

# **Programme national Physique et Chimie du Milieu Interstellaire**

## **Bilan 2019-2023 et Prospective 2024-2029**

### Introduction

Ce document résume les points forts de l'activité de la communauté PCMI entre 2019 et 2023 ainsi que les perspectives entre 2024 et 2029. Il est en grande partie basé sur les retours de questionnaires diffusés à la communauté pendant le printemps 2023 ainsi que les conclusions de l'atelier "Which observatories for PCMI?" organisé à l'automne 2021 (rédigé par J. Pety, K. Demyk, L. Biennier et P. Theulé). Les principaux rédacteurs sont les membres du CS de PCMI avec la participation (non exhaustive et par ordre alphabétique) de J. Aumont, S. Bontemps, E. Falgarone, U. Jacovella, D. Marshall, M.-A. Miville-Deschênes, J. Noble, J. Pety et B. Tabone. La partie bilan sur les demandes de temps d'observation sur le JWST a également été rédigée suite aux questionnaires distribués à la communauté au printemps 2024.

# Table des matières

<b>1. Présentation du programme</b>	<b>3</b>
1.1 PCMI - un programme interdisciplinaire	3
1.2 Interfaces avec les autres programmes nationaux de l'INSU	5
1.3 Structure et fonctionnement	6
1.4 Aspects budgétaires	7
<b>2. La communauté</b>	<b>12</b>
2.1 Contours	12
2.2 Prix et médailles	14
2.3 Modes de financements complémentaires	14
<b>3. Services d'observation</b>	<b>14</b>
4. Moyens d'observations, de calculs scientifiques et de mesures expérimentales	16
4.1 Grands instruments d'observation au sol	16
4.2 Missions spatiales	17
4.3 Centres de calcul	18
4.4 Plateformes expérimentales	19
<b>5. Science des données</b>	<b>21</b>
6. Animation et diffusion	22
6.1 Organisation d'écoles et de conférences	22
6.2 Diffusion des savoirs	23
6.3 Site web PCMI et mailing list	25
6.4 Enseignement	25
6.5 Aspects bibliographiques	27
<b>7. Questions scientifiques et faits marquants</b>	<b>27</b>
7.1 Structures du MIS, de la Galaxie aux galaxies externes et à la cosmologie.	28
7.2 Caractérisation du MIS, complexité et diversité moléculaires	31
7.3 Les grains interstellaires, moteurs de l'évolution du MIS	36
<b>8. Thèmes fédérateurs: bilans et prospective</b>	<b>39</b>
8.1 Les grandes échelles	39
8.1.1 Le Milieu Interstellaire de la Voie Lactée	39
8.1.2 Le milieu interstellaire des galaxies proches	47
8.1.3 Le milieu interstellaire des galaxies lointaines	54
8.2 Les moyennes échelles	58
8.2.1 Grands complexes moléculaires (GMC)	58
8.2.2 Régions de formation d'étoiles	60
8.2.3 Mécanismes de feedback de la formation d'étoiles	63
8.2.4 La séquence de formation d'une étoile : cœurs denses, pré stellaires et protostellaires, & protoétoiles	66
8.2.5 Disques protoplanétaires et formation des planètes	70
8.3 Les petites échelles	73
8.3.1 Poussières et nanograins interstellaires	75
8.3.2 Molécules en phase gazeuse : espèces stables/radicaux, neutres/chargés	80
8.3.3 Poussières glacées	89
8.3.4 L'héritage du MIS	96

# 1. Présentation du programme

## 1.1 PCMI - un programme interdisciplinaire

Le programme national Physique et Chimie du Milieu Interstellaire (PCMI) explore les processus à l'œuvre dans le milieu interstellaire (MIS), de ses phases les plus diffuses jusqu'à la formation stellaire et planétaire. Leur compréhension met en jeu des thématiques de recherche et des méthodologies très variées, requérant une approche fortement interdisciplinaire. Le programme PCMI s'appuie sur un réseau de laboratoires construit au cours des dernières décennies, qu'il est crucial de maintenir et de promouvoir afin de répondre aux questions scientifiques mises en avant dans ce document. Les activités de recherche de ces équipes englobent la recherche expérimentale en astrophysique de laboratoire (spectroscopie, collisions réactives ou non, interactions lumière-matière, chimie des surfaces, croissance des agrégats...) et le développement de modèles théoriques et numériques depuis les échelles de la microphysique jusqu'aux échelles galactiques. Poussée par la forte croissance des données observationnelles et des capacités de calcul au cours des dernières années, et désireuse d'accompagner les évolutions méthodologiques en cours, la communauté PCMI développe maintenant aussi ses recherches vers la science des données et les mathématiques appliquées (apprentissage machine, fouille des données, nouvelles méthodes statistiques).

La communauté PCMI regroupe des chercheurs de cinq instituts du CNRS (*CNRS Terre & Univers, CNRS Physique, CNRS Chimie, CNRS Ingénierie, CNRS Nucléaire et Particules*) et du CEA, témoignant d'une remarquable réalisation interdisciplinaire. Ce regroupement se caractérise par des collaborations solides qui débouchent vers la publication de papiers en communs et l'obtention de projets ANR (Agence Nationale de la Recherche) et ERC (European Research Council) impliquant des laboratoires de différents instituts (voir Tables A.8 et A.9). Le dynamisme de la communauté française de PCMI est reconnu internationalement. Le succès du programme est le résultat des nombreuses actions d'animation (voir section 2.6) mises en place depuis le début du programme pour construire un langage commun et identifier les points de collaboration. Les interactions avec les autres instituts s'effectuent également à travers plusieurs GdRs gérés par différents instituts du CNRS et concernant les thématiques et la communauté PCMI (GdR EMIE - CNRS Physique, GdR SUIE - CNRS Terre & Univers - Ingénieur - Physique - Chimie, GdR PILSE - CNRS Terre & Univers - Chimie). La communauté astrophysique de laboratoire est

pleinement impliquée dans le programme et leurs représentants constituent la moitié du conseil scientifique de PCMI et le directeur adjoint du programme (voir section 1.2).

Si le soutien des trois premiers instituts (Terre & Univers, Physique et Chimie) et du CEA au programme PCMI est constamment renouvelé, les liens avec CNRS Ingénierie et CNRS Nucléaire et Particules sont plus faibles. Pour ce dernier, la thématique concernée est très spécifique autour de la physique des rayons cosmiques, traitée essentiellement au LUPM, et des collisions à haute énergie avec des cibles neutres à l'IJClab, mais pour le CNRS Ingénierie, cet état de fait est regrettable : d'importants groupes de recherche de la communauté PCMI appartiennent à des laboratoires qui lui sont affiliés (PIIM et LOMC), ils travaillent sur des thématiques fortes (exploitation de JWST, thématiques des origines), et sont régulièrement soutenus par le programme. En sus de ce soutien à ses équipes, CNRS Ingénierie bénéficie également de retombées scientifiques, comme en atteste le fait que leurs résultats sont fréquemment mis en avant par leurs laboratoires et leur institut. De plus, plusieurs questions scientifiques du PCMI sont pertinentes pour CNRS Ingénierie, notamment autour de la physique de la combustion, dont s'inspirèrent les premiers modèles d'astrochimie. Il est donc crucial de renforcer ce lien entre le programme PCMI et CNRS Ingénierie, pour exploiter pleinement le potentiel des équipes PCMI de ces laboratoires, bénéficier de l'expertise complémentaire de leurs autres chercheurs, et ainsi reconnaître et soutenir ces collaborations fructueuses et hautement interdisciplinaires. La communauté du PCMI apprécierait que cela prenne la forme d'un soutien financier de CNRS Ingénierie, comme c'est déjà le cas pour CNRS Physique et CNRS Chimie. Notre expérience montre en effet que, même modeste, le soutien à long terme de divers instituts du CNRS au travers des programmes nationaux comme PCMI est non seulement très efficace mais aussi crucial pour promouvoir l'émergence et le succès de domaines fortement interdisciplinaires.

L'interdisciplinarité, si elle est une force de la communauté PCMI, peut également présenter des difficultés, car les différents instituts dont elle relève ont des priorités scientifiques et financières et des approches différentes. En contraste aux grands instruments de l'astrophysique (observatoires terrestres et spatiaux), l'astrophysique de laboratoire s'appuie sur des montages mi-lourds développés et exploités par des petites équipes. La tendance actuelle de migration d'équipes d'astrophysique de laboratoire, initialement hébergés dans des laboratoires CNRS Terre & Univers, vers des laboratoires Physique ou Chimie est une illustration de ces difficultés. Un autre aspect crucial reste le recrutement de chercheur(e)s en astrophysique de laboratoire au CNRS. En effet, leur profil interdisciplinaire peut constituer un frein à un recrutement en section 17 tandis que leur projet de recherche (orienté vers les questions d'astrophysique) peut être insuffisamment considéré dans les autres sections (04 et 13 essentiellement). En période de pénurie, les sections du comité national ont tendance à se concentrer sur leur cœur de métier. L'astrophysique de laboratoire, par nature interdisciplinaire, se situe plutôt en périphérie et le recrutement dans cette thématique peut alors en souffrir. Il est donc fréquent que ces candidat(e)s ne poursuivent pas dans ces thématiques après leur recrutement.

## **1.2 Interfaces avec les autres programmes nationaux de l'INSU**

Du fait du rôle central joué par le MIS dans l'évolution des galaxies, la formation stellaire et la formation planétaire, le programme PCMI possède naturellement des interfaces scientifiques avec de nombreux autres programmes de l'INSU, et les questions scientifiques à ces interfaces bénéficient grandement de la variété des horizons et des approches de ces différentes communautés.

*PNPS* : Les étoiles se forment au bout d'un long processus d'évolution et de structuration de la matière interstellaire, des nuages aux filaments et aux cœurs préstellaires, mettant en jeu de nombreux processus (gravitation, dynamique des fluides magnétisés non-idéaux, turbulence et chocs, thermodynamique, chimie dépendante du temps dans le gaz éclairé par le FUV, ...). L'interaction fortement non-linéaire entre ces processus doit permettre de contraindre l'efficacité de la formation stellaire. Réciproquement, les étoiles rétroagissent sur le MIS tout au long de leur vie, en injectant matière et énergie dans le milieu environnant, ce qui joue un rôle majeur dans l'évolution du MIS.

*PNCG* : Le MIS est une composante fondamentale des galaxies, et plusieurs traceurs de leur évolution, tant du point de vue de leur composition que de leur histoire de formation stellaire, sont calibrés sur la Voie Lactée et les galaxies proches. L'expertise de PCMI quant à la formation des structures du MIS et à la formation stellaire est donc essentielle aux échelles cosmologiques d'intérêt pour le PNCG. Inversement, les galaxies externes offrent des conditions environnementales différentes (métallicité, champ de rayonnement) permettant de tester notre compréhension du MIS Galactique. Enfin, de nombreux signaux cosmologiques (polarisation du CMB, réionisation) étant noyés dans les signaux Galactiques aux mêmes fréquences, leur détection future ne pourra reposer que sur une robuste compréhension de ces avant-plans.

*PNP* : L'interface principale avec le programme PNP réside dans la question de l'héritage interstellaire des nébuleuses préstellaires. Quantifier la manière dont la matière interstellaire et la chimie interstellaire sont préservées ou non dans la formation des systèmes exoplanétaires, comme dans notre propre système solaire, est essentiel pour comprendre la diversité des exoplanètes. Cela passe notamment par l'étude de la matière primitive provenant de (micro)météorites, de particules de poussière interplanétaire et d'inclusions présolaires, fournissant des informations précieuses et des contraintes sur la composition et l'évolution de la poussière interstellaire pendant le processus de formation stellaire et planétaire.

*PNHE* : La physique des rayons cosmiques (accélération dans les chocs magnétisés, propagation à travers le MIS et impact sur son évolution) se situe à l'interface entre le PCMI et le PNHE. La mission NewAthena élargira également une autre interface entre les deux programmes, en permettant la spectroscopie X du MIS, qui fournira des informations sur sa composition en phases gazeuse et solide.

En résumé, les interfaces scientifiques entre le PCMI et les programmes PNCG, PNPS, et PNP permettent une approche globale et interdisciplinaire des questions liées au MIS et à ses interactions avec les étoiles, les galaxies, et les systèmes planétaires. Cette collaboration enrichit la recherche dans chacun de ces domaines en tirant parti des expertises variées et des approches complémentaires des différentes communautés scientifiques impliquées. Renforcer ces collaborations entre programmes est donc essentiel

pour approfondir notre compréhension des processus astrophysiques complexes régissant l'univers qui nous entoure.

### 1.3 Structure et fonctionnement

Au moment de cette prospective, le programme national de PCMI est dirigé par trois membres dont les compétences scientifiques sont complémentaires : un directeur (François Levrier), un directeur adjoint (Ludovic Biennier) et une présidente du conseil scientifique (Valentine Wakelam). Le conseil scientifique (CS) est composé de 17 membres supplémentaires dont la liste est donnée dans la Table A.1 (dans les annexes). Les membres du CS sont sélectionnés par la direction de PCMI (et validés par le directeur adjoint scientifique AA de l'INSU) afin de couvrir l'essentiel des thématiques de PCMI, d'assurer la représentativité des laboratoires et de respecter la parité. Pour garder une vision internationale, un membre issu d'un laboratoire étranger est associé. Les membres du CS apportent chacun(e) des expertises dans différents domaines, expertises qui se nourrissent à la fois de leurs travaux au quotidien mais également de l'examen annuel des demandes de financement. Ces expertises sont sollicitées dans des cadres qui peuvent être annuels ou espacés de plusieurs années (prospectives des différents instituts, expertises sur les SNOs et sur les grands instruments).

PCMI est également représenté dans différents comités soit par des membres de son CS soit par des membres de sa communauté. En 2023, ces représentants sont :

- Représentant PCMI au comité d'experts du thème transverse exoplanètes (CET) : E. Chapillon (IRAM)
- Représentant PCMI à l'Action Spécifique Observatoires Virtuels : P. Gratier (LAB)
- Représentant PCMI au comité ANO5 : F. Lique (IPR)
- Représentant PCMI au comité de préparation scientifique de NewATHENA : P. Theulé (LAM)
- Représentant PCMI au comité de l'animation scientifique ELT: E. Habart (IAS)
- Responsables de l'animation scientifique des instruments ELT au sein de la communauté PCMI: E. Habart (IAS) et P. Guillard (IAP)

Les interactions avec le CET se font principalement lors de l'étude des réponses à l'appel à projet INSU annuel (AAP). Les demandes identifiées en lien avec les thématiques couvertes par le CET sont transmises à celle-ci avant la réunion du CS à l'automne de façon à avoir leur avis pour cette réunion.

PCMI est consulté au cours de l'année par la CSAA pour rapporter sur des demandes de financement portant sur ses thématiques et également dans le cadre de renouvellement ou de nouvelles labellisations de services nationaux d'observations.

La section 17 du CNRS sollicite chaque année la direction de PCMI afin de transmettre des dossiers de candidatures pour les médailles de bronze et d'argent du CNRS. Depuis 2023, nous avons décidé de prendre l'initiative de soumettre des candidatures aux autres sections du CNRS (sections 4 - Atomes et molécules - Optique et lasers - Plasmas chauds et 13 - Chimie physique, théorique et analytique) en lien avec les thématiques de PCMI après accord des dites sections. Outre l'attribution des financements de l'INSU, PCMI occupe une place importante en France dans l'animation scientifique qui sera décrite à la section 2.6 du document.

Le CS se réunit une fois par an (généralement à l'automne) afin de statuer sur les attributions de financements aux projets soumis à l'appel d'offre des PN de l'INSU AA chaque année. Lors du CS, d'autres sujets sont discutés comme le programme scientifique de la conférence bi-annuelle organisée par le programme. Les représentants des différents instituts sont conviés pour un temps d'échange avec les membres du CS. Les demandes de financement sont examinées en amont par deux ou trois rapporteurs (suivant le montant demandé) qui rédigent un rapport court et émettent ensuite un avis sur le montant à attribuer.

#### 1.4 Aspects budgétaires

Le programme national PCMI est financé par le CNRS, le CNES et le CEA. La principale contribution provient du *CNRS Terre & Univers*, mais la nature interdisciplinaire de PCMI est reflétée par un fort soutien du *CNRS Physique* et du *CNRS Chimie*. Le CNES finance PCMI par le biais de fonds récurrents et de fonds spéciaux destinés à soutenir l'analyse et l'interprétation des observations provenant de missions spatiales spécifiques (par exemple JWST et Gaia sur la période considérée).

Le budget total de PCMI pour la période 2019-2023 était de 1008 k€, identique à la période précédente (2014-2018). Sur ce montant, 91% ont soutenu les projets de la communauté à travers 5 appels à projets compétitifs annuels. Le reste (9%) a financé les opérations du conseil scientifique de PCMI. Le soutien aux projets vise notamment à financer des missions de collaboration, du petit équipement et des consommables pour les expériences d'astrophysique de laboratoire, des moyens de calcul et de stockage dans le cadre d'un déploiement mutualisé, la participation à des conférences, l'organisation d'ateliers et d'écoles thématiques, et depuis peu les gratifications de stages de master. Le conseil scientifique de PCMI soutient notamment le développement de projets collaboratifs, potentiellement à risque, interdisciplinaires, qui ont de ce fait parfois du mal à trouver des sources de financement autres.

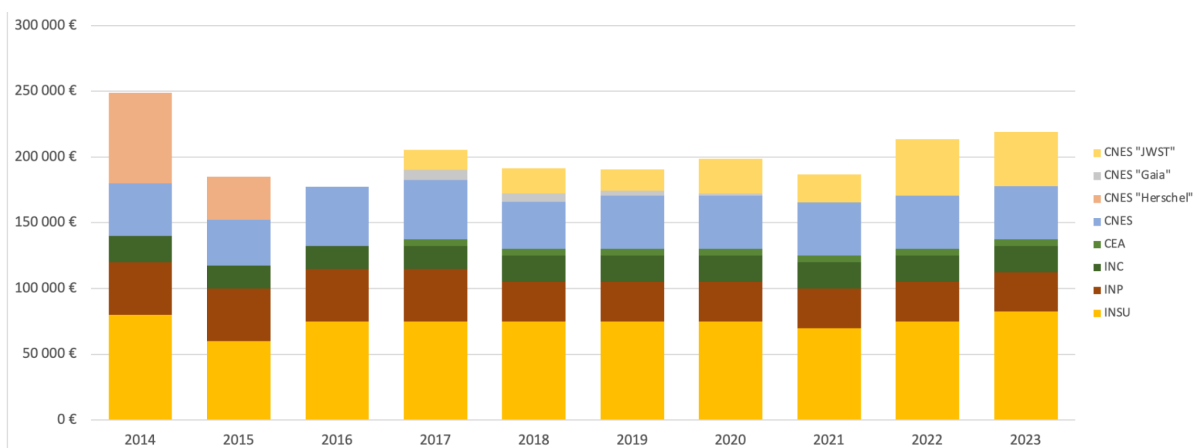


Fig. 1.1 : Evolution de la dotation par source de financement [2014-2023]

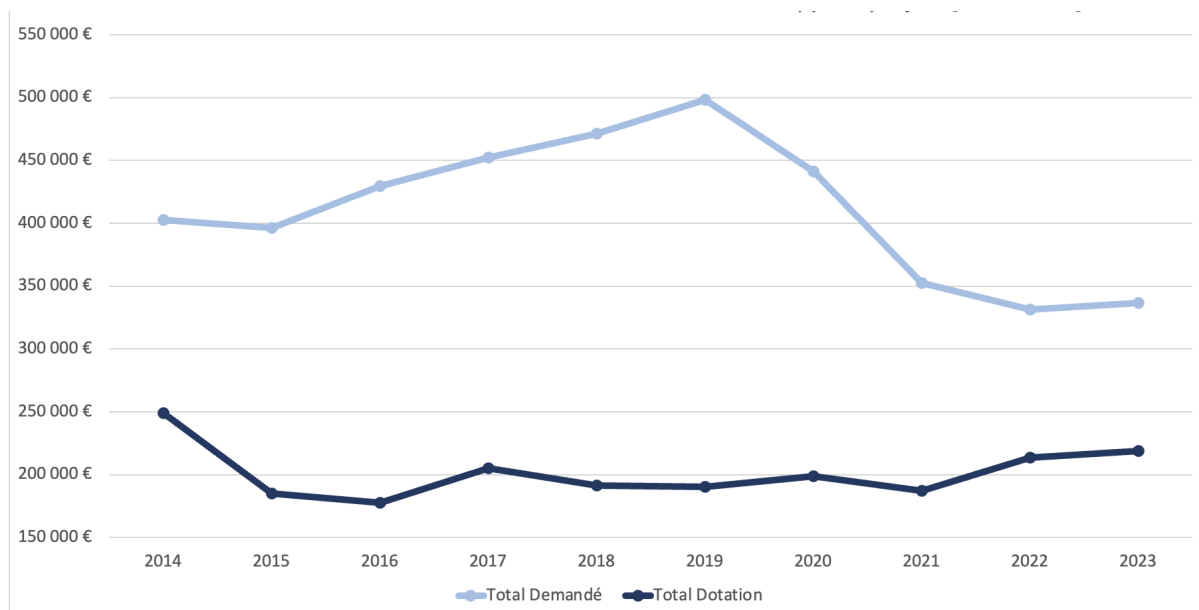


Fig. 1.2 : Evolution de la dotation de l'AAP et du montant total demandé [2014-2023]

Les dotations des différentes tutelles sur la période 2019-2023, ainsi que sur la période précédente 2014-2018, sont présentées sur la Fig. 1.1. Au cours de la période 2019-2023, le financement de PCMI a globalement augmenté, de 190.5 k€ en 2019 à 219 k€ en 2023, soit une augmentation de 15%. On y voit la régularité des financements du *CNRS Physique*, *CNRS Chimie* et du CEA, l'augmentation du financement *CNRS Terre & Univers* sur le dernier exercice, après une longue période de financement stable et une baisse substantielle (23%) lors de la précédente période (2014-2018), et l'apport important du CNES sur les deux dernières années en relation avec la préparation et l'exploitation des données JWST. Ce mécanisme est très efficace pour encourager les projets liés à cet instrument, comme ce fut le cas au cours des périodes précédentes pour Herschel. Les fonds récurrents du CNES se sont également avérés fondamentaux pour soutenir les expériences de laboratoire associées à des missions spatiales inattendues. La dotation du CEA, quoique limitée, permet néanmoins de financer régulièrement des projets d'équipes du CEA, notamment en termes d'instrumentation au sol ou dans l'espace. On déplore l'absence de financement du *CNRS Ingénierie*, alors que des équipes de laboratoires dépendant de cet institut émargent à la communauté PCMI et déposent chaque année avec succès des demandes de financement au programme.

Au cours de la même période 2019-2023, les demandes de financement de la communauté (Fig. 1.2) ont connu une forte baisse entre 2019 (498 k€) et 2022 (331 k€), en raison de la crise COVID qui a mis un frein aux activités (notamment en ce qui concerne les missions et l'organisation de conférences). La situation s'est stabilisée en 2022 et les demandes commencent à augmenter à nouveau légèrement en 2023.

Au total, 238 projets ont été soumis aux appels annuels au cours de la période 2019-2023, soit une moyenne de 47 projets soumis chaque année, en légère augmentation par rapport à la période précédente (223 projets). Cela masque néanmoins un fort effet de la crise COVID, puisque le nombre de projets déposés a fortement chuté entre 2019 (66) et 2021 (35) avant de se stabiliser et de reprendre légèrement à la hausse en 2023 (39). Malgré cet



effet, le nombre de projets déposés et la participation de nouvelles équipes à l'appel à projet illustre le dynamisme de la communauté PCMI.

En termes des thématiques des projets soumis, la crise COVID a surtout eu un effet fort sur les demandes de soutien à l'organisation d'ateliers et de colloques, qui ont quasiment disparu en 2021-2022 avant de retrouver un niveau habituel (6 projets, égal à la moyenne sur la période 2014-2020) en 2023. Le budget moyen demandé par ce type de projet est de 2.5 k€. Les demandes portant sur des thématiques « Observations et modélisation » ou « Astrophysique de laboratoire théorique » ont également connu un fort recul sur les deux mêmes années (2021-2022), de l'ordre de 50%, alors que les demandes portant sur l'astrophysique de laboratoire expérimentale ont connu une baisse plus modérée. Sur la période 2019-2023, le budget moyen des demandes « Observations et modélisation » est de 7 k€, alors qu'il est de 11.8 k€ sur les demandes « Astrophysique de laboratoire expérimentale », de 6.3 k€ sur les demandes « Astrophysique de laboratoire théorique » et de 2.6 k€ sur les demandes d'animation scientifique. On ne note pas d'évolution significative sur la période pour l'ensemble de ces catégories.

Le rôle du PCMI est notamment d'apporter un soutien aux petits projets dans un contexte de diminution du budget global des équipes, mais le financement attribué par le conseil scientifique du PCMI ne se limite pas à appliquer un simple facteur de pression. Il résulte d'une évaluation scientifique des projets, amenant parfois à attribuer une partie importante, voire la totalité du budget demandé et, inversement, à n'attribuer aucun financement ou qu'un financement minime à d'autres projets. Nous soulignons ainsi que le CS de PCMI joue son rôle en jugeant la qualité des demandes et en orientant la science en fonction des priorités du programme. Si la grande majorité des projets soumis obtiennent un financement du PCMI (227 projets sur les 238 soumis sur la période 2019-2023, comparé à 214 sur 223 au cours de la période précédente), le CS de PCMI a usé au mieux de cette possibilité de pilotage en attribuant entre 0 et 100% des fonds demandés par projet. Le taux de financement moyen des projets est de 49%, en légère augmentation par rapport à la période précédente (44% en 2014-2018), avec des variations significatives d'une année à l'autre (37% et 2019, 64% en 2022). Ce rôle de pilotage scientifique du programme a été renforcé par rapport à la période précédente. Ainsi, comme le montre la Fig. 1.3 qui donne la répartition des taux de financement des projets déposés, 21% des projets ont été financés à plus de 70% du budget demandé (comparé à 9% des projets sur la période précédente) et 10% l'ont été à moins de 20% du budget demandé (comparé à 7% sur la période précédente). Le taux de financement moyen, inférieur à 50%, souligne cependant que le budget global du PCMI ne correspond manifestement pas aux besoins de la communauté. Celle-ci, par sa participation continue aux appels à projets, exprime l'importance de ces financements pour développer de nouveaux projets et pour soutenir les activités des équipes qui les proposent.

#### Répartition en fonction des tutelles

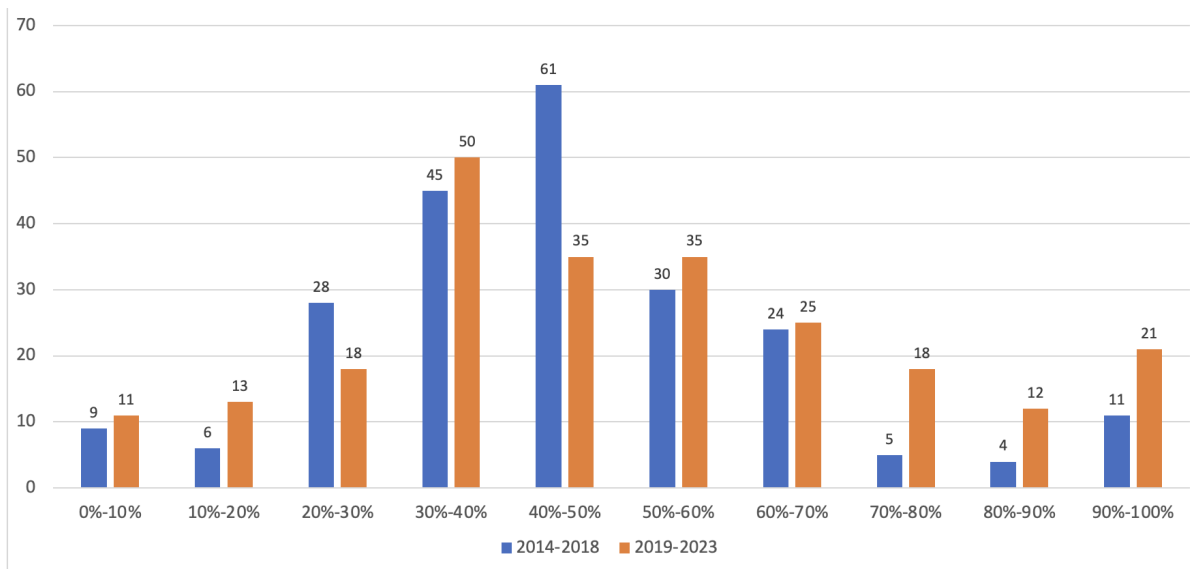


Fig. 1.3 Histogramme des taux de financement des projets soutenus par PCMI sur les périodes 2014-2018 et 2019-2023.

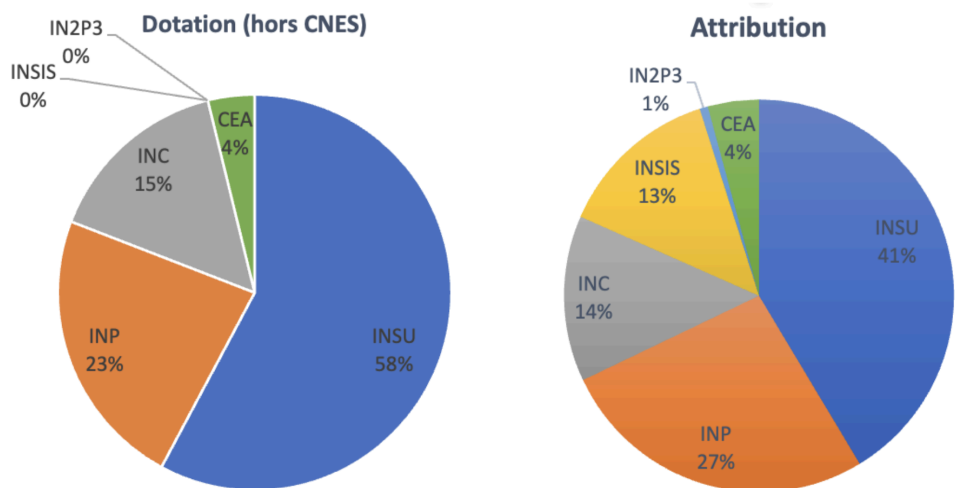


Fig. 1.4 Dotation (hors CNES) et attribution des crédits PCMI en fonction de la tutelle du PI.

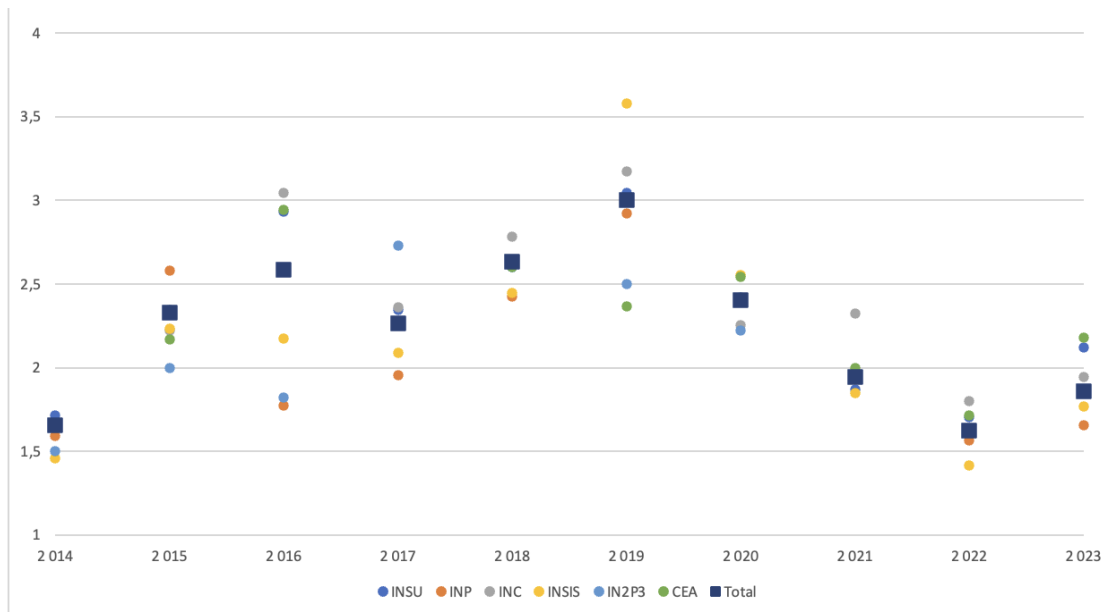


Fig. 1.5 : Evolution du facteur de pression par institut et total [2014-2023]

La répartition de l'attribution des crédits PCMI en fonction de l'Institut des PI est présentée sur la Fig. 1.4. Cette classification illustre le caractère interdisciplinaire de la communauté et des recherches menées pour répondre aux questions scientifiques au cœur de PCMI. Sur la période 2019-2023, 41% du budget a été alloué à des projets portés par des équipes du *CNRS Terre et Univers*, 27% à des équipes affiliées au *CNRS Physique*, 14% au *CNRS Chimie*, 13% au *CNRS Ingénierie*, 4% au CEA et 1% au *CNRS Nucléaire et Particules*. Cependant, il est difficile d'estimer précisément le retour financier à chaque institut, puisqu'une partie importante des projets implique des collaborations entre chercheurs de plusieurs instituts. De plus, une autre cause des variations annuelles observées des crédits alloués aux équipes des différents instituts du CNRS est liée au déménagement de certaines équipes dans des laboratoires appartenant à d'autres instituts, par exemple l'intégration de l'équipe de l'ENS, auparavant au LERMA (*CNRS Terre et Univers*), au sein du LPENS (*CNRS Physique*). Ceci étant dit, il est possible de calculer un facteur de pression par institut en faisant le rapport de la dotation d'un institut au montant total alloué aux projets dont le PI émerge à cet institut. L'évolution de ce facteur de pression par institut, ainsi que celle du facteur de pression total, est montré sur la Fig. 1.5 pour la période 2014-2023. Le facteur de pression par institut varie d'une année à l'autre, car la principale décision de financement d'un projet est fondée sur sa qualité scientifique, mais la moyenne du facteur de pression sur la période (2019-2023) est comparable pour tous les instituts (hors *CNRS Nucléaire et Particules*), à savoir  $2,1 \pm 0,1$ .

#### Répartition en fonction des méthodes disciplinaires

Les recherches menées par la communauté PCMI s'appuient sur des méthodes très différentes : 1) les observations astronomiques et les simulations et modèles pour interpréter les données observées, et 2) l'astrophysique de laboratoire qui produit des études expérimentales et théoriques de pointe pour reproduire et comprendre les conditions physiques et chimiques en jeu dans le milieu interstellaire. La Fig. 1.6 montre la répartition du financement de PCMI entre ces méthodes disciplinaires. Cela peut être considéré

comme un indicateur de l'interdisciplinarité de PCMI. Le soutien de PCMI aux activités d'astrophysique de laboratoire représente environ 62% des fonds alloués sur la période 2019-2023, tandis que le soutien aux observations astronomiques et à la modélisation représente environ 33%. Les 5% restants soutiennent l'organisation d'écoles thématiques et d'ateliers. Ces chiffres sont en tous points comparables à ceux de la période précédente 2014-2018. Il convient cependant de souligner qu'ils ne sont qu'indicatifs, car une proportion importante de projets combine différentes méthodologies. Sur la période 2019-2023, le facteur de pression est similaire pour les observations astronomiques et la modélisation (2,16) et pour l'astrophysique de laboratoire (2,19). Cette répartition et le fait que les équipes d'astrophysique de laboratoire sont réparties dans les laboratoires des différents instituts du CNRS reflète le dynamisme des études d'astrophysique de laboratoire et le caractère fortement interdisciplinaire de PCMI.

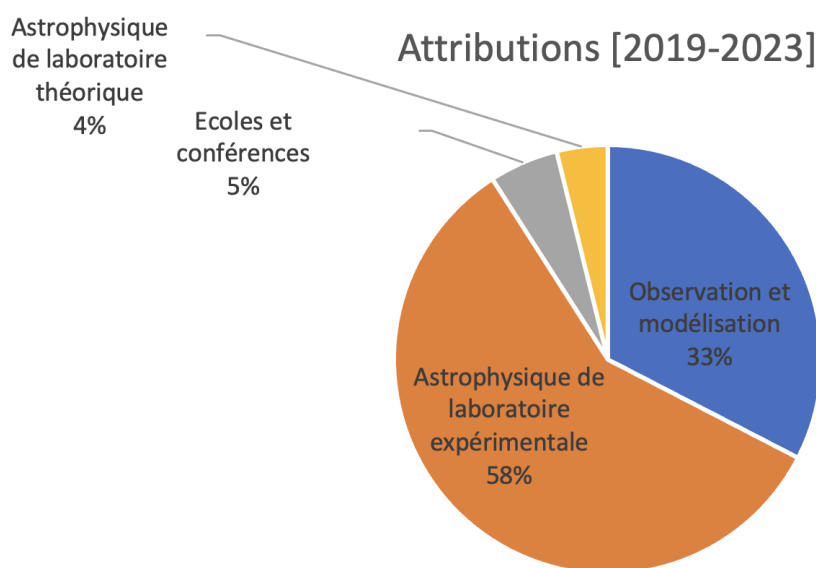


Fig. 1.6 : Répartition des financements attribués en fonction des méthodes disciplinaires.

## 2. La communauté

### 2.1 Contours

La difficulté pour définir les contours de la communauté PCMI est liée à la diversité des laboratoires appartenant aux tutelles autres que le *CNRS Terre et Univers* et qui sont parfois à la marge des thématiques principales de leur laboratoire. En se fondant sur les retours de questionnaires, les équipes de recherche en lien avec PCMI se composent actuellement de 142 chercheurs, (58 CNRS, 10 chercheurs CEA, 19 CNAP et 55 enseignants chercheurs), 31 ITA et 137 étudiants en thèse. Sur la période 2019-2024, 92 thèses et 16 HDR ont été (ou seront) soutenues et de l'ordre de 102 stages de M2 ont été supervisés. Il s'agit là d'estimations basses étant donné que tous les groupes n'ont pas répondu au questionnaire. La liste de diffusion PCMI (voir section 6.3) contient 418 abonnés.

Les contours de la communauté peuvent aussi se voir à travers les laboratoires soumettant des demandes de financement à PCMI lors des appels à projet *CNRS Terre et Univers*. La figure 2.1 montre les laboratoires porteurs des demandes sur la période 2019-2023 ainsi que la répartition par tutelle principale. Environ la moitié des demandes sont portées par des chercheur(e)s hors *CNRS Terre et Univers*. Par rapport à la précédente prospective, cette fraction est moins importante (52% des demandes contre 63% entre 2013 et 2018). Le nombre de laboratoires affiliés au *CNRS Terre et Univers* porteurs de demandes PCMI reste stable. Le nombre de laboratoires porteurs affiliés au *CNRS Chimie* et *CNRS Physique* est en légère augmentation.

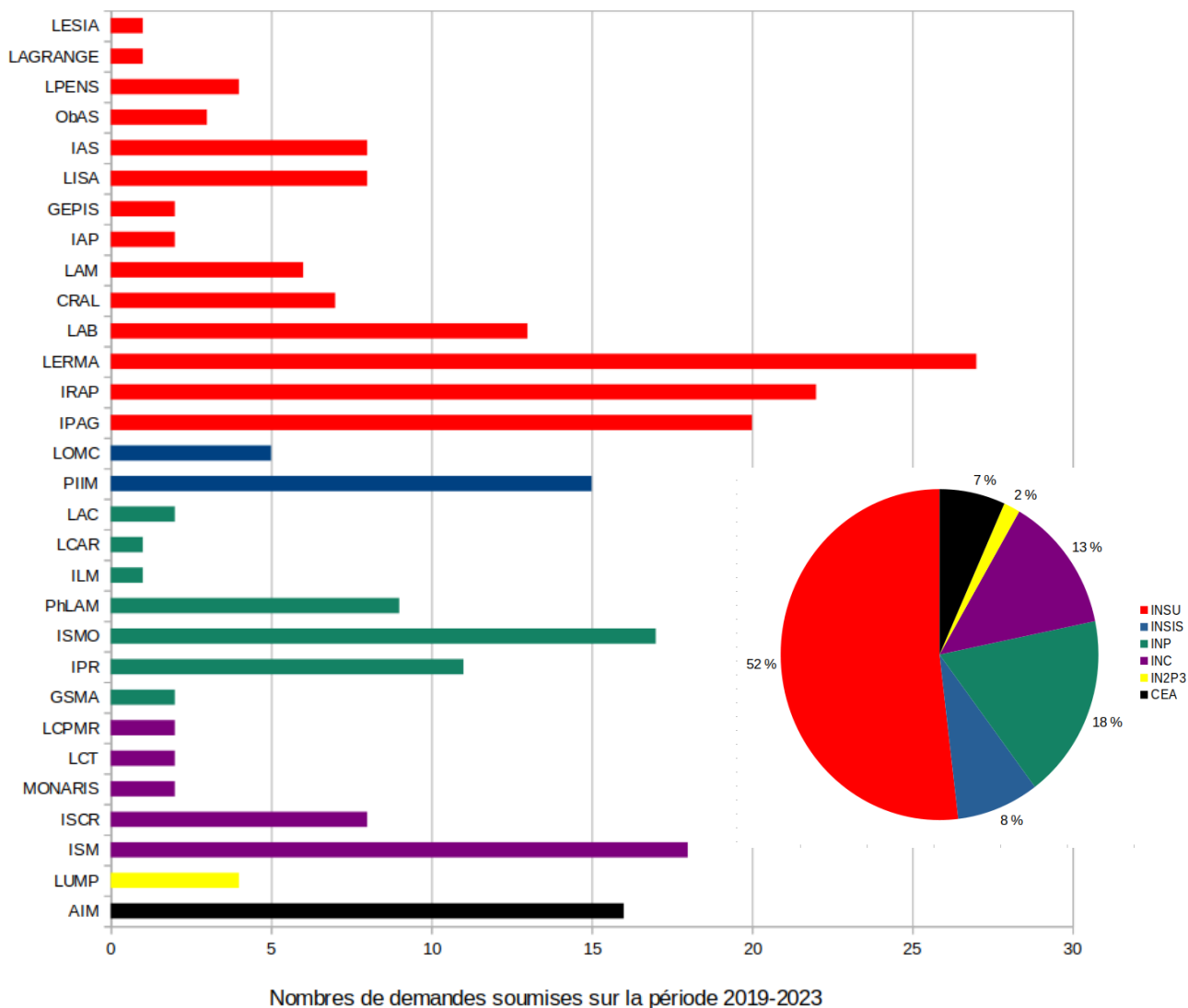


Figure 2.1 : Nombre de demandes soumises à PCMI aux appels à projets de 2019 à 2023 par laboratoire porteur de la demande. Les correspondances des acronymes avec les noms complets des laboratoires peuvent être trouvés dans la Table A.2 de l'annexe.

## 2.2 Prix et médailles

Le dynamisme de la communauté a été récompensé par l'obtention entre 2020 et 2023 d'un grand nombre de prix et médailles au niveau national (prix des universités, de la SF2A et médailles du CNRS) mais également international (prix de l'American Astronomical Society ou de l'American Chemical Society). La liste de ces médailles et prix est donnée dans la Table A.3.

## 2.3 Modes de financements complémentaires

En complément des appels annuels du programme national, la communauté PCMI exploite toutes les voies locales, nationales et internationales de financements. La liste des contrats ANR obtenus par la communauté est répertoriée dans la Table A.8. Par rapport à la précédente prospective, on observe une augmentation du nombre de projets ANR en lien avec les thématiques PCMI (25 contre 19). Plusieurs de ces projets associent des laboratoires de différentes tutelles. La liste des principaux contrats européens de type ERC, International Training Network et action COST est donnée dans la Table A.9. Ce nombre est également en légère augmentation par rapport à la précédente prospective (15 contre 13).

En plus de ces moyens nationaux et européens, les équipes de recherche utilisent également les moyens de financements de leurs universités associées (Labex, IDEX ou appels d'offres spécifiques de chaque université). Le CNES soutient des projets en lien avec le spatial tel que le développement de SPICA (mission arrêtée), etc. D'autres sources de financement comprennent les bourses de thèse MITI, le Projet 80 Prime et International Research Network du CNRS, des programmes d'échanges avec l'Australie et l'Inde (CEFIPRA), des programmes PHC avec la Hongrie, l'Italie, la république Tchèque, la Pologne et la Chine. Cette liste n'est pas exhaustive mais est un fort indicateur des financements complémentaires à celui de PCMI.

# 3. Services d'observation

Parmi les Actions Nationales pour l'Observation (ANO) existantes du *CNRS Terre et Univers*, les membres de la communauté PCMI sont particulièrement actifs dans les *Centres de traitement, d'archivage et de diffusion de données* (ANO5). Les principaux services en lien avec PCMI sont les mêmes que lors de la précédente prospective, en dehors du service BASECOL qui existe toujours mais dont la labellisation n'a pas été renouvelée en 2022.

Parmi les ANO5 représentatifs de PCMI, on trouve des services de mise à disposition de données d'astro :

- **CADE<sup>1</sup>** : Mise à disposition de données multi-longueurs d'onde pour des cartes d'émission étendues au format HEALPix.
- **F-VAMDC<sup>2</sup>** : Portail d'interopérabilité entre bases de données atomiques et moléculaires au niveau international.

<sup>1</sup> <http://cade.irap.omp.eu/dokuwiki/doku.php>

<sup>2</sup> [https://portal.vamdc.eu/vamdc\\_portal/home.seam](https://portal.vamdc.eu/vamdc_portal/home.seam)

- **KIDA**<sup>3</sup> : Base de données de réactions chimiques pour le milieu interstellaire et outils associés.
- **SSHAD-F**<sup>4</sup> : Base de données spectroscopique de soldes pour l'astrophysique et les sciences planétaires.

Également, la mise à disposition d'outils d'analyse de données ou de modèles numériques:

- **CASSIS**<sup>5</sup> : Outil d'analyse de raies moléculaires.
- **DustEM**<sup>6</sup> : Outils de modélisation de la poussière interstellaire.
- **Plateforme MIS et Jets**<sup>7</sup> : Mise à disposition de résultats de simulations numériques et de leurs modèles.

De nouveaux services sont également en développement. En 2023, une nouvelle base de données de collisions (nécessaire pour l'analyse de raies moléculaires hors équilibre thermodynamique local) a vu le jour et proposée à la labellisation : **EMAA**<sup>8</sup>. Cette base permet à la communauté française de producteurs de taux de collision de formater et mettre à disposition des données de base, un service particulièrement utile dans le cadre de la délabellisation du service BASECOL. Cette base est complémentaire à celle de Leiden (LAMDA<sup>9</sup>) mais également plus réactive pour mettre les données à disposition. Le groupe de spectroscopistes de Lille (PhLAM) met également à disposition les résultats de leurs résultats expérimentaux via la **Lille Spectroscopic Database**<sup>10</sup>. Concernant l'étude des PAH et autres porteurs des bandes aromatiques infrarouges (AIB), le portail Cosmic PAH<sup>11</sup> a été mis en place pour accéder aux bases de données et outils développés par l'IRAP et ses collaborateurs. La base de données CosmicPAH\_IRDB (en construction) est dédiée aux spectres infrarouges anharmoniques (expériences et théorie). Cette base ainsi que la base "Theoretical Spectral database of polycyclic aromatic hydrocarbons" apportent les données fondamentales pour la modélisation de la photophysique des PAH dans les environnements astrophysiques. Il est prévu de développer la base LAIBrary rassemblant une bibliothèque de spectres synthétiques d'émission IR de PAHs dans un environnement astrophysique donné afin de faciliter l'analyse des AIB. Un effort est également dédié à interfacier les bases moléculaires avec le portail VAMDC<sup>12</sup>. Enfin, le portail CosmicPAH pointe sur la base de données AROMA<sup>13</sup> dédiée à l'analyse par spectrométrie de masse d'analogues de poussières cosmiques et d'échantillons extraterrestres comme les météorites. ATOMIS<sup>14</sup> est un outil de recherche dans les archives ALMA (associé à des visualisateurs de cubes avec les outils Aladin et Cassis) développé à l'IRAP. Enfin, la base de données STOPCODA<sup>15</sup> regroupe les propriétés optiques des analogues de grains dans des conditions proches du MIS est maintenue à l'IRAP.

