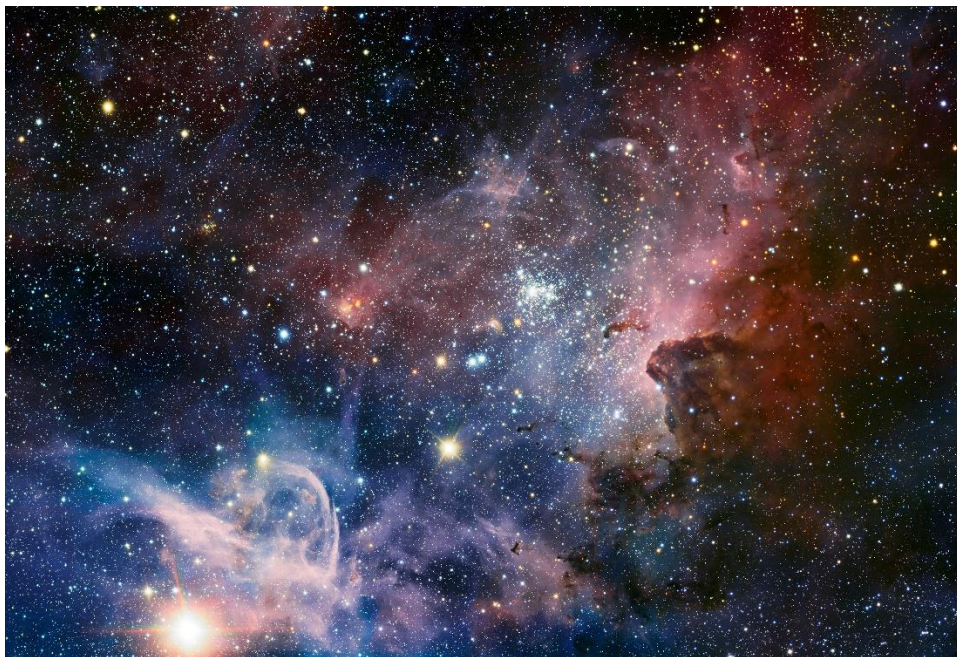


RAPPORT DE STAGE



LERMA

-

Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en
Astrophysique et Atmosphères

Stagiaire : Schmitter Emilie – DU ND

Tuteur de stage : M. Emanuele Congiu

Remerciements

Je tiens à remercier toute l'équipe du laboratoire LERMA, pour leur hospitalité, leur gentillesse et leur accueil.

Je tiens plus particulièrement à remercier M. Emanuele Congiu pour sa bienveillance, sa bonne humeur et ses délicieux cafés (que je doute réussir à faire aussi bien un jour) !

Un grand merci aussi à Mlle Julie Vitorino, qui m'a accompagnée pendant ce stage, a répondu à toutes mes questions, a su merveilleusement bien tout m'expliquer (et m'a à plusieurs reprises laissé verser l'azote liquide pour refroidir le spectromètre IR, tâche que j'ai adoré effectuer aussi souvent que je le pouvais).

Table des matières

Remerciements	2
Réflexion	4
Introduction	4
Partie 1 – Les dispositifs du LERMA.....	5
1) Le milieu interstellaire.....	5
2) Origine des molécules dans le milieu interstellaire	6
3) Chimie sur les grains de poussière interstellaires	7
Présentation de VENUS	9
Partie 2 – Expériences	11
Conclusion.....	16
ANNEXES	17

Réflexion

L'Univers est un milieu fascinant qui recèle encore bien des mystères. Comment le Big Bang est-il arrivé ? Comment les premiers systèmes stellaires se sont-ils créés ? Comment sommes-nous apparus ?

L'origine de la vie est étroitement liée à l'origine de l'Univers, pour la comprendre il faut comprendre le monde qui nous entoure, car comme le dit Victor Hugo dans Les Contemplations, « *Bien lire l'Univers, c'est bien lire la vie* ».

C'est dans une quête d'en apprendre plus sur ce sujet que j'ai souhaité réaliser mon stage dans un domaine en lien avec le spatial.

Ne connaissant que très peu de laboratoires d'astrophysique, j'ai été très curieuse lorsque j'ai entendu parler du laboratoire, par le biais de M.Congiu lors d'un de ses cours de physique.

