., Rizzo J. R., Simon R., Stutzki J., van der Tak F., Yorke H. W., Steinmetz E., Jarchow C., Hartogh P., Honingh C. E., Siebertz O., Caux E., Colin B.; Gas morphology and energetics at the surface of PDRs: New insights with *Herschel* observations of NGC 7023; Astronomy and Astrophysics 521 L25 (2010)

150. Johnstone D., Fich M., McCoey C., van Kempen T. A., Fuente A., Kristensen L. E., Cernicharo J., Caselli P., Visser R., Plume R., Herczeg G. J., van Dishoeck E. F., Wampfler S., Bachiller R., Baudry A., Benedettini M., Bergin E., Benz A. O., Bjerkeli P., Blake G., Bontemps S., Braine J., Bruderer S., Codella C., Daniel F., di Giorgio A. M., Dominik C., Doty S. D., Encrenaz P., Giannini T., Goicoechea J. R., de Graauw T., Helmich F., Herpin F., Hogerheijde M. R., Jacq T., Joergensen J. K., Larsson B., Lis D., Liseau R., Marseille M., Melnick G., Neufeld D., Nisini B., Olberg M., Parise B., Pearson J., Risacher C., Santiago-García J., Saraceno P., Shipman R., Tafalla M., van der Tak F., Wyrowski F., Yıldız U. A., Caux E., Honingh N., Jellema W., Schieder R., Teyssier D., Whyborn N.; *Herschel*/HIFI spectroscopy of the intermediate mass protostar NGC 7129 FIRS 2; Astronomy and Astrophysics 521 L41 (2010)

151. Jorfi M., Honvault P.; Quantum dynamics of the S+OH-->SO+H reaction; Journal of Chemical Physics 133 144315 (2010)

152. Juvela M., Ristorcelli I., Montier L. A., Marshall D. J., Pelkonen V.-M., Malinen J., Ysard N., Tóth L. V., Harju J., Bernard J.-P., Schneider N., Verebélyi E., Anderson L., André P., Giard M., Krause O., Lehtinen K., Macias-Perez J., Martin P., McGehee P. M., Meny C., Motte F., Pagani L., Paladini R., Reach W., Valenziano L., Ward-Thompson D., Zavagno A.; Galactic cold cores: *Herschel* study of first *Planck* detections; Astronomy and Astrophysics 518 L93 (2010)

153. Kama M., Dominik C., Maret S., van der Tak F., Caux E., Ceccarelli C., Fuente A., Crimier N., Lord S., Bacmann A., Baudry A., Bell T., Benedettini M., Bergin E. A., Blake G. A., Boogert A., Bottinelli S., Cabrit S., Caselli P., Castets A., Cernicharo J., Codella C., Comito C., Coutens A., Demyk K., Encrenaz P., Falgarone E., Gerin M., Goldsmith P. F., Helmich F., Hennebelle P., Henning T., Herbst E., Hily-Blant P., Jacq T., Kahane C., Klotz A., Langer W., Lefloch B., Lis D., Lorenzani A., Melnick G., Nisini B., Pacheco S., Pagani L., Parise B., Pearson J., Phillips T., Salez M., Saraceno P., Schilke P., Schuster K., Tielens X., van der Wiel M. H. D., Vastel C., Viti S., Walters V., Walters A., Wyrowski F., Yorke H., Cais P., Güsten R., Philipp S., Klein T., Helmich F.; The methanol lines and hot core of OMC2-FIR4, an intermediate-mass protostar, with *Herschel*/HIFI; Astronomy and Astrophysics 521 L39 (2010)

154. Könyves V., André P., Men'shchikov A., Schneider N., Arzoumanian D., Bontemps S., Attard M., Motte F., Didelon P., Maury A., Abergel A., Ali B., Baluteau J.-P., Bernard J.-P., Cambrésy L., Cox P., di Francesco J., di Giorgio A. M., Griffin M. J., Hargrave P., Huang M., Kirk J., Li J. Z., Martin P., Minier V., Molinari S., Olofsson G., Pezzuto S., Russeil D., Roussel H., Saraceno P., Sauvage M., Sibthorpe B., Spinoglio L., Testi L., Ward-Thompson D., White G., Wilson C. D., Woodcraft A., Zavagno A.; The Aquila prestellar core population revealed by *Herschel*; Astronomy and Astrophysics 518 L106 (2010)

155. Kastner J. H., Hily-Blant P., Sacco G. G., Forveille T., Zuckerman B.; Detection of a Molecular Disk Orbiting the Nearby, "old," Classical T Tauri Star MP Muscae; The Astrophysical Journal 723 L248 (2010)

156. Kemper F., Woods P. M., Antoniou V., Bernard J.-P., Blum R. D., Boyer M. L., Chan J., Chen C.-H. R., Cohen M., Dijkstra C., Engelbracht C., Galametz M., Galliano F., Gielen C., Gordon K. D., Gorjian V., Harris J., Hony S., Hora J. L., Indebetouw R., Jones O., Kawamura A., Lagadec E., Lawton B., Leisenring J. M., Madden S. C., Marengo M., Matsuura M., McDonald I., McGuire C., Meixner M., Mulia A. J., O'Halloran B., Oliveira J. M., Paladini R., Paradis D., Reach W. T., Rubin D., Sandstrom K., Sargent B. A., Sewilo M., Shiao B., Sloan G. C., Speck A. K., Srinivasan S., Szczerba R., Tielens A. G. G. M., van Aarle E., Van Dyk S. D., van Loon J. T., Van Winckel H., Vijh U. P., Volk K., Whitney B. A., Wilkins A. N., Zijlstra A. A.; The SAGE-Spec Spitzer Legacy Program: The Life Cycle of Dust and Gas in the Large Magellanic Cloud; Publications of the Astronomical Society of the Pacific 122 683 (2010)

157. Kim S., Kwon E., Madden S. C., Meixner M., Hony S., Panuzzo P., Sauvage M., Roman-Duval J., Gordon K. D., Engelbracht C., Israel F. P., Misselt K., Okumura K., Li A., Bolatto A., Skibba R., Galliano F., Matsuura M., Bernard J.-P., Bot C., Galametz M., Hughes A., Kawamura A., Onishi T., Paradis D., Poglitsch A., Reach W. T., Robitaille T., Rubio M., Tielens A. G. G. M.; Cold dust clumps in dynamically hot gas; Astronomy and Astrophysics 518 L75 (2010)

158. Kirk J. M., Polehampton E., Anderson L. D., Baluteau J.-P., Bontemps S., Joblin C., Jones S. C., Naylor D. A., Ward-Thompson D., White G. J., Abergel A., Ade P., André P., Arab H., Bernard J.-P., Blagrave K., Boulanger F., Cohen M., Compiegne M., Cox P., Dartois E., Davis G., Emery R., Fulton T., Gry C., Habart E., Huang M., Lagache G., Lim T., Madden S., Makiwa G., Martin P., Miville-Deschênes M.-A., Molinari S., Moseley H., Motte F., Okumura K., Pinheiro Gonçalves D., Rodón J. A., Russeil D., Saraceno P., Sidher S., Spencer L., Swinyard B., Zavagno A.; *Herschel*-SPIRE spectroscopy of G29.96-0.02: Fitting the full SED; Astronomy and Astrophysics 518 L82 (2010)

159. Klessen R. S., Hennebelle P.; Accretion-driven turbulence as universal process: galaxies, molecular clouds, and protostellar disks; Astronomy and Astrophysics 520 A17 (2010)

160. Kokoouline V., Faure A., Tennyson J., Greene C. H.; Calculation of rate constants for vibrational and rotational excitation of the H+3 ion by electron impact; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 405 1195 (2010)

161. Laffon C., Lasne J., Bournel F., Schulte K., Lacombe S., Parent Ph.; Photochemistry of carbon monoxide and methanol

in water and nitric acid hydrate ices: A NEXAFS study; Physical Chemistry Chemical Physics 12 10865 (2010)
162. Larbi T., Khadri F., Ghalila H., Lahmar S., Hochlaf M.; Theoretical spectroscopy and metastability of BeS and its cation; Chemical Physics 374 193 (2010)
163. Larbi T., Khadri F., Ghalila H., Lahmar S., Hochlaf M.; Theoretical spectroscopy and metastability of BeS and its cation; Chemical Physics 373 193 (2010)
164. Lattelais M., Ellinger Y., Matrane A., Guillemin J.-C.; Looking for heteroaromatic rings and related isomers as interstellar candidates; Physical Chemistry Chemical Physics (Incorporating Faraday Transactions) 12 4165 (2010)
165. Lattelais M., Pauzat F., Ellinger Y., Ceccarelli C.; A new weapon for the interstellar complex organic molecule hunt: the minimum energy principle; Astronomy and Astrophysics 519 A30 (2010)
166. Lawton B., Gordon K. D., Babler B., Block M., Bolatto A. D., Bracker S., Carlson L. R., Engelbracht C. W., Hora J. L., Indebetouw R., Madden S. C., Meade M., Meixner M., Misselt K., Oey M. S., Oliveira J. M., Robitaille T., Sewilo M., Shiao B., Vijh U. P., Whitney B.; Spitzer Analysis of H II Region Complexes in the Magellanic Clouds: Determining a Suitable Monochromatic Obscured Star Formation Indicator; The Astrophysical Journal 716 453 (2010)
167. Lefloch B., Cabrit S., Codella C., Melnick G., Cernicharo J., Caux E., Benedettini M., Boogert A., Caselli P., Ceccarelli C., Gueth F., Hily-Blant P., Lorenzani A., Neufeld D., Nisini B., Pacheco S., Pagani L., Pardo J. R., Parise B., Salez M., Schuster K., Viti S., Bacmann A., Baudry A., Bell T., Bergin E. A., Blake G., Bottinelli S., Castets A., Comito C., Coutens A., Crimier N., Dominik C., Demyk K., Encrenaz P., Falgarone E., Fuente A., Gerin M., Goldsmith P., Helmich F., Hennebelle P., Henning T., Herbst E., Jacq T., Kahane C., Kama M., Klotz A., Langer W., Lis D., Lord S., Maret S., Pearson J., Phillips T., Saraceno P., Schilke P., Tielens X., van der Tak F., van der Wiel M., Vastel C., Walters V., Walters A., Wyrowski F., Yorke H., Bachiller R., Borys C., de Lange G., Delorme Y., Kramer C., Larsson B., Lai R., Maiwald F. W., Martin-Pintado J., Mehdi I., Ossenkopf V., Siegel P., Stutzki J., Wunsch J. H.; The CHESS spectral survey of star forming regions: Peering into the protostellar shock L1157-B1. II. Shock dynamics; Astronomy and Astrophysics 518 L113 (2010)
168. Lemaire J. L., Vidali G., Baouche S., Chehrouri M., Chaabouni H., Mokrane H.; Competing Mechanisms of Molecular Hydrogen Formation in Conditions Relevant to the Interstellar Medium; The Astrophysical Journal 725 L156 (2010)
169. Leonori F., Hickson K. M., Le Picard S. D., Wang X., Petrucci R., Foggi P., Balucani N., Casavecchia P.; Crossed-beam universal-detection reactive scattering of radical beams characterized by laser-induced-fluorescence: the case of C2and CN; Molecular Physics 108 1097 (2010)
170. Libert Y., Gérard E., Thum C., Winters J. M., Matthews L. D., Le Bertre T.; Circumstellar H I and CO around the carbon stars V1942 Sagittarii and V Coronae Borealis; Astronomy and Astrophysics 510 A14 (2010)
171. Libert Y., Winters J. M., Le Bertre T., Gérard E., Matthews L. D.; H i and CO in the circumstellar environment of the S-type star RS Cancri; Astronomy and Astrophysics 515 A112 (2010)
172. Lique F., Kłos J., Hochlaf M.; Benchmarks for the generation of interaction potentials for scattering calculations: applications to rotationally inelastic collisions of C4 (X3Σ-g) with He; Physical Chemistry Chemical Physics (Incorporating Faraday Transactions) 12 15672 (2010)
173. Lique F., Spielfiedel A., Feautrier N., Schneider I. F., Kłos J., Alexander M. H.; Rotational excitation of CN(X 2Σ+) by He: Theory and comparison with experiments; Journal of Chemical Physics 132 024303 (2010)
174. Lique F.; Temperature dependence of the fine-structure resolved rate coefficients for collisions of O2(X3Σg-) with He; Journal of Chemical Physics 132 044311 (2010)
175. Lis D. C., Phillips T. G., Goldsmith P. F., Neufeld D. A., Herbst E., Comito C., Schilke P., Müller H. S. P., Bergin E. A., Gerin M., Bell T. A., Emprechtinger M., Black J. H., Blake G. A., Boulanger F., Caux E., Ceccarelli C., Cernicharo J., Coutens A., Crockett N. R., Daniel F., Dartois E., de Luca M., Dubernet M.-L., Encrenaz P., Falgarone E., Geballe T. R., Godard B., Giesen T. F., Goicoechea J. R., Gry C., Gupta H., Hennebelle P., Hily-Blant P., Kołos R., Krełowski J., Joblin C., Johnstone D., Kaźmierczak M., Lord S. D., Maret S., Martin P. G., Martín-Pintado J., Melnick G. J., Menten K. M., Monje R., Mookerjea B., Morris P., Murphy J. A., Ossenkopf V., Pearson J. C., Pérault M., Persson C., Plume R., Qin S.-L., Salez M., Schlemmer S., Schmidt M., Sonnentrucker P., Stutzki J., Teyssier D., Trappe N., van der Tak F. F. S., Vastel C., Wang S., Yorke H. W., Yu S., Zmuidzinas J., Boogert A., Erickson N., Karpov A., Kooi J., Maiwald F. W., Schieder R., Zaal P.; *Herschel*/HIFI measurements of the ortho/para ratio in water towards Sagittarius B2(M) and W31C; Astronomy and Astrophysics 521 L26 (2010)
176. Lis D. C., Wootten A., Gerin M., Roueff E.; Nitrogen Isotopic Fractionation in Interstellar Ammonia; The Astrophysical Journal 710 L49 (2010)
177. Lis D. C., Pearson J. C., Neufeld D. A., Schilke P., Müller H. S. P., Gupta H., Bell T. A., Comito C., Phillips T. G., Bergin E. A., Ceccarelli C., Goldsmith P. F., Blake G. A., Bacmann A., Baudry A., Benedettini M., Benz A., Black J., Boogert A., Bottinelli S., Cabrit S., Caselli P., Castets A., Caux E., Cernicharo J., Codella C., Coutens A., Crimier N., Crockett N. R., Daniel F., Demyk K., Dominic C., Dubernet M.-L., Emprechtinger M., Encrenaz P., Falgarone E., Fuente A., Gerin M., Giesen T. F., Goicoechea J. R., Helmich F., Hennebelle P., Henning T., Herbst E., Hily-Blant P., Hjalmarson Å., Hollenbach D., Jack T., Joblin C., Johnstone D., Kahane C., Kama M., Kaufman M., Klotz A., Langer W. D., Larsson B., Le Bourlot J., Lefloch B., Le Petit F., Li D., Liseau R., Lord S. D., Lorenzani A., Maret S., Martin P. G., Melnick G. J., Menten K. M., Morris P., Murphy J. A., Nagy Z., Nisini B., Ossenkopf V., Pacheco S., Pagani L., Parise B., Pérault M., Plume R., Qin S.-L., Roueff E., Salez M., Sandqvist A., Saraceno P., Schlemmer S., Schuster K., Snell R., Stutzki J., Tielens A., Trappe N., van der Tak F. F. S., van der Wiel M. H. D., van Dishoeck E., Vastel C., Viti S., Wakelam V., Walters A., Wang S., Wyrowski F., Yorke H. W., Yu S., Zmuidzinas J., Delorme Y., Desbat J.-P., Güsten R., Krieg J.-M., Delforge B.; *Herschel*/HIFI discovery of interstellar chloronium (H2Cl+); Astronomy and Astrophysics 521 L9 (2010)
178. Loenen A. F., van der Werf P. P., Güsten R., Meijerink R., Israel F. P., Requena-Torres M. A., García-Burillo S., Harris A. I., Klein T., Kramer C., Lord S., Martín-Pintado J., Röllig M., Stutzki J., Szczerba R., Weiß A., Philipp-May S., Yorke H., Caux E., Delforge B., Helmich F., Lorenzani A., Morris P., Philips T. G., Risacher C., Tielens A. G. G. M.; Excitation of the molecular gas in the nuclear region of M 82; Astronomy and Astrophysics 521 L2 (2010)
179. Maatouk A., Ben Houria A., Yazidi O., Jaidane N., Hochlaf M.; Electronic states of MgO: Spectroscopy, predissociation, and cold atomic Mg and O production; Journal of Chemical Physics 133 144302 (2010)
180. Maffei B., Noviello F., Murphy J. A., Ade P. A. R., Lamarre J.-M., Bouchet F. R., Brossard J., Catalano A., Colgan R., Gispert R., Gleeson E., Haynes C. V., Jones W. C., Lange A. E., Longval Y., McAuley I., Pajot F., Peacocke T., Pisano G., Puget J.-L., Ristorcelli I., Savini G., Sudiwala R., Wylde R. J., Yurchenko V.; *Planck* pre-launch status: HFI beam expectations from the optical optimisation of the focal plane; Astronomy and Astrophysics 520 A12 (2010)
181. Magdis G. E., Elbaz D., Hwang H. S., Amblard A., Arumugam V., Aussel H., Blain A., Bock J., Boselli A., Buat V.,

Castro-Rodríguez N., Cava A., Chanial P., Clements D. L., Conley A., Conversi L., Cooray A., Dowell C. D., Dwek E., Eales S., Farrah D., Franceschini A., Glenn J., Griffin M., Halpern M., Hatziminaoglou E., Huang J., Ibar E., Isaak K., Le Floc'h E., Lagache G., Levenson L., Lonsdale C. J., Lu N., Madden S., Maffei B., Mainetti G., Marchetti L., Morrison G. E., Nguyen H. T., O'Halloran B., Oliver S. J., Omont A., Owen F. N., Page M. J., Pannella M., Panuzzo P., Papageorgiou A., Pearson C. P., Pérez-Fournon I., Pohlen M., Rigopoulou D., Rizzo D., Roseboom I. G., Rowan-Robinson M., Schulz B., Scott D., Seymour N., Shupe D. L., Smith A. J., Stevens J. A., Strazzullo V., Symeonidis M., Trichas M., Tugwell K. E., Vaccari M., Valtchanov I., Vigroux L., Wang L., Wright G., Xu C. K., Zemcov M.; *Herschel* reveals a Tdust-unbiased selection of z ~ 2 ultraluminous infrared galaxies; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 409 22 (2010)

182. Marcelino N., Brünken S., Cernicharo J., Quan D., Roueff E., Herbst E., Thaddeus P.; The puzzling behavior of HNCO isomers in molecular clouds; Astronomy and Astrophysics 516 A105 (2010)
183. Margulès L., Huet T. R., Demaison J., Carvajal M., Kleiner I., Moellendal H., Tercero B., Marcelino N., Cernicharo J.; Rotational Spectrum and Tentative Detection of DCOOCH3-Methyl Formate in Orion; The Astrophysical Journal 714 1120 (2010)
184. Marloie G., Lattelais M., Pauzat F., Pilme J., Ellinger Y.; Looking for homochirality in the inter-stellar medium; Interdisciplinary sciences, computational life sciences 2 1 48 (2010)
185. Marouani S., Bahri M., Batis H., Hochlaf M.; Reactivity of the NO dimer: On the role of the triplet electronic states; J. Phys. Chem. A 114, 3025 (2010)
186. Marseille M. G., van der Tak F. F. S., Herpin F., Wyrowski F., Chavarría L., Pietropaoli B., Baudry A., Bontemps S., Cernicharo J., Jacq T., Frieswijk W., Shipman R., van Dishoeck E. F., Bachiller R., Benedettini M., Benz A. O., Bergin E., Bjerkeli P., Blake G. A., Braine J., Bruderer S., Caselli P., Caux E., Codella C., Daniel F., Dieleman P., di Giorgio A. M., Dominik C., Doty S. D., Encrenaz P., Fich M., Fuente A., Gaier T., Giannini T., Goicoechea J. R., de Graauw T., Helmich F., Herczeg G. J., Hogerheijde M. R., Jackson B., Javadi H., Jellema W., Johnstone D., Joergensen J. K., Kester D., Kristensen L. E., Larsson B., Laauwen W., Lis D., Liseau R., Luinge W., McCoey C., Megej A., Melnick G., Neufeld D., Nisini B., Olberg M., Parise B., Pearson J. C., Plume R., Risacher C., Roelfsema P., Santiago-García J., Saraceno P., Siegel P., Stutzki J., Tafalla M., van Kempen T. A., Visser R., Wampfler S. F., Yıldız U. A.; Water abundances in high-mass protostellar envelopes: *Herschel* observations with HIFI; Astronomy and Astrophysics 521 L32 (2010)
187. Martin-Zaïdi C., Augereau J.-C., Ménard F., Olofsson J., Carmona A., Pinte C., Habart E.; Where is the warm H2? A search for H2 emission from disks around Herbig Ae/Be stars; Astronomy and Astrophysics 516 A110 (2010)
188. Martins F., Pomarès M., Deharveng L., Zavagno A., Bouret J. C.; Near-IR integral field spectroscopy of ionizing stars and young stellar objects on the borders of H II regions; Astronomy and Astrophysics 510 A32 (2010)
189. Matar E., Bergeron H., Dulieu F., Chaabouni H., Accolla M., Lemaire J. L.; Gas temperature dependent sticking of hydrogen on cold amorphous water ice surfaces of interstellar interest; Journal of Chemical Physics 133 104507 (2010)
190. Mathews G. S., Dent W. R. F., Williams J. P., Howard C. D., Meeus G., Riaz B., Roberge A., Sandell G., Vandenbussche B., Duchêne G., Kamp I., Ménard F., Montesinos B., Pinte C., Thi W. F., Woitke P., Alacid J. M., Andrews S. M., Ardila D. R., Aresu G., Augereau J. C., Barrado D., Brittain S., Ciardi D. R., Danchi W., Eiroa C., Fedele D., Grady C. A., de Gregorio-Monsalvo I., Heras A., Huelamo N., Krivov A., Lebreton J., Liseau R., Martin-Zaidi C., Mendigutía I., Mora A., Morales-Calderon M., Nomura H., Pantin E., Pascucci I., Phillips N., Podio L., Poelman D. R., Ramsay S., Rice K., Riviere-Marichalar P., Solano E., Tilling I., Walker H., White G. J., Wright G.; GAS in Protoplanetary Systems (GASPS). I. First results; Astronomy and Astrophysics 518 L127 (2010)
191. Maury A. J., André P., Hennebelle P., Motte F., Stamatellos D., Bate M., Belloche A., Duchêne G., Whitworth A.; Toward understanding the formation of multiple systems. A pilot IRAM-PdBI survey of Class 0 objects; Astronomy and Astrophysics 512 A40 (2010)
192. Meeus G., Pinte C., Woitke P., Montesinos B., Mendigutía I., Riviere-Marichalar P., Eiroa C., Mathews G. S., Vandenbussche B., Howard C. D., Roberge A., Sandell G., Duchêne G., Ménard F., Grady C. A., Dent W. R. F., Kamp I., Augereau J. C., Thi W. F., Tilling I., Alacid J. M., Andrews S., Ardila D. R., Aresu G., Barrado D., Brittain S., Ciardi D. R., Danchi W., Fedele D., de Gregorio-Monsalvo I., Heras A., Huelamo N., Krivov A., Lebreton J., Liseau R., Martin-Zaidi C., Mora A., Morales-Calderon M., Nomura H., Pantin E., Pascucci I., Phillips N., Podio L., Poelman D. R., Ramsay S., Riaz B., Rice K., Solano E., Walker H., White G. J., Williams J. P., Wright G.; Gas in the protoplanetary disc of HD 169142: *Herschel*'s view; Astronomy and Astrophysics 518 L124 (2010)
193. Meixner M., Galliano F., Hony S., Roman-Duval J., Robitaille T., Panuzzo P., Sauvage M., Gordon K., Engelbracht C., Misselt K., Okumura K., Beck T., Bernard J.-P., Bolatto A., Bot C., Boyer M., Bracker S., Carlson L. R., Clayton G. C., Chen C.-H. R., Churchwell E., Fukui Y., Galametz M., Hora J. L., Hughes A., Indebetouw R., Israel F. P., Kawamura A., Kemper F., Kim S., Kwon E., Lawton B., Li A., Long K. S., Marengo M., Madden S. C., Matsuura M., Oliveira J. M., Onishi T., Otsuka M., Paradis D., Poglitsch A., Riebel D., Reach W. T., Rubio M., Sargent B., Sewiło M., Simon J. D., Skibba R., Smith L. J., Srinivasan S., Tielens A. G. G. M., van Loon J. T., Whitney B., Woods P. M.; *Herschel* Inventory of The Agents of Galaxy Evolution (HERITAGE): The Large Magellanic Cloud dust; Astronomy and Astrophysics 518 L71 (2010)
194. Melnick G. J., Tolls V., Neufeld D. A., Bergin E. A., Phillips T. G., Wang S., Crockett N. R., Bell T. A., Blake G. A., Cabrit S., Caux E., Ceccarelli C., Cernicharo J., Comito C., Daniel F., Dubernet M.-L., Emprechtinger M., Encrenaz P., Falgarone E., Gerin M., Giesen T. F., Goicoechea J. R., Goldsmith P. F., Herbst E., Joblin C., Johnstone D., Langer W. D., Latter W. D., Lis D. C., Lord S. D., Maret S., Martin P. G., Menten K. M., Morris P., Müller H. S. P., Murphy J. A., Ossenkopf V., Pagani L., Pearson J. C., Pérault M., Plume R., Qin S.-L., Salez M., Schilke P., Schlemmer S., Stutzki J., Trappe N., van der Tak F. F. S., Vastel C., Yorke H. W., Yu S., Zmuidzinas J.; *Herschel* observations of EXtra-Ordinary Sources (HEXOS): Observations of H2O and its isotopologues towards Orion KL; Astronomy and Astrophysics 521 L27 (2010)
195. Men'shchikov A., André P., Didelon P., Könyves V., Schneider N., Motte F., Bontemps S., Arzoumanian D., Attard M., Abergel A., Baluteau J.-P., Bernard J.-P., Cambrésy L., Cox P., di Francesco J., di Giorgio A. M., Griffin M., Hargrave P., Huang M., Kirk J., Li J. Z., Martin P., Minier V., Miville-Deschênes M.-A., Molinari S., Olofsson G., Pezzuto S., Roussel H., Russeil D., Saraceno P., Sauvage M., Sibthorpe B., Spinoglio L., Testi L., Ward-Thompson D., White G., Wilson C. D., Woodcraft A., Zavagno A.; Filamentary structures and compact objects in the Aquila and Polaris clouds observed by *Herschel*; Astronomy and Astrophysics 518 L103 (2010)
196. Menten K. M., Wyrowski F., Alcolea J., De Beck E., Decin L., Marston A. P., Bujarrabal V., Cernicharo J., Dominik C.,

Justtanont K., de Koter A., Melnick G., Neufeld D. A., Olofsson H., Planesas P., Schmidt M., Schöier F. L., Szczerba R., Teyssier D., Waters L. B. F. M., Edwards K., Olberg M., Phillips T. G., Morris P., Salez M., Caux E.; *Herschel*/HIFI deepens the circumstellar NH3 enigma; Astronomy and Astrophysics 521 L7 (2010)