---

<sup>3</sup> <https://astrochem-tools.org/>

<sup>4</sup> <https://www.sshade.eu>

<sup>5</sup> <http://cassis.irap.omp.eu>

<sup>6</sup> <https://www.ias.u-psud.fr/DUSTEM/> et <https://dustemwrap.irap.omp.eu>

<sup>7</sup> <https://ism.obspm.fr/>

<sup>8</sup> <https://emaa.osug.fr/>

<sup>9</sup> <https://home.strw.leidenuniv.nl/~moldata/>

<sup>10</sup> <https://lsd.univ-lille.fr/>

<sup>11</sup> <https://cosmic-pah.irap.omp.eu/>

<sup>12</sup> [https://portal.vamdc.org/vamdc\\_portal/home.seam](https://portal.vamdc.org/vamdc_portal/home.seam)

<sup>13</sup> <https://aroma.irap.omp.eu/>

<sup>14</sup> <https://atomis.irap.omp.eu/>

<sup>15</sup> <https://wiki.sshade.eu/ssshade/databases/stopcodas>

**Vu de l'extérieur, l'ensemble des services de bases de données développés et maintenus par la communauté PCMI peut sembler dispersé car nombreux. Chaque service est cependant unique en termes de type de données et de mode d'utilisation, requérant des formats et des outils différents. Un inventaire de l'ensemble de ces outils devrait permettre une meilleure visibilité des données disponibles à la communauté. Il nous semble également essentiel de garder un lien fort entre ces services et la communauté de façon à coller au mieux aux besoins de l'astrophysique. Ici les futures Actions Thématiques peuvent jouer un rôle de coordination.**

La nouvelle ANO-cc (Codes communautaires en Astronomie et Astrophysique) est actuellement composée de deux codes dont un purement porté par la communauté PCMI : le code PdR de Meudon. Code développé depuis le milieu des années 1990 à l'Observatoire de Paris, il permet de simuler la physique et chimie dans les régions de Photodissociation. Le deuxième code, RAMSES, initialement développé pour le suivi de la formation des grandes structures et des galaxies, est désormais un code flexible multi-physique pouvant traiter les écoulements magnéto-hydrodynamiques auto-gravitants, utilisé pour étudier la formation et l'évolution physico-chimique des structures du MIS, des échelles galactiques aux disques protoplanétaires. D'autres codes développés et maintenus principalement en France pourront à l'avenir prétendre à la labellisation ANO-cc comme le code astronomique Nautilus qui simule de façon détaillée la chimie dans le gaz et à la surface des grains du milieu interstellaire.

La communauté PCMI participe à la préparation de nouveaux instruments d'observations via le service ANO2 CONCERTO qui vise à mettre en place un spectromètre sub-millimétrique/millimétrique sur le télescope APEX au Chili.

Au sein des services ANO3, la communauté est particulièrement active sur les SNO IRAM (NOEMA, NIKA2, 30m) ainsi que le SNO ALMA/Regional Center et le SNO "Observatoires au Chili".

## 4. Moyens d'observations, de calculs scientifiques et de mesures expérimentales

Les thématiques de recherche de PCMI s'appuient en grande partie sur l'exploitation de grandes infrastructures de recherche, pour l'observation depuis le sol, en haute atmosphère (observatoire embarqué SOFIA<sup>16</sup>, ballon stratosphérique PILOT<sup>17</sup>), et dans l'espace ; pour la modélisation et la simulation au travers du calcul scientifique à haute performance ; et pour l'étude des processus microphysiques à l'aide de moyens expérimentaux lourds.

### 4.1 Grands instruments d'observation au sol

La communauté PCMI utilise un grand nombre d'instruments au sol, principalement permettant l'observation dans le domaine millimétrique et submillimétrique. Parmi les plus utilisés, on trouve tous les instruments de l'IRAM (antenne de 30m, NOEMA, NIKA2-Pol). L'interféromètre ALMA est également un des instruments phares de la communauté. De

---

<sup>16</sup> <https://science.nasa.gov/mission/sofia/>

<sup>17</sup> <https://www.irap.omp.eu/project/pilot/>



façon plus ponctuelle, d'autres antennes radio dans d'autres pays sont également utilisées : TRAO (Corée du sud), VLA (USA), Nobeyama 45m (Japon), Delingha 14-m (Chine), YEBES (Espagne), Apex (Chili) et Effelsberg (Allemagne). D'autres télescopes dans le domaine optique et infrarouge comme le VLT et VLTI (MUSE, MATISSE) sont utilisés notamment pour l'observation des disques protoplanétaires.

### **ELT**

Les questions scientifiques associées à PCMI qui seront abordées par l'ELT sont liées à la caractérisation de la poussière et des traceurs du gaz chaud dans les objets compacts (par exemple les disques externes et les centres de galaxies) ainsi qu'à la dynamique de ces objets. **Le CS de PCMI continue à mobiliser la communauté autour de l'ELT en co-organisant les ateliers annuels ELT à la SF2A.**

### **SKA**

Le futur observatoire SKA, instrument phare de la radioastronomie des prochaines décennies, fournira un grand volume de données d'intérêt pour la communauté PCMI. En visant les basses fréquences et en donnant accès à une résolution et une sensibilité inégalées, ces données seront complémentaires des observations en millimétrique et submillimétrique pour l'astrochimie et la formation stellaire (détection de longues chaînes carbonées et de PAHs). SKA, ses précurseurs (ASKAP et MeerKAT) et l'instrument LOFAR à plus basses fréquences encore permettront également de sonder la turbulence magnétisée et sa dissipation dans le milieu ionisé et dans le milieu atomique diffus, aux premiers stades de la formation des étoiles.

### **CTA**

Le Cerenkov Telescope Array (CTA) est un ensemble de 64 télescopes gamma au sol, qui permettra la caractérisation des rayonnements de haute énergie présents dans l'Univers, d'en déterminer les sources et d'identifier les processus d'accélération des rayons cosmiques. Ceux-ci peuvent jouer un rôle majeur dans la régulation du processus de formation stellaire, et il est donc important de comprendre où ils sont accélérés, comment ils se propagent et interagissent avec le milieu interstellaire, donnant lieu à l'émission de rayonnement gamma. Les observations de CTA devraient permettre de mieux comprendre la relation entre les particules de haute énergie et le processus de formation stellaire, en ciblant des régions couvrant plus de six ordres de grandeur dans le taux de formation d'étoiles (nébuleuse de la Carène, Cygnus, Westerlund 1, M31, M82, Arp 220).

## **4.2 Missions spatiales**

### **JWST**

Depuis 2021, la communauté soumet de nombreuses demandes de temps d'observation sur le satellite JWST. Afin de quantifier cette implication, nous avons fait un sondage auprès de la communauté dont l'analyse est donnée dans l'annexe A2. Elle est également fortement impliquée dans deux programmes *Early Release Science* (ERS, PDRs4all et IceAge, voir section 4) et désormais dans des programmes de temps ouvert.

**Il semble essentiel de continuer à soutenir (notamment par le biais du CNES) les équipes participant à l'exploitation des données JWST.**

### ***NewAthena***

La communauté PCMI est intéressée par le futur satellite NewAthena pour l'étude des différentes phases du milieu interstellaire (dynamique du gaz ionisé chaud, couplage et mélange entre les phases chaudes, tièdes et froides, impact de la poussière dans le refroidissement du gaz chaud, processus d'érosion des grains interstellaires dans les plasmas chauds, et abondances élémentaires). La communauté PCMI possède une forte expertise en astrophysique de laboratoire dans le domaine des X, nécessaire à l'interprétation des futures observations NewATHENA. On peut citer par exemple la spectroscopie d'ions polyélectroniques dont certaines données manquent encore ou les processus de photo-érosion des grains ou photo-dissociation des molécules dans le domaine du X. En 2021, le CS de PCMI a organisé un atelier au CNES autour de NewAthena<sup>18</sup>.

**La mobilisation de la communauté PCMI autour de cette mission doit cependant continuer à se faire.**

### ***LiteBIRD***

Le projet LiteBIRD (JAXA/ESA) a pour ambition de fournir une carte du ciel polarisé dans le domaine micro-ondes au même niveau de sensibilité que ce que la mission Planck a obtenu en intensité totale. Si son objectif principal est la détection des modes B primordiaux de la polarisation du fond diffus cosmologique, la mission fournira également des informations sur la population des grains interstellaires de notre Galaxie et sur son champ magnétique. Le niveau de contamination du signal cosmologique par ces avant-plans galactiques rend d'ailleurs l'implication de la communauté PCMI indispensable à la réussite de la mission. **Pour cela, la communauté PCMI continue d'apporter son soutien à ce projet.**

### ***Futur observatoire dans le domaine de l'infrarouge lointain***

L'arrêt du projet SPICA par l'ESA et l'abandon du projet OST par la NASA au profit de LUVOIR, suite aux recommandations du "decadal survey" 2020, laissent la communauté astrophysique, et en particulier PCMI, sans perspective de mission spatiale dans l'infrarouge lointain pour succéder à Herschel et Akari. Cette gamme de longueur d'onde est pourtant essentielle pour observer l'évolution de la matière et en particulier des PAH et des poussières dans les disques protoplanétaires autour des jeunes étoiles, avec comme point de mire la transition vers les disques de débris et la formation des exoplanètes. Les capacités polarimétriques prévues pour SPICA avaient également comme objectif d'étudier l'interaction entre la matière et le champ magnétique dans ces objets.

**La communauté PCMI réitère son soutien à la définition d'une mission ambitieuse, potentiellement appuyée sur l'un des concepts en phase précoce de développement (PRIMA<sup>19</sup>, FIRSST, SALTUS), pouvant couvrir ces longueurs d'onde, en imagerie, spectroscopie haute résolution et polarimétrie.**

## **4.3 Centres de calcul**

Les activités PCMI, concernant à la fois les simulations numériques astrophysiques et les calculs de physico-chimie, nécessitent l'utilisation de centres de calculs. Les principaux centres utilisés (gérés par les OSU, les universités ou le CNRS) sont :

---

<sup>18</sup> <https://pcmi-observ-21.sciencesconf.org/>

<sup>19</sup> <https://prima.ipac.caltech.edu/>

- Mésocentre CALMIP pour la région Occitanie (CNRS)
- Centre de calcul GRICAD (CNRS, l'Université Grenoble Alpes, Grenoble-INP et INRIA)
- MesoPSL (PSL)
- Mésocentre de calcul Intensif Aquitain MCIA (Université de Bordeaux)
- Genci centre de calcul national: CINES (France Universités), l'IDRIS (CNRS) et le TGCC (CEA)

Certaines équipes utilisent également des moyens de calculs européens via le centre PRACE (*partnership for advanced computing in Europe*) pour des calculs HPC. La mise en place et l'ouverture de ces centres de calculs ont été essentiels pour développer les aspects numériques de la discipline.

#### 4.4 Plateformes expérimentales

Les activités de PCMI sont intrinsèquement liées à l'astrophysique de laboratoire, à la fois sur des équipements à l'échelle d'un groupe de recherche et sur les grandes infrastructures. Les dispositifs sont conçus dans de nombreux laboratoires de recherche pour répondre à des questions clés telles que la détection de nouvelles molécules, l'évolution de la complexité de la matière, les mécanismes de formation et évolution de la poussière ou l'interaction lumière/matière interstellaire. A travers des efforts continus, ces installations permettent de comprendre, de contraindre et éventuellement de quantifier les processus physico-chimiques à l'échelle moléculaire en phase gazeuse, dans les solides, et à l'interface.

Une fraction significative des instruments mis au point par la communauté est accueillie sur des grandes infrastructures de recherche (Table A.6). On peut notamment mentionner le synchrotron SOLEIL (en particulier la ligne de lumière DESIRS qui héberge une grande diversité d'instruments) ou l'accélérateur d'ions lourds du GANIL. La communauté fait également appel aux infrastructures de recherche délocalisées telle qu'Infranalytics pour l'analyse chimique d'échantillons (synthétiques ou extra-terrestres) parmi lesquelles on compte la spectrométrie de masse de très haute résolution, la résonance paramagnétique électronique, ou encore la résonance magnétique nucléaire. Hors hexagone, la communauté a également recours à des installations similaires (accélérateur d'ions du GSI en Allemagne par exemple) mais aussi absentes du territoire tels que lasers à électrons libres (e.g. FELIX - Pays Bas) ou les anneaux électrostatiques cryogéniques de stockage d'ions (tels que DESIREE-Suède ou CSR-Allemagne).

Les objectifs visés par l'ensemble de ces équipements sont de différents ordres. Ils peuvent être employés pour 1) produire et isoler des échantillons, 2) caractériser des propriétés, 3) identifier, mesurer des processus.

La moitié environ des installations s'attache à explorer la phase gazeuse. On peut distinguer tout d'abord les dispositifs de très haute résolution, dédiés à la spectroscopie moléculaire en particulier pour couvrir le domaine (sub-)millimétrique et infrarouge. Des plateformes VUV sont aussi disponibles notamment pour extraire les sections efficaces absolues (LISA). D'autres types d'expériences en phase gazeuse étudient les propriétés photophysiques de petites molécules, de macromolécules ou de nanoparticules. Enfin une autre classe

d'instruments quantifie les collisions réactives et inélastiques sur une large gamme de températures.

Plusieurs spectromètres ont récemment émergé et sont associés à une grande variété de sources allant de l'écoulement supersonique aux sources de radicaux. Parmi les derniers développements, on pourra également évoquer le couplage d'un faisceau de nanoparticules isolées à un faisceau d'ions lourds (NanoCR-ISMO/IJCLab)...

Les expériences sur la phase solide peuvent être divisées en deux catégories. On peut tout d'abord distinguer les sources et les installations complexes développées pour l'étude de la formation/ évolution/coagulation d'une grande variété d'analogues de poussières. Une autre série d'installations est consacrée à l'étude d'analogues de poussières glacées: origine de la matière organique volatile, chimie de surface froide, interactions gaz-surface, (photo-)chimie de cœur.

Parmi les évolutions majeures en cours, on pourra retenir l'installation LITE-PhLAM pour l'analyse terahertz des espèces désorbées des glaces, l'expérience SPICES-VMI pour imager les molécules désorbant des analogues de glaces, ou encore le dispositif GOrbi-PIIM pour l'analyse d'échantillons et d'analogues extraterrestres associant chromatographie en phase gazeuse et Orbitrap. ...

Enfin, nous devons souligner le rôle important d'expériences qui produisent des analogues de poussières, des précurseurs ou des molécules cibles à utiliser dans de nombreuses installations citées précédemment. La production est généralement réalisée dans des installations expérimentales non nommées. Parmi les acteurs importants, nous pouvons citer l'ISCR qui synthétise des molécules pour la spectroscopie rotationnelle.

La Table A.7 liste les installations développées au sein des laboratoires, en grande majorité, en dehors de l'INSU. On ne peut qu'être frappé par le nombre (plus d'une quarantaine), la diversité et la sophistication croissante des installations. C'est d'autant plus remarquable qu'un certain nombre d'instruments ne sont pas répertoriés de manière individuelle. C'est le cas par exemple de plusieurs spectromètres micro-onde développés à l'ISMO ou au PhLAM.

Dans ce contexte, le soutien technique et financier nécessaire pour réaliser et maintenir la qualité de cette activité expérimentale devient critique. Il est essentiel de maintenir à un niveau adéquat ce parc instrumental d'expériences d'astrophysique en laboratoire, car il est unique en Europe.

Ceci est particulièrement important dans les laboratoires de l'INSU où le soutien aux expériences d'astrophysique de laboratoire n'est pas automatique par le biais d'un soutien de base standard, contrairement aux laboratoires de l'INP et de l'INC. La mise en place d'une expérience de physico-chimie de pointe nécessite souvent 5 à 8 ans pour devenir mature, avec des besoins de financement importants. Organiser des réseaux à l'échelle hexagonale et européenne afin d'ouvrir l'utilisation des expériences des PI volontaires à d'autres groupes nationaux et internationaux permettrait une meilleure utilisation de l'investissement et de l'expertise. Les redevances versées par les utilisateurs externes permettraient également de contribuer à la viabilité à long terme des équipements développés dans le cadre de projets de grande envergure mais de longue durée, financés par des agences nationales et/ou européennes (ANR, ERC, etc.). En outre, ce mode de fonctionnement contribuerait à la diffusion des connaissances expérimentales de différents groupes aux échelles nationale et internationale.

Les futurs projets d'organisation de l'astrophysique de laboratoire au niveau européen devraient prendre en compte ces aspects.

## 5. Science des données

Le développement extrêmement rapide des méthodes dites d'intelligence artificielle (IA) et des approches qui leur sont associées ne pouvait laisser indifférente la communauté PCMI, qui s'en est donc emparée, de différentes manières.

L'analyse de grands volumes de données, issues par exemple de relevés de spectro-imagerie à large bande et grande dynamique spatiale, a ainsi bénéficié des méthodes d'apprentissage non supervisé (« clustering », analyse en composantes principales, décompositions gaussiennes) comme supervisé (classification et régression) pour identifier les meilleurs traceurs des conditions physiques dans le MIS (IRAM, LERMA, IPAG, LAB). D'autres développements visent à optimiser la fusion des données issues de différents instruments (en particulier imageurs et spectro-imageurs, par exemple sur le JWST) pour obtenir un modèle des régions observées combinant les résolutions spatiales, spectrales, et champs de vue des deux types d'instruments, en traitant un problème inverse utilisant des modèles instrumentaux détaillés (IAS, IRAP, AIM, LESIA). Dans les années à venir, les volumes de données toujours croissants (SKA) imposeront rapidement l'utilisation de méthodes « intelligentes » de traitement statistique pour les exploiter directement en sortie des instruments (PEPR NumPEX).

Par ailleurs, de nouvelles méthodes de caractérisation statistique de textures complexes, empruntant à la science des données mais sans apprentissage, permettent désormais de décrire les structures filamenteuses du MIS avec une fiabilité que n'autorisent pas les outils usuels tels que le spectre de puissance (LPENS). Ces nouveaux outils ouvrent la voie à différentes applications fondamentales pour la physico-chimie du MIS (comparaison quantitative des observations avec les simulations numériques, séparation de composantes fondée sur les différences de textures, débruitage statistique, développement de modèles complexes du MIS fondés sur les données multi-longueur d'onde et multi-échelles, ...), mais aussi dans le cadre de problèmes cosmologiques pour lesquels les émissions galactiques complexes représentent des avant-plans (polarisation du CMB, signal de la réionisation). Ces développements s'accompagnent d'un meilleur traitement statistique des grands volumes de données d'observation et des grilles de modèles numériques, mettant l'accent sur une approche bayésienne autorisant non seulement l'estimation des paramètres mais également celle de leurs intervalles de confiance, à la manière de ce qui se fait depuis longtemps dans d'autres domaines (LERMA, IRAM, IPAG). De telles approches sont également mises en œuvre dans les thématiques liées à la chimie quantique, avec un large échantillonnage statistique des populations de nanograins pour explorer la dynamique réactionnelle de systèmes carbonés complexes et leurs signatures spectrales dans l'infrarouge (ISMO).

Un dernier aspect concerne le développement d'émulateurs de codes numériques complexes ou de certains de leur composants (IRAM, IRAP, LPENS, LERMA), permettant d'envisager des accélérations notables et l'exploration de vastes espaces de paramètres sans avoir recours à des simulations coûteuses en temps de calcul. De telles approches

sont particulièrement prometteuses pour faire sauter le point bloquant qu'est depuis longtemps l'inclusion d'une physico-chimie locale détaillée dans les grandes simulations (M)HD 3D du milieu interstellaire et de la formation d'étoiles. Elles doivent être poursuivies en parallèle du développement des codes HPC sur les nouvelles architectures machine (GPU, FPGA), lesquels doivent mettre l'accent sur les aspects « communautaires » pour assurer leur dissémination large (ateliers, soutien aux utilisateurs) et éviter les duplications d'efforts.

Tous ces développements ont pour origine des collaborations étroites entre les équipes de laboratoires PCMI et des équipes spécialisées dans la science des données (CRISAL, L2S, CSD ENS, Grenoble INP, Centrale Marseille), soulignant l'importance des approches interdisciplinaires pour avancer notre compréhension de la physico-chimie du MIS.

## 6. Animation et diffusion

### 6.1 Organisation d'écoles et de conférences

L'animation scientifique est un aspect essentiel de PCMI. En raison du caractère très interdisciplinaire du programme, les événements permettent à des chercheurs d'horizons très variés de se rencontrer et confronter/compléter leurs points de vue. L'animation menée par le programme de manière directe ou avec son appui peut prendre plusieurs formes. La première grande catégorie d'actions est l'organisation de colloques bisannuels pour discuter des progrès récents et des perspectives à court terme. Le colloque PCMI de 2020, initialement prévu au Havre<sup>20</sup>, a été maintenu en mode virtuel avec une participation élevée de 210 personnes. Parmi les nombreux sujets d'actualités abordés, le lien avec l'exobiologie a été mis en avant. Le colloque PCMI de Paris<sup>21</sup> en Oct. 2022 a également connu une forte affluence en rassemblant 176 personnes, cette fois-ci en présentiel. Ce colloque a été l'occasion de partager les premiers résultats JWST. Le colloque de 2024 se tiendra à Bordeaux<sup>22</sup>.

Le programme s'illustre aussi par l'organisation (ou le soutien à l'organisation via réponse à l'appel à projets) de nombreuses écoles et ateliers thématiques couvrant aussi bien des aspects de physique et chimie fondamentales, que des thèmes astrophysiques tels que la formation stellaire et planétaire. Parmi les actions de formation, on pourra ainsi mentionner les écoles d'été internationales sur le milieu interstellaire des galaxies (mode virtuel, 12-23 Juil. 2021 ; Banyuls sur Mer, 25 Juil.-2 Août 2023) ou l'école d'hiver des Houches d'astrophysique de laboratoire autour de l'évolution de la matière cosmique (5-10 Fév. 2023) qui ont toutes connu un vif succès. Une liste non exhaustive des ces actions d'animation sont données dans la Table A.4. Sollicités par le programme, plusieurs ateliers ont été organisés sur le temps du colloque bisannuel (voir liste en Annexe) mais également en dehors sur des temps plus long pour traiter des observatoires terrestres et spatiaux pour le programme 'Which observatories for PCMI' (Paris, 18-21 Oct. 2021), ou encore la fraction d'ionisation du MIS 'The ionisation fraction of the interstellar medium' (Le Havre, 18-19 Nov. 2020). Sur un format original plus long, mêlant 'hands-on' et exposés informels, les éditions

---

<sup>20</sup> <https://pcmi2020lehavre.sciencesconf.org/>

<sup>21</sup> <https://pcmi2022paris.sciencesconf.org/>

<sup>22</sup> <https://pcmi2024bordeaux.sciencesconf.org/>

II et III de Core2disk abordent le destin de la poussière interstellaire des noyaux préstellaires aux nébuleuses solaires et le rôle du champ magnétique dans la formation des disques, l'évolution et la formation des planètes.

A l'occasion des journées de la Société Française d'Astronomie et d'Astrophysique (sf2a), le programme PCMI organise des sessions thématiques, souvent en lien avec d'autres programmes, notamment sur l'ELT. A noter que dans le cadre de ces journées, un exposé invité est donné par un membre de notre communauté (proposé par nous) en session plénière (voir Table A.5 pour la liste des orateurs de 2019 à 2024).

Les ateliers annuels sur une journée au CNES en lien avec l'exobiologie et les missions spatiales continuent à animer la communauté sur des sujets à l'interface PCMI/PNP/SFE (e.g. 'Quels liens unissent la chimie des objets interstellaires et la chimie prébiotique ?' 2020, 'Premiers résultats de JWST et dernières nouvelles de Ryugu', 2023). Co-organisé avec le GDR-EMIE, l'atelier très fécond sur les glaces astrophysiques associant observations, modèles, expériences de laboratoires (Paris, 3-4 Oct. 2019) participe à la structuration de la communauté et à la préparation de JWST.

Le programme se fait enfin le relai d'actions sur les thématiques qu'il porte, tels que les ateliers sur les processus physico-chimiques d'intérêt astrophysique à St-Florent (2019, 2021, 2023), l'atelier TUMLA sur la philosophie de l'astrochimie à Rennes (6-7 Juil. 2022) ou encore le Tour de France EMIE d'Astrophysique de Laboratoire (Printemps 2024).

## 6.2 Diffusion des savoirs

Les membres de PCMI sont extrêmement actifs dans la médiation et la diffusion des sciences. Ils participent fortement à l'accueil de collégiens et lycéens, à la présentation des métiers de la recherche (Opération Déclics), à la fête de la Science et à la nuit européenne des chercheurs. Nos collègues participent également de manière individuelle à des actions très populaires comme Pint of Science, ou aux festivals d'astronomie comme ceux très reconnus de Tautavel, Fleurance...

Plutôt que de présenter un catalogue indigeste et difficilement exhaustif, cette section vise à illustrer quelques-unes des autres actions menées. La diffusion des sciences fait ainsi une part importante à la transmission orale via des conférences publiques avec de fortes affluences sur des thématiques très variées partant des origines (Université du Temps Libre, Marseille, 'Aux Origines de la vie - Partie 1: Définir la vie', G. Danger, Mars 2023), passant par la physico-chimie du MIS (Espace de Sciences, Saint-Malo, 'Des poussières interstellaires aux particules atmosphériques'<sup>23</sup>, S. Le Picard, Fév. 2022), poursuivant avec l'astrophysique de laboratoire (Cité de l'Espace, Toulouse, 'Voyage dans le nanocosmos : de l'astronomie infrarouge à la physique de laboratoire', C. Joblin, Déc. 2021), et terminant par les (dernières) observations astronomiques (Académie des Sciences, 'Premières révélations du télescope JWST'<sup>24</sup>, E. Habart, Déc. 2022 ; Astronomie et Lumières du Campus d'Orsay, 'L'origine des étoiles et des planètes vue par le JWST'<sup>25</sup>, B. Tabone Avr. 2023).

---

<sup>23</sup> <https://www.espace-sciences.org/conferences/des-poussieres-interstellaires-aux-particules-atmospheriques-1>

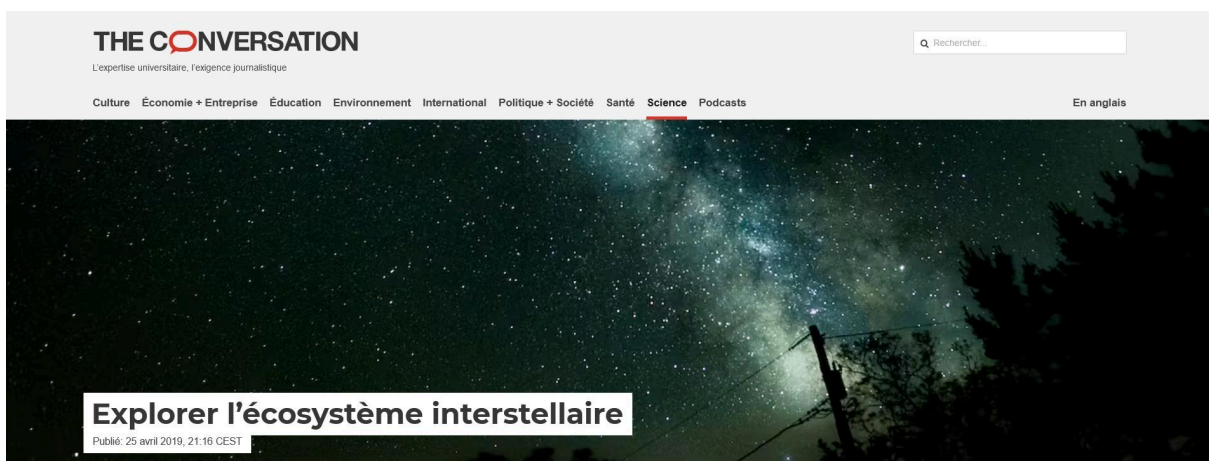
<sup>24</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=jxl1Jspry6M>

<sup>25</sup> [https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=YSocL\\_2Cr8Y](https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=YSocL_2Cr8Y)



Cette mission s'effectue aussi via la participation à des émissions radiophoniques (Nuage d'Oort : c'est vous là-bas dans le noir ?<sup>26</sup>, E. Dartois, La Méthode Scientifique, France Inter, Mars 2022) ou à travers la fabrication de vidéos éducatives (Fabriquer les briques du vivant<sup>27</sup>, V. Vinogradoff, 2021).

L'activité de dissémination des connaissances est conduite en parallèle via la publication de livres ou de chapitres d'ouvrages à destination du grand public ('De l'astrochimie à l'exobiologie : un fil directeur vers la vie ; Étonnante Chimie', Y. Ellinger & J.-C. Guillemin, CNRS Editions 2021 ; 'Étonnants Infinis', E. Dartois, CNRS Editions 2022 ; 'Étonnante Physique', E. Bron, M. Gerin, M.-A. Martin-Drumel, CNRS Editions 2023).



<sup>26</sup>

<https://www.radiofrance.fr/franceculture/podcasts/la-methode-scientifique/nuage-d-oort-c-est-vous-la-bas-dans-le-noir-1966901>

<sup>27</sup> <https://astrobioeducation.org/fr/video/5>



Enfin, la communauté publie régulièrement des articles ('Explorer l'écosystème interstellaire', The Conversation, V. Leboutteiller, F. Galliano, P. Hennebelle, 2019) et des tribunes dans la presse généraliste ('La science hollywoodienne annonçant la vie sur Mars ou Vénus est construite sur des paradigmes dépassés', L. D'Hendecourt, Le Monde, 3 Oct. 2020).

### 6.3 Site web PCMI et mailing list

En 2022, nous avons mis en ligne un nouveau site web<sup>28</sup> hébergé par le CNRS (géré par la DR15). Le site regroupe les informations de base du programme national. Associé à cet outil, nous avons une liste d'email de diffusion des nouvelles en lien avec les thématiques de PCMI et la vie institutionnelle. C'est le mode de communication principal avec la communauté. Les courriels sont envoyés de façon régulière suivant les besoins et stockés sur le site web<sup>29</sup>. Au 25 juillet 2023, la liste comprend 418 abonnés.

### 6.4 Enseignement

La communauté PCMI, forte de nombreux enseignants-chercheurs, occupe une place importante et active dans l'enseignement supérieur en physique, chimie, et astrophysique. La physique et la chimie du milieu interstellaire sont enseignées dans les universités françaises et étrangères en licence, master et école doctorale. Les programmes de licence sont généralement axés sur les éléments fondamentaux, avec parfois une introduction générale à l'astrophysique, et il y a souvent peu de place pour la physique et la chimie du milieu interstellaire (ou comme domaines d'application de concepts vus en licence de physique ou de chimie), alors même que les étudiants choisissent leur programme de master à la fin de leurs études de premier cycle. Pour les étudiants ayant choisi la chimie, il n'y a pas, à de rares exceptions près, d'introduction à l'astronomie ou à la chimie du MIS.

Il y a 16 masters en astrophysique répertoriés sur le site de la SF2A<sup>30</sup>. Si quatre sont situés en région parisienne et 12 en province, avec un master partagé entre les universités de Lyon et Montpellier, la plupart des étudiants sont en Ile-de-France. En province, à l'exception de Toulouse, les effectifs sont faibles, voire sous-critiques. Si certains masters sont spécialisés dans un domaine de l'astrophysique, ceux non-spécialisés en astrophysique (comme par exemple des masters avec un enseignement en optique, en physique atomique et moléculaire ou en chimie en relation avec l'astrophysique de laboratoire) l'offrent en complément d'une formation en physique fondamentale en première année, ce qui peut être positif par rapport à l'aspect pluridisciplinaire de la recherche du PCMI.

En termes d'attractivité, l'étude du milieu interstellaire permet de puiser dans plusieurs viviers (physique, chimie, astrophysique). Néanmoins, elle se situe entre les thèmes les plus visibles et les plus attractifs pour le grand public, et donc les jeunes étudiants, tant en astrophysique (comme la cosmologie ou les exoplanètes) qu'en physique et chimie (comme l'optique quantique ou l'exobiologie). Il s'avère souvent difficile de promouvoir un bon sujet de doctorat ou même un stage de master 2, et encore plus difficile de passer les processus

---

<sup>28</sup> <https://www.pcmi.cnrs.fr/>

<sup>29</sup> <https://www.pcmi.cnrs.fr/newsletter/>

<sup>30</sup> <https://stages-masters.sf2a.eu>

de sélection des écoles doctorales. Ce problème d'attractivité est parfois résolu en augmentant le vivier de recrutement vers les étudiants étrangers. Il pourrait également être atténué en soulignant la grande variété de problèmes passionnants que propose l'étude du MIS, et le fait que celui-ci est une clef pour comprendre l'évolution de nombreux objets dans l'univers (des galaxies aux exoplanètes) en reliant les échelles infiniment petites et infiniment grandes, dans une recherche qui englobe des domaines pluridisciplinaires. De plus, il faut souligner que le milieu interstellaire est un immense laboratoire qui offre aux physiciens et aux chimistes la possibilité d'étudier des états exotiques de la matière et nécessite des efforts expérimentaux ou numériques et théoriques de pointe pour les comprendre en profondeur. Il est donc important de faire apparaître clairement auprès des étudiants les différents thèmes de recherche de PCMI, en particulier les défis sous-jacents en physique et chimie et leur impact en astrophysique, le plus tôt possible, idéalement en licence voire en master 1 ou début master 2, bien avant que les étudiants ne s'engagent dans un choix spécifique de stage de master ou de doctorat.

Au-delà de ces points spécifiques à PCMI, d'autres difficultés, communes à tous les domaines scientifiques, doivent également être prises en compte. Une partie de la première année de master est consacrée au rattrapage des prérequis de licence souvent manquants, ce qui a pour conséquence de réduire l'enseignement en master, voire de transférer les prérequis du master en première année de doctorat. Ceci est encore plus vrai pour les étudiants ne venant pas d'un master d'astrophysique (physique, chimie, mathématiques, informatique). Puisque dans le même temps de plus en plus d'obligations pèsent sur le doctorat (cours doctoraux, professionnalisation, enseignement), le format français de doctorat en 3 ans réduit drastiquement le temps effectivement consacré à la recherche, par rapport aux formats de doctorat en 4 ou 5 ans que l'on peut trouver à l'étranger, ce qui a des conséquences sur la compétitivité sur le marché post-doctoral ou sur les emplois en dehors de la recherche académique. Pour être plus attractif, le panel d'emplois en dehors de la recherche académique doit également être mis en avant par l'acquisition de compétences au cours du doctorat (analyse de données, intelligence artificielle, traitement du signal, simulation numérique, conception de montages expérimentaux, etc.).

Il est donc important que les membres du PCMI continuent à s'impliquer dans le pilotage des formations et dans l'accueil de stagiaires tant en licence qu'en master, et plus globalement dans la diffusion scientifique *extra-curriculum*. Renforcer le lien entre le travail des physiciens et des chimistes et les applications astrophysiques de leur travail est essentiel pour attirer les étudiants en physique et en chimie. Le PCMI doit continuer à soutenir et à organiser des écoles pour les doctorants ou les post-doctorants et à veiller à ce que les supports de cours (présentations, vidéos, travaux pratiques) soient mis à la disposition de la communauté sur le long terme par le biais d'un espace de stockage dédié ou de chaînes en ligne<sup>31</sup>. Ce matériel est une mine d'or pour enseigner à un doctorant débutant ou à un stagiaire de master. Les membres du PCMI doivent également poursuivre leurs actions de sensibilisation auprès des jeunes (collégiens et lycéens), des enseignants et du grand public, en particulier dans un contexte où la science est de moins en moins enseignée et peut sembler moins attrayante. Dans ce contexte, l'effort global pour faire connaître et rendre attrayants les nombreux défis scientifiques de la communauté PCMI doit être continuellement mis à jour.

---

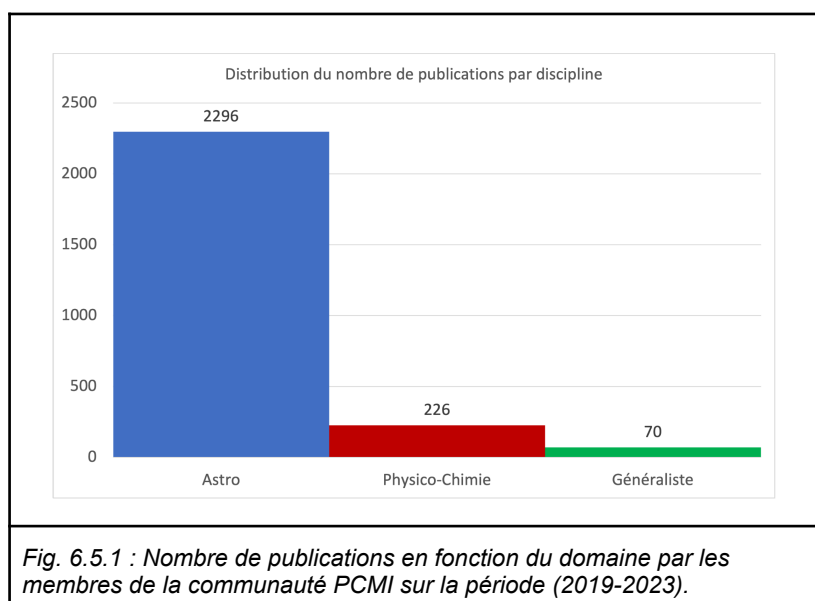
<sup>31</sup> <https://www.youtube.com/@pcmifrance8906>

## 6.5 Aspects bibliographiques

De façon à quantifier la production scientifique française en lien avec les thématiques du PCMI, nous avons utilisé la méthode suivante. Une liste de potentiels contributeurs à la thématique a été créée à partir de la liste de diffusion d'email. Nous avons finalisé une liste d'environ 400 chercheur(e)s des différents domaines. Ces noms ont ensuite été cherchés dans ADS avec un filtre sur l'affiliation (qui devait inclure "France") et un filtre sur la période (2019-2023).

Nous obtenons ainsi une liste d'environ 2600 articles (Fig. 6.5.1) et avons estimé un taux de faux positifs de l'ordre de 20% (basé sur le même type d'analyse réalisé lors de la précédente prospective). La liste des journaux issus de cette sélection et donc dans laquelle la communauté publie est donnée dans la Table A.10. Environ 88% de ces publications ont été faites dans les revues d'astrophysique, 9% dans des revues spécialisées en physico-chimie et 3% dans des revues généralistes. Par rapport à la précédente prospective, le nombre de publications dans des revues de physico-chimie a diminué au profit des revues d'astrophysique (période 2013-2018: 22% en physico-chimie et 74% en astrophysique). Ce changement peut refléter une meilleure intégration des résultats d'astrophysique de laboratoire dans les revues d'astrophysique.

Dans cette liste, nous avons également cherché les articles mentionnant PCMI dans les remerciements. Ils sont au nombre de 450 (soit 17%). On peut supposer que la mention de remerciements à PCMI ait été oubliée dans un certain nombre de publications, mais cette différence est surtout le reflet du fait que la communauté PCMI est extrêmement active et ne dépend pas exclusivement des financements apportés par le programme national.



## 7. Questions scientifiques et faits marquants

Les questions scientifiques prioritaires du programme sont développées suivant trois axes exposés ci-dessous. Communes à ces trois axes, certaines méthodes de travail ont évolué, notamment grâce à l'amélioration des outils d'observation et de simulation, qui bénéficient en particulier de la mise à disposition par la communauté PCMI des données de laboratoire dans des bases référencées (dont certaines sont des SNOs). Le caractère

fondamentalement multi-échelles et non-linéaire des systèmes physiques et chimiques étudiés est au cœur des défis affrontés par la communauté PCMI, tant du côté des données observationnelles que des modèles numériques, et désormais à l'interface entre ces deux aspects, dans la comparaison entre observations et simulations. Ces défis ont impliqué le développement de nouvelles méthodes d'analyse statistique avancées, élaborées en étroite collaboration avec des équipes de science des données (voir section 5). Ces approches deviennent indispensables pour faire face à l'inflation des volumes de données d'observation et de modèles numériques.

## 7.1 Structures du MIS, de la Galaxie aux galaxies externes et à la cosmologie.

*Questions : Quels sont les processus physiques qui régissent les structures complexes observées dans le MIS (filaments, coquilles, cœurs) ? Peut-on déterminer les différents rôles de ces processus en comparant observations et simulations numériques ? Nos modèles sont-ils généralisables aux galaxies externes, tant dans notre voisinage qu'à haut redshift ?*

La communauté PCMI s'intéresse particulièrement à ces questions liées à la formation de structures complexes, des échelles galactiques jusqu'à la formation des disques protoplanétaires et des jeunes étoiles, où les thématiques de recherche du programme rejoignent celles du PNPS et du PNP. Elle étend ces questions à la formation stellaire dans les galaxies, à l'évolution de celles-ci, et souligne leur importance jusque dans des thématiques cosmologiques, à l'interface avec le PNCG.

Pour y répondre, la communauté s'appuie en premier lieu sur les moyens observationnels existants (*IRAM 30m, NOEMA, ALMA, JWST, VLT, LOFAR*) et s'implique dans la définition et le développement des moyens futurs (*ELT, SKA, CTA, NewAthena, LiteBIRD*). Elle s'appuie également sur le développement de codes numériques traitant les écoulements magnétisés et l'évolution physico-chimique du MIS sur de grandes plages d'échelles, pour lesquels la mise en place de mésocentres de calculs (*CALMIP, GRICAD, MesoPSL, MCIA*) a été essentielle, en complément des centres nationaux (*CINES, IDRIS, TGCC*) et des moyens européens (*PRACE*).

**Fait marquant 1 : Le relevé ALMA-IMF. Remise en cause de l'IMF standard**

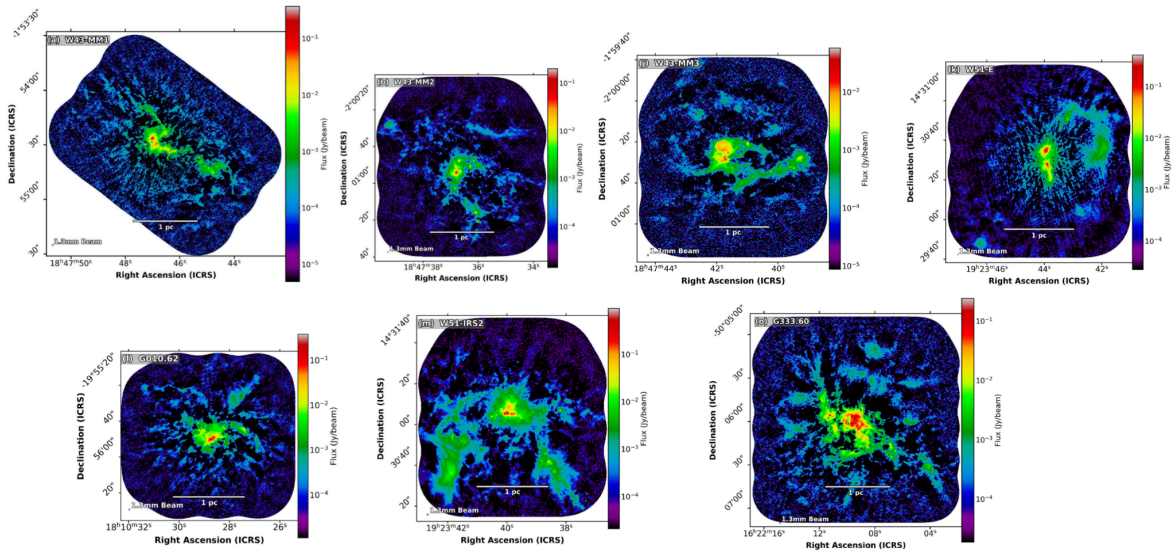


Figure 7.1.1 : Images obtenues avec ALMA de 7 des 15 régions de formation d'étoiles massives observées par le programme ALMA-IMF, illustrant des régions jeunes (a et b), intermédiaires (j et k) et évoluées (l, m et o).

Le grand programme d'observation ALMA-IMF (IPAG, LAB, CEA-AIM, IRAM, LPENS, LERMA) a pour objectif principal d'élucider le lien potentiel entre la fonction de masse initiale (IMF) d'une région de formation d'étoiles massives et les caractéristiques du nuage moléculaire parent. En cartographiant la fragmentation de 15 régions de formation d'étoiles massives avec ALMA, et en établissant un catalogue exhaustif de la population de cœurs pré-stellaires et protostellaires dans ces régions, ALMA-IMF a montré que ces régions présentent un excès de cœurs massifs par rapport à l'IMF observée dans les régions de formation d'étoiles de faibles masses, et que cet excès varie en fonction du taux instantané de formation d'étoiles. L'étude de l'émission de molécules organiques complexes typiques de la phase de cœur chaud, comme le méthyl formate ( $\text{HCOOCH}_3$ ), montre également que les cœurs les plus massifs entrent très rapidement dans cette phase.

Références : Motte et al. 2018a, Motte et al. 2022, Ginsburg, Csengeri et al. 2022, Pouteau 2022, Brouillet et al. 2022, Pouteau et al. 2023, Nony et al. 2023, Cunningham et al. 2023, Bonfand et al. in press, Louvet et al. resubm., Armante et al. in press.

### **Fait marquant 2 : Les relevés PHANGS ALMA-MUSE-HST-JWST. Le MIS, les jeunes étoiles et la rétroaction dans les disques de galaxies proches**

La formation des étoiles dans le milieu interstellaire est étroitement liée à l'évolution des galaxies (évolution chimique des galaxies, régulation des disques galactiques via la rétroaction stellaire, accumulation de la masse stellaire). La formation des étoiles et les processus de rétroaction sont étudiés en détail dans les objets Galactiques, mais une théorie quantitative de la formation stellaire à l'échelle galactique nécessite des mesures fiables de l'efficacité de la conversion du gaz en étoiles, des échelles de temps mises en jeu et de la dépendance environnementale de ce processus. Ces cinq dernières années ont vu de grands progrès dans ce domaine grâce à un ambitieux programme d'observations mené par la collaboration PHANGS (Physics at High Angular resolution<sup>32</sup> in Nearby Galaxies<sup>32</sup>).

<sup>32</sup> <https://www.phangs.org>

Avec des programmes phares sur ALMA, VLT/MUSE, HST et JWST, et un ensemble d'observations complémentaires avec NOEMA, AstroSat, le VLA et des télescopes dans le domaine visible, la collaboration PHANGS a fourni une cartographie à l'échelle de 10 à 100 pc du gaz froid, des régions HII, des jeunes étoiles, des amas stellaires, de la poussière chaude et du gaz ionisé au sein de 90 galaxies proches. Les membres de la communauté PCMI (IRAP, IRAM) ont pris des responsabilités majeures au sein de la collaboration PHANGS, grâce à leur expertise reconnue dans les domaines de l'imagerie et de l'analyse de l'émission des raies moléculaires. Les données PHANGS ALMA-MUSE-HST-JWST ont déjà été mises à la disposition de la communauté scientifique internationale. C'est à ce jour l'image la plus complète des propriétés des étoiles et du MIS dans les galaxies proches, et un ensemble de données essentielles pour relier la physique et la chimie du MIS à notre compréhension de l'évolution des galaxies.

Références : Schinnerer et al 2019; Herrera et al 2020; Leroy et al 2021a; Leroy et al 2021b; Rosolowsky et al 2021; Emsellem et al 2022; Lee et al 2022; Pan et al 2022; Lee et al 2023; Querejeta et al 2023; Stuber et al 2023; Zakardjian et al 2023.

