

Stage au Lerma

19/02/2018 au 30/03/2018

Spécialité : Astrophysique

Tuteur de stage: François DULIEU

Rapport de stage

Léa B.

Licence 1 Physique chimie, Université Aix-Marseille

Remerciements

Je tiens à remercier mon tuteur, Mr François Dulieu, directeur du Lerma, qui durant mon stage, a guidé mon activité, tout particulièrement les premiers jours durant lesquels, je découvrais les manip liées au dispositif Venus (ainsi que les tâches dévolues aux membres doctorants et post-doctorants de l'équipe), puis par la suite en assurant le suivi de nos expériences.

Je remercie également, Mme Henda Chaabouni, pour ses précieux commentaires et ses interprétations des résultats d'expériences lorsque je peinais à comprendre le sens des spectres obtenus.

Les moments passés à interpréter les spectres de séries de TPD m'ont permis de mieux saisir la démarche scientifique d'un chercheur.

Et mon sentiment d'avoir une entière écoute autours de moi, concernant mes questions, m'a permis d'améliorer chaque jour ma compréhension du contenu et de la progression de nos expériences.

Je remercie l'ensemble du personnel pour son accueil et son soutien : François Dulieu, Henda Chaabouni, Emanuele Congiu, Thanh Nguyen, Abdellahi Sow, Abdi-Salam Mohamed, Saoud Baouche.

Afin de ne pas diviser mon attention, j'ai choisi après trois jours de stage, de mener mon étude uniquement sur le dispositif Formolism.

Enfin, j'adresse des remerciements tous particuliers à Abdi-Salam Mohamed pour son accompagnement pédagogique, quotidien et infaillible. Sa patience, et son instruction des manip d'expériences et des notions élémentaires de physique et chimie l'ont hissé à mon égard, au rang de mentor pendant ce stage.

Présentation du Lerma

Le LERMA (Laboratoire d'Etudes du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique et Atmosphères) est une unité mixte de recherche, commune au CNRS et à 4 établissements d'enseignement supérieur : l'Observatoire de Paris (OP), l'École normale supérieure (ENS), l'Université Pierre et Marie Curie (UPMC - Paris 6) et l'Université de Cergy-Pontoise (UCP). Ces 4 établissements hébergent les différentes composantes du LERMA.

Le LERMA est organisé en 4 Pôles thématiques de recherche (Pôle "Galaxies et cosmologie", Pôle "Dynamique des milieux interstellaires et plasmas stellaires", Pôle "Molécules dans l'Univers" et Pôle "Instrumentation et télédétection").

Mon stage concerne le Pôle "Molécules dans l'univers".

Les deux dispositifs majeurs du Lerma sont FORMOLISM (FORMation des MOLécules dans le Milieu InterStellaire) et VENUS (VERs de NoUvelles Synthèses). Ceux-ci reproduisent les conditions extrêmes du milieu interstellaire : très basses pression et température.

Leur but est l'étude des mécanismes réactionnels de formation des molécules sur les surfaces de grains de poussières dans les conditions semblables au milieu interstellaire (MIS).

L'objectif de ce stage, a été l'étude expérimentale des réactions fondamentales entre, d'une part, des atomes et molécules d'intérêt astrophysique (H, H₂O, O₂...) composants principaux pour la formation des étoiles, et d'autre part, des surfaces carbonées graphitique, le graphite HPOG ZYA (Highly oriented pyrolytic graphite ZYA).

Bien que les poussières ne représentent environ, que 1% de la masse du milieu interstellaire, elles sont cruciales pour la formation et la dynamique physico-chimique des molécules les plus simples aux plus complexes, menant à des planètes et des étoiles.

En effet elles jouent un rôle de catalyseur dans ce milieu interstellaire de trop faible de densité pour occasionner la collision et l'interaction de molécules.

D'ailleurs même ces poussières ne se forment pas dans le milieu interstellaire, car la densité y est trop faible ($\sim 1 \text{ atome.cm}^{-3}$ en moyenne et une masse

visible de 5 à 10% de celle de notre galaxie, la Voie Lactée), pour permettre la rencontre de molécules.

A bonne distance de l'étoile en train de mourir, la température est suffisamment basse pour que la matière éjectée se retrouve sous forme d'atomes constituant les poussières.

(Ces noyaux de poussière réfractaires se forment dans les enveloppes des Géantes Rouges et dans les ondes de choc des restes des supernovæ. Mais elles échangent continuellement des particules avec le gaz interstellaire.)

La densité ρ est également assez élevée pour que ces atomes puissent s'associer et donner naissance à des molécules complexes puis à de minuscules grains de poussière.

Ces grains absorbent de façon continue le rayonnement dans le domaine ultraviolet (UV) et visible. Cette énergie chauffe les poussières qui se refroidissent en émettant des photons infrarouges. Une partie de cette énergie peut également servir à éjecter en phase gazeuse des électrons de la surface des grains qui participeront au chauffage du gaz.

De plus, les grains favorisent certaines réactions chimiques très importantes : par exemple la formation de la molécule la plus abondante du milieu interstellaire, le dihydrogène, H_2 , est rendue possible par la présence de poussières : L'énergie cinétique de l'atome étant transmise sous forme d'énergie de vibration au cours de l'adsorption les grains de poussière servent alors de catalyseurs à la formation de molécules H_2 .

Introduction et contexte de l'étude

Dans la Voie Lactée, le milieu interstellaire est constitué à 90% d'atomes d'hydrogène (70% en masse) et à 10% d'atomes d'hélium (28% en masse). Les éléments plus lourds nommés les métaux, dont le carbone, l'azote, l'oxygène, le magnésium, le silicium et le fer sont les plus abondants, complètent sa composition.