197. Miville-Deschênes M.-A., Martin P. G., Abergel A., Bernard J.-P., Boulanger F., Lagache G., Anderson L. D., André P., Arab H., Baluteau J.-P., Blagrave K., Bontemps S., Cohen M., Compiegne M., Cox P., Dartois E., Davis G., Emery R., Fulton T., Gry C., Habart E., Huang M., Joblin C., Jones S. C., Kirk J., Lim T., Madden S., Makiwa G., Menshchikov A., Molinari S., Moseley H., Motte F., Naylor D. A., Okumura K., Pinheiro Gonçalves D., Polehampton E., Rodón J. A., Russeil D., Saraceno P., Schneider N., Sidher S., Spencer L., Swinyard B., Ward-Thompson D., White G. J., Zavagno A.; *Herschel*-SPIRE observations of the Polaris flare: Structure of the diffuse interstellar medium at the sub-parsec scale; Astronomy and Astrophysics 518 L104 (2010)
198. Molinari S., Swinyard B., Bally J., Barlow M., Bernard J.-P., Martin P., Moore T., Noriega-Crespo A., Plume R., Testi L., Zavagno A., Abergel A., Ali B., Anderson L., André P., Baluteau J.-P., Battersby C., Beltrán M. T., Benedettini M., Billot N., Blommaert J., Bontemps S., Boulanger F., Brand J., Brunt C., Burton M., Calzoletti L., Carey S., Caselli P., Cesaroni R., Cernicharo J., Chakrabarti S., Chrysostomou A., Cohen M., Compiegne M., de Bernardis P., de Gasperis G., di Giorgio A. M., Elia D., Faustini F., Flagey N., Fukui Y., Fuller G. A., Ganga K., Garcia-Lario P., Glenn J., Goldsmith P. F., Griffin M., Hoare M., Huang M., Ikhenaode D., Joblin C., Joncas G., Juvela M., Kirk J. M., Lagache G., Li J. Z., Lim T. L., Lord S. D., Marengo M., Marshall D. J., Masi S., Massi F., Matsuura M., Minier V., Miville-Deschênes M.-A., Montier L. A., Morgan L., Motte F., Mottram J. C., Müller T. G., Natoli P., Neves J., Olmi L., Paladini R., Paradis D., Parsons H., Peretto N., Pestalozzi M., Pezzuto S., Piacentini F., Piazzo L., Polychroni D., Pomarès M., Popescu C. C., Reach W. T., Ristorcelli I., Robitaille J.-F., Robitaille T., Rodón J. A., Roy A., Royer P., Russeil D., Saraceno P., Sauvage M., Schilke P., Schisano E., Schneider N., Schuller F., Schulz B., Sibthorpe B., Smith H. A., Smith M. D., Spinoglio L., Stamatellos D., Strafella F., Stringfellow G. S., Sturm E., Taylor R., Thompson M. A., Traficante A., Tuffs R. J., Umana G., Valenziano L., Vavrek R., Veneziani M., Viti S., Waelkens C., Ward-Thompson D., White G., Wilcock L. A., Wyrowski F., Yorke H. W., Zhang Q.; Clouds, filaments, and protostars: The *Herschel* Hi-GAL Milky Way; Astronomy and Astrophysics 518 L100 (2010)
199. Molinari S., Swinyard B., Bally J., Barlow M., Bernard J.-P., Martin P., Moore T., Noriega-Crespo A., Plume R., Testi L., Zavagno A., Abergel A., Ali B., André P., Baluteau J.-P., Benedettini M., Berné O., Billot N. P., Blommaert J., Bontemps S., Boulanger F., Brand J., Brunt C., Burton M., Campeggio L., Carey S., Caselli P., Cesaroni R., Cernicharo J., Chakrabarti S., Chrysostomou A., Codella C., Cohen M., Compiegne M., Davis C. J., de Bernardis P., de Gasperis G., Di Francesco J., di Giorgio A. M., Elia D., Faustini F., Fischera J. F., Fukui Y., Fuller G. A., Ganga K., Garcia-Lario P., Giard M., Giardino G., Glenn J. :, Goldsmith P., Griffin M., Hoare M., Huang M., Jiang B., Joblin C., Joncas G., Juvela M., Kirk J., Lagache G., Li J. Z., Lim T. L., Lord S. D., Lucas P. W., Maiolo B., Marengo M., Marshall D., Masi S., Massi F., Matsuura M., Meny C., Minier V., Miville-Deschênes M.-A., Montier L., Motte F., Müller T. G., Natoli P., Neves J., Olmi L., Paladini R., Paradis D., Pestalozzi M., Pezzuto S., Piacentini F., Pomarès M., Popescu C. C., Reach W. T., Richer J., Ristorcelli I., Roy A., Royer P., Russeil D., Saraceno P., Sauvage M., Schilke P., Schneider-Bontemps N., Schuller F., Schultz B., Shepherd D. S., Sibthorpe B., Smith H. A., Smith M. D., Spinoglio L., Stamatellos D., Strafella F., Stringfellow G., Sturm E., Taylor R., Thompson M. A., Tuffs R. J., Umana G., Valenziano L., Vavrek R., Viti S., Waelkens C., Ward-Thompson D., White G., Wyrowski F., Yorke H. W., Zhang Q.; Hi-GAL: The *Herschel* Infrared Galactic Plane Survey; Publications of the Astronomical Society of the Pacific 122 314 (2010)
200. Monin J.-L., Guieu S., Pinte C., Rebull L., Goldsmith P., Fukagawa M., Ménard F., Padgett D., Stappelfeld K., McCabe C., Carey S., Noriega-Crespo A., Brooke T., Huard T., Terebey S., Hillenbrand L., Guedel M.; The large-scale disk fraction of brown dwarfs in the Taurus cloud as measured with Spitzer; Astronomy and Astrophysics 515 A91 (2010)
201. Montier L. A., Pelkonen V.-M., Juvela M., Ristorcelli I., Marshall D. J.; An all-sky catalogue of cold cores observed with *Planck*-HFI: simulation and colour detection algorithms; Astronomy and Astrophysics 522 A83 (2010)
202. Mookerjea B., Giesen T., Stutzki J., Cernicharo J., Goicoechea J. R., de Luca M., Bell T. A., Gupta H., Gerin M., Persson C. M., Sonnentrucker P., Makai Z., Black J., Boulanger F., Coutens A., Dartois E., Encrenaz P., Falgarone E., Geballe T., Godard B., Goldsmith P. F., Gry C., Hennebelle P., Herbst E., Hily-Blant P., Joblin C., Kaźmierczak M., Kołos R., Krełowski J., Lis D. C., Martin-Pintado J., Menten K. M., Monje R., Pearson J. C., Perault M., Phillips T. G., Plume R., Salez M., Schlemmer S., Schmidt M., Teyssier D., Vastel C., Yu S., Dieleman P., Güsten R., Honingh C. E., Morris P., Roelfsema P., Schieder R., Tielens A. G. G. M., Zmuidzinas J.; Excitation and abundance of C3 in star forming cores. *Herschel*/HIFI observations of the sight-lines to W31C and W49N; Astronomy and Astrophysics 521 L13 (2010)
203. Morales S. B., Le Picard S. D., Canosa A., Sims I. R.; Experimental measurements of low temperature rate coefficients for neutral-neutral reactions of interest for atmospheric chemistry of Titan, Pluto and Triton: Reactions of the CN radical; Faraday Discussions 147 155 (2010)
204. Motiyenko R. A., Margulès L., Alekseev E. A., Guillemin J.-C., Demaison J.; Centrifugal distortion analysis of the rotational spectrum of aziridine: Comparison of different Hamiltonians; Journal of Molecular Spectroscopy 264 94 (2010)
205. Motte F., Zavagno A., Bontemps S., Schneider N., Hennemann M., di Francesco J., André P., Saraceno P., Griffin M., Marston A., Ward-Thompson D., White G., Minier V., Men'shchikov A., Hill T., Abergel A., Anderson L. D., Aussel H., Balog Z., Baluteau J.-P., Bernard J.-P., Cox P., Csengeri T., Deharveng L., Didelon P., di Giorgio A.-M., Hargrave P., Huang M., Kirk J., Leeks S., Li J. Z., Martin P., Molinari S., Nguyen-Luong Q., Olofsson G., Persi P., Peretto N., Pezzuto S., Roussel H., Russeil D., Sadavoy S., Sauvage M., Sibthorpe B., Spinoglio L., Testi L., Teyssier D., Vavrek R., Wilson C. D., Woodcraft A.; Initial highlights of the HOBYS key program, the *Herschel* imaging survey of OB young stellar objects; Astronomy and Astrophysics 518 L77 (2010)
206. Murakami N., Kawada M., Ootsubo T., Okada Y., Takahashi H., Yasuda A., Kaneda H., Matsuo H., Baluteau J.-P., Davis-Imhof P., Gom B. G., Naylor D. A., Zavagno A., Yamamura I., Matsuura S., Shirahata M., Doi Y., Nakagawa T., Shibai H.; Calibration of the AKARI Far-Infrared Imaging Fourier-Transform Spectrometer; Publications of the Astronomical Society of Japan 62 1155 (2010)
207. Murphy J. A., Peacocke T., Maffei B., McAuley I., Noviello F., Yurchenko V., Ade P. A. R., Savini G., Lamarre J.-M., Brossard J., Colgan R., Gleeson E., Lange A. E., Longval Y., Pisano G., Puget J.-L., Ristorcelli I., Sudiwala R., Wylde R. J.; Multi-mode horn design and beam characteristics for the *Planck* satellite; Journal of Instrumentation 5 4001 (2010)
208. Naylor D. A., Dartois E., Habart E., Abergel A., Baluteau J.-P., Jones S. C., Polehampton E., Ade P., Anderson L. D., André P., Arab H., Bernard J.-P., Blagrave K., Bontemps S., Boulanger F., Cohen M., Compiègne M., Cox P., Davis G., Emery R., Fulton T., Gry C., Huang M., Joblin C., Kirk J. M., Lagache G., Lim T., Madden S., Makiwa G., Martin P.,

Miville-Deschênes M.-A., Molinari S., Moseley H., Motte F., Okumura K., Pinheiro Gonçalves D., Rodón J. A., Russeil D., Saraceno P., Sidher S., Spencer L., Swinyard B., Ward-Thompson D., White G. J., Zavagno A.; First detection of the methylidyne cation (CH+) fundamental rotational line with the *Herschel*/SPIRE FTS; Astronomy and Astrophysics 518 L117 (2010)

209. Nesvadba N. P. H., Boulanger F., Salomé P., Guillard P., Lehnert M. D., Ogle P., Appleton P., Falgarone E., Pineau Des Forets G.; Energetics of the molecular gas in the H2 luminous radio galaxy 3C 326: Evidence for negative AGN feedback; Astronomy and Astrophysics 521 A65 (2010)
210. Nesvorný D., Jenniskens P., Levison H. F., Bottke W. F., Vokrouhlický D., Gounelle M.; Cometary Origin of the Zodiacal Cloud and Carbonaceous Micrometeorites. Implications for Hot Debris Disks; The Astrophysical Journal 713 816 (2010)
211. Neufeld D. A., Goicoechea J. R., Sonnentrucker P., Black J. H., Pearson J., Yu S., Phillips T. G., Lis D. C., de Luca M., Herbst E., Rimmer P., Gerin M., Bell T. A., Boulanger F., Cernicharo J., Coutens A., Dartois E., Kazmierczak M., Encrenaz P., Falgarone E., Geballe T. R., Giesen T., Godard B., Goldsmith P. F., Gry C., Gupta H., Hennebelle P., Hily-Blant P., Joblin C., Kołos R., Krełowski J., Martín-Pintado J., Menten K. M., Monje R., Mookerjea B., Perault M., Persson C., Plume R., Salez M., Schlemmer S., Schmidt M., Stutzki J., Teyssier D., Vastel C., Cros A., Klein K., Lorenzani A., Philipp S., Samoska L. A., Shipman R., Tielens A. G. G. M., Szczerba R., Zmuidzinas J.; *Herschel*/HIFI observations of interstellar OH+ and H2O+ towards W49N: a probe of diffuse clouds with a small molecular fraction; Astronomy and Astrophysics 521 L10 (2010)
212. Neufeld D. A., Sonnentrucker P., Phillips T. G., Lis D. C., de Luca M., Goicoechea J. R., Black J. H., Gerin M., Bell T., Boulanger F., Cernicharo J., Coutens A., Dartois E., Kazmierczak M., Encrenaz P., Falgarone E., Geballe T. R., Giesen T., Godard B., Goldsmith P. F., Gry C., Gupta H., Hennebelle P., Herbst E., Hily-Blant P., Joblin C., Kołos R., Krełowski J., Martín-Pintado J., Menten K. M., Monje R., Mookerjea B., Pearson J., Perault M., Persson C., Plume R., Salez M., Schlemmer S., Schmidt M., Stutzki J., Teyssier D., Vastel C., Yu S., Cais P., Caux E., Liseau R., Morris P., Planesas P.; Strong absorption by interstellar hydrogen fluoride: *Herschel*/HIFI observations of the sight-line to G10.6-0.4 (W31C); Astronomy and Astrophysics 518 L108 (2010)
213. Nguyen H. T., Schulz B., Levenson L., Amblard A., Arumugam V., Aussel H., Babbedge T., Blain A., Bock J., Boselli A., Buat V., Castro-Rodriguez N., Cava A., Chanial P., Chapin E., Clements D. L., Conley A., Conversi L., Cooray A., Dowell C. D., Dwek E., Eales S., Elbaz D., Fox M., Franceschini A., Gear W., Glenn J., Griffin M., Halpern M., Hatziminaoglou E., Ibar E., Isaak K., Ivison R. J., Lagache G., Lu N., Madden S., Maffei B., Mainetti G., Marchetti L., Marsden G., Marshall J., O'Halloran B., Oliver S. J., Omont A., Page M. J., Panuzzo P., Papageorgiou A., Pearson C. P., Perez Fournon I., Pohlen M., Rangwala N., Rigopoulou D., Rizzo D., Roseboom I. G., Rowan-Robinson M., Scott D., Seymour N., Shupe D. L., Smith A. J., Stevens J. A., Symeonidis M., Trichas M., Tugwell K. E., Vaccari M., Valtchanov I., Vigroux L., Wang L., Ward R., Wiebe D., Wright G., Xu C. K., Zemcov M.; HerMES: The SPIRE confusion limit; Astronomy and Astrophysics 518 L5 (2010)
214. Nuevo M., Bredehöft J. H., Meierhenrich U. J., d'Hendecourt L., Thiemann W. H.-P.; Urea, Glycolic Acid, and Glycerol in an Organic Residue Produced by Ultraviolet Irradiation of Interstellar/Pre-Cometary Ice Analogs; Astrobiology 10 245 (2010)
215. O'Halloran B., Galametz M., Madden S. C., Auld R., Baes M., Barlow M. J., Bendo G. J., Bock J. J., Boselli A., Bradford M., Buat V., Castro-Rodriguez N., Chanial P., Charlot S., Ciesla L., Clements D. L., Cormier D., Cooray A., Cortese L., Davies J. I., Dwek E., Eales S. A., Elbaz D., Galliano F., Gear W. K., Glenn J., Gomez H. L., Hony S., Isaak K. G., Levenson L. R., Lu N., Okumura K., Oliver S., Page M. J., Panuzzo P., Papageorgiou A., Parkin T. J., Perez-Fournon I., Pohlen M., Rangwala N., Rigby E. E., Roussel H., Rykala A., Sacchi N., Sauvage M., Schulz B., Schirm M. R. P., Smith M. W. L., Spinoglio L., Srinivasan S., Stevens J. A., Symeonidis M., Trichas M., Vaccari M., Vigroux L., Wilson C. D., Wozniak H., Wright G. S., Zeilinger W. W.; *Herschel* photometric observations of the low metallicity dwarf galaxy NGC 1705; Astronomy and Astrophysics 518 L58 (2010)
216. Ogle P., Boulanger F., Guillard P., Evans D. A., Antonucci R., Appleton P. N., Nesvadba N., Leipski C.; Jet-powered Molecular Hydrogen Emission from Radio Galaxies; The Astrophysical Journal 724 1193 (2010)
217. Oliver S. J., Wang L., Smith A. J., Altieri B., Amblard A., Arumugam V., Auld R., Aussel H., Babbedge T., Blain A., Bock J., Boselli A., Buat V., Burgarella D., Castro-Rodríguez N., Cava A., Chanial P., Clements D. L., Conley A., Conversi L., Cooray A., Dowell C. D., Dwek E., Eales S., Elbaz D., Fox M., Franceschini A., Gear W., Glenn J., Griffin M., Halpern M., Hatziminaoglou E., Ibar E., Isaak K., Ivison R. J., Lagache G., Levenson L., Lu N., Madden S., Maffei B., Mainetti G., Marchetti L., Mitchell-Wynne K., Mortier A. M. J., Nguyen H. T., O'Halloran B., Omont A., Page M. J., Panuzzo P., Papageorgiou A., Pearson C. P., Pérez-Fournon I., Pohlen M., Rawlings J. I., Raymond G., Rigopoulou D., Rizzo D., Roseboom I. G., Rowan-Robinson M., Sánchez Portal M., Savage R., Schulz B., Scott D., Seymour N., Shupe D. L., Stevens J. A., Symeonidis M., Trichas M., Tugwell K. E., Vaccari M., Valiante E., Valtchanov I., Vieira J. D., Vigroux L., Ward R., Wright G., Xu C. K., Zemcov M.; HerMES: SPIRE galaxy number counts at 250, 350, and 500 μm; Astronomy and Astrophysics 518 L21 (2010)
218. Olofsson J., Augereau J.-C., van Dishoeck E. F., Merín B., Grosso N., Ménard F., Blake G. A., Monin J.-L.; C2D Spitzer-IRS spectra of disks around T Tauri stars. V. Spectral decomposition; Astronomy and Astrophysics 520 A39 (2010)
219. Ossenkopf V., Müller H. S. P., Lis D. C., Schilke P., Bell T. A., Bruderer S., Bergin E., Ceccarelli C., Comito C., Stutzki J., Bacman A., Baudry A., Benz A. O., Benedettini M., Berne O., Blake G., Boogert A., Bottinelli S., Boulanger F., Cabrit S., Caselli P., Caux E., Cernicharo J., Codella C., Coutens A., Crimier N., Crockett N. R., Daniel F., Demyk K., Dieleman P., Dominik C., Dubernet M. L., Emprechtinger M., Encrenaz P., Falgarone E., France K., Fuente A., Gerin M., Giesen T. F., di Giorgio A. M., Goicoechea J. R., Goldsmith P. F., Güsten R., Harris A., Helmich F., Herbst E., Hily-Blant P., Jacobs K., Jacq T., Joblin C., Johnstone D., Kahane C., Kama M., Klein T., Klotz A., Kramer C., Langer W., Lefloch B., Leinz C., Lorenzani A., Lord S. D., Maret S., Martin P. G., Martin-Pintado J., McCoey C., Melchior M., Melnick G. J., Menten K. M., Mookerjea B., Morris P., Murphy J. A., Neufeld D. A., Nisini B., Pacheco S., Pagani L., Parise B., Pearson J. C., Pérault M., Phillips T. G., Plume R., Quin S.-L., Rizzo R., Röllig M., Salez M., Saraceno P., Schlemmer S., Simon R., Schuster K., van der Tak F. F. S., Tielens A. G. G. M., Teyssier D., Trappe N., Vastel C., Viti S., Walters V., Walters A., Wang S., Whyborn N., van der Wiel M., Yorke H. W., Yu S., Zmuidzinas J.; Detection of interstellar oxidaniumyl: Abundant H2O+ towards the star-forming regions DR21, Sgr B2, and NGC6334; Astronomy and Astrophysics 518 L111 (2010)
220. Ossenkopf V., Röllig M., Simon R., Schneider N., Okada Y., Stutzki J., Gerin M., Akyilmaz M., Beintema D., Benz A. O., Berne O., Boulanger F., Bumble B., Coeur-Joly O., Dedes C., Diez-Gonzalez M. C., France K., Fuente A., Gallego J. D., Goicoechea J. R., Güsten R., Harris A., Higgins R., Jackson B., Jarchow C., Joblin C., Klein T.,

Kramer C., Lord S., Martin P., Martin-Pintado J., Mookerjea B., Neufeld D. A., Phillips T., Rizzo J. R., van der Tak F. F. S., Teyssier D., Yorke H.; HIFI observations of warm gas in DR21: Shock versus radiative heating; Astronomy and Astrophysics 518 L79 (2010)
221. Otsuka M., van Loon J. T., Long K. S., Meixner M., Matsuura M., Reach W. T., Roman-Duval J., Gordon K., Sauvage M., Hony S., Misselt K., Engelbracht C., Panuzzo P., Okumura K., Woods P. M., Kemper F., Sloan G. C.; Dust in the bright supernova remnant N49 in the LMC; Astronomy and Astrophysics 518 L139 (2010)
222. Ouellette N., Gounelle M., Hennebelle P.; Large-Scale Injection of 60Fe in Molecular Clouds; Meteoritics and Planetary Science Supplement 73 5239 (2010)
223. Pagani L., Ristorcelli I., Boudet N., Giard M., Abergel A., Bernard J.-P.; L1506: a prestellar core in the making; Astronomy and Astrophysics 512 A3 (2010)
224. Pagani L., Steinacker J., Bacmann A., Stutz A., Henning T.; The Ubiquity of Micrometer-Sized Dust Grains in the Dense Interstellar Medium; Science 329 1622 (2010)
225. Paganini L., Villanueva G. L., Lara L. M., Lin Z. Y., Küppers M., Hartogh P., Faure A.; HCN Spectroscopy of Comet 73P/Schwassmann-Wachmann 3. A Study of Gas Evolution and its Link to CN; The Astrophysical Journal 715 1258 (2010)
226. Palaudoux J., Jutier L., Hochlaf M.; Theoretical spectroscopy of acetylene dication and its deuterated species; Journal of Chemical Physics 132 194301 (2010)
227. Panuzzo P., Rangwala N., Rykala A., Isaak K. G., Glenn J., Wilson C. D., Auld R., Baes M., Barlow M. J., Bendo G. J., Bock J. J., Boselli A., Bradford M., Buat V., Castro-Rodríguez N., Chanial P., Charlot S., Ciesla L., Clements D. L., Cooray A., Cormier D., Cortese L., Davies J. I., Dwek E., Eales S. A., Elbaz D., Fulton T., Galametz M., Galliano F., Gear W. K., Gomez H. L., Griffin M., Hony S., Levenson L. R., Lu N., Madden S., O'Halloran B., Okumura K., Oliver S., Page M. J., Papageorgiou A., Parkin T. J., Pérez-Fournon I., Pohlen M., Polehampton E. T., Rigby E. E., Roussel H., Sacchi N., Sauvage M., Schulz B., Schirm M. R. P., Smith M. W. L., Spinoglio L., Stevens J. A., Srinivasan S., Symeonidis M., Swinyard B., Trichas M., Vaccari M., Vigroux L., Wozniak H., Wright G. S., Zeilinger W. W.; Probing the molecular interstellar medium of M82 with *Herschel*-SPIRE spectroscopy; Astronomy and Astrophysics 518 L37 (2010)
228. Paradis D., Veneziani M., Noriega-Crespo A., Paladini R., Piacentini F., Bernard J. P., de Bernardis P., Calzoletti L., Faustini F., Martin P., Masi S., Montier L., Natoli P., Ristorcelli I., Thompson M. A., Traficante A., Molinari S.; Variations of the spectral index of dust emissivity from Hi-GAL observations of the Galactic plane; Astronomy and Astrophysics 520 L8 (2010)
229. Pauzat F., Pilmé J., Toulouse J., Ellinger Y.; About the collapse of the 3.3 μm CH stretching band with ionization in polycyclic aromatic hydrocarbons: Configuration interaction and quantum Monte Carlo studies of the CH fragment; Journal of Chemical Physics 133 054301 (2010)
230. Peretto N., Fuller G. A., Plume R., Anderson L. D., Bally J., Battersby C., Beltran M. T., Bernard J.-P., Calzoletti L., Digiorgio A. M., Faustini F., Kirk J. M., Lenfestey C., Marshall D., Martin P., Molinari S., Montier L., Motte F., Ristorcelli I., Rodón J. A., Smith H. A., Traficante A., Veneziani M., Ward-Thompson D., Wilcock L.; Mapping the column density and dust temperature structure of IRDCs with *Herschel*; Astronomy and Astrophysics 518 L98 (2010)
231. Persson C. M., Black J. H., Cernicharo J., Goicoechea J. R., Hassel G. E., Herbst E., Gerin M., de Luca M., Bell T. A., Coutens A., Falgarone E., Goldsmith P. F., Gupta H., Kaźmierczak M., Lis D. C., Mookerjea B., Neufeld D. A., Pearson J., Phillips T. G., Sonnentrucker P., Stutzki J., Vastel C., Yu S., Boulanger F., Dartois E., Encrenaz P., Geballe T. R., Giesen T., Godard B., Gry C., Hennebelle P., Hily-Blant P., Joblin C., Kołos R., Krełowski J., Martín-Pintado J., Menten K., Monje R., Perault M., Plume R., Salez M., Schlemmer S., Schmidt M., Teyssier D., Péron I., Cais P., Gaufre P., Cros A., Ravera L., Morris P., Lord S., Planesas P.; Nitrogen hydrides in interstellar gas. *Herschel*/HIFI observations towards G10.6-0.4 (W31C); Astronomy and Astrophysics 521 L45 (2010)
232. Phillips T. G., Bergin E. A., Lis D. C., Neufeld D. A., Bell T. A., Wang S., Crockett N. R., Emprechtinger M., Blake G. A., Caux E., Ceccarelli C., Cernicharo J., Comito C., Daniel F., Dubernet M.-L., Encrenaz P., Gerin M., Giesen T. F., Goicoechea J. R., Goldsmith P. F., Herbst E., Joblin C., Johnstone D., Langer W. D., Latter W. D., Lord S. D., Maret S., Martin P. G., Melnick G. J., Menten K. M., Morris P., Müller H. S. P., Murphy J. A., Ossenkopf V., Pearson J. C., Pérault M., Plume R., Qin S.-L., Schilke P., Schlemmer S., Stutzki J., Trappe N., van der Tak F. F. S., Vastel C., Yorke H. W., Yu S., Zmuidzinas J., Boogert A., Güsten R., Hartogh P., Honingh N., Karpov A., Kooi J., Krieg J.-M., Schieder R.; *Herschel* observations of EXtra-Ordinary Sources (HEXOS): Detection of hydrogen fluoride in absorption towards Orion KL; Astronomy and Astrophysics 518 L109 (2010)
233. Pinte C., Woitke P., Ménard F., Duchêne G., Kamp I., Meeus G., Mathews G., Howard C. D., Grady C. A., Thi W.-F., Tilling I., Augereau J.-C., Dent W. R. F., Alacid J. M., Andrews S., Ardila D. R., Aresu G., Barrado D., Brittain S., Ciardi D. R., Danchi W., Eiroa C., Fedele D., de Gregorio-Monsalvo I., Heras A., Huelamo N., Krivov A., Lebreton J., Liseau R., Martin-Zaïdi C., Mendigutía I., Montesinos B., Mora A., Morales-Calderon M., Nomura H., Pantin E., Pascucci I., Phillips N., Podio L., Poelman D. R., Ramsay S., Riaz B., Rice K., Riviere-Marichalar P., Roberge A., Sandell G., Solano E., Vandenbussche B., Walker H., Williams J. P., White G. J., Wright G.; The *Herschel* view of GAS in Protoplanetary Systems (GASPS). First comparisons with a large grid of models; Astronomy and Astrophysics 518 L126 (2010)
234. Pirali O., Galué H. A., Dahl J. E., Carlson R. M. K., & Oomens, J.; Infrared spectra and structures of diamantyl and triamantyl carbocations; International Journal of Mass Spectrometry 297 55 (2010)
235. Pirim C., Krim L., Laffon C., Parent Ph., Pauzat F., Pilme J., Ellinger Y.; Preliminary Study of the Influence of Environment Conditions on the Successive Hydrogenations of CO; Journal of Physical Chemistry A 114 3320(2010)
236. Poglitsch A., Waelkens C., Geis N., Feuchtgruber H., Vandenbussche B., Rodriguez L., Krause O., Renotte E., van Hoof C., Saraceno P., Cepa J., Kerschbaum F., Agnèse P., Ali B., Altieri B., Andreani P., Augueres J.-L., Balog Z., Barl L., Bauer O. H., Belbachir N., Benedettini M., Billot N., Boulade O., Bischof H., Blommaert J., Callut E., Cara C., Cerulli R., Cesarsky D., Contursi A., Creten Y., De Meester W., Doublier V., Doumayrou E., Duband L., Exter K., Genzel R., Gillis J.-M., Grözinger U., Henning T., Herreros J., Huygen R., Inguscio M., Jakob G., Jamar C., Jean C., de Jong J., Katterloher R., Kiss C., Klaas U., Lemke D., Lutz D., Madden S., Marquet B., Martignac J., Mazy A., Merken P., Montfort F., Morbidelli L., Müller T., Nielbock M., Okumura K., Orfei R., Ottensamer R., Pezzuto S., Popesso P., Putzeys J., Regibo S., Reveret V., Royer P., Sauvage M., Schreiber J., Stegmaier J., Schmitt D., Schubert J., Sturm E., Thiel M., Tofani G., Vavrek R., Wetzstein M., Wieprecht E., Wiezorrek E.; The Photodetector Array Camera and Spectrometer (PACS) on the *Herschel* Space Observatory; Astronomy and Astrophysics 518 L2 (2010)
237. Pohlen M., Cortese L., Smith M. W. L., Eales S. A., Boselli A., Bendo G. J., Gomez H. L., Papageorgiou A., Auld R.,

Baes M., Bock J. J., Bradford M., Buat V., Castro-Rodriguez N., Chanial P., Charlot S., Ciesla L., Clements D. L., Cooray A., Cormier D., Dwek E., Eales S. A., Elbaz D., Galametz M., Galliano F., Gear W. K., Glenn J., Griffin M., Hony S., Isaak K. G., Levenson L. R., Lu N., Madden S., O'Halloran B., Okumura K., Oliver S., Page M. J., Panuzzo P., Parkin T. J., Perez-Fournon I., Rangwala N., Rigby E. E., Roussel H., Rykala A., Sacchi N., Sauvage M., Schulz B., Schirm M. R. P., Smith M. W. L., Spinoglio L., Stevens J. A., Srinivasan S., Symeonidis M., Trichas M., Vaccari M., Vigroux L., Wilson C. D., Wozniak H., Wright G. S., Zeilinger W. W.; Radial distribution of gas and dust in spiral galaxies . The case of M 99 (NGC 4254) and M 100 (NGC 4321); Astronomy and Astrophysics 518 L72 (2010)