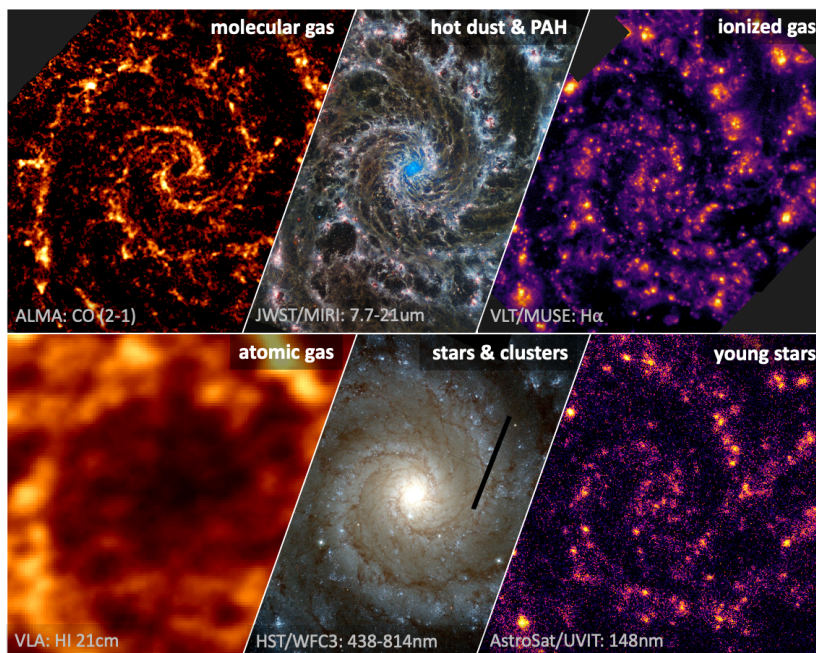


Fig. 7.1.2 Galerie d'images de la galaxie proche NGC0628 obtenues par les programmes phares de la collaboration PHANGS. En partant du haut à gauche : le gaz moléculaire froid tracé par la raie CO(2-1) avec l'interféromètre ALMA ; l'émission de la poussière chaude et de molécules polycycliques aromatiques hydrocarbonées révélées par un composite de trois bandes spectrales de l'instrument MIRI/JWST; le gaz ionisé tracé par l'émission H $\alpha$  de l'instrument MUSE/VLT; l'émission des jeunes étoiles dans l'ultraviolet lointain cartographié par l'instrument UVIT/AstroSat; l'émission des jeunes étoiles et l'absorption par la poussière révélées par un composite de trois bandes spectrales dans le domaine visible avec l'instrument WFC3/HST; le gaz diffus neutre tracé par la raie à 21cm avec le VLA. (PHANGS collaboration/J. Sun, Princeton/J. Schmidt, Geckzilla).

### Fait marquant 3 : La masse du gaz moléculaire dans les galaxies à faible métallicité

Les étoiles se forment dans la phase moléculaire froide du MIS. Les transitions de rotation à bas J de CO sont souvent utilisées pour cartographier la masse totale du gaz moléculaire dans les galaxies, mais elles deviennent difficiles à détecter dans les galaxies à faible métallicité où la molécule est photo-dissociée. Établir des méthodes robustes pour quantifier le réservoir de gaz moléculaire dans les systèmes à faible métallicité est particulièrement

important pour interpréter les observations du MIS et de la formation d'étoiles à haut redshift. Le Herschel Dwarf Galaxy Survey (DGS), un programme du temps garanti dirigé par l'équipe NUAGES (LFEMI/CEA), a cartographié la poussière et les raies les plus brillantes dans l'infrarouge lointain dominant le refroidissement du gaz interstellaire, sur un échantillon de 50 galaxies naines proches avec des métallicités entre 1/50 et 1/2 solaire. En modélisant les diverses conditions du MIS à l'aide du code de photoionisation CLOUDY, le groupe NUAGES a établi une méthode empirique pour quantifier la masse totale du gaz moléculaire sur la base d'observations de CO et de la raie [C II] à 158  $\mu\text{m}$ . La méthode a ensuite été utilisée pour quantifier la masse totale et la fraction du gaz moléculaire 'CO-dark' pour toutes les galaxies cartographiées par le DGS. Dans cet échantillon de galaxies à faible métallicité, ces travaux ont établi que 70 à 100 % du gaz moléculaire n'émet pas en CO. Après la prise en compte du gaz moléculaire 'CO-dark', ces travaux concluent que l'efficacité de formation d'étoiles dans les galaxies naines ressemble à celle des galaxies normales. Cela signifie que même si nous avons besoin de différents traceurs pour observer la formation des étoiles dans l'univers primitif, la physique fondamentale du processus de formation des étoiles reste la même.

Références: Cormier et al 2019, Polles et al 2019, Madden et al 2020, Ramambason et al 2022

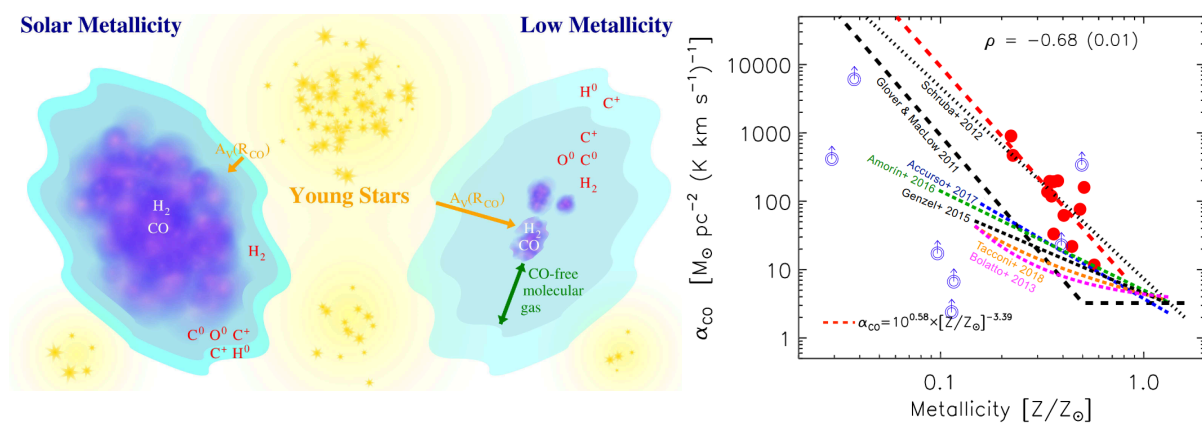


Fig 7.1.3. (Gauche) Comparaison schématique d'un nuage moléculaire à métallicité solaire (riche en métaux) et d'un nuage à faible métallicité, impactés par les photons UV des amas d'étoiles proches. La diminution de l'écrantage fourni par la poussière dans le cas du nuage à faible métallicité conduit à une photodissociation supplémentaire du gaz moléculaire, laissant une couche plus importante de H<sub>2</sub> auto-protégé à l'extérieur des petits noyaux émetteurs de CO. Ce gaz moléculaire, qui n'émet pas en CO, peut être tracé par les raies du [CII] ou [CI]. (Droite) Conversion entre la luminosité de la raie CO(J=1-0) et la masse de H<sub>2</sub> en fonction de la métallicité. La nouvelle relation déterminée à partir des travaux de l'équipe NUAGES sur les données DGS est représentée par une ligne pointillée rouge. Les autres lignes montrent des résultats d'études précédentes. Les points rouges sont les masses totales de H<sub>2</sub> des galaxies dans l'échantillon DGS. Images adaptées de Madden et al. (2020).

## 7.2 Caractérisation du MIS, complexité et diversité moléculaires

Questions : Quels sont les liens entre les observables accessibles et les conditions physico-chimiques dans les différents environnements du MIS ? Quelle est la diversité et la complexité chimique du MIS ? Comment, où et quand se mettent-elles en place (dans notre Galaxie et sur des échelles de temps cosmologiques) ? Comment la diversité et la

complexité moléculaire évoluent-elles dans les différents environnements, du nuage moléculaire jusqu'à la formation des planètes ?

La communauté PCMI étudie la chimie du milieu interstellaire par le biais d'une approche pluridisciplinaire, associant astrophysique de laboratoire (réactivité et spectroscopie), observations (identification et distribution des molécules) et modélisation astrochimique (prédictions et interprétation d'observations). Au niveau de l'astrophysique de laboratoire, les dernières années ont vu le développement de nouvelles expériences ou approches numériques pour 1) étudier la formation des molécules organiques complexes (MOC) sur des analogues de glaces interstellaires, 2) étudier les processus de désorption permettant de les remettre dans le gaz et donc leur observation et 3) caractériser leurs données spectroscopiques.

La caractérisation physique et chimique du MIS et sa complexité sont de mieux en mieux connues grâce aux progrès instrumentaux des radiotélescopes (tels que IRAM 30m et NOEMA). Enfin, les principaux défis au niveau des modèles astrochimiques concernent le couplage de ces modèles avec des modèles MHD d'évolution de la matière interstellaire et d'effondrement pour former des protoétoiles et des disques protoplanétaires.

#### Fait marquant 4 : Dissection du nuage moléculaire géant Orion B

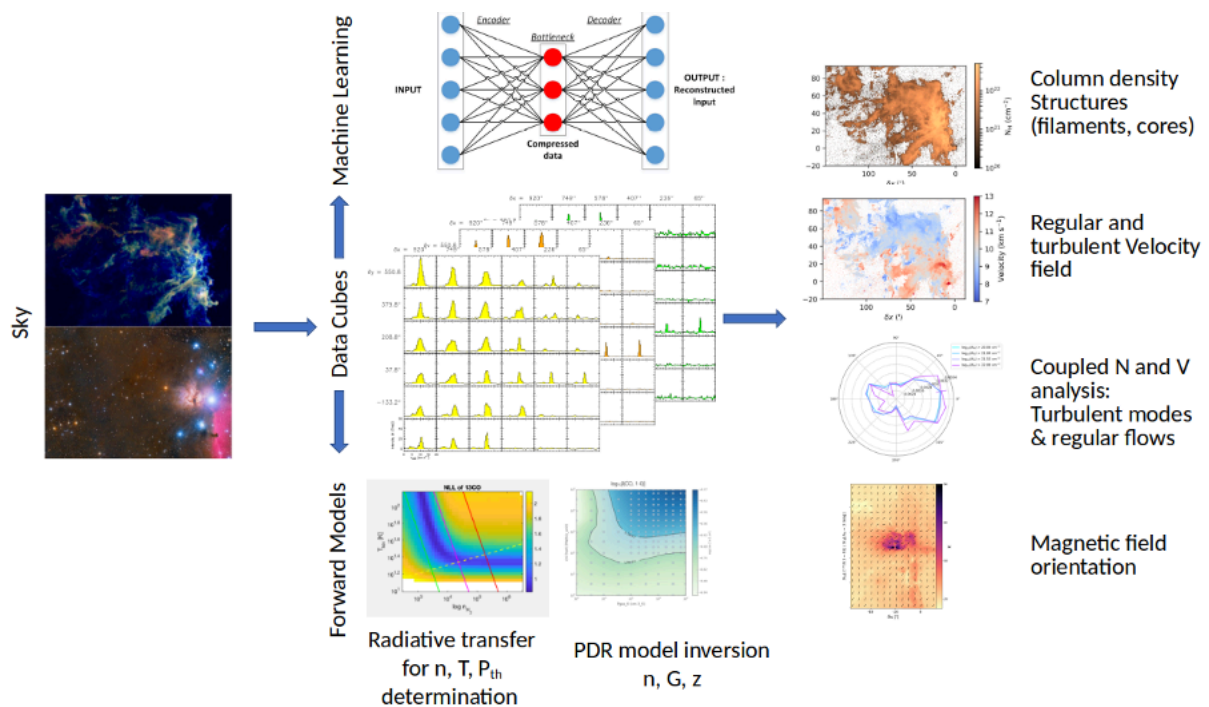


Figure 7.2.1 : Illustration de l'aspect interdisciplinaire des diverses méthodes utilisées pour analyser le cube de données hyperspectral obtenu par le programme ORION-B à l'IRAM 30m : obtention de cartes de colonne densité, vitesse et champs magnétique, et estimation des conditions physiques avec quantification des incertitudes par la combinaison de modèles astrophysiques, de méthodes de machine learning et d'outils de théorie de l'information.

Le développement de récepteurs à large bande dans le domaine (sub-)millimétrique, par exemple à l'IRAM-30m, permet l'obtention de cartes multi-spectrales, cartographiant simultanément des dizaines de traceurs moléculaires sur de larges champs de vue. L'exploitation scientifique des jeux de données massifs qui en résultent posent des défis nouveaux. Le grand programme ORION-B à l'IRAM-30m (collaboration internationale menée



par l'IRAM et le LERMA, avec participation LAB, IRAP, LPENS) a en particulier montré comment des collaborations interdisciplinaires avec les domaines du traitement du signal et de l'apprentissage statistique (machine learning) pouvaient mener au développement de méthodes nouvelles d'analyse dont nous avons besoin pour surmonter les défis nouveaux de tels jeux de données. ORION-B a cartographié le nuage moléculaire géant Orion B sur 5 degrés carrés dans toute la bande à 100 GHz, afin d'établir une vue non biaisée d'un nuage moléculaire dans son ensemble et d'en caractériser la structure physico-chimique et son lien avec l'efficacité de formation stellaire en son sein. De nombreuses méthodes nouvelles ont pu être développées en collaboration avec des chercheurs en traitement du signal et apprentissage statistique (CRISAL, GIPSA-Lab, IM2NP) pour s'attaquer à une large variété de questions : caractérisation du bruit et débruitage par réseau de neurones (autoencodeurs), caractérisation de l'incertitude sur les estimations des conditions physiques locales par des outils de théorie de l'information, ajustement bayésien de modèles numériques d'astrochimie lourds grâce à l'émulation du modèle par réseau de neurones, extraction de la structure filamentaire du nuage grâce à des outils de traitement d'image ou séparation des différentes phases physico-chimiques constituant le nuage par une approche d'apprentissage non supervisé, étude des liens entre traceurs moléculaires observables et propriétés physiques locales du milieu, en exploitant autant les masses de données observées que celles issues de bases de modèles astrophysiques, etc. Le projet vise également à faire le pont entre les études galactiques, résolues, des nuages moléculaires et les études extragalactiques, non résolues, dans les galaxies proches, et s'est prolongé pour cela par l'ANR DAOISM (menés par l'IRAM, le LERMA, et l'IRAP), qui vise entre autres à faire le lien entre les programmes ORION-B et PHANGS (cf. fait marquant PHANGS).

*Références : Orkisz et al. 2019, Gratier et al. 2021, Roueff et al. 2021, Bron et al. 2021, Einig et al. 2023, Gaudel et al. 2023, Palud et al. 2023, Santa-Maria et al. 2023, Roueff et al. 2024 in press*

### **Fait marquant 5 : Première détection de $\text{CH}_3^+$ dans le milieu interstellaire**

L'objectif scientifique du programme d'observation "Early Release Science" (ERS) PDRs4All (PIs : O. Berné de l'IRAP et E. Habart de l'IAS) est d'étudier l'effet des étoiles massives sur leur environnement. Dans les régions de photodissociation (PDR), les photons ultraviolets lointains de ces étoiles créent une région de gaz et de poussières chauds. Le télescope spatial James Webb permet de résoudre spatialement et d'observer directement, pour la première fois, la réponse du gaz des PDR aux photons pénétrants dans l'ultraviolet lointain, avec des détails spectraux et spatiaux sans précédent. L'ERS PDRs4All a donc observé la PDR emblématique de la Barre d'Orion, en utilisant les instruments MIRI, NIRSpec et NIRCам.

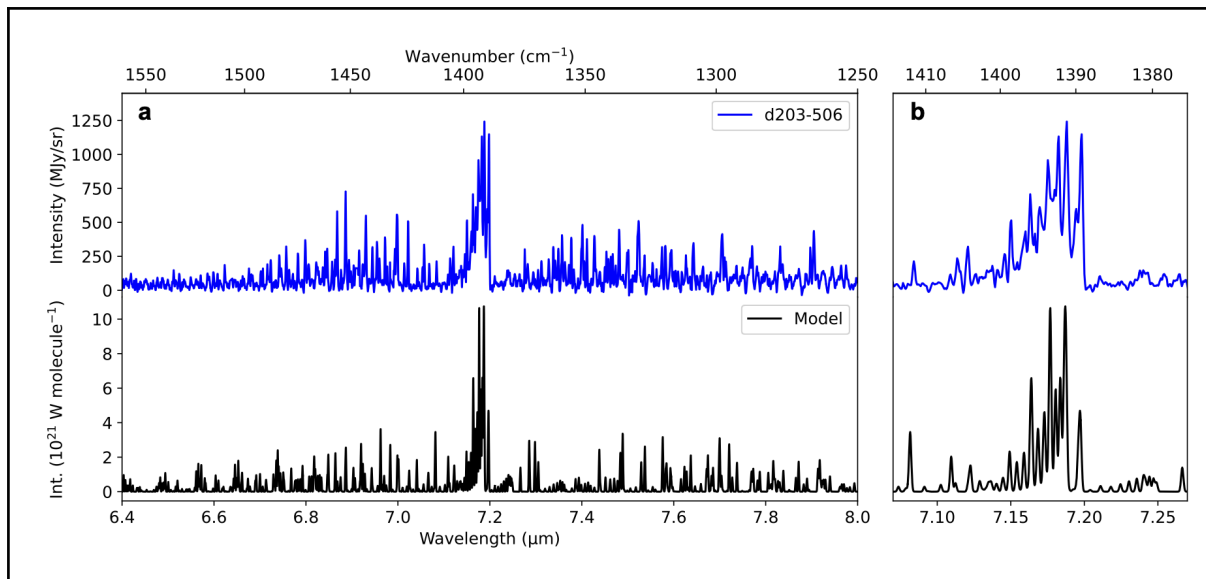


Figure 7.2.2 : Spectre MIRI-MRS à 7  $\mu\text{m}$  du disque protoplanétaire d203-506 (bleu) et le meilleur modèle des vibrations  $\nu_2$  et  $\nu_4$  de  $\text{CH}_3^+$  (extrait de Berné et al., 2023). L'adéquation entre le spectre observé et le modèle a permis la première détection de cette molécule dans l'espace.

Un des résultats marquants du programme est la première détection de l'ion  $\text{CH}_3^+$  dans l'atmosphère du disque protoplanétaire d203-506, avec l'appui d'une collaboration étroite avec des spectroscopistes, notamment de l'ISMO à Orsay. Le méthyl cation,  $\text{CH}_3^+$ , recherché par les astronomes depuis plusieurs décennies, est considéré comme une pierre angulaire de la chimie carbonée interstellaire. Des modèles chimiques soulignent l'importance des photons UV dans la formation de ce cation, et son évolution participe à la complexification moléculaire. Ce travail a impliqué très fortement la communauté PCMI, avec une collaboration interdisciplinaire entre l'IRAP, l'IAS, l'ISMO, le LERMA, l'ACRI-ST, l'INCLASS, l'IPAG et l'IRAM. La synergie entre spectroscopistes et astronomes, fédérés depuis de nombreuses années par PCMI, a permis d'arriver à cette identification en seulement quelques semaines.

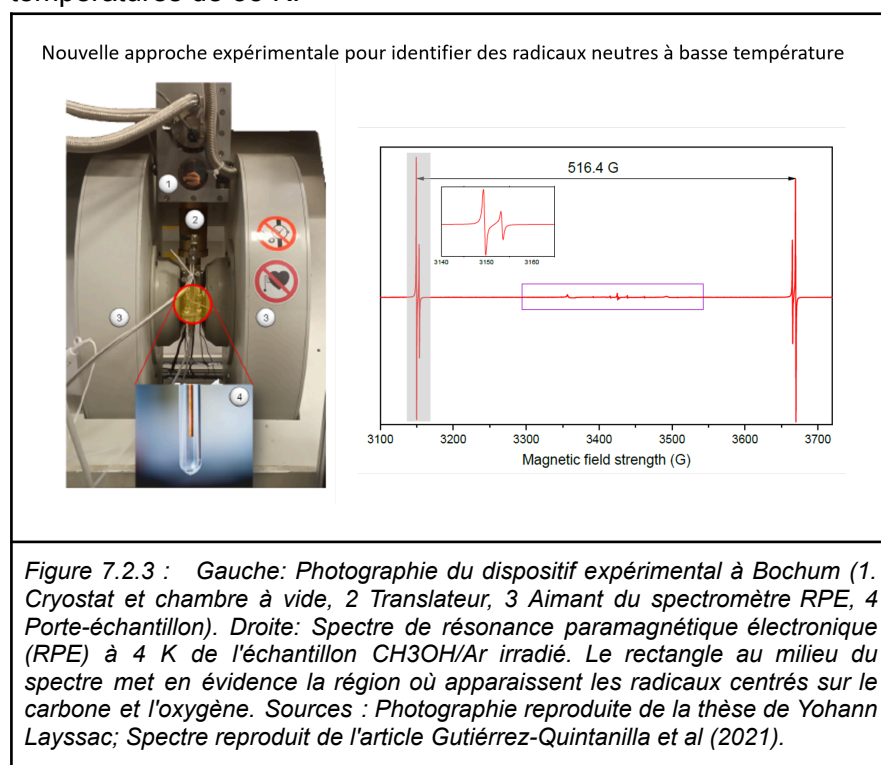
Références : Berné et al. (2022), Berné et al. (2023), Changala et al. (2023), Habart et al. (2023), Berné et al. (2024), Zannese et al. (2024)

### **Fait marquant 6 : Les glaces interstellaires, source de matière organique complexe**

Dans les zones les plus froides et les plus denses du milieu interstellaire, des molécules se condensent à la surface des grains de poussière, constituant ainsi un manteau de glace. Ces glaces interstellaires constituent de véritables réacteurs chimiques, un milieu propice à la complexification moléculaire, révélé indirectement par les récentes observations dans la phase gazeuse. Cependant, de nombreux liens entre les différentes étapes de réactivité menant à cette complexification moléculaire dans la phase solide et son observation dans la phase gazeuse restent à élucider. Récemment, la communauté du PCMI a apporté d'importants éléments de réponses à ces questions fondamentales.

En utilisant une nouvelle approche expérimentale mêlant technique d'isolement en matrice cryogénique de gaz rares, la spectrométrie de masse et les spectroscopies infrarouge et résonance paramagnétique électronique (RPE), la formation de molécules organiques

complexes (MOC), à partir d'un mélange de radicaux, a pu être étudiée jusqu'à des températures de 35 K.



Cette approche innovante développée au PIIM a permis la première identification expérimentale de radicaux neutres dans un contexte astrophysique. Pour mieux comprendre les mécanismes réactionnels pouvant avoir lieu dans ces environnements froids du milieu interstellaire, l'apport de la chimie théorique est primordial. Par exemple, la compétition entre les réactions radicaux-radicaux et les réactions d'abstraction d'hydrogène menant à la formation de la formamide a été récemment mise en évidence à l'IPAG et au LCT.

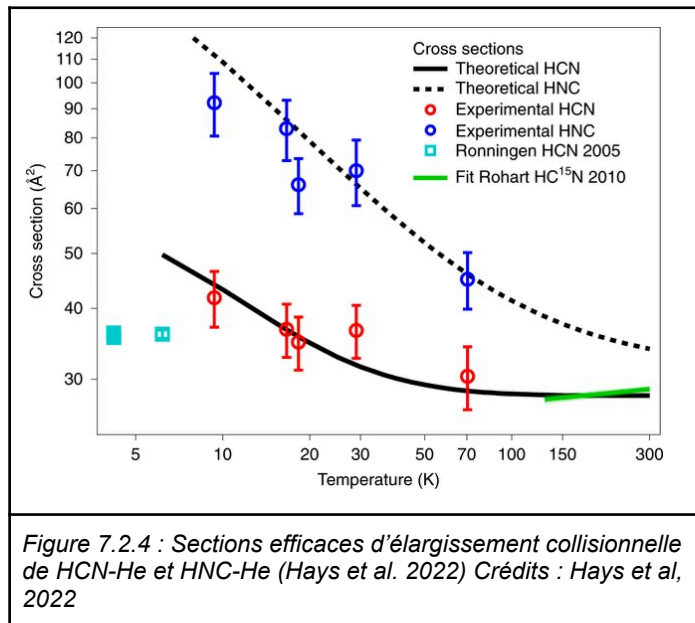
Les résultats du programme d'observation JWST ERS "IceAge" (Co-I français: J. Noble du PIIM et E. Dartois de l'ISMO) sont également prometteurs quant à l'identification de MOC dans les glaces interstellaires.

Enfin, une fois ces molécules complexes formées au sein des glaces, plusieurs agents énergétiques peuvent les relarguer dans la phase gazeuse, dans laquelle elles sont observées. Parmi ces agents énergétiques, on peut citer les rayons cosmiques et les photons. Plusieurs travaux expérimentaux développés dans la communauté PCMI ont montré que des photons et des analogues de rayons cosmiques permettent à certaines molécules complexes condensées à basse température (méthanol CH<sub>3</sub>OH, méthylacétate CH<sub>3</sub>COOCH<sub>3</sub>, acetonitrile CH<sub>3</sub>CN) d'être relarguées dans la phase gazeuse. L'implémentation de ces données issues de travaux menés dans les laboratoires ISMO, IJCLab, LAB, LERMA, MONARIS dans les modèles astrochimiques du LAB ou du LERMA est primordiale pour interpréter les observations des molécules organiques complexes dans le milieu interstellaire.

Références: Butscher et al. (2019), Dartois et al. (2019), Layssac et al. (2020), Coutens et al. (2020), Gutiérrez-Quintanilla et al. (2021), Basalgète et al. (2021), Wakelam et al. (2021), Enrique-Romero et al. (2022), Tenelanda-Osorio et al. (2022), Dartois et al. (2023), Taillard et al. (2023), Basalgète et al. (2023), Boland et al. (2024)

## Fait marquant 7 : Collisions inélastiques et réactives

Pendant des années, les conditions d'excitation des molécules HCN et HNC dans le MIS ont été considérées comme identiques. En 2010, des membres du PCMI ont décidé d'étudier en parallèle l'excitation des deux isomères et ont découvert que leur excitation respective induite par He et H<sub>2</sub> était très différente. Ces résultats théoriques permettaient de résoudre le problème de la surabondance de HNC dans le MIS, mais n'avaient pas encore été confirmés expérimentalement. Le groupe d'astrophysique de



laboratoire de l'Institut de Physique de Rennes a travaillé récemment sur une validation indirecte des conditions d'excitation différentes de HCN et HNC en mesurant et en calculant les taux d'élargissement des raies pour les systèmes HCN-He et HNC-He. Les données se sont révélées très différentes, confirmant les prédictions théoriques.

Ce résultat résulte d'une collaboration poussée entre théoriciens et expérimentateurs et a pu être publié dans la revue Nature Chemistry. Les données de collisions de HCN et HNC sont nécessaires pour interpréter correctement les abondances de ces deux espèces dans les nuages moléculaires froids.

Références : Hays et al. (2022)

## 7.3 Les grains interstellaires, moteurs de l'évolution du MIS

*Questions: Quelles sont les caractéristiques des grains interstellaires (températures, tailles, compositions) ? Comment ces propriétés évoluent en fonction de la densité, de la dynamique et de l'irradiation du milieu ? Quelle est l'évolution de leur composition chimique par accréation d'éléments de la phase gazeuse et réactions à leur surface ? Quelle est l'évolution de la géométrie du grain isolé à l'agrégat, du grain compact à poreux ? Quels sont les impacts de cette évolution sur la physique, la chimie et la dynamique du MIS et donc la formation des étoiles et des planètes ?*

Les grains de poussière interstellaires, des plus grands aux plus petits, jouent un rôle clé dans l'évolution physique, chimique et dynamique du gaz depuis les régions diffuses jusqu'aux nuages de formation d'étoiles et aux disques protoplanétaires. Des découvertes récentes montrent que la composition de la poussière est beaucoup plus complexe que le modèle silicate/graphite souvent supposé et qu'elle évolue rapidement en réponse aux conditions locales. Les principales questions sont liées à leurs caractéristiques

(températures, tailles et compositions) dans les différents environnements interstellaires ainsi qu'à leur formation. En particulier, le rôle des plus petits grains, les nanograins, reste assez peu connu, malgré son importance présumée dans le couplage avec le gaz dans certains environnements comme les disques protoplanétaires. La synergie entre les observateurs, les modélisateurs, les théoriciens et les expérimentateurs au sein de la communauté PCMI est un pilier central pour fournir des données de laboratoire sur une large gamme de longueurs d'onde pour des analogues pertinents de silicates et de carbones amorphes, de PAHs, ainsi que des mesures quantitatives pour les processus physiques ayant un impact sur l'évolution des grains de poussière (photoprocessing, rayons cosmiques, chimie de surface...).

### **Fait marquant 8 : Caractérisation des grains avec le JWST**

Grâce à la spectroscopie multi-instruments du télescope spatial James Webb, et à l'aide de modèles et d'expériences d'astrophysique de laboratoire, une équipe incluant des membres du PIIM, de l'ISMO, du LAB et du LERMA a pu démontrer une croissance précoce des grains interstellaires jusqu'à des tailles microniques dans les régions les plus sombres et les plus froides d'un nuage moléculaire. Les observations ont été réalisées dans le cadre du programme Early Release Science (ERS) « Ice Age », avec le télescope JWST. Les données récoltées sur le nuage dense du Caméléon I démontrent que la croissance de ces grains débute très tôt dans la vie des nuages interstellaires, avant la phase dite protostellaire qui mènera à la formation de nouvelles étoiles et leurs cortèges possibles de planètes. Ce grossissement a pour conséquence de changer l'interaction de la lumière avec ces grains, de manière sélective en fonction de la longueur d'onde.



Fig. 7.3.1 : Image d'artiste du JWST pour caractériser les grains interstellaires.

Les profils spectroscopiques des bandes de glace observées dans le domaine infrarouge sont alors modifiés, ce qui en fait des marqueurs de l'évolution de la taille des grains. Une analyse spectrale fine de ces profils, sondés en regardant l'extinction de la lumière provenant d'étoiles de notre Galaxie situées en arrière-plan du nuage dense du Caméléon, confirme que les grains glacés atteignent des tailles de l'ordre du micron. Ces observations contraignent de manière quantitative l'évolution de la taille des grains avant la formation des étoiles et des planètes.

Le programme « Ice Age » a également apporté de nouvelles contraintes sur la matière organique présente dans les glaces interstellaires.

*Références: Dartois et al. 2022, McClure et al. 2023, Dartois et al. 2024*

### **Fait marquant 9 : Familles de nanograins et leurs signatures spectroscopiques**

La matière carbonée, dont le rôle est prépondérant dans la physico-chimie du MIS, interagit avec des photons UV dans les zones les plus illuminées du MIS. Cette interaction donne alors naissance à de nombreuses signatures spectroscopiques, allant de l'absorption UV

("bump" et DIBs) à l'émission de photons infrarouge (AIBs). Seuls quelques porteurs de ces signatures sont à ce jour identifiés. Plusieurs difficultés sont rencontrées, comme la grande taille des structures carbonées (molécules ou nanograins), ou encore la complexité des processus mis en jeu, du fait que les signatures spectroscopiques liées à l'émission de lumière sont le fruit d'une compétition avec d'autres processus de nature non radiative, comme l'ionisation ou la dissociation. Ces deux verrous ont récemment été levés par divers acteurs de la communauté PCMI, impliquant à la fois astrophysiciens, physiciens, chimistes, théoriciens, modélisateurs et expérimentateurs.

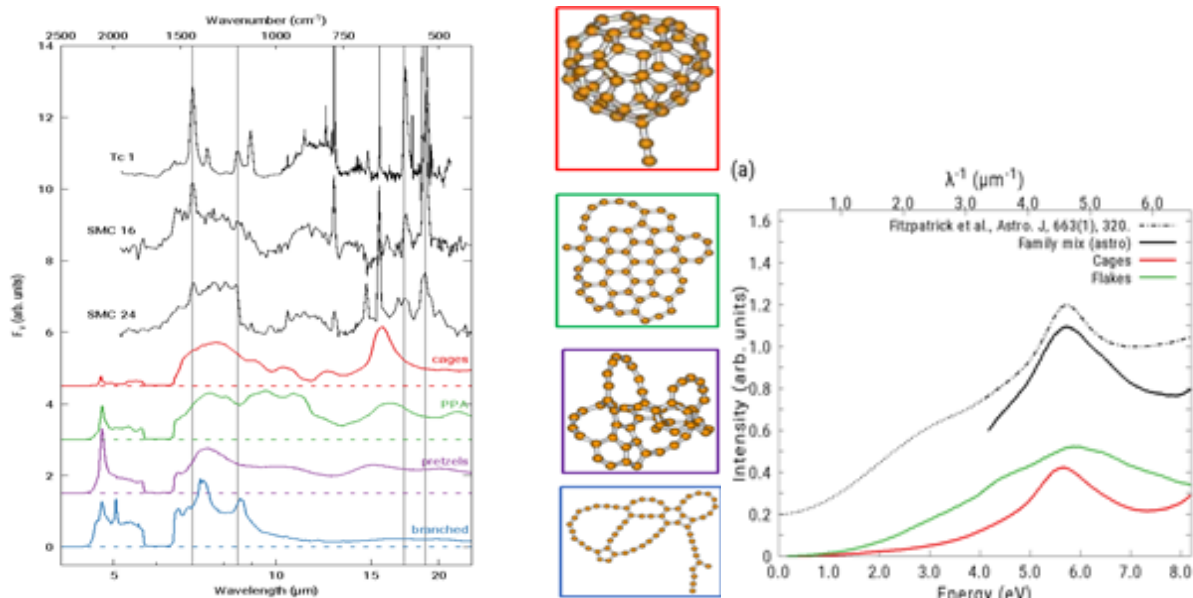


Figure 7.3.2 : (gauche) : spectres IR calculés de populations d'isomères du  $C_{60}$  avec un exemple de structure de chaque famille (centre). Comparaison avec des spectres astronomiques (droite) : spectres UV-visible calculés (familles des cages et des flakes, et mélange) et comparaison avec le bump UV observé. La figure de gauche est reproduite de Dubosq et al. 2019 et la figure de droite est adaptée de Dubosq et al. 2020.

Le premier verrou concerne la taille des systèmes étudiés, qui concernait principalement des systèmes assez petits, mais qui a récemment été ouverte à une nouvelle classe d'objets que sont les populations d'agrégats carbonés de plusieurs dizaines d'atomes, comme par exemple les isomères du  $C_{60}$ . Les réponses spectroscopiques dans l'IR et l'UV-visible de ces populations ont été établies par des méthodes théoriques, montrant la pertinence 1) de la famille des "cages" (sphériques et organisées) de  $C_{60}$  comme contributeur au plateau dans la zone 6-9 microns et 2) des familles des "cages" et, dans une moindre mesure, des "flakes" (planes et organisées) de  $C_{60}$  et  $C_{42}$  comme contributeurs au bump UV. Cette modélisation montre que la fluorescence récurrente, mécanisme peu étudié en physique moléculaire, appliquée aux cages et flakes de  $C_{60}$  et des cages de  $C_{42}$  est capable d'expliquer l'émission de continuum dans le proche infrarouge observée dans plusieurs nébuleuses par réflexion et nébuleuses planétaires. Ces études, principalement théoriques, ont été menées par différents laboratoires du PCMI : l'ISMO, le LCPQ et le LCAR.

Du fait de la grande difficulté à produire expérimentalement les systèmes précédemment décrits, les études expérimentales actuelles se concentrent pour l'instant sur des systèmes plus petits. L'un des résultats marquants de ces dernières années concerne la quantification de la compétition entre les différents chemins de relaxation de l'énergie injectée suite à

l'absorption de photons UV dans plusieurs PAHs (cationiques). Les rapports de branchement entre l'ionisation et la dissociation ont pu être mesurés pour des molécules allant de 30 à 48 atomes de carbone, et montrent la robustesse des grosses molécules suite à l'excitation UV. Les expériences, menées au synchrotron Soleil, sont le fruit du projet ERC Synergy Nanocosmos (PI au CNRS/Université de Toulouse : C. Joblin et deux PI à Madrid), en collaboration entre l'IRAP, le LCPQ, le LCAR, l'INRAE, le synchrotron Soleil et une collaboration internationale avec l'Italie et l'Espagne. Ce résultat a fait l'objet d'un communiqué de presse<sup>33</sup> sur le site du synchrotron Soleil.

La compétition entre les différents processus, incluant notamment la dissociation, a des effets importants sur l'évolution des grains interstellaires. C'est ce qui a récemment été mis en évidence grâce aux derniers développements du modèle de grains THEMIS (couplé à un code de transfert radiatif) effectués à l'IAS et à l'IRAP. Les résultats théoriques et expérimentaux obtenus sur les signatures spectrales des différentes familles de molécules et nanograins carbonés alimentent ainsi les modèles astrochimiques, qui nous permettent *in fine* de mieux comprendre les observations des environnements illuminés par des photons UV.

*Références : Bonnin et al. (2019), Dubosq et al. (2019), Dubosq et al. (2020), Wenzel et al. (2020), Schirmer et al. (2020), Calvo et al. (2021), Parneix et al. (2021), Schirmer et al. (2022), Lacinbala et al. (2022), Lacinbala et al. (2023), Elyajouri et al. (2024)*

## 8. Thèmes fédérateurs: bilans et prospective

### 8.1 Les grandes échelles

#### 8.1.1 Le Milieu Interstellaire de la Voie Lactée

##### *Contexte global*

La Voie Lactée est notre meilleur laboratoire pour étudier les processus physiques et chimiques du MIS. C'est le prototype permettant d'interpréter l'équilibre de phase du gaz et la relation entre le MIS et la structure stellaire dans les galaxies. Au-delà des études détaillées d'objets individuels, améliorer notre compréhension globale des propriétés du MIS de la Voie Lactée et obtenir une cartographie précise de la distribution de son MIS par rapport à sa structure stellaire reste donc un objectif crucial pour la communauté PCMI.

##### **La structure de notre Galaxie**

##### *Contexte*

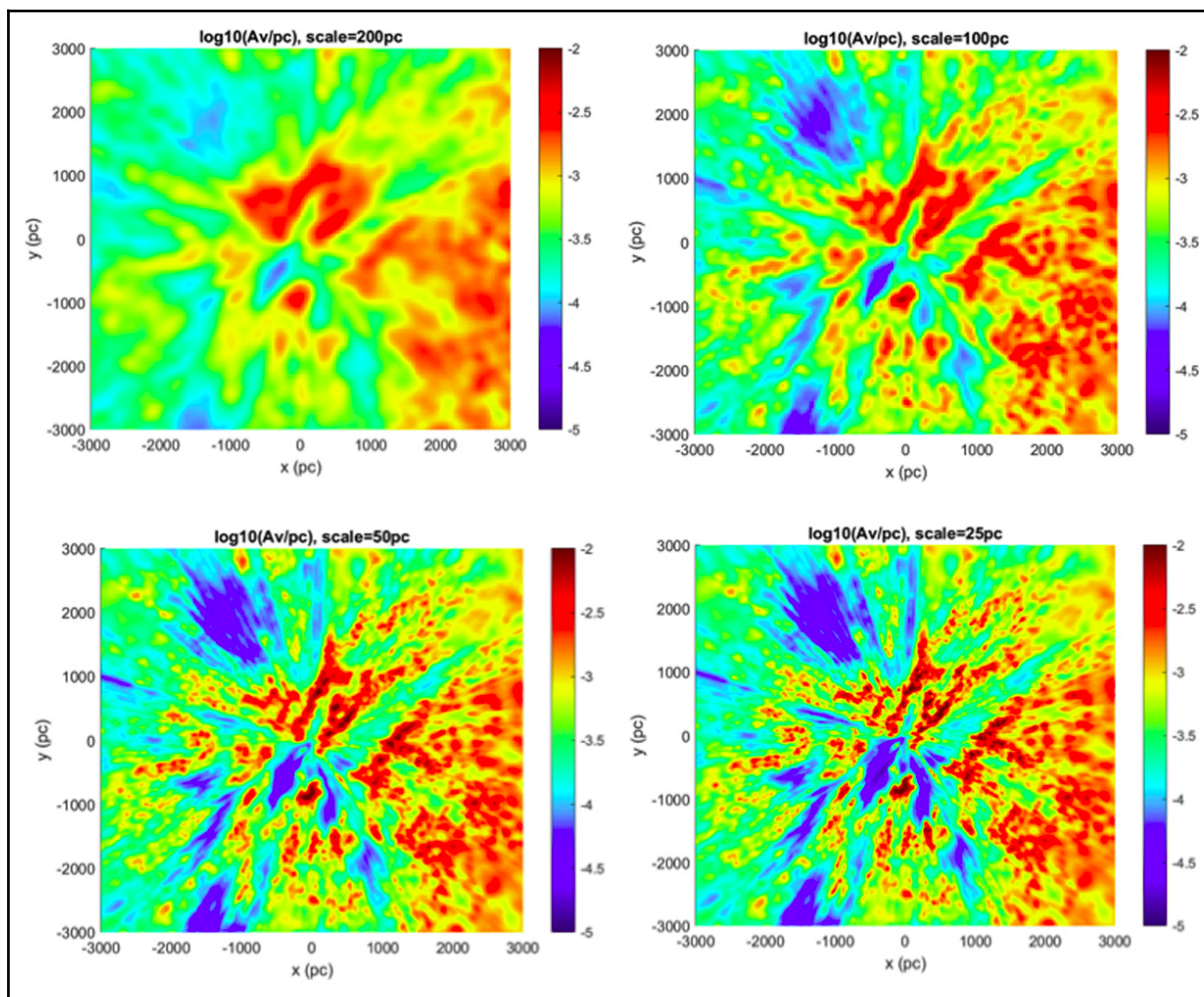
Notre position au sein du disque de la Voie Lactée complexifie l'étude de sa structure, qui repose sur une combinaison d'observables variées et d'outils de modélisation. Au cours des cinq dernières années, il y a eu une amélioration significative dans la qualité des données et des méthodes permettant d'explorer la structure de notre Galaxie. Cela est particulièrement dû aux dernières données de la mission Gaia, mais aussi à plusieurs relevés de l'émission

<sup>33</sup> <https://www.synchrotron-soleil.fr/highlights/2020/#page=63>

des raies moléculaires qui tracent le gaz froid dans ses différents régimes de densité, le relevé BeSSeL qui mesure les parallaxes de régions de formation stellaire, et les nouvelles données dans la raie à 21 cm émise par le gaz neutre provenant des expériences précurseurs de l'observatoire SKA. Cependant, la structure de la Voie Lactée cache encore bien des mystères à élucider.

### Bilan

La mission Gaia offre des mesures de parallaxes précises pour plus d'un milliard d'étoiles dans notre Galaxie. Grâce à ces mesures, la structure spirale du voisinage solaire est maintenant clairement identifiable. L'analyse des données Gaia a montré que le bras local est plus étendu que ce que l'on pensait précédemment, atteignant 8 kpc, et a conduit à une mise à jour des distances des nuages moléculaires les plus proches, des cibles emblématiques pour les études sur la formation des étoiles et le MIS froid. Ces nuages constituent une structure connue sous le nom de ceinture de Gould. Combinées à des observations de CO (J=1-0) qui tracent le gaz moléculaire, les données Gaia ont montré qu'au lieu d'être une structure circulaire, la ceinture de Gould consiste plutôt en une structure allongée de 2,7 kpc de long, surnommée la Radcliff wave, oscillant orthogonalement au plan de la Galaxie. Si l'origine de cette oscillation reste incertaine, ce résultat remarquable a mis fin à une représentation de l'environnement solaire vieille d'un siècle et demi.





**Figure 8.1.1.1** : Carte d'extinction 3D de Lallement et al. (2022), fondée sur les données Gaia et 2MASS après croisement des deux catalogues. Les quatre panneaux illustrent l'approche itérative consistant à affiner la résolution spatiale de la carte étape par étape.

Cartographier la structure spirale de la Voie Lactée de manière plus large avec Gaia reste une entreprise complexe en raison des effets de l'extinction interstellaire, ce qui modifie la lumière stellaire observée et donc les distances aux étoiles que l'on déduit. Avec une participation importante dans le traitement et l'exploitation des données de la mission Gaia, la communauté PCMI a développé des techniques pour construire les cartes d'extinction en trois dimensions, fournissant des résultats sur la structure du milieu interstellaire et les propriétés de la poussière interstellaire, dans un rayon de 3 kpc autour du soleil.

Les observations VLBI sont une technique bien établie pour obtenir des mesures précises de parallaxes des masers, un phénomène astrophysique fortement lié aux régions de formation d'étoiles. Depuis plusieurs décennies, on pense que la distribution spatiale des masers observés favorise un modèle de la structure galactique avec quatre bras spiraux dominants. Néanmoins, la majorité des masers ciblés par BeSSeL se situent dans l'hémisphère nord, laissant une lacune importante dans notre connaissance de la structure globale. Une nouvelle avancée importante ces dernières années vient des études qui combinent les informations provenant de Gaia DR3 et du relevé BeSSeL, avec des résultats qui remettent en question le modèle de Voie Lactée avec quatre bras spiraux. La remise en question de la structure fondamentale de la Voie Lactée souligne la complexité inhérente à l'étude de la structure galactique et la nécessité de continuer à questionner et tester nos modèles existants à la lumière de nouvelles données et de nouvelles méthodes. Un autre aspect novateur de ces études est la comparaison statistique avec les structures observées dans les galaxies proches, apportant des informations a priori sur la structure de la Voie Lactée. De la même manière, des études de notre galaxie ont commencé à s'appuyer sur les simulations cosmologiques pour établir des liens entre la structure et l'histoire des galaxies, permettant de lier indirectement la structure de la Voie Lactée à des éléments comme la présence d'une barre et l'environnement immédiat du disque.

### *Perspectives*

Une des difficultés pour comprendre la structure de notre propre Galaxie est l'hétérogénéité des données qui sont utilisées : chaque technique d'observation vise des objets différents et est optimale dans des conditions interstellaires spécifiques. À l'avenir, il est impératif de fusionner toutes les observations et outils disponibles pour appréhender intégralement la structure 3D de notre Galaxie en utilisant ces données observationnelles en complémentarité. Ainsi des méthodes statistiques comme l'apprentissage machine, qui se sont déjà révélées efficaces pour combiner les données Gaia et 2MASS sans *cross-match* afin de tirer le maximum de chaque jeu de données, pourront être davantage développées. De même, la tomographie cinétique, qui associe l'extinction et l'émission du gaz, par exemple en CO, ou l'extinction et l'absorption dans des raies du domaine visible permet de représenter la matière interstellaire galactique en six dimensions, i.e. 3 dimensions de vitesse en plus des dimensions spatiales. Ces techniques portent un potentiel important pour l'exploitation des données des relevés à grande échelle du gaz neutre (par ex. MWISP,

FASHI), et des bandes diffuses interstellaires détectées dans les relevés spectroscopiques des étoiles (par ex. APOGEE et RAVE).

L'évolution de notre compréhension de la Voie Lactée reposera également sur une meilleure connaissance des biais et incertitudes de chacune des méthodes, qui restent pour le moment peu caractérisées, rendant difficile l'évaluation de la robustesse des résultats obtenus. La réconciliation des diverses perspectives issues des différents jeux de données nécessitera donc la prise en main et le développement de nouveaux outils alliés à un effort de caractérisation des méthodologies elles-mêmes. Enfin, la comparaison à des informations auxiliaires comme les relevés extragalactiques et les simulations numériques d'évolution des galaxies restent des leviers qui devraient être davantage développés.

## **La physique du milieu interstellaire diffus de la Galaxie**

### *Contexte*

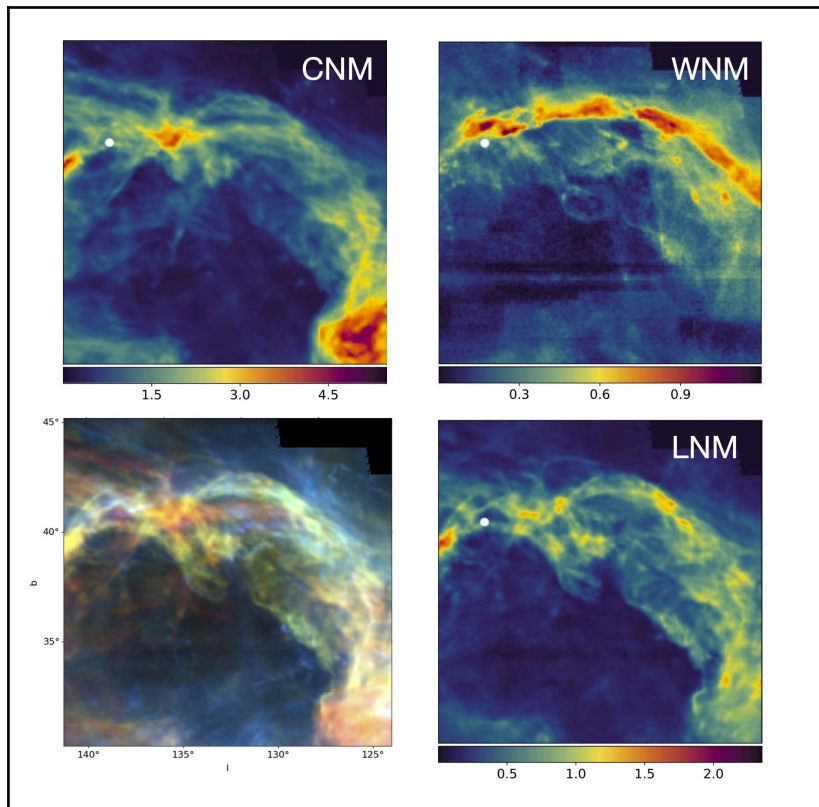
Omniprésent dans les galaxies, sous forme de phase tiède ou de phase froide, le gaz atomique est un élément fondamental du MIS des galaxies. Les observations de l'émission de la raie à 21cm révèlent la morphologie d'une galaxie, traçant l'évolution de l'hydrogène sur son chemin entre le milieu intergalactique ionisé et les nuages de gaz moléculaire où se forment les étoiles. Ces observations montrent que le gaz atomique est structuré à toutes les échelles spatiales, depuis l'unité astronomique jusqu'aux échelles circumgalactiques. Contrairement à d'autres traceurs de la structure galactique, la raie à 21cm n'est pas biaisée par la population stellaire : elle suit les bras spiraux, sonde le disque de gaz au-delà du disque stellaire et trace l'interaction entre une galaxie et son environnement. Le gaz atomique très diffus dans le halo d'une galaxie constitue également un réservoir important de baryons et d'énergie qui influencent fortement l'évolution de sa galaxie hôte.