Tous ces éléments se trouvent à la fois sous forme de gaz atomique et moléculaire mais aussi sous forme de poussières.

Celle-ci change au gré des conditions physiques locales. Elle est détruite dans les régions les plus ténues et les plus chaudes mais jamais complètement, ce qui lui permet de se reconstruire dans les régions denses de l'espace interstellaire par addition d'atomes et de molécules du gaz, et aussi coagulation entre particules solides. La poussière réémet dans l'infrarouge l'énergie qu'elle absorbe des étoiles. Le rayonnement infrarouge des grains interstellaires est aujourd'hui une source principale d'information sur la nature de cette poussière et sur le milieu interstellaire dans son ensemble. C'est ainsi que FORMOLISM est équipé d'un spectromètre infrarouge.

Dans les parties froides des nuages denses, où la température des poussières est de l'ordre de 10 K, l'observation de déplétions d'éléments lourds plus importantes dans les milieux denses accrédite la présence du processus d'accrétion. Des atomes, des ions, des radicaux ou des molécules du gaz peuvent venir se fixer à leur surface. L'accrétion s'effectue soit par physisorption lorsqu'elle met en jeu des forces électrostatiques, soit par chimisorption lorsque les liaisons sont chimiques et les espèces concernées sont diverses (C, O, Mg, Si, Fe, H₂O...). C'est le phénomène d'accrétion qui conduit à la formation de manteaux à la surface des grains, cependant cela ne conduit pas à une grande modification de la taille des gros grains (Draine, 1985).

Ce manteau constitue d'ailleurs une des propriétés générales de la matière interstellaire : le gaz et la poussière étant tous deux très froids en phase prestellaire, les molécules se collent sur les grains interstellaires et forment une couche de glace moléculaire dont la molécule majoritaire est H₂O. Les molécules capturées par le grain vont se déplacer sur sa surface gelée et rencontrer d'autres molécules elles aussi piégées par le grain. Deux molécules vont ainsi pouvoir réagir l'une avec l'autre et donner naissance à une nouvelle

espèce chimique plus complexe. Les nouvelles molécules formées pourront rejoindre la phase gazeuse du milieu interstellaire par évaporation du manteau de glace ou par destruction de celui-ci lors d'un choc avec un autre grain par exemple.

Cette imbrication du froid et du chaud dans les régions de formation stellaire est reproduite au sein du dispositif FORMOLISM.

1) Dispositif FORMOLISM

Le dispositif FORMOLISM a été conçu en 2001 afin d'étudier les réactions de physico-chimie de formation de molécules présentes dans le MIS (milieu interstellaire) ainsi qu'à étudier les interactions d'atomes et de molécules sur des glaces d'eau ou sur des surfaces sèches (silicates ou composés carbonés) à très basses pressions (10^{-10} mbar) et températures (10K).

Elle est constituée des éléments expérimentaux suivant :

A) Le cryostat

Le Cryostat est un instrument physique qui permet d'obtenir des températures cryogéniques par le biais d'une compression/détente d'hélium en circuit fermé. L'appareil est modèle DE204 de Arscryo de capacité de refroidissement de 2w à 10K et de 9w à 20K et à 60Hz. Il permet d'atteindre une température de 4,2K. L'échantillon que nous étudions est fixé sur un porte-échantillon lui-même fixé sur la tête froide du cryostat.

L'ensemble du cryostat est monté sur une platine en translation, qui permet de reculer la surface par rapport au centre de l'enceinte afin de permettre l'approche soit du QMS, soit du diffuseur d'eau

Le cryostat est modèle à circulation d'hélium gazeux qui permet d'atteindre en primaire une température de 4, 2 K. Le transfert thermique est provoqué par

l'action mécanique d'un piston (cycle de compression détente suivant le principe de Gifford-McMahon) et permet d'atteindre une puissance thermique typique de 4W. L'extrémité du cryostat sous vide comprend deux étages. L'interface 800 K situé entre l'étage 2 et le porte échantillon est une extension qui permet de chauffer le porte échantillon jusqu'à 800 K tout en limitant la conduction thermique (commutation mécanique à 350 K) depuis l'échantillon vers les étages inférieurs du cryostat au moment d'un recuit. Une augmentation de température au-delà de cette limite risquerait d'endommager les éléments mécaniques du cryostat.

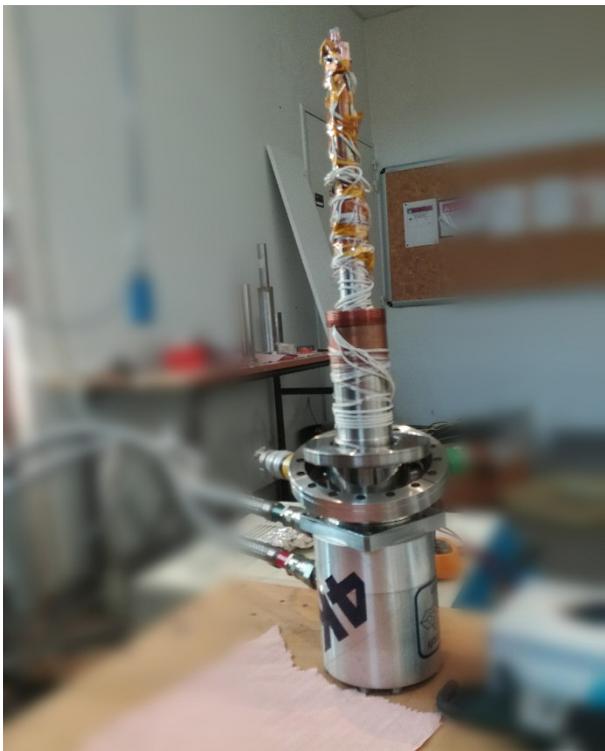


Figure 1 : Cryostat 4K (à gauche) et son bouclier thermique(à droite). Du scotch Kapton est utilisé pour protéger les composants électroniques sensibles. Sa caractéristique principale est d'avoir des propriétés d'isolation électrique et en particulier d'être un ruban adhésif à faible décharge électrostatique. Et sa stabilité thermique lors des hautes températures, l'empêchent de ramollir ce qui en fait une surface anti-adhérente exceptionnelle.