238. Poisson L., Maksimenska R., Soep B., Mestdagh J.-M., Parker D., Nsangou M., Hochlaf M.; Unusual Quantum Interference in the S1 State of DABCO and Observation of Intramolecular Vibrational Redistribution Relaxation; J. Phys. Chem. A 114, 3313 (2010)
239. Poully J. C., Schermann J. P., Nieuwjaer N., Lecomte F., Grégoire G., Desfrançois C., Garcia G. A., Nahon L., Nandi D., Poisson L., Hochlaf M. Photoionization of 2-pyridone and 2-hydroxypyridine; Phys. Chem. Chem. Phys. 12, 3566 (2010)
240. Pulliam R. L., Savage C., Agúndez M., Cernicharo J., Guélin M., Ziurys L. M.; Identification of KCN in IRC+10216: Evidence for Selective Cyanide Chemistry; The Astrophysical Journal 725 L181 (2010)
241. Qin S.-L., Schilke P., Comito C., Möller T., Rolffs R., Müller H. S. P., Belloche A., Menten K. M., Lis D. C., Phillips T. G., Bergin E. A., Bell T. A., Crockett N. R., Blake G. A., Cabrit S., Caux E., Ceccarelli C., Cernicharo J., Daniel F., Dubernet M.-L., Emprechtinger M., Encrenaz P., Falgarone E., Gerin M., Giesen T. F., Goicoechea J. R., Goldsmith P. F., Gupta H., Herbst E., Joblin C., Johnstone D., Langer W. D., Lord S. D., Maret S., Martin P. G., Melnick G. J., Morris P., Murphy J. A., Neufeld D. A., Ossenkopf V., Pagani L., Pearson J. C., Pérault M., Plume R., Salez M., Schlemmer S., Stutzki J., Trappe N., van der Tak F. F. S., Vastel C., Wang S., Yorke H. W., Yu S., Zmuidzinas J., Boogert A., Güsten R., Hartogh P., Honingh N., Karpov A., Kooi J., Krieg J.-M., Schieder R., Diez-Gonzalez M. C., Bachiller R., Martin-Pintado J., Baechtold W., Olberg M., Nordh L. H., Gill J. L., Chattopadhyay G.; *Herschel* observations of EXtra-Ordinary Sources (HEXOS): detecting spiral arm clouds by CH absorption lines; Astronomy and Astrophysics 521 L14 (2010)
242. Quan D., Herbst E., Osamura Y., Roueff E.; Gas-grain Modeling of Isocyanic Acid (HNCO), Cyanic Acid (HOCN), Fulminic Acid (HCNO), and Isofulminic Acid (HONC) in Assorted Interstellar Environments; The Astrophysical Journal 725 2101 (2010)
243. Rebull L. M., Padgett D. L., McCabe C.-E., Hillenbrand L. A., Stapelfeldt K. R., Noriega-Crespo A., Carey S. J., Brooke T., Huard T., Terebey S., Audard M., Monin J.-L., Fukagawa M., Güdel M., Knapp G. R., Menard F., Allen L. E., Angione J. R., Baldovin-Saavedra C., Bouvier J., Briggs K., Dougados C., Evans N. J., Flagey N., Guieu S., Grosso N., Glauser A. M., Harvey P., Hines D., Latter W. B., Skinner S. L., Strom S., Tromp J., Wolf S.; The Taurus Spitzer Survey: New Candidate Taurus Members Selected Using Sensitive Mid-Infrared Photometry; The Astrophysical Journal Supplement Series 186 259 (2010)
244. Rigopoulou D., Magdis G., Ivison R. J., Amblard A., Arumugam V., Aussel H., Blain A., Bock J., Boselli A., Buat V., Burgarella D., Castro-Rodríguez N., Cava A., Chanial P., Clements D. L., Conley A., Conversi L., Cooray A., Dowell C. D., Dwek E., Eales S., Elbaz D., Farrah D., Franceschini A., Glenn J., Griffin M., Halpern M., Hatziminaoglou E., Huang J.-S., Ibar E., Isaak K., Lagache G., Levenson L., Lu N., Madden S., Maffei B., Mainetti G., Marchetti L., Nguyen H. T., O'Halloran B., Oliver S. J., Omont A., Page M. J., Panuzzo P., Papageorgiou A., Pearson C. P., Pérez-Fournon I., Pohlen M., Rizzo D., Roseboom I. G., Rowan-Robinson M., Schulz B., Scott D., Seymour N., Shupe D. L., Smith A. J., Stevens J. A., Symeonidis M., Trichas M., Tugwell K. E., Vaccari M., Valtchanov I., Vigroux L., Wang L., Wright G., Xu C. K., Zemcov M.; HerMES: *Herschel*-SPIRE observations of Lyman break galaxies; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 409 L7 (2010)
245. Roberts J. F., Jiménez-Serra I., Martín-Pintado J., Viti S., Rodríguez-Franco A., Faure A., Tennyson J.; The magnetic precursor of L1448-mm: excitation differences between ion and neutral fluids; Astronomy and Astrophysics 513 A64 (2010)
246. Rodón J. A., Zavagno A., Baluteau J.-P., Anderson L. D., Polehampton E., Abergel A., Motte F., Bontemps S., Ade P., André P., Arab H., Beichman C., Bernard J.-P., Blagrave K., Boulanger F., Cohen M., Compiegne M., Cox P., Dartois E., Davis G., Emery R., Fulton T., Gry C., Habart E., Halpern M., Huang M., Joblin C., Jones S. C., Kirk J., Lagache G., Lin T., Madden S., Makiwa G., Martin P., Miville-Deschênes M.-A., Molinari S., Moseley H., Naylor D., Okumura K., Orieux F., Pinheiro Gonçalves D., Rodet T., Russeil D., Saraceno P., Sidher S., Spencer L., Swinyard B., Ward-Thompson D., White G.; Physical properties of the Sh2-104 H II region as seen by *Herschel*; Astronomy and Astrophysics 518 L80 (2010)
247. Rolffs R., Schilke P., Comito C., Bergin E. A., van der Tak F. F. S., Lis D. C., Qin S.-L., Menten K. M., Güsten R., Bell T. A., Blake G. A., Caux E., Ceccarelli C., Cernicharo J., Crockett N. R., Daniel F., Dubernet M.-L., Emprechtinger M., Encrenaz P., Gerin M., Giesen T. F., Goicoechea J. R., Goldsmith P. F., Gupta H., Herbst E., Joblin C., Johnstone D., Langer W. D., Latter W. D., Lord S. D., Maret S., Martin P. G., Melnick G. J., Morris P., Müller H. S. P., Murphy J. A., Ossenkopf V., Pearson J. C., Pérault M., Phillips T. G., Plume R., Schlemmer S., Stutzki J., Trappe N., Vastel C., Wang S., Yorke H. W., Yu S., Zmuidzinas J., Diez-Gonzalez M. C., Bachiller R., Martin-Pintado J., Baechtold W., Olberg M., Nordh L. H., Gill J. J., Chattopadhyay G.; Reversal of infall in SgrB2(M) revealed by *Herschel*/HIFI observations of HCN lines at THz frequencies; Astronomy and Astrophysics 521 L46 (2010)
248. Roman-Duval J., Israel F. P., Bolatto A., Hughes A., Leroy A., Meixner M., Gordon K., Madden S. C., Paradis D., Kawamura A., Li A., Sauvage M., Wong T., Bernard J.-P., Engelbracht C., Hony S., Kim S., Misselt K., Okumura K., Ott J., Panuzzo P., Pineda J. L., Reach W. T., Rubio M.; Dust/gas correlations from *Herschel* observations; Astronomy and Astrophysics 518 L74 (2010)
249. Roseboom I. G., Oliver S. J., Kunz M., Altieri B., Amblard A., Arumugam V., Auld R., Aussel H., Babbedge T., Béthermin M., Blain A., Bock J., Boselli A., Brisbin D., Buat V., Burgarella D., Castro-Rodríguez N., Cava A., Chanial P., Chapin E., Clements D. L., Conley A., Conversi L., Cooray A., Dowell C. D., Dwek E., Dye S., Eales S., Elbaz D., Farrah D., Fox M., Franceschini A., Gear W., Glenn J., Solares E. A. G., Griffin M., Halpern M., Harwit M., Hatziminaoglou E., Huang J., Ibar E., Isaak K., Ivison R. J., Lagache G., Levenson L., Lu N., Madden S., Maffei B., Mainetti G., Marchetti L., Marsden G., Mortier A. M. J., Nguyen H. T., O'Halloran B., Omont A., Page M. J., Panuzzo P., Papageorgiou A., Patel H., Pearson C. P., Pérez-Fournon I., Pohlen M., Rawlings J. I., Raymond G., Rigopoulou D., Rizzo D., Rowan-Robinson M., Portal M. S., Schulz B., Scott D., Seymour N., Shupe D. L., Smith A. J., Stevens J. A., Symeonidis M., Trichas M., Tugwell K. E., Vaccari M., Valtchanov I., Vieira J. D., Vigroux L., Wang L., Ward R., Wright G., Xu C. K., Zemcov M.; The *Herschel* Multi-Tiered Extragalactic Survey: source extraction and cross-identifications in confusion-dominated

SPIRE images; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 409 48 (2010)
250. Roussel H., Wilson C. D., Vigroux L., Isaak K. G., Sauvage M., Madden S. C., Auld R., Baes M., Barlow M. J., Bendo G. J., Bock J. J., Boselli A., Bradford M., Buat V., Castro-Rodriguez N., Chanial P., Charlot S., Ciesla L., Clements D. L., Cooray A., Cormier D., Cortese L., Davies J. I., Dwek E., Eales S. A., Elbaz D., Galametz M., Galliano F., Gear W. K., Glenn J., Gomez H. L., Griffin M., Hony S., Levenson L. R., Lu N., O'Halloran B., Okumura K., Oliver S., Page M. J., Panuzzo P., Papageorgiou A., Parkin T. J., Perez-Fournon I., Pohlen M., Rangwala N., Rigby E. E., Rykala A., Sacchi N., Schulz B., Schirm M. R. P., Smith M. W. L., Spinoglio L., Stevens J. A., Srinivasan S., Symeonidis M., Trichas M., Vaccari M., Wozniak H., Wright G. S., Zeilinger W. W.; SPIRE imaging of M 82: Cool dust in the wind and tidal streams; Astronomy and Astrophysics 518 L66 (2010)
251. Rowan-Robinson M., Roseboom I. G., Vaccari M., Amblard A., Arumugam V., Auld R., Aussel H., Babbedge T., Blain A., Bock J., Boselli A., Brisbin D., Buat V., Burgarella D., Castro-Rodriguez N., Cava A., Chanial P., Clements D. L., Conley A., Conversi L., Cooray A., Dowell C. D., Dwek E., Dye S., Eales S., Elbaz D., Farrah D., Fox M., Franceschini A., Gear W., Glenn J., González Solares E. A., Griffin M., Halpern M., Hatziminaoglou E., Huang J., Ibar E., Isaak K., Ivison R. J., Lagache G., Levenson L., Lu N., Madden S., Maffei B., Mainetti G., Marchetti L., Mortier A. M. J., Nguyen H. T., O'Halloran B., Oliver S. J., Omont A., Page M. J., Panuzzo P., Papageorgiou A., Patel H., Pearson C. P., Perez Fournon I., Pohlen M., Rawlings J. I., Raymond G., Rigopoulou D., Rizzo D., Schulz B., Scott D., Seymour N., Shupe D. L., Smith A. J., Stevens J. A., Symeonidis M., Trichas M., Tugwell K. E., Valtchanov I., Vigroux L., Wang L., Ward R., Wright G., Xu C. K., Zemcov M.; Cold dust and young starbursts: spectral energy distributions of *Herschel* SPIRE sources from the HerMES survey; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 409 2 (2010)
252. Russeil D., Zavagno A., Motte F., Schneider N., Bontemps S., Walsh A. J.; The earliest phases of high-mass star formation: the NGC 6334-NGC 6357 complex; Astronomy and Astrophysics 515 A55 (2010)
253. Sargent B. A., Srinivasan S., Meixner M., Kemper F., Tielens A. G. G. M., Speck A. K., Matsuura M., Bernard J.-P., Hony S., Gordon K. D., Indebetouw R., Marengo M., Sloan G. C., Woods P. M.; The Mass-loss Return from Evolved Stars to the Large Magellanic Cloud. II. Dust Properties for Oxygen-rich Asymptotic Giant Branch Stars; The Astrophysical Journal 716 878 (2010)
254. Sarrasin E., Abdallah D. B., Wernli M., Faure A., Cernicharo J., Lique F.; The rotational excitation of HCN and HNC by He: new insights on the HCN/HNC abundance ratio in molecular clouds; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 404 518 (2010)
255. Sauvage M., Sacchi N., Bendo G. J., Boselli A., Pohlen M., Wilson C. D., Auld R., Baes M., Barlow M. J., Bock J. J., Bradford M., Buat V., Castro-Rodriguez N., Chanial P., Charlot S., Ciesla L., Clements D. L., Cooray A., Cormier D., Cortese L., Davies J. I., Dwek E., Eales S. A., Elbaz D., Galametz M., Galliano F., Gear W. K., Glenn J., Gomez H. L., Griffin M., Hony S., Isaak K. G., Levenson L. R., Lu N., Madden S. C., O'Halloran B., Okumura K., Oliver S., Page M. J., Panuzzo P., Papageorgiou A., Parkin T. J., Perez-Fournon I., Rangwala N., Rigby E. E., Roussel H., Rykala A., Schulz B., Schirm M. R. P., Smith M. W. L., Spinoglio L., Stevens J. A., Srinivasan S., Symeonidis M., Trichas M., Vaccari M., Vigroux L., Wozniak H., Wright G. S., Zeilinger W. W.; The central region of spiral galaxies as seen by *Herschel*. M 81, M 99, and M 100; Astronomy and Astrophysics 518 L64 (2010)
256. Schilke P., Comito C., Müller H. S. P., Bergin E. A., Herbst E., Lis D. C., Neufeld D. A., Phillips T. G., Bell T. A., Blake G. A., Cabrit S., Caux E., Ceccarelli C., Cernicharo J., Crockett N. R., Daniel F., Dubernet M.-L., Emprechtinger M., Encrenaz P., Falgarone E., Gerin M., Giesen T. F., Goicoechea J. R., Goldsmith P. F., Gupta H., Joblin C., Johnstone D., Langer W. D., Latter W. B., Lord S. D., Maret S., Martin P. G., Melnick G. J., Menten K. M., Morris P., Murphy J. A., Ossenkopf V., Pagani L., Pearson J. C., Pérault M., Plume R., Qin S.-L., Salez M., Schlemmer S., Stutzki J., Trappe N., van der Tak F. F. S., Vastel C., Wang S., Yorke H. W., Yu S., Erickson N., Maiwald F. W., Kooi J., Karpov A., Zmuidzinas J., Boogert A., Schieder R., Zaal P.; *Herschel* observations of ortho- and para-oxidaniumyl (H2O+) in spiral arm clouds toward Sagittarius B2(M); Astronomy and Astrophysics 521 L11 (2010)
257. Schneider N., Csengeri T., Bontemps S., Motte F., Simon R., Hennebelle P., Federrath C., Klessen R.; Dynamic star formation in the massive DR21 filament; Astronomy and Astrophysics 520 A49 (2010)
258. Schneider N., Motte F., Bontemps S., Hennemann M., di Francesco J., André P., Zavagno A., Csengeri T., Men'shchikov A., Abergel A., Baluteau J.-P., Bernard J.-P., Cox P., Didelon P., di Giorgio A.-M., Gastaud R., Griffin M., Hargrave P., Hill T., Huang M., Kirk J., Könyves V., Leeks S., Li J. Z., Marston A., Martin P., Minier V., Molinari S., Olofsson G., Panuzzo P., Persi P., Pezzuto S., Roussel H., Russeil D., Sadavoy S., Saraceno P., Sauvage M., Sibthorpe B., Spinoglio L., Testi L., Teyssier D., Vavrek R., Ward-Thompson D., White G., Wilson C. D., Woodcraft A.; The *Herschel* view of star formation in the Rosette molecular cloud under the influence of NGC 2244; Astronomy and Astrophysics 518 L83 (2010)
259. Schulz B., Pearson C. P., Clements D. L., Altieri B., Amblard A., Arumugam V., Auld R., Aussel H., Babbedge T., Blain A., Bock J., Boselli A., Buat V., Burgarella D., Castro-Rodríguez N., Cava A., Chanial P., Conley A., Conversi L., Cooray A., Dowell C. D., Dwek E., Eales S., Elbaz D., Fox M., Franceschini A., Gear W., Giovannoli E., Glenn J., Griffin M., Halpern M., Hatziminaoglou E., Ibar E., Isaak K., Ivison R. J., Lagache G., Levenson L., Lu N., Madden S., Maffei B., Mainetti G., Marchetti L., Marsden G., Mortier A. M. J., Nguyen H. T., O'Halloran B., Oliver S. J., Omont A., Page M. J., Panuzzo P., Papageorgiou A., Pérez-Fournon I., Pohlen M., Rangwala N., Rawlings J. I., Raymond G., Rigopoulou D., Rizzo D., Roseboom I. G., Rowan-Robinson M., Sánchez Portal M., Scott D., Seymour N., Shupe D. L., Smith A. J., Stevens J. A., Symeonidis M., Trichas M., Tugwell K. E., Vaccari M., Valiante E., Valtchanov I., Vigroux L., Wang L., Ward R., Wright G., Xu C. K., Zemcov M.; HerMES: The submillimeter spectral energy distributions of *Herschel*/SPIRE-detected galaxies; Astronomy and Astrophysics 518 L32 (2010)
260. Scribano Y., Faure A., Wiesenfeld L.; Communication: Rotational excitation of interstellar heavy water by hydrogen molecules; Journal of Chemical Physics 133 231105 (2010)
261. Sellgren K., Werner M. W., Ingalls J. G., Smith J. D. T., Carleton T. M., Joblin C.; C60 in Reflection Nebulae; The Astrophysical Journal 722 L54 (2010)
262. Semenov D., Hersant F., Wakelam V., Dutrey A., Chapillon E., Guilloteau S., Henning T., Launhardt R., Piétu V., Schreyer K.; Chemistry in disks. IV. Benchmarking gas-grain chemical models with surface reactions; Astronomy and Astrophysics 522 A42 (2010)
263. Senent M. L., Hochlaf M.; Ab Initio Characterization of C- 4, C4H, and C4H-; The Astrophysical Journal 708 1452 (2010)
264. Seperuelo Duarte E., Domaracka A., Boduch P., Rothard H., Dartois E., da Silveira E. F.; Laboratory simulation of heavy-ion cosmic-ray interaction with condensed CO; Astronomy and Astrophysics 512 A71 (2010)
265. Sewiło M., Indebetouw R., Carlson L. R., Whitney B. A., Chen C.-H. R., Meixner M., Robitaille T., van Loon J. T.,

Oliveira J. M., Churchwell E., Simon J. D., Hony S., Panuzzo P., Sauvage M., Roman-Duval J., Gordon K., Engelbracht C., Misselt K., Okumura K., Beck T., Hora J., Woods P. M.; The youngest massive protostars in the Large Magellanic Cloud; Astronomy and Astrophysics 518 L73 (2010)

266. Simon A., Joblin C.; The Computed Infrared Spectra of a Variety of [FePAH]+ Complexes: Mid- and Far-Infrared Features; The Astrophysical Journal 712 69 (2010)
267. Smith M. W. L., Vlahakis C., Baes M., Bendo G. J., Bianchi S., Bomans D. J., Boselli A., Clemens M., Corbelli E., Cortese L., Dariush A., Davies J. I., de Looze I., di Serego Alighieri S., Fadda D., Fritz J., Garcia-Appadoo D. A., Gavazzi G., Giovanardi C., Grossi M., Hughes T. M., Hunt L. K., Jones A. P., Madden S., Pierini D., Pohlen M., Sabatini S., Verstappen J., Xilouris E. M., Zibetti S.; The *Herschel* Virgo Cluster Survey. IV. Resolved dust analysis of spiral galaxies; Astronomy and Astrophysics 518 L51 (2010)
268. Smolders K., Acke B., Verhoelst T., Blommaert J. A. D. L., Decin L., Hony S., Sloan G. C., Neyskens P., van Eck S., Zijlstra A. A., van Winckel H.; When an old star smolders . On the detection of hydrocarbon emission from S-type AGB stars; Astronomy and Astrophysics 514 L1 (2010)
269. Sonnentrucker P., Neufeld D. A., Phillips T. G., Gerin M., Lis D. C., de Luca M., Goicoechea J. R., Black J. H., Bell T. A., Boulanger F., Cernicharo J., Coutens A., Dartois E., Kaźmierczak M., Encrenaz P., Falgarone E., Geballe T. R., Giesen T., Godard B., Goldsmith P. F., Gry C., Gupta H., Hennebelle P., Herbst E., Hily-Blant P., Joblin C., Kołos R., Krełowski J., Martín-Pintado J., Menten K. M., Monje R., Mookerjea B., Pearson J., Perault M., Persson C. M., Plume R., Salez M., Schlemmer S., Schmidt M., Stutzki J., Teyssier D., Vastel C., Yu S., Caux E., Güsten R., Hatch W. A., Klein T., Mehdi I., Morris P., Ward J. S.; Detection of hydrogen fluoride absorption in diffuse molecular clouds with *Herschel*/HIFI: an ubiquitous tracer of molecular gas; Astronomy and Astrophysics 521 L12 (2010)
270. Stacey G. J., Charmandaris V., Boulanger F., Wu Y., Combes F., Higdon S. J. U., Smith J. D. T., Nikola T.; The Energetics of Molecular Gas in NGC 891 from H2 and Far-infrared Spectroscopy; The Astrophysical Journal 721 59 (2010)
271. Stanke T., Stutz A. M., Tobin J. J., Ali B., Megeath S. T., Krause O., Linz H., Allen L., Bergin E., Calvet N., di Francesco J., Fischer W. J., Furlan E., Hartmann L., Henning T., Manoj P., Maret S., Muzerolle J., Myers P. C., Neufeld D., Osorio M., Pontoppidan K., Poteet C. A., Watson D. M., Wilson T.; Hier ist wahrhaftig ein Loch im Himmel. The NGC 1999 dark globule is not a globule; Astronomy and Astrophysics 518 L94 (2010)
272. Steinacker J., Pagani L., Bacmann A., Guieu S.; Direct evidence of dust growth in L183 from mid-infrared light scattering; Astronomy and Astrophysics 511 A9 (2010)
273. Sturm B., Bouwman J., Henning T., Evans N. J., Acke B., Mulders G. D., Waters L. B. F. M., van Dishoeck E. F., Meeus G., Green J. D., Augereau J. C., Olofsson J., Salyk C., Najita J., Herczeg G. J., van Kempen T. A., Kristensen L. E., Dominik C., Carr J. S., Waelkens C., Bergin E., Blake G. A., Brown J. M., Chen J.-H., Cieza L., Dunham M. M., Glassgold A., Güdel M., Harvey P. M., Hogerheijde M. R., Jaffe D., Joergensen J. K., Kim H. J., Knez C., Lacy J. H., Lee J.-E., Maret S., Meijerink R., Merín B., Mundy L., Pontoppidan K. M., Visser R., Yıldız U. A.; First results of the *Herschel* key program ``Dust, Ice and Gas In Time" (DIGIT): Dust and gas spectroscopy of HD 100546; Astronomy and Astrophysics 518 L129 (2010)
274. Stutz A., Launhardt R., Linz H., Krause O., Henning T., Kainulainen J., Nielbock M., Steinacker J., André P.; Dust-temperature of an isolated star-forming cloud: *Herschel* observations of the Bok globule CB244; Astronomy and Astrophysics 518 L87 (2010)
275. Talbi D., Bacchus-Montabonel M.-C.; The formation of H2O from the radiative association of O and H2; Chemical Physics Letters 485 56 (2010)
276. Tauber J. A., Mandolesi N., Puget J.-L., Banos T., Bersanelli M., Bouchet F. R., Butler R. C., Charra J., Crone G., Dodsworth J., Efstathiou G., Gispert R., Guyot G., Gregorio A., Juillet J. J., Lamarre J.-M., Laureijs R. J., Lawrence C. R., Noergaard-Nielsen H. U., Passvogel T., Reix J. M., Texier D., Vibert L., Zacchei A., Ade P. A. R., Aghanim N., Aja B., Alippi E., Aloy L., Armand P., Arnaud M., Arondel A., Arreola-Villanueva A., Artal E., Artina E., Arts A., Ashdown M., Aumont J., Azzaro M., Bacchetta A., Baccigalupi C., Baker M., Balasini M., Balbi A., Banday A. J., Barbier G., Barreiro R. B., Bartelmann M., Battaglia P., Battaner E., Benabed K., Beney J.-L., Beneyton R., Bennett K., Benoit A., Bernard J.-P., Bhandari P., Bhatia R., Biggi M., Biggins R., Billig G., Blanc Y., Blavot H., Bock J. J., Bonaldi A., Bond R., Bonis J., Borders J., Borrill J., Boschini L., Boulanger F., Bouvier J., Bouzit M., Bowman R., Bréelle E., Bradshaw T., Braghin M., Bremer M., Brienza D., Broszkiewicz D., Burigana C., Burkhalter M., Cabella P., Cafferty T., Cairola M., Caminade S., Camus P., Cantalupo C. M., Cappellini B., Cardoso J.-F., Carr R., Catalano A., Cayón L., Cesa M., Chaigneau M., Challinor A., Chamballu A., Chambelland J. P., Charra M., Chiang L.-Y., Chlewicki G., Christensen P. R., Church S., Ciancietta E., Cibrario M., Cizeron R., Clements D., Collaudin B., Colley J.-M., Colombi S., Colombo A., Colombo F., Corre O., Couchot F., Cougrand B., Coulais A., Couzin P., Crane B., Crill B., Crook M., Crumb D., Cuttaia F., Dörl U., da Silva P., Daddato R., Damasio C., Danese L., D'Aquino G., D'Arcangelo O., Dassas K., Davies R. D., Davies W., Davis R. J., de Bernardis P., de Chambure D., de Gasperis G., de La Fuente M. L., de Paco P., de Rosa A., de Troia G., de Zotti G., Dehamme M., Delabrouille J., Delouis J.-M., Désert F.-X., di Girolamo G., Dickinson C., Doelling E., Dolag K., Domken I., Douspis M., Doyle D., Du S., Dubruel D., Dufour C., Dumesnil C., Dupac X., Duret P., Eder C., Elfving A., Enßlin T. A., Eng P., English K., Eriksen H. K., Estaria P., Falvella M. C., Ferrari F., Finelli F., Fishman A., Fogliani S., Foley S., Fonseca A., Forma G., Forni O., Fosalba P., Fourmond J.-J., Frailis M., Franceschet C., Franceschi E., François S., Frerking M., Gómez-Reñasco M. F., Górski K. M., Gaier T. C., Galeotta S., Ganga K., García Lázaro J., Garnica A., Gaspard M., Gavila E., Giard M., Giardino G., Gienger G., Giraud-Heraud Y., Glorian J.-M., Griffin M., Gruppuso A., Guglielmi L., Guichon D., Guillaume B., Guillouet P., Haissinski J., Hansen F. K., Hardy J., Harrison D., Hazell A., Hechler M., Heckenauer V., Heinzer D., Hell R., Henrot-Versillé S., Hernández-Monteagudo C., Herranz D., Herreros J. M., Hervier V., Heske A., Heurtel A., Hildebrandt S. R., Hills R., Hivon E., Hobson M., Hollert D., Holmes W., Hornstrup A., Hovest W., Hoyland R. J., Huey G., Huffenberger K. M., Hughes N., Israelsson U., Jackson B., Jaffe A., Jaffe T. R., Jagemann T., Jessen N. C., Jewell J., Jones W., Juvela M., Kaplan J., Karlman P., Keck F., Keihänen E., King M., Kisner T. S., Kletzkine P., Kneissl R., Knoche J., Knox L., Koch T., Krassenburg M., Kurki-Suonio H., Lähteenmäki A., Lagache G., Lagorio E., Lami P., Lande J., Lange A., Langlet F., Lapini R., Lapolla M., Lasenby A., Le Jeune M., Leahy J. P., Lefebvre M., Legrand F., Le Meur G., Leonardi R., Leriche B., Leroy C., Leutenegger P., Levin S. M., Lilje P. B., Lindensmith C., Linden-Voernle M., Loc A., Longval Y., Lubin P. M., Luchik T., Luthold I., Macias-Perez J. F., Maciaszek T., MacTavish C., Madden S., Maffei B., Magneville C., Maino D., Mambretti A., Mansoux B., Marchioro D., Maris M., Marliani F., Marrucho J.-C., Martí-Canales J., Martínez-González E., Martín-Polegre A., Martin P., Marty C., Marty W., Masi S., Massardi M., Matarrese S., Matthai F., Mazzotta P., McDonald A.,

McGrath P., Mediavilla A., Meinhold P. R., Mélin J.-B., Melot F., Mendes L., Mennella A., Mervier C., Meslier L., Miccolis M., Miville-Deschenes M.-A., Moneti A., Montet D., Montier L., Mora J., Morgante G., Morigi G., Morinaud G., Morisset N., Mortlock D., Mottet S., Mulder J., Munshi D., Murphy A., Murphy P., Musi P., Narbonne J., Naselsky P., Nash A., Nati F., Natoli P., Netterfield B., Newell J., Nexon M., Nicolas C., Nielsen P. H., Ninane N., Noviello F., Novikov D., Novikov I., O'Dwyer I. J., Oldeman P., Olivier P., Ouchet L., Oxborrow C. A., Pérez-Cuevas L., Pagan L., Paine C., Pajot F., Paladini R., Pancher F., Panh J., Parks G., Parnaudeau P., Partridge B., Parvin B., Pascual J. P., Pasian F., Pearson D. P., Pearson T., Pecora M., Perdereau O., Perotto L., Perrotta F., Piacentini F., Piat M., Pierpaoli E., Piersanti O., Plaige E., Plaszczynski S., Platania P., Pointecouteau E., Polenta G., Ponthieu N., Popa L., Poulleau G., Poutanen T., Prézeau G., Pradell L., Prina M., Prunet S., Rachen J. P., Rambaud D., Rame F., Rasmussen I., Rautakoski J., Reach W. T., Rebolo R., Reinecke M., Reiter J., Renault C., Ricciardi S., Rideau P., Riller T., Ristorcelli I., Riti J. B., Rocha G., Roche Y., Pons R., Rohlfs R., Romero D., Roose S., Rosset C., Rouberol S., Rowan-Robinson M., Rubiño-Martín J. A., Rusconi P., Rusholme B., Salama M., Salerno E., Sandri M., Santos D., Sanz J. L., Sauter L., Sauvage F., Savini G., Schmelzel M., Schnorhk A., Schwarz W., Scott D., Seiffert M. D., Shellard P., Shih C., Sias M., Silk J. I., Silvestri R., Sippel R., Smoot G. F., Starck J.-L., Stassi P., Sternberg J., Stivoli F., Stolyarov V., Stompor R., Stringhetti L., Strommen D., Stute T., Sudiwala R., Sugimura R., Sunyaev R., Sygnet J.-F., Türler M., Taddei E., Tallon J., Tamiatto C., Taurigna M., Taylor D., Terenzi L., Thuerey S., Tillis J., Tofani G., Toffolatti L., Tommasi E., Tomasi M., Tonazzini E., Torre J.-P., Tosti S., Touze F., Tristram M., Tuovinen J., Tuttlebee M., Umana G., Valenziano L., Vallée D., van der Vlis M., van Leeuwen F., Vanel J.-C., van-Tent B., Varis J., Vassallo E., Vescovi C., Vezzu F., Vibert D., Vielva P., Vierra J., Villa F., Vittorio N., Vuerli C., Wade L. A., Walker A. R., Wandelt B. D., Watson C., Werner D., White M., White S. D. M., Wilkinson A., Wilson P., Woodcraft A., Yoffo B., Yun M., Yurchenko V., Yvon D., Zhang B., Zimmermann O., Zonca A., Zorita D.; *Planck* pre-launch status: The *Planck* mission; Astronomy and Astrophysics 520 A1 (2010)