Depuis la rédaction du Livre Blanc français sur le projet international SKA, la communauté PCMI a montré une activité croissante sur l'utilisation des données en radio-astronomie basse-fréquence pour l'étude du milieu interstellaire atomique. Ceci intervient dans le cadre de la disponibilité de nouvelles données provenant des précurseurs de SKA: le survey LOFAR du ciel à haute latitude galactique (LoTTS), les programmes clés dédiés à l'observation à 21 cm avec ASKAP de la Voie Lactée et des nuages de Magellan et les observations de galaxies proches avec MeerKAT.

### *Bilan*

Au cours des cinq dernières années, la communauté PCMI a fait des avancées méthodologiques décisives pour l'interprétation et l'analyse des données radio. Les développements importants menés par la communauté PCMI incluent le code ROHSA, qui permet de segmenter les phases du HI des données hyperspectrales à 21 cm en émission, le développement d'une expertise en tomographie Faraday et la preuve que l'émission des canaux en vitesse à 21 cm est dominée par des fluctuations de densité et non par des caustiques.

L'analyse renouvelée des données à 21 cm du gaz atomique dans notre Galaxie par la communauté PCMI a mis en évidence plusieurs aspects nouveaux de la structure du HI dans le disque galactique et le halo. Parmi les résultats scientifiques les plus frappants: la non-existence du bras de Persée, des mesures précises de la hauteur typique et de la fraction de masse du gaz atomique froid dans la partie externe du disque de notre Galaxie, et le changement systématique de la topologie du HI entre les régions de formation d'étoiles et les régions inactives. À plus petite échelle, les propriétés de la turbulence de la phase



**Figure 8.1.1.2 :** Décomposition des phases du HI dans la North Celestial Loop. Les trois cartes représentent la densité de colonne (en  $10^{20} \text{ cm}^{-2}$ ) dans trois phases du milieu interstellaire: phase froide (CNM), phase tiède et hors équilibre (LNM - Lukewarm Neutral Medium) et phase chaude (WNM - Warm Neutral Medium). Les couleurs RGB de l'encart en bas à gauche sont rouge-CNM, vert-LNM et bleu-WNM. Référence : Taank et al (2022)

tiède du HI ont été étudiées, ainsi que les propriétés du HI dans l'environnement de nuages moléculaires proches du Soleil, et la transition entre la phase tiède et la phase froide dans les grands complexes de gaz atomique (HVCs, 'high velocity clouds') dans le halo de notre Galaxie.

Au sein de la collaboration de l'Interstellar Institute (un International Research Network du CNRS), les travaux sur le gaz atomique se placent dans un contexte plus large de l'étude de l'évolution de la matière interstellaire dans les galaxies, l'évolution des nuages moléculaires, les interactions entre le disque et le halo des galaxies et le milieu circumgalactique, la turbulence et la rétroaction stellaire aux grandes

échelles, et le rôle du champ magnétique sur l'état dynamique du gaz interstellaire.

### Perspectives

L'étude du milieu interstellaire diffus dans les galaxies va bientôt connaître une révolution. Les précurseurs de l'expérience SKA, ASKAP et MeerKAT, sont en train d'obtenir des données à haute résolution pour de très grands champs. Ces précurseurs vont fournir une imagerie profonde du gaz atomique à haute latitude dans notre Galaxie, ce qui va permettre des études poussées sur l'équilibre des phases dans le gaz neutre et les caractéristiques de la turbulence dans ces phases. Des programmes phares pour cartographier le plan Galactique, le centre de notre Galaxie et les Nuages de Magellan (les galaxies satellites de la Voie Lactée) sont aussi en cours. Les études du gaz atomique qui utilisent la raie

d'émission à 21 cm seront complétées par une forte croissance dans le nombre et la couverture spatiale des mesures en absorption, fournissant des informations précises sur la profondeur optique, la température de spin et la densité de colonne du gaz atomique dans notre Galaxie. Comme pour de nombreux domaines d'étude du MIS, l'ère du « big data » est arrivée pour les études du gaz diffus, ce qui signifie qu'il ne sera plus possible d'analyser les données de prochains grands relevés à la main. Il sera essentiel de continuer à développer de nouvelles techniques pour extraire les propriétés physiques des données ainsi que pour déterminer les caractéristiques morphologiques par l'interprétation des données multidimensionnelles, en s'appuyant sur les méthodes développées dans les domaines des statistiques et du deep learning.

## **La poussière galactique: un avant-plan polarisé de la cosmologie**

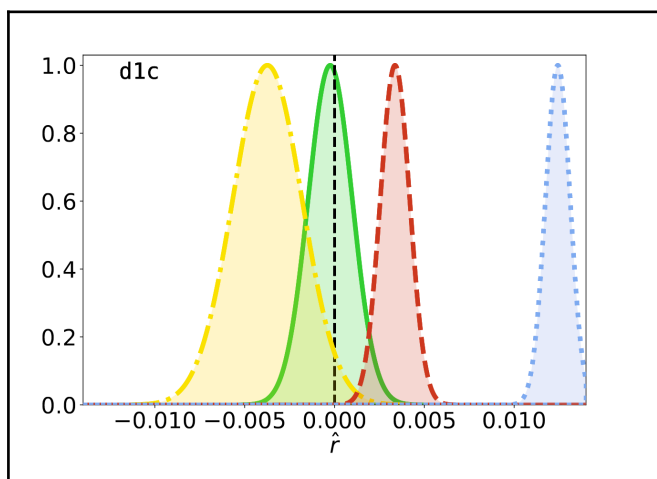
### *Contexte*

La poussière du milieu interstellaire de notre Galaxie, formée d'une combinaison de grains carbonés, de grains silicatés et d'hydrocarbures polycycliques aromatiques (PAH), interagit avec le champ de rayonnement interstellaire. Ils sont chauffés par l'absorption des photons dans l'optique et se refroidissent en émettant dans l'infrarouge et les micro-ondes. Cette émission thermique est bien décrite par une loi de corps noir modifié (modified black body ou MBB) et dépend localement de la composition des grains et de leur température. Cette émission diffuse domine le ciel aux fréquences supérieures à ~70 GHz, même loin du plan Galactique. En raison de la forme non-sphérique des grains et de leur alignement avec le champ magnétique Galactique, l'émission thermique des poussières est significativement polarisée, avec une fraction de polarisation pouvant atteindre 20% et une polarisation perpendiculaire au champ magnétique. En 2014, l'expérience BICEP2/Keck a annoncé avoir détecté les modes B de la polarisation du CMB, signal primordial dû au fond d'ondes gravitationnelles primordiales et sonde unique de la phase d'inflation. Quelques mois plus tard, les données du satellite Planck ont réussi à montrer que le signal mesuré par BICEP2/Keck était dû à l'émission polarisée de la poussière de notre propre Galaxie. Depuis, la communauté CMB a pris conscience du caractère crucial de la soustraction de cet avant-plan.

### *Bilan*

Ces dernières années la communauté PCMI a été pionnière dans le développement de différentes méthodes novatrices permettant de prendre en compte la complexité de l'émission des poussières, sans augmenter l'incertitude de manière délétère. Par exemple, la diversité des conditions physiques dans le milieu interstellaire et donc des propriétés spectrales entre les lignes de visée, a forcé les méthodes de séparation de composantes à prendre en compte ces effets, pour éviter des biais importants sur les analyses cosmologiques. Néanmoins, ces variations sont inévitables le long de la ligne de visée ou entre les lignes de visée au sein d'un lobe instrumental et vont entraîner une distorsion de la distribution spectrale d'énergie (SED), qui va s'éloigner de la forme d'un corps noir modifié et provoquer une rotation de l'angle de polarisation.

En développant une description quantitative et complète de ces effets, la communauté PCMI a montré qu'ils sont significatifs pour les expériences futures. Le formalisme de l'expansion en moments de la SED est particulièrement prometteur pour traiter tous ces effets et il a récemment été généralisé à la polarisation par les équipes de la communauté PCMI. La non-gaussianité de la distribution spatiale de l'émission des poussières va également entraîner des biais potentiels dans les analyses du CMB mais elle peut aussi être utilisée pour réaliser la séparation des composantes. Les méthodes de "scattering transforms" ont été étudiées en profondeur ces dernières années, et démontrent un grand potentiel dans cette direction.



**Figure 8.1.1.3** : Probabilité a posteriori du paramètre tenseur sur scalaire  $r$ , quantifiant l'amplitude des modes B primordiaux, après séparation de la composante due à l'émission polarisée de la poussière de la Galaxie, dans une simulation des observations LiteBIRD avec  $r=0$ . En bleu, la poussière est supposée suivre une loi de corps-noir modifié, ce qui amène un biais significatif. En rouge et en jaune, la séparation est faite en tenant compte des distorsions dues au mélange de différents indices spectraux (moments en  $\beta$  à l'ordre 1 et 2, respectivement). Seul le cas en vert (distorsions dues au mélange en  $\beta$  et en température à l'ordre 1), permet de retrouver une estimation de  $r$  non biaisée. Figure issue de Vacher et al. (2022).

### Perspectives

Au cours des prochaines années, un grand nombre d'expériences dédiées à la mesure des modes B du CMB, comme les expériences au sol Simons Observatory, CMB-S4 ou le satellite LiteBIRD vont observer le ciel avec une sensibilité sans précédent. La mesure des paramètres cosmologiques nécessitera la caractérisation de l'émission des poussières avec une précision extrême, en particulier les variations dues aux mélanges le long de la ligne de visée et à la dépendance en fréquence de son émission polarisée. Afin de permettre la mesure des modes B du CMB, de nouveaux relevés, avec l'expérience SKA et ses précurseurs, d'autres émissions Galactiques comme l'émission synchrotron, fortement polarisée, et l'émission anormale

micro-onde (AME) sont essentiels pour caractériser leurs contributions à l'avant-plan avec une précision accrue. Dans l'immédiat, d'autres études sur l'impact de la non-gaussianité sur les résultats et incertitudes des différentes méthodes de nettoyage du signal d'avant-plan sont nécessaires.

## La formation et l'évolution des nuages moléculaires dans les galaxies

### Contexte

La dynamique des nuages moléculaires, les mécanismes de leur formation et destruction et leur durée de vie sont des sujets longuement débattus. Les premières théories supposaient des nuages de très longue durée de vie (~100 Myr) afin de construire les nuages les plus massifs via des collisions. Depuis, les estimations pour la durée de vie des nuages moléculaires ont généralement été revues à la baisse, avec une révision de notre compréhension de leur dynamique et des processus qui dominent leur évolution. Néanmoins, les processus par lesquels ces nuages sont assemblés à partir du grand réservoir d'hydrogène atomique (HI) des galaxies sont loin d'être bien compris. Certains modèles reposent sur un équilibre délicat entre gravité, turbulence et champ magnétique. Une augmentation de la pression externe ou de la turbulence due à une rétroaction stellaire ou à des ondes de densité de bras spiraux déclenche alors de manière aléatoire une lente accumulation quasi-statique de gaz, conduisant à la formation de poches d'hydrogène moléculaire ( $H_2$ ). D'autres modèles proposent que la formation des nuages soit plus dynamique et liée à des mouvements à grande échelle dans la Galaxie, mais reste étroitement liée à la transition locale d'un gaz chaud et principalement atomique ( $T \sim 5000K$ , WNM), à un gaz dense, froid et de plus en plus moléculaire ( $T < 100K$ , CNM). Les défis majeurs dans ce domaine consistent à identifier les traceurs robustes de la cinétique et les transitions thermiques et chimiques entre les phases du gaz, et à démêler les signatures de la formation des nuages des effets de rétroaction stellaire tels que les vents stellaires et les explosions de supernovæ.

### *Bilan*

Les nuages moléculaires les plus proches sont des cibles privilégiées pour des études observationnelles de la formation des nuages moléculaires, grâce à la haute résolution spatiale et spectrale qui peut être obtenue pour ces objets. Au cours des cinq dernières années, le projet collaboratif franco-allemand (ANR/DFG) GENESIS (GENeration and Evolution of Structures in the ISm) a mené des études approfondies de plusieurs nuages proches (Draco, Musca, Cygnus...), en combinant des observations dans l'infrarouge lointain (FIR) de la poussière, des cartes de raies moléculaires qui révèlent les structures les plus froides et les plus denses dans les nuages, et des observations de raies FIR ([C II], [C I], CO, [O I]) qui dominent le refroidissement du gaz et permettent de déterminer les conditions physiques dans la zone de transition entre les phases entièrement atomique et entièrement moléculaire. Les résultats du projet GENESIS suggèrent que le processus de formation des nuages étudiés n'est ni une collision frontale de nuages entièrement moléculaires ni une douce fusion de nuages uniquement atomiques. Le scénario proposé est plutôt que toutes les phases du MIS froid participent en interaction dans un assemblage continu sur environ 1 million d'années, avec un rôle important du champ magnétique. Ces résultats suggèrent un certain degré d'universalité de la formation des nuages moléculaires, et que l'interaction des structures dans le gaz atomique due à la rétroaction stellaire et à la gravité conduisent à la formation de structures plus denses.

La dernière génération d'interféromètres millimétriques (ALMA, NOEMA) atteint une résolution suffisante pour que certains aspects de cette problématique puissent être abordés d'une façon complémentaire, via des approches statistiques qui étudient les propriétés de la population des nuages dans les galaxies proches. L'une de ces mesures est le sens de rotation des nuages dans le disque des galaxies spirales puisque le moment cinétique est

une quantité conservée. Des études menées par la communauté PCMI ont démontré que la rotation des nuages est systématiquement prograde dans les galaxies M33 et M51. Cependant, la rotation des nuages dans M33 et M51 est suffisamment lente pour que la rotation ne représente pas une grande contribution à la stabilité du nuage contre l'effondrement gravitationnel. Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte les processus dynamiques à grande échelle dans les galaxies pour les modèles de formation des nuages.

Une autre mesure accessible aux études statistiques est l'échelle de temps des différentes étapes dans l'évolution des nuages et la formation des étoiles. Sous l'hypothèse d'état stationnaire, le chevauchement spatial des différents traceurs du MIS et des plus jeunes étoiles offre une première approximation de la durée relative de chaque étape (assemblage des nuages, formation d'étoiles, destruction des nuages...). Les rapports de flux entre les traceurs du gaz froid et la formation stellaire, et leur variation avec l'échelle spatiale sur laquelle le rapport est mesuré fournissent une autre estimation alternative plus robuste de ces échelles de temps. Les deux approches ont été appliquées aux données du programme phare PHANGS-ALMA. Les résultats montrent que la destruction des nuages moléculaires par la rétroaction stellaire est très rapide (~4-5 Myr), et que la photoionisation et les vents stellaires jouent un rôle crucial dans la dispersion des nuages moléculaires dans les galaxies proches.

### *Perspectives*

SKA et ses précurseurs vont tracer la cinématique du gaz atomique à haute résolution spatiale dans la Voie Lactée et ainsi permettre des tests observationnels des modèles qui invoquent des collisions ou des mouvements cohérents dans le gaz interstellaire avant la formation de la phase moléculaire. Une cartographie à haute résolution du gaz atomique dans les galaxies proches révélera comment ces processus se déroulent dans leur contexte galactique et évaluera leur importance relative par rapport aux autres mécanismes de formation et de destruction des nuages. En capturant l'émission de jeunes étoiles encore profondément enfouies dans leurs nuages poussiéreux natals, les observations avec JWST/MIRI vont permettre d'affiner les estimations de l'échelle de temps typique associée à l'assemblage des nuages, la formation des étoiles et la dispersion des nuages par la rétroaction stellaire. Avec le decommissioning de SOFIA et l'annulation de la mission SPICA, les opportunités d'observation des raies infrarouges lointaines sont malheureusement réduites. Les missions sous les ballons stratosphériques GUSTO et ASTRHOS, ainsi que le programme GEco sur le Fred Young Submillimeter Telescope (anciennement CCAT-Prime), vont observer ces raies au cours des cinq prochaines années, mais la participation française à ces projets reste assez limitée à ce stade.

## **8.1.2 Le milieu interstellaire des galaxies proches**

### *Contexte global*

Les observations de galaxies proches fournissent un point de vue unique sur les conditions physiques et chimiques du MIS, car elles donnent accès à une grande gamme d'environnements différents (en termes de métallicité, activité de formation d'étoiles,

présence d'un noyau actif). Elles tissent donc un lien solide entre les études détaillées de la Voie Lactée et celles des galaxies lointaines.

## **Le milieu interstellaire des galaxies naines**

### *Contexte*

Alors que JWST et ALMA sondent depuis peu la nature multi-phase du MIS dans des galaxies jeunes, les galaxies naines à faible métallicité dans l'univers local servent de laboratoires proches pour confronter les observations, modèles et théories de l'évolution cosmique du MIS. Parmi les spécificités des galaxies naines, leur MIS est plus poreux, transparent et à faible métallicité, permettant des études de l'impact de l'ionisation sur le réseau chimique dans le gaz neutre atomique et moléculaire, et des processus de chauffage et refroidissement, qui ont des conséquences profondes sur la distribution de gaz froid et la régulation de la formation stellaire. Les galaxies naines à faible métallicité permettent également une étude détaillée de la nature et de l'influence des sources lumineuses X, à la fois plus nombreuses et plus lumineuses dans ces systèmes, qui participent à l'ionisation ainsi qu'à l'équilibre thermique du MIS. L'influence des sources X augmente à faible métallicité car la faible abondance relative des poussières rend d'une part le MIS plus transparent aux photons énergétiques et diminue d'autre part la contribution du chauffage par effet photoélectrique.

### *Bilan*

La communauté PCMI est reconnue internationalement pour son expertise du MIS dans les galaxies proches de faible métallicité. Elle a été chargée de diriger de nombreux programmes d'observation phares, tels que le Dwarf Galaxy Survey avec les instruments PACS et SPIRE sur le satellite Herschel, et des programmes d'observation des régions emblématiques de formation d'étoiles dans les nuages de Magellan avec Herschel, ALMA et SOFIA. Les cinq dernières années ont vu la publication de nombreux résultats synthétiques issus de ces efforts de longue haleine. Ces travaux ont caractérisé les conditions physiques dans le MIS des galaxies de faible masse et à faible métallicité, démontré l'importance de la raie de CII en tant que traceur observationnel du gaz moléculaire, étudié la provenance des raies FIR dans la phase ionisée et la phase neutre du MIS, et étudié la corrélation empirique entre les raies FIR et l'émission de la poussière chaude. D'autres travaux observationnels et théoriques effectués en parallèle ont confirmé que le chauffage par effet photoélectrique sur les petits grains de poussière carbonés devient de moins en moins important quand la métallicité diminue.

Des travaux pionniers menés par la communauté PCMI ont montré que la photoionisation par les photons X dans le MIS de galaxies externes pauvres en métaux était un mécanisme crucial à prendre en compte en plus de celle par les photons UV. En reliant directement les mécanismes de chauffage et refroidissement via des modèles, est apparue une nouvelle vision des diagnostics fournis par de nombreuses raies d'émission dans le domaine visible (par ex: diagrammes dits "BPT") comme dans l'IR proche (par ex: [NeV]) et lointain (par ex: [CII], [OI]). La plupart de ces diagnostics ne sont pas calibrés à très faible métallicité et la communauté PCMI est encore en tête des efforts pour combiner des échantillons multi-longueurs d'onde de galaxies de faible métallicité à des modèles du MIS multiphase



qui prennent en compte divers mécanismes énergétiques, en particulier pour l'analyse des observations JWST.

### *Perspectives*

Les études achevées par la communauté PCMI pendant ces cinq ans vont naturellement se poursuivre avec la comparaison des différents mécanismes de chauffage (ionisation par rayons cosmiques, X, et effet photoélectrique) de manière cohérente via des modèles de photoionisation et photodissociation. Un effort important est à fournir en ce qui concerne le traitement simultané des chocs, de la photoionisation et de la photodissociation du gaz. En outre, les différentes signatures du MIS dues à la présence de sources X nous renseignent sur la nature même des objets compacts associés. Ainsi, de nombreux travaux cherchent à identifier la nature de ces objets dans les galaxies naines peu métalliques, en utilisant un large éventail de transitions d'espèces d'ionisations différentes. Cette méthode, aussi employée pour l'étude des noyaux actifs dans les galaxies massives, doit nous permettre de contraindre la fraction d'occupation de trous noirs de masse intermédiaire dans les galaxies les moins massives (qui sont les plus susceptibles d'héberger de tels trous noirs). De telles techniques sont interdisciplinaires par nature et sont actuellement en cours d'élaboration par le groupe LFEMI à AIM en collaboration avec des experts dans divers domaines (spectroscopie visible, continu radio, objets compacts...). À beaucoup plus long terme, un spectropolarimètre UV tel que POLLUX proposé pour Habitable Worlds Observatory (mission NASA recommandée par le Decadal Survey Astro 2020; PI instrument PRIMAgger) fournira des contraintes fortes sur l'environnement interstellaire des objets compacts.

## **Les propriétés et l'évolution de la poussière interstellaire dans les galaxies proches**

### *Contexte*

Les poussières interstellaires jouent un rôle fondamental dans la physique et la chimie du MIS, contribuant aux processus de refroidissement et de chauffage du gaz, mais aussi à la formation de molécules. De plus, l'émission et l'absorption de la lumière par les grains de poussière sont souvent utilisées comme des traceurs de la masse du gaz interstellaire. Comprendre comment les gains se forment, évoluent et acquièrent leurs propriétés optiques est donc crucial pour la communauté astrophysique dans son ensemble.

### *Bilan*

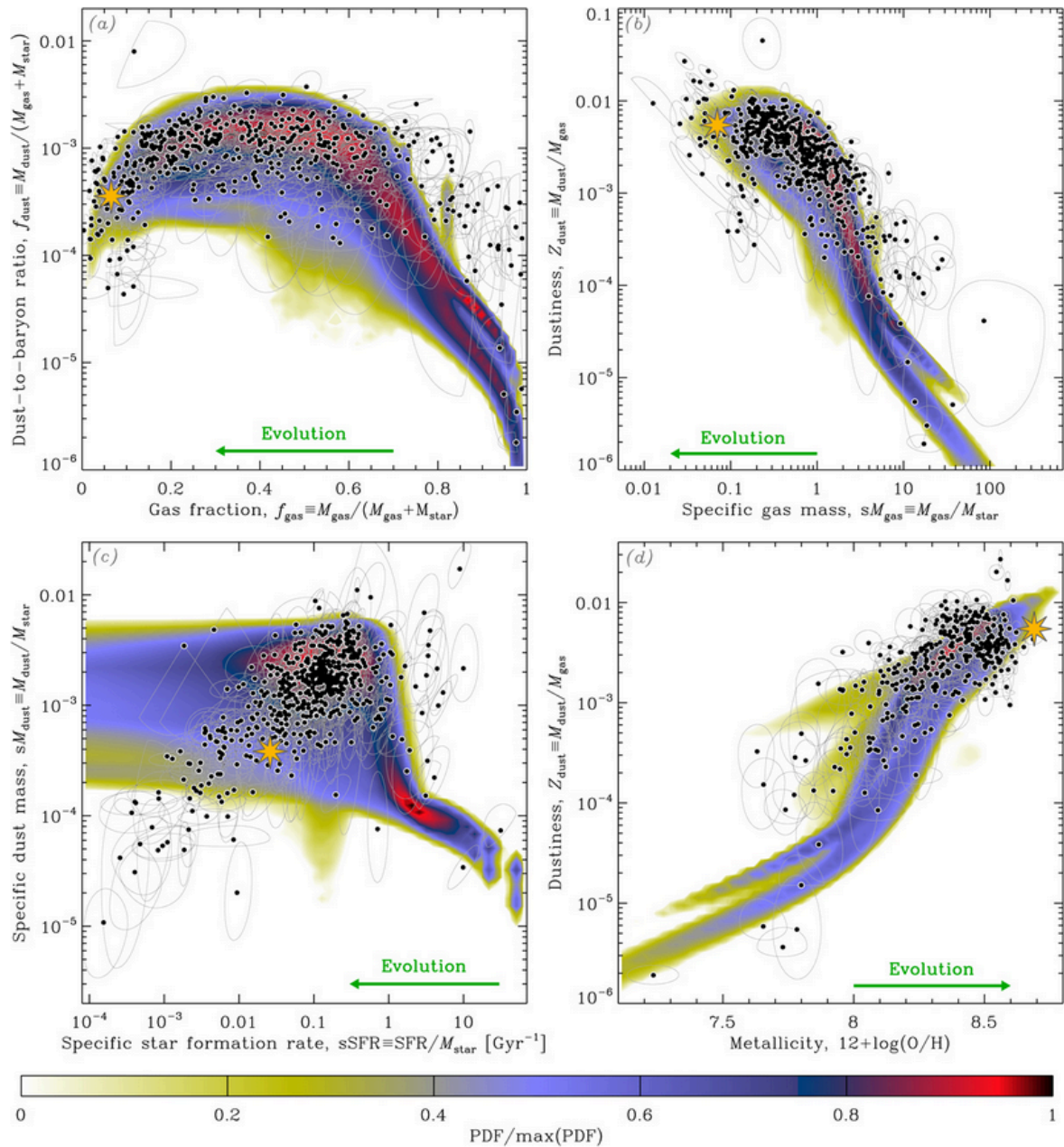
Depuis le précédent document de prospective, un effort important a été produit par la communauté PCMI sur l'étude des propriétés des grains de poussière dans les galaxies proches. L'expertise de la communauté PCMI dans ce domaine est internationalement reconnue, avec leadership du projet européen FP7 DustPedia. Ce projet a produit une base de données de près de 900 galaxies proches, rassemblant ainsi une gamme de longueurs d'ondes sans précédent. Un autre axe important a été le développement des modèles bayésiens hiérarchiques de poussières, permettant la caractérisation des paramètres physiques de ces galaxies. Parmi les résultats les plus importants, on peut citer les contraintes sur 1) la structure en trois dimensions du MIS de galaxies proches; 2) la contribution des différentes sources de chauffage de la poussière; 3) la mesure de l'émissivité des grains et sa dépendance en fonction de l'environnement; 4) les relations

d'échelles entre propriétés des grains et conditions physiques; et 5) les échelles de temps caractéristiques des principaux processus d'évolution cosmique des grains.

### *Perspectives*

Le JWST et ses instruments couvrant l'infrarouge proche et moyen vont jouer un rôle central dans l'avancement de ces sujets, avec une forte participation dans différents programmes d'observation acceptés. Les programmes Treasury menés par la collaboration PHANGS ont permis de cartographier 84 galaxies proches avec l'instrument MIRI et 26 galaxies avec l'instrument NIRCAM (voir Fait Marquant 2), en complément de programmes plus ciblés qui visent à décrypter les étapes clés du cycle de vie de la poussière dans les diverses conditions du MIS de l'univers local. Pour la fenêtre de l'infrarouge lointain, l'une des opportunités les plus prometteuses est la mission PRIMA de la NASA. La communauté française est très impliquée dans sa préparation, par le développement d'un instrument et la grande quantité de cas scientifiques soumis au PRIMA Science Book. Un effort important est également à fournir du côté de la modélisation, notamment en ce qui concerne notre compréhension de la variation des propriétés des grains en fonction de la métallicité et du champ de rayonnement dans le milieu diffus des galaxies. La communauté PCMI (IAS, IRAP, AIM) est responsable de plusieurs codes de pointe pour la modélisation de l'émission de poussière du MIS (par ex. HerBIE, DustEM).

Aux plus grandes longueurs d'onde, plusieurs projets d'observation pour étendre la couverture spectrale des galaxies proches jusqu'au domaine millimétrique avec la caméra NIKA2 au télescope de 30m de l'IRAM ont été entrepris et vont bientôt rendre leurs premiers résultats. Les données de ces programmes permettront de mieux comprendre les propriétés optiques des grains à grande longueur d'onde et leur évolution en fonction des conditions physiques, ainsi que la stratification du MIS et la transition avec le milieu circumgalactique.



**Figure 8.1.2.1 :** Evolution de la poussière interstellaire dans les galaxies, en supposant une IMF de Salpeter (1955). Les quatre panneaux montrent les relations empiriques entre la masse totale de poussière par rapport à la masse globale des gaz et des étoiles, la métallicité et le taux de formation d'étoiles des galaxies. Les points noirs représentent 556 galaxies de la base de données DustPedia. L'étoile jaune est la Voie Lactée. Les contours de densité colorés représentent la distribution de probabilité postérieure des traces d'évolution de la poussière, marginalisant sur l'histoire de formation stellaire (SFH) individuelle de chaque galaxie. Figure adaptée de Galliano et al. (2021).

## Mieux caractériser le MIS froid dans les galaxies avec les relevés hyperspectraux

### Contexte

Avec l'avènement des interféromètres à haute sensibilité comme NOEMA et ALMA, des projets comme PHANGS ont pu cartographier le gaz moléculaire dans la raie  $^{12}\text{CO}(2-1)$  dans des milliers de nuages moléculaires géants des galaxies proches avec une résolution spatiale typique de 50 à 100 pc. Un échantillon aussi grand permet pour la première fois de mettre en évidence l'importance de l'environnement galactique pour la formation des étoiles. Des récepteurs à large bande instantanée sont actuellement utilisés pour détecter des raies plus faibles telles que les isotopologues du  $^{12}\text{CO}$  ( $^{13}\text{CO}$  ou  $\text{C}^{18}\text{O}$ ) ou de différentes espèces comme  $\text{HCO}^+$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{HNC}$ ,  $\text{N}_2\text{H}^+$ , etc. Chacune de ces raies est excitée sous des conditions spécifiques de densité, de température et de rayonnement, ce qui implique que la modélisation de l'ensemble de ces raies est une technique bien établie pour déduire les paramètres physiques du MIS froid local. Ces raies d'émission sont cependant extrêmement faibles dans les autres galaxies, ce qui rend une cartographie à haute résolution actuellement impossible.

### *Bilan*

La communauté PCMI est très active dans les études des nuages moléculaires de notre Galaxie. A titre d'exemple, le programme ORION-B (Outstanding Radio-Imaging of Orion B) a récemment finalisé les observations d'une trentaine de raies moléculaires pour un champ de  $13 \times 18$  pc dans le nuage Orion B, à une résolution typique de 50 mpc et 0,6 km/s. Le grand volume de ces données ( $\sim 1.6 \times 10^{11}$  voxels) a nécessité le développement de nouvelles méthodes pour plusieurs étapes de l'analyse comme le débruitage, la classification, le contenu informationnel des raies et l'estimation des paramètres physiques. Déduire ces paramètres sans supervision humaine implique d'inverser non seulement les modèles de transfert radiatif, mais également les modèles physiques et chimiques fournis par exemple par le code PDR de Meudon. De récentes méthodes statistiques et d'apprentissage automatique puissantes sont actuellement développées pour contribuer à cet objectif. Ces grands jeux de données ont également propulsé de nouvelles méthodes pour exploiter l'information spectrale (rapports d'intensité et formes spectrales de plusieurs raies d'émission) pour déduire les conditions physiques (distribution de la densité du gaz, structure du champ de vitesse) à des échelles spatiales inférieures à la résolution du télescope.

### *Perspectives*

Dans les années à venir, les nouvelles techniques d'analyse des données hyperspectrales permettront d'inférer des paramètres physiques du MIS froid de notre galaxie et des galaxies proches. Ces estimations de la densité de colonne et volumique, la cinétique, la température et la pression du gaz, chacun avec des intervalles de crédibilité fiables, sont les quantités clés pour valider les modèles de la formation des étoiles. Le prochain défi consiste à améliorer la résolution spatiale d'un facteur au moins cinq, afin de résoudre les nuages individuels dans les galaxies proches. L'IRAM développe actuellement une caméra réceptrice qui contiendra 25 pixels, chacun délivrant la même bande passante de fréquence instantanée de 16 GHz (multipliée par deux polarisations) que le récepteur EMIR. Cette formidable puissance d'observation pourrait être utilisée pour augmenter la sensibilité des observations dans les galaxies proches, permettant ainsi une cartographie des raies d'émission moléculaire avec une puissance de diagnostic éprouvée pour un échantillon de galaxies proches. Combinée aux efforts actuels pour améliorer la résolution spatiale vers les

galaxies proches et atteindre 10 pc en utilisant les lignes de base les plus longues de NOEMA et ALMA, cette caméra permettra à la communauté de combler le fossé de résolution, de sensibilité et de conditions environnementales qui sépare aujourd'hui les études Galactiques et extragalactiques du MIS froid.

## **Bilan d'énergie et dissipation de la turbulence dans le MIS et le gaz circumgalactique**

### *Contexte*

Le retraitement de l'énergie mécanique et radiative dans le milieu interstellaire (MIS) régule la distribution des phases gazeuses, la formation des nuages moléculaires et des étoiles, et les mécanismes de rétroaction. Cette énergie est libérée par l'accrétion du gaz, les interactions entre galaxies et la rétroaction des étoiles et des trous noirs. L'impact de cette injection d'énergie sur la formation et l'évolution des galaxies est largement inconnu et dépend de la façon dont cette énergie est transférée au gaz et dans quelle phase du gaz interstellaire elle est dissipée.

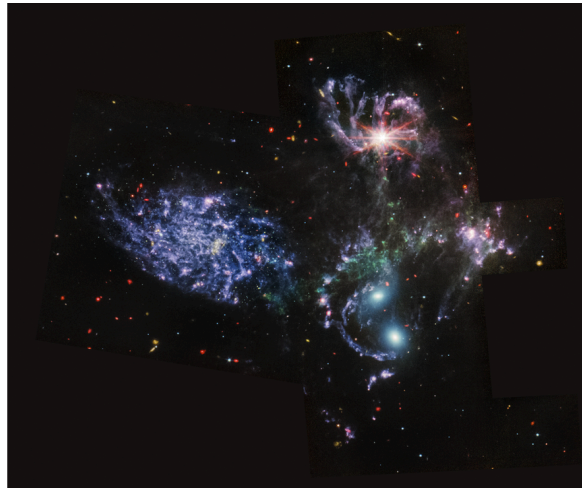
Une partie de cette énergie est thermalisée, produisant des halos de gaz chauds avec de longs temps de refroidissement. Une partie est transférée sous forme d'énergie cinétique globale par pression de radiation ou par impact mécanique direct, produisant des vents galactiques. Une partie de l'énergie cinétique injectée à grande échelle par rétroaction est transférée à plus petite échelle, ce qui entretient la turbulence dans le gaz et le mélange entre les phases du gaz. Ce troisième point est largement ignoré dans les études actuelles sur la formation des galaxies et n'est pris en compte dans les simulations cosmologiques que sur une gamme très limitée d'échelles. Parce qu'elle a un fort impact sur le refroidissement du gaz, la dissipation de la turbulence peut être un processus clé dans la régulation du contenu en gaz des galaxies, mais on sait encore peu de choses sur l'impact du mélange sur la formation et l'excitation du gaz moléculaire.

### *Bilan*

Les observations de la mission Spitzer ont révélé qu'une grande partie de l'énergie mécanique injectée par la rétroaction descend par cascade jusqu'aux échelles sub-parsec, où elle est dissipée, en particulier à travers les raies de H<sub>2</sub>. Les raies rotationnelles de H<sub>2</sub> intégrées sur des galaxies entières rayonnent, dans de nombreuses sources, une puissance totale qui ne peut être expliquée par le seul retraitement de l'énergie radiative UV disponible. Depuis plusieurs années, la communauté PCMI (LPENS, IAP, Strasbourg) a mené de nombreuses études pour obtenir des signatures observationnelles de la turbulence, faire des bilans énergétiques des galaxies, et développer des modèles physiques du refroidissement du gaz et de la dissipation de l'énergie.

La collision des galaxies du Quintette de Stephan, objet de plusieurs programmes d'observation avec ALMA et JWST, constitue une cible privilégiée pour étudier ces processus. L'énergie mécanique de cette collision induit une multitude de chocs dans le milieu gazeux situé entre les galaxies. Ce milieu est hétérogène, constitué de gaz très diffus subissant des chocs à grande vitesse et à très hautes températures mais aussi d'hydrogène plus dense, soumis à des chocs à des vitesses plus faibles, qui peut ensuite se refroidir sous l'effet de la compression. L'origine précise des filaments moléculaires dans le milieu

intergalactique révélés par les dernières images JWST reste pourtant inconnue. Le gaz moléculaire chaud (>100K) pourrait être formé à partir d'amas moléculaires froids (~20K) qui ont été déchirés, mélangés et entraînés avec le gaz chaud, émettant des rayons X. Des observations spectroscopiques avec l'instrument MRS/JWST ont été très récemment obtenues et vont permettre aux chercheurs de caractériser la cinématique et l'excitation du gaz H<sub>2</sub> à l'échelle d'un parsec dans ces filaments et tester ce scénario de formation.



**Figure 8.1.2.2 :** Image composite JWST MIRI des galaxies en collision du Quintette de Stephan. Rouge : F1500W (15 microns - poussières) Vert : F1000W (10 microns - hydrogène moléculaire) Bleu : F770W (7,7 microns - poussière). Crédit: P. Guillard, NASA, ESA, CSA, STScI

### *Perspectives*

À l'avenir, on peut s'attendre à des progrès sur plusieurs aspects de cet axe de recherche. La spectro-imagerie à haute résolution spatiale de la molécule H<sub>2</sub> avec le télescope JWST ouvre une perspective entièrement nouvelle. Ces observations, à une résolution de l'ordre du parsec, nous donneront accès au bilan énergétique du gaz multiphase dans différents types de galaxies (formation d'étoiles, flambées d'étoiles, AGN), au taux de dissipation et d'excitation du gaz, et nous permettront ainsi de relier le taux d'apport d'énergie mécanique provenant de la collision des galaxies au taux de dissipation turbulente. Les données JWST vont également pousser le développement de nouvelles méthodes pour contraindre les mécanismes d'excitation et les bilans énergétiques à l'échelle galactique. La communauté a également besoin des simulations numériques de l'impact de l'éclatement et du mélange des nuages sur la formation et l'excitation du gaz chaud H<sub>2</sub>. Pour élucider les mécanismes de formation de ces spectaculaires structures filamenteuses de poussière et de gaz moléculaire observées dans les images JWST, des comparaisons entre les données et les simulations numériques seront cruciales.

### 8.1.3 Le milieu interstellaire des galaxies lointaines

#### *Contexte global*

L'étude du MIS dans les galaxies lointaines se distingue des études menées sur les galaxies proches pour plusieurs raisons. Les galaxies lointaines sont en général non ou faiblement résolues spatialement, ce qui implique que l'émission observée représente un ensemble de régions avec des conditions physiques différentes.<sup>34</sup> Les objets extrêmes, tels que les

<sup>34</sup> Cette spécificité est moins vraie aujourd'hui que dans les décennies précédentes puisque le nombre des observations de galaxies à grand redshift qui atteint des échelles spatiales de l'ordre de quelques centaines de parsecs ne cesse d'augmenter, surtout pour les observations de traceurs moléculaires (H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, OH<sup>+</sup>, CH<sup>+</sup>) dans les galaxies lentillées gravitationnellement avec des reconstructions dans le plan source.

galaxies en fusion, les galaxies ultralumineuses dans l'infra-rouge (ULIRGS), les noyaux actifs de galaxies (AGN), présentent des milieux interstellaires très différents des conditions du MIS dans le voisinage solaire. De plus, les processus physiques et chimiques qui dominent la formation d'étoiles et l'évolution des galaxies ont eux-mêmes évolué au fil du temps cosmique. Même pour les galaxies de la séquence principale, les paramètres d'évolution des galaxies – la fonction de masse initiale, la population stellaire, les fonctions de chauffage et de refroidissement, les taux de formation d'étoiles, les rétroactions des supernovæ et des AGN, le rayonnement du fond cosmologique et les taux d'ionisation par les rayons cosmiques – ont varié considérablement pendant l'histoire de l'Univers.

## **L'évolution physico-chimique des galaxies lointaines**

### *Contexte*

Les observations des raies d'émission moléculaire sont devenues un outil courant pour étudier le MIS des galaxies lointaines et la formation des galaxies jusqu'aux redshifts les plus élevés. Pour les galaxies à grand décalage vers le rouge ( $8 < z < 2$ ), les atomes et les molécules sont des traceurs polyvalents de la matière diffuse et dense car leurs états d'ionisation et leurs degrés de liberté internes portent la signature complète des conditions physiques de leur environnement. Ces raies tracent directement les abondances chimiques et les conditions d'excitation, tout en contrôlant la fonction de refroidissement. Les raies moléculaires sont des témoins encore plus exigeants des nombreux processus dans le milieu dense : réactions chimiques en phase gazeuse ou à l'état solide avec d'autres espèces, photoionisation et photo-dissociation par les photons UV, ionisation par les rayons cosmiques, condensation sur les grains, désorption thermique ou non-thermique. De plus, la chimie est étroitement liée à la dynamique du gaz : l'état d'ionisation contrôle le couplage avec le champ magnétique galactique, et le rayonnement des molécules polaires est le principal agent de refroidissement du MIS froid. Inversement, les perturbations dynamiques du gaz conduisent à des variations de densité et de vitesse qui modifient les taux de formation et de destruction des molécules.

À des décalages vers le rouge encore plus élevés ( $z > 8-10$ ), avant l'apparition des métaux, les molécules simples (telles que  $H_2$ , HD,  $HeH^+$ ,  $H_2^+$ ) ont joué un rôle crucial dans le refroidissement du gaz et la formation des premières étoiles. À cette époque, la chimie du MIS est essentiellement une chimie gazeuse de l'hydrogène, du deutérium, de l'hélium et éventuellement du lithium. La connaissance précise des vitesses de réaction pour la gamme de températures prévalant dans le gaz aux premiers stades de l'effondrement (100 - 5000 K) est cruciale afin de bien comprendre l'évolution moléculaire du MIS primordial.

### *Bilan*

Au cours des cinq dernières années, la communauté PCMI a mené de nombreuses études pour approfondir notre compréhension de la physique et de la chimie du MIS dans les galaxies jeunes. Pour ne citer que quelques exemples, la modélisation de la distribution spectrale d'énergie (SED) des galaxies naines à faible métallicité et des Lyman Break Galaxies avec le code public CIGALE a permis d'évaluer l'importance relative de différents processus pour l'évolution chimique des galaxies : la naissance et la mort des étoiles, la

formation et la destruction des grains de poussière, et les outflows galactiques. Ces résultats ont permis de développer des prescriptions plus précises pour l'évolution des métaux et de la poussière dans ces jeunes systèmes. Des relevés spectraux avec NOEMA des jeunes galaxies (<1,8 Gyr) par le projet SUNRISE (Submillimeter molecULar liNe suRveys in dIstant duSty galaxiEs) ont révélé la richesse chimique et la complexité des propriétés physiques du MIS à cette époque. La modélisation astrochimique de ces observations a indiqué que le champ de rayonnement ultraviolet lointain est moins important pour la régulation du MIS que dans les galaxies proches, tandis que les rayons cosmiques, les rayons-X et les chocs régulent les abondances moléculaires et les conditions initiales de formation des étoiles.

Des résultats importants ont également été obtenus grâce aux expériences de laboratoire sur le MIS de l'Univers primitif. Par exemple, la formation de l'hydrogène moléculaire dans les galaxies poussiéreuses à grand décalage vers le rouge telles qu'observées par le JWST (avec une température des grains élevée due au rayonnement du fond cosmologique) posait problème. Elle a été mesurée à la surface des grains de carbone comme étant efficace à ces températures, levant l'obstacle à la formation de H<sub>2</sub>, ce qui a un impact important sur la turbulence, sur la fonction de refroidissement et, par conséquent, sur la formation d'étoiles des galaxies à grand décalage vers le rouge.

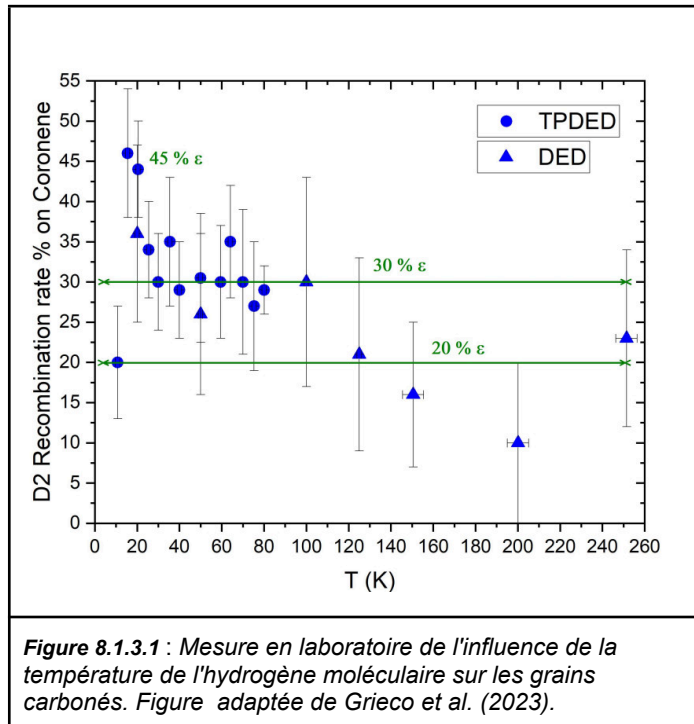


Figure 8.1.3.1 : Mesure en laboratoire de l'influence de la température de l'hydrogène moléculaire sur les grains carbonés. Figure adaptée de Grieco et al. (2023).

Sur tous ces aspects, des observations à la modélisation en passant par l'astrophysique de laboratoire ou la chimie quantique, la communauté PCMI dispose des outils nécessaires pour comprendre la formation et l'évolution physico-chimique des galaxies lointaines. Ces outils ont été développés pour obtenir une compréhension détaillée de ce qui se passe dans notre Galaxie et peuvent être transposés. Plusieurs équipes travaillent en commun depuis une décennie et ont pu faire émerger un savoir-faire unique en termes de production de données moléculaires pour la chimie primordiale.

### Perspectives

Les nouveaux instruments et observatoires au sol et les télescopes spatiaux qui travaillent dans les domaines visibles et infra-rouges (tels que l'ELT et les missions JWST et Euclid pour ne citer que quelques exemples), ainsi que les observatoires sub-millimétriques et radio (ALMA, NOEMA, SKA, ngVLA), permettent de sonder l'univers primitif et d'observer le gaz et la poussière des galaxies les plus jeunes. Les améliorations dans l'instrumentation prévues dans le domaine radio et sub-millimétrique, notamment l'augmentation de la sensibilité et de la flexibilité (par exemple, les plus grandes largeurs de bandes en



fréquence), permettent des sondages de plus en plus profonds avec une statistique accrue et un nombre grandissant d'espèces moléculaires détectées.

Le développement des observations va de pair avec le développement de codes d'ajustement des distributions spectrales en énergie des galaxies, qui permettent, en combinant de façon cohérente les données photométriques et spectroscopiques, d'extraire les paramètres d'évolution des galaxies (histoire de la formation stellaire, taux de formation stellaire, fonction de masse initiale, proportion de noyaux galactiques actifs, etc). Ces codes vont pouvoir offrir une vision statistique, sur des centaines voire des milliers d'objets, de l'évolution de ces paramètres sur des temps cosmiques.