B) Enceinte UHV

L'ensemble des pièces composant la structure du dispositif expérimental est en acier inoxydable. L'utilisation d'un tel matériau se justifie par sa très faible réactivité. Ainsi, il présente une très forte résistance à la corrosion grâce à son taux de chrome et une grande résistance mécanique. La teneur en chrome, très réactif et particulièrement oxydable, peut sembler étonnante mais son oxyde, en présence de fer ou de nickel est capable d'arrêter totalement la corrosion en formant, à la surface de l'alliage, une couche passivée hermétique. Le joint est un anneau de cuivre de haute pureté (qui sera changé à chaque ouverture). L'intérieur de chaque bride possède une lame affûtée (le couteau) qui va venir écraser le cuivre lors du serrage. Ainsi, la jonction est composée d'acier inoxydable écrasant un métal plus mou ce qui assure ainsi une étanchéité optimale. De même, toutes les vannes sont spécifiquement conçues pour l'ultravide. Elles possèdent également leur propre système de couteaux.

L'enceinte principale sous ultravide de pression de l'ordre de 10^{-10} mbar de densité moyenne de 10^6 molécules / cm^3 est proche de celle du MIS. Les gaz y sont raréfiés.

Lorsque des pressions inférieures à 10^{-6} mbar sont atteintes, les matériaux vont adsorber c'est-à-dire fixer à leur surface, les molécules de gaz présentes qui forment alors une couche monomoléculaire (Monolayer: ML) sur le matériel. De ce fait, la presque totalité de réactions au sein de la chambre survient à la surface des matériaux.

Cette enceinte sous ultravide est elle-même connectée à un réseau de trois chambres en acier inoxydable toutes reliées entre elles. Un système de pompage différentiel permet d'obtenir un vide progressif de plus en plus important à l'intérieur des chambres.

L'intérêt de ce système de pompage différentiel est qu'il permet d'abaisser progressivement la pression au sein du dispositif. En son absence, il serait pratiquement impossible de déposer des réactifs au sein de l'enceinte sous ultravide car l'écart entre la pression atmosphérique et celle requise pour l'ultravide est trop importante.

c) **Tête froide ou porte échantillon cryogénique**

Le porte échantillon est fixé sur l'ensemble cryostat-interface 800 K. Il est formé d'un cylindre de cuivre poli OFHC (Oxygène Free High Conductivity) vissé sur l'interface 800K. Une rondelle en feuille d'argent assure une bonne conductivité thermique entre l'interface 800K et la tête froide.

Une rotation de 360° autour de l'axe vertical central de l'expérience permet de faire varier l'angle d'incidence du faisceau de particules malgré la position fixe de la source.

Le choix du graphite s'explique par la présence dans le milieu interstellaire de nano- et micro-particules de solides de poussières constitués principalement de silicate et de carbone graphique.

Les mécanismes de dépôt, d'ancrage, les mouvements et le départ des molécules formées sur le graphite comme grain de poussière interstellaire, sont régis par des lois qui renseignent sur les énergies mises en jeu lors de ces processus de déplacement.

La connaissance des processus réactionnels mis en jeu, peuvent s'appliquer à des domaines très variés. Par exemple les interactions entre molécules H₂ et surfaces carbonées apportent des connaissances capitales pour la compréhension de la nature physico-chimique des réactions des plasmas de H₂ sur les parois des tokamaks en vue du stockage de l'Energie. Cela permet de prédire les éventuelles altérations des matériaux dont les radicaux et ions des plasmas d'hydrogène sont responsables.

d) **Mesure et contrôle de la température**

L'interface 800 K dispose d'une résistance chauffante qui permet la régulation de la température du porte-échantillon.

Aussi, des thermocouples mesurent la température du cryostat a plusieurs endroits et permettent ainsi par leur connexion a un contrôleur Lakeshore (340), la lecture et la régulation des températures.

Ce contrôleur permet de réguler la température du porte échantillon grâce à un asservissement de type Proportionnel-Intégrale-Dérivé (PID) qui contrôle la puissance délivrée par la résistance chauffante. La gestion de la régulation est effectuée par le biais d'un programme Labview destiné à piloter entièrement le contrôleur à distance.

E) Pompage

Les gaz à évacuer sont d'une part ceux présents au début de la mise sous vide (généralement à la pression atmosphérique) et d'autre part ceux émanant de phénomènes tels que le dégazage naturel des parois sous vide (voire de zones qui sont chauffées), des fuites éventuelles (réelles ou virtuelles), de la perméabilité des joints ou des parois, voire d'introduction volontaire de gaz.

Pour atteindre le régime ultravide il est aussi nécessaire de réaliser régulièrement un étuvage ou *bakeout* à des températures très élevées. Plus les températures sont élevées et la durée grande, plus la proportion de molécules d'eau et le dégazage sera efficace.

Lors des expériences, le faisceau de particules injectées est assimilé à une fuite, qui nécessite donc, un système de pompage à haut débit pour maintenir les conditions d'ultravide. Les pompes utilisées sont les suivantes :

Pompe à sublimation de titane : La pompe à sublimation de titane utilise le phénomène de chimisorption, c'est-à-dire l'adsorption des molécules du gaz par une surface recouverte d'une couche de titane qui possède une forte activité chimique avec certains gaz, comme l'oxygène (avec formation d'oxydes), l'azote (nitrides) et l'hydrogène (dont la solubilité est très élevée, jusqu'à 1 %). Ce mécanisme n'est valable uniquement que pour des gaz chimiquement actifs. La couche de titane est renouvelée régulièrement par évaporation sous vide (filament de W ou évaporation par bombardement électronique). La surface de l'enceinte est refroidie à l'air, à l'eau ou à l'azote liquide.