277. Tauber J. A., Norgaard-Nielsen H. U., Ade P. A. R., Amiri Parian J., Banos T., Bersanelli M., Burigana C., Chamballu A., de Chambure D., Christensen P. R., Corre O., Cozzani A., Crill B., Crone G., D'Arcangelo O., Daddato R., Doyle D., Dubruel D., Forma G., Hills R., Huffenberger K., Jaffe A. H., Jessen N., Kletzkine P., Lamarre J. M., Leahy J. P., Longval Y., de Maagt P., Maffei B., Mandolesi N., Martí-Canales J., Martín-Polegre A., Martin P., Mendes L., Murphy J. A., Nielsen P., Noviello F., Paquay M., Peacocke T., Ponthieu N., Pontoppidan K., Ristorcelli I., Riti J.-B., Rolo L., Rosset C., Sandri M., Savini G., Sudiwala R., Tristram M., Valenziano L., van der Vorst M., van't Klooster K., Villa F., Yurchenko V.; *Planck* pre-launch status: The optical system; Astronomy and Astrophysics 520 A2 (2010)
278. Testor G., Lemaire J. L., Heydari-Malayeri M., Kristensen L. E., Diana S., Field D.; VLT/NACO near-infrared imaging and spectroscopy of N88A in the SMC; Astronomy and Astrophysics 510 A95 (2010)
279. Thi W.-F., Mathews G., Ménard F., Woitke P., Meeus G., Riviere-Marichalar P., Pinte C., Howard C. D., Roberge A., Sandell G., Pascucci I., Riaz B., Grady C. A., Dent W. R. F., Kamp I., Duchêne G., Augereau J.-C., Pantin E., Vandenbussche B., Tilling I., Williams J. P., Eiroa C., Barrado D., Alacid J. M., Andrews S., Ardila D. R., Aresu G., Brittain S., Ciardi D. R., Danchi W., Fedele D., de Gregorio-Monsalvo I., Heras A., Huelamo N., Krivov A., Lebreton J., Liseau R., Martin-Zaidi C., Mendigutía I., Montesinos B., Mora A., Morales-Calderon M., Nomura H., Phillips N., Podio L., Poelman D. R., Ramsay S., Rice K., Solano E., Walker H., White G. J., Wright G.; *Herschel*-PACS observation of the 10 Myr old T Tauri disk TW Hya. Constraining the disk gas mass; Astronomy and Astrophysics 518 L125 (2010)
280. Thi W.-F., van Dishoeck E. F., Pontoppidan K. M., Dartois E.; Evidence for episodic warm outflowing CO gas from the intermediate-mass young stellar object IRAS 08470-4321; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 406 1409 (2010)
281. Turowski M., Crépin C., Gronowski M., Guillemin J.-C., Coupeaud A., Couturier-Tamburelli I., Piétri N., Kolos R.; Electronic absorption and phosphorescence of cyanodiacetylene; Journal of Chemical Physics 133 074310 (2010)
282. Useli-Bacchitta F., Bonnamy A., Mulas G., Malloci G., Toublanc D., Joblin C.; Visible photodissociation spectroscopy of PAH cations and derivatives in the PIRENEA experiment; Chemical Physics 371 16 (2010)
283. Vaccari M., Marchetti L., Franceschini A., Altieri B., Amblard A., Arumugam V., Auld R., Aussel H., Babbedge T., Blain A., Bock J., Boselli A., Buat V., Burgarella D., Castro-Rodríguez N., Cava A., Chanial P., Clements D. L., Conley A., Conversi L., Cooray A., Dowell C. D., Dwek E., Dye S., Eales S., Elbaz D., Farrah D., Fox M., Gear W., Glenn J., González Solares E. A., Griffin M., Halpern M., Hatziminaoglou E., Huang J., Ibar E., Isaak K., Ivison R. J., Lagache G., Levenson L., Lu N., Madden S., Maffei B., Mainetti G., Mortier A. M. J., Nguyen H. T., O'Halloran B., Oliver S. J., Omont A., Page M. J., Panuzzo P., Papageorgiou A., Pearson C. P., Pérez-Fournon I., Pohlen M., Rawlings J. I., Raymond G., Rigopoulou D., Rizzo D., Rodighiero G., Roseboom I. G., Rowan-Robinson M., Sánchez Portal M., Schulz B., Scott D., Seymour N., Shupe D. L., Smith A. J., Stevens J. A., Symeonidis M., Trichas M., Tugwell K. E., Valiante E., Valtchanov I., Vigroux L., Wang L., Ward R., Wright G., Xu C. K., Zemcov M.; The HerMES SPIRE submillimeter local luminosity function; Astronomy and Astrophysics 518 L20 (2010)
284. van der Wiel M. H. D., van der Tak F. F. S., Lis D. C., Bell T., Bergin E. A., Comito C., Emprechtinger M., Schilke P., Caux E., Ceccarelli C., Baudry A., Goldsmith P. F., Herbst E., Langer W., Lord S., Neufeld D., Pearson J., Phillips T., Rolffs R., Yorke H., Bacmann A., Benedettini M., Blake G. A., Boogert A., Bottinelli S., Cabrit S., Caselli P., Castets A., Cernicharo J., Codella C., Coutens A., Crimier N., Demyk K., Dominik C., Encrenaz P., Falgarone E., Fuente A., Gerin M., Helmich F., Hennebelle P., Henning T., Hily-Blant P., Jacq T., Kahane C., Kama M., Klotz A., Lefloch B., Lorenzani A., Maret S., Melnick G., Nisini B., Pacheco S., Pagani L., Parise B., Salez M., Saraceno P., Schuster K., Tielens A. G. G. M., Vastel C., Viti S., Walters V., Walters A., Wyrowski F., Edwards K., Zmuidzinas J., Morris P., Samoska L. A., Teyssier D.; *Herschel*/HIFI observations of spectrally resolved methylidyne signatures toward the high-mass star-forming core NGC 6334I; Astronomy and Astrophysics 521 L43 (2010)
285. van Kempen T. A., Green J. D., Evans N. J., van Dishoeck E. F., Kristensen L. E., Herczeg G. J., Merín B., Lee J.-E., Joergensen J. K., Bouwman J., Acke B., Adamkovics M., Augereau J. C., Bergin E., Blake G. A., Brown J. M., Carr J. S., Chen J.-H., Cieza L., Dominik C., Dullemond C. P., Dunham M. M., Glassgold A., Güdel M., Harvey P. M., Henning T., Hogerheijde M. R., Jaffe D., Kim H. J., Knez C., Lacy J. H., Maret S., Meeus G., Meijerink R., Mulders G. D., Mundy L., Najita J., Olofsson J., Pontoppidan K. M., Salyk C., Sturm B., Visser R., Waters L. B. F. M., Waelkens C., Yıldız U. A.; Dust, Ice, and Gas In Time (DIGIT) *Herschel* program first results. A full PACS-SED scan of the gas line emission in protostar DK Chamaeleontis; Astronomy and Astrophysics 518 L128 (2010)
286. Varambhia H. N., Faure A., Graupner K., Field T. A., Tennyson J.; Electron-impact rotational excitation of the carbon monosulphide (CS) molecule; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 403 1409 (2010)
287. Vastel C., Ceccarelli C., Caux E., Coutens A., Cernicharo J., Bottinelli S., Demyk K., Faure A., Wiesenfeld L., Scribano

Y., Bacmann A., Hily-Blant P., Maret S., Walters A., Bergin E. A., Blake G. A., Castets A., Crimier N., Dominik C., Encrenaz P., Gérin M., Hennebelle P., Kahane C., Klotz A., Melnick G., Pagani L., Parise B., Schilke P., Walters V., Baudry A., Bell T., Benedettini M., Boogert A., Cabrit S., Caselli P., Codella C., Comito C., Falgarone E., Fuente A., Goldsmith P. F., Helmich F., Henning T., Herbst E., Jacq T., Kama M., Langer W., Lefloch B., Lis D., Lord S., Lorenzani A., Neufeld D., Nisini B., Pacheco S., Pearson J., Phillips T., Salez M., Saraceno P., Schuster K., Tielens X., van der Tak F., van der Wiel M. H. D., Viti S., Wyrowski F., Yorke H., Cais P., Krieg J. M., Olberg M., Ravera L.; Ortho-to-para ratio of interstellar heavy water; Astronomy and Astrophysics 521 L31 (2010)

288. Vergely J.-L., Valette B., Lallement R., Raimond S.; Spatial distribution of interstellar dust in the Sun's vicinity. Comparison with neutral sodium-bearing gas; Astronomy and Astrophysics 518 A31 (2010)
289. Wakelam V., Herbst E., Le Bourlot J., Hersant F., Selsis F., Guilloteau S.; Sensitivity analyses of dense cloud chemical models; Astronomy and Astrophysics 517 A21 (2010)
290. Wakelam V., Smith I. W. M., Herbst E., Troe J., Geppert W., Linnartz H., Öberg K., Roueff E., Agúndez M., Pernot P., Cuppen H. M., Loison J. C., Talbi D.; Reaction Networks for Interstellar Chemical Modelling: Improvements and Challenges; Space Science Reviews 156 13 (2010)
291. Wampfler S. F., Herczeg G. J., Bruderer S., Benz A. O., van Dishoeck E. F., Kristensen L. E., Visser R., Doty S. D., Melchior M., van Kempen T. A., Yıldız U. A., Dedes C., Goicoechea J. R., Baudry A., Melnick G., Bachiller R., Benedettini M., Bergin E., Bjerkeli P., Blake G. A., Bontemps S., Braine J., Caselli P., Cernicharo J., Codella C., Daniel F., di Giorgio A. M., Dominik C., Encrenaz P., Fich M., Fuente A., Giannini T., de Graauw T., Helmich F., Herpin F., Hogerheijde M. R., Jacq T., Johnstone D., Joergensen J. K., Larsson B., Lis D., Liseau R., Marseille M., McCoey C., Neufeld D., Nisini B., Olberg M., Parise B., Pearson J. C., Plume R., Risacher C., Santiago-García J., Saraceno P., Shipman R., Tafalla M., van der Tak F. F. S., Wyrowski F., Roelfsema P., Jellema W., Dieleman P., Caux E., Stutzki J.; *Herschel* observations of the hydroxyl radical (OH) in young stellar objects; Astronomy and Astrophysics 521 L36 (2010)
292. Ward-Thompson D., Kirk J. M., André P., Saraceno P., Didelon P., Könyves V., Schneider N., Abergel A., Baluteau J.-P., Bernard J.-P., Bontemps S., Cambrésy L., Cox P., di Francesco J., di Giorgio A. M., Griffin M., Hargrave P., Huang M., Li J. Z., Martin P., Men'shchikov A., Minier V., Molinari S., Motte F., Olofsson G., Pezzuto S., Russeil D., Sauvage M., Sibthorpe B., Spinoglio L., Testi L., White G., Wilson C., Woodcraft A., Zavagno A.; A *Herschel* study of the properties of starless cores in the Polaris Flare dark cloud region using PACS and SPIRE; Astronomy and Astrophysics 518 L92 (2010)
293. Welsh B. Y., Lallement R., Vergely J.-L., Raimond S.; New 3D gas density maps of NaI and CaII interstellar absorption within 300 pc; Astronomy and Astrophysics 510 A54 (2010)
294. Welsh B. Y., Lallement R.; High-Resolution UV Absorption Observations of the Local Interstellar Cavity; Publications of the Astronomical Society of the Pacific 122 1320 (2010)
295. Welsh B. Y., Wheatley J., Siegmund O. H. W., Lallement R.; Detection of Highly Ionized C IV Gas Within the Local Cavity; The Astrophysical Journal 712 L199 (2010)
296. White G. J., Abergel A., Spencer L., Schneider N., Naylor D. A., Anderson L. D., Joblin C., Ade P., André P., Arab H., Baluteau J.-P., Bernard J.-P., Blagrave K., Bontemps S., Boulanger F., Cohen M., Compiegne M., Cox P., Dartois E., Davis G., Emery R., Fulton T., Gom B., Griffin M., Gry C., Habart E., Huang M., Jones S., Kirk J. M., Lagache G., Leeks S., Lim T., Madden S., Makiwa G., Martin P., Miville-Deschênes M.-A., Molinari S., Moseley H., Motte F., Okumura K., Pinheiro Gonçalves D., Polehampton E., Rodet T., Rodón J. A., Russeil D., Saraceno P., Sidher S., Swinyard B. M., Ward-Thompson D., Zavagno A.; *Herschel*-SPIRE spectroscopy of the DR21 molecular cloud core; Astronomy and Astrophysics 518 L114 (2010)
297. Wiesenfeld L., Faure A.; Ab initio computation of the broadening of water rotational lines by molecular hydrogen; Physical Review A 82 040702 (2010)
298. Wirström E. S., Bergman P., Black J. H., Hjalmarson Å., Larsson B., Olofsson A. O. H., Encrenaz P. J., Falgarone E., Frisk U., Olberg M., Sandqvist A.; Ground-state ammonia and water in absorption towards Sgr B2; Astronomy and Astrophysics 522 A19 (2010)
299. Woitke P., Pinte C., Tilling I., Ménard F., Kamp I., Thi W.-F., Duchêne G., Augereau J.-C.; Continuum and line modelling of discs around young stars - I. 300000 disc models for *HERSCHEL*/GASPS; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 405 L26 (2010)
300. Wyrowski F., van der Tak F., Herpin F., Baudry A., Bontemps S., Chavarria L., Frieswijk W., Jacq T., Marseille M., Shipman R., van Dishoeck E. F., Benz A. O., Caselli P., Hogerheijde M. R., Johnstone D., Liseau R., Bachiller R., Benedettini M., Bergin E., Bjerkeli P., Blake G., Braine J., Bruderer S., Cernicharo J., Codella C., Daniel F., di Giorgio A. M., Dominik C., Doty S. D., Encrenaz P., Fich M., Fuente A., Giannini T., Goicoechea J. R., de Graauw T., Helmich F., Herczeg G. J., Joergensen J. K., Kristensen L. E., Larsson B., Lis D., McCoey C., Melnick G., Nisini B., Olberg M., Parise B., Pearson J. C., Plume R., Risacher C., Santiago J., Saraceno P., Tafalla M., van Kempen T. A., Visser R., Wampfler S., Yıldız U. A., Black J. H., Falgarone E., Gerin M., Roelfsema P., Dieleman P., Beintema D., de Jonge A., Whyborn N., Stutzki J., Ossenkopf V.; Variations in H2O+/H2O ratios toward massive star-forming regions; Astronomy and Astrophysics 521 L34 (2010)
301. Yang C.-H., Sarma G., Ter Meulen J. J., Parker D. H., McBane G. C., Wiesenfeld L., Faure A., Scribano Y., Feautrier N.; Communication: Mapping water collisions for interstellar space conditions; Journal of Chemical Physics 133 131103 (2010)
302. Yu S., Pearson J. C., Drouin B. J., Sung K., Pirali O., Vervloet M., Martin-Drumel M.-A., Endres C. P., Shiraishi T., Kobayashi K., Matsushima F.; Submillimeter-wave and far-infrared spectroscopy of high-J transitions of the ground and ν2=1 states of ammonia; Journal of Chemical Physics 133 174317 (2010)
303. Zavagno A., Anderson L. D., Russeil D., Morgan L., Stringfellow G. S., Deharveng L., Rodón J. A., Robitaille T. P., Mottram J. C., Schuller F., Testi L., Billot N., Molinari S., di Gorgio A., Kirk J. M., Brunt C., Ward-Thompson D., Traficante A., Veneziani M., Faustini F., Calzoletti L.; Star formation triggered by H II regions in our Galaxy. First results for N49 from the *Herschel* infrared survey of the Galactic plane; Astronomy and Astrophysics 518 L101 (2010)
304. Zavagno A., Russeil D., Motte F., Anderson L. D., Deharveng L., Rodón J. A., Bontemps S., Abergel A., Baluteau J.-P., Sauvage M., André P., Hill T., White G. J.; Star formation triggered by the Galactic H II region RCW 120. First results from the *Herschel* Space Observatory; Astronomy and Astrophysics 518 L81 (2010)

2011

1. Abouaf-Marguin L., Vasserot A.-M.; Infrared spectroscopic studies of solid normal hydrogen doped with CH_3F and O_2 at 4.2 K : CH_3F: O_2 complex and CH_3F migration ; Low Temperature Physics **37**, 357-362 (2011)
2. Accolla M., Congiu E., Dulieu F., Manicò G., Chaabouni H., Matar E., Mokrane H., Lemaire J. L., Pirronello V.; Changes in the morphology of interstellar ice analogues after hydrogen atom exposure; Physical Chemistry Chemical Physics (Incorporating Faraday Transactions) 13 8037 (2011)
3. Amblard A., Cooray A., Serra P., Altieri B., Arumugam V., Aussel H., Blain A., Bock J., Boselli A., Buat V., Castro-Rodríguez N., Cava A., Chanial P., Chapin E., Clements D. L., Conley A., Conversi L., Dowell C. D., Dwek E., Eales S., Elbaz D., Farrah D., Franceschini A., Gear W., Glenn J., Griffin M., Halpern M., Hatziminaoglou E., Ibar E., Isaak K., Ivison R. J., Khostovan A. A., Lagache G., Levenson L., Lu N., Madden S., Maffei B., Mainetti G., Marchetti L., Marsden G., Mitchell-Wynne K., Nguyen H. T., O'Halloran B., Oliver S. J., Omont A., Page M. J., Panuzzo P., Papageorgiou A., Pearson C. P., Pérez-Fournon I., Pohlen M., Rangwala N., Roseboom I. G., Rowan-Robinson M., Portal M. S., Schulz B., Scott D., Seymour N., Shupe D. L., Smith A. J., Stevens J. A., Symeonidis M., Trichas M., Tugwell K., Vaccari M., Valiante E., Valtchanov I., Vieira J. D., Vigroux L., Wang L., Ward R., Wright G., Xu C. K., Zemcov M.; Submillimetre galaxies reside in dark matter haloes with masses greater than $3x10^{11}$ solar masses; Nature 470 510 (2011)
4. André P., Men'shchikov A., Könyves V., Arzoumanian D.; Origin of the prestellar core mass function and link to the IMF - *Herschel* first results; Computational Star Formation 270 255 (2011)
5. Arzoumanian D., André P., Didelon P., Könyves V., Schneider N., Men'shchikov A., Sousbie T., Zavagno A., Bontemps S., di Francesco J., Griffin M., Hennemann M., Hill T., Kirk J., Martin P., Minier V., Molinari S., Motte F., Peretto N., Pezzuto S., Spinoglio L., Ward-Thompson D., White G., Wilson C. D.; Characterizing interstellar filaments with *Herschel* in IC 5146; Astronomy and Astrophysics 529 L6 (2011)
6. Ashby M. L. N., Mahajan S., Smith H. A., Willner S. P., Fazio G. G., Raychaudhury S., Zezas A., Barmby P., Bonfini P., Cao C., González-Alfonso E., Ishihara D., Kaneda H., Lyttle V., Madden S., Papovich C., Sturm E., Surace J., Wu H., Zhu Y.-N.; The Star Formation Reference Survey. I. Survey Description and Basic Data; Publications of the Astronomical Society of the Pacific 123 1011 (2011)
7. Barklem P. S., Belyaev A. K., Guitou M., Feautrier N., Gadéa F. X., Spielfiedel A.; On inelastic hydrogen atom collisions in stellar atmospheres; Astronomy and Astrophysics 530 A94 (2011)
8. Belloche A., Parise B., Schuller F., André P., Bontemps S., Menten K. M.; Will the starless cores in Chamaeleon I and III turn prestellar?; Astronomy and Astrophysics 535 A2 (2011)
9. Belloche A., Schuller F., Parise B., André P., Hatchell J., Joergensen J. K., Bontemps S., Weiß A., Menten K. M., Muders D.; The end of star formation in Chamaeleon I?. A LABOCA census of starless and protostellar cores; Astronomy and Astrophysics 527 A145 (2011)
10. Béroff K., van-Oanh N. T., Chabot M., Tuna T., Pino T., Martinet G., Le Padellec A., Carpentier Y., Lavergne L.; Fragmentation of multiply charged hydrocarbon molecules CnHq+ (n ≤ 4, q ≤ 9) produced in high-velocity collisions: Branching ratios and kinetic energy release of the H+ fragment; Physical Review A 84 032705 (2011)
11. Berteloite C., Le Picard S. D., Birza P., Gazeau M.-C., Canosa A., Bénilan Y., Sims I. R.; Corrigendum to "Low temperature (39-298 K) kinetics study of the reactions of the C4H radical with various hydrocarbons observed in Titan's atmosphere" [Icarus 194 (2008) 746-757]; Icarus 212 963 (2011)
12. Berteloite C., Le Picard S. D., Sims I. R., Rosi M., Leonori F., Petrucci R., Balucani N., Wang X., Casavecchia P.; Low temperature kinetics, crossed beam dynamics and theoretical studies of the reaction S(1D) + CH4 and low temperature kinetics of S(1D) + C2H2; Physical Chemistry Chemical Physics (Incorporating Faraday Transactions) 13 8485 (2011)
13. M. Bertin, C. Romanzin, X. Michaut, P. Jeseck , and J.H. Fillion ; Adsorption of organic isomers on water ice surface: study of acetic acid and methyl formate ; Journal of Physical Chemistry C 115**,** 12920-12928 (2011)
14. Betti Beneventi G., Perniola L., Sousa V., Gourvest E., Maitrejean S., Bastien J. C., Bastard A., Hyot B., Fargeix A., Jahan C., Nodin J. F., Persico A., Fantini A., Blachier D., Toffoli A., Loubriat S., Roule A., Lhostis S., Feldis H., Reimbold G., Billon T., de Salvo B., Larcher L., Pavan P., Bensahel D., Mazoyer P., Annunziata R., Zuliani P., Boulanger F.; Carbon-doped GeTe: A promising material for Phase-Change Memories; Solid State Electronics 65 197 (2011)
15. Blanchard I., Gounelle M., Bourot-Denise M., Kearsley A.; Secondary Processes Within the Paris CM Chondrite; Meteoritics and Planetary Science Supplement 74 5322 (2011)
16. Bolatto A. D., Leroy A. K., Jameson K., Ostriker E., Gordon K., Lawton B., Stanimirović S., Israel F. P., Madden S. C., Hony S., Sandstrom K. M., Bot C., Rubio M., Winkler P. F., Roman-Duval J., van Loon J. T., Oliveira J. M., Indebetouw R.; The State of the Gas and the Relation between Gas and Star Formation at Low Metallicity: The Small Magellanic Cloud; The Astrophysical Journal 741 12 (2011)
17. Boselli A., Boissier S., Heinis S., Cortese L., Ilbert O., Hughes T., Cucciati O., Davies J., Ferrarese L., Giovanelli R., Haynes M. P., Baes M., Balkowski C., Brosch N., Chapman S. C., Charmandaris V., Clemens M. S., Dariush A., de Looze I., di Serego Alighieri S., Duc P.-A., Durrell P. R., Emsellem E., Erben T., Fritz J., Garcia-Appadoo D. A., Gavazzi G., Grossi M., Jordán A., Hess K. M., Huertas-Company M., Hunt L. K., Kent B. R., Lambas D. G., Lançon A., MacArthur L. A., Madden S. C., Magrini L., Mei S., Momjian E., Olowin R. P., Papastergis E., Smith M. W. L., Solanes J. M., Spector O., Spekkens K., Taylor J. E., Valotto C., van Driel W., Verstappen J., Vlahakis C., Vollmer B., Xilouris E. M.; The GALEX Ultraviolet Virgo Cluster Survey (GUViCS). I. The UV luminosity function of the central 12 sq. deg; Astronomy and Astrophysics 528 A107 (2011)
18. Briani G., Morbidelli A., Gounelle M., Nesvorný D.; Evidence for an asteroid-comet continuum from simulations of carbonaceous microxenolith dynamical evolution; Meteoritics and Planetary Science 46 1863 (2011)
19. Brites V., Franzreb K., Harvey J. N., Sayres S. G., Ross M. W., Blumling D. E., Castleman Jr. A. W., Hochlaf M.; Oxygen-containing gas-phase diatomic trications and tetracations: ReO^{z+}, NbO^{z+} and HfO^{z+} (z=3, 4); Phys. Chem. Chem. Phys. **13**, 15233 (2011).
20. Brites V., Franzreb K., Hochlaf M.; Metastable ClO2+ and ClO3+ ions in the gas phase: a combined theoretical and mass spectrometric investigation; Physical Chemistry Chemical Physics (Incorporating Faraday Transactions) 13 18315 (2011)
21. Brunetto R., Borg J., Dartois E., Rietmeijer F. J. M., Grossemy F., Sandt C., Le Sergeant D'Hendecourt L., Rotundi A., Dumas P., Djouadi Z., Jamme F.; Mid-IR, Far-IR, Raman micro-spectroscopy, and FESEM-EDX study of IDP L2021C5: Clues to its origin; Icarus 212 896 (2011)

22. Bulut N., Roncero O., Jorfi M., Honvault P.; Accurate time dependent wave packet calculations for the N + OH reaction; Journal of Chemical Physics 135 104307 (2011)
23. Calvo F., Basire M., Parneix P.; Temperature Effects on the Rovibrational Spectra of Pyrene-Based PAHs ; Journal of Physical Chemistry A 115 8845 (2011)
24. Carles S., Adjali F., Monnerie C., Guillemin J.-C., Le Garrec J.-L.; Kinetic studies at room temperature of the cyanide anion CN- with cyanoacetylene (HC3N) reaction; Icarus 211 901 (2011)
25. Caux E., Kahane C., Castets A., Coutens A., Ceccarelli C., Bacmann A., Bisschop S., Bottinelli S., Comito C., Helmich F. P., Lefloch B., Parise B., Schilke P., Tielens A. G. G. M., van Dishoeck E., Vastel C., Wakelam V., Walters A.; TIMASSS: the IRAS 16293-2422 millimeter and submillimeter spectral survey. I. Observations, calibration, and analysis of the line kinematics; Astronomy and Astrophysics 532 A23 (2011)
26. Ceccarelli C., Hily-Blant P., Montmerle T., Dubus G., Gallant Y., Fiasson A.; Supernova-enhanced Cosmic-Ray Ionization and Induced Chemistry in a Molecular Cloud of W51C; The Astrophysical Journal 740 L4 (2011)
27. Cernicharo J., Agúndez M., Kahane C., Guélin M., Goicoechea J. R., Marcelino N., De Beck E., Decin L.; Probing the dust formation region in IRC +10216 with the high vibrational states of hydrogen cyanide; Astronomy and Astrophysics 529 L3 (2011)
28. Cernicharo J., Spielfiedel A., Balança C., Dayou F., Senent M.-L., Feautrier N., Faure A., Cressiot-Vincent L., Wiesenfeld L., Pardo J. R.; Collisional excitation of sulfur dioxide in cold molecular clouds; Astronomy and Astrophysics 531 A103 (2011)
29. Chabot M., Martinet G., Béroff K., Pino T., Bouneau S., Genolini B., Grave X., Nguyen K., Le Gailliard C., Rosier P., Féraud G., Friha H., Villier B.; Detection of atomic and molecular mega-electron-volt projectiles using an x-ray charged coupled device camera; Review of Scientific Instruments 82 103301 (2011)
30. Chabrier G., Hennebelle P.; Dimensional argument for the impact of turbulent support on the stellar initial mass function; Astronomy and Astrophysics 534 A106 (2011)
31. Chapillon E., Parise B., Guilloteau S., Du F.; A deep search for H2D+ in protoplanetary disks. Perspectives for ALMA; Astronomy and Astrophysics 533 A143 (2011)
32. Chehrouri M., Fillion J.-H., Chaabouni H., Mokrane H., Congiu E., Dulieu F., Matar E., Michaut X., Lemaire J. L.; Nuclear spin conversion of molecular hydrogen on amorphous solid water in the presence of O2 traces; Physical Chemistry Chemical Physics (Incorporating Faraday Transactions) 13 2172 (2011)
33. Cieza L. A., Olofsson J., Harvey P. M., Pinte C., Merín B., Augereau J.-C., Evans N. J., II, Najita J., Henning T., Ménard F.; *Herschel* Observations of the T Cha Transition Disk: Constraining the Outer Disk Properties; The Astrophysical Journal 741 L25 (2011)
34. Commerçon B., Hennebelle P., Audit E., Chabrier G., Teyssier R.; Radiative, magnetic and numerical feedbacks on small-scale fragmentation; Computational Star Formation 270 227 (2011)
35. Commerçon B., Hennebelle P., Henning T.; Collapse of Massive Magnetized Dense Cores Using Radiation Magnetohydrodynamics: Early Fragmentation Inhibition; The Astrophysical Journal 742 L9 (2011)
36. Commerçon B., Teyssier R., Audit E., Hennebelle P., Chabrier G.; Radiation hydrodynamics with adaptive mesh refinement and application to prestellar core collapse. I. Methods; Astronomy and Astrophysics 529 A35 (2011)
37. Compiègne M., Verstraete L., Jones A., Bernard J.-P., Boulanger F., Flagey N., Le Bourlot J., Paradis D., Ysard N.; The global dust SED: tracing the nature and evolution of dust with DustEM; Astronomy and Astrophysics 525 A103 (2011)
38. Coupeaud A., Demyk K., Meny C., Nayral C., Delpech F., Leroux H., Depecker C., Creff G., Brubach J.-B., Roy P.; Low-temperature FIR and submillimetre mass absorption coefficient of interstellar silicate dust analogues; Astronomy and Astrophysics 535 A124 (2011)
39. Cox N. L. J., Ehrenfreund P., Foing B. H., D'Hendecourt L., Salama F., Sarre P. J.; Linear and circular spectropolarimetry of diffuse interstellar bands; Astronomy and Astrophysics 531 A25 (2011)
40. Cusano F., Ripepi V., Alcalá J. M., Gandolfi D., Marconi M., Degl'Innocenti S., Palla F., Guenther E. W., Bernabei S., Covino E., Neiner C., Puga E., Hony S.; Pre-main-sequence stars in the star-forming complex Sh 2-284; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 410 227 (2011)
41. Danger G., Borget F., Chomat M., Duvernay F., Theulé P., Guillemin J.-C., Le Sergeant D'Hendecourt L., Chiavassa T.; Experimental investigation of aminoacetonitrile formation through the Strecker synthesis in astrophysical-like conditions: reactivity of methanimine (CH2NH), ammonia (NH3), and hydrogen cyanide (HCN); Astronomy and Astrophysics 535 A47 (2011)
42. Danger G., Bossa J.-B., de Marcellus P., Borget F., Duvernay F., Theulé P., Chiavassa T., D'Hendecourt L.; Experimental investigation of nitrile formation from VUV photochemistry of interstellar ices analogs: acetonitrile and amino acetonitrile; Astronomy and Astrophysics 525 A30 (2011)
43. Daniel F., Dubernet M.-L., Grosjean A.; Rotational excitation of 45 levels of ortho/para-H2O by excited ortho/para-H2 from 5 K to 1500 K: state-to-state, effective, and thermalized rate coefficients; Astronomy and Astrophysics 536 A76 (2011)
44. Daranlot J., Jorfi M., Xie C., Bergeat A., Costes M., Caubet P., Xie D., Guo H., Honvault P., Hickson K.M.; Revealing Atom-Radical Reactivity at Low Temperature Through the N + OH Reaction ; Science 334 1538 (2011)
45. Dartois E.; CO clathrate hydrate: Near to mid-IR spectroscopic signatures; Icarus 212 950 (2011)
46. Defazio P., Bussery-Honvault B., Honvault P., Petrongolo C.; Nonadiabatic quantum dynamics of C(1D)+H2-->CH+H: Coupled-channel calculations including Renner-Teller and Coriolis terms; Journal of Chemical Physics 135 114308 (2011)
47. Deharveng L., Zavagno A.; Observations of star formation triggered by H ii regions; Computational Star Formation 270 239 (2011)
48. Donati J.-F., Bouvier J., Walter F. M., Gregory S. G., Skelly M. B., Hussain G. A. J., Flaccomio E., Argiroffi C., Grankin K. N., Jardine M. M., Ménard F., Dougados C., Romanova M. M.; Non-stationary dynamo and magnetospheric accretion processes of the classical T Tauri star V2129 Oph; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 412 2454 (2011)
49. Donati J.-F., Gregory S. G., Alencar S. H. P., Bouvier J., Hussain G., Skelly M., Dougados C., Jardine M. M., Ménard F., Romanova M. M., Unruh Y. C.; The large-scale magnetic field and poleward mass accretion of the classical T Tauri star TW Hya; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 417 472 (2011)
50. Dumouchel F., Kłos J., Lique F.; The rotational excitation of the interstellar HNC by para- and ortho-H2; Physical Chemistry Chemical Physics (Incorporating Faraday Transactions) 13 8204 (2011)
51. Dutrey A., Wakelam V., Boehler Y., Guilloteau S., Hersant F., Semenov D., Chapillon E., Henning T., Piétu V.,