## **Nouveaux traceurs de la physique dans l'Univers jeune**

### *Contexte*

Les hydrures légers, formés par réaction de  $H_2$  avec des éléments lourds (C, O, N, Ar,...) sont de précieux traceurs observationnels de l'évolution des galaxies à grand redshift : ils tracent les toutes premières étapes de l'évolution chimique de la matière baryonique parce qu'ils émergent peu après la formation de  $H_2$  et une fois que les éléments lourds ont commencé à enrichir le gaz. Parmi ces molécules,  $CH^+$  est particulièrement intéressant d'une part parce que sa formation est fortement endothermique et donc limitée dans le gaz froid ( $\sim 100K$ ) lors de l'apparition des premières molécules, et d'autre part parce qu'il s'agit d'une molécule très fragile, détruite par des collisions avec  $H_2$  avant d'être photo-dissociée. En outre, son moment dipolaire étant très élevé, ses transitions rotationnelles sont très difficiles à exciter. C'est pourquoi  $CH^+(J=1-0)$  est connu depuis longtemps pour être une espèce moléculaire unique capable de tracer des processus hautement dissipatifs tels que les chocs, ou plus faibles comme les cisaillements en vitesse produits par la turbulence. Aux grandes échelles,  $CH^+(J=1-0)$  est donc un très bon traceur de l'accrétion de gaz froid dans les halos des galaxies et l'injection de quantité de mouvement et d'énergie dans le milieu circumgalactique (CGM) entraînée par les processus de rétroaction par les étoiles et les noyaux actifs de galaxies (AGN).

### *Bilan*

Le CGM d'un groupe de galaxies à un redshift  $z=2.8$ , comprenant une galaxie à flambée d'étoiles et un quasar à large raie d'absorption, immergé dans une nébuleuse géante Ly alpha, a été imagé avec ALMA dans la raie  $CH^+(J=1-0)$  sur 100 kpc. L'analyse de ces données, combinées avec les données auxiliaires de la raie CO, montrent que l'ensemble du CGM est en train d'affluer vers les galaxies. Plusieurs chocs à l'échelle du kpc sont détectés dans l'émission  $CH^+$  à l'interface du CGM entrant et du gaz sortant à grande vitesse, et vus dans les raies Ly $\alpha$ . Ces chocs indiquent que la turbulence du CGM est alimentée par des flux sortants des AGN et des étoiles. Les bilans de masse et d'énergie du CGM montrent une accrétion nette de masse à un taux proportionnel au taux de formation d'étoiles. De cette relation, on a déduit que l'explosion de la formation d'étoiles et de la croissance des trous noirs est alimentée par l'accrétion de gaz à grande échelle. L'étude pilote menée sur le CGM de ce groupe de galaxies lentillées est une bonne illustration de la puissance de la spectroscopie des raies moléculaires à haute résolution spectrale lorsqu'elle est combinée

avec la raie Ly $\alpha$ , un traceur des phases chaudes présentes dans le CGM, et interprétée dans le cadre des modèles de choc moléculaires.

### *Perspectives*

**XXX ? ALMA ??? JWST ??**

## **8.2 Les moyennes échelles**

### **8.2.1 Grands complexes moléculaires (GMC)**

#### *Contexte*

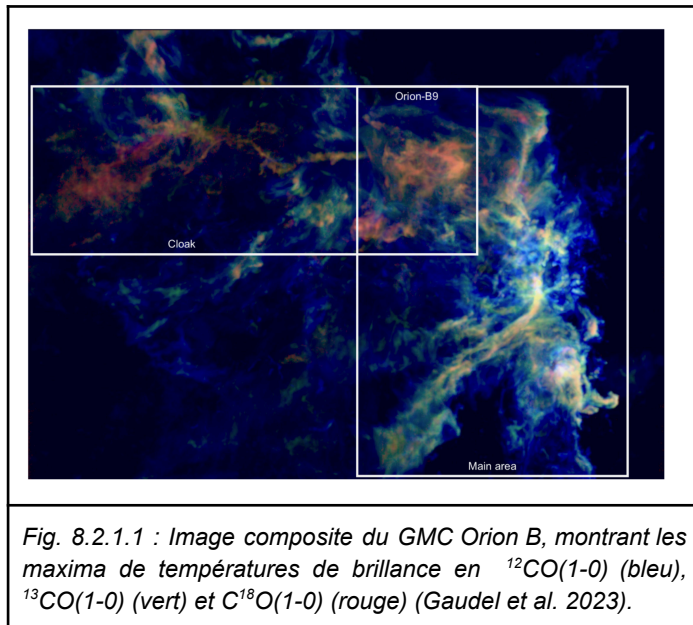
Les grands complexes moléculaires (GMC) sont des nuages de gaz moléculaire qui constituent les plus grandes entités auto-gravitantes de la Galaxie. D'une échelle de taille comparable à la hauteur de pression, ils sont le siège d'une condensation à pression quasi constante vers des filaments et des grumeaux de plus en plus petits où a lieu la formation de nouvelles étoiles. Cette fragmentation hiérarchique est probablement due à l'instabilité thermique combinée à la dynamique turbulente de ces gaz magnétisés. Caractériser la structure physico-chimique complexe qui en résulte (en particulier leur structuration filamenteuse), ses liens avec l'efficacité de formation stellaire au sein du GMC, et comprendre comment utiliser l'émission moléculaire de tels GMC pour remonter à ces propriétés restent également des questions clés des travaux actuels.

#### *Bilan*

La formation des GMCs et l'émergence de leur structure sont fortement liées à la combinaison entre la nature multiphasique du MIS et sa nature turbulente, induisant un cyclage de la matière entre les phases WNM et CNM. Des progrès importants ont été réalisés sur la compréhension théorique de ce cyclage et de ses signatures observables grâce à des simulations numériques de turbulence forcée avec refroidissement et champ magnétique au LPENS. Ces simulations reproduisent pour la première fois les statistiques d'un échantillon homogène de lignes de visée, et montrent comment la formation d'espèces observées comme CH<sup>+</sup> par des réactions endothermiques est rendue possible par le H<sub>2</sub> chaud présent dans le gaz cyclant entre les phases chaude et froide. Un élément technique déterminant, qui a permis cette étude et qui combine à la fois dynamique MHD et chimie, est de traiter la chimie lente de H<sub>2</sub> et de calculer a posteriori les autres abondances à l'équilibre. Cette technique ouvre des perspectives pour l'interprétation des données JWST car les raies de H<sub>2</sub> peuvent être traitées plus efficacement. Une autre approche, beaucoup plus coûteuse, consiste à calculer la chimie entièrement couplée à la dynamique (comme dans le code CHEMSES développé également au LPENS). Elle a permis de montrer qu'il était possible de représenter l'émission globale d'une masse de gaz moléculaire turbulent en additionnant les contributions d'un ensemble statistique de chocs.

Des études observationnelles menées en particulier au CEA avec Herschel ont établi que la structure filamenteuse au sein des GMC semble présenter une épaisseur de filament caractéristique de 0.1 pc pour les GMC proches, mais l'universalité de cette propriété reste débattue. Plusieurs travaux ont donc été menés pour éliminer la possibilité d'un biais lié à la

résolution spatiale, et montrer la compatibilité de cette propriété avec l'absence d'échelle caractéristique apparente dans les spectres de puissance. Les propriétés de cette structure filamenteuse jouent un rôle clé dans la compréhension du processus de formation d'étoiles, comme discuté dans la section 8.2.2 ci-dessous.



Par ailleurs, le grand programme ORION-B à l'IRAM-30m (collaboration internationale menée par l'IRAM et le LERMA, avec participation de l'IRAP, du LAB, et du LPENS) a procédé au relevé systématique de plus d'une dizaine de raies moléculaires sur un champ de vue de plusieurs dizaines de parsecs dans le GMC le plus proche du voisinage solaire: Orion B. Ce type d'observations hyperspectrales sur un champ de vue étendu, combinant en partie les forces des relevés spectraux (nombreuses raies détectées, mais sur une ou quelques positions) et de la

cartographie dans une ou quelques raies, permet de s'attaquer aux questions sur la structuration (physique et chimique) des GMC et son lien avec l'efficacité de formation stellaire sous un angle statistique. En particulier, elles permettent d'aller au-delà de l'étude des seules régions denses des GMCs (coeurs denses, cf. 8.2.2 ) et de tenir compte également de la structure et de l'émission des parties moins denses. Les travaux du consortium ORION-B ont par exemple permis de montrer la contribution importante de l'enveloppe diffuse à l'émission totale du nuage dans des traceurs comme HCN, traditionnellement associés aux seules régions denses.

### Perspectives

Le développement de récepteurs multi-beams pour des radio-telescopes comme l'IRAM-30m devrait faciliter la réalisation d'observations hyperspectrales grand champ sur un plus grand nombre de GMC, permettant ainsi de vérifier le caractère universel ou non des relations observées dans Orion B et de caractériser comment la structuration physico-chimique des GMC dépend de leur environnement.

Dans le domaine de la radioastronomie interférométrique, NenuFAR et LOFAR offrent une vue complètement nouvelle du milieu interstellaire, sans doute proche de la bulle locale (~200 pc). Les canaux de dépolarisation qui strient les images du rayonnement synchrotron sont d'une origine encore inconnue, mais sans doute liée aux structures qui matérialisent la dissipation de la turbulence magnétisée du MIS diffus (chocs, feuilles de cisaillement et de courant). Les futurs travaux théoriques devront s'efforcer de prendre en compte les effets de la rotation Faraday pour pouvoir exploiter à fond le pouvoir interprétatif de ces nouveaux observatoires, précurseurs de SKA. L'anisotropie de la diffusion thermique dans des milieux dilués permet peut-être aussi d'expliquer ces structures extrêmement filamenteuses et sans doute parallèles au champ magnétique. La très grande résolution de JWST va aussi

permettre de sonder des échelles proches du libre parcours moyen des grains de poussière, pour tenter de révéler où se termine le spectre en loi de puissance observé dans la poussière, et sonder ainsi les échelles en deçà desquelles le domaine non-collisionnel commence.

Enfin, de nouvelles techniques de génération de champs turbulents proposent un nouveau cadre pour interpréter finement la structure 3D d'un milieu turbulent magnétisé ou non. Ces techniques en plein essor pourraient permettre de court-circuiter les simulations numériques dans un grand nombre de cas en proposant des réalisations statistiquement réalistes d'un champ issu d'un jeu d'équations aux dérivées partielles donné, pour le coût d'un seul pas de temps d'une simulation "classique".

## 8.2.2 Régions de formation d'étoiles

### *Contexte*

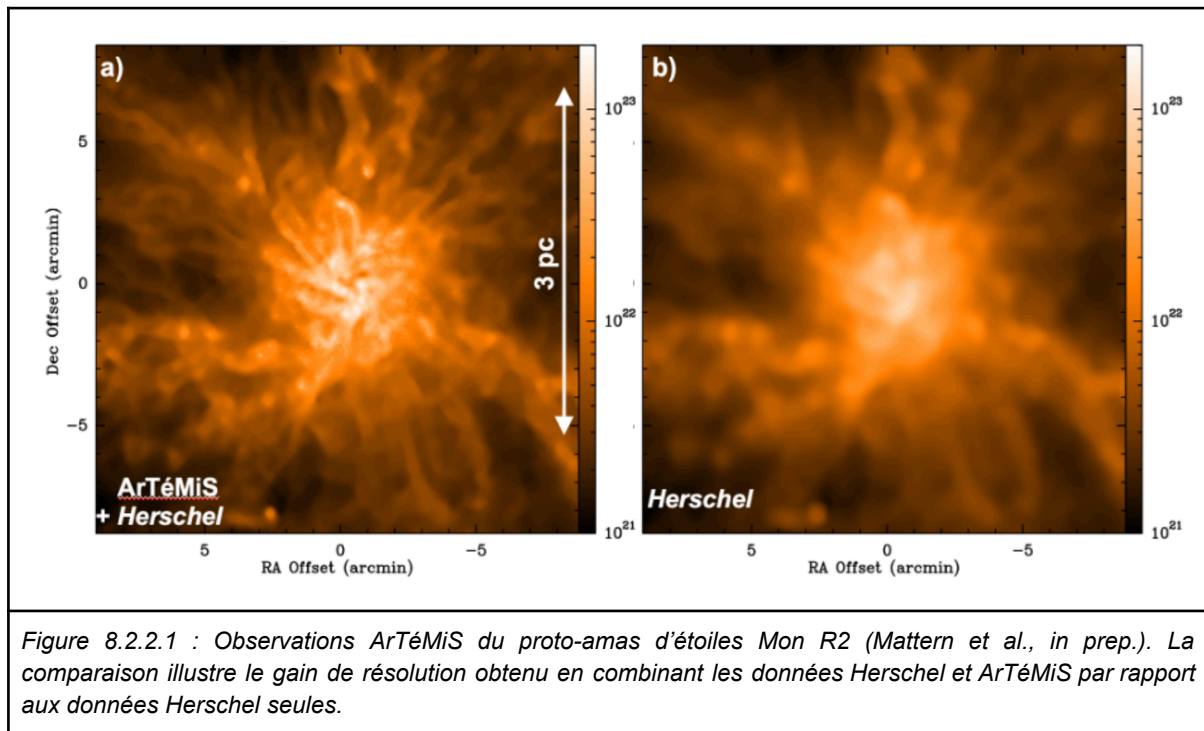
Il est désormais établi que les régions de formation stellaire sont structurées en réseau de filaments de poussières et de gaz. Les plus denses d'entre eux se fragmentent pour former des cœurs, qui eux-mêmes s'effondrent pour former des étoiles. La communauté PCMI française a grandement contribué à établir cette vision hiérarchique de la formation stellaire notamment à travers l'étude des données en infrarouge lointain et (sub-)millimétrique fournies par les satellites Herschel et Planck. Il est donc devenu évident que la formation et l'évolution des filaments interstellaires est étroitement liée à la détermination, et à la variation éventuelle, de la fonction de masse initiale (IMF) des étoiles. C'est cette question fondamentale de l'origine de l'IMF qui alimente la grande majorité des travaux de recherche en formation stellaire.

### *Bilan*

Ces 5 dernières années, un grand nombre d'études menées par des équipes françaises ont visé à affiner le scénario établi, ceci par: i. l'étude à haute résolution angulaire de la fragmentation dans les régions de formation d'étoiles massives; ii. l'étude systématique de la dynamique du gaz à l'intérieur des filaments; iii. l'étude des propriétés du champ magnétique au sein des filaments.

Des observations ALMA menées par l'AIM-CEA, ont permis de montrer que la masse caractéristique des cœurs proto-stellaires - et donc des étoiles - qui résulte de la fragmentation des filaments interstellaires augmente avec la densité linéique de ces derniers (masse par unité de longueur). Une des implications de ce résultat est que la fonction de masse initiale des étoiles (IMF) pourrait, au moins partiellement, être « héritée » de la distribution en densité linéique des filaments. Le large programme ALMA-IMF (mené entre autres par l'IPAG) est justement dédié à l'étude de l'origine et de la variation de l'IMF en fonction de l'évolution et de l'environnement dans lequel les régions de formation d'étoiles se trouvent. En cartographiant la fragmentation de 15 régions de formation d'étoiles massives avec ALMA, ALMA-IMF a montré que la distribution en masse des cœurs dans ces régions présente un excès de cœurs massifs par rapport à l'IMF standard. Il a été aussi suggéré que l'amplitude de cet excès varie en fonction du taux instantané de formation d'étoiles. Récemment, les résultats du programme CAFFEINE (AIM-CEA, LAM) sur le télescope

APEX et la caméra ArTéMiS semblent suggérer que l'efficacité locale de formation d'étoiles pourrait être directement liée aux propriétés physiques des filaments présents au sein des nuages moléculaires.



Des simulations numériques récentes menées au CEA-AIM de nuages moléculaires en effondrement montrent que le champ magnétique joue un rôle important, à la fois en ce qui concerne la détermination de la forme de l'IMF mais aussi pour la formation et l'évolution des filaments interstellaires. Cependant, du point de vue observationnel, quantifier l'importance du champ magnétique pendant les phases précoces de la formation des étoiles reste un défi. Dans ce contexte, l'étude de l'orientation relative entre les filaments et le champ magnétique est devenue une méthode de choix pour obtenir de nouvelles informations. Récemment, une méthode dédiée, FiLDReaMS, a été développée à l'IRAP permettant de détecter et extraire les filaments à plusieurs échelles. Cette méthode a été appliquée aux cartes *Herschel* du programme 'Galactic Cold Cores' ('GCC') et les orientations des filaments ont ensuite été comparées à l'orientation du champ magnétique dans le plan du ciel, déduite des observations *Planck*. Ces résultats préliminaires appliqués sur un échantillon de quatre champs *Herschel* montrent l'existence d'orientations relatives préférentielles similaires à celles observées précédemment avec *Planck* à plus grande échelle, suggérant l'existence d'un couplage entre les champs magnétiques à l'échelle des nuages et les filaments à plus petite échelle. Une des limitations de ce type d'études est la résolution angulaire des observations *Planck* (7'). La mise en route du mode polarimétrique (NIKA2-Pol) de la nouvelle caméra NIKA2 pour le continuum millimétrique sur le télescope de 30m de l'IRAM a pu être achevée, ouvrant la voie vers des programmes ambitieux de caractérisation de la morphologie du champ magnétique à haute résolution angulaire (~11") dans les régions de formation d'étoiles comme proposé par le grand programme B-FUN (mené par le CEA-AIM).

Les études de l'émission des poussières au sein des régions de formation d'étoiles nous renseignent sur leurs structures en densité (filaments, cœurs, etc...) mais en revanche, elles ne procurent aucune information quant aux flots du gaz menant à la formation des étoiles. La caractérisation de ces flots, une fois mis en relation avec la structure en densité, peut révéler la physique qui les produit et donc mettre en lumière les origines du processus de formation stellaire. Par exemple, dans une étude menée à l'UTINAM, la cartographie de la dynamique du gaz en  $N_2H^+(1-0)$  et autres raies moléculaires dans la région du Monoceros a mis en évidence la collision de deux filaments comme étant à l'origine de la formation d'un proto-amas d'étoiles. De manière similaire, le grand programme ORION-B à l'IRAM 30m a permis d'identifier les filaments de la région ainsi que leur dynamique. Ces résultats montrent que les filaments d'Orion B sont particulièrement calmes du point de vue de leur dynamique interne. En revanche, des signes d'accrétion transverse ont pu être mis en évidence, démontrant le processus de croissance en masse de certains de ces filaments. Une fois observé à plus haute résolution angulaire avec NOEMA, l'un de ces filaments révèle une dynamique plus complexe, qui semble reliée au processus de fragmentation du filament en cœurs préstellaires.

Pour finir, les nouvelles images JWST (obtenues par un consortium auquel ont participé l'IRAM et l'IRAP) de galaxies proches soulignent de manière spectaculaire l'importance des bulles ( $H_I$  et  $H_{II}$ ) et des effets de rétroaction pour la structuration à grande échelle du milieu interstellaire froid des galaxies. Ces résultats favorisent le(s) scénario(s) selon le(s)quel(s)l'expansion de bulles et la propagation d'ondes de choc à grande échelle peut comprimer la matière interstellaire et former des nuages moléculaires filamenteux à la surface des bulles ou à l'interface entre plusieurs bulles. Dans ce contexte, des observations ArTeMIS (menées par le LAM et le CEA-AIM) ont permis d'identifier puis de caractériser les filaments de la région HII RCW120. Cette étude a montré que les filaments en bord de région HII sont grandement comprimés par son expansion, potentiellement aidant à la formation d'une seconde génération d'étoiles. Un scénario similaire est aussi évoqué dans la région d'Orion B.

### *Perspectives*

Dans les cinq années à venir, il est évident que les observatoires comme NOEMA, ALMA et JWST seront au centre de la recherche sur la formation stellaire. La combinaison de grandes sensibilités et de hautes résolutions angulaires dans des domaines de longueurs d'ondes complémentaires fait que de nombreux projets verront le jour, et la communauté PCMI est particulièrement bien positionnée. Des projets polarimétriques avec NIKA2-Pol sur le télescope de l'IRAM 30m pourraient aussi ouvrir la voie vers des programmes plus sensibles et plus systématiques dans l'infrarouge lointain depuis l'espace avec de nouvelles générations d'imageurs polarimétriques prévus pour les projets PRIMA et SALTUS proposés dans le cadre de l'appel "Astrophysics Probe" de la NASA. Finalement, la communauté astrophysique dans son ensemble, et la communauté PCMI en particulier, a grandement contribué à l'établissement de nouveaux outils d'analyse faisant appel à l'intelligence artificielle, que ce soit pour l'identification de filaments ou la reconstruction de cartes de densité de colonne. Ces outils en sont encore à leurs balbutiements et il est plus que probable que leur utilisation et leur développement vont continuer de s'accroître dans le futur.

### 8.2.3 Mécanismes de feedback de la formation d'étoiles

#### *Contexte*

Comprendre comment les jeunes étoiles massives qui naissent dans les régions de formation stellaire rétroagissent ensuite sur leur nuage parent reste aussi une question majeure de l'étude du processus de formation d'étoiles. Ces étoiles injectent de l'énergie dans le milieu environnant à la fois sous forme radiative (rayonnements ionisants EUV et dissociants FUV) et sous forme mécanique (vents stellaires et outflows, puis explosion de supernova à la fin de vie de l'étoile). Cette énergie tend à disperser le nuage parent et peut donc limiter la formation d'étoiles qui y a lieu, mais le processus local d'injection tend à créer des régions compressées (ondes de choc de supernova, coquille comprimée autour d'une région HII en expansion) et peut donc aussi contribuer à déclencher localement l'effondrement gravitationnel et donc induire une formation d'étoiles.

Les études sur les feedbacks stellaires visent donc à comprendre et quantifier leur impact sur la formation d'étoiles. À l'échelle d'une région de formation d'étoiles, quel est leur impact global sur le taux de formation d'étoiles, la fraction de masse du nuage convertie en étoiles in fine, ou la fonction de masse initiale (IMF) des étoiles formées ? Quelle est la contribution relative des différents mécanismes de feedback ? Il s'agit également de comprendre localement le processus d'injection et son impact sur les conditions physiques du milieu : comment l'intensité du feedback local (par exemple le flux de rayonnement EUV ou FUV) affecte la température, la densité et la composition chimique du gaz du nuage parent.

Enfin, il s'agit de comprendre quels traceurs observables (raies d'émission, émission des poussières) peuvent être utilisés pour contraindre les conditions physiques des zones impactées par le feedback et nous informer sur les processus par lesquels le feedback agit.

#### *Bilan*

Au cours des dernières années, des progrès significatifs dans notre compréhension de l'impact des processus de feedback sur les régions de formation d'étoiles ont été permis par les simulations numériques menées au CEA-AIM. Aux plus grandes échelles (simulations de régions de 1kpc), la prise en compte du feedback (expansion des régions HII, supernovæ) résulte en une réduction majeure du taux de formation d'étoiles. Dans des galaxies comme notre Voie Lactée, ces processus de feedback suffisent à réduire le taux de formation d'étoiles au niveau de la relation de Kennicutt-Schmidt observée, tandis que dans les galaxies riches en gaz (à haut redshift), l'effet du feedback est insuffisant et la turbulence à grande échelle se met à jouer un rôle majeur. À l'opposé, d'autres travaux se sont intéressés à l'échelle d'un clump en effondrement ( $\sim 0.1$  pc), étudiant l'impact du feedback radiatif sur l'IMF. Ces simulations ont ainsi pu montrer la tendance de ce feedback à limiter la fragmentation pendant l'effondrement et donc à permettre la formation d'étoiles plus massives, et différencier les effets des feedback mécaniques et radiatifs : tandis que le feedback radiatif (EUV) tend à stopper l'effondrement et donc à réduire la masse finale du cluster formé, le feedback mécanique (outflows) affecte surtout la structure du cluster formé.

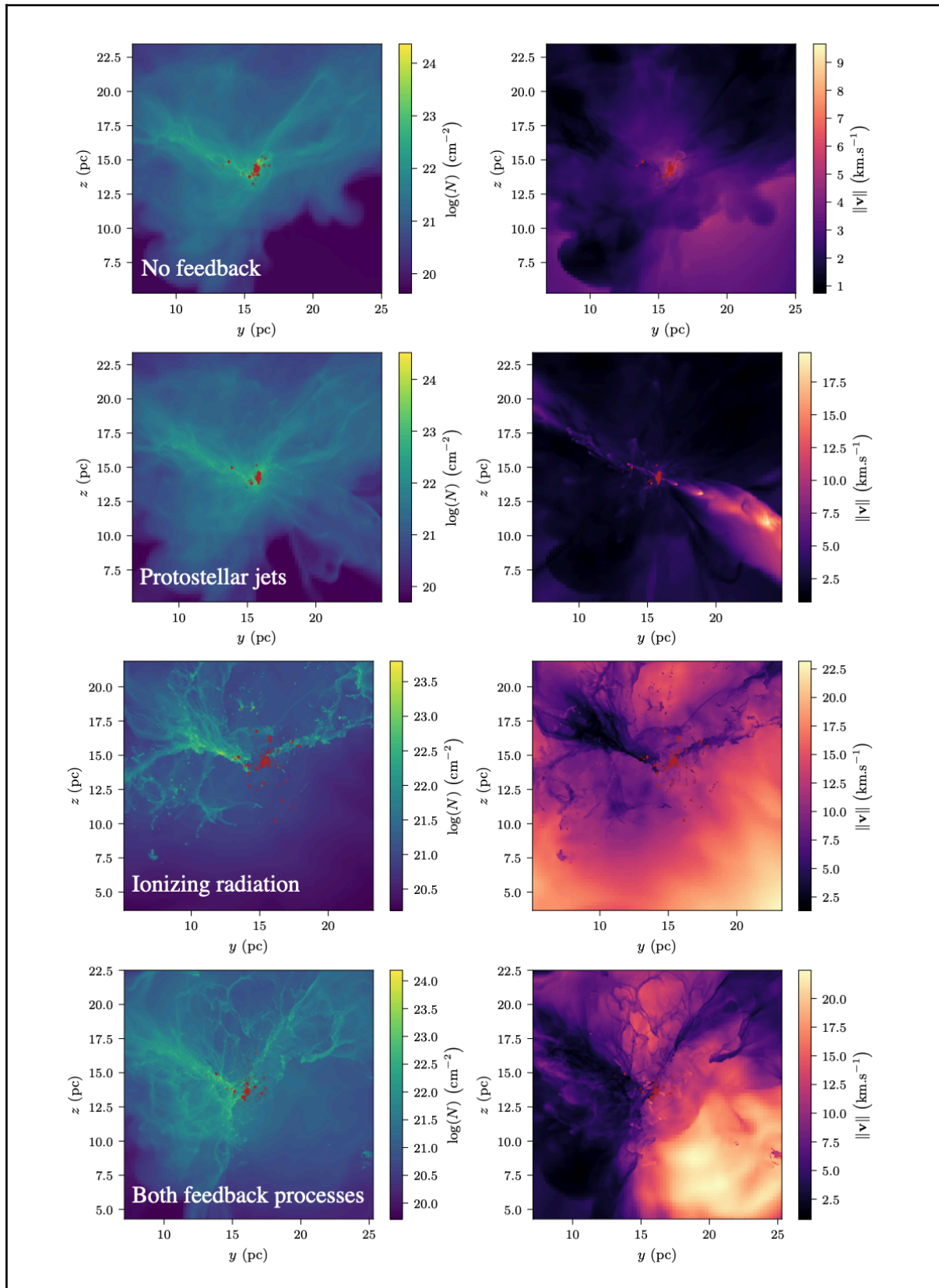


Figure 8.2.3.1 : Simulations numériques de formation stellaire (adapté de Verliat et al. 2022). La figure compare quatre simulations : sans feedback (première ligne), avec uniquement feedback des jets proto-stellaires (seconde ligne), avec feedback radiatif seulement (troisième ligne) et avec une combinaison des deux processus de feedback (quatrième ligne). La colonne de gauche montre les cartes résultantes de densité de colonne et celle de droite la vitesse moyenne le long de la ligne de visée.



Si ces études offrent une vue globale de l'impact des processus de feedback sur la dynamique d'effondrement d'une région de formation d'étoiles, elles reposent sur des approximations simplificatrices de la physique locale du processus de feedback (interaction des UV avec le gaz, etc.). Les progrès de notre compréhension de l'impact local du feedback radiatif sur le gaz moléculaire ont donc reposé sur l'étude des régions de photodissociation (PDR, couche de surface où le gaz moléculaire est impacté par le rayonnement UV des jeunes étoiles massives à proximité), en combinant observations dans l'IR et le sub-mm et modèles détaillés de ces environnements. En particulier, le code PDR de Meudon développé au LERMA est l'un des modèles de référence de ces environnements, simulant simultanément le transfert de rayonnement, la chimie et les processus thermiques ayant lieu dans le gaz, et l'excitation de dizaines d'espèces observables. L'analyse des observations Herschel à l'aide des modèles PDR a permis de mettre directement en évidence l'impact compressif du feedback radiatif sous la forme d'une corrélation observée entre la pression thermique des PDR et le flux UV incident, mais aussi de montrer que d'importants traceurs observables des régions de formation d'étoiles (par ex. CO rotationnellement excité) peuvent être formés par une chimie nouvelle déclenchée par les UV. Si les modèles usuels sont statiques, les effets dynamiques induits par la propagation du front d'ionisation peuvent également avoir des effets importants sur la structure de la PDR comme l'ont montré d'autres travaux de modélisation menés au LERMA. De tels effets dynamiques ont été cherchés avec ALMA dans la PDR de la Tête de Cheval, mais la résolution d'environ 1" s'est révélée insuffisante pour résoudre la structure de la zone où ces effets sont attendus. La communauté PCMI a également joué un rôle majeur dans l'obtention d'un programme ERS JWST dédié à l'étude des PDR (deux PI français sur 3, à l'IAS et à l'IRAP, avec de nombreux collaborateurs de la communauté française PCMI). Ce programme a permis l'observation de la barre d'Orion, une des PDR les plus étudiées, avec une résolution spatiale et une sensibilité inégalées, dans le proche IR où se trouve l'émission caractéristique du gaz moléculaire chaud qui constitue les PDR. L'analyse des observations est encore en cours, mais ce programme a déjà permis de révéler la complexité inattendue de la structure spatiale de la surface de la PDR, l'impact des UV sur la population de poussières présentes dans la PDR, et un spectre d'émission riche en raies de molécules vibrationnellement excitées.

D'autres travaux menés au LPENS adoptent une approche locale similaire pour l'impact physico-chimique du feedback mécanique, c'est-à-dire des ondes de choc. Il s'agit de comprendre leur impact sur l'état physique et chimique du gaz et les signatures observables qui y donnent accès, dans les outflows générés par les proto-étoiles et dans les rémanents de supernovae. Des modèles détaillés de cette physico-chimie des chocs ont été développés, en particulier le code de choc Paris-Durham, récemment mis à jour pour inclure le traitement du rayonnement UV. Ce modèle a par exemple permis d'étudier l'impact des UV générés par le choc lui-même sur les conditions physiques des régions choquées, ainsi que d'explorer comment les observables permettent de remonter aux conditions physiques des régions choquées, en particulier en cas de mélange des contributions de multiples chocs non résolus. Avec l'arrivée du JWST, les travaux se sont particulièrement concentrés sur le lien entre l'émission observable des raies ro-vibrationnelles de H<sub>2</sub> et les conditions physico-chimiques dans les chocs.

### *Perspectives*

Le télescope James Webb a apporté une résolution spatiale et une sensibilité sans précédent dans la gamme de longueurs d'onde idéale pour observer les processus d'injection d'énergie, radiative et mécanique, dans le gaz moléculaire des nuages par le feedback de la formation d'étoiles. La révolution qu'il va entraîner dans notre compréhension des processus de feedback commence à peine, et on peut en particulier s'attendre à ce que la combinaison des observations JWST avec les observations interférométriques dans le mm/sub-mm (ALMA, NOEMA), apportant une aussi haute résolution spatiale dans un domaine complémentaire où émettent de nombreuses molécules clés, se révèle particulièrement fructueuse. À plus long terme, SKA étendra l'étude des régions d'étoiles aux plus basses longueurs d'onde, où se trouvent de nombreuses raies de recombinaison qui apporteront une vue nouvelle des régions affectées par le feedback radiatif, caractérisées par une succession de transition ionisé/neutre pour les différents éléments.

Du point de vue des simulations, arriver à relier les grandes simulations 3D de formation d'étoiles à des prédictions d'observables (e.g., intensités de raies moléculaires) calculées de façon complètement cohérente reste un défi majeur, car la prise en compte de réseaux chimiques complets et de processus microphysiques détaillés dans les simulations 3D induit un coût numérique pour l'instant irréalisable. L'évolution non seulement des moyens de calculs, mais aussi des méthodes numériques avec entre autres l'irruption du machine learning dans le domaine des simulations (par exemple, les *physics-informed neural networks*) pourrait mener à un rapprochement progressif des grandes simulations dynamiques en 3D et des modèles détaillés de la physico-chimie des régions affectées par le feedback (actuellement 1D).

#### 8.2.4 La séquence de formation d'une étoile : cœurs denses, pré stellaires et protostellaires, & protoétoiles

##### *Contexte*

Les premiers stades d'évolution vers la formation d'un système stellaire et planétaire de type solaire durent environ un million d'années et comprennent essentiellement deux étapes. Pendant la première étape, un cœur préstellaire froid ( $T < 10$  K) subit une lente contraction isotherme. Lors de la deuxième étape, le cœur protostellaire subit une forte accréation de matière vers le centre, marquant le début de la phase principale d'accréation. À ce stade, la protoétoile nouvellement née est encore fortement ancrée dans le cœur moléculaire parental, à partir duquel elle continue d'accumuler de la matière. L'accréation se déroule de manière non sphérique, résultant généralement en une enveloppe d'effondrement aplatie et un disque protostellaire. Simultanément, des jets et des flots de matière collimatés se propagent à grande vitesse vers l'extérieur. L'exploration des différents processus participant à ces premières phases de formation des étoiles, tant en termes de physique que de chimie, est un point de départ crucial pour comprendre nos propres origines et, plus généralement, le cycle de la matière qui façonne notre histoire galactique.

##### *Bilan*

Afin de progresser dans notre compréhension des premières étapes de la formation stellaire, des études globales des structures denses du MIS à différentes échelles sont

cruciales. C'est l'approche suivie par le projet international Galactic Cold Cores, visant à caractériser les propriétés physiques des cœurs froids et des filaments qui les hébergent. L'IRAP a récemment participé à plusieurs études multi-échelles dans lesquelles les profils de densité et de température, ainsi que les taux d'effondrement et la fragmentation, ont été déterminés avec précision pour un certain nombre de cœurs préstellaires.

Du point de vue chimique, la caractérisation des cœurs préstellaires froids est un défi en raison de la haute sensibilité requise dans les observations spectrales. Pourtant, ces dernières années, l'inventaire moléculaire d'un nombre limité de cœurs préstellaires a été exploré en profondeur grâce à des relevés spectraux très sensibles tels que ASAI et SOLIS, entre autres. De nouvelles molécules ont été détectées dans le cœur préstellaire prototypique L1544 par les équipes Interstellaire de l'IPAG et Micmac de l'IRAP, plaçant de fortes contraintes sur les réseaux de réactions chimiques impliqués. Par exemple, la détection de molécules organiques lourdes telles que HC<sub>9</sub>N dans L1544 indique une chimie des longues chaînes carbonées liée à la disponibilité de grandes quantités de carbone atomique gazeux dans ces objets froids, et montre l'importance des études spectrales de cœurs préstellaires dans le domaine centimétrique, où ces molécules lourdes peuvent être détectées. Les études astrochimiques des cœurs préstellaires s'orientent désormais vers la question de la diversité chimique et de sa dépendance à l'environnement physique des nuages hôtes ou à leur stade évolutif. Les progrès sont lents mais prometteurs grâce à des instruments à large bande de plus en plus sensibles (IRAM, ALMA, GBT, VLA).

Le domaine de l'astrochimie protostellaire a connu des progrès considérables ces derniers temps, avec des participations significatives de l'IPAG, l'IRAM, l'IRAP et du LAB. On sait depuis une quinzaine d'années qu'il n'existe pas de composition chimique protostellaire typique en matière de molécules organiques. À un extrême de l'échelle de diversité chimique se trouvent les *hot corinos*, qui sont des régions chaudes (> 100 K) et compactes (<100 UA) autour de l'objet protostellaire central, riches en molécules organiques saturées telles que le formiate de méthyle (HCOOCH<sub>3</sub>). À l'extrême opposé se trouvent les protoétoiles de type *Warm Carbon-Chain Chemistry* (WCCC), qui sont déficientes en molécules organiques saturées, mais surabondantes en chaînes carbonées insaturées et en hydrocarbures tels que C<sub>4</sub>H<sub>2</sub>. Après l'ère des relevés spectraux à large bande avec des télescopes à antenne unique commencée il y a une dizaine d'années, nous voyons commencer aujourd'hui une nouvelle ère des relevés spectraux d'échantillons multi-sources avec des interféromètres (sub-)millimétriques tels que NOEMA et ALMA. Cela a conduit à une augmentation du nombre de *hot corinos* clairement identifiés de moins de 10 à plus de 50 en moins de 7 ans. Une contribution française dans ce sens vient de l'étude ALMA ORANGES, qui a identifié tous les *hot corinos* présents dans le filament OMC-2/3 d'Orion A. Cette étude a montré que les environnements irradiés par un fort champ de rayonnement ultraviolet semblent moins susceptibles de développer des protoétoiles de type *hot corino* que d'autres régions moins exposées telles que Perseus. La prévalence des *hot corinos* dans une région de formation d'étoiles peut donc dépendre des propriétés physiques de l'environnement natal à plus grande échelle. Le nombre de *hot cores* massifs clairement identifiés a également augmenté grâce à de grands projets tels qu'ALMA-IMF, où un recensement statistique des *hot cores* dans 15 régions de formation d'étoiles massives a été récemment réalisé en utilisant HCOOCH<sub>3</sub> comme traceur principal : 76 candidats *hot core* ont été identifiés avec des masses allant de ~0,2 M<sub>☉</sub> à ~80 M<sub>☉</sub>, dont 56 sont de nouvelles détections.

En parallèle des observations, les modèles astrochimiques développés en France, simulant la chimie en phase gazeuse et à la surface des grains interstellaires ont grandement bénéficié des données de laboratoire exposées à la section 8.3, que ce soit le code PDR de Meudon (LERMA) ou le code gas-grain Nautilus (LAB). Une des avancées majeures dans ce domaine est cependant le calcul de la composition chimique des enveloppes protostellaires en utilisant les résultats de simulations numériques RMHD d'effondrement comme paramètre d'entrée des modèles. Ce type de simulation permet d'obtenir la composition du gaz et des poussières en fonction du temps et en 3D dans ces enveloppes de façon à comprendre la localisation des molécules et comment elles se forment. La prise en compte des conditions physiques dépendantes du temps ont par exemple été utilisées pour étudier la formation des glaces interstellaires lors de la transition du milieu diffus vers le milieu dense (LAB).

La superbe sensibilité et résolution angulaire d'ALMA permettent désormais de caractériser en profondeur la composition chimique des *hot corinos*, et même de résoudre les régions d'émission de différentes molécules organiques. Cela a révélé des tailles différentes selon la molécule émettrice, qui sont en parfait accord avec les différentes énergies de liaison calculées de chacune des espèces ciblées. Des différences dans le bilan organique d'un *hot corino* à l'autre sont également apparues récemment, remettant en question notre compréhension des réactions chimiques impliquées et leur dépendance à l'environnement physique. Pour conclure sur ce sujet, il convient de noter que les observations dans le domaine (sub-)millimétrique se sont révélées insuffisantes pour caractériser ou même détecter les *hot corinos* compacts en raison des grandes opacités de la poussière dans ces longueurs d'onde, et les observations centimétriques semblent être plus adaptées pour cette tâche. La communauté française, en particulier l'IPAG et l'IRAP, continue d'être active également dans le domaine du fractionnement isotopique au sein des cœurs pré- et protostellaires, et plus particulièrement sur la dépendance du fractionnement du deutérium et de l'azote à l'évolution et à l'environnement physique, questions pour lesquelles l'interférométrie joue un rôle de plus en plus dominant.

Outre les *hot corinos*, les chocs provenant des filaments qui canalisent la matière vers les futures étoiles, aussi appelés *streamers*, sont également susceptibles d'être riches en molécules organiques. Ce domaine de recherche a fait l'objet d'une attention considérable ces dernières années et la communauté française (e.g. IRAM, LAB, IPAG) s'y implique à travers des collaborations internationales comme la participation au projet à temps garanti NOEMA PRODIGE. Les chocs protostellaires sont également des régions chimiquement riches qui commencent maintenant à être caractérisées en détail. Ces objets ont également récemment été étudiés en termes de variabilité d'éjection de matière, à la fois du point de vue des observations et du point de vue de la modélisation. De telles études sont d'une importance cruciale pour mieux comprendre l'interaction entre l'accrétion et l'éjection de matière dans les premiers stades de la formation des étoiles. Enfin, un résultat intéressant dans le domaine des chocs dans les régions de formation d'étoiles est la découverte récente de chocs à petite échelle et à faible vitesse au sein du complexe de formation d'étoiles de Persée. Ces *fingers* émettant en SiO/CH<sub>3</sub>OH représentent probablement une empreinte chimique de l'impact à grande échelle de bulles de gaz en expansion sur la région. Ceci ouvre une nouvelle porte vers les études interférométriques des chocs qui relient les petites et grandes échelles de tels événements galactiques.

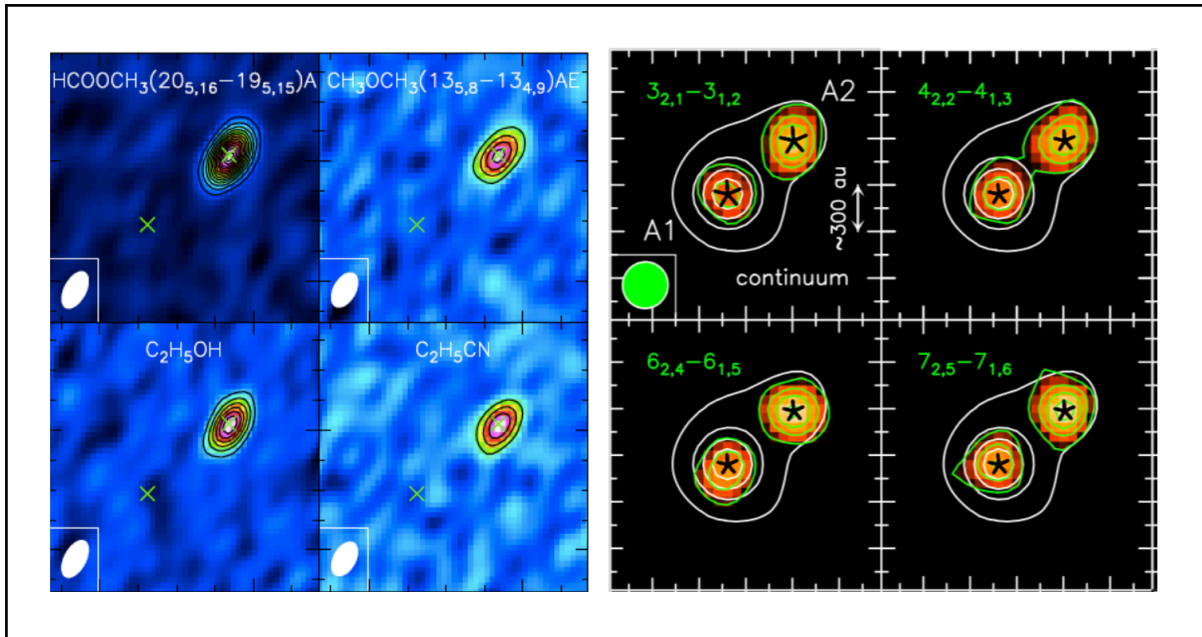


Figure 8.2.4.1 : (Gauche) Cartes moléculaires ALMA à 1.2 mm de la protobinaire NGC1333 IRAS4A, montrant un seul hot corino : A2 (López-Sepulcre et al. 2017). (Droite) Cartes VLA à 1.3 cm de la même source, montrant de l'émission de méthanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) chaud sur A1 et A2, ce qui démontre l'existence de deux hot corinos, ainsi que le besoin des longueurs d'onde plus élevées afin de détecter l'émission moléculaire bloquée par la poussière aux longueurs d'onde millimétriques (De Simone et al. 2020).

Enfin, le rôle des champs magnétiques dans les premières phases de la formation stellaire est un sujet largement exploré au sein de la communauté française (CEA/DRF/IRFU). Puisque ce sujet est couvert plus en détail dans le document PNPS, nous mentionnons ici brièvement les principaux faits marquants de ces dernières années, qui incluent l'omniprésence des champs magnétiques dans les enveloppes protostellaires, des preuves observationnelles d'un effondrement magnétiquement régulé et l'importance des études de topologie de la polarisation des poussières dans ce contexte, le rôle joué par les champs magnétiques dans la détermination de la taille des disques protostellaires, et une fraction d'ionisation locale élevée due à l'accélération des rayons cosmiques par les champs magnétiques, ce qui a naturellement aussi un impact sur la chimie associée. Une illustration de l'investissement français dans ce domaine de recherche est le développement en cours du mode polarimétrique à l'observatoire NOEMA, largement soutenu par des financements et des ressources humaines françaises.

### Perspectives

Le domaine de l'astrochimie des premiers stades de formation des étoiles a un avenir prometteur, ainsi qu'un certain nombre de défis à relever. Par exemple, la nécessité d'observer à plus grande longueur d'onde afin de caractériser de manière adéquate (et même de détecter) la richesse chimique associée aux *hot corinos* déplacera progressivement l'équilibre de ces études observationnelles vers de futurs observatoires tels que le ngVLA et SKA. Le domaine de la diversité chimique des protoétoiles et des cœurs préstellaires fera sans aucun doute également l'objet d'une attention considérable. En particulier, il existe actuellement un biais en faveur des études sur les *hot corinos*, alors que les statistiques des protoétoiles de type WCCC sont largement inexplorées. Les

observations de longues chaînes carbonées et d'hydrocarbures, sollicitant là encore des observations à longueur d'onde relativement grande dans le domaine radio, gagneront en importance dans les années à venir. De même, la caractérisation chimique des chocs protostellaires suscite de plus en plus d'attention dans plusieurs instituts français, car ces objets imposent des contraintes inestimables sur les modèles astrochimiques en phase gazeuse dépendant du temps. Du côté des masses élevées, de nouvelles campagnes d'observation à grande échelle telles que NOEMA LP NASCENT-STARS permettront une caractérisation chimique approfondie des cœurs moléculaires couvrant une large gamme de masses et nécessiteront le développement de nouvelles techniques d'analyse de raies spectrales. Enfin, les progrès dans les études de polarisation sont en bonne voie et devraient donner de nouveaux résultats dans les prochaines années, par exemple grâce au projet NOEMA ENYGMA, qui permettra d'obtenir des cartes de polarisation dans un large échantillon de protoétoiles, et grâce également aux études dédiées de polarisation dans les cœurs froids utilisant NIKA2-pol au télescope 30-m de l'IRAM. Toutes ces études observationnelles devront nécessairement être associées à une modélisation astrochimique/MHD adaptée et améliorée ainsi qu'à des techniques d'analyse de données de *machine learning*, soulignant le rôle crucial que le travail interdisciplinaire jouera dans un avenir proche.

## 8.2.5 Disques protoplanétaires et formation des planètes

### *Contexte*

Au cours des dernières années, l'étude des exoplanètes a connu un développement fulgurant, avec la découverte de systèmes très différents du nôtre et la détection d'espèces chimiques dans leurs atmosphères. Cette diversité trouve son origine dans le processus de formation planétaire. Depuis une décennie, le déploiement de l'interféromètre ALMA, ainsi que le développement de NOEMA et des instruments du VLT et du VLTI, ont permis de donner une vision inégalée de la structure des disques. L'arrivée du JWST ouvre de nouvelles opportunités grâce à des capacités de spectro-imagerie uniques dans le domaine de l'infrarouge proche et moyen. Des questions comme le moment de la formation des planétésimaux ou la composition chimique du gaz accrété par les planètes gazeuses peuvent désormais être abordées sous l'angle observationnel. Dans ce contexte, une analyse du gaz et des grains, de l'UV jusqu'au domaine radio, ainsi qu'une compréhension fine des processus microphysiques est indispensable. Ainsi, les expertises rassemblées au sein de PCMI jouent un rôle clé au plus proche des observations afin d'informer les modèles de formation planétaire et d'éclairer les analyses de la matière primitive du Système Solaire. À ce titre, PCMI est pleinement intégré dans la thématique de la formation planétaire, au sein du CTE à l'interface avec le PNPS et le PNP.