Pompe ionique : Un film de titane sublimé est déposé sur une paroi et capture par chimisorption les particules gazeuses (formation d'un composé chimique). Dans la pompe ionique, il y a d'abord ionisation, puis pulvérisation du titane qui

forme le dépôt actif alors que dans la pompe à sublimation, ce dépôt est obtenu par sublimation thermique.

A faible pression, le gaz est rendu conducteur et s'ionise. Le mouvement des électrons et des ions est allongé (trajectoire spiralée) sous l'effet du champ magnétique, ce qui amplifie les ionisations par chocs. Les cathodes en titane subissent un bombardement ionique qui provoque une pulvérisation cathodique. Le titane vient se déposer sur les parois des tubes en acier et forme un revêtement adsorbant par chimisorption. La pompe ionique a un débit volumique faible (quelques $\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et possède un rendement très variable selon la nature du gaz ; elle est peu efficace pour des gaz neutres (He, Ne, A... environ 0,1 à 0,01 $\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$) en raison de leur faible efficacité d'ionisation due à un potentiel d'ionisation élevé ; par contre elle est particulièrement bien adaptée au pompage de l'hydrogène (de l'ordre de 3 $\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$).

Pompe turbo moléculaire (TMP) : est une pompe cinétique à entraînement mécanique. Elle est constituée d'un empilement de disques munis de pales, disques en rotation (rotors) et fixes (stators) disposés de façon alternée. Les pales sont inclinées en sens inverse selon qu'elles appartiennent à un disque stator ou un disque rotor.

Une pompe TMP ne fonctionne efficacement qu'en régime moléculaire libre, régime dans lequel le libre parcours moyen des molécules est très grand par rapport aux dimensions caractéristiques de la pompe. Les collisions intermoléculaires sont alors négligeables et les seules collisions entre les molécules et les parois solides (surfaces des pales) peuvent être considérées. Lorsque le gaz à comprimer (flux de molécules indépendantes) parvient à l'aspiration de la pompe, le mouvement des pales du rotor, avec lequel il entre en contact, permet de donner aux molécules constitutives du gaz une direction privilégiée par le biais des chocs qui se produisent entre ces molécules et les pales inclinées. Le rôle des stators est ensuite de rediriger les molécules vers une autre pale de rotor. Ainsi, par chocs successifs entre les pales des rotors et des stators, le gaz (flux de molécules) est conduit à travers les différents étages de la pompe jusqu'à atteindre le refoulement.

Une pompe primaire : c'est-à-dire pouvant fonctionner dès la pression atmosphérique, en opposition à la pompe « secondaire » qui nécessite un vide moyen pour s'amorcer.

Pompe à Cryoréfrigérateur : Cette pompe utilise le même principe que les réfrigérateurs : elle est constituée d'un compresseur qui comprime de l'hélium, d'un échangeur pour éliminer les calories dues à la compression, d'un détendeur pour refroidir le gaz et d'un échangeur froid pour le pompage.

Pompe à diffusion d'huile : elle est constituée d'un cylindre métallique (le corps de pompe) refroidi extérieurement par une circulation d'eau et contenant une série de tubes coaxiaux de hauteurs décroissantes à partir du centre (les collecteurs) ; ces collecteurs sont surmontés d'un chapeau formant tuyère. Le fond de la pompe, rempli d'une huile spéciale, est muni d'un élément chauffant. Cette huile possède une masse molaire élevée (> 250), une très faible pression de vapeur saturante à température ambiante (10-5 Pa) mais assez élevée à 200°C (102 Pa). Sous l'action de la chaufferette, l'huile est vaporisée, monte dans les collecteurs et se trouve projetée à des vitesses supersoniques par les tuyères vers la paroi. Sur la paroi refroidie, l'huile se condense et coule vers le bas où elle se vaporise de nouveau dans un cycle continu. Durant son trajet, elle entraîne avec elle vers le bas les molécules du gaz à pomper (aspiration). Ce gaz est libéré lors de la re-vaporisation de l'huile et extrait par une pompe primaire (refoulement).

F) Brides et joints

Les brides et les joints utilisés en ultravide se doivent de pouvoir supporter des températures assez hautes d'étuvage tout en ne polluant pas l'enceinte. Les joints et brides sont donc métalliques, et utilisent parfois des alliages spécifiques d'aluminium développés pour ces applications

Les pièces mécaniques souffrent des grandes variations de température subies lors des refroidissements successifs, et beaucoup des processus de refroidissement sont assimilables à de légères trempes. Les différents matériaux utilisés ne réagissant de la même manière, il est courant de devoir ouvrir l'enceinte pour resserrer des vis, régler les cannes de transfert ou remplacer des pièces endommagées.

G) Jets atomiques et moléculaires

Le dispositif expérimental en acier inoxydable comporte deux jets autonomes pourvus de trois chambres secondaires pompées différentiellement. Les trois premières chambres sont séparées par deux diaphragmes de diamètre $d = 3$ mm, pour atteindre sous un faible angle solide de diffusion le centre de l'échantillon et aussi ajustables en position (hauteur et largeur) de façon à pouvoir régler l'axe du jet. Après le second diaphragme qui ouvre sur la 3ème chambre, se trouve une vanne munie d'une fenêtre. La 3ème chambre communique avec l'enceinte principale par un diaphragme fixe.