Launhardt R., Gueth F., Schreyer K.; Chemistry in disks. V. Sulfur-bearing molecules in the protoplanetary disks surrounding LkCa15, MWC480, DM Tauri, and GO Tauri; Astronomy and Astrophysics 535 A104 (2011)
52. Elbaz D., Dickinson M., Hwang H. S., Díaz-Santos T., Magdis G., Magnelli B., Le Borgne D., Galliano F., Pannella M., Chanial P., Armus L., Charmandaris V., Daddi E., Aussel H., Popesso P., Kartaltepe J., Altieri B., Valtchanov I., Coia D., Dannerbauer H., Dasyra K., Leiton R., Mazzarella J., Alexander D. M., Buat V., Burgarella D., Chary R.-R., Gilli R., Ivison R. J., Juneau S., Le Floc'h E., Lutz D., Morrison G. E., Mullaney J. R., Murphy E., Pope A., Scott D., Brodwin M., Calzetti D., Cesarsky C., Charlot S., Dole H., Eisenhardt P., Ferguson H. C., Förster Schreiber N., Frayer D., Giavalisco M., Huynh M., Koekemoer A. M., Papovich C., Reddy N., Surace C., Teplitz H., Yun M. S., Wilson G.; GOODS-*Herschel*: an infrared main sequence for star-forming galaxies; Astronomy and Astrophysics 533 A119 (2011)
53. Faure A., Szalewicz K., Wiesenfeld L.; Potential energy surface and rotational cross sections for methyl formate colliding with helium; Journal of Chemical Physics 135 024301 (2011)
54. Favre C., Despois D., Brouillet N., Baudry A., Combes F., Guélin M., Wootten A., Wlodarczak G.; HCOOCH3 as a probe of temperature and structure in Orion-KL; Astronomy and Astrophysics 532 A32 (2011)
55. Fayolle E. C., Bertin M., Romanzin C., Michaut X., Öberg K. I., Linnartz H., Fillion J.-H.; CO Ice Photodesorption: A Wavelength-dependent Study; The Astrophysical Journal 739 L36 (2011)
56. Ferkinhoff C., Brisbin D., Nikola T., Parshley S. C., Stacey G. J., Phillips T. G., Falgarone E., Benford D. J., Staguhn J. G., Tucker C. E.; First Detections of the [N II] 122 μm Line at High Redshift: Demonstrating the Utility of the Line for Studying Galaxies in the Early Universe; The Astrophysical Journal 740 L29 (2011)
57. Flagey N., Boulanger F., Noriega-Crespo A., Paladini R., Montmerle T., Carey S. J., Gagné M., Shenoy S.; Tracing the energetics and evolution of dust with Spitzer: a chapter in the history of the Eagle Nebula; Astronomy and Astrophysics 531 A51 (2011)
58. France K., Schindhelm E., Burgh E. B., Herczeg G. J., Harper G. M., Brown A., Green J. C., Linsky J. L., Yang H., Abgrall H., Ardila D. R., Bergin E., Bethell T., Brown J. M., Calvet N., Espaillat C., Gregory S. G., Hillenbrand L. A., Hussain G., Ingleby L., Johns-Krull C. M., Roueff E., Valenti J. A., Walter F. M.; The Far-ultraviolet "Continuum" in Protoplanetary Disk Systems. II. Carbon Monoxide Fourth Positive Emission and Absorption; The Astrophysical Journal 734 31 (2011)
59. Galametz M., Madden S. C., Galliano F., Hony S., Bendo G. J., Sauvage M.; Probing the dust properties of galaxies up to submillimetre wavelengths. II. Dust-to-gas mass ratio trends with metallicity and the submm excess in dwarf galaxies; Astronomy and Astrophysics 532 A56 (2011)
60. Galliano F., Hony S., Bernard J.-P., Bot C., Madden S. C., Roman-Duval J., Galametz M., Li A., Meixner M., Engelbracht C. W., Lebouteiller V., Misselt K., Montiel E., Panuzzo P., Reach W. T., Skibba R.; Non-standard grain properties, dark gas reservoir, and extended submillimeter excess, probed by *Herschel* in the Large Magellanic Cloud; Astronomy and Astrophysics 536 A88 (2011)
61. Gans B., Boyé-Péronne S., Broquier M., Delsaut M., Douin S., Fellows C. E., Halvick P., Loison J.-C., Lucchese R. R., Gauyacq D.; Photolysis of methane revisited at 121.6 nm and at 118.2 nm: quantum yields of the primary products, measured by mass spectrometry; Physical Chemistry Chemical Physics (Incorporating Faraday Transactions) 13 8140 (2011)
62. Gattacceca J., Valenzuela M., Uehara M., Jull A. J. T., Giscard M., Rochette P., Braucher R., Suavet C., Gounelle M., Morata D., Munayco P., Bourot-Denise M., Bourles D., Demory F.; The densest meteorite collection area in hot deserts: The San Juan meteorite field (Atacama Desert, Chile); Meteoritics and Planetary Science 46 1276 (2011)
63. Gerin M., Kaźmierczak M., Jastrzebska M., Falgarone E., Hily-Blant P., Godard B., de Luca M.; The tight correlation of CCH, and c-C3H2 in diffuse and translucent clouds; Astronomy and Astrophysics 525 A116 (2011)
64. Ghalila H., Lahmar S., Hochlaf M.; A theoretical investigation of the diatomic dication SeO2+ in the gas phase; Chemical Physics Letters 518 21 (2011)
65. Godard M., Féraud G., Chabot M., Carpentier Y., Pino T., Brunetto R., Duprat J., Engrand C., Bréchignac P., D'Hendecourt L., Dartois E.; Ion irradiation of carbonaceous interstellar analogues. Effects of cosmic rays on the 3.4 μm interstellar absorption band; Astronomy and Astrophysics 529 A146 (2011)
66. Goicoechea J. R., Joblin C., Contursi A., Berné O., Cernicharo J., Gerin M., Le Bourlot J., Bergin E. A., Bell T. A., Röllig M.; OH emission from warm and dense gas in the Orion Bar PDR; Astronomy and Astrophysics 530 L16 (2011)
67. Goldsmith P. F., Liseau R., Bell T. A., Black J. H., Chen J.-H., Hollenbach D., Kaufman M. J., Li D., Lis D. C., Melnick G., Neufeld D., Pagani L., Snell R., Benz A. O., Bergin E., Bruderer S., Caselli P., Caux E., Encrenaz P., Falgarone E., Gerin M., Goicoechea J. R., Hjalmarson Å., Larsson B., Le Bourlot J., Le Petit F., De Luca M., Nagy Z., Roueff E., Sandqvist A., van der Tak F., van Dishoeck E. F., Vastel C., Viti S., Yıldız U.; *Herschel* Measurements of Molecular Oxygen in Orion; The Astrophysical Journal 737 96 (2011)
68. Gordon K. D., Meixner M., Meade M. R., Whitney B., Engelbracht C., Bot C., Boyer M. L., Lawton B., Sewiło M., Babler B., Bernard J.-P., Bracker S., Block M., Blum R., Bolatto A., Bonanos A., Harris J., Hora J. L., Indebetouw R., Misselt K., Reach W., Shiao B., Tielens X., Carlson L., Churchwell E., Clayton G. C., Chen C.-H. R., Cohen M., Fukui Y., Gorjian V., Hony S., Israel F. P., Kawamura A., Kemper F., Leroy A., Li A., Madden S., Marble A. R., McDonald I., Mizuno A., Mizuno N., Muller E., Oliveira J. M., Olsen K., Onishi T., Paladini R., Paradis D., Points S., Robitaille T., Rubin D., Sandstrom K., Sato S., Shibai H., Simon J. D., Smith L. J., Srinivasan S., Vijh U., Van Dyk S., van Loon J. T., Zaritsky D.; Surveying the Agents of Galaxy Evolution in the Tidally Stripped, Low Metallicity Small Magellanic Cloud (SAGE-SMC). I. Overview; The Astronomical Journal 142 102 (2011)
69. Gounelle, M. ; Massive stars and short-lived radionuclides in the solar system, in: Charbonnel, C., Montmerle, T. (Eds.), Star formation in the local universe EDP Sciences, Paris, pp. 289-297 (2011)
70. Green J. D., Watson D. M., Bergin E., Maret S., Melnick G., Sonnentrucker P., Tolls V., Sargent B. A., Forrest W. J., Kim K. H., Raines S. N.; GGD 37: An Extreme Protostellar Outflow; The Astrophysical Journal 726 L1 (2011)
71. Guilloteau S., Dutrey A., Piétu V., Boehler Y.; A dual-frequency sub-arcsecond study of proto-planetary disks at mm wavelengths: first evidence for radial variations of the dust properties; Astronomy and Astrophysics 529 A105 (2011)
72. Guitou M., Belyaev A. K., Barklem P. S., Spielfiedel A., Feautrier N.; Inelastic Mg+H collision processes at low energies; Journal of Physics B Atomic Molecular Physics 44 035202 (2011)
73. Guzmán V., Pety J., Goicoechea J. R., Gerin M., Roueff E.; H2CO in the Horsehead PDR: photo-desorption of dust grain ice mantles; Astronomy and Astrophysics 534 A49 (2011)
74. Habart E., Abergel A., Boulanger F., Joblin C., Verstraete L., Compiègne M., Pineau Des Forêts G., Le Bourlot J.;

Excitation of H2 in photodissociation regions as seen by Spitzer; Astronomy and Astrophysics 527 A122 (2011)
75. Hamrita H., Pârlog M., Borderie B., Lavergne L., Le Neindre N., Rivet M. F., Barbey S., Bougault R., Chabot M., Chbihi A., Cussol D., de Oliveira Santos F., Edelbruck P., Frankland J. D., Galichet E., Guinet D., Lautesse P., Lopez O., Martinet G., Orr N. A., Piantelli S., Tillier J., Politi G., Rauly E., Rosato E., Tamain B., Vient E., Vigilante M. F. C.; Description of current pulses induced by heavy ions in silicon detectors (II); Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 642 59 (2011)
76. Hennebelle P., Chabrier G.; Analytical Star Formation Rate from Gravoturbulent Fragmentation; The Astrophysical Journal 743 L29 (2011)
77. Hennebelle P., Chabrier G.; Theories of the initial mass function; Computational Star Formation 270 159 (2011)
78. Hennebelle P., Commerçon B., Joos M., Klessen R. S., Krumholz M., Tan J. C., Teyssier R.; Collapse, outflows and fragmentation of massive, turbulent and magnetized prestellar barotropic cores; Astronomy and Astrophysics 528 A72 (2011)
79. Herbst E., Roueff E.; Dissociative recombination and electron attachment in regions of star formation; Journal of Physics Conference Series 300 012026 (2011)
80. Herrera C. N., Boulanger F., Nesvadba N. P. H.; From large scale gas compression to cluster formation in the Antennae overlap region; Astronomy and Astrophysics 534 A138 (2011)
81. Hickman A. P., Kashinski D. O., Malenda R. F., Gatti F., Talbi D.; Calculation of dissociating autoionizing states using the block diagonalization method: Application to N2H; Journal of Physics Conference Series 300 012016 (2011)
82. Hill T., Motte F., Didelon P., Bontemps S., Minier V., Hennemann M., Schneider N., André P., Men'shchikov A., Anderson L. D., Arzoumanian D., Bernard J.-P., di Francesco J., Elia D., Giannini T., Griffin M. J., Könyves V., Kirk J., Marston A. P., Martin P. G., Molinari S., Nguyen Luong Q., Peretto N., Pezzuto S., Roussel H., Sauvage M., Sousbie T., Testi L., Ward-Thompson D., White G. J., Wilson C. D., Zavagno A.; Filaments and ridges in Vela C revealed by *Herschel*: from low-mass to high-mass star-forming sites; Astronomy and Astrophysics 533 A94 (2011)
83. Hincelin U., Wakelam V., Hersant F., Guilloteau S., Loison J. C., Honvault P., Troe J.; Oxygen depletion in dense molecular clouds: a clue to a low O2 abundance?; Astronomy and Astrophysics 530 A61 (2011)
84. Honvault P., Jorfi M., González-Lezana T., Faure A., Pagani L.; Ortho-Para H2 Conversion by Proton Exchange at Low Temperature: An Accurate Quantum Mechanical Study; Physical Review Letters 107 023201 (2011)
85. Honvault P., Jorfi M., González-Lezana T., Faure A., Pagani L.; Quantum mechanical study of the proton exchange in the ortho-para H2 conversion reaction at low temperature; Physical Chemistry Chemical Physics (Incorporating Faraday Transactions) 13 19089 (2011)
86. Hony S., Kemper F., Woods P. M., van Loon J. T., Gorjian V., Madden S. C., Zijlstra A. A., Gordon K. D., Indebetouw R., Marengo M., Meixner M., Panuzzo P., Shiao B., Sloan G. C., Roman-Duval J., Mullaney J., Tielens A. G. G. M.; The Spitzer discovery of a galaxy with infrared emission solely due to AGN activity; Astronomy and Astrophysics 531 A137 (2011)
87. Hutzler A., Gattacceca J., Rochette P., Jull T., Valenzuela M., Cournede C., Uehara M., Laridhi-Ouazaa N., Gounelle M., Braucher R.; New Dense Collection Area in Atacama Desert, Chile: Preliminary Results; Meteoritics and Planetary Science Supplement 74 5091 (2011)
88. Ingalls J. G., Bania T. M., Boulanger F., Draine B. T., Falgarone E., Hily-Blant P.; Spitzer Infrared Spectrograph Detection of Molecular Hydrogen Rotational Emission towards Translucent Clouds; The Astrophysical Journal 743 174 (2011)
89. Ingleby L., Calvet N., Bergin E., Herczeg G., Brown A., Alexander R., Edwards S., Espaillat C., France K., Gregory S. G., Hillenbrand L., Roueff E., Valenti J., Walter F., Johns-Krull C., Brown J., Linsky J., McClure M., Ardila D., Abgrall H., Bethell T., Hussain G., Yang H.; Near-ultraviolet Excess in Slowly Accreting T Tauri Stars: Limits Imposed by Chromospheric Emission; The Astrophysical Journal 743 105 (2011)
90. Jacquet E. & Krumholz M. R.; Radiative Rayleigh-Taylor instabilities ; The Astrophysical Journal, 730, 116 (2011)
91. Jacquet E., Balbus S. A., Latter H. N. ; On linear dust-gas streaming instabilities in protoplanetary discs, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 415, 3591 (2011)
92. Jacquet E., Fromang S., Gounelle M.; Radial transport of refractory inclusions and their preservation in the dead zone; Astronomy and Astrophysics 526 L8 (2011)
93. Jacquet E., Fromang S., Gounelle M.; Transport of Chondrite Components in the Protoplanetary Disc: Interpreting the Carbonaceous/Non-Carbonaceous Chondrite Dichotomy; Meteoritics and Planetary Science Supplement 74 5043 (2011)
94. Jorfi M., Honvault P., Bussery-Honvault B., Bañares L., Bulut N.; Influence of ro-vibrational and isotope effects on the dynamics of the C(3P)+ OD(X2Π) → CO(X1Σ+) + D(2S) reaction; Molecular Physics 109 543 (2011)
95. Jorfi M., Honvault P.; Quasi-classical trajectory study of the S + OH → SO + H reaction: from reaction probability to thermal rate constant; Physical Chemistry Chemical Physics (Incorporating Faraday Transactions) 13 8414 (2011)
96. Juvela M., Ristorcelli I., Pelkonen V.-M., Marshall D. J., Montier L. A., Bernard J.-P., Paladini R., Lunttila T., Abergel A., André P., Dickinson C., Dupac X., Malinen J., Martin P., McGehee P., Pagani L., Ysard N., Zavagno A.; Galactic cold cores. II. *Herschel* study of the extended dust emission around the first *Planck* detections; Astronomy and Astrophysics 527 A111 (2011)
97. Kłos J., Lique F.; First rate coefficients for an interstellar anion: application to the CN--H2 collisional system; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 418 271 (2011)
98. Kamp I., Woitke P., Pinte C., Tilling I., Thi W.-F., Menard F., Duchene G., Augereau J.-C.; Continuum and line modelling of discs around young stars. II. Line diagnostics for GASPS from the DENT grid; Astronomy and Astrophysics 532 A85 (2011)
99. Kearsley A. T., Smith C. L., Spratt J., Benedix G. K., Hunt A., Russell S. S., Joy K. H., Gounelle M.; Meteorite Polished Sections: X-Ray Map Imagery for Documentation, Curation and `Virtual-Loan' of Irreplaceable Materials; Meteoritics and Planetary Science Supplement 74 5280 (2011)
100. Kristensen L. E., Amiaud L., Fillion J.-H., Dulieu F., Lemaire J.-L.; H2, HD, and D2 abundances on ice-covered dust grains in dark clouds; Astronomy and Astrophysics 527 A44 (2011)
101. Kupka F., Dubernet M.-L., VAMDC Collaboration; Vamdc as a Resource for Atomic and Molecular Data and the New Release of Vald; Baltic Astronomy 20 503 (2011)
102. Lallement R., Welsh B. Y., Barstow M. A., Casewell S. L.; High ions towards white dwarfs: circumstellar line shifts and stellar temperature; Astronomy and Astrophysics 533 A140 (2011)

103. Lara M., Dayou F., Launay J.-M., Bergeat A., Hickson K. M., Naulin C., Costes M.; Observation of partial wave structures in the integral cross section of the S(1D2) + H2(j = 0) reaction; Physical Chemistry Chemical Physics (Incorporating Faraday Transactions) 13 8127 (2011)
104. Lara M., Dayou F., Launay J.-M.; Reaching the cold regime: S(1D) + H2 and the role of long-range interactions in open shell reactive collisions; Physical Chemistry Chemical Physics (Incorporating Faraday Transactions) 13 8359 (2011)
105. Lattelais M., Bertin M., Mokrane H., Romanzin C., Michaut X., Jeseck P., Fillion J.-H., Chaabouni H., Congiu E., Dulieu F., Baouche S., Lemaire J.-L., Pauzat, F., Pilmé J., Minot C., Ellinger Y.; Differential adsorption of complex organic molecules isomers at interstellar ice surfaces; Astronomy and Astrophysics 532 A12 (2011)
106. Lattelais M., Pauzat F., Pilmé J., Ellinger Y., Ceccarelli C.; About the detectability of glycine in the interstellar medium; Astronomy and Astrophysics 532 A39 (2011)
107. Lattelais M., Risset O., Pilmé J., Pauzat F., Ellinger Y., Sirotti F., Silly M., Parent Ph., Laffon C.; The survival of glycine in interstellar ices: a coupled investigation using NEXAFS experiments and theoretical calculations; International Journal of Quantum Chemistry 111 1163 (2011)
108. Lauvergnat D., Senent M. L., Jutier L., Hochlaf M. ; Explicitly correlated treatment of H_2NSi and H_2SiN radicals: Electronic structure calculations and rovibrational spectra; J. Chem. Phys. **135**, 074301 (2011)
109. Lebouteiller V., Bernard-Salas J., Whelan D. G., Brandl B., Galliano F., Charmandaris V., Madden S., Kunth D.; Influence of the Environment on Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Emission in Star-forming Regions; The Astrophysical Journal 728 45 (2011)
110. Lemaire J. L.; Formation of molecular hydrogen on bare grains in the interstellar medium (the connection between astronomic and nano-metric scales) ; Global Journal of Physical Chemistry, 2 189 (2011)
111. Lique F., Kłos J.; Hyperfine excitation of CN by He; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 413 L20 (2011)
112. Muller H. S. P., Coutens A., Walters A., Grabow J.-U., Schlemmer S.; Rotational spectroscopy, dipole moment and 14N nuclear hyperfine structure of iso-propyl cyanide; Journal of Molecular Spectroscopy 267 100 (2011)
113. Maatouk A., Ben Houria A., Yazidi O., Jaidane N., Hochlaf M.; Theoretical investigations of the MgO+ cation: spectroscopy, spin-orbit coupling and single ionization spectrum; Journal of Physics B Atomic Molecular Physics 44 225101 (2011)
114. Magrini L., Bianchi S., Corbelli E., Cortese L., Hunt L., Smith M., Vlahakis C., Davies J., Bendo G. J., Baes M., Boselli A., Clemens M., Casasola V., de Looze I., Fritz J., Giovanardi C., Grossi M., Hughes T., Madden S., Pappalardo C., Pohlen M., di Serego Alighieri S., Verstappen J.; The *Herschel* Virgo Cluster Survey. IX. Dust-to-gas mass ratio and metallicity gradients in four Virgo spiral galaxies; Astronomy and Astrophysics 535 A13 (2011)
115. Mahjoub A., Hochlaf M., Poisson L., Nieuwjaer N., Lecomte F., Schermann J. P., Grégoire G., Manil B., Garcia G. A., Nahon L. ; Slow photoelectron spectroscopy of d-Valerolactam and of its dimer; ChemPhysChem **12**, 1822 (2011).
116. Maret S., Hily-Blant P., Pety J., Bardeau S., Reynier E.; Weeds: a CLASS extension for the analysis of millimeter and sub-millimeter spectral surveys; Astronomy and Astrophysics 526 A47 (2011)
117. Martin-Drumel M. A., Pirali O., Balcon D., Bréchignac P., Roy P., Vervloet M.; High resolution far-infrared Fourier transform spectroscopy of radicals at the AILES beamline of SOLEIL synchrotron facility; Review of Scientific Instruments 82 113106 (2011)
118. Matsuura M., Dwek E., Meixner M., Otsuka M., Babler B., Barlow M. J., Roman-Duval J., Engelbracht C., Sandstrom K., Lakićević M., van Loon J. T., Sonneborn G., Clayton G. C., Long K. S., Lundqvist P., Nozawa T., Gordon K. D., Hony S., Panuzzo P., Okumura K., Misselt K. A., Montiel E., Sauvage M.; *Herschel* Detects a Massive Dust Reservoir in Supernova 1987A; Science 333 1258 (2011)
119. Matthews L. D., Libert Y., Gérard E., Le Bertre T., Johnson M. C., Dame T. M.; H I Observations of the Asymptotic Giant Branch Star X Herculis: Discovery of an Extended Circumstellar Wake Superposed on a Compact High-velocity Cloud; The Astronomical Journal 141 60 (2011)
120. Maury A. J., André P., Men'shchikov A., Könyves V., Bontemps S.; The formation of active protoclusters in the Aquila rift: a millimeter continuum view; Astronomy and Astrophysics 535 A77 (2011)
121. Mayer P. M., Blanchet V., Joblin C.; Threshold photoelectron study of naphthalene, anthracene, pyrene, 1,2-dihydronaphthalene, and 9,10-dihydroanthracene; Journal of Chemical Physics 134 244312 (2011)
122. McCabe C., Duchêne G., Pinte C., Stapelfeldt K. R., Ghez A. M., Ménard F.; Spatially Resolving the HK Tau B Edge-on Disk from 1.2 to 4.7 μm: A Unique Scattered Light Disk; The Astrophysical Journal 727 90 (2011)
123. Melis C., Duchêne G., Chomiuk L., Palmer P., Perrin M. D., Maddison S. T., Ménard F., Stapelfeldt K., Pinte C., Duvert G.; Microwave Observations of Edge-on Protoplanetary Disks: Program Overview and First Results; The Astrophysical Journal 739 L7 (2011)
124. Moellendal, H. ; Samdal, S. ; Matrane, A. ; Guillemin, J.-C. ; Synthesis, Microwave Spectrum, and Dipole Moment of Allenylisocyanide ($H_2C=C=CHNC$), a Compound of Potential Astrochemical Interest : Journal of Physical Chemistry A 115 7978 (2011)
125. Molinari S., Bally J., Noriega-Crespo A., Compiègne M., Bernard J. P., Paradis D., Martin P., Testi L., Barlow M., Moore T., Plume R., Swinyard B., Zavagno A., Calzoletti L., Di Giorgio A. M., Elia D., Faustini F., Natoli P., Pestalozzi M., Pezzuto S., Piacentini F., Polenta G., Polychroni D., Schisano E., Traficante A., Veneziani M., Battersby C., Burton M., Carey S., Fukui Y., Li J. Z., Lord S. D., Morgan L., Motte F., Schuller F., Stringfellow G. S., Tan J. C., Thompson M. A., Ward-Thompson D., White G., Umana G.; A 100 pc Elliptical and Twisted Ring of Cold and Dense Molecular Clouds Revealed by *Herschel* Around the Galactic Center; The Astrophysical Journal 735 L33 (2011)
126. Morales S. B., Bennett C. J., Le Picard S. D., Canosa A., Sims I. R., Sun B. J., Chen P. H., Chang A. H. H., Kislov V. V., Mebel A. M., Gu X., Zhang F., Maksyutenko P., Kaiser R. I.; A Crossed Molecular Beam, Low-temperature Kinetics, and Theoretical Investigation of the Reaction of the Cyano Radical (CN) with 1,3-butadiene (C4H6). A Route to Complex Nitrogen-bearing Molecules in Low-temperature Extraterrestrial Environments; The Astrophysical Journal 742 26 (2011)
127. Moudens A., Georges R., Benidar A., Amyay B., Herman M., Fayt A., Plez B.; Emission spectroscopy from optically thick laboratory acetylene samples at high temperature; Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 112 540 (2011)
128. Moynier F., Paniello R. C., Gounelle M., Albarède F., Beck P., Podosek F., Zanda B.; Nature of volatile depletion and genetic relationships in enstatite chondrites and aubrites inferred from Zn isotopes; Geochimica et Cosmochimica Acta 75 297 (2011)
129. Muller S., Beelen A., Guélin M., Aalto S., Black J. H., Combes F., Curran S. J., Theule P., Longmore S. N.; Molecules at

z = 0.89. A 4-mm-rest-frame absorption-line survey toward PKS 1830-211; Astronomy and Astrophysics 535 A103 (2011)
130. Nesvadba N. P. H., Boulanger F., Lehnert M. D., Guillard P., Salome P.; Dense gas without star formation: the kpc-sized turbulent molecular disk in 3C 326 N; Astronomy and Astrophysics 536 L5 (2011)
131. Ngom, M. ; Kwabia Tchana, F. ; Perrin, A. ; Guillemin, J.-C. ; Flaud, J.-M. ; Demaison, J. ; Ngom, El.A. New vibrational assignments for the n_1 to n_{17} vibrational modes of aziridine and first analysis of the high resolution infrared spectrum of aziridine between 720 cm^{-1} and 1050 cm^{-1} ; Molecular Physics 109 2153 (2011)
132. Nguyen Luong Q., Motte F., Hennemann M., Hill T., Rygl K. L. J., Schneider N., Bontemps S., Men'shchikov A., André P., Peretto N., Anderson L. D., Arzoumanian D., Deharveng L., Didelon P., di Francesco J., Griffin M. J., Kirk J. M., Könyves V., Martin P. G., Maury A., Minier V., Molinari S., Pestalozzi M., Pezzuto S., Reid M., Roussel H., Sauvage M., Schuller F., Testi L., Ward-Thompson D., White G. J., Zavagno A.; The *Herschel* view of massive star formation in G035.39-00.33: dense and cold filament of W48 undergoing a mini-starburst; Astronomy and Astrophysics 535 A76 (2011)
133. Noble J. A., Dulieu F., Congiu E., Fraser H. J.; CO2 Formation in Quiescent Clouds: An Experimental Study of the CO + OH Pathway; The Astrophysical Journal 735 121 (2011)
134. Olofsson J., Benisty M., Augereau J.-C., Pinte C., Ménard F., Tatulli E., Berger J.-P., Malbet F., Merín B., van Dishoeck E. F., Lacour S., Pontoppidan K. M., Monin J.-L., Brown J. M., Blake G. A.; Warm dust resolved in the cold disk around T Chamaeleontis with VLTI/AMBER; Astronomy and Astrophysics 528 L6 (2011)
135. Omont A., Neri R., Cox P., Lupu R., Guélin M., van der Werf P., Weiß A., Ivison R., Negrello M., Leeuw L., Lehnert M., Smail I., Verma A., Baker A. J., Beelen A., Aguirre J. E., Baes M., Bertoldi F., Clements D. L., Cooray A., Coppin K., Dannerbauer H., de Zotti G., Dye S., Fiolet N., Frayer D., Gavazzi R., Hughes D., Jarvis M., Krips M., Michałowski M. J., Murphy E. J., Riechers D., Serjeant S., Swinbank A. M., Temi P., Vaccari M., Vieira J. D., Auld R., Buttiglione B., Cava A., Dariush A., Dunne L., Eales S. A., Fritz J., Gomez H., Ibar E., Maddox S., Pascale E., Pohlen M., Rigby E., Smith D. J. B., Bock J., Bradford C. M., Glenn J., Scott K. S., Zmuidzinas J.; Observation of H2O in a strongly lensed *Herschel*-ATLAS source at z = 2.3; Astronomy and Astrophysics 530 L3 (2011)
136. Ozeki H., Bailleux S., Wlodarczak G.; Terahertz spectroscopy of the CHD radical (widetilde{X 3{A}"}); Astronomy and Astrophysics 527 A64 (2011)
137. Padovani M., Walmsley C. M., Tafalla M., Hily-Blant P., Pineau Des Forêts G.; Hydrogen cyanide and isocyanide in prestellar cores; Astronomy and Astrophysics 534 A77 (2011)
138. Pagani L., Roueff E., Lesaffre P.; Ortho-H2 and the Age of Interstellar Dark Clouds; The Astrophysical Journal 739 L35 (2011)
139. Paradis D., Reach W. T., Bernard J.-P., Madden S., Dobashi K., Meixner M., Onishi T., Kawamura A., Fukui Y.; A Statistical Study of Dust Properties in Large Magellanic Cloud Molecular Clouds; The Astronomical Journal 141 43 (2011)
140. Pauzat F., Lattelais M., Ellinger Y., Minot C.; The interstellar carbonaceous aromatic matter as a trap for molecular hydrogen; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 412 2729 (2011)
141. Petitat M., Birck J.-L., Luu T. H., Gounelle M.; The Chromium Isotopic Composition of the Ungrouped Carbonaceous Chondrite Tagish Lake; The Astrophysical Journal 736 23 (2011)
142. Petitat M., Marrocchi Y., McKeegan K. D., Mostefaoui S., Meibom A., Zolensky M. E., Gounelle M.; 53Mn-53Cr ages of Kaidun carbonates; Meteoritics and Planetary Science 46 275 (2011)
143. Piétu V., di Folco E., Guilloteau S., Gueth F., Cox P.; High-sensitivity search for clumps in the Vega Kuiper-belt. New PdBI 1.3 mm observations; Astronomy and Astrophysics 531 L2 (2011)
144. Piétu V., Gueth F., Hily-Blant P., Schuster K.-F., Pety J.; High resolution imaging of the GG Tauri system at 267 GHz; Astronomy and Astrophysics 528 A81 (2011)
145. Pirim C., Krim L.; A neon-matrix isolation study of the reaction of non energetic H-atoms with CO molecules at 3 K; Physical Chemistry Chemical Physics 13 19454 (2011)
146. Pirim C., Krim L.; An FTIR study on the catalytic effect of water molecules on the reaction of CO successive hydrogenation at 3 K; Chemical Physics 380 67 (2011)
147. *Planck* Collaboration, Abergel A., Ade P. A. R., Aghanim N., Arnaud M., Ashdown M., Aumont J., Baccigalupi C., Balbi A., Banday A. J., Barreiro R. B., Bartlett J. G., Battaner E., Benabed K., Benoît A., Bernard J.-P., Bersanelli M., Bhatia R., Bock J. J., Bonaldi A., Bond J. R., Borrill J., Bouchet F. R., Boulanger F., Bucher M., Burigana C., Cabella P., Cardoso J.-F., Catalano A., Cayón L., Challinor A., Chamballu A., Chiang L.-Y., Chiang C., Christensen P. R., Clements D. L., Colombi S., Couchot F., Coulais A., Crill B. P., Cuttaia F., Danese L., Davies R. D., Davis R. J., de Bernardis P., de Gasperis G., de Rosa A., de Zotti G., Delabrouille J., Delouis J.-M., Désert F.-X., Dickinson C., Dobashi K., Donzelli S., Doré O., Dörl U., Douspis M., Dupac X., Efstathiou G., Enßlin T. A., Eriksen H. K., Finelli F., Forni O., Frailis M., Franceschi E., Galeotta S., Ganga K., Giard M., Giardino G., Giraud-Héraud Y., González-Nuevo J., Górski K. M., Gratton S., Gregorio A., Gruppuso A., Guillet V., Hansen F. K., Harrison D., Henrot-Versillé S., Herranz D., Hildebrandt S. R., Hivon E., Hobson M., Holmes W. A., Hovest W., Hoyland R. J., Huffenberger K. M., Jaffe A. H., Jones A., Jones W. C., Juvela M., Keihänen E., Keskitalo R., Kisner T. S., Kneissl R., Knox L., Kurki-Suonio H., Lagache G., Lamarre J.-M., Lasenby A., Laureijs R. J., Lawrence C. R., Leach S., Leonardi R., Leroy C., Linden-Voernle M., López-Caniego M., Lubin P. M., Macías-Pérez J. F., MacTavish C. J., Maffei B., Mandolesi N., Mann R., Maris M., Marshall D. J., Martin P., Martínez-González E., Masi S., Matarrese S., Matthai F., Mazzotta P., McGehee P., Meinhold P. R., Melchiorri A., Mendes L., Mennella A., Mitra S., Miville-Deschênes M.-A., Moneti A., Montier L., Morgante G., Mortlock D., Munshi D., Murphy A., Naselsky P., Natoli P., Netterfield C. B., Noergaard-Nielsen H. U., Noviello F., Novikov D., Novikov I., Osborne S., Pajot F., Paladini R., Pasian F., Patanchon G., Perdereau O., Perotto L., Perrotta F., Piacentini F., Piat M., Plaszczynski S., Pointecouteau E., Polenta G., Ponthieu N., Poutanen T., Prézeau G., Prunet S., Puget J.-L., Reach W. T., Rebolo R., Reinecke M., Renault C., Ricciardi S., Riller T., Ristorcelli I., Rocha G., Rosset C., Rubiño-Martín J. A., Rusholme B., Sandri M., Santos D., Savini G., Scott D., Seiffert M. D., Shellard P., Smoot G. F., Starck J.-L., Stivoli F., Stolyarov V., Sudiwala R., Sygnet J.-F., Tauber J. A., Terenzi L., Toffolatti L., Tomasi M., Torre J.-P., Tristram M., Tuovinen J., Umana G., Valenziano L., Verstraete L., Vielva P., Villa F., Vittorio N., Wade L. A., Wandelt B. D., Yvon D., Zacchei A., Zonca A.; *Planck* early results. XXV. Thermal dust in nearby molecular clouds; Astronomy and Astrophysics 536 A25 (2011)
148. *Planck* Collaboration, Abergel A., Ade P. A. R., Aghanim N., Arnaud M., Ashdown M., Aumont J., Baccigalupi C., Balbi A., Banday A. J., Barreiro R. B., Bartlett J. G., Battaner E., Benabed K., Benoît A., Bernard J.-P., Bersanelli M.,