### *Bilan*

Les progrès apportés par ALMA ont été décisifs pour accéder à la structure des régions externes des disques ( $> \sim 20$  UA). Si les premières observations se sont focalisées sur l'émission de la poussière, montrant une distribution radiale très structurée des gros grains ( $\sim 1$  mm), les cinq dernières années ont vu l'arrivée d'observations du gaz à haute résolution ( $0.15'' \sim 20$  UA, par exemple le large programme MAPS). L'émission des différentes molécules comme CS, HCN, ou  $C_2H$  apparaît fortement structurée, probablement liée à des

gradients de densité du gaz ou du rapport élémentaire C/O. L'implication des équipes françaises s'est concentrée sur la structure des disques en suivant des études pionnières du groupe du LAB sur les disques vus par la tranche. Des méthodes d'analyse des cubes spectraux ont aussi été optimisées pour reconstruire la surface d'émission des raies pour des disques plus inclinés. Des travaux menés en particulier à l'IPAG ont ainsi permis d'obtenir une vision en 3 dimensions de la structure thermique du gaz en utilisant des raies de  $^{12}\text{CO}$  et  $^{13}\text{CO}$ , montrant des gradients en accord qualitatif avec des modèles de disques chauffés par l'étoile centrale. Les observations au sol dans le visible et l'infrarouge donnent également des informations très complémentaires sur les disques externes. Les données SPHERE et ALMA, et maintenant l'imagerie JWST, tracent la sédimentation des grains (IPAG) alors que la modélisation détaillée des bandes infrarouges (IAS) révèle l'altération des nano-grains carbonés à la surface de certains disques. L'ensemble de ces contraintes observationnelles permettront de développer des modèles chimiques adoptant une structure physique réaliste de disque. Ainsi, les chercheurs du LAB ont montré que les régions de sublimation des espèces volatiles ainsi que l'efficacité de la formation des molécules organiques complexes (COMs) dépendent fortement de la distribution en tailles de grains et de leur sédimentation. L'étude dynamique du gaz via les raies moléculaires a également abouti à des résultats novateurs à l'interface entre PNPS et PCMI, comme l'étude des perturbations dynamiques des disques (large programme exoALMA, mené entre autres par l'OCA) ou encore la mesure de la masse d'étoiles jeunes (LAB). D'autres travaux menés au LAB ont également permis de détecter de nouvelles molécules ( $\text{H}_2\text{S}$ , CCS) pour la première fois dans un disque grâce à l'arrivée de NOEMA.

Depuis 2022, le domaine des disques connaît une évolution importante avec l'arrivée du JWST. Les capacités de spectroscopie entre 1 et 27 microns donnent accès aux transitions des principales molécules en phase gazeuse ( $\text{H}_2$ , CO,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ), ainsi que des bandes des glaces ( $\text{H}_2\text{O}$ , CO,  $\text{CO}_2$ , COMs). Deux stratégies d'observation sont alors suivies. Pour caractériser les glaces dans les régions externes des disques, des disques vus par la tranche sont observés. Des premières études ont été faites grâce au programme ERS IceAge avec une implication importante de l'ISMO et du PIIM. Les résultats préliminaires confirment les capacités uniques du JWST pour sonder les glaces dans les disques. En effet, la résolution angulaire permet d'avoir une détection spatialement résolue des glaces dans les disques. Mais la majorité des observations JWST sont faites sur des disques pour lesquels l'essentiel de l'émission provient des régions internes, là où la majorité des planètes se forment ( $\sim < 100$  UA). L'implication de l'IAS dans le programme de temps garanti MIRI sur les disques a permis d'analyser un des premiers spectres MIRI-MRS de disque, révélant un gaz extrêmement riche en hydrocarbures avec la première détection du benzène et du diacétylène dans un disque. Les résultats publiés depuis suggèrent une grande diversité dans la composition chimique des disques internes avec une forte dépendance en masse stellaire. Si ces données sont analysées aujourd'hui avec des modèles simples, elles appellent une modélisation détaillée de l'atmosphère irradiée des disques comme celle faite au LERMA. Enfin, le programme ERS PDR4all, co-dirigé à l'IAS et l'IRAP avec de nombreux collaborateurs de la communauté française PCMI, a permis d'observer d203-506, un disque fortement irradié par des étoiles massives dans la nébuleuse d'Orion. Ce disque s'est avéré être un laboratoire interstellaire remarquable pour étudier la chimie du gaz fortement irradié avec la première identification de  $\text{CH}_3^+$  et la mise en évidence du cycle de formation et destruction de l'eau en phase gazeuse. Comme le gaz observé provient d'un vent

photoévaporé, l'observation des raies de  $H_2$  a permis d'inférer le taux de perte de masse de d203-506 et de déduire une durée de vie du disque de seulement  $\sim 10^5$  ans.

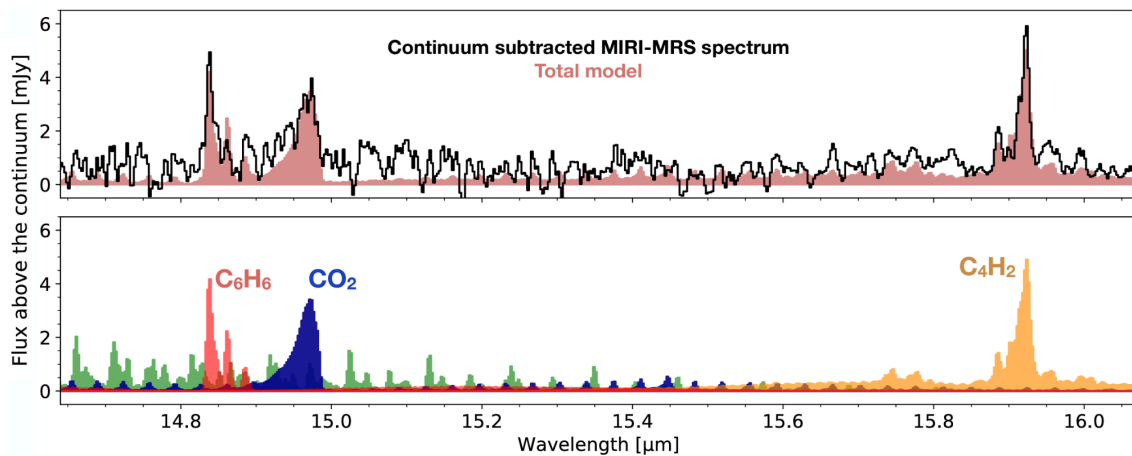


Figure 8.2.5.1 : Première détection du benzène ( $C_6H_6$ ) et du acétylène ( $C_4H_2$ ) dans un disque protoplanétaire (Tabone et al. 2023). Spectre JWST-MIRI après soustraction de l'émission du continuum et de la contribution de  $C_2H_2$ , avec les meilleurs modèles d'émission moléculaire en couleur.

Au cours des 5 dernières années, l'étude des disques autour des protoétoiles est devenue un sujet très actif. Selon le paradigme émergent, ce sont dans ces disques que les premiers planétésimaux se formeraient. Des travaux pionniers menés à AIM dans le cadre du large programme CALYPSO ont montré que les disques protostellaires étaient en moyenne compacts (taille médiane de 40 UA). Ces observations sont cohérentes avec les simulations de formation de disques régulées par les effets de MHD non-idéale, menées également à AIM (ERC ECOGAL). Aujourd'hui, le large programme ALMA eDisk nous donne une vision sans précédent de ces disques à une résolution de 5 UA. Un des enjeux centraux est alors de comprendre l'évolution des grains, de l'enveloppe protostellaire aux disques, ainsi que le rôle de l'accrétion de l'enveloppe sur le disque, notamment observée sous forme de « streamers ».

Le mécanisme induisant l'accrétion dans les disques reste une question ouverte à la frontière avec le PNPS. Les simulations numériques de disques protoplanétaires tendent à favoriser les vents magnétisés pour rendre compte du transport du moment cinétique mais les preuves observationnelles sont encore insuffisantes. Depuis la dernière prospective, l'étude des flots moléculaires a été poursuivie à l'IPAG et au LERMA, notamment sur le système DG Tau B où une étude détaillée avec ALMA a apporté une nouvelle indication de vent magnétisé capable d'extraire le moment cinétique du disque. Ces études sont maintenant poursuivies avec le JWST afin d'avoir accès au gaz moléculaire chaud (raies de  $H_2$ ) et au gaz atomique. L'émergence d'observations de grands échantillons de disques permet également de mettre à l'épreuve les mécanismes contrôlant l'évolution des disques (large programme ALMA AGE-PRO).

### Perspectives

Les progrès spectaculaires apportés par les observatoires actuellement en fonctionnement (ALMA, NOEMA, JWST, VLT) vont continuer à transformer le domaine des disques. Une meilleure synergie multi-longueur d'onde sera la clé pour comprendre les disques dans leur



globalité avec deux voies de développement : (i) obtenir des diagnostics à la fois sur la phase gazeuse et solide (grains+glaces), et (ii) faire le lien entre les régions internes ( $< 100$  UA; JWST, VLT-CRIRES+, VLT), et les régions externes ( $> 50$  UA; ALMA, SPHERE, spectro-imagerie JWST). La spectroscopie de grands échantillons de disques va également nous donner une vision statistique des disques indispensable pour faire le lien avec les populations d'exoplanètes (programme ALMA-DECO, 80 disques; JWST Cycle 1-2:  $\sim 100$ -150 disques). Les 5 prochaines années seront également critiques pour la préparation aux observations de l'ELT et notamment de l'instrument METIS qui nous donnera une combinaison de haute résolution spatiale ( $\sim 0.02''$ ) et spectrale (3km/s) inégalée en bandes L et M, particulièrement riches en raies moléculaires. Dans ce contexte, l'accès aux programmes JWST et aux instruments du VLT/VLT (CRIRES+, MATISSE, GRAVITY) en collaboration avec le PNPS et le PNP constitue une opportunité pour assurer un positionnement de PCMI sur cette thématique. Notons qu'une mission en infrarouge lointain sera particulièrement complémentaire avec le JWST et ALMA/NOEMA afin d'accéder à l'émission des régions intermédiaires, entre  $\sim 1$ -10 UA. Enfin le SKA (mid-frequency) nous donnera à l'horizon 2030 des nouvelles contraintes sur des poussières dans les régions les plus optiquement épaisses des disques.

Ces progrès observationnels doivent être accompagnés d'un effort de modélisation pour interpréter quantitativement les données et tester les processus à l'œuvre dans les disques. Les observations présentent souvent de multiples composantes et requièrent ainsi le développement de modèles complexes. Si la communauté PCMI est en première ligne pour la modélisation des régions de photodissociation classiques, de l'émission des grains, ou encore des chocs, encore peu de modèles sont développés et confrontés aux observations des disques. Bien que de nombreux processus soient similaires à ceux opérant dans le milieu interstellaire, la modélisation des disques nécessite également de nouvelles données de physique moléculaire comme les taux de collision pour les bandes vibrationnelles d'un grand nombre de molécules (OH, CO<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>...) ou encore des données de spectroscopie pour identifier de nouvelles molécules.

## 8.3 Les petites échelles

### *Contexte global*

Lorsqu'on zoome sur les petites échelles du milieu interstellaire, du micromètre à l'Angström, nous rencontrons différents éléments, comme des molécules très diverses, des nanograins (de quelques dizaines à quelques centaines d'atomes de carbone, pour une taille caractéristique de quelques nanomètres), ou encore des poussières micrométriques nues ou bien recouvertes de glaces. Cette matière microscopique et nanoscopique joue un rôle prépondérant dans l'évolution physico-chimique et dynamique des différents environnements interstellaires (cf 8.1 et 8.2). Molécules, poussières et nanograins sont en constante évolution, que ce soit par interaction entre eux ou par apport d'énergie. Les processus microphysiques et chimiques agissant sur la matière interstellaire sont complexes et interdépendants, et de multiples paramètres, à différentes échelles temporelles ou spatiales, les gouvernent.

L'apport des multiples expertises présentes dans PCMI, qu'elles relèvent de la physique, de la chimie, et bien sûr de l'astrophysique, est absolument nécessaire pour améliorer notre

connaissance du MIS aux petites échelles. De nombreux efforts sont déployés et continueront à l'être, que ce soit en modélisation ou en astrophysique de laboratoire (théorique et expérimentale, au laboratoire ou bien sur infrastructure de recherche IR/IR\*), afin de dévoiler de nouveaux processus physico-chimiques, et de fournir des données fiables se rapprochant le plus possible des conditions interstellaires pour pouvoir ainsi interpréter et prédire les observations actuelles et futures (Figure 8.3.1). La communauté du PCMI veille à rendre les données accessibles par la Science ouverte, ou bien par la mise en ligne de bases de données. Seul un réseau collaboratif de grande ampleur tel que celui tissé au sein de la communauté PCMI depuis de nombreuses années et dont l'évolution est constante, permet de répondre aux grandes questions soulevées concernant les éléments microscopiques du milieu interstellaire, et d'identifier les nouvelles questions auxquelles nous répondrons demain.

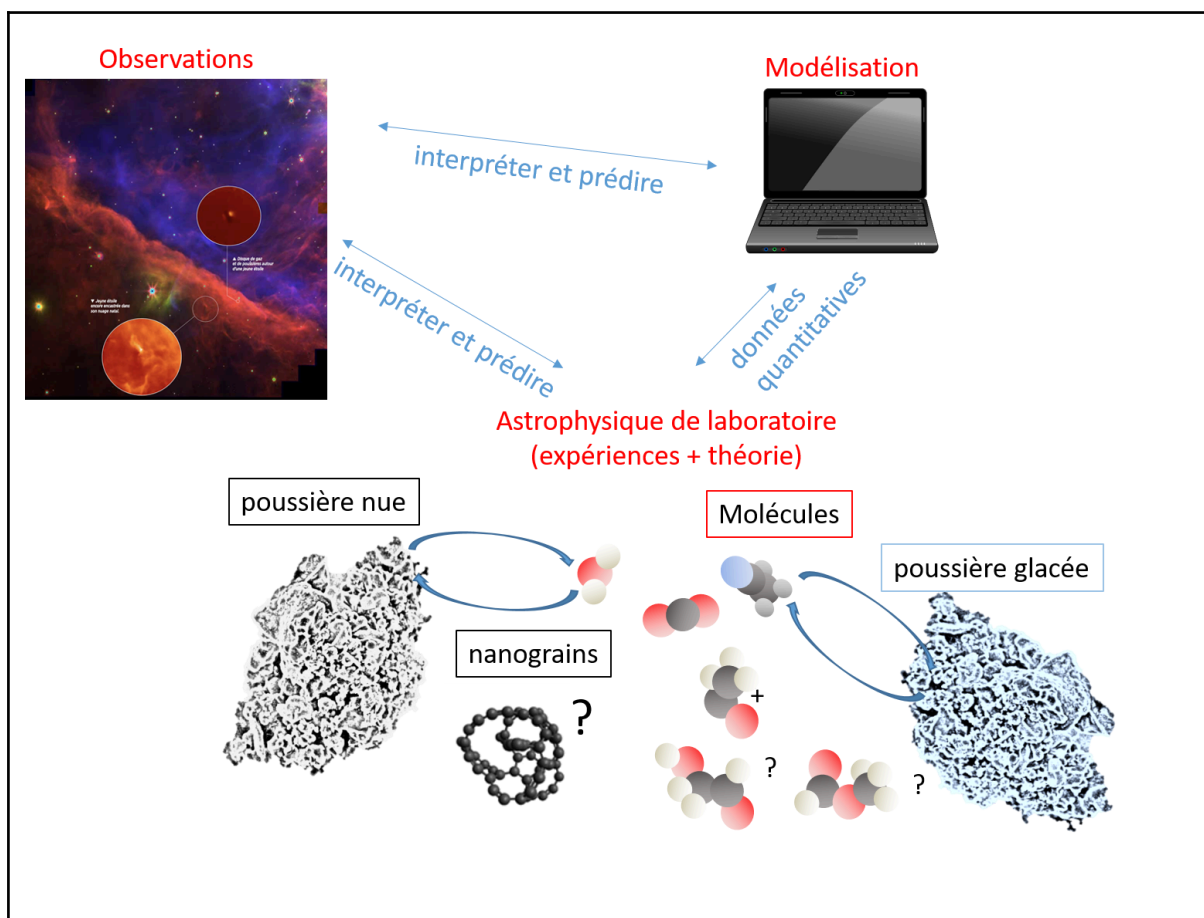


Figure 8.3.1 : L'interconnexion entre les observations, la modélisation et l'astrophysique de laboratoire est nécessaire pour étudier le MIS aux petites échelles, incluant molécules, nanograins, poussières nues et glacées. Figure réalisée par G. Féraud, en reproduisant en haut à gauche l'Image NIRCcam de la Barre D'Orion obtenue dans le cadre du programme ERS PDRs4All. Il s'agit d'une image composite de plusieurs filtres qui montre la présence de divers éléments de matière soumis à un fort rayonnement UV : l'émission de gaz ionisé, d'hydrocarbures, de gaz moléculaire, de poussière. La barre d'Orion s'étend du haut à gauche au bas à droite de l'image et contient un groupe de jeunes étoiles massives et chaudes en haut à droite de l'image (hors champ de vue). Crédit de l'image en haut à gauche: NASA, ESA, CSA, Réduction et analyse des données : équipe ERS PDRs4All ; traitement graphique S. Fuenmayor

### 8.3.1 Poussières et nanograins interstellaires

#### *Contexte*

Les grains de poussière interstellaires, des plus grands aux plus petits, jouent un rôle clé dans l'évolution physique, chimique et dynamique du gaz depuis les régions diffuses jusqu'aux nuages de formation d'étoiles et aux disques protoplanétaires, où la poussière est le principal réservoir de matière pour la formation des planètes telluriques et des noyaux des planètes géantes. Des découvertes récentes montrent que la composition de la poussière est beaucoup plus complexe que le modèle silicate/graphite souvent supposé et qu'elle évolue rapidement en réponse aux conditions locales. Le rôle des plus petits grains, les nanograins, reste assez peu connu, malgré son importance présumée dans le couplage avec le gaz dans certains environnements comme les disques protoplanétaires. La synergie entre les travaux des observateurs, modélisateurs, théoriciens et expérimentateurs au sein de la communauté PCMI (AIM, CRAL, CSNSM, IAP, IAS, ICP, IJCLab, ILM, IPAG, IRAP, ISMO, LAPLACE, LCPQ, LCAR, LERMA, LPCNO, LPENS, LUPM, MNHN, NIMBE, PIIM, UMET) est un pilier central pour fournir des données de laboratoire sur une large gamme de longueurs d'onde pour des analogues pertinents de silicates et de carbones amorphes, de PAHs, ainsi que des mesures quantitatives pour les processus physiques ayant un impact sur l'évolution des grains de poussière (sous l'action de photons, de rayons cosmiques, par chimie de surface...).

#### *Bilan*

#### **De nouvelles observations des poussières**

Les travaux récents montrent que la majorité des étoiles et de leurs systèmes planétaires se forment dans des régions fortement irradiées par le puissant rayonnement UV d'étoiles massives. De plus, les régions internes des disques protoplanétaires où se forment la majorité des exoplanètes sont également fortement irradiées par l'étoile centrale. Pourtant, la rétroaction du champ UV sur la formation stellaire et planétaire reste une question ouverte dans la communauté. Le JWST donne aujourd'hui un accès sans précédent aux régions chaudes, où la rétroaction s'opère, et qui émettent principalement dans l'infrarouge. La force de la communauté PCMI (AIM, IAP, IAS, IRAP, ISMO, LERMA, PIIM) est d'être à la fois impliquée dans la modélisation détaillée du gaz et des grains dans les régions irradiées, ainsi que d'être parfaitement positionnée dans les programmes d'observations phares du JWST (PI ERS PDR4all, co-I ERS Ice Age, GTO disques protoplanétaires et PDRs, GO en PI et col), en lien étroit avec les activités d'astrophysique de laboratoire.

Les données du JWST en imagerie et spectroscopie ont pour la première fois permis de résoudre spatialement la variation abrupte de l'émission de la poussière au bord éclairé de la Barre d'Orion (ERS PDRs4All). En considérant un modèle de poussières avec des nanograins de carbone et des grains de silicate submicroniques recouverts d'une couche de glace (THEMIS), des contraintes sans précédent sur les poussières ont été obtenues. Les deux principales sont que (1) l'abondance des nanograins de carbone par rapport au gaz doit être 15 fois plus faible que dans le MIS diffus (données en imagerie, MIRI), (2) l'hydrogénation des nanograins de carbone varie à travers le bord illuminé de la Barre d'Orion avec des nanograins de plus en plus pauvres en hydrogène à mesure qu'on se

rapproche des étoiles qui l'illuminent (données en spectroscopie, NIRSpec et MRS). Ces deux résultats ont des conséquences majeures sur la façon dont on va comprendre et modéliser la chimie du gaz dans les régions denses illuminées à l'avenir (transition H/H<sub>2</sub> par exemple).

La communauté PCMI a également été motrice dans l'analyse à grande échelle de l'émission polarisée des grains dans le submm avec l'analyse des données Planck-HFI (ENS, IAS, IRAP, LUPM) et du ballon stratosphérique PILOT (IRAP). La dépendance spectrale, la fraction de polarisation et leurs variations en fonction de l'extinction ont pu être caractérisées pour la première fois. Ces nouvelles contraintes se sont révélées en contradiction avec les modèles de grains considérés comme "standards" pour le milieu interstellaire Galactique et ont conduit à une révision des modèles les plus populaires dans la communauté internationale. Cela a permis à des membres de la communauté PCMI de créer le premier modèle empirique compatible avec les observations Planck (IAS, IRAP, LERMA, LUPM) puis d'élaborer le premier modèle basé sur les expériences en laboratoire permettant de rendre compte des observations polarisées THEMIS 2.0 (AIM, IAS, IRAP, LUPM).

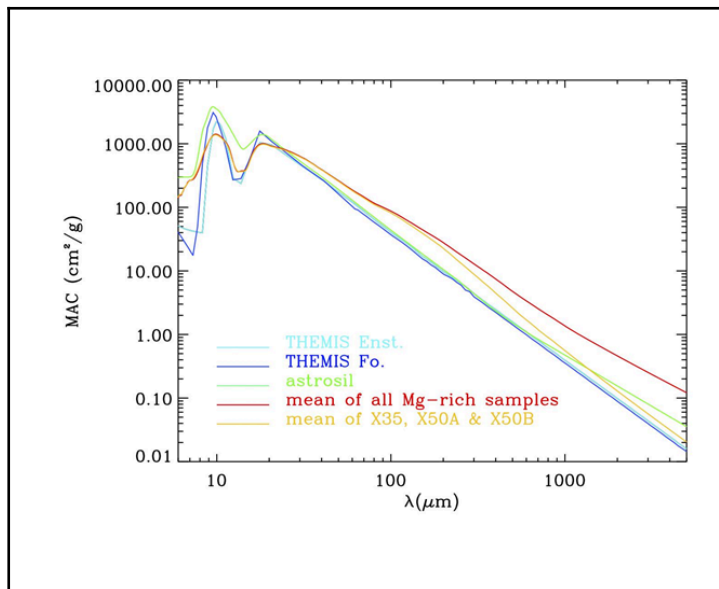


Fig. 8.3.1.1 : Comparaison du coefficient d'absorption massique de la composante silicatée des modèles de poussière cosmique (en vert et bleu) avec celui des silicates riches en magnésium (en orange et rouge), calculé pour un grain prolate dans la limite de Rayleigh. Figure reproduite de Demyk et al. (2022).

De nombreux efforts sont engagés pour améliorer la caractérisation des propriétés optiques des analogues de grains dans des conditions proches du MIS (Figure 8.3.1.1), avec la mise à disposition d'une base de données accessible à toute la communauté (IRAP, IAS, base de données STOPCODA). Cette base de données et le modèle public THEMIS 2.0 ont pour vocation d'être largement utilisés par la communauté pour analyser les observations IR du JWST mais aussi les observations polarisées faites et à venir avec NIKA2, ALMA et NOEMA. Par ailleurs, la caractérisation de l'émission polarisée des grains a conduit à la définition de méthodes innovantes de séparation des composantes pour la mesure des modes B du CMB (LPENS, IAS, IRAP, LUPM).

Les membres de PCMI ont également tiré parti des instruments permettant la mesure de la polarisation à petite échelle (ALMA, NIKA2) dans les régions denses de notre Galaxie (IRAP) et plus particulièrement dans les cœurs denses protostellaires (AIM). Les résultats les plus récents suggèrent que la croissance des grains est beaucoup plus rapide que ce qui était estimé jusqu'à présent et que les grains pourraient déjà atteindre des tailles de quelques dizaines à quelques centaines de microns dans le premier million d'années de la

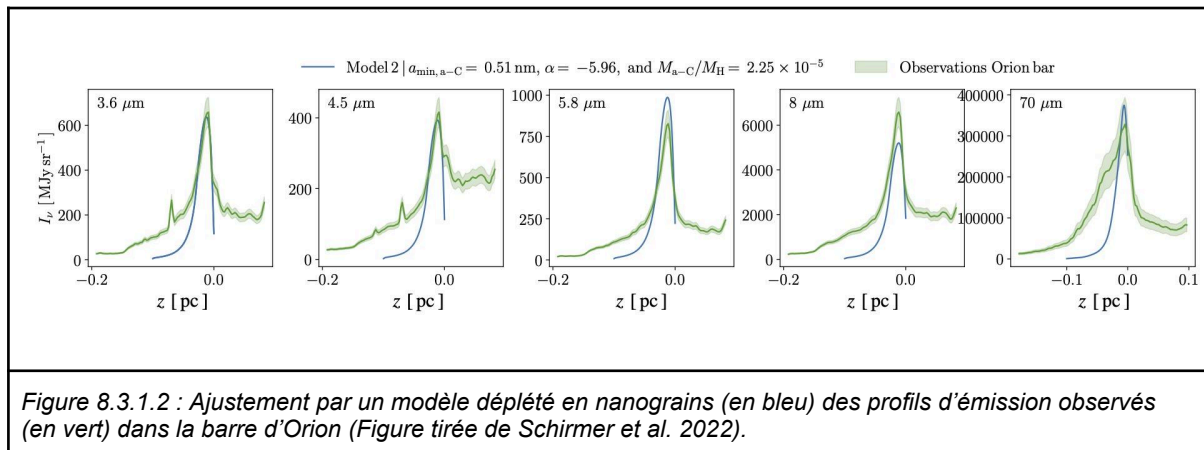
formation stellaire (AIM), à comparer à la taille caractéristique de 100 nm dans le milieu interstellaire diffus et ne dépassant pas le micron dans les nuages moléculaires.

### Quels sont les mécanismes de formation des poussières et quels sont les effets des différents environnements ?

Notre compréhension de la formation des poussières dans les enveloppes d'étoiles ainsi que leur évolution dans différents environnements astrophysiques a progressé, grâce au développement de nombreux dispositifs expérimentaux d'astrophysique de laboratoire (IRAP, LCAR, LAPLACE, ISMO). L'ensemble de ces travaux apporte des avancées sur l'identification des PAH et des fullerènes dans les milieux astrophysiques, mais aussi sur les conditions amenant à leur formation ainsi que leur évolution sous l'action du rayonnement ultraviolet. Un premier résultat sur le rôle potentiel des métaux dans la formation des poussières et des hydrocarbures dans les enveloppes d'étoiles carbonées a également été obtenu (IRAP, LCAR, LAPLACE, LCPQ) et ouvre de nombreuses perspectives.

D'autres expériences menées par différents laboratoires français (ISMO, IJCLab, IAS) et collaborations internationales ont permis d'étudier les effets des rayons cosmiques sur les poussières interstellaires. Des analogues de poussières carbonées ont été produits au laboratoire et ont été irradiés par des ions lourds rapides, simulant l'action des rayons cosmiques. De grands fragments moléculaires, notamment des PAH contenant jusqu'à plusieurs dizaines d'atomes de carbone, ainsi que des fullerènes ioniques, ont été détectés. Ceci montre qu'une approche de chimie "top-down" est possible, où les poussières interstellaires constituent des sources de molécules dans la phase gazeuse (cf 8.3.2).

### Evolution des nanograins : effet des collisions, effet des photons



Les nanograins évoluent lorsqu'ils entrent en collision avec des atomes/molécules ou interagissent avec des photons UV ou des particules énergétiques, comme le montrent diverses études. Par exemple, l'IAS a modélisé la variation de l'abondance des nanograins dans les régions de formation stellaire, en analysant les processus de fragmentation et coagulation (Figure 8.3.1.2). Les collisions entre agrégats de PAH et molécules d'eau, menant à l'attachement de molécules d'eau, ont été étudiées expérimentalement et théoriquement. Des collaborations entre expérimentateurs et théoriciens (IRAP, LCAR, SOLEIL, ILM, LCPQ) ont permis de mieux comprendre la physicochimie des agrégats de

PAH soumis à irradiation ou collision, notamment les paramètres influençant leur dissociation et leurs signatures spectrales IR.

Les méthodes de chimie quantique utilisées pour décrire *in fine* les structures des nanograins, leurs stabilités et leur évolution temporelle lorsqu'ils sont soumis à des processus énergétiques, reposent sur la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT,  $N < 100$ ) et sur l'approximation de type liaisons fortes de la DFT (méthode DFTB,  $N > 100$ ). L'efficacité de la méthode DFTB permet notamment d'effectuer des simulations de dynamique moléculaire "en vol" de l'ordre de la nanoseconde pour des systèmes de plusieurs dizaines d'atomes dans leur état électronique fondamental (LCPQ, ISMO). La description explicite de la structure électronique permet d'accéder aux propriétés spectroscopiques dans l'IR et l'UV-visible, en synergie avec les données expérimentales (ISMO, LCPQ, LiPhy).

### *Perspectives*

#### **Comment les différents environnements influencent-ils la formation et l'évolution des poussières ?**

Une meilleure compréhension de la nature des grains de poussière et de leur évolution est nécessaire pour améliorer la modélisation de l'évolution des objets interstellaires (cf 8.1 et 8.2). Cela nécessite d'améliorer la caractérisation des grains (nature chimique, forme, taille) et des processus physico-chimiques auxquels ils sont soumis, notamment formation et destruction. Une question qui reste ouverte concerne les propriétés des grains de poussière dans les jeunes protoétoiles, des enveloppes aux disques. L'analyse des données obtenues avec JWST dans l'IR moyen (programme ERS PDRs4all et GTO 1192 *Physics and chemistry of PDR fronts*) pourra servir de base aux modélisateurs et expérimentateurs pour mieux contraindre la taille, la forme, le rapport C/H et le degré d'organisation (fractions de structures aromatiques et aliphatiques) des espèces carbonées présentes dans les différentes régions du MIS (ISMO, LCPQ, IAS, IRAP).

Les mécanismes de formation des grains à différentes échelles, des PAH aux poussières, demeurent méconnus. Se pose notamment la question du rôle des métaux, et en particulier du fer, dans la formation d'hydrocarbures, de nanograins et de poussières dans des environnements chimiques complexes. Il y a peu de travaux sur ce sujet, et ils sont pourtant nécessaires afin d'améliorer notre compréhension de la chimie dans les enveloppes circumstellaires des étoiles carbonées. Modélisations (chimie quantique et dynamique) et expériences de laboratoire (pièges à ions et plasma) visent à améliorer notre compréhension de ces processus réactifs au sein de la communauté PCMI (IRAP, LCPQ, LAPLACE).

#### **Nouvelles sondes de caractérisation des poussières**

Afin d'aller toujours plus loin dans notre caractérisation des propriétés des poussières et de leur évolution, les membres de la communauté PCMI portent le développement de nouvelles sondes expérimentales, le développement ou l'application de méthodes de simulation de pointe, la mise en place ou l'extension de bases de données, et des apports dans les modèles astrophysiques. Ainsi, le développement, au sein de la communauté française, d'un instrument innovant pour l'imagerie hyperspectrale infrarouge à l'échelle nanométrique

permettra de réaliser des analyses physico-chimiques de pointe sur des poussières. L'instrument de nouvelle génération mis en oeuvre pourra cartographier les variations chimiques des matières organiques et inorganiques dans les matériaux extraterrestres à l'échelle nanométrique dans le contexte du retour d'échantillons extraterrestres par des missions spatiales, et pour d'autres échantillons précieux conservés sous des atmosphères contrôlées préservant leur intégrité, en lien avec le PNP (ICP, ISMO, IJClab, MNHN).

Les expériences d'astrophysique de laboratoire visent à se rapprocher toujours plus des conditions du MIS. L'un des défis expérimentaux à relever est de réussir à produire des nanoparticules *isolées*, au plus proche des conditions du MIS. Une des voies explorées consiste à produire des faisceaux de particules de taille homogène. Les effets des photons et des analogues de rayons cosmiques sur ces nanoparticules isolées pourront alors être caractérisés (IJClab, ISMO, NIMBE) et inclus dans les modèles (IAS, IRAP, ISMO).

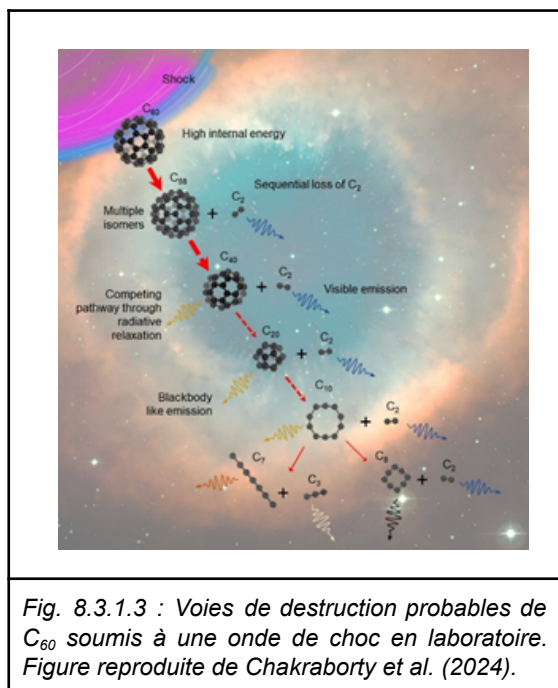


Fig. 8.3.1.3 : Voies de destruction probables de C<sub>60</sub> soumis à une onde de choc en laboratoire. Figure reproduite de Chakraborty et al. (2024).

Enfin, un axe intéressant pour étudier l'évolution des grains consiste à exploiter les tubes de choc (Figure 8.3.1.3). Cette approche originale d'astrophysique de laboratoire, à dominante expérimentale, permet de caractériser *ex situ* les modifications physico-chimiques induites par le passage d'une onde de choc sur des résidus solides et des composés volatils d'analogues de grains (carbones amorphes hydrogénés, suies, carbures de silicium...) et de sonder *in situ* l'émission visible des grains portés à haute température ainsi que leurs produits de décomposition (IPR, LCPQ, ISMO, LiPhy, LPENS, LERMA).

### À la recherche de nouveaux porteurs ou de mécanismes inexplorés pour expliquer des signatures astrophysiques qui ne sont toujours pas attribuées dans l'UV ou l'IR

Plusieurs signatures astrophysiques, que ce soit l'Emission Rouge Etendue ou les Bandes Aromatiques Infrarouges (AIBs), restent majoritairement inexpliquées. Seuls des travaux expérimentaux et théoriques, implémentés dans des modèles de poussières, permettront d'avancer dans l'identification des porteurs. Récemment, la volonté d'identifier ces porteurs a motivé l'étude d'une nouvelle classe d'objets qui sont des populations d'agrégats carbonés de plusieurs dizaines d'atomes, notamment les isomères du C<sub>60</sub> (ISMO, LCPQ, LiPhy). L'injection des données spectrales déterminées au niveau quantique a permis de montrer que les isomères de C<sub>60</sub> dans NGC 7023 contiendraient 0,1 à 1,5 % de l'abondance du carbone interstellaire. Avec l'avènement et le développement des méthodes basées sur l'apprentissage automatique, il sera possible de décrire au niveau moléculaire des systèmes

de taille de plus en plus grande avec des potentiels de plus en plus précis sous différentes conditions de température. Cela sera une avancée importante pour mieux décrire les interactions entre le gaz et des grains de grande taille (plusieurs milliers d'atomes).

Pour expliquer l'émission rouge étendue dans le proche IR, une piste très prometteuse est le mécanisme de fluorescence récurrente, fondé sur la réversibilité du processus de fluorescence. C'est un mécanisme qui est assez peu étudié en physique moléculaire, et dont l'introduction comme candidat pour expliquer l'Emission Rouge Etendue est totalement novatrice, et reste à explorer par la théorie et l'expérience, pour de grandes molécules carbonées (ISMO, LIPhy, LCPQ).

Pour finir, les observations récentes des AIBs permises par JWST, stimulent des activités de recherche sur l'émission IR, qui est un processus physico-chimique complexe. Ainsi, l'étude du processus d'émission IR, que ce soit pour les PAH, agrégats de PAH, et systèmes carbonés jusqu'à une centaine d'atomes de C, d'un point de vue théorique ou expérimental, est un défi à relever, pour permettre de mieux identifier les porteurs des AIBs (IAS, ISMO, IRAP).

### 8.3.2 Molécules en phase gazeuse : espèces stables/radicaux, neutres/chargés

#### *Contexte*

Notre connaissance du MIS repose sur les spectres de rayonnement capturés par divers télescopes (ALMA, IRAM NOEMA, IRAM-30m, Yebes, JWST, SOFIA). En particulier, l'identification des molécules interstellaires et la détermination de leur abondance reposent quasi-entièrement sur la spectroscopie millimétrique et dans une moindre mesure infrarouge. Plus de 300 molécules ont été observées dans le milieu interstellaire, dévoilant une grande diversité et complexité : des molécules diatomiques au C<sub>70</sub>, des molécules dans tout état de charge (neutres, cations, anions), stables ou radicalaires. Les radicaux ou leurs ions constituent une part importante (30 %) des détections. Les molécules peuvent évoluer dans le milieu interstellaire, sous l'action de collisions (inélastiques ou réactives), ou bien par interaction avec des photons, conduisant à leur dissociation ou ionisation. De nombreux processus physiques ou chimiques, d'une grande complexité, régissent ainsi l'évolution des molécules du milieu interstellaire.

De nombreuses équipes de laboratoires du PCMI étudient les molécules dans un contexte astrophysique (COSYS/IMSE, ICP, IEMN, IMSE, IPAG, IPR, IRAP, ISCR, ISM, ISMO, ILM, IPR, LAC, LCPMR, LCAR, LCT, LERMA, LESIA, LiPhy, LP2iB, LAB, PhLAM, PIIM, Utinam, XLIM) à l'aide d'expériences dédiées développées par la communauté et des grands instruments (Tables A6-A7).

#### *Bilan*

#### **Nouvelles détections: observations et apport et l'astrophysique de laboratoire**

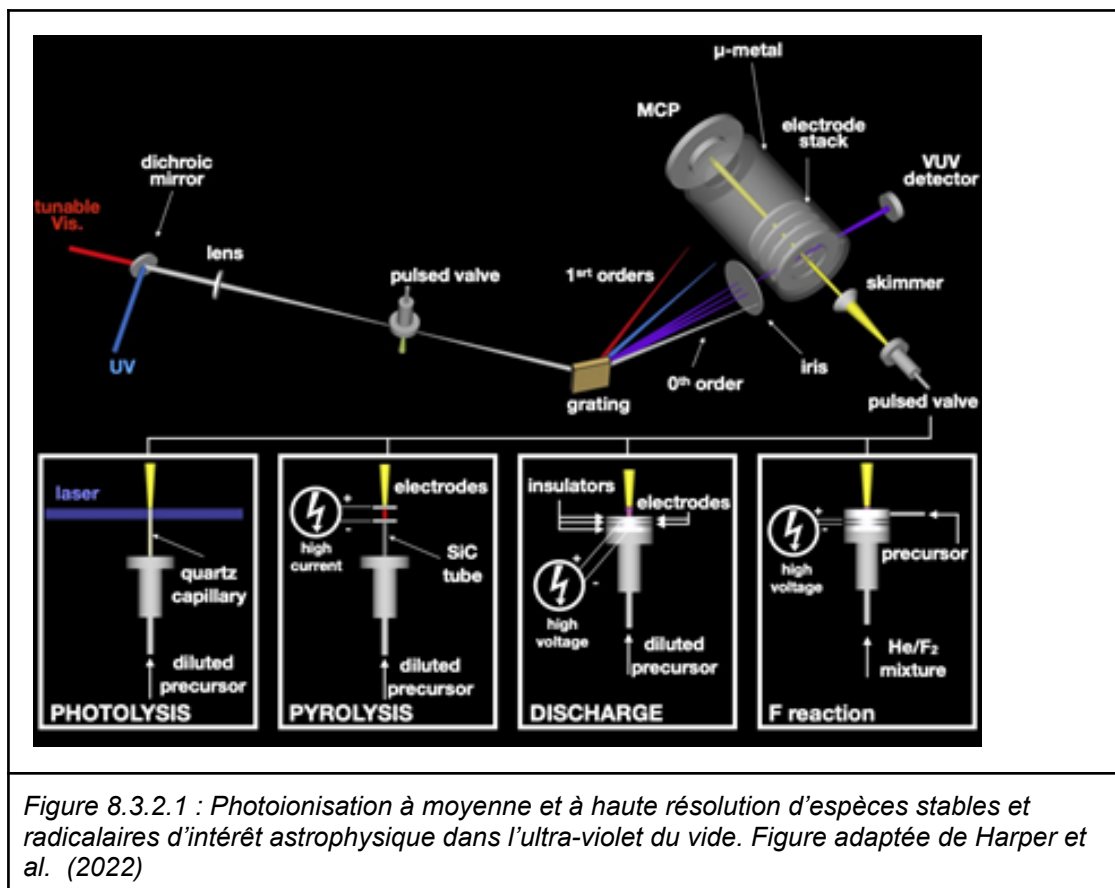
Entre 2019 et 2023, au niveau international, 99 nouvelles molécules ont été identifiées dans le MIS, marquant une augmentation significative de près de 30% du nombre total de molécules détectées. Parallèlement, 96 non-détections ont été publiées durant cette



période, dont 3 ont été ultérieurement identifiées. Les contributions notables des équipes de la communauté PCMI incluent notamment la détection de plusieurs molécules clés telles que le trans-HONO (LAB, ISM), le cation acétyle  $\text{CH}_3\text{CO}^+$  (PhLAM, IPAG), le propynéthial HCCSH (PhLAM, ISCR), le méthylcétène  $\text{CH}_3\text{CHCO}$  (PhLAM, ISCR), le Z-1,2-éthènediol Z-(CHOH)<sub>2</sub> (ISCR), le 3-hydroxypropénal (HOCHCHCHO) (IRAP, ISM, LAB, LESIA), le  $\text{H}_2\text{CCCH}^+$  (ISM, LAB), le  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$  (PhLAM) et le  $\text{C}_2\text{H}_5\text{CONH}_2$  (PhLAM - détection cependant contestée). Outre ces nouvelles espèces moléculaires, les chercheurs de la communauté PCMI ont joué un rôle clé dans les études conduisant à la détection de transitions d'espèces isotopiques et/ou d'états excités de vibration pour diverses molécules interstellaires. Parmi elles, on compte le méthyle-diacétylène-d  $\text{CH}_2\text{DC}_4\text{H}$ , le méthyle-acétylène-d  $\text{CH}_2\text{DCCD}$ , le méthyle-cyanoacétylène-d  $\text{CH}_2\text{DC}_3\text{N}$  (LERMA), le diméthyle éther  $\text{CH}_3\text{OCHD}_2$  et la méthylamine  $\text{CH}_3\text{NH}_2$   $v_t=1$  (PhLAM). Il faut également noter la contribution de chercheurs de la communauté PCMI dans l'inventaire chimique de la proto-étoile IRAS 16293-2422 (ISCR, PhLAM, IRAP, ISMO, LESIA, LAB, ISM) avec la détection des molécules suivante (liste non exhaustive) : oxirane-d  $c\text{-C}_2\text{H}_3\text{DO}$  (ISCR), amidogen-d : NHD &  $\text{ND}_2$  (ISMO), acétaldéhyde-d :  $\text{CH}_2\text{DCOH}$  &  $\text{CH}_3\text{COD}$  (ISCR, PhLAM, ISMO, IRAP), propénal  $\text{C}_2\text{H}_3\text{CHO}$  & propylène  $\text{C}_3\text{H}_6$  (LAB, ISM), méthanol-d  $\text{CHD}_2\text{OH}$  (ISMO, PhLAM, IRAP, LESIA). Les observations de molécules complexes dans les cœurs préstellaires froids, premières étapes du processus de formation des étoiles de faible masse, constituent un changement de paradigme, en démontrant que les molécules complexes ne sont pas uniquement observées dans les derniers stades de la formation des étoiles (IRAP). Ces résultats soulèvent de nombreuses questions, comme par exemple : quelle est l'influence de l'environnement externe sur la complexité moléculaire dans les cœurs froids? Quels sont les effets des paramètres physiques du nuage (température, densité) sur la variabilité chimique ? Ces observations ont été rendues possibles grâce à l'amélioration des performances instrumentales, par exemple à l'IRAM-30m, IRAM/NOEMA, et YEBES. Dans les régions massives de formations d'étoiles, plus chaudes, de nombreuses COMs sont observées. De récents larges programmes sur ALMA (LAB) ont notamment permis d'observer des COMs dans des échantillons statistiquement significatifs d'enveloppes proto-stellaires massives présentant des signatures de chimie riche et active. Malgré la diversité des environnements, la composition chimique est assez similaire d'une source à l'autre, sauf pour certaines molécules, comme  $\text{CH}_3\text{CCH}$ , qui tracent préférentiellement l'enveloppe.

Les récentes détections de COMs dans des nuages sombres et froids, pour lesquels la chimie standard en phase gazeuse et la chimie sur la surface des grains n'expliquent pas les abondances observées, montrent d'un côté la nécessité d'améliorer les modèles astrochimiques et de l'autre le besoin de nouvelles données de laboratoire pour interpréter et prédire les observations. Par exemple, certains radicaux clés, tels que le méthoxy ( $\text{CH}_3\text{O}$ ) et des COMs tels que  $\text{CH}_3\text{OCH}_3$ ,  $\text{CH}_3\text{OCHO}$ ,  $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$  ont été trouvés dans des régions très froides. Il n'est pas clair si les photons secondaires ou d'autres processus énergétiques peuvent produire ces radicaux et molécules organiques dans des nuages sombres et froids. De plus, si ces radicaux peuvent également être produits dans des nuages moléculaires chauds, la chimie des COMs devrait prendre en compte les réactions radical-neutre en phase gazeuse et à la surface des grains. Les études d'espèces radicalaires dans le domaine millimétrique/submillimétrique sont devenues la priorité des spectroscopistes à l'ISMO et au PhLAM. Les innovations techniques développées sur les dispositifs expérimentaux ont permis de caractériser les spectres de rotation de radicaux tels que  $\text{CH}_2\text{OH}$ ,  $\text{CH}_2\text{CN}$ ,  $\text{CH}_2\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{NCO}$ .

La spectroscopie de photoionisation à haute résolution peut être une alternative intéressante à l'absorption directe pour les espèces cationiques (Figure 8.3.1.1). On peut citer la confirmation de la détection de  $\text{CH}_3^+$  grâce à des spectres de photoélectron résolus rotationnellement avec l'expérience VULCAIM, comme décrit dans le fait marquant 5 (ISMO, IRAP, ICP, IAS).



## Collisions et chimie en phase gazeuse : des études de plus en plus précises et de plus en plus proches des conditions du MIS

### Collisions inélastiques

Dans le MIS, les populations des niveaux d'énergie moléculaire sont rarement à l'équilibre thermodynamique local (ETL) car la densité est généralement si faible ( $n \ll 10^8 \text{ cm}^{-3}$ ) que les collisions ne peuvent pas maintenir l'ETL. Dans de telles conditions, interpréter un spectre et déterminer les conditions physiques régnant dans les nuages moléculaires nécessite de résoudre simultanément les équations du transfert de rayonnement et d'équilibre statistique des molécules. La modélisation des nuages moléculaires interstellaires nécessite donc le calcul de taux d'excitation collisionnelle pour les molécules, car les collisions influencent les populations de leurs niveaux d'énergie, en compétition avec les processus radiatifs. Depuis environ quinze ans, la communauté française, particulièrement PCMI, est leader mondial dans la production de taux de collision pour les espèces interstellaires. Ces recherches sont actuellement menées au LERMA, à l'IPAG, au LOMC, à l'IPR et à l'ISM.