Dans la première chambre est installé un jet développé sur la base du modèle de Walraven et Silvera (1982)

le jet N°1 est à géométrie coudée pour éviter toute influence de la lumière générée par le plasma de la décharge sur la surface de l'échantillon. Placé au niveau de la première chambre il permet d'avoir un jet atomique ou moléculaire refroidi à 20K. Il est équipé d'un système de refroidissement (accommodateur relié à un cryostat par cycle de compression - détente d'hélium en circuit fermé de marque ARS : modèle DE2002 Capacité de refroidissement 0,5W à 10K et 2,5 W à 20K et à 60Hz).

Le jet N°2 n'est pas coude mais linéaire, il est néanmoins construit sur le même principe que le premier jet.

H) QMS (Spectromètre de masse à quadrupole)

Afin de déterminer la dynamique des réactions étudiées, nous voulons avoir accès à l'énergie cinétique des réactifs et produits de celles-ci, ainsi qu'à la distribution angulaire des espèces désorbées pour observer le cas échéant une « mémoire » du moment cinétique parallèle à la surface. En combinant la technique de spectrométrie de masse à ionisation électronique avec un

faisceau de réactif modulé temporellement, on a une méthode d'une extrême sensibilité capable de nous donner toutes les informations désirées.

La détection des réactifs et produits de réactions effectuée dans le plan d'incidence de l'expérience, utilise deux techniques : un spectromètre de masse quadripolaire (QMS) permet de déterminer la quantité de particules diffusées et leur énergie cinétique moyenne, et un dispositif de mesure par ionisation multiphotonique résonante (REMPI) donne accès à l'énergie interne des molécules. Ces deux appareils peuvent tourner autour de la surface donnant ainsi une résolution angulaire aux expériences.

Principe de fonctionnement du QMS : Un QMS permet de détecter la présence d'une espèce donnée, et de suivre quantitativement son évolution au cours du temps.

Les particules à détecter sont tout d'abord ionisées par des électrons de quelques dizaines d'électronvolts, puis accélérées vers un filtre de masse qui va les séparer en fonction du rapport entre leur charge et leur masse, Z/M . Les ions sélectionnés sont alors détectés par un multiplicateur d'électrons secondaires (SEM).

Le filtre de masse peut être réalisé soit par un analyseur électrostatique suivi d'un secteur magnétique [4], soit par un quadripôle [5]. Cette dernière méthode, moins encombrante, est celle que nous utilisons. Le filtre quadripolaire est structuré par quatre barreaux cylindriques parallèles que l'on porte deux à deux à un potentiel $\pm V_0$. En superposant à V_0 une modulation radiofréquence V_1 d'environ 2MHz, on crée un champ électrique dans l'axe médian à la structure décrit par l'expression $V(x,y,t) \sim (V_0 + V_1 \cos(\omega t)) \cdot (x^2 - y^2)$. Les ions injectés dans cet axe vont, sous l'influence du champ électrique, suivre une trajectoire hélicoïdale qui est stable si V_0/V_1 est inférieur, ou égal pour une meilleure résolution, à 0,167. En choisissant les valeurs de V_0 et V_1 , on sélectionne le rapport Z/M pour lequel la trajectoire est stable, c'est à dire l'espèce que nous voulons détecter, les autres étant éjectés de l'axe du filtre et n'atteignant pas le SEM.

2) Interactions particules/surfaces

Dans le MIS, La surface d'un grain est d'environ 10–13 m² et 1 site correspond à environ 1 Å².

Compte tenu des temps caractéristiques de vie des nuages moléculaires (10⁶ à 10⁷ ans), la surface des glaces des grains de poussière demeure donc le siège d'une chimie hétérogène, permettant la formation de nouvelles espèces. Deux mécanismes principaux sont connus pour expliquer la genèse des molécules à la surface des grains :

Le mécanisme Eley-Rideal, où un atome est initialement adsorbé sur la surface. Un autre atome de la phase gazeuse entre en collision avec l'atome adsorbé sur la surface. Le tout peut désorber en formant une molécule.

Le mécanisme Langmuir-Hinshelwood, où les deux atomes sont initialement adsorbés sur la surface, sur laquelle ils diffusent, entrent en collision et désorbent en une molécule. Les espèces se déplacent par effet tunnel ou saut thermique de site en site à la surface du grain. Le mécanisme de Langmuir-Hinshelwood est plus efficace que le précédent car la surface du grain est très faiblement couverte d'espèces réactives. Le bombardement par les rayons cosmiques ou l'irradiation par des photons UV peuvent en outre contribuer à enrichir ou complexifier cette chimie (e.g. Gerakines et al. , 2000; Moore et al. , 2001). Le rayonnement cosmique peut également contribuer à l'évaporation des molécules ou atomes à la surface du manteau de glaces. Lorsque la surface est capable d'accumuler des atomes par un collage efficace, la densité d'atomes peut augmenter de sorte que le collage soit compensé par le processus de désorption. Les atomes présents à la surface des grains sont mobiles. Ils diffusent et vont ainsi rencontrer d'autres atomes adsorbés. Cette diffusion dépend de la température du grain et des énergies d'adsorption des espèces. A 10 K seules les espèces H, H₂ et D sont mobiles. **La diffusion des atomes plus lourds tels que C et O est observée à plus haute température. Cette diffusion procède via deux mécanismes :**

- les sauts thermiques ou agitations thermiques. L'énergie thermique est suffisamment importante pour permettre aux atomes de franchir la barrière de potentiel qui les lie à la surface du grain.

- l'effet tunnel qui permet notamment le passage d'un site de physisorption à un site de chimisorption.