C'est donc naturellement que je lui ai demandé si je pouvais effectuer mon stage, sous sa tutelle, dans ce milieu et c'est avec un grand plaisir que j'ai reçu la nouvelle de son acceptation.

Introduction

Dans le cadre de la validation de mon parcours d'études au sein du Diplôme Universitaire – Nouveau Départ (DU ND), j'ai été amené à réaliser un stage de 5 semaines auprès du laboratoire LERMA ; Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique et Atmosphères.

Le LERMA est une unité mixte de recherche commune au CNRS et à 3 établissements d'enseignement supérieur : l'Observatoire de Paris, la Sorbonne Université et l'Université Paris-Cergy.

Les recherches sont réparties en 4 pôles :

- Galaxies et cosmologies
- Dynamique des milieux interstellaires et plasmas stellaires
- Molécules dans l'Univers
- Instrumentation et télédétection

J'ai réalisé mon stage au laboratoire de l'Université de Paris-Cergy, sur le site de Neuville, appartenant au pôle « Molécules dans l'Univers ».

Le LERMA-Cergy est spécialisé dans l'étude de la formation et de la réactivité des molécules dans les conditions du milieu interstellaire, sur les grains de poussière stellaire, et s'intéresse aux mécanismes réactionnels à l'origine des molécules simples et complexes formées à partir des constituants de ce milieu qui sont l'hydrogène (H), l'oxygène (O), l'azote (N) et le carbone (C).

Au cours de ces 5 semaines, j'ai eu l'occasion d'observer les mécanismes de cette chimie interstellaire grâce aux nombreuses expériences faites en laboratoire par le biais de deux dispositifs reconstituant les conditions du milieu interstellaire : VENUS et FORMOLISM. J'ai principalement observé les expériences sur VENUS, car étant plus utilisée.

Partie 1 – Les dispositifs du LERMA

Pour comprendre les expériences menées au LERMA, et étudier le comportement des molécules dans l'Univers, il faut réussir à comprendre les conditions de l'espace interstellaire, que le laboratoire essaye de reproduire au plus près.

1) Le milieu interstellaire

Le milieu interstellaire (MIS) est la matière qui, dans une galaxie, remplit l'espace entre les étoiles et se fond dans le milieu intergalactique environnant. Il est un mélange de gaz (ionisés, atomiques et moléculaires), de rayons cosmiques et de poussières.

C'est un milieu à forte inhomogénéité, comprenant des valeurs très variées de densité et de température : de moins 1 à plus de 10^8 particules par cm^3 et de 10K à plusieurs millions de degrés. Le gaz s'y structure sous la forme de « phases » correspondant aux états stables possibles de la matière, et distinguées par l'état d'ionisation qu'y prend l'hydrogène (ionisé, atomique (neutre), moléculaire), et par la température d'équilibre (chaud $> 10^5 K$, tiède, froid $< 100K$).

- Régions chaudes du MIS = **nuages interstellaires diffus** (surfaces sèches)

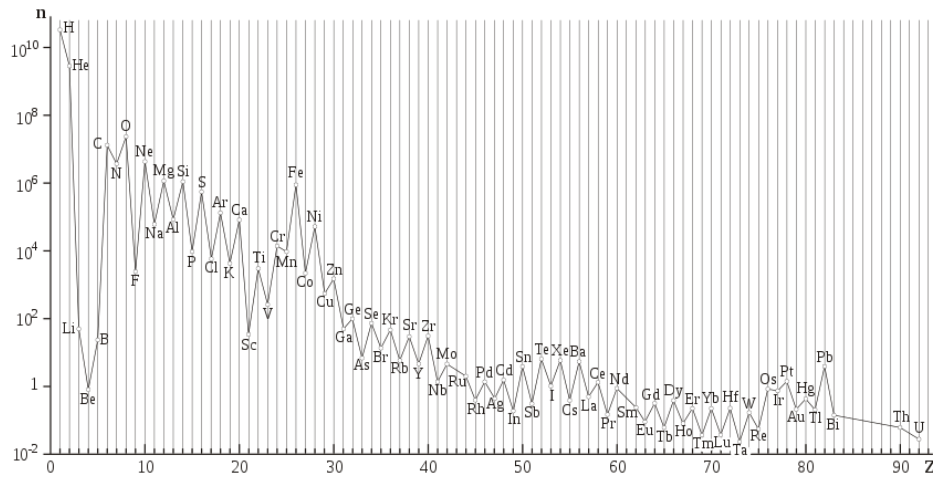
- Régions froides du MIS = **nuages interstellaires denses** (surfaces recouvertes de glace) (*cf annexe 1*).