Ces dernières années ont été marquées par la production d'un grand nombre de données de collisions pour des molécules pour lesquelles aucune donnée n'existait. Des calculs des taux de collision pour les molécules réactives (ions et radicaux) d'intérêt interstellaire ont été développés à l'IPR et à l'IPAG. Le calcul de ces taux était un défi car les processus inélastiques et réactifs entrent en compétition lors des collisions. Des méthodes innovantes basées sur des approches statistiques et/ou en dimensionnalité réduite ont été développées, menant à la production des données de collisions pour de nombreux ions mais aussi pour des radicaux tels que  $C_2H$ ,  $CCS$ ,  $OH$  considérés comme d'excellents traceurs des conditions physiques. Grâce à des projets financés par le PCMI, des données de collisions pour des atomes et des petites molécules complexes ont aussi pu être obtenues. Il a même été possible de déterminer des données pour des molécules polyatomiques complexes telles que  $CH_3CHCH_2O$  ou  $C_5H_6$ .

Ces calculs théoriques ont dans certains cas pu être validés via des comparaisons avec des expériences en laboratoire de cinétique ou de faisceaux moléculaires croisés (IPR et ISM). L'accord théorie-expérience a dans la plupart des cas été excellent, démontrant ainsi que les calculs utilisant des traitements avancés pour décrire les mouvements électroniques et nucléaires peuvent rivaliser avec la précision des expériences.

### *Collisions réactives*

Les trois dernières années ont vu une progression spectaculaire des détections d'espèces moléculaires dans le MIS, portée en grande partie par la mise en service de nouveaux détecteurs sur le radiotélescope Yebes.

Malgré un travail de fond mené sur les réseaux de réactions chimiques (base de données KIDA, LAB, ISM), les modèles astrochimiques peinent néanmoins à reproduire certaines abondances moléculaires observées. Parmi les causes possibles, la méconnaissance de nombreuses voies de formation et destruction en phase gazeuse alors que leur inclusion dans les modèles avec les paramètres déterminés dans les expériences de laboratoire ou par des calculs théoriques précis pourrait être décisive. Dans ce contexte, un des défis majeurs est la détermination des produits des collisions réactives en phase gazeuse et des rapports de branchement entre différentes voies de sortie. On peut distinguer ici deux types de processus (ioniques et neutres) pour lesquels les avancées diffèrent.

La réactivité d'ions dont on contrôle l'énergie de collision mais surtout l'énergie interne (vibronique) peut être explorée finement grâce à une plateforme instrumentale unique au monde mise à la disposition de la communauté scientifique (ICP, synchrotron SOLEIL). Cette méthode permet d'accéder aux seuils thermodynamiques et aux sections efficaces absolues de réaction. Elle a également été utilisée récemment pour sonder le changement de structure d'ions isomères tels  $C_{10}H_8^+$  (azulène/naphthalène). En dépit de très nombreux travaux, l'exploration de la réactivité des ions avec des molécules neutres reste le plus fréquemment limitée à la température ambiante. Une des approches les plus prometteuses à basse température, le piégeage cryogénique, est surtout adapté aux réactions avec l'hydrogène moléculaire comme partenaire neutre de collision. Cette technique est plutôt employée sur le territoire national pour la spectroscopie et la photophysique. Alternative aux pièges à ions cryogéniques, l'utilisation des écoulements supersoniques uniformes avec injection d'ion (IPR) ouvre la voie aux basses températures et à l'étude de co-réactifs neutres lourds.

La collision d'ions moléculaires avec des électrons (recombinaison dissociative), considérée comme le processus dominant de destruction des ions dans le milieu interstellaire en raison de sa très haute efficacité, continue de faire l'objet d'études théoriques via des calculs quantiques (LOMC). Les calculs sont le plus souvent validés par comparaison aux résultats expérimentaux existants. Notons que des études complémentaires expérimentales, en particulier pour les gros systèmes, portant autant sur le coefficient de vitesse et sur les produits de réaction, extrêmement difficiles à prédire serait de tout premier intérêt.

Pour les études de cinétique avec des systèmes complexes, un des défis les plus difficiles à relever reste celui de l'élucidation des produits de réactions entre espèces neutres à basse température. C'est aux basses températures, là où les effets quantiques peuvent jouer un rôle majeur, que les comportements les plus spectaculaires sont rencontrés, la vitesse de réaction pouvant parfois gagner deux ordres de grandeur. Une sélection de réactions du radical OH avec des molécules organiques (méthanol, ammoniac, méthylamine...) entre dans cette catégorie. Aujourd'hui, les coefficients de vitesse des réactions radical-neutre peuvent être déterminés avec précision à basse température (IPR, ISM) mais seule une poignée de celles-ci ont vu leurs produits décisivement mesurés en deçà de 50 K. À côté des faisceaux moléculaires croisés permettant d'assurer des conditions de collisions uniques (ISM), plusieurs dispositifs combinant les écoulements supersoniques uniformes et la spectrométrie de masse (CRESUSOL) ou la spectroscopie microonde (CRESUCHIRP) ont été mis au point pour identifier les produits de réaction et commencent à donner leurs premiers fruits comme par exemple via la réaction de CN avec le propène C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>. L'ensemble de ces recherches repose sur une intrication très forte des expériences avec la théorie via des calculs de chimie quantique couplés à des calculs de dynamique.

### **Photochimie en phase gazeuse**

L'étude de l'interaction entre les photons ultraviolets dans le vide (VUV) et les molécules d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (PAHs) est d'une grande importance pour comprendre la physique et la chimie des régions de photodissociation (PDRs) associées aux régions de formation d'étoiles. Cette interaction joue un rôle crucial en influençant l'inventaire chimique par le déclenchement de divers processus unimoléculaires, comme la dissociation, l'isomérisation, l'ionisation et l'ionisation dissociative. La nature du rayonnement VUV, qui dépend de l'énergie, peut activer diverses voies de réaction et donner lieu à toute une série de produits. Ces produits peuvent présenter des schémas de réactivité spécifiques qui, à leur tour, influencent la dynamique chimique générale dans l'environnement. En outre, le rayonnement VUV est largement reconnu comme le principal catalyseur de l'émission omniprésente dans l'infrarouge (IR), communément appelée bandes infrarouges aromatiques (AIB), observée sur de nombreux objets astronomiques.

Les études expérimentales sur l'irradiation VUV se sont principalement concentrées sur la compétition entre ionisation et fragmentation pour les PAHs neutres (IRAP, synchrotron Soleil, cf Fig. 8.3.2.2). Plus récemment, ces aspects ont été étudiés pour les PAHs cationiques, révélant que l'ionisation (formation du dication) prévaut pour les cations de PAHs de grandes tailles, tandis qu'elle concurrence la fragmentation pour les PAHs cationiques de plus petite taille. Par conséquent, les variations des caractéristiques d'ionisation des PAH peuvent être aussi importantes que les paramètres de fragmentation

cinétique dans la modélisation chimique des PAHs interstellaires. Cela souligne l'importance d'incorporer à la fois la photofragmentation et la photoionisation dans les modèles.

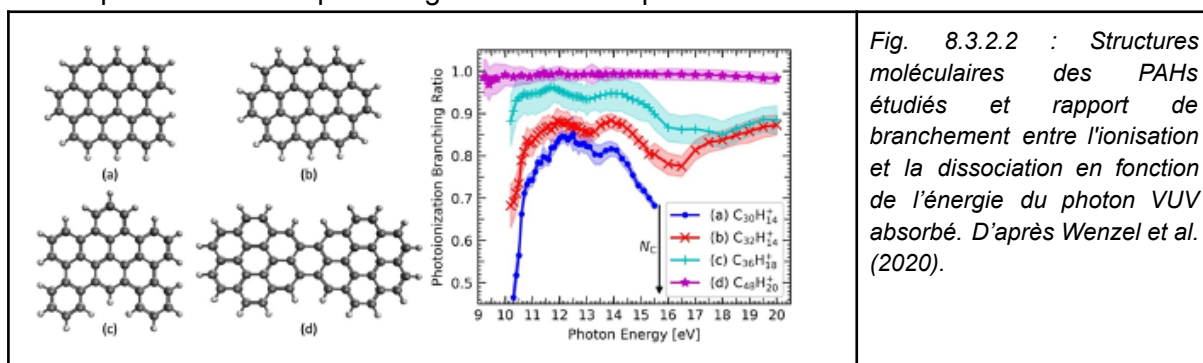


Fig. 8.3.2.2 : Structures moléculaires des PAHs étudiés et rapport de branchement entre l'ionisation et la dissociation en fonction de l'énergie du photon VUV absorbé. D'après Wenzel et al. (2020).

La question de savoir comment les PAHs cosmiques réagissent après avoir absorbé un photon VUV a, pour l'essentiel, été résolue sans contrôle précis de l'énergie interne ou même de la structure des PAHs ionisés qui réagissent. Récemment, il est devenu évident que la réactivité des PAHs ionisés et les produits résultant de l'ionisation dissociative sont fortement influencés par l'énergie du photon entrant, définissant l'énergie interne communiquée au système moléculaire.

L'irradiation VUV des PAHs neutres, processus le plus documenté actuellement, est généralement effectuée auprès de rayonnement synchrotron (ex : ligne DESIRS du synchrotron SOLEIL) où une large accordabilité de l'énergie du photon est disponible. L'étude de l'irradiation des PAHs cationiques a été relativement limitée en raison de la nécessité de combiner un piège à ions avec une source de lumière VUV. Les données proviennent de dispositifs expérimentaux comprenant des pièges à ions à température ambiante ou refroidis, et des sources de lumière laser ou sur grand instrument (ICP, IRAP, ISMO, LCAR, Synchrotron Soleil).

### Perspectives

#### Des observations de molécules à interpréter et à prédire

L'interprétation des récentes observations de molécules dans le milieu interstellaire nécessite des outils fiables et de plus en plus performants. En parallèle de cette interprétation, il est primordial de travailler sur la prédiction de l'observation de nouvelles espèces, en définissant la gamme spectrale pertinente et en estimant l'intensité des raies.

Une étape absolument cruciale consiste à effectuer la synthèse chimique de différentes familles de molécules candidates pour interpréter/prédire les observations. Ces synthèses, principalement effectuées à l'ISCR, sont la source de nombreuses collaborations au sein de la communauté du PCMI.

Spectroscopie mm-sub mm des radicaux et ions: des mesures ultrasensibles

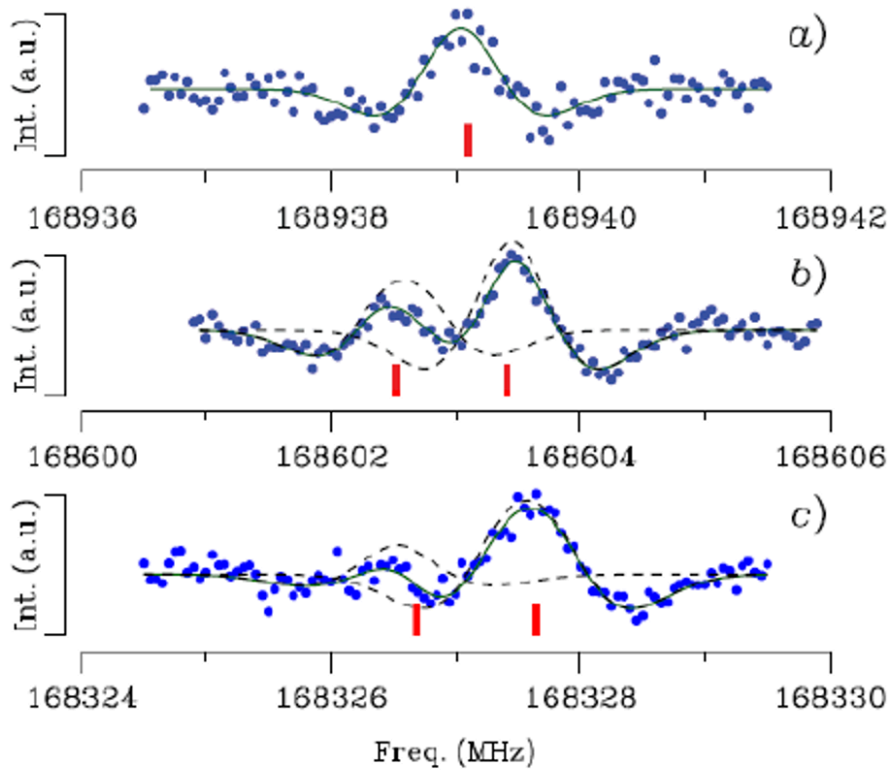


Figure 8.3.2.3 Spectres expérimentaux de la structure fine et des composantes d'effet tunnel de la transition  $1_{10} \leftarrow 1_{01}$  du radical  $\text{CH}_2\text{OH}$  ((a), (b) et (c) correspondent respectivement aux composantes  $\nu_t = 0, J = 0.5$ ;  $\nu_t = 0, J = 1.5$ ; et  $\nu_t = 1, J = 1.5$ . Les points expérimentaux sont complétés par des ajustements en ligne continue ou en tirets. Les fréquences calculées sont indiquées par des traits verticaux. Figure reproduite de Coudert et al (2022, *J. Chem. Phys.* 156, 244301)

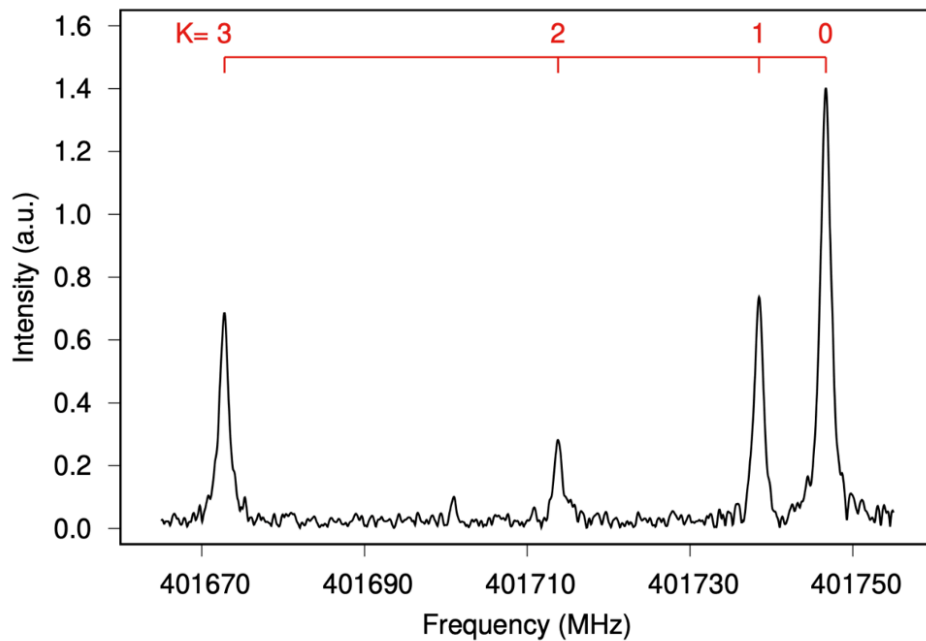


Figure 8.3.2.4 Spectre expérimental du cation d'acétyle démontrant une série de transitions  $J = 21-22$  et  $K = 0$  à  $K = 3$ . Le spectre sur la figure est le résultat de la moyenne de  $6,7 \times 10^7$  acquisitions enregistré en  $\sim 20$  min. Figure reproduite de Cernicharo et al. 2021, *A&A* 646, L7

Dans le domaine de la spectroscopie en phase gazeuse des radicaux et ions, la principale difficulté réside dans le besoin de spectromètres extrêmement sensibles, capables de détecter ces espèces en très faible quantité, tout en ayant un temps d'acquisition suffisamment court pour capturer leur présence éphémère (cf Figure 8.3.2.3 et 8.3.2.4). Pour surmonter ces obstacles, il est impératif de poursuivre le développement de nouveaux outils et spectromètres. L'amélioration de la sensibilité peut être réalisée par le développement de nouvelles sources de rayonnement plus puissantes et par la mise en place ou l'optimisation de systèmes résonants ou à multipassage (PhLAM, ISMO). En plus de la sensibilité, l'obtention de l'ultra-haute résolution de mesures dans le domaine mm-submm permettra de fournir des données de grande précision exploitables pour les études dynamiques de différentes sources astrophysiques, qui recherchent de petites différences de vitesse entre différents marqueurs moléculaires. Une nouvelle piste intéressante pour la formation des molécules à couche ouverte est l'application de la photolyse laser, qui ouvre des applications à la dynamique chimique (PhLAM). Les développements futurs de nouveaux spectromètres permettront de former et d'étudier des espèces radicalaires, de mesurer les rapports de ramification des produits de collisions réactives et les sections efficaces des collisions non réactives.

Il existe également de nombreuses difficultés théoriques pour analyser les spectres des radicaux et des ions. Au fur et à mesure que leur taille augmente, des mouvements de grande amplitude tels que l'inversion ou la torsion d'un groupement méthyle peuvent apparaître. Si les codes nécessaires pour traiter ces mouvements de grande amplitude sont disponibles pour les molécules à couche fermée, ils ne le sont pas pour les molécules à couche ouverte. Il est donc important de poursuivre les travaux de modélisation des spectres des radicaux et ions ayant un ou plusieurs mouvements de grande amplitude (ISMO).

### **Vers de nouvelles données de collisions : des petites molécules (excitées) et leurs isotopologues aux molécules complexes**

La communauté possède maintenant des données de collisions pour plus de 50 espèces, dont les 2/3 ont été produites grâce à des projets soutenus par le PCMI. Les données sont cependant encore majoritairement absentes pour les molécules complexes. La communauté PCMI se concentrera donc sur ces espèces, y compris les molécules cycliques. Les données de collisions sont cruciales pour détecter de nouvelles espèces car les raies d'émission de nombreuses molécules complexes sont détectables grâce à des effets MASER : sans ces données de collisions pas d'interprétation possible. Les effets isotopiques sont également importants à considérer, car les taux de collisions des isotopologues secondaires peuvent différer de ceux de l'isotopologue principal, nécessitant des calculs spécifiques qui apporteront des informations clés sur la chimie et les conditions physiques du MIS. De plus, avec la capacité du JWST à observer les molécules vibrationnellement excitées dans certaines régions du MIS, un effort important, théorique et expérimental, sera nécessaire pour obtenir ces données, notamment en développant de nouvelles approches pour les collisions non réactives impliquant des molécules excitées vibrationnellement ( $H_2O$ , etc.). Ces données sont essentielles pour alimenter des codes de transfert radiatif et mieux comprendre l'excitation de ces molécules, notamment dans l'environnement des étoiles évoluées.

## Dépasser les limites de la chimie en phase gazeuse

La sophistication croissante des modèles astrochimiques ne doit pas cacher une certaine méconnaissance des vitesses et des produits de très nombreuses réactions radical-neutre, comme souligné dans le bilan. L'effort de développement d'outils analytiques doit se poursuivre. Aux côtés des améliorations des instruments sondant les écoulements supersoniques uniformes par spectroscopie rotationnelle et par spectrométrie de masse, d'autres pistes sont engagées. Une des idées les plus novatrices est de combiner spectroscopie par peigne de fréquences, amplification en cavité optique, détection résolue en temps, et écoulements supersoniques uniformes pour détecter les signatures spectrales et sonder l'abondance de molécules et radicaux à basses températures.

Pour répondre aux observations effectuées par des télescopes tels que JWST de molécules dans des états excités de vibration, il devient impératif d'étendre les mesures de réactivité à des espèces vibrationnellement excitées. Ces recherches sont aujourd'hui envisageables de manière systématique pour les espèces chargées qui sont plus facilement manipulables. Les ions peuvent ainsi être préparés dans un état vibrationnel spécifique avant la collision et il est ainsi possible d'étudier expérimentalement l'influence de l'excitation vibrationnelle sur les processus réactifs. En parallèle, les théoriciens travaillent actuellement sur des modèles qui permettent d'obtenir des données d'états à états, c'est-à-dire pour lesquels l'influence des états ro-vibrationnels des réactifs et ou les distributions des états d'énergie des produits sont prises en compte. Ce type de données est actuellement accessible pour les petits systèmes moléculaires (3 à 4 atomes) et les développements actuels devraient permettre d'étendre ce type d'étude à des systèmes avec 5 ou 6 atomes. Il semble en revanche aujourd'hui non réaliste de mener à bien ce type d'étude sur des molécules plus complexes.

L'autre défi restant à relever est l'identification des différents isomères issus des produits de réaction. En effet, suite à la détection de COMs dans le milieu interstellaire, il arrive que les abondances calculées par les modèles astrochimiques, comportant des centaines d'espèces et des milliers de réactions, peinent à reproduire les abondances observées. C'est le cas pour deux molécules apparentées d'intérêt prébiotique, le glycolaldéhyde  $\text{HOCH}_2\text{CHO}$  et le glycolonitrile  $\text{HOCH}_2\text{CN}$ , et pour les deux isomères les plus stables de l'espèce  $\text{H}_3\text{C}_2\text{S}$ , le thiopropadiénone  $\text{H}_2\text{CCCS}$  et le thiopropynal  $\text{HCSCCH}$ . Le manque de réactions en phase gazeuse dans le réseau de réactions chimiques est souvent évoqué et les méthodes de chimie quantique sont appliquées pour trouver des voies réactionnelles. Il faut ici déterminer les voies de réactivité les plus probables, non seulement du point de vue thermodynamique, mais aussi du point de vue cinétique. Ces systèmes sont abordés via des méthodes de chimie quantique fondées sur la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT) ou bien post Hartree-Fock, pouvant atteindre une très bonne précision. Par exemple, pour l'étude de la formation d'amines primaires et secondaires par réduction de nitriles, la détermination des barrières d'énergie a expliqué que seule l'amine secondaire pouvait être formée à partir de  $\text{CH}_3\text{NC}$  (LCT, ISCR, LERMA, IPAG).

## Processus photophysiques et photochimiques : des processus complexes et en compétition



Les molécules du milieu interstellaire sont soumises à des excitations électroniques par absorption de photons stellaires. Suite à cette excitation électronique, différents processus de relaxation entrent en compétition (relaxation radiative, dissociation, etc). Différentes pistes de recherche sont explorées pour mieux caractériser les excitations électroniques et leurs effets.

Bien que le rayonnement VUV soit abondant dans l'espace et joue un rôle clé dans la chimie interstellaire, les données de laboratoire dans cette gamme spectrale sont rares en raison de la difficulté d'accéder à une source de lumière VUV accordable. Le développement de systèmes laser VUV largement accordables à haute et moyenne résolutions spectrales offre des opportunités considérables (ISMO, LERMA, MONARIS). Ces avancées permettront une meilleure compréhension des excitations électroniques et de l'ionisation des molécules d'intérêt astrophysique. De plus, une nouvelle technique combinant spectrométrie de masse et mobilité ionique de pointe, associée à la spectroscopie laser, offre des perspectives prometteuses pour l'étude des ions carbonés, des porteurs potentiels des bandes diffuses interstellaires (DIBs).

Concernant les effets de relaxation de l'énergie, la dissociation des molécules est très importante dans les zones du milieu interstellaire les plus exposées aux photons énergétiques. Ainsi l'observation du radical OH par JWST (ERS PDRs4All) et son identification comme un produit de photodissociation de H<sub>2</sub>O a été le fruit de discussions entre astrophysiciens, physiciens, et chimistes. L'étude de la fragmentation des ions multichargés, notamment par de nouveaux outils théoriques, est également un sujet d'intérêt (COSYS/IMSE, LCPMR). Un autre effet de relaxation de l'énergie, peu caractérisé, est la conversion de l'énergie électronique en énergie vibrationnelle, pouvant mener à l'émission de lumière infrarouge. Les récentes observations réalisées par JWST, dans le domaine spectral infrarouge, qui offrent une résolution spatiale et une sensibilité inégalées, justifient clairement la nécessité de disposer de données de laboratoire supplémentaires. En effet, la compréhension du devenir des PAHs après la photo-absorption des photons VUV est une étape presque obligatoire pour élucider le mécanisme en jeu qui conduit aux bandes d'émission infrarouges (AIBs). Une piste prometteuse pour ces études est le couplage d'un mini anneau de stockage, permettant d'accéder aux dynamiques aux temps longs, avec le synchrotron Soleil (IRAP, ILM). Enfin, l'étude théorique des processus de réactivité, d'isomérisation et de fragmentation, et leur lien avec la dynamique électronique est un véritable défi. Cela demande de développer des outils afin de mieux simuler les couplages électrons-noyaux sur une grande échelle de temps (de la dynamique sub-fs à quelques ps) et de comprendre leur impact sur les rapports de branchement entre les différents processus de relaxation (ISMO, LCPQ).

### 8.3.3 Poussières glacées

#### *Contexte*

Dans les zones les plus froides et les plus denses du MIS, les atomes, radicaux et molécules se condensent à la surface des poussières, formant par réaction et accrétion des manteaux de glaces. Celles-ci constituent des éléments prépondérants dans la physique et la chimie du milieu interstellaire. Comme la chimie en phase gazeuse ne permet pas de comprendre toute la diversité moléculaire dans le MIS, l'intervention du solide et de la

catalyse hétérogène est nécessaire. De nombreuses équipes cherchent à mieux comprendre ces glaces (PIIM, ISMO, LAB, LERMA, IAS, IRAP, IJCLab, PhLAM, LCPQ, ISM, LCT, MONARIS, CIMAP, IPAG, ICN, Utinam), que ce soit pour caractériser leur composition ou leur structure, les réactions chimiques qui ont lieu en leur sein faisant d'elles des réservoirs de COMs, ou encore les nombreux échanges avec le gaz. L'interprétation des données observationnelles des molécules dans l'univers froid produites actuellement ou prochainement par la dernière génération de télescopes infrarouges et millimétriques (ALMA, NOEMA, JWST, SPHEREx) incite de nombreux travaux d'astrophysique de laboratoire (théorique ou expérimentale), localement ou en lien avec les infrastructures de recherche (accélérateur de particules GANIL ou GSI, synchrotron Soleil, Infranalytics), et de calcul.

### *Bilan*

#### **Caractérisation des glaces : spectroscopie, composition et structure**

Le lancement du JWST marque une nouvelle ère dans l'observation des glaces et des grains dans le milieu interstellaire. L'absorption tellurique dans les gammes spectrales NIR et MIR limite l'observation des bandes fondamentales vibrationnelles de la matière solide depuis le sol à quelques fenêtres spectrales. Avec des instruments embarqués sur un observatoire spatial avec la sensibilité et la résolution angulaire du JWST, les observations de la glace sont possibles, depuis les nuages moléculaires vers les disques protoplanétaires, en passant par des cœurs denses et des protoétoiles. Dans la première année du fonctionnement de JWST, la communauté PCMI a été bien représentée dans l'observation des glaces, tant par des participations dans des programmes GTO (temps garanti) que dans des ERS (temps de direction) et des GO (observation générale). Les premiers résultats publiés incluent des observations des lignes de visée les plus éteintes jamais observées dans un nuage dense (ERS IceAge, participation PIIM, ISMO, LAB, LERMA), qui ont démontré la présence des molécules condensées telles qu'OCS ou encore l'ion OCN<sup>-</sup> dans un tel environnement pour la première fois.

L'interprétation des spectres observés nécessite des études de laboratoire spécifiques, non seulement pour fournir des constantes optiques permettant une comparaison directe avec les observations via la modélisation de la forme et de la taille des grains, mais aussi pour comprendre la structure, la composition et la morphologie des manteaux glacés. Ces informations sont obtenues par une caractérisation de l'effet de l'environnement chimique et physique local sur les positions et les profils de bandes d'absorption infrarouge. Au sein de la communauté PCMI, ces études sont réalisées par des collaborations entre équipes expérimentales et théoriques (LERMA, PIIM, ISMO, PhLAM, LCPQ, ISM, MONARIS). Un exemple récent de la compréhension au niveau moléculaire fournie par le couplage d'expériences et de calculs est illustré par la Fig. 8.3.3.1 (ISM, PhLAM, LCPQ, PIIM). Il a été démontré que la présence de grosses molécules, telles que les PAHs, dans une glace d'eau amorphe perturbe le réseau de liaisons hydrogène des molécules d'eau à tel point que les modes d'absorption vibrationnelle du solide en volume et des molécules non entièrement liées dans la glace sont affectés par la présence de PAHs. La composition de la glace peut ainsi fortement influencer sa structure.

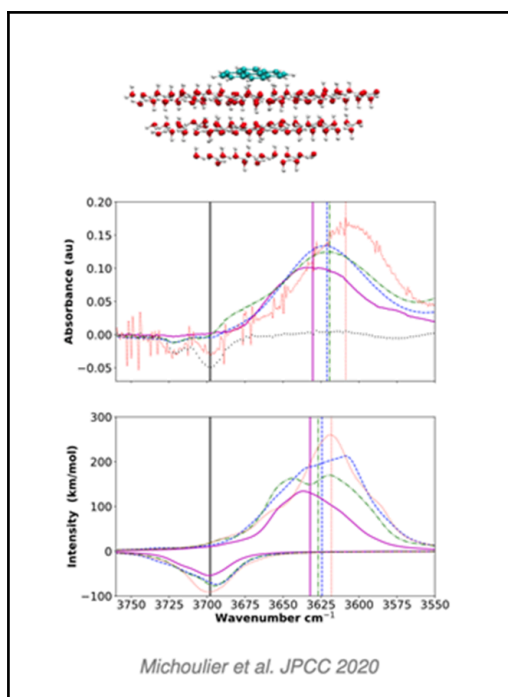


Fig. 8.3.3.1 : Spectres IR dans la région des modes d'élongation OH. Le panneau supérieur présente les spectres expérimentaux de glace amorphe, soit pure, soit mélangée avec des molécules aromatiques, tandis que les spectres théoriques de glace amorphe basse densité sont présentés dans le panneau inférieur. Dans chaque cas, les spectres de glace amorphe pure (ligne noire en pointillés) sont représentés en valeurs négatives pour faciliter la comparaison avec les spectres de glace amorphe basse densité et avec les spectres des glaces mixtes. Figure adaptée de Michoulier et al. (2020).

Afin de caractériser précisément les glaces, des travaux théoriques sont nécessaires (LCT, PhLAM). Il est ainsi utile d'évaluer les forces d'interaction entre l'adsorbat et la surface, pouvant influencer non seulement la réactivité sur le solide et la formation des molécules organiques complexes (MOC), mais aussi la phase gazeuse en modifiant la composition du gaz environnant le solide. La surface peut être représentée soit par un modèle moléculaire (modèle d'agrégat) utile pour dégager des tendances, soit par un modèle tenant compte de la périodicité de la surface pour obtenir des valeurs d'un modèle du solide.

La force de la communauté PCMI est de fournir aux observateurs de telles interprétations physico-chimiques des spectres expérimentaux et théoriques, notamment en IR, particulièrement pertinent avec l'implication de PCMI dans divers programmes JWST qui ont observé et observeront des grains recouverts de glace dans divers environnements, des nuages denses aux disques protoplanétaires.

### **Evolution des glaces vers la formation de molécules organiques complexes (COMs):**

Les glaces abritent une chimie complexe, et elles sont notamment le siège de la formation de COMs. Au sein de la communauté PCMI, divers travaux expérimentaux, théoriques et de modélisation ont pour but d'identifier les molécules organiques complexes formées au sein des glaces, ainsi que

de révéler les chemins de formation de ces molécules. Ces approches permettent d'accompagner des programmes d'observations avec JWST, IRAM-30m, IRAM NOEMA, ALMA ou encore JVLA pour l'interprétation des données astrophysiques.

La mise en évidence des étapes de formation des molécules complexes, en identifiant les intermédiaires radicalaires mis en jeu, a récemment été possible grâce à une nouvelle approche expérimentale (PIIM, fait marquant 6). Cette chimie radicalaire associée au réchauffement du système mène à la formation d'une très grande diversité moléculaire. Il a en effet été montré qu'à partir d'une glace uniquement formée d'eau, de méthanol et d'ammoniac irradiée à 77K sous vide dans l'UV ( $\text{Ly}\alpha$ ) puis réchauffée à température ambiante, des dizaines de milliers de molécules sont formées et ont été observées par spectrométrie de masse très haute résolution. Par ailleurs, une modification des ratios des molécules composant initialement la glace mène à une variation de la composition moléculaire des résidus organiques formés (PIIM).

Pour mieux comprendre les mécanismes réactionnels pouvant avoir lieu dans ces environnements froids du milieu interstellaire, l'apport de la chimie théorique est primordial (cf faits marquants 7). Par exemple, la compétition entre les réactions radicaux-radicaux et les réactions d'abstraction d'hydrogène, produisant des COMs, est à prendre en compte (LCT, IPAG). De plus, il a été montré que HNC piégé dans une glace d'eau pouvait mener à la formation d'une MOC, la formamide  $\text{COHNH}_2$ , sous bombardement d'ions composant les rayons cosmiques. Par ailleurs, des réactions d'isomérisation peuvent avoir lieu au sein des glaces ( $\text{HCN/HNC}$ , LCT). Les réactions d'hydrogénation constituent des étapes clés de l'évolution des glaces. En effet, des études expérimentales et théoriques sur l'hydrogénation de cétène  $\text{CH}_2\text{CO}$  en matrice d'eau ont montré la possibilité de former du CO et du  $\text{H}_2\text{CO}$  (MONARIS, ISCR, LCT). Il a notamment été montré que l'hydrogénation de CO jusqu'au méthanol passe par un complexe hydrogène atomique/ $(\text{H}_2\text{O})_n$  qui permet la suppression de la barrière d'activation (LCT, ISCR).

D'autres expériences ont montré la formation d'une diversité moléculaire importante lorsque des glaces sont bombardées par des ions de basse énergie (100 keV). Une étude effectuée par bombardement de soufre sur une de ces glaces ou sur le résidu organique formé montre une incorporation du soufre au sein de la matrice organique, des composés organo-soufrés ayant été détectés au sein des molécules organiques résultantes (PIIM, CIMAP).

### ***Interaction glaces/gaz***

Les transitions gaz-glace et glace-gaz sont des éléments essentiels pour comprendre les observations astrophysiques des environnements froids. En effet, des abondances d'espèces chimiques sont observées en phase gazeuse ne pouvant s'expliquer uniquement par réactivité en phase gazeuse. Les interactions glaces/gaz sont déclenchées par un apport d'énergie, qu'il soit thermique ou non thermique (bombardement par rayons cosmiques ou irradiations photoniques).

Lors de bombardements par des ions de haute énergie, analogues des rayons cosmiques, une pulvérisation de la glace interstellaire peut avoir lieu (ISMO, IJCLab, CIMAP, MNHN, IPAG), comme illustré sur la Fig. 8.3.3.2. Des mesures des rendements de pulvérisation sur des glaces simples ou complexes ont été effectuées. Cette désorption des molécules organiques complexes (COMs) par les rayons cosmiques a ensuite été implémentée, en collaboration avec les modélisateurs, dans les modèles astrochimiques, et s'avère très efficace pour recharger en COMs la phase gazeuse dans les milieux denses (LAB, ISMO, IJCLab, ISM, PIIM).

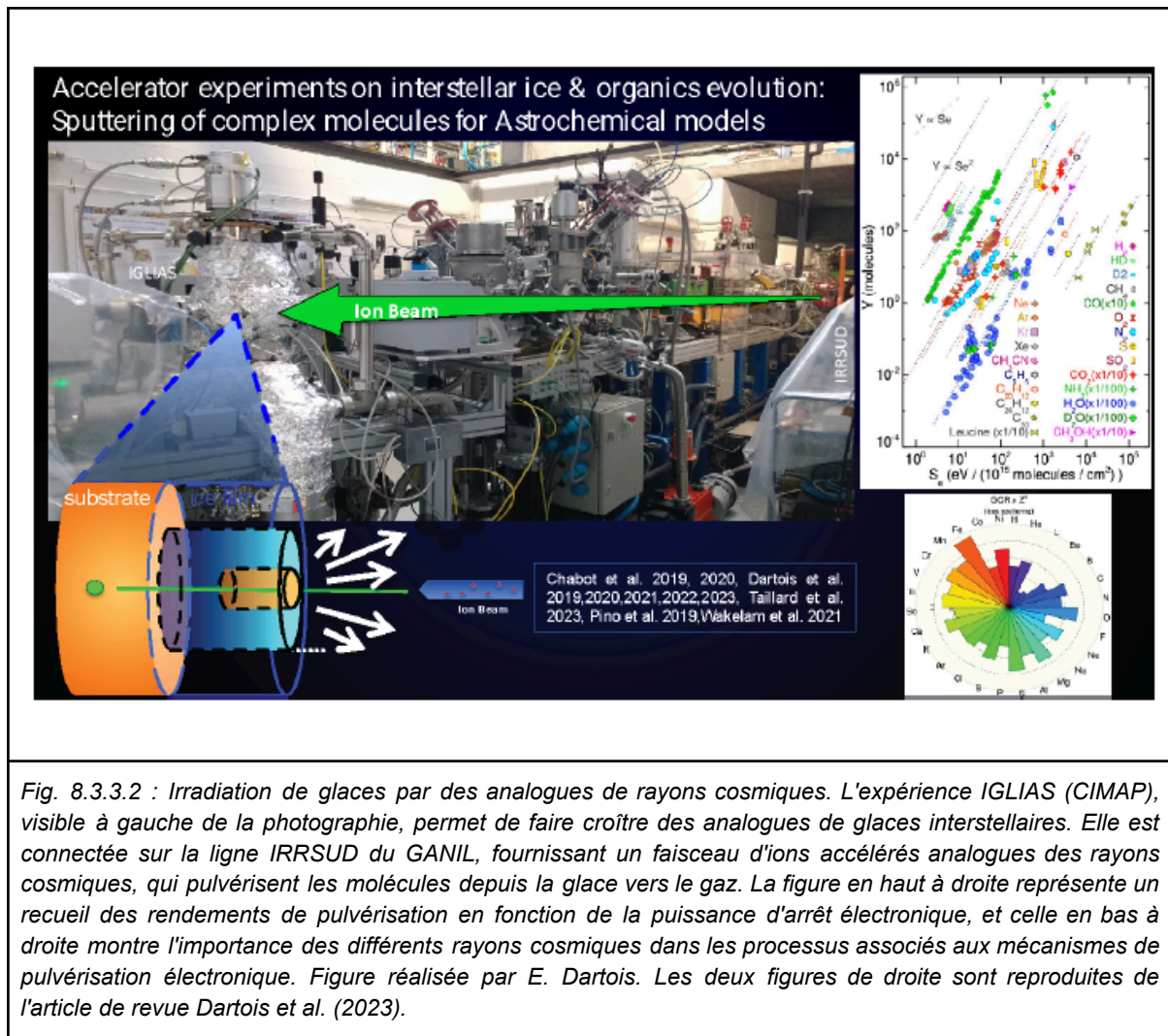


Fig. 8.3.3.2 : Irradiation de glaces par des analogues de rayons cosmiques. L'expérience IGLIAS (CIMAP), visible à gauche de la photographie, permet de faire croître des analogues de glaces interstellaires. Elle est connectée sur la ligne IRRSUD du GANIL, fournissant un faisceau d'ions accélérés analogues des rayons cosmiques, qui pulvérisent les molécules depuis la glace vers le gaz. La figure en haut à droite représente un recueil des rendements de pulvérisation en fonction de la puissance d'arrêt électronique, et celle en bas à droite montre l'importance des différents rayons cosmiques dans les processus associés aux mécanismes de pulvérisation électronique. Figure réalisée par E. Dartois. Les deux figures de droite sont reproduites de l'article de revue Dartois et al. (2023).

Une autre voie possible d'enrichissement de la phase gazeuse à partir des glaces, est la photodésorption dans le domaine du VUV (<200 nm) et des rayons X "mous". Les rendements de photodésorption VUV à partir de glaces pures ou mixtes ont montré que les taux de photodésorption varient avec la molécule étudiée. Ainsi, les résultats obtenus sur CH<sub>3</sub>CN se comparent parfaitement avec les observations faites, par exemple dans les disques protoplanétaires, dans lesquels la détection du CH<sub>3</sub>CN est courante dans un grand nombre de sources, contrairement aux autres espèces organiques (LERMA, ICP). Les premières études menées sur des irradiations de glaces contenant des molécules organiques (CH<sub>3</sub>OH, CH<sub>3</sub>CN, HCOOH) avec des photons X ont permis de montrer que cette photodésorption X, notamment dans les disques, doit dépendre de la composition des glaces et ainsi de leur localisation par rapport à la ligne de gel de CO (LERMA, ICP, ISMO).

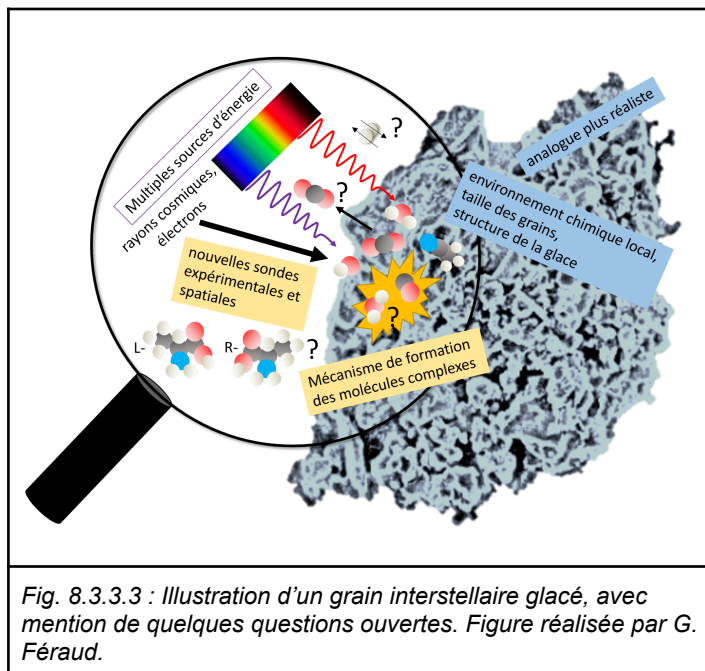
La phase de réchauffement de la glace interstellaire qui permet la formation *in fine* de composés organiques réfractaires, provoque aussi le dégazage d'une partie importante des molécules formées en phase solide. Au laboratoire, une analyse des molécules présentes dans cette phase gazeuse par chromatographie gazeuse couplée à de la spectrométrie de masse a ainsi montré la présence d'une très grande diversité moléculaire. De même que pour la phase solide, la variation des proportions dans les glaces initiales impacte les abondances relatives des molécules détectées en phase gazeuse. De plus, l'étude de

l'impact de la dose de photons UV lors de l'irradiation d'une glace pure de méthanol a montré que la diversité moléculaire augmente avec la dose. Cependant, suivant la famille chimique considérée, la cinétique de formation est différente. Il a été montré que les esters et cétones se forment très rapidement du fait d'une formation rapide du monoxyde de carbone, les alcools se formant plus tardivement via des mécanismes différents (PIIM).

Toujours en ce qui concerne l'apport thermique d'énergie dans les glaces, la paramétrisation des propriétés physiques des atomes et molécules adsorbés à la surface des glaces est un aspect clé de l'interprétation des observations astrophysiques et de la construction de modèles astrochimiques réalistes et prédictifs. Un travail de plusieurs équipes françaises de la communauté PCMI (PIIM, LERMA, IRAP, PhLAM, LAB, IPAG) et d'équipes internationales, a permis de rassembler les paramètres de désorption couramment utilisés dans la communauté astrochimique et de fournir des tableaux avec des valeurs recommandées.

Enfin, la caractérisation des processus de conversion de spin nucléaire de l'eau en phase condensée est une étape préliminaire avant d'étudier les effets des échanges entre le solide et le gaz sur la conversion de spin nucléaire. Les processus de conversion de spin nucléaire de l'eau en milieu confiné (matrices de gaz rare, fullerène) ont ainsi été récemment étudiés, d'un point de vue expérimental et théorique (LERMA, MONARIS). Un effet isotopique important sur la conversion de spin nucléaire à basse température a notamment été mis en évidence.

### Prospective



Les travaux d'astrophysique de laboratoire sur les glaces et les données observationnelles des molécules dans l'univers froid obtenues par la dernière génération de télescopes infrarouges et millimétriques ont ouvert de nombreuses questions (Fig. 8.3.3.3).

Dans quelle mesure et par quels mécanismes les grains recouverts de glace peuvent-ils croître aux premiers stades de la phase dense (nuage, cœur), conduisant éventuellement à la formation d'étoiles et de planètes? Les multiples instruments allant du NIR

au MIR sur le JWST permettent de caractériser la diffusion et l'absorption des grains par la photométrie et par l'analyse des profils spectraux, des nuages aux disques (ISMO, PIIM, IAS, IRAP, Laboratoire de physique des deux infinis, LAB). L'accès à plusieurs bandes spectrales permet d'obtenir des contraintes plus fortes sur le degré de croissance des grains

à partir de la distribution diffuse du MIS. Cette étude nécessite une grande base de données de constantes optiques obtenues en laboratoire et des modèles complexes de structure, de taille et de forme des grains pour un objet astrophysique observé donné. Bien que la modélisation du transfert radiatif nécessaire pour déconvoluer les différentes contributions aux profils spectraux soit complexe, certaines indications sur les rôles variés des environnements chimiques locaux, le degré de mélange ou de stratification, la structure à grande échelle, la taille et la forme des grains peuvent être extraites des observations. L'augmentation de plusieurs ordres de grandeur du nombre de bandes observées fournira une énorme base de données de spectres à analyser et il sera nécessaire de réfléchir au rôle de l'analyse automatisée par rapport à l'extraction et à l'analyse traditionnelles spécifiques à chaque ligne de visée.

L'une des questions concernant les glaces interstellaires qui demeure toujours ouverte est la suivante: dans quelle mesure la chimie de surface et les processus d'interaction gaz-solide (désorption chimique, désorption par rayons cosmiques et électrons, photodésorption) sont-ils responsables de la diversité et de la complexité moléculaire nouvellement révélée ? Pour répondre à cette question, différents axes sont pressentis.

(i) Tout d'abord, il est nécessaire d'identifier précisément quelles molécules sont formées au sein des glaces, ainsi que la manière dont elles sont formées. Les chimistes théoriciens de PCMI s'attèlent à comprendre les étapes de formation des molécules complexes (par exemple des amines, glycolaldehyde) au sein des glaces (IPAG, LCT). Conjointement, de nouvelles méthodes expérimentales sont développées, pour permettre une analyse dans le domaine du millimétrique des éléments sublimés, ce qui permettra à terme une comparaison directe des données de laboratoire avec les données observationnelles des environnements astrophysiques correspondants (PhLAM). Par ailleurs, on pourra déterminer dans quelles limites la phase gazeuse pourrait être utilisée comme sonde de la chimie se déroulant en phase solide (PIIM).

(ii) Un autre axe concerne la détermination du rôle de l'apport d'énergie dans l'évolution des glaces. Un nouveau banc expérimental accessible à toute la communauté est développé au CIMAP, ce qui permettra en une seule expérience l'irradiation et le bombardement de glaces par des photons VUV, électrons et ions de différentes énergies. Le rôle spécifique des électrons, qu'ils impactent les glaces ou qu'ils soient formés en leur sein, reste largement inexploré (ISMO). De plus, le rôle des photons IR, peu compris jusqu'à présent, mais potentiellement essentiel pour modéliser les mécanismes de relaxation vibrationnelle actifs dans les grains recouverts de glace dans des milieux irradiés par photons, électrons ou cosmiques, devrait être abordé. L'étude de la photodésorption et de la restructuration de la glace compléteront ainsi la modélisation des effets plus énergétiques (MONARIS, PIIM). En parallèle, de nouveaux outils de chimie théorique permettront de simuler les possibles apports d'énergie (photons, rayons cosmiques, etc) au PhLAM et au LCT.

(iii) Un dernier axe consiste à prédire la chimie dans les glaces et les échanges entre glaces et gaz. Cela demande d'étudier des analogues de glaces interstellaires clés pour pouvoir dégager des tendances par familles de glaces. L'étape ultime est d'arriver à produire de manière théorique ou expérimentale des analogues les plus proches possibles de ceux présents dans le MIS. Expérimentalement, il s'agit d'affiner la composition de la glace et la nature du substrat sur lequel les glaces sont formées (analogues de poussières silicatées ou

carbonées) (MONARIS, ISMO, PIIM). D'un point de vue théorique, l'une des voies de recherches très importantes pour les années à venir est de développer plusieurs modèles de surface de glace, en particulier de glace amorphe (LCT).

Une autre question très ouverte sur les échanges gaz/glace concerne la mémoire du spin nucléaire entre la phase solide (glace) et le gaz. Pour tenter de répondre à cette question, différentes stratégies sont envisagées, comme par exemple cartographier les rapports entre différents isomères de spin nucléaire, et développer de nouvelles méthodes de contrôle de spin nucléaire (IPAG, MONARIS, LERMA).