3) Deuteration :

L'eau est l'une des molécules les plus abondantes du milieu interstellaire, le réservoir de gaz à partir duquel les étoiles se fabriquent. L'eau y revêt plusieurs formes chimiques comme l'eau réitérée (HDO). Cette molécule du MIS est très intéressante, elle est chimiquement équivalente à l'eau, H₂O mais l'un de ses atomes d'hydrogène est remplacé par un isotope lourd de l'hydrogène, le deutérium dont le noyau contient un neutron supplémentaire.

A partir des rayonnements infrarouges que ces molécules émettent, nous pouvons déterminer leur abondance et par la même le rapport d'abondance HDO/H₂O dans différents objets astrophysiques dont les régions de formation stellaire permettent de caractériser la surface des matériaux.

Le rapport HDO/H₂O est un outil d'autant plus intéressant puisque selon sa valeur il permet de contraindre les mécanismes de formations de l'eau. En effet en raison d'une différence d'énergie potentiel de point 0 entre l'eau et l'eau réitérée, le rapport HDO/H₂O est élevé si l'eau se forme à basse température tandis qu'il est faible si l'eau se forme à haute température.

Il a été déterminé dans plusieurs types de comètes et en le comparant avec celui des océans terrestres que l'eau sur terre avait probablement été apportée par les comètes lors de grands bombardements, permettant ainsi l'apparition de la Vie sur terre.

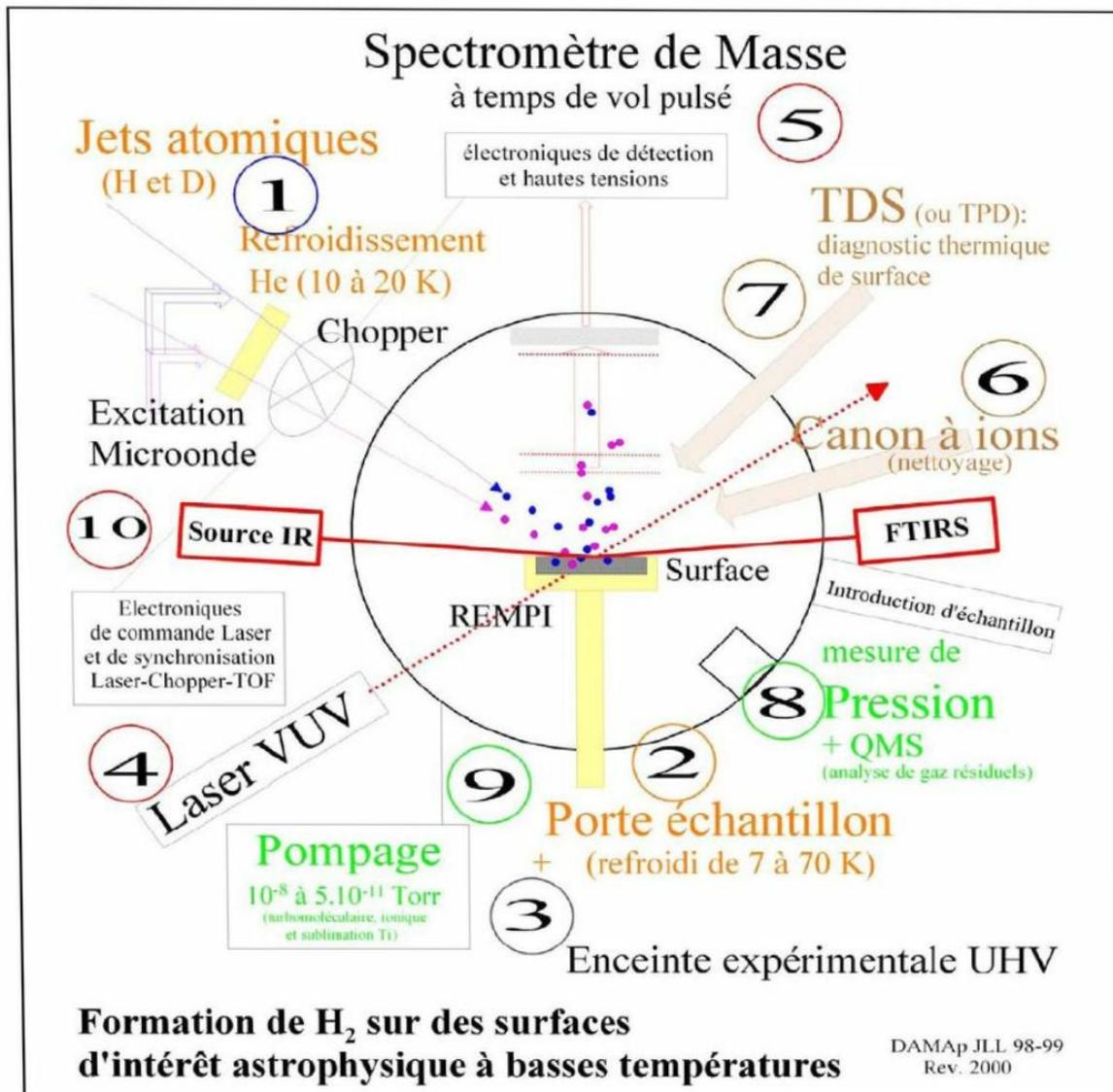


FIG. 1.1 – Schéma de l'expérience FORMOLISM, composée de : (1) Jets atomiques, (2) Porte échantillon, (3) Enceinte à vide, (4) Laser ultra violet, (5) Spectromètre de masse à temps de vol, (6) Canon à ions, (7) Diagnostic thermique de surface (TDS), (8) Gauges de pression, (9) Un système de pompage, (10) Une source infrarouge plus un FTIR

Figure 2 : Schéma du FORMOLISM, tiré de la thèse de Saoud Baouche

4) Etude expérimentale des interactions particules/surface

A) Adsorption/Désorption

Lorsqu'une particule s'approche d'une surface (à plusieurs centaines de mètres par seconde, soit plusieurs angströms par picoseconde), plusieurs réactions sont possibles. S'il n'y a pas ou peu d'interaction, la particule est réfléchi, c'est-à-dire diffusée quasi instantanément. En cas d'interaction plus forte, la particule peut être adsorbée, c'est à dire collée sur la surface, par des forces de nature soit physique (physisorption) soit chimique (chimisorption), soit définitivement, soit temporairement. Dans ce dernier cas, la particule adsorbée se libèrera de la surface lors d'un processus de désorption et pourra être détectée par le QMS.