Bhatia R., Blagrave K., Bock J. J., Bonaldi A., Bond J. R., Borrill J., Bouchet F. R., Boulanger F., Bucher M., Burigana C., Cabella P., Cantalupo C. M., Cardoso J.-F., Catalano A., Cayón L., Challinor A., Chamballu A., Chiang L.-Y., Chiang C., Christensen P. R., Clements D. L., Colombi S., Couchot F., Coulais A., Crill B. P., Cuttaia F., Danese L., Davies R. D., Davis R. J., de Bernardis P., de Gasperis G., de Rosa A., de Zotti G., Delabrouille J., Delouis J.-M., Désert F.-X., Dickinson C., Donzelli S., Doré O., Dörl U., Douspis M., Dupac X., Efstathiou G., Enßlin T. A., Eriksen H. K., Finelli F., Forni O., Frailis M., Franceschi E., Galeotta S., Ganga K., Giard M., Giardino G., Giraud-Héraud Y., González-Nuevo J., Górski K. M., Gratton S., Gregorio A., Gruppuso A., Hansen F. K., Harrison D., Helou G., Henrot-Versillé S., Herranz D., Hildebrandt S. R., Hivon E., Hobson M., Holmes W. A., Hovest W., Hoyland R. J., Huffenberger K. M., Jaffe A. H., Joncas G., Jones A., Jones W. C., Juvela M., Keihänen E., Keskitalo R., Kisner T. S., Kneissl R., Knox L., Kurki-Suonio H., Lagache G., Lamarre J.-M., Lasenby A., Laureijs R. J., Lawrence C. R., Leach S., Leonardi R., Leroy C., Linden-Voernle M., Lockman F. J., López-Caniego M., Lubin P. M., Macías-Pérez J. F., MacTavish C. J., Maffei B., Maino D., Mandolesi N., Mann R., Maris M., Marshall D. J., Martin P., Martínez-González E., Masi S., Matarrese S., Matthai F., Mazzotta P., McGehee P., Meinhold P. R., Melchiorri A., Mendes L., Mennella A., Miville-Deschênes M.-A., Moneti A., Montier L., Morgante G., Mortlock D., Munshi D., Murphy A., Naselsky P., Nati F., Natoli P., Netterfield C. B., Noergaard-Nielsen H. U., Noviello F., Novikov D., Novikov I., O'Dwyer I. J., Osborne S., Pajot F., Paladini R., Pasian F., Patanchon G., Perdereau O., Perotto L., Perrotta F., Piacentini F., Piat M., Pinheiro Gonçalves D., Plaszczynski S., Pointecouteau E., Polenta G., Ponthieu N., Poutanen T., Prézeau G., Prunet S., Puget J.-L., Rachen J. P., Reach W. T., Reinecke M., Renault C., Ricciardi S., Riller T., Ristorcelli I., Rocha G., Rosset C., Rowan-Robinson M., Rubiño-Martín J. A., Rusholme B., Sandri M., Santos D., Savini G., Scott D., Seiffert M. D., Shellard P., Smoot G. F., Starck J.-L., Stivoli F., Stolyarov V., Stompor R., Sudiwala R., Sygnet J.-F., Tauber J. A., Terenzi L., Toffolatti L., Tomasi M., Torre J.-P., Tristram M., Tuovinen J., Umana G., Valenziano L., Vielva P., Villa F., Vittorio N., Wade L. A., Wandelt B. D., Wilkinson A., Yvon D., Zacchei A., Zonca A.; *Planck* early results. XXIV. Dust in the diffuse interstellar medium and the Galactic halo ; Astronomy and Astrophysics 536 A24 (2011)

149. *Planck* Collaboration, Abergel A., Ade P. A. R., Aghanim N., Arnaud M., Ashdown M., Aumont J., Baccigalupi C., Balbi A., Banday A. J., Barreiro R. B., Bartlett J. G., Battaner E., Benabed K., Benoît A., Bernard J.-P., Bersanelli M., Bhatia R., Bock J. J., Bonaldi A., Bond J. R., Borrill J., Bouchet F. R., Boulanger F., Bucher M., Burigana C., Cabella P., Cardoso J.-F., Catalano A., Cayón L., Challinor A., Chamballu A., Chiang L.-Y., Chiang C., Christensen P. R., Colombi S., Couchot F., Coulais A., Crill B. P., Cuttaia F., Dame T. M., Danese L., Davies R. D., Davis R. J., de Bernardis P., de Gasperis G., de Rosa A., de Zotti G., Delabrouille J., Delouis J.-M., Désert F.-X., Dickinson C., Donzelli S., Doré O., Dörl U., Douspis M., Dupac X., Efstathiou G., Enßlin T. A., Finelli F., Forni O., Frailis M., Franceschi E., Galeotta S., Ganga K., Giard M., Giardino G., Giraud-Héraud Y., González-Nuevo J., Górski K. M., Gratton S., Gregorio A., Grenier I. A., Gruppuso A., Hansen F. K., Harrison D., Henrot-Versillé S., Herranz D., Hildebrandt S. R., Hivon E., Hobson M., Holmes W. A., Hovest W., Hoyland R. J., Huffenberger K. M., Jaffe T. R., Jaffe A. H., Jones W. C., Juvela M., Keihänen E., Keskitalo R., Kisner T. S., Kneissl R., Knox L., Kurki-Suonio H., Lagache G., Lähteenmäki A., Lamarre J.-M., Lasenby A., Laureijs R. J., Lawrence C. R., Leach S., Leonardi R., Leroy C., Lilje P. B., Linden-Voernle M., López-Caniego M., Lubin P. M., Macías-Pérez J. F., MacTavish C. J., Maffei B., Mandolesi N., Mann R., Maris M., Marshall D. J., Martínez-González E., Masi S., Matarrese S., Matthai F., Mazzotta P., McGehee P., Meinhold P. R., Melchiorri A., Mendes L., Mennella A., Miville-Deschênes M.-A., Moneti A., Montier L., Morgante G., Mortlock D., Munshi D., Murphy A., Naselsky P., Natoli P., Netterfield C. B., Noergaard-Nielsen H. U., Noviello F., Novikov D., Novikov I., Osborne S., Pajot F., Paladini R., Pasian F., Patanchon G., Perdereau O., Perotto L., Perrotta F., Piacentini F., Piat M., Plaszczynski S., Pointecouteau E., Polenta G., Ponthieu N., Poutanen T., Prézeau G., Prunet S., Puget J.-L., Rachen J. P., Reach W. T., Rebolo R., Reich W., Renault C., Ricciardi S., Riller T., Ristorcelli I., Rocha G., Rosset C., Rubiño-Martín J. A., Rusholme B., Sandri M., Santos D., Savini G., Scott D., Seiffert M. D., Shellard P., Smoot G. F., Starck J.-L., Stivoli F., Stolyarov V., Stompor R., Sudiwala R., Sygnet J.-F., Tauber J. A., Terenzi L., Toffolatti L., Tomasi M., Torre J.-P., Tristram M., Tuovinen J., Umana G., Valenziano L., Varis J., Vielva P., Villa F., Vittorio N., Wade L. A., Wandelt B. D., Wilkinson A., Ysard N., Yvon D., Zacchei A., Zonca A.; *Planck* early results. XXI. Properties of the interstellar medium in the Galactic plane ; Astronomy and Astrophysics 536 A21 (2011)

150. *Planck* Collaboration, Ade P. A. R., Aghanim N., Arnaud M., Ashdown M., Aumont J., Baccigalupi C., Balbi A., Banday A. J., Barreiro R. B., Bartlett J. G., Battaner E., Benabed K., Benoît A., Bernard J.-P., Bersanelli M., Bhatia R., Bock J. J., Bonaldi A., Bond J. R., Borrill J., Bouchet F. R., Boulanger F., Bucher M., Burigana C., Cabella P., Cantalupo C. M., Cardoso J.-F., Catalano A., Cayón L., Challinor A., Chamballu A., Chary R.-R., Chiang L.-Y., Christensen P. R., Clements D. L., Colombi S., Couchot F., Coulais A., Crill B. P., Cuttaia F., Danese L., Davies R. D., Davis R. J., de Bernardis P., de Gasperis G., de Rosa A., de Zotti G., Delabrouille J., Delouis J.-M., Désert F.-X., Dickinson C., Dobashi K., Donzelli S., Doré O., Dörl U., Douspis M., Dupac X., Efstathiou G., Enßlin T. A., Falgarone E., Finelli F., Forni O., Frailis M., Franceschi E., Galeotta S., Ganga K., Giard M., Giardino G., Giraud-Héraud Y., González-Nuevo J., Górski K. M., Gratton S., Gregorio A., Gruppuso A., Hansen F. K., Harrison D., Helou G., Henrot-Versillé S., Herranz D., Hildebrandt S. R., Hivon E., Hobson M., Holmes W. A., Hovest W., Hoyland R. J., Huffenberger K. M., Jaffe A. H., Joncas G., Jones W. C., Juvela M., Keihänen E., Keskitalo R., Kisner T. S., Kneissl R., Knox L., Kurki-Suonio H., Lagache G., Lamarre J.-M., Lasenby A., Laureijs R. J., Lawrence C. R., Leach S., Leonardi R., Leroy C., Linden-Voernle M., López-Caniego M., Lubin P. M., Macías-Pérez J. F., MacTavish C. J., Maffei B., Mandolesi N., Mann R., Maris M., Marshall D. J., Martin P., Martínez-González E., Marton G., Masi S., Matarrese S., Matthai F., Mazzotta P., McGehee P., Melchiorri A., Mendes L., Mennella A., Mitra S., Miville-Deschênes M.-A., Moneti A., Montier L., Morgante G., Mortlock D., Munshi D., Murphy A., Naselsky P., Nati F., Natoli P., Netterfield C. B., Noergaard-Nielsen H. U., Noviello F., Novikov D., Novikov I., Osborne S., Pajot F., Paladini R., Pasian F., Patanchon G., Pearson T. J., Pelkonen V.-M., Perdereau O., Perotto L., Perrotta F., Piacentini F., Piat M., Plaszczynski S., Pointecouteau E., Polenta G., Ponthieu N., Poutanen T., Prézeau G., Prunet S., Puget J.-L., Reach W. T., Rebolo R., Reinecke M., Renault C., Ricciardi S., Riller T., Ristorcelli I., Rocha G., Rosset C., Rowan-Robinson M., Rubiño-Martín J. A., Rusholme B., Sandri M., Santos D., Savini G., Scott D., Seiffert M. D., Smoot G. F., Starck J.-L., Stivoli F., Stolyarov V., Sudiwala R., Sygnet J.-F., Tauber J. A., Terenzi L., Toffolatti L., Tomasi M., Torre J.-P., Toth V., Tristram M., Tuovinen J., Umana G., Valenziano L., Vielva P., Villa F., Vittorio N., Wade L. A., Wandelt B. D., Ysard N., Yvon D., Zacchei A., Zahorecz S., Zonca A.; *Planck* early results. XXIII. The first all-sky survey of Galactic cold clumps; Astronomy and Astrophysics 536 A23 (2011)

151. *Planck* Collaboration, Ade P. A. R., Aghanim N., Arnaud M., Ashdown M., Aumont J., Baccigalupi C., Balbi A., Banday A. J., Barreiro R. B., Bartlett J. G., Battaner E., Benabed K., Benoît A., Bernard J.-P., Bersanelli M., Bhatia R.,

Bock J. J., Bonaldi A., Bond J. R., Borrill J., Bouchet F. R., Boulanger F., Bucher M., Burigana C., Cabella P., Cantalupo C. M., Cardoso J.-F., Catalano A., Cayón L., Challinor A., Chamballu A., Chiang L.-Y., Christensen P. R., Clements D. L., Colombi S., Couchot F., Coulais A., Crill B. P., Cuttaia F., Danese L., Davies R. D., de Bernardis P., de Gasperis G., de Rosa A., de Zotti G., Delabrouille J., Delouis J.-M., Désert F.-X., Dickinson C., Doi Y., Donzelli S., Doré O., Dörl U., Douspis M., Dupac X., Efstathiou G., Enßlin T. A., Falgarone E., Finelli F., Forni O., Frailis M., Franceschi E., Galeotta S., Ganga K., Giard M., Giardino G., Giraud-Héraud Y., González-Nuevo J., Górski K. M., Gratton S., Gregorio A., Gruppuso A., Hansen F. K., Harrison D., Helou G., Henrot-Versillé S., Herranz D., Hildebrandt S. R., Hivon E., Hobson M., Holmes W. A., Hovest W., Hoyland R. J., Huffenberger K. M., Ikeda N., Jaffe A. H., Jones W. C., Juvela M., Keihänen E., Keskitalo R., Kisner T. S., Kitamura Y., Kneissl R., Knox L., Kurki-Suonio H., Lagache G., Lamarre J.-M., Lasenby A., Laureijs R. J., Lawrence C. R., Leach S., Leonardi R., Leroy C., Linden-Voernle M., López-Caniego M., Lubin P. M., Macías-Pérez J. F., MacTavish C. J., Maffei B., Malinen J., Mandolesi N., Mann R., Maris M., Marshall D. J., Martin P., Martínez-González E., Masi S., Matarrese S., Matthai F., Mazzotta P., McGehee P., Melchiorri A., Mendes L., Mennella A., Meny C., Mitra S., Miville-Deschênes M.-A., Moneti A., Montier L., Morgante G., Mortlock D., Munshi D., Murphy A., Naselsky P., Nati F., Natoli P., Netterfield C. B., Noergaard-Nielsen H. U., Noviello F., Novikov D., Novikov I., Osborne S., Pagani L., Pajot F., Paladini R., Pasian F., Patanchon G., Pelkonen V.-M., Perdereau O., Perotto L., Perrotta F., Piacentini F., Piat M., Plaszczynski S., Pointecouteau E., Polenta G., Ponthieu N., Poutanen T., Prézeau G., Prunet S., Puget J.-L., Reach W. T., Rebolo R., Reinecke M., Renault C., Ricciardi S., Riller T., Ristorcelli I., Rocha G., Rosset C., Rowan-Robinson M., Rubiño-Martín J. A., Rusholme B., Sandri M., Santos D., Savini G., Scott D., Seiffert M. D., Smoot G. F., Starck J.-L., Stivoli F., Stolyarov V., Sudiwala R., Sygnet J.-F., Tauber J. A., Terenzi L., Toffolatti L., Tomasi M., Torre J.-P., Toth V., Tristram M., Tuovinen J., Umana G., Valenziano L., Vielva P., Villa F., Vittorio N., Wade L. A., Wandelt B. D., Ysard N., Yvon D., Zacchei A., Zonca A.; *Planck* early results. XXII. The submillimetre properties of a sample of Galactic cold clumps; Astronomy and Astrophysics 536 A22 (2011)

152. *Planck* Collaboration, Ade P. A. R., Aghanim N., Arnaud M., Ashdown M., Aumont J., Baccigalupi C., Balbi A., Banday A. J., Barreiro R. B., Bartlett J. G., Battaner E., Benabed K., Benoît A., Bernard J.-P., Bersanelli M., Bhatia R., Bock J. J., Bonaldi A., Bond J. R., Borrill J., Bouchet F. R., Boulanger F., Bucher M., Burigana C., Cabella P., Cappellini B., Cardoso J.-F., Casassus S., Catalano A., Cayón L., Challinor A., Chamballu A., Chary R.-R., Chen X., Chiang L.-Y., Chiang C., Christensen P. R., Clements D. L., Colombi S., Couchot F., Coulais A., Crill B. P., Cuttaia F., Danese L., Davies R. D., Davis R. J., de Bernardis P., de Gasperis G., de Rosa A., de Zotti G., Delabrouille J., Delouis J.-M., Dickinson C., Donzelli S., Doré O., Dörl U., Douspis M., Dupac X., Efstathiou G., Enßlin T. A., Eriksen H. K., Finelli F., Forni O., Frailis M., Franceschi E., Galeotta S., Ganga K., Génova-Santos R. T., Giard M., Giardino G., Giraud-Héraud Y., González-Nuevo J., Górski K. M., Gratton S., Gregorio A., Gruppuso A., Hansen F. K., Harrison D., Helou G., Henrot-Versillé S., Herranz D., Hildebrandt S. R., Hivon E., Hobson M., Holmes W. A., Hovest W., Hoyland R. J., Huffenberger K. M., Jaffe T. R., Jaffe A. H., Jones W. C., Juvela M., Keihänen E., Keskitalo R., Kisner T. S., Kneissl R., Knox L., Kurki-Suonio H., Lagache G., Lähteenmäki A., Lamarre J.-M., Lasenby A., Laureijs R. J., Lawrence C. R., Leach S., Leonardi R., Lilje P. B., Linden-Voernle M., López-Caniego M., Lubin P. M., Macías-Pérez J. F., MacTavish C. J., Maffei B., Maino D., Mandolesi N., Mann R., Maris M., Marshall D. J., Martínez-González E., Masi S., Matarrese S., Matthai F., Mazzotta P., McGehee P., Meinhold P. R., Melchiorri A., Mendes L., Mennella A., Mitra S., Miville-Deschênes M.-A., Moneti A., Montier L., Morgante G., Mortlock D., Munshi D., Murphy A., Naselsky P., Natoli P., Netterfield C. B., Noergaard-Nielsen H. U., Noviello F., Novikov D., Novikov I., O'Dwyer I. J., Osborne S., Pajot F., Paladini R., Partridge B., Pasian F., Patanchon G., Pearson T. J., Peel M., Perdereau O., Perotto L., Perrotta F., Piacentini F., Piat M., Plaszczynski S., Platania P., Pointecouteau E., Polenta G., Ponthieu N., Poutanen T., Prézeau G., Procopio P., Prunet S., Puget J.-L., Reach W. T., Rebolo R., Reich W., Reinecke M., Renault C., Ricciardi S., Riller T., Ristorcelli I., Rocha G., Rosset C., Rowan-Robinson M., Rubiño-Martín J. A., Rusholme B., Sandri M., Santos D., Savini G., Scott D., Seiffert M. D., Shellard P., Smoot G. F., Starck J.-L., Stivoli F., Stolyarov V., Stompor R., Sudiwala R., Sygnet J.-F., Tauber J. A., Terenzi L., Toffolatti L., Tomasi M., Torre J.-P., Tristram M., Tuovinen J., Umana G., Valenziano L., Varis J., Verstraete L., Vielva P., Villa F., Vittorio N., Wade L. A., Wandelt B. D., Watson R., Wilkinson A., Ysard N., Yvon D., Zacchei A., Zonca A.; *Planck* early results. XX. New light on anomalous microwave emission from spinning dust grains; Astronomy and Astrophysics 536 A20 (2011)

153. *Planck* Collaboration, Ade P. A. R., Aghanim N., Arnaud M., Ashdown M., Aumont J., Baccigalupi C., Balbi A., Banday A. J., Barreiro R. B., Bartlett J. G., Battaner E., Benabed K., Benoît A., Bernard J.-P., Bersanelli M., Bhatia R., Bock J. J., Bonaldi A., Bond J. R., Borrill J., Bouchet F. R., Boulanger F., Bucher M., Burigana C., Cabella P., Cardoso J.-F., Catalano A., Cayón L., Challinor A., Chamballu A., Chiang L.-Y., Chiang C., Christensen P. R., Clements D. L., Colombi S., Couchot F., Coulais A., Crill B. P., Cuttaia F., Dame T. M., Danese L., Davies R. D., Davis R. J., de Bernardis P., de Gasperis G., de Rosa A., de Zotti G., Delabrouille J., Delouis J.-M., Désert F.-X., Dickinson C., Dobashi K., Donzelli S., Doré O., Dörl U., Douspis M., Dupac X., Efstathiou G., Enßlin T. A., Eriksen H. K., Falgarone E., Finelli F., Forni O., Fosalba P., Frailis M., Franceschi E., Fukui Y., Galeotta S., Ganga K., Giard M., Giardino G., Giraud-Héraud Y., González-Nuevo J., Górski K. M., Gratton S., Gregorio A., Grenier I. A., Gruppuso A., Hansen F. K., Harrison D., Helou G., Henrot-Versillé S., Herranz D., Hildebrandt S. R., Hivon E., Hobson M., Holmes W. A., Hovest W., Hoyland R. J., Huffenberger K. M., Jaffe A. H., Jones W. C., Juvela M., Kawamura A., Keihänen E., Keskitalo R., Kisner T. S., Kneissl R., Knox L., Kurki-Suonio H., Lagache G., Lamarre J.-M., Lasenby A., Laureijs R. J., Lawrence C. R., Leach S., Leonardi R., Leroy C., Lilje P. B., Linden-Voernle M., López-Caniego M., Lubin P. M., Macías-Pérez J. F., MacTavish C. J., Maffei B., Maino D., Mandolesi N., Mann R., Maris M., Martin P., Martínez-González E., Masi S., Matarrese S., Matthai F., Mazzotta P., McGehee P., Meinhold P. R., Melchiorri A., Mendes L., Mennella A., Miville-Deschênes M.-A., Moneti A., Montier L., Morgante G., Mortlock D., Munshi D., Murphy A., Naselsky P., Natoli P., Netterfield C. B., Noergaard-Nielsen H. U., Noviello F., Novikov D., Novikov I., O'Dwyer I. J., Onishi T., Osborne S., Pajot F., Paladini R., Paradis D., Pasian F., Patanchon G., Perdereau O., Perotto L., Perrotta F., Piacentini F., Piat M., Plaszczynski S., Pointecouteau E., Polenta G., Ponthieu N., Poutanen T., Prézeau G., Prunet S., Puget J.-L., Reach W. T., Reinecke M., Renault C., Ricciardi S., Riller T., Ristorcelli I., Rocha G., Rosset C., Rowan-Robinson M., Rubiño-Martín J. A., Rusholme B., Sandri M., Santos D., Savini G., Scott D., Seiffert M. D., Shellard P., Smoot G. F., Starck J.-L., Stivoli F., Stolyarov V., Stompor R., Sudiwala R., Sygnet J.-F., Tauber J. A., Terenzi L., Toffolatti L., Tomasi M., Torre J.-P., Tristram M., Tuovinen J., Umana G., Valenziano L., Vielva P., Villa F., Vittorio N., Wade L. A., Wandelt B. D., Wilkinson A., Yvon D., Zacchei A., Zonca A.; *Planck* early results. XIX. All-sky temperature and dust optical depth from *Planck* and IRAS. Constraints on the "dark gas" in our Galaxy; Astronomy and Astrophysics 536 A19 (2011)

154. *Planck* Collaboration, Ade P. A. R., Aghanim N., Arnaud M., Ashdown M., Aumont J., Baccigalupi C., Balbi A., Banday

A. J., Barreiro R. B., Bartlett J. G., Battaner E., Benabed K., Benoît A., Bernard J.-P., Bersanelli M., Bhatia R., Blagrave K., Bock J. J., Bonaldi A., Bonavera L., Bond J. R., Borrill J., Bouchet F. R., Bucher M., Burigana C., Cabella P., Cardoso J.-F., Catalano A., Cayón L., Challinor A., Chamballu A., Chiang L.-Y., Chiang C., Christensen P. R., Clements D. L., Colombi S., Couchot F., Coulais A., Crill B. P., Cuttaia F., Danese L., Davies R. D., Davis R. J., de Bernardis P., de Gasperis G., de Rosa A., de Zotti G., Delabrouille J., Delouis J.-M., Désert F.-X., Dole H., Donzelli S., Doré O., Dörl U., Douspis M., Dupac X., Efstathiou G., Enßlin T. A., Eriksen H. K., Finelli F., Forni O., Fosalba P., Frailis M., Franceschi E., Galeotta S., Ganga K., Giard M., Giardino G., Giraud-Héraud Y., González-Nuevo J., Górski K. M., Grain J., Gratton S., Gregorio A., Gruppuso A., Hansen F. K., Harrison D., Helou G., Henrot-Versillé S., Herranz D., Hildebrandt S. R., Hivon E., Hobson M., Holmes W. A., Hovest W., Hoyland R. J., Huffenberger K. M., Jaffe A. H., Jones W. C., Juvela M., Keihänen E., Keskitalo R., Kisner T. S., Kneissl R., Knox L., Kurki-Suonio H., Lagache G., Lamarre J.-M., Lasenby A., Laureijs R. J., Lawrence C. R., Leach S., Leonardi R., Leroy C., Lilje P. B., Linden-Voernle M., Lockman F. J., López-Caniego M., Lubin P. M., Macías-Pérez J. F., MacTavish C. J., Maffei B., Maino D., Mandolesi N., Mann R., Maris M., Martin P., Martínez-González E., Masi S., Matarrese S., Matthai F., Mazzotta P., Melchiorri A., Mendes L., Mennella A., Mitra S., Miville-Deschênes M.-A., Moneti A., Montier L., Morgante G., Mortlock D., Munshi D., Murphy A., Naselsky P., Natoli P., Netterfield C. B., Noergaard-Nielsen H. U., Novikov D., Novikov I., O'Dwyer I. J., Oliver S., Osborne S., Pajot F., Pasian F., Patanchon G., Perdereau O., Perotto L., Perrotta F., Piacentini F., Piat M., Pinheiro Gonçalves D., Plaszczynski S., Pointecouteau E., Polenta G., Ponthieu N., Poutanen T., Prézeau G., Prunet S., Puget J.-L., Rachen J. P., Reach W. T., Reinecke M., Remazeilles M., Renault C., Ricciardi S., Riller T., Ristorcelli I., Rocha G., Rosset C., Rowan-Robinson M., Rubiño-Martín J. A., Rusholme B., Sandri M., Santos D., Savini G., Scott D., Seiffert M. D., Shellard P., Smoot G. F., Starck J.-L., Stivoli F., Stolyarov V., Stompor R., Sudiwala R., Sunyaev R., Sygnet J.-F., Tauber J. A., Terenzi L., Toffolatti L., Tomasi M., Torre J.-P., Tristram M., Tuovinen J., Umana G., Valenziano L., Vielva P., Villa F., Vittorio N., Wade L. A., Wandelt B. D., White M., Yvon D., Zacchei A., Zonca A.; *Planck* early results. XVIII. The power spectrum of cosmic infrared background anisotropies; Astronomy and Astrophysics 536 A18 (2011)