Un nuage interstellaire est le nom donné aux accumulations de gaz et de poussières dans notre Galaxie. C'est dans ces nuages que naissent les systèmes stellaires. Comptant quelques dizaines de milliards d'atomes par mètre cube (par opposition à notre atmosphère, qui en compte 25 millions de milliards de milliards), et s'étendant sur des centaines d'années-lumière, un nuage contient l'équivalent de plusieurs milliers de fois la masse du Soleil en matière gazeuse. Principalement composé d'hydrogène, l'hélium étant le second élément le plus abondant, il contient également des traces d'éléments plus lourds, tels le carbone, l'azote, et le fer. L'hydrogène contenu dans un nuage interstellaire peut, selon la densité, la taille et la température du nuage, être neutre (région HI), ionisé (région HII) ou moléculaire (nuage moléculaire). (*cf annexe 2*)

2) Origine des molécules dans le milieu interstellaire

Tous les éléments que nous connaissons aujourd'hui proviennent de 2 sources :

- La nucléosynthèse primordiale (datant d'il y a 13,8 milliards d'années), qui explique l'abondance des éléments légers. Elle s'est manifestée à l'échelle de l'Univers tout entier, durant les premières minutes suivant le Big Bang. Elle est responsable de la première apparition des noyaux légers comme l'hélium (He), le deutérium (D) et du lithium (Li).
- La nucléosynthèse stellaire (100 Ma plus tard), qui a lieu dans les étoiles. Durant toute leur existence, les étoiles synthétisent la plupart des éléments de numéro atomique situé entre ceux du lithium et du fer par fusion nucléaire. Pendant la phase d'explosion, les étoiles massives des processus plus complexes produisent les autres éléments plus lourds que le fer.



Abondance relative des éléments chimiques dans l'Univers

Crédits : Observatoire de Paris

L'hydrogène et l'hélium sont supposés compter respectivement pour environ 74 et 24% de toute la matière baryonique (matière ordinaire) de l'Univers. Par exemple, la voie lactée n'est formée en masse que de 2% d'éléments autres que l'hydrogène et l'hélium. (*cf annexe 3*)

3) Chimie sur les grains de poussière interstellaires

Le milieu interstellaire étant très peu dense, les réactions entre molécules et atomes sont rares. C'est dans les nuages moléculaires que se passe la majorité des réactions chimiques.

Les grains de poussières du milieu interstellaire sont constitués d'un noyau froid de silicates et/ou de matière carbonée, dont la taille est nettement inférieure au micromètre. Ces noyaux ont été formés lors de l'éjection de matière provenant soit de vents stellaires, dans les étoiles en fin de vie, soit de l'explosion de supernova. Ils sont baignés par le gaz interstellaire froid, de température comprise entre 100 et 10 K. De ce fait, les atomes ou molécules qu'ils rencontrent peuvent être piégés par condensation sur leur surface et forment alors un manteau de « glace » sur lequel vont se produire les réactions chimiques, qui seraient très rares en phase gazeuse du fait de la très faible densité.

Les atomes d'hydrogène qui se déplacent dans le milieu interstellaire du fait de l'agitation thermique, entrent en collision avec un grain de poussière (*cf annexe 4*) et se collent à sa surface : c'est le phénomène d'adsorption (phénomène de surface par lequel des atomes, des ions ou des molécules (adsorbats) se fixent sur une surface solide : l'adsorbant).

Ils sont très mobiles sur cette surface, se déplaçant rapidement d'un site énergétique à l'autre. C'est le principe de diffusion : c'est-à-dire le déplacement des atomes vers des sites préférentiels où leur énergie d'adsorption est importante, pour y rester le plus longtemps possible. Si d'autres sites offrent une meilleure énergie d'adsorption, les atomes peuvent se déplacer jusqu'à atteindre ces sites).

Deux atomes d'hydrogène présents au même moment sur un même site peuvent se combiner pour former une molécule, le grain de poussière servant de catalyseur.