Ainsi, l'adsorption a lieu lorsque la particule incidente interagit fortement avec la surface, c'est-à-dire lorsque son temps de résidence devient non négligeable ($> 10^{-7}$ s). On parle alors d'adsorption, et les échanges d'énergie sont suffisamment importants pour que la particule, lorsqu'elle désorbe, ait perdu toute mémoire de son état initial (énergie cinétique, angle d'incidence...), autrement dit la particule a été thermalisée sur la surface.

Le taux de désorption s'exprime souvent par une loi d'Arrhenius simple de la forme :

$$K(T) = A \exp(-E_{des} / K_B T_s)$$

où A est un facteur pré-exponentiel, représentatif par exemple, du taux maximal de réaction limitée par la diffusion dans la désorption recombinative, E_{des} l'énergie de désorption et T_s la température de la surface.

Cette loi met en évidence la dépendance de la constante de la vitesse de relation avec la température.

B) TPD (Thermal Program Desorption)

Lors d'une expérience de TPD, la température de surface est accrue régulièrement à des vitesses de l'ordre de quelques Kelvin par seconde permettant un suivi de la quantité des molécules désorbées. Et suivant l'évolution des température de desorption observées on a accès à la cinétique de desorption des espèces. Car l'une des caractéristique très importante dans le régime ultravide est la rapidité avec laquelle une surface va se retrouver couverte d'une couche de gaz d'une molécule d'épaisseur : une monocouche ou Monolayer (ML).

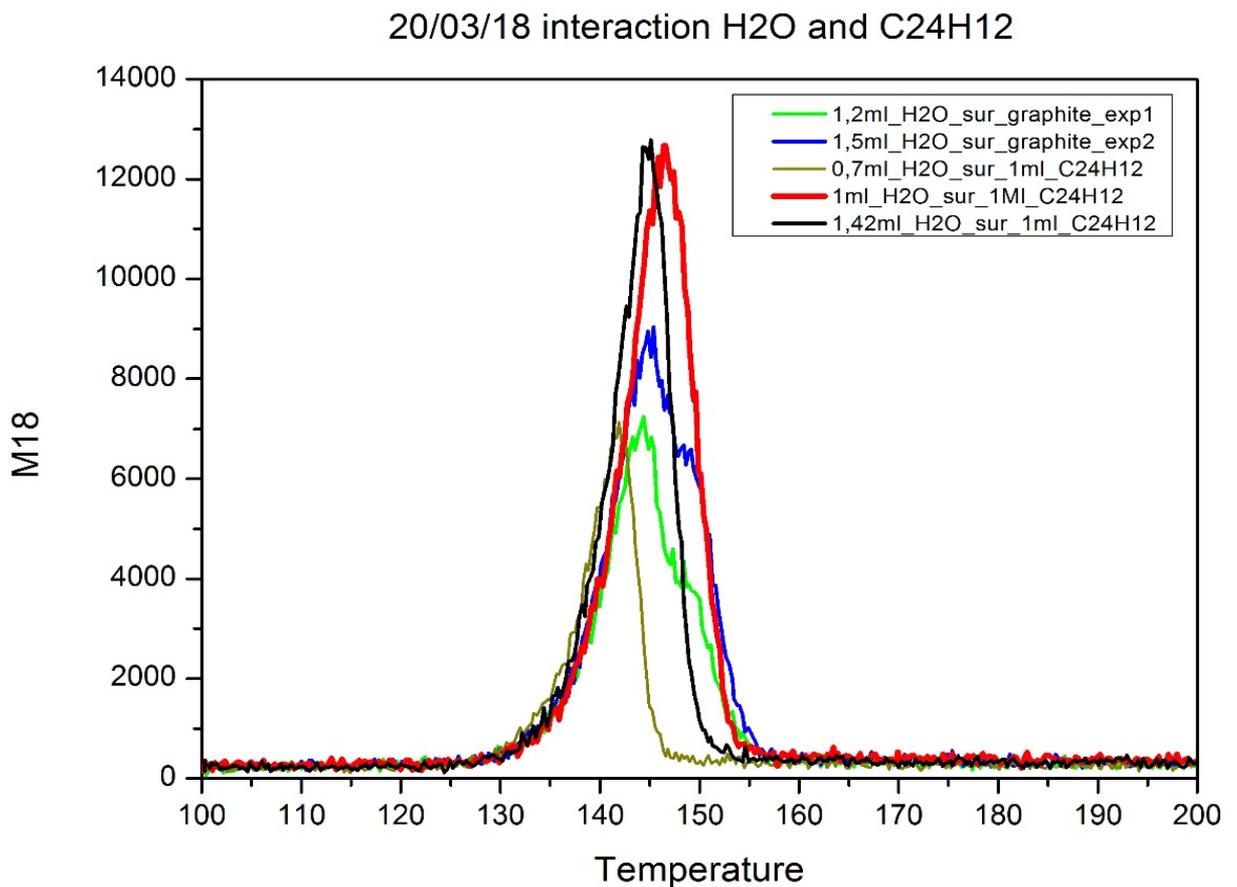


Figure 3 : Interaction H2O/coronene. Les courbes de désorption des espèces H2O/PAH et H2O/HOPG en fonction de la Temperature met en évidence la différence de désorption selon que H2O est sur le graphite ou sur le coronène. Le coronene (C24H12) présente une faible interaction a l'eau, ce qui explique sa forte désorption.