155. *Planck* Collaboration, Ade P. A. R., Aghanim N., Arnaud M., Ashdown M., Aumont J., Baccigalupi C., Balbi A., Banday A. J., Barreiro R. B., Bartlett J. G., Battaner E., Benabed K., Benoît A., Bernard J.-P., Bersanelli M., Bhatia R., Bock J. J., Bonaldi A., Bond J. R., Borrill J., Bot C., Bouchet F. R., Boulanger F., Bucher M., Burigana C., Cabella P., Cardoso J.-F., Catalano A., Cayón L., Challinor A., Chamballu A., Chiang L.-Y., Chiang C., Christensen P. R., Clements D. L., Colombi S., Couchot F., Coulais A., Crill B. P., Cuttaia F., Danese L., Davies R. D., Davis R. J., de Bernardis P., de Gasperis G., de Rosa A., de Zotti G., Delabrouille J., Delouis J.-M., Désert F.-X., Dickinson C., Dobashi K., Donzelli S., Doré O., Dörl U., Douspis M., Dupac X., Efstathiou G., Enßlin T. A., Finelli F., Forni O., Frailis M., Franceschi E., Fukui Y., Galeotta S., Ganga K., Giard M., Giardino G., Giraud-Héraud Y., González-Nuevo J., Górski K. M., Gratton S., Gregorio A., Gruppuso A., Harrison D., Helou G., Henrot-Versillé S., Herranz D., Hildebrandt S. R., Hivon E., Hobson M., Holmes W. A., Hovest W., Hoyland R. J., Huffenberger K. M., Jaffe A. H., Jones W. C., Juvela M., Kawamura A., Keihänen E., Keskitalo R., Kisner T. S., Kneissl R., Knox L., Kurki-Suonio H., Lagache G., Lähteenmäki A., Lamarre J.-M., Lasenby A., Laureijs R. J., Lawrence C. R., Leach S., Leonardi R., Leroy C., Linden-Voernle M., López-Caniego M., Lubin P. M., Macías-Pérez J. F., MacTavish C. J., Madden S., Maffei B., Mandolesi N., Mann R., Maris M., Martínez-González E., Masi S., Matarrese S., Matthai F., Mazzotta P., Meinhold P. R., Melchiorri A., Mendes L., Mennella A., Miville-Deschênes M.-A., Moneti A., Montier L., Morgante G., Mortlock D., Munshi D., Murphy A., Naselsky P., Nati F., Natoli P., Netterfield C. B., Noergaard-Nielsen H. U., Noviello F., Novikov D., Novikov I., Onishi T., Osborne S., Pajot F., Paladini R., Paradis D., Pasian F., Patanchon G., Perdereau O., Perotto L., Perrotta F., Piacentini F., Piat M., Plaszczynski S., Pointecouteau E., Polenta G., Ponthieu N., Poutanen T., Prézeau G., Prunet S., Puget J.-L., Reach W. T., Rebolo R., Reinecke M., Renault C., Ricciardi S., Riller T., Ristorcelli I., Rocha G., Rosset C., Rowan-Robinson M., Rubiño-Martín J. A., Rusholme B., Sandri M., Savini G., Scott D., Seiffert M. D., Smoot G. F., Starck J.-L., Stivoli F., Stolyarov V., Sudiwala R., Sygnet J.-F., Tauber J. A., Terenzi L., Toffolatti L., Tomasi M., Torre J.-P., Tristram M., Tuovinen J., Umana G., Valenziano L., Varis J., Vielva P., Villa F., Vittorio N., Wade L. A., Wandelt B. D., Wilkinson A., Ysard N., Yvon D., Zacchei A., Zonca A.; *Planck* early results. XVII. Origin of the submillimetre excess dust emission in the Magellanic Clouds; Astronomy and Astrophysics 536 A17 (2011)

156. *Planck* Collaboration, Ade P. A. R., Aghanim N., Arnaud M., Ashdown M., Aumont J., Baccigalupi C., Balbi A., Banday A. J., Barreiro R. B., Bartlett J. G., Battaner E., Benabed K., Benoît A., Bernard J.-P., Bersanelli M., Bhatia R., Bonaldi A., Bonavera L., Bond J. R., Borrill J., Bouchet F. R., Bucher M., Burigana C., Butler R. C., Cabella P., Cantalupo C. M., Cappellini B., Cardoso J.-F., Carvalho P., Catalano A., Cayón L., Challinor A., Chamballu A., Chary R.-R., Chen X., Chiang L.-Y., Chiang C., Christensen P. R., Clements D. L., Colombi S., Couchot F., Coulais A., Crill B. P., Cuttaia F., Danese L., Davis R. J., de Bernardis P., de Rosa A., de Zotti G., Delabrouille J., Delouis J.-M., Désert F.-X., Dickinson C., Diego J. M., Dolag K., Dole H., Donzelli S., Doré O., Dörl U., Douspis M., Dupac X., Efstathiou G., Enßlin T. A., Eriksen H. K., Finelli F., Forni O., Fosalba P., Frailis M., Franceschi E., Galeotta S., Ganga K., Giard M., Giraud-Héraud Y., González-Nuevo J., Górski K. M., Gratton S., Gregorio A., Gruppuso A., Haissinski J., Hansen F. K., Harrison D., Helou G., Henrot-Versillé S., Hernández-Monteagudo C., Herranz D., Hildebrandt S. R., Hivon E., Hobson M., Holmes W. A., Hornstrup A., Hovest W., Hoyland R. J., Huffenberger K. M., Huynh M., Jaffe A. H., Jones W. C., Juvela M., Keihänen E., Keskitalo R., Kisner T. S., Kneissl R., Knox L., Kurki-Suonio H., Lagache G., Lähteenmäki A., Lamarre J.-M., Lasenby A., Laureijs R. J., Lawrence C. R., Leach S., Leahy J. P., Leonardi R., León-Tavares J., Leroy C., Lilje P. B., Linden-Voernle M., López-Caniego M., Lubin P. M., Macías-Pérez J. F., MacTavish C. J., Maffei B., Maggio G., Maino D., Mandolesi N., Mann R., Maris M., Marleau F., Marshall D. J., Martínez-González E., Masi S., Massardi M., Matarrese S., Matthai F., Mazzotta P., McGehee P., Meinhold P. R., Melchiorri A., Melin J.-B., Mendes L., Mennella A., Mitra S., Miville-Deschênes M.-A., Moneti A., Montier L., Morgante G., Mortlock D., Munshi D., Murphy A., Naselsky P., Natoli P., Netterfield C. B., Noergaard-Nielsen H. U., Noviello F., Novikov D., Novikov I., O'Dwyer I. J., Osborne S., Pajot F., Paladini R., Partridge B., Pasian F., Patanchon G., Pearson T. J., Perdereau O., Perotto L., Perrotta F., Piacentini F., Piat M., Piffaretti R., Plaszczynski S., Platania P., Pointecouteau E., Polenta G., Ponthieu N., Poutanen T., Pratt G. W., Prézeau G., Prunet S., Puget J.-L., Rachen J. P., Reach W. T., Rebolo R., Reinecke M., Renault C., Ricciardi S., Riller T., Ristorcelli I., Rocha G., Rosset C., Rowan-Robinson M., Rubiño-Martín J. A., Rusholme B., Sajina A., Sandri M., Santos D., Savini G., Schaefer B. M., Scott D., Seiffert M. D., Shellard P., Smoot G. F., Starck J.-L., Stivoli F., Stolyarov V., Sudiwala R., Sunyaev R., Sygnet J.-F., Tauber J. A., Tavagnacco D., Terenzi L., Toffolatti L., Tomasi M., Torre J.-P., Tristram M., Tuovinen J., Türler M., Umana G., Valenziano L., Valiviita J., Varis J., Vielva P., Villa F., Vittorio N., Wade L. A., Wandelt B. D., White S. D. M.,

Wilkinson A., Yvon D., Zacchei A., Zonca A.; *Planck* early results. VII. The Early Release Compact Source Catalogue; Astronomy and Astrophysics 536 A7 (2011)

157. *Planck* Collaboration, Ade P. A. R., Aghanim N., Arnaud M., Ashdown M., Aumont J., Baccigalupi C., Baker M., Balbi A., Banday A. J., Barreiro R. B., Bartlett J. G., Battaner E., Benabed K., Bennett K., Benoît A., Bernard J.-P., Bersanelli M., Bhatia R., Bock J. J., Bonaldi A., Bond J. R., Borrill J., Bouchet F. R., Bradshaw T., Bremer M., Bucher M., Burigana C., Butler R. C., Cabella P., Cantalupo C. M., Cappellini B., Cardoso J.-F., Carr R., Casale M., Catalano A., Cayón L., Challinor A., Chamballu A., Charra J., Chary R.-R., Chiang L.-Y., Chiang C., Christensen P. R., Clements D. L., Colombi S., Couchot F., Coulais A., Crill B. P., Crone G., Crook M., Cuttaia F., Danese L., D'Arcangelo O., Davies R. D., Davis R. J., de Bernardis P., de Bruin J., de Gasperis G., de Rosa A., de Zotti G., Delabrouille J., Delouis J.-M., Désert F.-X., Dick J., Dickinson C., Dolag K., Dole H., Donzelli S., Doré O., Dörl U., Douspis M., Dupac X., Efstathiou G., Enßlin T. A., Eriksen H. K., Finelli F., Foley S., Forni O., Fosalba P., Frailis M., Franceschi E., Freschi M., Gaier T. C., Galeotta S., Gallegos J., Gandolfo B., Ganga K., Giard M., Giardino G., Gienger G., Giraud-Héraud Y., González J., González-Nuevo J., Górski K. M., Gratton S., Gregorio A., Gruppuso A., Guyot G., Haissinski J., Hansen F. K., Harrison D., Helou G., Henrot-Versillé S., Hernández-Monteagudo C., Herranz D., Hildebrandt S. R., Hivon E., Hobson M., Holmes W. A., Hornstrup A., Hovest W., Hoyland R. J., Huffenberger K. M., Jaffe A. H., Jagemann T., Jones W. C., Juillet J. J., Juvela M., Kangaslahti P., Keihänen E., Keskitalo R., Kisner T. S., Kneissl R., Knox L., Krassenburg M., Kurki-Suonio H., Lagache G., Lähteenmäki A., Lamarre J.-M., Lange A. E., Lasenby A., Laureijs R. J., Lawrence C. R., Leach S., Leahy J. P., Leonardi R., Leroy C., Lilje P. B., Linden-Voernle M., López-Caniego M., Lowe S., Lubin P. M., Macías-Pérez J. F., Maciaszek T., MacTavish C. J., Maffei B., Maino D., Mandolesi N., Mann R., Maris M., Martínez-González E., Masi S., Massardi M., Matarrese S., Matthai F., Mazzotta P., McDonald A., McGehee P., Meinhold P. R., Melchiorri A., Melin J.-B., Mendes L., Mennella A., Mevi C., Miniscalco R., Mitra S., Miville-Deschênes M.-A., Moneti A., Montier L., Morgante G., Morisset N., Mortlock D., Munshi D., Murphy A., Naselsky P., Natoli P., Netterfield C. B., Noergaard-Nielsen H. U., Noviello F., Novikov D., Novikov I., O'Dwyer I. J., Ortiz I., Osborne S., Osuna P., Oxborrow C. A., Pajot F., Paladini R., Partridge B., Pasian F., Passvogel T., Patanchon G., Pearson D., Pearson T. J., Perdereau O., Perotto L., Perrotta F., Piacentini F., Piat M., Pierpaoli E., Plaszczynski S., Platania P., Pointecouteau E., Polenta G., Ponthieu N., Popa L., Poutanen T., Prézeau G., Prunet S., Puget J.-L., Rachen J. P., Reach W. T., Rebolo R., Reinecke M., Reix J.-M., Renault C., Ricciardi S., Riller T., Ristorcelli I., Rocha G., Rosset C., Rowan-Robinson M., Rubiño-Martín J. A., Rusholme B., Salerno E., Sandri M., Santos D., Savini G., Schaefer B. M., Scott D., Seiffert M. D., Shellard P., Simonetto A., Smoot G. F., Sozzi C., Starck J.-L., Sternberg J., Stivoli F., Stolyarov V., Stompor R., Stringhetti L., Sudiwala R., Sunyaev R., Sygnet J.-F., Tapiador D., Tauber J. A., Tavagnacco D., Taylor D., Terenzi L., Texier D., Toffolatti L., Tomasi M., Torre J.-P., Tristram M., Tuovinen J., Türler M., Tuttlebee M., Umana G., Valenziano L., Valiviita J., Varis J., Vibert L., Vielva P., Villa F., Vittorio N., Wade L. A., Wandelt B. D., Watson C., White S. D. M., White M., Wilkinson A., Yvon D., Zacchei A., Zonca A.; *Planck* early results. I. The *Planck* mission; Astronomy and Astrophysics 536 A1 (2011)
158. Prantzos N., Boehm C., Bykov A. M., Diehl R., Ferrière K., Guessoum N., Jean P., Knoedlseder J., Marcowith A., Moskalenko I. V., Strong A., Weidenspointner G.; The 511 keV emission from positron annihilation in the Galaxy; Reviews of Modern Physics 83 1001 (2011)
159. Provornikova E. A., Izmodenov V. V., Lallement R.; Two-component model of the interaction of an interstellar cloud with surrounding hot plasma; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 415 3879 (2011)
160. Rangwala N., Maloney P. R., Glenn J., Wilson C. D., Rykala A., Isaak K., Baes M., Bendo G. J., Boselli A., Bradford C. M., Clements D. L., Cooray A., Fulton T., Imhof P., Kamenetzky J., Madden S. C., Mentuch E., Sacchi N., Sauvage M., Schirm M. R. P., Smith M. W. L., Spinoglio L., Wolfire M.; Observations of Arp 220 Using *Herschel*-SPIRE: An Unprecedented View of the Molecular Gas in an Extreme Star Formation Environment; The Astrophysical Journal 743 94 (2011)
161. Rapacioli M., Spiegelman F., Scemama A., Mirtschink A.; Modeling charge resonance in cationic molecular clusters: Combining dft tight binding with configuration interaction ; Journal Chemical Theory and Computation 7 44 (2011)
162. Roueff E., Herbst E.; Dissociative Recombination: building and destroying aspects in interstellar chemistry; Journal of Physics Conference Series 300 012028 (2011)
163. Russeil D., Pestalozzi M., Mottram J. C., Bontemps S., Anderson L. D., Zavagno A., Beltrán M. T., Bally J., Brand J., Brunt C., Cesaroni R., Joncas G., Marshall D., Martin P., Massi F., Molinari S., Moore T., Noriega-Crespo A., Olmi L., Thompson M. A., Wienen M., Wyrowski F.; Giving physical significance to the Hi-GAL data: determining the distance of cold dusty cores in the Milky Way; Astronomy and Astrophysics 526 A151 (2011)
164. Samdal, S. ; Moellendal, H. ; Guillemin, J.-C.; Microwave Spectrum and Conformational Composition of 2-Fluoroethylisocyanide; Journal of Physical Chemistry A 115 9192 (2011)
165. Schneider N., Bontemps S., Simon R., Ossenkopf V., Federrath C., Klessen R. S., Motte F., André P., Stutzki J., Brunt C.; The link between molecular cloud structure and turbulence; Astronomy and Astrophysics 529 A1 (2011)
166. Schwalm D., Shafir D., Novotny S., Buhr H., Altevogt S., Faure A., Grieser M., Harvey A. G., Heber O., Hoffmann J., Kreckel H., Lammich L., Motapon O., Nevo I., Pedersen H. B., Rubinstein H., Schneider I. F., Tennyson J., Waffeu Tamo F. O., Wolf A., Zajfman D.; Rotational Cooling of HD+ by Superelastic Collisions with Electrons; Journal of Physics Conference Series 300 012006 (2011)
167. Scribano Y., Akin-Ojo O., Faure A.; Note: Second virial coefficient of the water-hydrogen complex from an explicitly correlated potential energy surface; Journal of Chemical Physics 135 116101 (2011)
168. Seymour N., Symeonidis M., Page M. J., Amblard A., Arumugam V., Aussel H., Blain A., Bock J., Boselli A., Buat V., Castro-Rodríguez N., Cava A., Chanial P., Clements D. L., Conley A., Conversi L., Cooray A., Dowell C. D., Dwek E., Eales S., Elbaz D., Franceschini A., Glenn J., Solares E. A. G., Griffin M., Hatziminaoglou E., Ibar E., Isaak K., Ivison R. J., Lagache G., Levenson L., Lu N., Madden S., Maffei B., Mainetti G., Marchetti L., Nguyen H. T., O'Halloran B., Oliver S. J., Omont A., Panuzzo P., Papageorgiou A., Pearson C. P., Pérez-Fournon I., Pohlen M., Rawlings J. I., Rizzo D., Roseboom I. G., Rowan-Robinson M., Schulz B., Scott D., Shupe D. L., Smith A. J., Stevens J. A., Trichas M., Tugwell K. E., Vaccari M., Valtchanov I., Vigroux L., Wang L., Wright G., Xu C. K., Zemcov M.; HerMES: SPIRE emission from radio-selected active galactic nuclei; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 413 1777 (2011)
169. Simon A., Rapacioli M., Lanza M., Joalland B., Spiegelman F.; Molecular dynamics simulations on [FePAH]+π-complexes of astrophysical interest: anharmonic infrared spectroscopy; Physical Chemistry Chemical Physics (Incorporating Faraday Transactions) 13 3359 (2011)
170. Sloan G. C., Hony S., Smolders K., Decin L., Zijlstra A. A., Feast M. W., van Wyk F., van Loon J. T., Groenewegen M.

A. T., Sahai R.; The Identification of Probable SiS Emission at 13-14 μm in Spectra of Galactic S Stars; The Astrophysical Journal 729 121 (2011)
171. Steinacker J., Henning T., Bacmann A.; Radiative Transfer Modeling of Simulation and Observational Data; Computational Star Formation 270 433 (2011)
172. Talbi D., Wakelam V., Kida Team; KIDA : The new kinetic database for astrochemistry; Journal of Physics Conference Series 300 012029 (2011)
173. Tatulli E., Benisty M., Ménard F., Varnière P., Martin-Zaïdi C., Thi W.-F., Pinte C., Massi F., Weigelt G., Hofmann K.-H., Petrov R. G.; Constraining the structure of the planet-forming region in the disk of the Herbig Be star HD 100546; Astronomy and Astrophysics 531 A1 (2011)
174. Theule P., Borget F., Mispelaer F., Danger G., Duvernay F., Guillemin J. C., Chiavassa T.; Hydrogenation of solid hydrogen cyanide HCN and methanimine CH2NH at low temperature; Astronomy and Astrophysics 534 A64 (2011)
175. Theule P., Duvernay F., Ilmane A., Hasegawa T., Morata O., Coussan S., Danger G., Chiavassa T.; Kinetics of the OCN- and HOCN formation from the HNCO + H2O thermal reaction in interstellar ice analogs; Astronomy and Astrophysics 530 A96 (2011)
176. Thi W.-F., Ménard F., Meeus G., Martin-Zaïdi C., Woitke P., Tatulli E., Benisty M., Kamp I., Pascucci I., Pinte C., Grady C. A., Brittain S., White G. J., Howard C. D., Sandell G., Eiroa C.; Detection of CH+ emission from the disc around HD 100546; Astronomy and Astrophysics 530 L2 (2011)
177. Tobin J. J., Hartmann L., Chiang H.-F., Looney L. W., Bergin E. A., Chandler C. J., Masqué J. M., Maret S., Heitsch F.; Complex Structure in Class 0 Protostellar Envelopes. II. Kinematic Structure from Single-dish and Interferometric Molecular Line Mapping; The Astrophysical Journal 740 45 (2011)
178. Toboła R., Dumouchel F., Kłos J., Lique F.; Calculations of fine-structure resolved collisional rate coefficients for the NH(X3Σ-)-He system; Journal of Chemical Physics 134 024305 (2011)
179. Townsley L. K., Broos P. S., Chu Y.-H., Gagné M., Garmire G. P., Gruendl R. A., Hamaguchi K., Mac Low M.-M., Montmerle T., Nazé Y., Oey M. S., Park S., Petre R., Pittard J. M.; The Chandra Carina Complex Project: Deciphering the Enigma of Carina's Diffuse X-ray Emission; The Astrophysical Journal Supplement Series 194 15 (2011)
180. Townsley L. K., Broos P. S., Corcoran M. F., Feigelson E. D., Gagné M., Montmerle T., Oey M. S., Smith N., Garmire G. P., Getman K. V., Povich M. S., Remage Evans N., Nazé Y., Parkin E. R., Preibisch T., Wang J., Wolk S. J., Chu Y.-H., Cohen D. H., Gruendl R. A., Hamaguchi K., King R. R., Mac Low M.-M., McCaughrean M. J., Moffat A. F. J., Oskinova L. M., Pittard J. M., Stassun K. G., ud-Doula A., Walborn N. R., Waldron W. L., Churchwell E., Nichols J. S., Owocki S. P., Schulz N. S.; An Introduction to the Chandra Carina Complex Project; The Astrophysical Journal Supplement Series 194 1 (2011)
181. Vázquez-Semadeni E., Banerjee R., Gómez G. C., Hennebelle P., Duffin D., Klessen R. S.; Molecular cloud evolution - IV. Magnetic fields, ambipolar diffusion and the star formation efficiency; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 414 2511 (2011)
182. Vinogradoff V., Duvernay F., Danger G., Theulé P., Chiavassa T.; New insight into the formation of hexamethylenetetramine (HMT) in interstellar and cometary ice analogs; Astronomy and Astrophysics 530 A128 (2011)
183. Wakelam V., Hersant F., Herpin F.; Sulfur chemistry: 1D modeling in massive dense cores; Astronomy and Astrophysics 529 A112 (2011)
184. Wang S., Bergin E. A., Crockett N. R., Goldsmith P. F., Lis D. C., Pearson J. C., Schilke P., Bell T. A., Comito C., Blake G. A., Caux E., Ceccarelli C., Cernicharo J., Daniel F., Dubernet M.-L., Emprechtinger M., Encrenaz P., Gerin M., Giesen T. F., Goicoechea J. R., Gupta H., Herbst E., Joblin C., Johnstone D., Langer W. D., Latter W. B., Lord S. D., Maret S., Martin P. G., Melnick G. J., Menten K. M., Morris P., Müller H. S. P., Murphy J. A., Neufeld D. A., Ossenkopf V., Pérault M., Phillips T. G., Plume R., Qin S.-L., Schlemmer S., Stutzki J., Trappe N., van der Tak F. F. S., Vastel C., Yorke H. W., Yu S., Zmuidzinas J.; *Herschel* observations of EXtra-Ordinary Sources (HEXOS): Methanol as a probe of physical conditions in Orion KL; Astronomy and Astrophysics 527 A95 (2011)
185. Welsh B. Y., Wheatley J., Lallement R.; Multiphase High-Velocity Gas Detected within 7 kpc Toward the M13 Globular Cluster; Publications of the Astronomical Society of the Pacific 123 914 (2011)
186. Wiesenfeld L., Scifoni E., Faure A., Roueff E.; Collisional excitation of doubly deuterated ammonia ND2H by para-H2; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 413 509 (2011)
187. Wiesenfeld L., Scribano Y., Faure A.; Rotational quenching of monodeuterated water by hydrogen molecules; Physical Chemistry Chemical Physics (Incorporating Faraday Transactions) 13 8230 (2011)
188. Woitke P., Riaz B., Duchêne G., Pascucci I., Lyo A.-R., Dent W. R. F., Phillips N., Thi W.-F., Ménard F., Herczeg G. J., Bergin E., Brown A., Mora A., Kamp I., Aresu G., Brittain S., de Gregorio-Monsalvo I., Sandell G.; The unusual protoplanetary disk around the T Tauri star ET Chamaeleontis; Astronomy and Astrophysics 534 A44 (2011)
189. Woods P. M., Oliveira J. M., Kemper F., van Loon J. T., Sargent B. A., Matsuura M., Szczerba R., Volk K., Zijlstra A. A., Sloan G. C., Lagadec E., McDonald I., Jones O., Gorjian V., Kraemer K. E., Gielen C., Meixner M., Blum R. D., Sewiło M., Riebel D., Shiao B., Chen C.-H. R., Boyer M. L., Indebetouw R., Antoniou V., Bernard J.-P., Cohen M., Dijkstra C., Galametz M., Galliano F., Gordon K. D., Harris J., Hony S., Hora J. L., Kawamura A., Lawton B., Leisenring J. M., Madden S., Marengo M., McGuire C., Mulia A. J., O'Halloran B., Olsen K., Paladini R., Paradis D., Reach W. T., Rubin D., Sandstrom K., Soszyński I., Speck A. K., Srinivasan S., Tielens A. G. G. M., van Aarle E., van Dyk S. D., van Winckel H., Vijh U. P., Whitney B., Wilkins A. N.; The SAGE-Spec Spitzer Legacy programme: the life-cycle of dust and gas in the Large Magellanic Cloud - Point source classification I; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 411 1597 (2011)
190. Young E. D., Gounelle M., Smith R. L., Morris M. R., Pontoppidan K. M.; Astronomical Oxygen Isotopic Evidence for Supernova Enrichment of the Solar System Birth Environment by Propagating Star Formation; The Astrophysical Journal 729 43 (2011)
191. Zins EL., Joshi P., Krim L.; Production and isolation of OH radicals in water ice; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 415 4 3107(2011)
192. Zins EL., Joshi P., Krim L.; Reactivity between a CO-containing ice and non-energetic OH radicals; Astrophysical Journal 738 2 175 (2011)

2012

1. Agundez M., Fonfria J. P., Cernicharo J., Kahane C., Daniel F., Guélin M.; Molecular abundances in the inner layers of IRC +10216; Astronomy and Astrophysics 543 A48 (2012)
2. Alekseev E. A., Motiyenko R. A., Margulès L.; - and Submillimeter-Wave Spectrometers on the Basis of Direct Digital Frequency Synthesizers; Radio Physics and Radio Astronomy 3 75 (2012)
3. Anderson L. D., Zavagno A., Barlow M. J., García-Lario P., Noriega-Crespo A.; Distinguishing between HII regions and planetary nebulae with Hi-GAL, WISE, MIPSGAL, and GLIMPSE; Astronomy and Astrophysics 537 A1 (2012)
4. Bacmann A., Taquet V., Faure A., Kahane C., Ceccarelli C.; Detection of complex organic molecules in a prestellar core: a new challenge for astrochemical models; Astronomy and Astrophysics 541 L12 (2012)
5. Bailleux S., Martin-Drumel M. A., Margulès L., Pirali O., Wlodarczak G., Roy P., Roueff E., Gerin M., Faure A., Hily-Blant P.; High-resolution terahertz spectroscopy of the 15NH radical (widetilde{X 3}Σ-); Astronomy and Astrophysics 538 A135 (2012)
6. Belyaev A. K., Barklem P. S., Spielfiedel A., Guitou M., Feautrier N., Rodionov D. S., Vlasov D. V.; Cross sections for low-energy inelastic Mg + H and Mg+ + H- collisions; Physical Review A 85 032704 (2012)
7. Ben Abdallah D., Najar F., Jaidane N., Dumouchel F., Lique F.; Hyperfine excitation of HCN by H2 at low temperature; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 419 2441 (2012)
8. Ben Houria A., Yazidi O., Jaidane N., Senent M. L., Hochlaf M.; Electronic structure of the [MgO3]+ cation; Journal of Chemical Physics 136 024316 (2012)
9. Ben Messaouda M., Abderrabba M., Mahjoub A., Chambaud G., Hochlaf M.; Theoretical study of the spectroscopy of methyl substituted 2-Pyridones, tautomers and ions; Comp. Theo. Chem., (2012). In press.
10. Bendo G. J., Boselli A., Dariush A., Pohlen M., Roussel H., Sauvage M., Smith M. W. L., Wilson C. D., Baes M., Cooray A., Clements D. L., Cortese L., Foyle K., Galametz M., Gomez H. L., Lebouteiller V., Lu N., Madden S. C., Mentuch E., O'Halloran B., Page M. J., Remy A., Schulz B., Spinoglio L.; Investigations of dust heating in M81, M83 and NGC 2403 with the *Herschel* Space Observatory; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 419 1833 (2012)
11. Bernard-Salas J., Habart E., Arab H., Abergel A., Dartois E., Martin P., Bontemps S., Joblin C., White G. J., Bernard J.-P., Naylor D.; Spatial variation of the cooling lines in the Orion Bar from *Herschel*/PACS; Astronomy and Astrophysics 538 A37 (2012)
12. Bertin M., Fayolle E. C., Romanzin C., Öberg K. I., Michaut X., Moudens A., Philippe L., Jeseck P., Linnartz H., Fillion J. H. ; UV photodesorption of interstellar CO ice analogues: from subsurface excitation to surface desorption ; in press in Phys. Chem. Chem. Phys. (2012)
13. Blitz M. A., Talbi D., Seakins P. W., Smith I. W. M.; Rate Constants and Branching Ratios for the Reaction of CH Radicals with NH_3: A Combined Experimental and Theoretical Study; Journal of physical chemistry A, in press
14. Borget F., Danger G., Duvernay F., Chomat M., Vinogradoff V., Theulé P., Chiavassa T. ; Aminoacetonitrile characterization in astrophysical like conditions ; Astronomy and Astrophysics 541, A114 (2012)
15. Boselli A., Ciesla L., Cortese L., Buat V., Boquien M., Bendo G. J., Boissier S., Eales S., Gavazzi G., Hughes T. M., Pohlen M., Smith M. W. L., Baes M., Bianchi S., Clements D. L., Cooray A., Davies J., Gear W., Madden S., Magrini L., Panuzzo P., Remy A., Spinoglio L., Zibetti S.; Far-infrared colours of nearby late-type galaxies in the *Herschel* Reference Survey; Astronomy and Astrophysics 540 A54 (2012)
16. Bossa J.B., Borget F., Duvernay F., Danger G., Theulé P., Chiavassa T. ; Solid-State Methylamine VUV Irradiation Study Using Carbon Monoxide as an H Radical ; Australian Journal of Chemistry, 65 (2012) 129-137.
17. Bouchez A., Margulès L., Motiyenko R. A., Guillemin J.-C., Walters A., Bottinelli S., Ceccarelli C., Kahane C.; The submillimeter spectrum of deuterated glycolaldehydes; Astronomy and Astrophysics 540 A51 (2012)
18. Bouchez A., Walters A., Müller H.S.P., Ordu M., Lewen F., Koerber M., Bottinelli S., Endres C.P., Schlemmer S.; Millimetre-wave spectrum of anti- 13C1 and 13C2 isotopologues of éthanol ; J. Quant. Spectrosc. Radiat. 113 1148-1154 (2012)
19. Cacciani P., Cosleou J., Khelkhal M. ; Nuclear spin conversion in H_2O; Physical Review A **85**, 012521 (2012)
20. Cacciani P., Cermak P., Cosleou J., Khelkhal M., Jeseck P., Michaut X.; New progress in spectroscopy of ammonia in the infrared 1.5µm range using evolution of spectra from 296K down to 120 K. ; in press in Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer (2012)
21. Calvo F., Parneix P. ; Amplification of Anharmonicities in Multiphoton Vibrational Action Spectra ; ChemPhysChem 13 212 (2012)
22. Chaabouni H., Bergeron H., Baouche S., Dulieu F., Matar E., Congiu E., Gavilan L., Lemaire J. L.; Sticking coefficient of hydrogen and deuterium on silicates under interstellar conditions; Astronomy and Astrophysics 538 A128 (2012)
23. Chapillon E., Guilloteau S., Dutrey A., Piétu V., Guélin M.; Chemistry in disks. VI. CN and HCN in protoplanetary disks; Astronomy and Astrophysics 537 A60 (2012)
24. Chrostowska, A.; Matrane, A.; Maki, D.; Khayar, S.; Ushiki, H.; Graciaa, A.; Belachemi, L.; Guillemin, J.-C.; Are Unsaturated Isocyanides so Different from the Corresponding Nitriles?; ChemPhysChem. 13, 226 (2012)
25. Codella C., Ceccarelli C., Bottinelli S., Salez M., Viti S., Lefloch B., Cabrit S., Caux E., Faure A., Vasta M., Wiesenfeld L.; First Detection of Hydrogen Chloride Toward Protostellar Shocks; The Astrophysical Journal 744 164 (2012)
26. Congiu E., Fedoseev G., Ioppolo S., Dulieu F., Chaabouni H., Baouche S., Lemaire J. L., Laffon C., Parent P., Lamberts T., Cuppen H. M., Linnartz H.; No Ice Hydrogenation: A Solid Pathway to NH2OH Formation in Space; The Astrophysical Journal 750 L12 (2012)
27. Cortese L., Ciesla L., Boselli A., Bianchi S., Gomez H., Smith M. W. L., Bendo G. J., Eales S., Pohlen M., Baes M., Corbelli E., Davies J. I., Hughes T. M., Hunt L. K., Madden S. C., Pierini D., di Serego Alighieri S., Zibetti S., Boquien M., Clements D. L., Cooray A., Galametz M., Magrini L., Pappalardo C., Spinoglio L., Vlahakis C.; The dust scaling relations of the *Herschel* Reference Survey; Astronomy and Astrophysics 540 A52 (2012)
28. Coudert, L. H. ; Margulès, L.; Huet, T. R. ; Motiyenko, R. A. ; Moellendal, H. ; Guillemin, J.-C. The submillimeterwave spectrum of the doubly deuterated species of methyl formate $HCOOCD_2H$; Astronomy & Astrophysics, forthcoming article (on Line) (2012)
29. Coutens A., Vastel C., Caux E., Ceccarelli C., Bottinelli S., Wiesenfeld L., Faure A., Scribano Y., Kahane C.; A study of deuterated water in the low-mass protostar IRAS 16293-2422; Astronomy and Astrophysics 539 A132 (2012)
30. Daniel F., Agundez M., Cernicharo J., De Beck E., Lombaert R., Decin L., Kahane C., Guélin M., Muller H. S. P.; *Herschel*/HIFI observation of highly excited rotational lines of HNC toward IRC +10 216; Astronomy and Astrophysics