La molécule formée peut alors être réinjectée dans l'espace : c'est le processus de désorption (émission de molécules de gaz ou de liquides préalablement adsorbées par la surface d'un solide).

On distingue deux processus d'adsorption : la chimisorption et la physisorption.

- La chimisorption est le processus d'adsorption à haute température où l'interaction entre atomes ou molécules est très importante et très forte, résultant en des liaisons covalentes.
- La physisorption est le processus d'adsorption à basse température où l'interaction entre atomes ou molécules est faible, conduisant à une polarisation molécules/surface et à un placement en miroir.

Au LERMA on utilise le principe de physisorption, grâce au cryostat qui permet d'atteindre des températures très froides, de l'ordre de 10°K, soit -263°C, afin que les molécules soient adsorbées sur la surface en or.

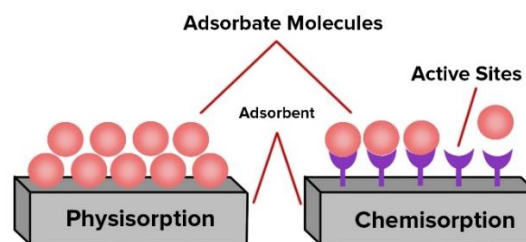


Schéma des phénomènes de physisorption et chimisorption

Présentation de VENUS

Les conditions du milieu interstellaire sont reproduites au LERMA grâce à deux machines :

- FORMOLISM (FORmation of MOLEcules in the InsterStellar Medium), développé depuis 2001.
- VENUS (VErs de NoUvelles Synthèses), développé depuis 2011.

Durant mon stage, j'ai exclusivement participé aux expériences sur VENUS.

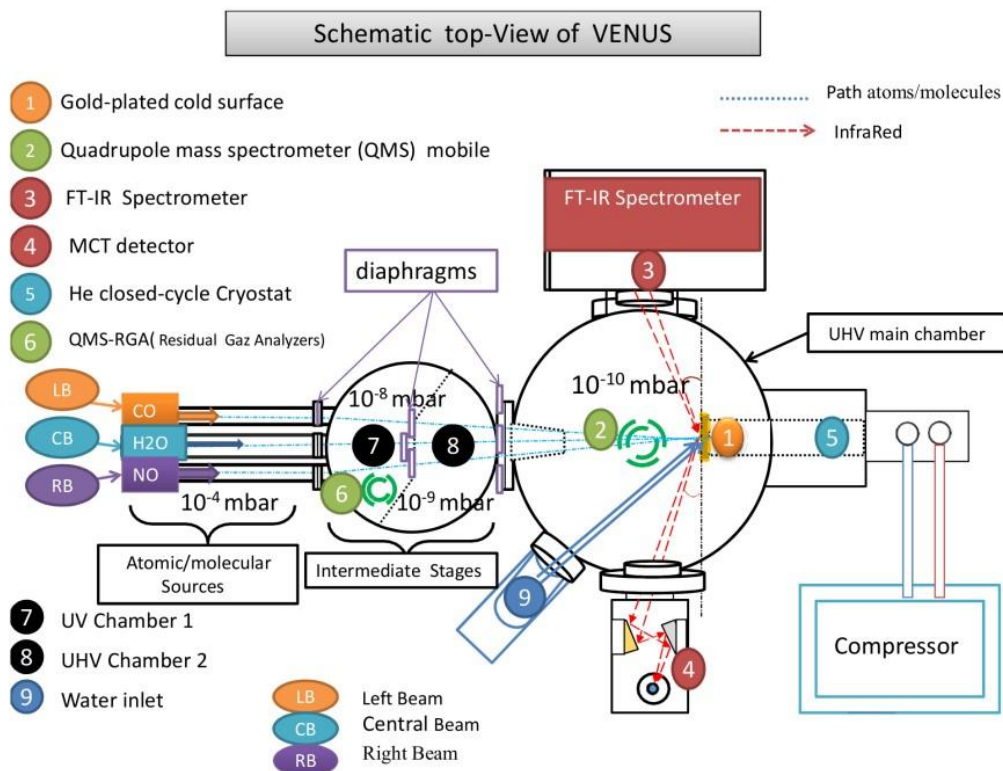


Schéma du dispositif VENUS

VENUS est composée d'une chambre principale (ChP) et de deux chambres intermédiaires (Ch1 et Ch2). La chambre principale représente le lieu de déroulement des réactions chimiques pendant les expériences. Elle est aussi appelée enceinte ultravide, du fait de sa très basse pression (inférieure à 10^{-10} mbar), qui est obtenue grâce à des pompes très puissantes.