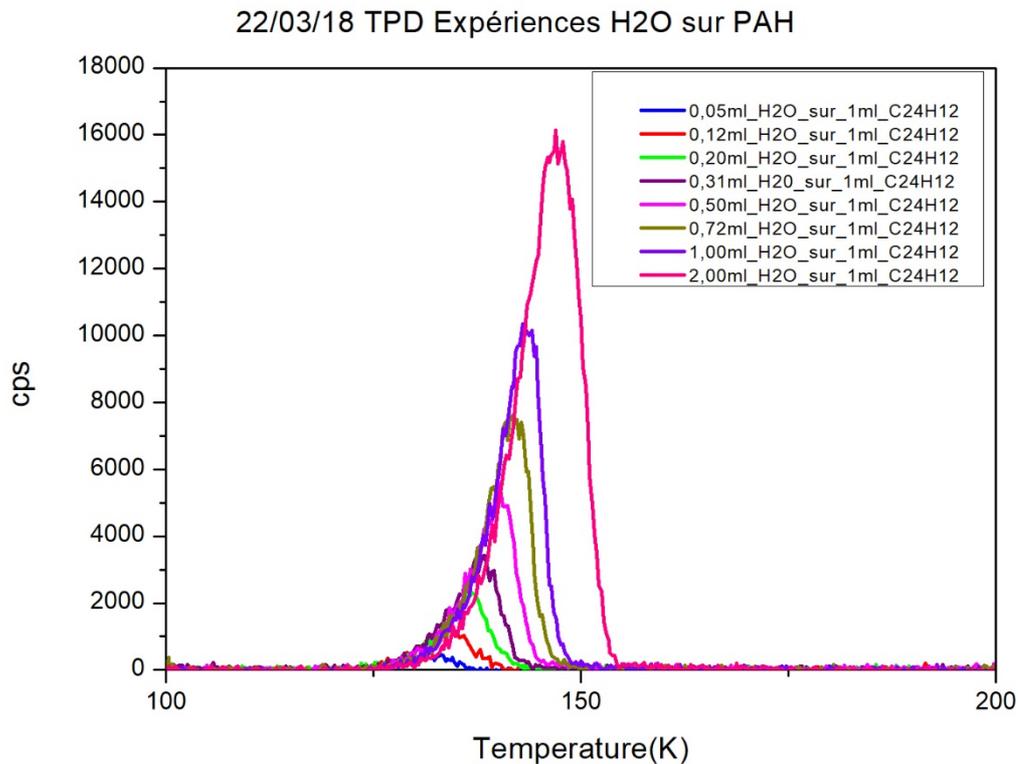


Figure 4 : Interaction H₂O/PAH : les désorptions multiples de H₂O en différentes quantité, permettent d'identifier très distinctement la monocouche et la multicouche.

L'alignement des pentes croissantes qui se confondent, traduit la désorption des multicouches. En effet en regime multicouche, les molecules qui desorbent le font sur les mêmes interfaces de liaison donc ce sont les mêmes énergies de liaisons qui sont mises en jeu.

La descente des spectres montre clairement une divergence, un decalage. C'est la monocouche.

Conclusion

On a longtemps considéré que l'espace situé entre les étoiles, le milieu interstellaire, était vide. Le milieu interstellaire est en effet un milieu extrêmement ténu en comparaison de l'atmosphère terrestre. La masse de la matière le constituant ne représente que 5% de celle des étoiles et seulement 0.5% de la masse totale de la galaxie.

Ce MIS, abrite une chimie interstellaire active et complexe en perpétuel changement. Par exemple les rayons cosmiques émis en continu, constitués surtout de protons à hautes énergies, jouent un rôle fondamental dans les étapes réactionnelles initiales se déroulant en phase gazeuse interstellaire notamment via la réaction : $H_2 + H^+$ donnant H_3^+ .

La poussière interstellaire se révèle cruciale au sein du milieu interstellaire, et plus particulièrement de sa phase dense. En écrantant le rayonnement stellaire au sein des nuages denses, les poussières protègent les espèces chimiques moléculaires de la dissociation.

De plus l'importance des poussières ne se limite pas à leur rôle de catalyseur de la chimie interstellaire mais elles peuvent également moduler la formation stellaire. Mestel & Spitzer (1956) démontrèrent que les poussières pouvaient, en écrantant le rayonnement stellaire, diminuer de manière drastique la fraction d'ionisation à l'intérieur du nuage et permettre ainsi son effondrement gravitationnel par diffusion ambipolaire jusqu'à la formation d'étoiles.

Il est important de noter que la masse du milieu interstellaire et des étoiles ne représentent pas 100% de la masse totale de la galaxie. Une partie de la masse de la galaxie n'a toujours pas été détectée. La piste actuelle concerne la matière noire. Néanmoins, la faible quantité de matière du MIS est très importante car c'est à partir de celle-ci, et notamment de l'hydrogène atomique et moléculaire, que se forment de nouvelles étoiles.

Bibliographie

- Thèse de doctorat de Saoud baouche
- Articles et rapports de stages du site Lerma-Cergy
- Heddy Arab. Evolution des poussières interstellaires : apport des données de l'observatoire spatial Herschel. Université Paris Sud
- L'espace interstellaire de François Boulanger :
<http://books.openedition.org/editionscnrs/11545?lang=fr>
- Thèse Vincent Guillet : Évolution des poussières dans les chocs
- Thèse de Ye Wang : Ecoulement dans une pompe à vide turbomoléculaire : modélisation et analyse par voie numérique
- Thèse de Mourad Chehrouri
- Thèse de Régis Bisson