542 A37 (2012)
31. Daranlot J., Hincelin U., Bergeat A., Costes M.; Loison J.-C., Wakelam V., Hickson K. M. Elemental nitrogen partitioning in dense interstellar clouds; Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 2012 in press
32. Davies J. I., Bianchi S., Cortese L., Auld R., Baes M., Bendo G. J., Boselli A., Ciesla L., Clemens M., Corbelli E., de Looze I., Alighieri S. D. S., Fritz J., Gavazzi G., Pappalardo C., Grossi M., Hunt L. K., Madden S., Magrini L., Pohlen M., Smith M. W. L., Verstappen J., Vlahakis C.; The *Herschel* Virgo Cluster Survey - VIII. The Bright Galaxy Sample; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 419 3505 (2012)
33. De Beck E., Lombaert R., Agúndez M., Daniel F., Decin L., Cernicharo J., Müller H. S. P., Min M., Royer P., Vandenbussche B., de Koter A., Waters L. B. F. M., Groenewegen M. A. T., Barlow M. J., Guélin M., Kahane C., Pearson J. C., Encrenaz P., Szczerba R., Schmidt M. R.; On the physical structure of IRC +10216. Ground-based and *Herschel* observations of CO and C2H; Astronomy and Astrophysics 539 A108 (2012)
34. De Luca M., Gupta H., Neufeld D., Gerin M., Teyssier D., Drouin B. J., Pearson J. C., Lis D. C., Monje R., Phillips T. G., Goicoechea J. R., Godard B., Falgarone E., Coutens A., Bell T. A.; *Herschel*/HIFI Discovery of HCl+ in the Interstellar Medium; The Astrophysical Journal 751 L37 (2012)
35. Dhouib A., Abderrabba M., Essalah K., Brites V., Hochlaf M.; DFT and *Ab Initio* Calculations of Spectroscopic Properties of Tetramethyltin and of its Cation; Int. J. Quant. Chem. **112**, 2032 (2012).
36. Dislaire V., Hily-Blant P., Faure A., Maret S., Bacmann A., Pineau Des Forêts G.; Nitrogen hydrides and the H2 ortho-to-para ratio in dark clouds; Astronomy and Astrophysics 537 A20 (2012)
37. Eidelsberg M., Lemaire J.L., Federman S.R., Stark G., Heays A. N., Sheffer Y., Gavilan. L., Fillion J.-H., Rostas F., Lyons J. R., Smith P. L., de Oliveira N., Joyeux D., Roudjane M., Nahon L.; High-resolution study of oscillator strengths and predissociation rates for 12C16O: W-X bands and Rydberg complexes between 92.9 and 93.4 nm ; Astronomy & Astrophysics 543 A69 (2012)
38. Faure A., Wiesenfeld L., Scribano Y., Ceccarelli C.; Rotational excitation of mono- and doubly-deuterated water by hydrogen molecules; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 420 699 (2012)
39. Ferrière K.; Interstellar gas within ~10 pc of Sagittarius A∗; Astronomy and Astrophysics 540 A50 (2012)
40. Foyle K., Wilson C. D., Mentuch E., Bendo G., Dariush A., Parkin T., Pohlen M., Sauvage M., Smith M. W. L., Roussel H., Baes M., Boquien M., Boselli A., Clements D. L., Cooray A., Davies J. I., Eales S. A., Madden S., Page M. J., Spinoglio L.; The dust and gas properties of M83; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 421 2917 (2012)
41. France K., Burgh E. B., Herczeg G. J., Schindhelm E., Yang H., Abgrall H., Roueff E., Brown A., Brown J. M., Linsky J. L.; CO and H2 Absorption in the AA Tauri Circumstellar Disk; The Astrophysical Journal 744 22 (2012)
42. Gavilan L., Lemaire J. L., Vidali G.; Formation of deuterium molecules in the cold interstellar medium: An experimental view ; ScienceJet C (2012) in press
43. Gavilan L., Lemaire, J. L., Vidali G.; Are molecule-covered dust grains efficient catalysts of H2 formation in the cold ISM?; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (2012) in press
44. Giannini T., Elia D., Lorenzetti D., Molinari S., Motte F., Schisano E., Pezzuto S., Pestalozzi M., di Giorgio A. M., André P., Hill T., Benedettini M., Bontemps S., di Francesco J., Fallscheer C., Hennemann M., Kirk J., Minier V., Nguyn Lu'O'Ng Q., Polychroni D., Rygl K. L. J., Saraceno P., Schneider N., Spinoglio L., Testi L., Ward-Thompson D., White G. J.; The *Herschel* view of the on-going star formation in the Vela-C molecular cloud; Astronomy and Astrophysics 539 A156 (2012)
45. Godard B., Falgarone E., Gerin M., Lis D. C., De Luca M., Black J. H., Goicoechea J. R., Cernicharo J., Neufeld D. A., Menten K. M., Emprechtinger M.; Comparative study of CH+ and SH+ absorption lines observed towards distant star-forming regions; Astronomy and Astrophysics 540 A87 (2012)
46. Godard M., Geballe T. R., Dartois E., Muñoz Caro G. M.; The deep 3.4 μm interstellar absorption feature toward the <ASTROBJ>IRAS 18511+0146</ASTROBJ> cluster; Astronomy and Astrophysics 537 A27 (2012)
47. Guillard P., Boulanger F., Pineau des Forêts G., Falgarone E., Gusdorf A., Cluver M. E., Appleton P. N., Lisenfeld U., Duc P.-A., Ogle P. M., Xu C. K.; Turbulent Molecular Gas and Star Formation in the Shocked Intergalactic Medium of Stephan's Quintet; The Astrophysical Journal 749 158 (2012)
48. Harvey P. M., Henning T., Ménard F., Wolf S., Liu Y., Cieza L. A., Evans N. J., Pascucci I., Merín B., Pinte C.; A *Herschel* Search for Cold Dust in Brown Dwarf Disks: First Results; The Astrophysical Journal 744 L1 (2012)
49. Hébrard E., Dobrijevic M., Loison J. C., Bergeat A., Hickson K. M., Neutral production of hydrogen isocyanide (HNC) and hydrogen cyanide (HCN) in Titan's upper atmosphere, A&A, 541 (2012) A21
50. Herberth D., Baum O., Pirali O., Roy P., Thorwirth S., Yamada K. M. T., Schlemmer S., & Giesen T. F.; Far infrared Fourier-transform spectroscopy of mono-deuterated hydrogen peroxide HOOD ; Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 113 1127 (2012)
51. Herrera C. N., Boulanger F., Nesvadba N. P. H., Falgarone E.; ALMA CO and VLT/SINFONI H2 observations of the Antennae overlap region: mass and energy dissipation; Astronomy and Astrophysics 538 L9 (2012)
52. Honvault P., Jorfi M., González-Lezana T., Faure A., Pagani L.; Erratum: Ortho-Para H2 Conversion by Proton Exchange at Low Temperature: An Accurate Quantum Mechanical Study [Phys. Rev. Lett. 107, 023201 (2011)]; Physical Review Letters 108 109903 (2012)
53. Joshi P., Zins EL., Krim L.; The NO and non-energetic OH radical reactivity: characterization and reaction scheme; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 419 2 1713 (2012)
54. Kalugina Y., Lique F., Kłos J.; Hyperfine collisional rate coefficients of CN with H2(j= 0); Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 422 812 (2012)
55. Kashinski D. O., Talbi D., Hickman A. P.; Ab initio calculations of autoionizing states using block diagonalization: Collinear diabatic states for dissociative recombination of electrons with NH; Chemical Physics Letters 529 10 (2012)
56. Khadri F., Hochlaf M.; Theoretical calculations on the NaS and NaS^+ radicals: Electronic structure, spectroscopy and spin-orbit couplings; European J. Phys. D, (2012) in press
57. Le Bertre T., Matthews L.D., Gérard E., Libert Y., 2012, Discovery of a detached HI gas shell surrounding alpha Orionis, Monthly Notices Roy. Astron. Soc., 422 3433 (2012)
58. Le Bourlot J., Le Petit F., Pinto C., Roueff E., Roy F.; Surface chemistry in the interstellar medium. I. H2 formation by Langmuir-Hinshelwood and Eley-Rideal mechanisms; Astronomy and Astrophysics 541 A76 (2012)
59. Levrier F., Le Petit F., Hennebelle P., Lesaffre P., Gerin M., Falgarone E.; UV-driven chemistry in simulations of the interstellar medium. I. Post-processed chemistry with the Meudon PDR code; Astronomy and Astrophysics 544 A22

(2012)
60. Linguerri R., Komiha N., Hochlaf M.; Solvation effects and stabilization of multicharged ions: a case study of ArmBeOq+ complexes; Physical Chemistry Chemical Physics (Incorporating Faraday Transactions) 14 4236 (2012)
61. Lique F., Alexander M. H.; Spin-orbit quenching of Cl(2P1/2) by H2; Journal of Chemical Physics 136 124312 (2012)
62. Lique F., Faure A.; Communication: The rotational excitation of D2 by H: On the importance of the reactive channels; Journal of Chemical Physics 136 031101 (2012)
63. Liseau R., Goldsmith P. F., Larsson B., Pagani L., Bergman P., Le Bourlot J., Bell T. A., Benz A. O., Bergin E. A., Bjerkeli P., Black J. H., Bruderer S., Caselli P., Caux E., Chen J.-H., de Luca M., Encrenaz P., Falgarone E., Gerin M., Goicoechea J. R., Hjalmarson Å., Hollenbach D. J., Justtanont K., Kaufman M. J., Le Petit F., Li D., Lis D. C., Melnick G. J., Nagy Z., Olofsson A. O. H., Olofsson G., Roueff E., Sandqvist A., Snell R. L., van der Tak F. F. S., van Dishoeck E. F., Vastel C., Viti S., Yıldız U. A.; Multi-line detection of O2 toward ρ Ophuichi A; Astronomy and Astrophysics 541 A73 (2012)
64. Loison J.-C., Halvick P., Bergeat A., Hickson K. M., Wakelam V.; Review of OCS gas-phase reactions in dark cloud chemical models; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 421 1476 (2012)
65. Moellendal H., Margulès L., Belloche A., Motiyenko R. A., Konovalov A., Menten K. M., Guillemin J. C.; Rotational spectrum of a chiral amino acid precursor, 2-aminopropionitrile, and searches for it in Sagittarius B2(N); Astronomy and Astrophysics 538 A51 (2012)
66. Mathews G. S., Williams J. P., Ménard F., Phillips N., Duchêne G., Pinte C.; The Late Stages of Protoplanetary Disk Evolution: A Millimeter Survey of Upper Scorpius; The Astrophysical Journal 745 23 (2012)
67. Maury A., Ohashi N., André P.; Subarcsecond SMA observations of the prototype Class 0 object VLA1623 at 1.3 mm: a single protostar with a structured outflow cavity?; Astronomy and Astrophysics 539 A130 (2012)
68. Melnick G. J., Tolls V., Goldsmith P. F., Kaufman M. J., Hollenbach D. J., Black J. H., Encrenaz P., Falgarone E., Gerin M., Hjalmarson A;., Li D., Lis D. C., Liseau R., Neufeld D. A., Pagani L., Snell R. L., van der Tak F., van Dishoeck E. F.; *Herschel* Search for O2 toward the Orion Bar; The Astrophysical Journal 752 26 (2012)
69. Mezei J. Z., Schneider I. F., Roueff E., Jungen C.; Resonances in photoionization: Cross sections for vibrationally excited H2; Physical Review A 85 043411 (2012)
70. Mispelaer F., Theule P., Duvernay F., Roubin P., Chiavassa T.; Kinetics of OCN- formation from the HNCO + NH3 solid-state thermal reaction; Astronomy and Astrophysics 540 A40 (2012)
71. Moellendal, H. ; Margulès, L. ; Motiyenko, R. A. ; Larsen, N. W. ; Guillemin, J.-C. Composition of Cyanoacetaldehyde, a Compound of Potential Prebiotic and Astrochemical Interest ; Journal of Physical Chemistry A 116 4047 (2012)
72. Motiyenko, R. A.; Margulès, L.; Guillemin, J.-C.; The submillimeter-wave spectrum of diisocyanomethane, Astronomy & Astrophysics, in press (2012)
73. Neufeld D. A., Roueff E., Snell R. L., Lis D., Benz A. O., Bruderer S., Black J. H., De Luca M., Gerin M., Goldsmith P. F., Gupta H., Indriolo N., Le Bourlot J., Le Petit F., Larsson B., Melnick G. J., Menten K. M., Monje R., Nagy Z., Phillips T. G., Sandqvist A., Sonnentrucker P., van der Tak F., Wolfire M. G.; *Herschel* Observations of Interstellar Chloronium; The Astrophysical Journal 748 37 (2012)
74. Neufeld D. A., Falgarone E., Gerin M., Godard B., Herbst E., Pineau des Forêts G., Vasyunin A. I., Güsten R., Wiesemeyer H., Ricken O.; Discovery of interstellar mercapto radicals (SH) with the GREAT instrument on SOFIA; Astronomy and Astrophysics 542 L6 (2012)
75. Nissen H. D., Cunningham N. J., Gustafsson M., Bally J., Lemaire J.-L., Favre C., Field D.; A 3D view of the outflow in the Orion Molecular Cloud 1 (OMC-1); Astronomy and Astrophysics 540 A119 (2012)
76. Noble J. A., Congiu E., Dulieu F., Fraser H. J.; Thermal desorption characteristics of CO, O2 and CO2 on non-porous water, crystalline water and silicate surfaces at submonolayer and multilayer coverages; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 421 768 (2012)
77. Ordu M., Müller H.S.P., Walters A., Nuñez M., Lewen F., Belloche A., Menten K.M., Schlemmer S.; The quest for complex molecules in space: Laboratory spectroscopy of n-butyl cyanide, n-C4H9CN, in the millimeter wave region and astronomical search in Sagittarius B2(N) ; Astron. Astrophys 541 A121 (2012)
78. Pagani L., Lefèvre C., Bacmann A., Steinacker J.; Absence of coreshine in the Gum/Vela region; Astronomy and Astrophysics 541 A154 (2012)
79. Parneix P., Basire M., Calvo F. ; Time-resolved infrared emission spectra of naphthalene under gas phase laboratory and astrophysical conditions ; Computational and Theoretical Chemistry 990 112 (2012)
80. Parkin T. J., Wilson C. D., Foyle K., Baes M., Bendo G. J., Boselli A., Boquien M., Cooray A., Cormier D., Davies J. I., Eales S. A., Galametz M., Gomez H. L., Lebouteiller V., Madden S., Mentuch E., Page M. J., Pohlen M., Remy A., Roussel H., Sauvage M., Smith M. W. L., Spinoglio L.; The gas-to-dust mass ratio of Centaurus A as seen by *Herschel*; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2730 (2012)
81. Peretto, N.; André, P.; Könyves, V.; Schneider, N.; Arzoumanian, D.; Palmeirim, P.; Didelon, P.; Attard, M.; Bernard, J. P.; Di Francesco, J.; Elia, D.; Hennemann, M.; Hill, T.; Kirk, J.; Men'shchikov, A.; Motte, F.; Nguyen Luong, Q.; Roussel, H.; Sousbie, T.; Testi, L.; Ward-Thompson, D.; White, G. J.; Zavagno, A.; The Pipe Nebula as seen with *Herschel*: formation of filamentary structures by large-scale compression?; Astronomy and Astrophysics, 541, A63 (2012)
82. Pilleri P., Montillaud J.,Evaporating Very Small Grains as tracers of the UV radiation field in Photo-dissociation Regions, Astronomy and Astrophysics 542 id.A69 (2012)
83. Pilleri P., Fuente A., Cernicharo J., Ossenkopf V., Berné; O., Gerin M., Pety J., Goicoechea J. R., Rizzo J. R., Montillaud J., González-García M., Joblin C., Le Bourlot J., Le Petit F., Kramer C.; *Herschel* / HIFI observations of CO, H2O and NH3 in Mon R2; ArXiv e-prints arXiv:1206.1249 (2012)
84. Pirali O., Boudon V., Oomens J., Vervloet M.; Rotationally resolved infrared spectroscopy of adamantane; Journal of Chemical Physics 136 024310 (2012)
85. Plume R., Bergin E. A., Phillips T. G., Lis D. C., Wang S., Crockett N. R., Caux E., Comito C., Goldsmith P. F., Schilke P.; A Direct Measurement of the Total Gas Column Density in Orion KL; The Astrophysical Journal 744 28 (2012)
86. Rapacioli M., Simon A., Dontot L., Spiegelman F.; Extensions of DFTB to investigate molecular complexes and clusters; Physica Status Solidi B Basic Research 249 245 (2012)
87. Richard, C.; Margulès, L.; Motiyenko, R. A.; Guillemin, J.-C.; New analysis of the rotational spectrum of the three mono-^{13}C ethyl cyanides (^{13}C–CH$_3$CH$_2$CN) up to 1 THz; Astronomy & Astrophysics in press (2012)
88. Rimmer P. B., Herbst E., Morata O., Roueff E.; Observing a column-dependent ζ in dense interstellar sources: the case of the Horsehead nebula; Astronomy and Astrophysics 537 A7 (2012)

89. Riviere-Marichalar P., Ménard F., Thi W. F., Kamp I., Montesinos B., Meeus G., Woitke P., Howard C., Sandell G., Podio L., Dent W. R. F., Mendigutía I., Pinte C., White G. J., Barrado D.; Detection of warm water vapour in Taurus protoplanetary discs by *Herschel*; Astronomy and Astrophysics 538 L3 (2012)
90. Rist C., Faure A.; A Monte Carlo error estimator for the expansion of rigid-rotor potential energy surfaces; Journal of Mathematical Chemistry 50 588 (2012)
91. Roelfsema P. R., Helmich F. P., Teyssier D., Ossenkopf V., Morris P., Olberg M., Shipman R., Risacher C., Akyilmaz M., Assendorp R., Avruch I. M., Beintema D., Biver N., Boogert A., Borys C., Braine J., Caris M., Caux E., Cernicharo J., Coeur-Joly O., Comito C., de Lange G., Delforge B., Dieleman P., Dubbeldam L., de Graauw T., Edwards K., Fich M., Flederus F., Gal C., di Giorgio A., Herpin F., Higgins D. R., Hoac A., Huisman R., Jarchow C., Jellema W., de Jonge A., Kester D., Klein T., Kooi J., Kramer C., Laauwen W., Larsson B., Leinz C., Lord S., Lorenzani A., Luinge W., Marston A., Martín-Pintado J., McCoey C., Melchior M., Michalska M., Moreno R., Müller H., Nowosielski W., Okada Y., Orleański P., Phillips T. G., Pearson J., Rabois D., Ravera L., Rector J., Rengel M., Sagawa H., Salomons W., Sánchez-Suárez E., Schieder R., Schlöder F., Schmülling F., Soldati M., Stutzki J., Thomas B., Tielens A. G. G. M., Vastel C., Wildeman K., Xie Q., Xilouris M., Wafelbakker C., Whyborn N., Zaal P., Bell T., Bjerkeli P., De Beck E., Cavalié T., Crockett N. R., Hily-Blant P., Kama M., Kaminski T., Leflóch B., Lombaert R., de Luca M., Makai Z., Marseille M., Nagy Z., Pacheco S., van der Wiel M. H. D., Wang S., Yıldız U.; In-orbit performance of *Herschel*-HIFI; Astronomy and Astrophysics 537 A17 (2012)
92. Roseboom I. G., Ivison R. J., Greve T. R., Amblard A., Arumugam V., Auld R., Aussel H., Bethermin M., Blain A., Bock J., Boselli A., Brisbin D., Buat V., Burgarella D., Castro-Rodríguez N., Cava A., Chanial P., Chapin E., Chapman S., Clements D. L., Conley A., Conversi L., Cooray A., Dowell C. D., Dunlop J. S., Dwek E., Eales S., Elbaz D., Farrah D., Franceschini A., Glenn J., Griffin M., Halpern M., Hatziminaoglou E., Ibar E., Isaak K., Lagache G., Levenson L., Lu N., Madden S., Maffei B., Mainetti G., Marchetti L., Marsden G., Morrison G., Mortier A. M. J., Nguyen H. T., O'Halloran B., Oliver S. J., Omont A., Page M. J., Panuzzo P., Papageorgiou A., Pearson C. P., Pérez-Fournon I., Pohlen M., Rawlings J. I., Raymond G., Rigopoulou D., Rizzo D., Rodighiero G., Rowan-Robinson M., Schulz B., Scott D., Seymour N., Shupe D. L., Smith A. J., Stevens J. A., Symeonidis M., Trichas M., Tugwell K. E., Vaccari M., Valtchanov I., Vieira J. D., Viero M. P., Vigroux L., Wardlow J., Wang L., Wright G., Xu C. K., Zemcov M.; The *Herschel* Multi-tiered Extragalactic Survey: SPIRE-mm photometric redshifts; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 419 2758 (2012)
93. Russeil D., Zavagno A., Adami C., Anderson L. D., Bontemps S., Motte F., Rodon J. A., Schneider N., Ilmane A., Murphy K. J.; Statistical study of OB stars in NGC 6334 and NGC 6357; Astronomy and Astrophysics 538 A142 (2012)
94. Sadavoy S. I., di Francesco J., André P., Pezzuto S., Bernard J.-P., Bontemps S., Bressert E., Chitsazzadeh S., Fallscheer C., Hennemann M., Hill T., Martin P., Motte F., Nguyn Lu'O'Ng Q., Peretto N., Reid M., Schneider N., Testi L., White G. J., Wilson C.; *Herschel* observations of a potential core-forming clump: Perseus B1-E; Astronomy and Astrophysics 540 A10 (2012)
95. Samdal, S.; Moellendal, H.; Guillemin, J.-C.; Microwave Spectra and Barriers to Internal Rotation of Z- and E-1-Propenylisocyanide; Journal of Physical Chemistry A in press (2012)
96. Schneider N., Csengeri T., Hennemann M., Motte F., Didelon P., Federrath C., Bontemps S., Di Francesco J., Arzoumanian D., Minier V., André P., Hill T., Zavagno A., Nguyen-Luong Q., Attard M., Bernard J.-P., Elia D., Fallscheer C., Griffin M., Kirk J., Klessen R., Könyves V., Martin P., Men'shchikov A., Palmeirim P., Peretto N., Pestalozzi M., Russeil D., Sadavoy S., Sousbie T., Testi L., Tremblin P., Ward-Thompson D., White G.; Cluster-formation in the Rosette molecular cloud at the junctions of filaments; Astronomy and Astrophysics 540 L11 (2012)
97. Scribano Y., Faure A., Lauvergnat D.; Rotational excitation of H2O by para-H2 from an adiabatically reduced dimensional potential; Journal of Chemical Physics 136 094109 (2012)
98. Senent M. L., Dumouchel F., Lique F.; Cyanide/isocyanide abundances in the interstellar medium - I. Theoretical spectroscopic characterization; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 420 1188 (2012)
99. Smith M. W. L., Gomez H. L., Eales S. A., Ciesla L., Boselli A., Cortese L., Bendo G. J., Baes M., Bianchi S., Clemens M., Clements D. L., Cooray A. R., Davies J. I., de Looze I., di Serego Alighieri S., Fritz J., Gavazzi G., Gear W. K., Madden S., Mentuch E., Panuzzo P., Pohlen M., Spinoglio L., Verstappen J., Vlahakis C., Wilson C. D., Xilouris E. M.; The *Herschel* Reference Survey: Dust in Early-type Galaxies and across the Hubble Sequence; The Astrophysical Journal 748 123 (2012)
100. Smolders K., Neyskens P., Blommaert J. A. D. L., Hony S., van Winckel H., Decin L., van Eck S., Sloan G. C., Cami J., Uttenthaler S., Degroote P., Barry D., Feast M., Groenewegen M. A. T., Matsuura M., Menzies J., Sahai R., van Loon J. T., Zijlstra A. A., Acke B., Bloemen S., Cox N., De Cat P., Desmet M., Exter K., Ladjal D., oestensen R., Saesen S., van Wyk F., Verhoelst T., Zima W.; The Spitzer spectroscopic survey of S-type stars; Astronomy and Astrophysics 540 A72 (2012)
101. Spielfiedel A., Feautrier N., Najar F., Ben Abdallah D., Dayou F., Senent M. L., Lique F.; Fine and hyperfine excitation of C2H by collisions with He at low temperature; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 421 1891 (2012)
102. Stoecklin T., Bussery-Honvault B., Honvault P., Dayou F. ; Asymptotic potentials and ACCSA rate constants for X + OH --> OX + H reaction where X=O, S or N ; Computational and Theoretical Chemistry 990 39 (2012).
103. Talbi D., Chandler G.S.; Theoretical infrared spectra of biphenyl, terphenyls and tetraphenyls for astrophysical purposes; Journal of Molecular Spectroscopy 275 31 (2012)
104. Tercero B., Margulès L., Carvajal M., Motiyenko R. A., Huet T. R., Alekseev E. A., Kleiner I., Guillemin J. C., Moellendal H., Cernicharo J.; Microwave and submillimeter spectroscopy and first ISM detection of 18O-methyl formate; Astronomy and Astrophysics 538 A119 (2012)
105. Tilling I., Woitke P., Meeus G., Mora A., Montesinos B., Riviere-Marichalar P., Eiroa C., Thi W.-F., Isella A., Roberge A., Martin-Zaidi C., Kamp I., Pinte C., Sandell G., Vacca W. D., Ménard F., Mendigutía I., Duchêne G., Dent W. R. F., Aresu G., Meijerink R., Spaans M.; Gas modelling in the disc of HD 163296; Astronomy and Astrophysics 538 A20 (2012)
106. Tobin J. J., Hartmann L., Bergin E., Chiang H.-F., Looney L. W., Chandler C. J., Maret S., Heitsch F.; Complex Structure in Class 0 Protostellar Envelopes. III. Velocity Gradients in Non-axisymmetric Envelopes, Infall, or Rotation?; The Astrophysical Journal 748 16 (2012)
107. Toulouze M., Pilmé J., Pauzat F., Ellinger Y.; Arsenic in prebiotic species: a theoretical approach; Physical Chemistry Chemical Physics (2012)
108. van der Avoird A., Scribano Y., Faure A., Weida M. J., Fair J. R., Nesbitt D. J.; Intermolecular potential and rovibrational states of the H2O-D2 complex; Chemical Physics 399 28 (2012)

109. van der Tak F. F. S., Ossenkopf V., Nagy Z., Faure A., Röllig M., Bergin E. A.; Detection of HF emission from the Orion Bar; Astronomy and Astrophysics 537 L10 (2012)
110. Vinogradoff V., Duvernay F., Danger G., Theulé P., Chiavassa T. ; Acetaldehyde solid state reactivity at low temperature : formation of the acetaldehyde-ammonia trimer ; J. Phys. Chem 116 2225 (2012)
111. Wakelam V., Herbst E., Loison J.-C., Smith I. W. M., Chandrasekaran V., Pavone B., Adams N. G., Bacchus-Montabonel M.-C., Bergeat A., Béroff K., Bierbaum V. M., Chabot M., Dalgarno A., van Dishoeck E. F., Faure A., Geppert W. D., Gerlich D., Galli D., Hébrard E., Hersant F., Hickson K. M., Honvault P., Klippenstein S. J., Le Picard S., Nyman G., Pernot P., Schlemmer S., Selsis F., Sims I. R., Talbi D., Tennyson J., Troe J., Wester R., Wiesenfeld L.; A KInetic Database for Astrochemistry (KIDA); The Astrophysical Journal Supplement Series 199 21 (2012)
112. Welsh B. Y., Wheatley J., Lallement R.; Ultraviolet absorption observations of intermediate-velocity cloud gas detected towards the M 15 globular cluster; Astronomy and Astrophysics 537 A51 (2012)
113. Zanchet A., Gonzalez-Lezana T., Roncero O., Jorfi M., Honvault P., Hankel M.; An accurate study of the dynamics of the C+OH reaction on the second excited 14A" potential energy surface; J. Chem. Phys. 136, 164309 (2012).