Par ailleurs, la formation d'excès énantiométriques au sein d'environnements astrophysiques est un axe sur lequel la communauté PCMI travaillera dans les prochaines années (INC, Utinam, MONARIS). Il a déjà été montré que l'altération de glaces par des rayonnements UV polarisés circulairement mène à la formation d'excès énantiomériques sur les acides aminés (INC). Ces expériences devront être poursuivies pour déterminer si une asymétrie peut être aussi observée sur d'autres molécules telles que les carbohydrates. Une nouvelle approche consistera à simuler en laboratoire le piégeage/relargage d'espèces moléculaires par les glaces interstellaires. Ces approches nécessitent le développement de nouvelles stratégies expérimentales, pour étudier par exemple le rôle de la polarisation de la lumière dans la photodésorption de molécules chirales (MONARIS).

Toutes ces questions ne pourront être abordées que si des données moléculaires fiables et prédictives, issues des expériences ou de la théorie, sont insérées dans les modélisations astrochimiques.

### 8.3.4 L'héritage du MIS

#### *Contexte*

Les nuages moléculaires denses sont les lieux de formation des systèmes planétaires comme notre système solaire. Des informations sur la composition des phases solides et gazeuses de ces objets sont obtenues par observation notamment avec Spitzer/JWST pour la phase solide et ALMA/IRAM pour la phase gazeuse. Ces environnements sont riches en molécules organiques que ce soit au niveau des grains glacés ou des phases gazeuses. L'effondrement du nuage sur lui-même est le point de départ d'une évolution où la réactivité est extrêmement riche. Se pose alors la question de l'héritage de la matière organique du nuage moléculaire dense originel dans les contenus organique et minéral observés actuellement dans le système solaire, notamment au niveau des objets interplanétaires que sont les comètes et les astéroïdes, des objets ayant peu évolué depuis la stabilisation du système solaire (Fig. 8.3.4.1).

#### *Bilan*

Cette thématique de recherche, très en lien avec le PNP, est étudiée dans plusieurs laboratoires PCMI, comme par exemple le PIIM, le CRPG, le LAB ou l'IRAP. L'expertise de la communauté PCMI est fondamentale pour comprendre l'origine des objets et des systèmes planétaires. Pour déterminer cette possible filiation entre le milieu interstellaire et les systèmes planétaires évolués, les observations des différents environnements



astrophysiques menant à la formation d'un système planétaire permettent d'obtenir des informations sur l'évolution du contenu moléculaire de chaque objet.

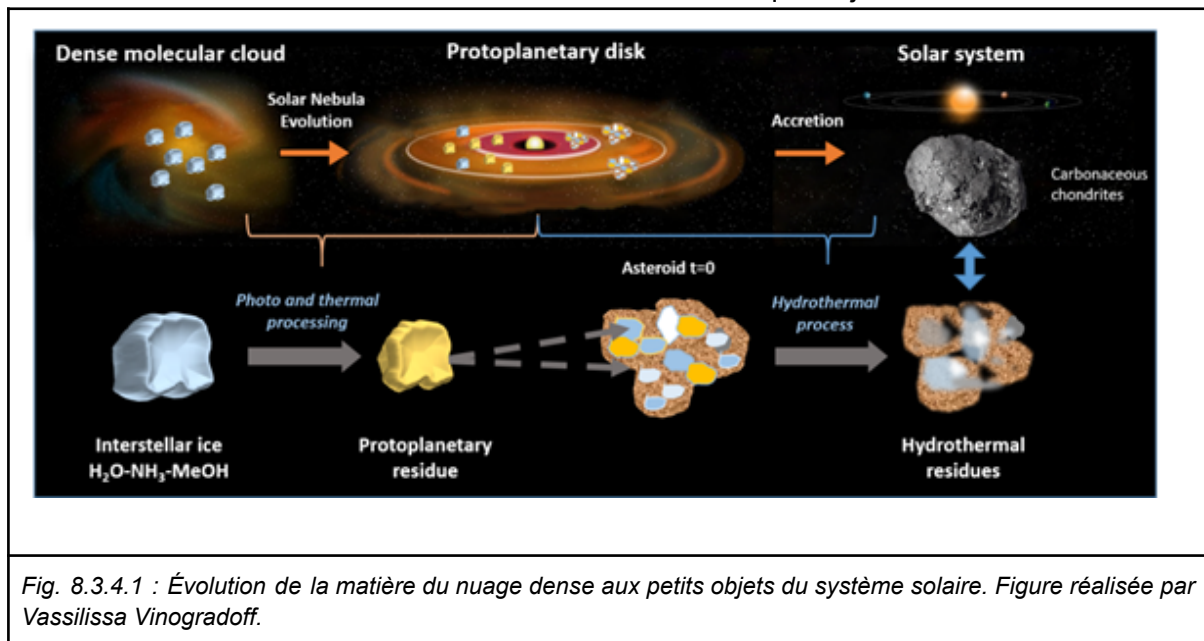


Fig. 8.3.4.1 : Évolution de la matière du nuage dense aux petits objets du système solaire. Figure réalisée par Vassilissa Vinogradoff.

Une autre approche est le développement d'expériences d'astrophysique de laboratoire qui permettent de simuler l'évolution des grains glacés lors de la formation d'un système planétaire (PIIM). Il a ainsi été montré que les glaces initialement observées par spectroscopie infrarouge peuvent générer une très grande diversité moléculaire, plusieurs milliers de molécules, lorsqu'elles sont soumises à des processus d'irradiation par UV à Ly $\alpha$ , et/ou bombardement d'électrons et/ou d'ions. Cependant, même si cette diversité présente des similitudes avec la matière organique observée au sein de certaines météorites dites chondrites carbonées, de nombreuses différences subsistent. Ces matériaux organo-minéraux formés à partir des glaces ne sont en fait que des analogues de la matière organique ayant pu être présente au niveau du disque protoplanétaire. Par l'analyse minérale des météorites carbonées, il est reconnu que leurs corps parents ont subi des altérations secondaires après leur formation, notamment par altération aqueuse ou par métamorphisme. L'évolution des analogues organiques du disque protoplanétaire simulée expérimentalement dans les conditions d'altération aqueuse au sein d'un astéroïde montre une évolution intéressante du contenu organique vers plus de similarité avec l'objet naturel. Ces expériences permettent ainsi de renforcer le lien pouvant exister entre le contenu organique de certaines météorites et les glaces initiales du nuage moléculaire originel. Les analyses des contenus organiques et minéraux de ces météorites, ainsi que l'analyse du récent retour des échantillons de l'astéroïde Ryugu par la mission Hayabusa 2, permettent de renforcer l'hypothèse selon laquelle une fraction des contenus organiques et minéraux de ces objets peuvent provenir de l'altération des glaces du nuage moléculaire originel.

Par ailleurs, d'autres expériences effectuées avec le dispositif Nébulotron (CRPG) simulant les processus d'évolution de la matière en phase gazeuse au sein de la nébuleuse solaire montrent la possibilité de former des matériaux organiques insolubles qui pourraient être, là aussi, des précurseurs des matériaux observés au sein des objets naturels que sont les météorites et leurs corps parents. Ainsi, les récentes détections de fullerènes au sein de

météorites pourraient avoir comme origine une synthèse dans la phase gazeuse de la nébuleuse solaire (IRAP).

D'un point de vue des modélisations astrochimiques, l'étude théorique de la chimie lors de la formation des disques protoplanétaires très jeunes a permis de montrer que la composition des enveloppes protostellaires était dépendante de la composition du nuage parent, elle-même dépendante de l'histoire thermique et de la densité de la matière formant le nuage (LAB).

### *Perspectives*

Les nouveaux moyens d'observations vont permettre, notamment avec les capacités du JWST et d'ALMA, d'obtenir des informations plus précises sur l'évolution moléculaire entre les différents environnements qui ont précédé la formation d'un système planétaire. Ces observations permettront à terme de comprendre la fraction de la matière organique portant l'héritage du cœur préstellaire.

Ces observations astronomiques devront s'appuyer sur l'analyse des objets interplanétaires, notamment dans le cadre de l'analyse des missions spatiales de retour d'échantillons d'astéroïdes (HAYABUSA 2, OSIRIS-REX, MMX) ou de comètes. Les analyses des matrices minérales et organiques, ainsi que des gaz rares et des fractionnements isotopiques permettront d'estimer le degré d'héritage présent au sein de ces objets entre cœurs pré-stellaires et systèmes planétaires.

Cette information sur ce degré d'héritage et de réinitialisation des matières organique et minérale au niveau du système solaire sera un élément important pour comprendre quels types de matériaux pourraient se retrouver au sein de systèmes exoplanétaires.

Ces observations et analyses d'échantillons extraterrestres devront s'appuyer sur les développements d'expériences d'astrophysique de laboratoire pour aider à comprendre la physico-chimie des milieux observés. Il sera notamment important d'étudier l'impact de la phase minérale sur l'évolution des matériaux organiques pour notamment estimer à quel degré cette interaction entre les deux phases influence l'évolution. Par ailleurs, l'observation des environnements gazeux étant généralement plus efficace que celle des environnements solides, des expériences permettant de déterminer le degré d'information obtenu sur la phase solide à partir de l'analyse de la phase gazeuse devront être mises en place. Il sera enfin intéressant de développer des expériences pour estimer l'importance respective des phases gazeuse et solide dans l'inventaire des matériaux organiques des systèmes planétaires.

L'ensemble de ces données expérimentales pourra être utilisé pour compléter les modèles d'évolution astrochimiques qui permettront de mieux comprendre les observations.

# ANNEXE 1 : Tables annexes

**Table A.1 : Liste des membres du CS de PCMI en 2022**

Biennier Ludovic (Directeur adjoint)	IPR, Rennes
Bron Emeric	LERMA, Paris
Chapillon Edwige	IRAM, Grenoble
Danger Grégoire	PIIM, Marseille
Feraud Géraldine	LERMA/MONARIS, Paris
Gans Bérenger	ISMO, Orsay
Gratier Pierre	LAB, Bordeaux
Hughes Annie	IRAP, Toulouse
Lesaffre Pierre	ENS, Paris
Levrier François (Directeur)	ENS Paris
Lique François	IPR, Rennes
López-Sepulcre Ana	IPAG, Grenoble
Markovits Alexis	LCT, Paris
Montillaud Julien	UTINAM, Besançon
Motiyenko Roman	PhLAM, Lille
Peretto Nicolas	Cardiff University, UK
Simon Aude	LCPQ, Toulouse
Theulé Patrice	LAMPIIM, Marseille
Wakelam Valentine (Présidente du CS)	LAB, Bordeaux
Ysard Nathalie	IRAP, Toulouse

**Table A.2 : Liste des acronymes de laboratoires utilisés dans ce document**

Liste UMR	Acronymes	Nom complet	Tutelle principale
UMR7158	AIM	Astrophysique, Instrumentation, Modélisation	CEA
UMR5299	LUPM	Laboratoire Univers et Particules de Montpellier	IN2P3
UMR5255	ISM	Institut des sciences moléculaires	INC
UMR6226	ISCR	Institut des sciences Chimiques de Rennes	INC
UMR8233	MONARIS	Molécule aux Nano-Objets : Réactivité, Interactions et Spectroscopies	INC
UMR7616	LCT	Laboratoire de Chimie Théorique	INC
UMR7614	LCPMR	Laboratoire de Chimie Physique-Matière et Rayonnement	INC

UMR7331	GSMA	Groupe de Spectrométrie Moléculaire et Atmosphérique	INP
UMR6251	IPR	Institut de physique de Rennes	INP
UMR8214	ISMO	Institut des Sciences Moléculaires d'Orsay	INP
UMR8523	PhLAM	Laboratoire de Physique des Lasers, Atomes et Molécules	INP
UMR5306	ILM	Institut Lumière Matière	INP
UMR5589	LCAR	Laboratoire collisions Agrégats Réactivité	INP
UMR9025	LAC	Laboratoire Aimé Cotton	INP
UMR7345	PIIM	Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires	INSIS
UMR6294	LOMC	Laboratoire Ondes et Milieux Complexes.	INSIS
UMR5274	IPAG	Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble	INSU
UMR5277	IRAP	Institut de Recherche en Astrophysique et planétologie	INSU
UMR8112	LERMA	Laboratoire d'Etudes du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique et Atmosphères	INSU
UMR5804	LAB	Laboratoire d'astrophysique de Bordeaux	INSU
UMR5574	CRAL	Centre de Recherche Astrophysique de Lyon	INSU
UMR7326	LAM	Laboratoire d'Astrophysique de Marseille	INSU
UMR7095	IAP	Institut d'astrophysique de Paris	INSU
UMR8111	GEPIS	Galaxies, Etoiles, Physique, Instrumentation	INSU
UMR7583	LISA	Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques	INSU
UMR8617	IAS	Institut d'astrophysique spatiale	INSU
UMR7550	ObAS	Observatoire astronomique de Strasbourg	INSU
UMR8023	LPENS	Laboratoire de Physique de l'Ecole normale supérieure	INSU
UMR7293	LAGRANGE	Laboratoire J-L Lagrange	INSU
UMR8109	LESIA	Laboratoire d'Etudes spatiales et d'Instrumentation en astrophysique	INSU

**Table A.3 : Liste des prix et médailles obtenus par les membres de la communauté<sup>35</sup>**

Stéphane Guilloteau	Prix Delandres 2020
Anaëlle Maury (CEA)	Prix jeune chercheuse de la SF2A 2020
Olivier Harper (ISMO)	Prix de thèse 2020 du pôle Physique des Ondes et de la matière de la Graduate School de Physique de l'université Paris-Saclay
Joan Enrique-Romero (IPAG)	ACS Astrochemistry subdivision's Astrochemistry Dissertation Award, 2022
Marta De Simone (IPAG)	Prix de thèse de la SF2A 2023

<sup>35</sup> Liste possiblement pas exhaustive

Christine Joblin (IRAP)	Prix Huy Duong Bui de l'académie des Sciences 2020 et grand prix de l'association "Les amis de la Cité de l'espace" 2021
Eszter Dudas (IPR)	Prix L'Oréal-Unesco pour les femmes et la science 2021
Rémi Dupuy (LERMA)	Prix de thèse Division de Chimie Physique de la SFP 2019
Marie-Aline Martin (ISMO)	Médaille de bronze du CNRS 2021 et Prix de la fédération de Physique-Chimie Paris Saclay 2020
Emeric Bron	Médaille de bronze du CNRS 2022
Audrey Coutens (IRAP)	Prix jeune chercheure de la SF2A 2022
Evelyne Roueff (LERMA)	Prix "Laboratory astrophysics" de l'American Astronomical Society 2022
Joan Enrique-Romero (IPAG)	ACS Astrochemistry subdivision's Astrochemistry dissertation Award 2022
Marta De Simone (IPAG)	Prix de thèse SF2A 2023 et Prix de thèse académique 2023 Université de Grenoble
Ian Sims (IPR)	Prix de l'Institut Universitaire de France 2023
Cecilia Ceccarelli (IPAG)	Spiers Medal of the Royal Chemical Society 2023

**Table A.4 : Liste des animations menées, soutenues ou relayées par PCMI**

Intitulé	Type	Porteur	Lieu	Date
<a href="#">Colloque bisannuel 2020 PCMI</a>	Colloque/Conférence	F. Lique	virtuel	6-10 Juil. 2020
<a href="#">Colloque bisannuel 2022 PCMI</a>	Colloque/Conférence	F. Levrier	Paris	24-28 Oct. 2022
<a href="#">Colloque bisannuel 2024 PCMI</a>	Colloque/Conférence	V. Wakelam	Bordeaux	28-31 Oct. 2024
Chemical processes in Solar Type Star forming regions	Colloque/Conférence	C. Vastel	Toulouse	5-9 juin 2023
<a href="#">Colloque 26th Gas Kinetics and related phenomena, Rennes</a>	Colloque/Conférence	I. Sims	Rennes	28 Aout – 1 Sept.2022
<a href="#">Journées de Spectroscopie Moléculaire JSM 2020</a>	Colloque/Conférence	L. Rutkowski	Rennes,	28-30 Juin 2021
Programmes scientifiques de 3-4 semaines de l'Interstellar Institute organisé à l'Institut Pascal de l'Université Paris-Saclay (The self-organised star formation process - The Grand Cascade - Interstellar Institute #5 - With two eyes - Interstellar Institute #6)	Colloque/Conférence	M.-A. Miville-Deschênes	Orsay	2019, 2021, 2022, 2023
Ecole internationale du réseau EuroPAH 'Physical Chemistry of PAHs in Extreme Environments'	Ecole	O. Berné A. Simon	Toulouse	24-28 Juin 2019
Atelier "The ionisation fraction of the interstellar medium"	Atelier	D. Talbi E. Bron I. Schneider	Le Havre	18-19 Nov. 2021
Astrochimie des proto-étoiles massives	Atelier	S. Bontemps, T. Csengeri	Bordeaux	Jan. 2020, Dec 2022

Les glaces astrophysiques : observations, modèles, expériences de laboratoires	Atelier	G. Féraud A. Domaracka A. Markovits J. Mascetti C. Toubin	Paris	3-4 octobre 2019
Core2Disk II : From prestellar cores to solar nebulae II	Atelier	E. Dartois J. Duprat E. Habart P. Hennebelle A. Maury E. Pantin L. Testi N. Ysard	Orsay	17-28 Mai 2021
Core2disk III : The role of magnetic fields in disk formation, evolution, and planet formation	Atelier	P. Hennebelle S. Cabrit B. Tabone	Orsay	25-Sept. – 20 Oct. 2023
Dynamical Methods for Cold Molecules: from Laboratory to beyond Earth”, DyMCoM	Atelier	L. Wiesenfeld	Orsay	4-29.11.2019
Ateliers CNES en Exobiologie (Des missions spatiales aux expériences de laboratoire - Premiers résultats de JWST et dernières nouvelles de Ryugu - Quels liens unissent la chimie des objets interstellaires et la chimie prébiotique ?)	Atelier	G. Danger, J.-C. Guillemin	Paris	Mai 2019, Mai 2020, Nov. 2022, Mai 2023
Workshop with Astrochemistry Lab, NASA, Goddard, USA "Bridging the Gap between Astrochemistry and Cosmochemistry"	Atelier	G. Danger	Marseille	06/2019
Atoms, Molecules and Clusters in Motion conference (AMOC2024)	Conférence	M. Hochlaf	Marne la Vallée	15-18 Avr. 2024
Ateliers St Florent, Processus physico-chimiques d'intérêt astrophysique	Atelier	F. Lique A. Faure	Saint-Florent	2019 ,2021, 2023
Atelier Chemodyn	Atelier	R. Le Gal	virtuel	2020
<a href="#">TUMLA Philosophy of Astrochemistry, Rennes</a>	Atelier	M. Guéguen	Rennes	6-7 Juil. 2022
Atelier de Physico-Chimie <a href="#">ATMOsphérique et interSTELlaire relatif à la formation des aérosols</a>	Atelier	J.-L. Le Garrec	Rennes	26 Fév. 2019
Tour de France EMIE de l'astrophysique de laboratoire	Atelier	M. Goubet	France	13-31 Mai 2024
Laboratory astrophysics : tracking the evolution of cosmic matter towards molecular complexity	Ecole	J.-H. Fillion, L. Biennier, A. Simon, G. Danger	France	5-10 Février 2023
<a href="#">Atelier "Which observatories for PCMI"</a>	Atelier	J. Pety, K. Demyk, P. Theulé	Paris	18-21 Oct. 2021

**Table A.5 : Orateurs invités en session plénière SF2A pour PCMI**

Année	Orateur	Titre
-------	---------	-------

2019	Pierre Lesaffre (LPENS)	The interstellar medium in Silico
2021	Valentine Wakelam (LAB)	Tribulation d'une molécule dans un nuage moléculaire : synergie entre simulations, observations et astrophysique de laboratoire
2022	Grégoire Danger (PIIM)	From Astrochemistry to Planetary Chemistry An Astrobiological point of view
2023	Jennifer Noble (PIIM)	Ice evolution during the star formation process: An IceAge JWST study of Chameleon I
2024	Jérôme Pety (IRAM)	Astrophysics meet data science to characterize Giant Molecular Clouds

**Table A.6 Infrastructures de Recherche en France en astrophysique de laboratoire**

IR*	Thème/cible
SOLEIL	Interaction lumière-matière
ESRF	
Accélérateur d'ions lourds GANIL	Interaction Ion-matière
Accélérateur d'ions Andromède	
Infranalytics	FT-ICR, RPE, NMR

**Table A.7 Expériences développées par la communauté (Instruments PI)**

Expérience	Thème	Laboratoire	PI
AGAT	Fragmentation de petits hydrocarbures	IJCLab	M. Chabot
AHIIAA (VAHIIAA/ RAHIIA)	(Volatile/Residue) Analyses coming from the Heating of Interstellar/pre-cometary Ice Analogues	PIIM	G. Danger
AROMA	Astrochemistry Research of Organics with Molecular Analyzer	IRAP	H. Sabbah
CASIMIR	In situ ice irradiation and spectroscopy	CIMAP	H. Rothard
CERISES	Collisions Et Réactions d'Ions Sélectionnés par Electrons de Seuil	ICP, SOLEIL	R. Thissen

Faisceaux moléculaires croisés	Sections efficaces de collisions réactives et inélastiques entre espèces neutres à basse énergie	ISM	A. Bergeat
CRESUSOL	Cinétique de Réaction en Ecoulement Supersonique Uniforme CRESU– Soleil / Spectrométrie de Masse	IPR, SOLEIL	L. Biennier
CRESU-SIS	CRESU-Source d'Ions Sélectionnés en masse	IPR	S. Carles
CRESU-CHIRP	Chirped-Pulse Fourier Transform mm-Wave Detection of Transient Species in Uniform Supersonic Flows for Reaction Kinetics	IPR	I. Sims
CRESU-LIF A, CRESU-LIF B	CRESU avec détection par fluorescence induite par laser	IPR	A. Canosa, I. Sims
CRESU-PF	Détection de produits de réaction en écoulement supersonique uniforme par Peigne de Fréquence	IPR	L. Rutkowski
COLIMACON	COLlision Ion-Molécule/Agrégat COMplexe Neutre	CIMAP, GANIL	A. Domaracka
Cospinu 1&2	Conversion de spin nucléaire à basse température	LERMA/ MONARIS	X. Michaut
ESPOIRS	Etudes Spectroscopiques des Propriétés Optiques dans l'InfraRouge et le Submillimétrique d'analogues de grains interstellaires	IRAP	K. Demyk
FIREFLY	Mesure de l'émission IR de molécules et de nanoparticules en phase gazeuse après excitation UV	ISMO	T. Pino
FORMOLISM	FORmation of MOlecules in the ISM	LERMA	F. Dulieu
GOrbi	Gas Chromatography coupled to FT-Orbitrap-MS for extraterrestrial samples and analogs analyses	PIIM	G. Danger
IGLIAS	Irradiation de Glaces d'Intérêt Astrophysique	CIMAP, GANIL	Ph. Boduch
INSOLITE	Interstellar Solids Laboratory Experiments	ISMO	E. Dartois
iSELECTION	Isomer-selected spectroscopy of interstellar ions	ISMO	U. Jacovella
LITE	Lille Ice Terhaertz Experiment	PhLAM	R. Motiienko
MASSIR	Formation and transformation of cosmic molecules	MONARIS	L. Krim
Matrix-ISM	Réactivité et spectroscopie en matrices cryogéniques	ISM	J. Mascetti



MICMOC	Matière interstellaire et cométaire, molécules organiques complexes	PIIM	L. D'Hendecourt
Mini-RING	Anneau électrostatique pour l'étude des processus de refroidissement/chauffage d'espèces astrochimiques	ILM	S. Martin, J. Bernard
Cryo-Mini-RING	Anneau électrostatique cryogénique pour l'étude des processus de refroidissement/chauffage d'espèces astrochimiques	ILM, SOLEIL	J. Bernard
NanoCR	Expérience de croisement d'un faisceau de nanoparticules et d' un faisceau d'ions lourds	ISMO, ICJLab	E. Dartois
NanoGrains	Production d'analogues de grains carbonés par combustion	ISMO	T. Pino
Pirenea 1&2	Piège à ions pour la Recherche et l'Etude de Nouvelles Espèces Astrochimiques	IRAP, LCAR	C. Joblin
Plateforme VUV	Spectroscopie d'absorption VUV de molécules astrophysiques	LISA	?
PLATYPUS	Source Jet Plasma Radiofréquence	IPR	R. Georges
Primale	Plasma reactor for Interstellar Matter	ISMO	E. Dartois
Pulsed CRESU	CRESU avec tuyère pulsée	ISM	K. Hickson
Rarici	Radical Analysis and Reactivity in Interstellar Ices	PIIM	F. Duvernay
Ring	Reactivity in INTERstellar ice Grains	PIIM	F. Duvernay
SMAUG	Spectroscopy of Molecules Accelerated in Uniform Gas flows	IPR	R. Georges
Spectromètres haute résolution	Spectroscopie THz et IR d'ions et radicaux et sources de production	ISMO	O. Pirali, M.-A. Martin Drummel
Spectromètres haute résolution	Spectroscopie mm/sub-mm d'espèces astrochimiques	PhLAM	L. Margulès, R. Motienko
SPICES 2	Surface Processes & ICES	LERMA/MONARIS	J.-H. Fillion
SPICES-VMI	Surface Processes & ICES- Velocity Map Imaging	LERMA/MONARIS	J.-H. Fillion
Tuyère plasma planaire	Spectroscopie d'absorption UV-VIS d'ions et de radicaux refroidis	IPR	A. Benidar
Venus	Formation des molécules dans le MIS	LERMA	F. Dulieu

VULCAIM	Laser VUV et Spectromètre de photoionisation à haute résolution spectrale	ISMO	B. Gans
Saphirs	Multipurpose molecular beam chamber	SOLEIL/DESIRS	L. Nahon G. Garcia
Delicious	Spectromètre PEPICO	SOLEIL/DESIRS	L. Nahon G. Garcia
Flow tube reactor	Source de radicaux sur le montage SAPHIRS	SOLEIL/DESIRS	L. Nahon J.C. Loison
VUV FTS	Spectromètre FT dans le VUV	SOLEIL/DESIRS	L. Nahon N. de Oliveira
Jet-AILES	Supersonic jet facility in the far infrared	SOLEIL/AILES	P. Roy R. Georges

**Table A.8 : Liste des contrats ANRs obtenus par la communauté<sup>36</sup>**

PI	Titre	Laboratoires partenaires	Dates
S. Bontemps	GENESIS <sup>37</sup>	LAB	2017-2021
C. Falvo	PACHYNO	LiPhy, LCPQ, ISMO	2017-2021
B. Gans	PRIMA	ISMO	2017-2021
M.-A. Martin-Drumel	LISTed	ISMO	2019-2024
C. Engrand	COMETOR	CSNSM, IPAG, LCP, UMET, ISMO	2018-2023
M. Mikikian	MONA	GREMI, LSPM, LOMC, ITODYS	2018-2023
F. Dulieu	SIRC	LERMA, IPAG, PIIM	2019-2023
A. de la Lande	RUBI	LCP, LCPQ, ICGM, LUPM	2020-2024
F. Motte	COSMHIC	IPAG, LPENS, Dap	2021-2025
A. Chiavassa	PEPPER	OCA, LAB, IRAP, LUPM	2020-2024
T. Stoecklin	WATERSTARS	ISM, LAB, IPAG	2020-2024
L. Rutkowski	CECOSA	IPR	2020-2024

<sup>36</sup> Liste possiblement non exhaustive

<sup>37</sup> ANR Franco-Germanique

M. Bertin	PIXyES	LERMA/MONARIS, PhLAM, ISMO	2020-2025
R. Georges	FULLDIBS	IPR, LIPHY	2021-2025
A.Simon	GROWNANO	LCPQ, IRAP, LAPLACE	2022-2026
J. Pety, M. Gerin, A. Hughes	DAOISM	IRAM, LERMA, IRAP, CSIC/Madrid, Cardiff, NRAO, MPIA, OSU	2022-2025
J. Noble	HYDRAE	PIIM	2022-2026
J. Bernard	SynPAHcool	ILM, SOLEIL, IRAP	2022-2026
A. Abergel	LabCom INCLASS	IAS, ACRI-ST	2022-2026
S. Boyé-Péronne	ZEPHIRS	ISMO, ISM, SOLEIL	2022-2027
S. Kassi	METEORIT	ISMO, LIPHY, EIMN,	2023-2027
J.-F. Lampin	WASPE	ISMO, LPCA, XLIM, IEMN	2023-2027
U. Jacovella	iSELECTION	ISMO	2023-2027
V. Vinogradoff	ORGAMISS	PIIM	2023-2027
F. Galliano	WIDENING	CEA, IRAM, IAP, IRAP, IAS	
Laboratoires INSU, INP, INC, INSIS, CEA, IN2P3, autre.			

**Table A.9 : Liste des contrats Européens obtenus par la communauté<sup>38</sup>**

PI	Titre	Laboratoires	Dates	Type
C. Joblin,	Nanocosmos	IRAP	2014-2020	ERC Synergy
M. Hochlaf	MOLIM	LCP-MR	2015-2019	COST action
L. Hornaker (Dk)	euroPAH	IRAP, LCAR, LCPQ	2016-2020	International Training Network
A. Maury	Magnetic YSOs	CEA Aim	2016-2022	ERC Starting
I. Sims	CRESUCHIRP	IPR	2016-2022	ERC advanced
C. Ceccarelli	DOC	IPAG	2017-2022	ERC Advanced
Edith Falgarone	MIST	ENS-PSL	2017-2023	ERC Advanced

<sup>38</sup> Liste possiblement non exhaustive

S. Le Picard	QUADMARTS	IPR	2018-2022 2023-2027	International research network
C. Ceccarelli	ACO	IPAG	2019-2023	Innovative Training Network
A.Domaracka	MD-GAS	CIMAP	2019-2024	COST action
M. Hochlaf	CBRIO	LCP-MR	2019-2023	COST action
F. Lique	COLLEXISM	IPR	2019-2025	ERC consolidator
P. Hennebelle	ECOGAL	CEA Aim	2020-2026	ERC Synergy
A. Coutens	Chemtrip	IRAP	2021-2026	ERC Starting
A.Maury	Pebbles	CEA Aim	2023-2028	ERC Advanced

**Table A.10 : Liste des journaux dans lesquels la communauté PCMI publie.**

Astrophysique	Physico-chimie	Non spécialisé
Astronomy & Astrophysics	Journal of Chemical Physics	Nature
The Astrophysical Journal	Journal of Physical Chemistry	Science
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	Journal of Physical Chemistry A	Nature Communications
Icarus	Chemical Physics Letters	Scientific Reports
The Astrophysical Journal Supplement Series	Physical Chemistry Chemical Physics	
The Astronomical Journal	Journal of Molecular Spectroscopy	
The Astronomy and Astrophysics Review	Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer	
Nature Astronomy	Physical Review Letters	
Advances in Astronomy and Space Physics	Physical Review A	
Astronomische Nachrichten	Review of Scientific Instruments	
Annual Review of Astronomy and Astrophysics	Journal of Physics B Atomic Molecular Physics	
New Astronomy	Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B	
Molecular Astrophysics	Journal of the American Chemical Society	
Publications of the Astronomical Society of Japan		
Publications of the Astronomical Society of the Pacific		



## ANNEXE 2 : Analyse des réponses au sondage sur l'implication de la communauté PCMI sur les demandes de temps JWST

Afin de connaître l'implication de la communauté PCMI aux demandes de temps JWST, nous avons diffusé un questionnaire auquel 21 personnes ont répondu. Les laboratoires concernés par les réponses sont montrés sur la Fig. A2.1.

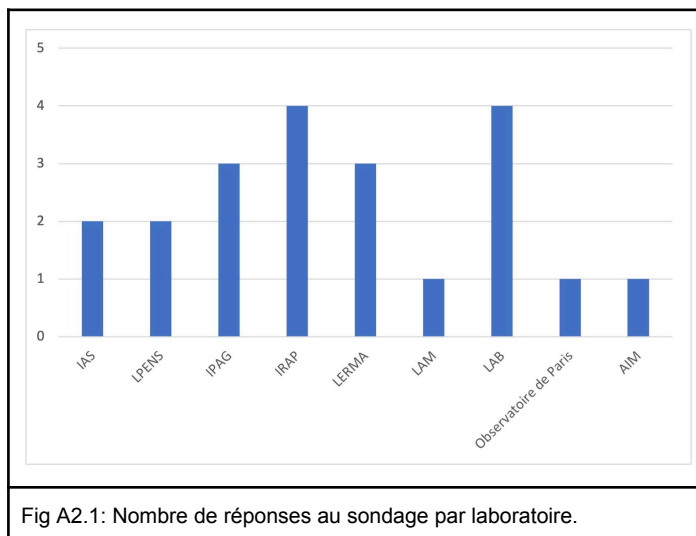


Fig A2.1: Nombre de réponses au sondage par laboratoire.

Parmi ces réponses, nous avons répertorié les demandes de temps soumises dans 6 catégories scientifiques de PCMI (glaces interstellaires, outflows et jets, formation stellaire, la physique du milieu interstellaire galactique et/ou extragalactique, PDR et les disques protoplanétaires) soumis en tant que PI ou co-I au cours des trois cycles du JWST (Fig. A2.2). La communauté PCMI a soumis au total 21 demandes en PI dans 4 des 6 catégories avec un taux de réussite moyen de 25 %. D'une façon générale, il y a moins de demandes de temps en tant que PI sur les cycles 2 et 3 qu'en cycle 1, mais cela représente une variation sur des petits nombres. Cela semble être l'inverse pour les demandes de temps en co-I. Les Figs. A2.3 et A2.4 montrent le taux de succès sur l'ensemble pour les différents cycles et en fonction des thématiques. Le pourcentage de succès au dernier cycle semble être significativement moins grand au dernier cycle en tant que co-I tandis que celui des demandes PI est en augmentation. Les projets d'observation sur les disques protoplanétaires et la physique du MIS sont les plus nombreux à être acceptés mais aussi les plus nombreux soumis.

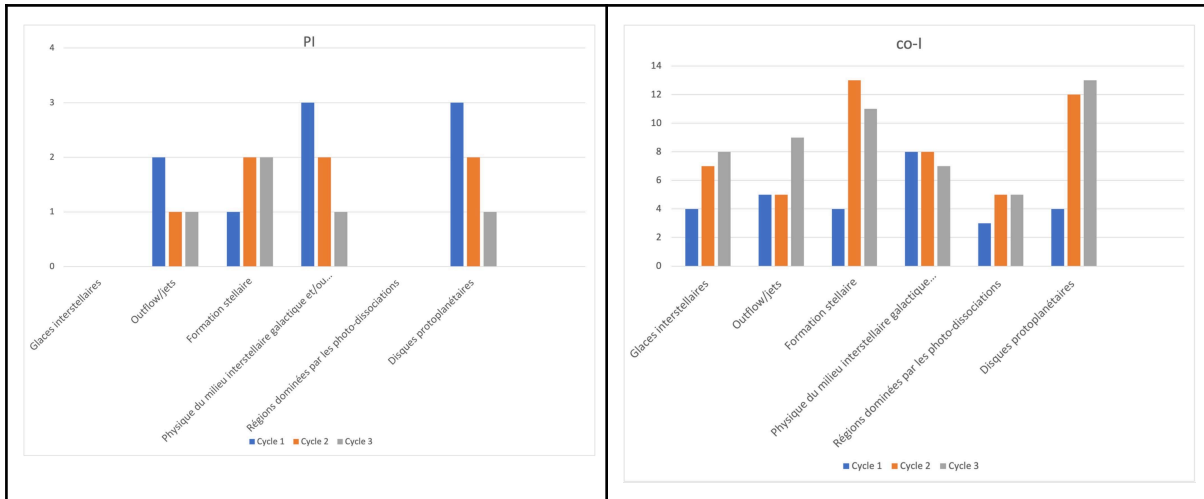


Fig. A2.2 : Nombre de proposals soumis en tant que PI et co-I.

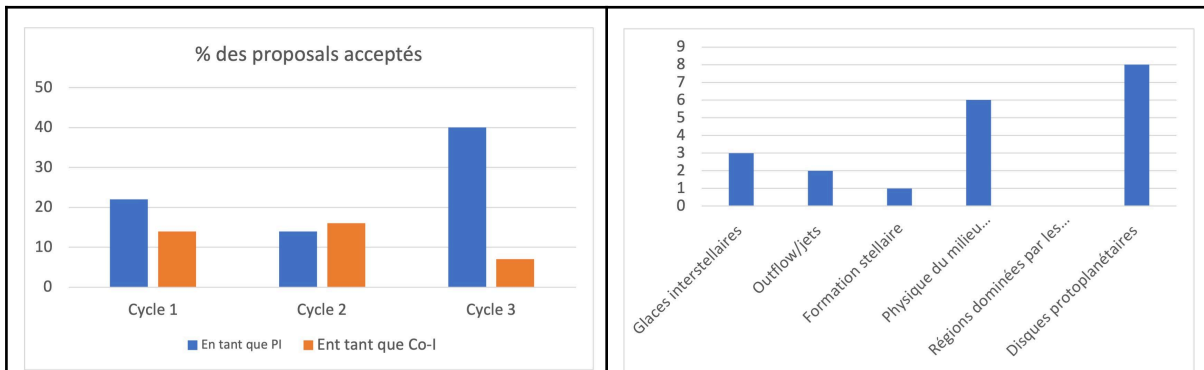


Fig. A2.3 : Pourcentage des demandes de temps acceptés (toutes catégories confondues).

Fig. A2.4 : Nombre de demandes de temps acceptées en fonction des catégories thématiques lors des 3 cycles.

# Références pour les figures et faits marquants

- Armante, M., Gusdorf, A., Louvet, F., et al. 2024, A&A, 686, A122.  
doi:10.1051/0004-6361/202347595
- Basalgète, R., Dupuy, R., Féraud, G., et al. 2021, A&A, 647, A36  
doi:10.1051/0004-6361/202040117
- Basalgète, R., Torres-Díaz, D., Lafosse, A., et al. 2023, A&A, 676, A13  
doi:10.1051/0004-6361/202346209
- Berné, O., Habart, E., Peeters, E., et al. 2022, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 134, 054301. doi:10.1088/1538-3873/ac604c
- Berné, O., Martin-Drumel, M.-A., Schroetter, I., et al. 2023, Nature, 621, 56.  
doi:10.1038/s41586-023-06307-x
- Berné, O., Habart, E., Peeters, E., et al. 2024, Science, 383, 988.  
doi:10.1126/science.adh2861
- Boland, M., Chaquin, P., Volatron, F., et al. 2024, A&A, 682, A13.  
doi:10.1051/0004-6361/202348171
- Bonfand, M., Csengeri, T., Bontemps, S., et al. 2024, in press arXiv:2402.15023.  
doi:10.48550/arXiv.2402.15023
- Bonnín, M. A., Falvo, C., Calvo, F., et al. 2019, Phys Rev A, 99, 042504.  
doi:10.1103/PhysRevA.99.042504
- Bron, E., Roueff, E., Gerin, M., et al. 2021, A&A, 645, A28.  
doi:10.1051/0004-6361/202038040
- Brouillet, N., Despois, D., Molet, J., et al. 2022, A&A, 665, A140.  
doi:10.1051/0004-6361/202243669
- Butscher, T., Duvernay, F., Danger, G., et al. 2019, MNRAS, 486, 1953.  
doi:10.1093/mnras/stz879
- Calvo F., Simon A., Parneix P., et al. 2021, J. Phys. Chem. A 125, 5509–5518
- Changala, P.-B., Chen, N.-L., Le, H.-L., et al. 2023, A&A, 680, A19.  
doi:10.1051/0004-6361/202347765
- Cormier, D., Abel, N.-P., Hony, S., et al. 2019, A&A, 626, A23.  
doi:10.1051/0004-6361/201834457
- Coutens, A., Commerçon, B., Wakelam, V. 2020, A&A, 643, A108.  
doi:10.1051/0004-6361/202038437
- Cunningham, N., Ginsburg, A., Galvan-Madrid, R., et al. 2023, A&A, 678, A194.  
doi:10.1051/0004-6361/202245429
- Dartois, E., Chabot, M., Id Barkach, T., et al. 2019, A&A, 627, A55  
doi:10.1051/0004-6361/201834787
- Dartois, E., Noble, J.-A., Ysard, N., et al. 2022, A&A, 666, A153.  
doi:10.1051/0004-6361/202243929
- Dartois, E., Chabot, M., da Costa, C.A.P., et al. 2023, A&A, 671, A156  
doi:10.1051/0004-6361/202245383
- Dartois, E., Noble, J.-A., Caselli, P., et al. 2024, Nature Astronomy, 8, 359.  
doi:10.1038/s41550-023-02155-x
- Dubosq, C., Falvo, C., Calvo, F., et al. 2019, A&A, 625, L11.  
doi:10.1051/0004-6361/201834943
- Dubosq, C., Calvo, F., Rapacioli, M., et al. 2020, A&A, 634, A62.  
doi:10.1051/0004-6361/201937090



- Einig, L., Pety, J., Roueff, A., et al. 2023, A&A, 677, A158. doi:10.1051/0004-6361/202346064
- Elyajouri, M., Ysard, N., Abergel, A., et al. 2024, A&A, 685, A76.  
doi:10.1051/0004-6361/202348728
- Emsellem, E., Schinnerer, E., Santoro, F., et al. 2022, A&A, 659, A191.  
doi:10.1051/0004-6361/202141727
- Enrique-Romero, J., Rimola, A., Ceccarelli, C., et al. 2022, ApJS, 259, 39.  
doi:10.3847/1538-4365/ac480e
- Gaudel, M., Orkisz, J.~H., Gerin, M., et al. 2023, A&A, 670, A59.  
doi:10.1051/0004-6361/202142109
- Ginsburg, A., Csengeri, T., Galván-Madrid, R., et al. 2022, A&A, 662, A9.  
doi:10.1051/0004-6361/202141681
- Gratier, P., Pety, J., Bron, E., et al. 2021, A&A, 645, A27. doi:10.1051/0004-6361/202037871
- Gutiérrez-Quintanilla, A., Layssac, Y., Butscher, T., et al. 2021, MNRAS, 506, 3734.  
doi:10.1093/mnras/stab1850
- Habart, E., Le Gal, R., Alvarez, C., et al. 2023, A&A, 673, A149.  
doi:10.1051/0004-6361/202244034
- Harper, O. J., Chen, N. L., Boyé-Péronne, S., et al. 2022, Physical Chemistry Chemical  
Physics (Incorporating Faraday Transactions), 24, 2777. doi:10.1039/D1CP04569E
- Hays, B. M., Gupta, D., Guillaume T. et al. 2022, Nature Chemistry 14, 811.  
doi:10.1038/s41557-022-00936-x
- Herrera, C.~N., Pety, J., Hughes, A., et al. 2020, A&A, 634, A121.  
doi:10.1051/0004-6361/201936060
- Lacinbala, O., Calvo, F., Dubosq, C., et al. 2022, J Chem Phys, 156, 144305.  
doi:10.1063/5.0080494
- Lacinbala, O., Calvo, F., Dartois, E., et al. 2023, A&A, 671, A89.  
doi:10.1051/0004-6361/202245421
- Layssac, Y., Gutiérrez-Quintanilla, A., Chiavassa, T., et al. 2020, MNRAS, 496, 5292.  
doi:10.1093/mnras/staa1875
- Lee, J. C., Whitmore, B. C., Thilker, D. A., et al. 2022, ApJS, 258, 10.  
doi:10.3847/1538-4365/ac1fe5
- Lee, J.C., Sandstrom, K.M., Leroy, A.K., et al. 2023, ApJL, 944, L17.  
doi:10.3847/2041-8213/acaaae
- Leroy, A. K., Schinnerer, E., Hughes, A., et al. 2021, ApJS, 257, 43.  
doi:10.3847/1538-4365/ac17f3
- Leroy, A. K., Hughes, A., Liu, D., et al. 2021, ApJS, 255, 19. doi:10.3847/1538-4365/abec80
- Madden, S.~C., Cormier, D., Hony, S., et al. 2020, A&A, 643, A141.  
doi:10.1051/0004-6361/202038860
- McClure, M.~K., Rocha, W.~R.~M., Pontoppidan, K.~M., et al. 2023, Nature Astronomy, 7,  
431. doi:10.1038/s41550-022-01875-w
- Michoulier, E., Toubin, C., Simon, A. et al. 2020, *J. Phys. Chem. C*, 124, 5, 2994–3001.  
doi:10.48550/arXiv.2003.02098
- Motte, F., Nony, T., Louvet, F., et al. 2018, *Nature Astronomy*, 2, 478.  
doi:10.1038/s41550-018-0452-x
- Motte, F., Bontemps, S., Csengeri, T., et al. 2022, A&A, 662, A8.  
doi:10.1051/0004-6361/202141677
- Nony, T., Galván-Madrid, R., Motte, F., et al. 2023, A&A, 674, A75.  
doi:10.1051/0004-6361/202244762
- Orkisz, J.~H., Peretto, N., Pety, J., et al. 2019, A&A, 624, A113.  
doi:10.1051/0004-6361/201833410
- Palud, P., Einig, L., Le Petit, F., et al. 2023, A&A, 678, A198.  
doi:10.1051/0004-6361/202347074

- Pan, H.-A., Schinnerer, E., Hughes, A., et al. 2022, *ApJ*, 927, 9.  
doi:10.3847/1538-4357/ac474f
- Parneix, P., Maupin, R., Attal, L. et al. 2021, *Theor. Chem. Acc.* 140, 40.  
DOI:10.1063/1.5050087
- Polles, F.~L., Madden, S.~C., Lebouteiller, V., et al. 2019, *A&A*, 622, A119.  
doi:10.1051/0004-6361/201833776
- Pouteau, Y., Motte, F., Nony, T., et al. 2022, *A&A*, 664, A26.  
doi:10.1051/0004-6361/202142951
- Pouteau, Y., Motte, F., Nony, T., et al. 2023, *A&A*, 674, A76.  
doi:10.1051/0004-6361/202244776
- Querejeta, M., Pety, J., Schrubba, A., et al. 2023, *A&A*, 680, A4.  
doi:10.1051/0004-6361/202143023
- Ramambason, L., Lebouteiller, V., Bik, A., et al. 2022, *A&A*, 667, A35.  
doi:10.1051/0004-6361/202243866
- Rosolowsky, E., Hughes, A., Leroy, A. K., et al. 2021, *MNRAS*, 502, 1218.  
doi:10.1093/mnras/stab085
- Roueff, A., Gerin, M., Gratier, P., et al. 2021, *A&A*, 645, A26.  
doi:10.1051/0004-6361/202037776
- Roueff, A., Pety, J., Gerin, M., et al. 2024, arXiv:2403.20057. doi:10.48550/arXiv.2403.20057
- Santa-Maria, M.~G., Goicoechea, J.~R., Pety, J., et al. 2023, *A&A*, 679, A4.  
doi:10.1051/0004-6361/202346598
- Schinnerer, E., Hughes, A., Leroy, A., et al. 2019, *ApJ*, 887, 49.  
doi:10.3847/1538-4357/ab50c2
- Schirmer, T., Abergel, A., Verstraete, L., et al. 2020, *A&A*, 639, A144.  
doi:10.1051/0004-6361/202037937
- Schirmer, T., Ysard, N., Habart, E., et al. 2022, *A&A*, 666, A49.  
doi:10.1051/0004-6361/202243635
- Stuber, S.~K., Pety, J., Schinnerer, E., et al. 2023, *A&A*, 680, L20.  
doi:10.1051/0004-6361/202348205
- Taillard, A., Wakelam, V., Gratier, P., et al. 2023, *A&A*, 670, A141.  
doi:10.1051/0004-6361/202245157
- Tenelanda-Osorio, L. I., Bouquet, A., Javelle, T., et al. 2022, *MNRAS*, 515, 5009.  
doi:10.1093/mnras/stac1932
- Vacher, L., Aumont, J., Montier, L., et al. 2022, *A&A*, 660, A111.  
doi:10.1051/0004-6361/202142664
- Wakelam, V., Dartois, E., Chabot, M., et al. 2021, *A&A*, 652, A63.  
doi:10.1051/0004-6361/202039855
- Wenzel, G., Joblin, C., Giuliani, A., et al. 2020, *A&A*, 641, A98.  
doi:10.1051/0004-6361/202038139
- Zakardjian, A., Pety, J., Herrera, C.~N., et al. 2023, *A&A*, 678, A171.  
doi:10.1051/0004-6361/202244520
- Zannese, M., Tabone, B., Habart, E., et al. 2024, *Nature Astronomy*, 8, 577.  
doi:10.1038/s41550-024-02203-0