Cette chambre principale est reliée aux chambres 1 et 2, qui sont séparées en 2 par une valve que l'on peut ouvrir ou fermer.

Les expériences dans la chambre principale se font sur une surface en or (porte-échantillon), faisant 9mm de diamètre.

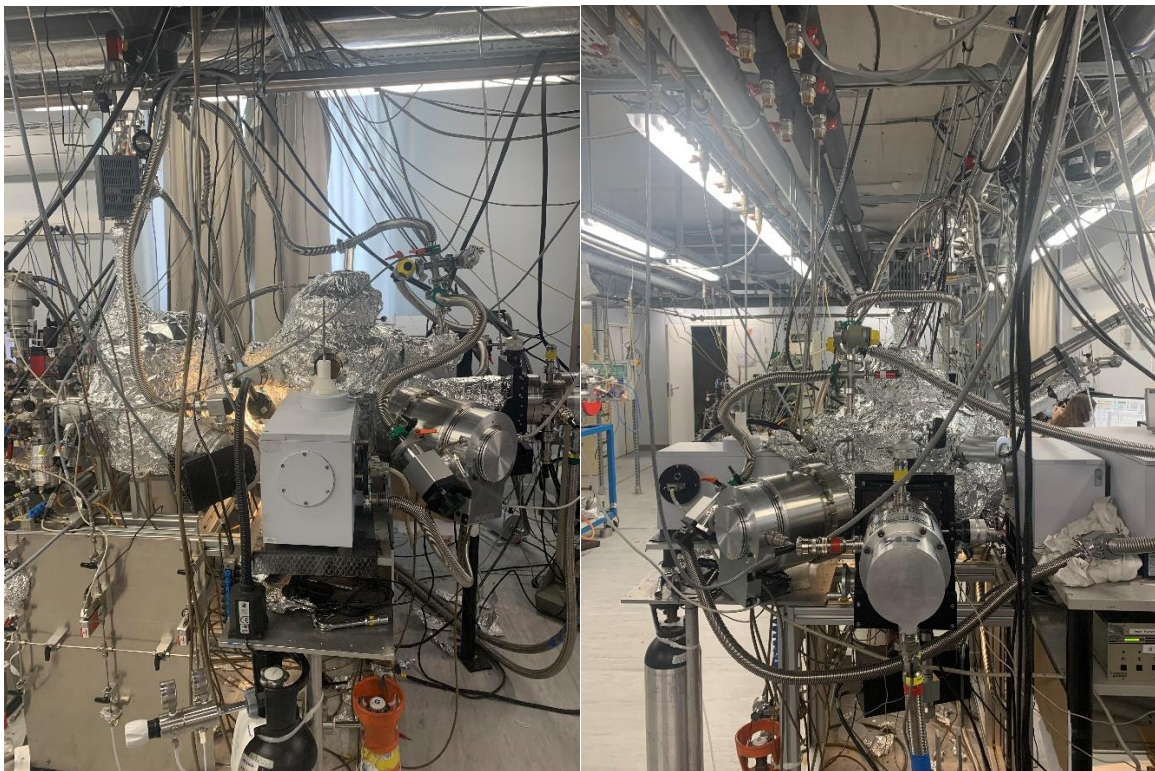
Pour atteindre les températures très basses du MIS (autour de 10K soit -263°C), la surface en or est refroidie par un cryostat, fonctionnant avec de l'hélium liquide.

Le cryostat peut aussi réchauffer le porte-échantillon par le biais d'une résistance, pouvant aller aux alentours de 350°K (soit 77°C).

Les molécules utilisées pour les expériences sont introduites par le biais de jets. Pendant mon stage, nous les avons introduites par :

- Un jet central (central beam, CB)
- Un jet du haut (top beam, TB)

Leur flux peut être contrôlé par un régulateur automatique (utilisé par exemple pour les dépôts d'éthylamine $C_2H_5NH_2$), ou par une vanne aiguille (utilisée par exemple pour les dépôts de CO_2). En faisant varier la pression de chaque jet, on contrôle la quantité de molécules envoyées.



VENUS vue de côté et de dos

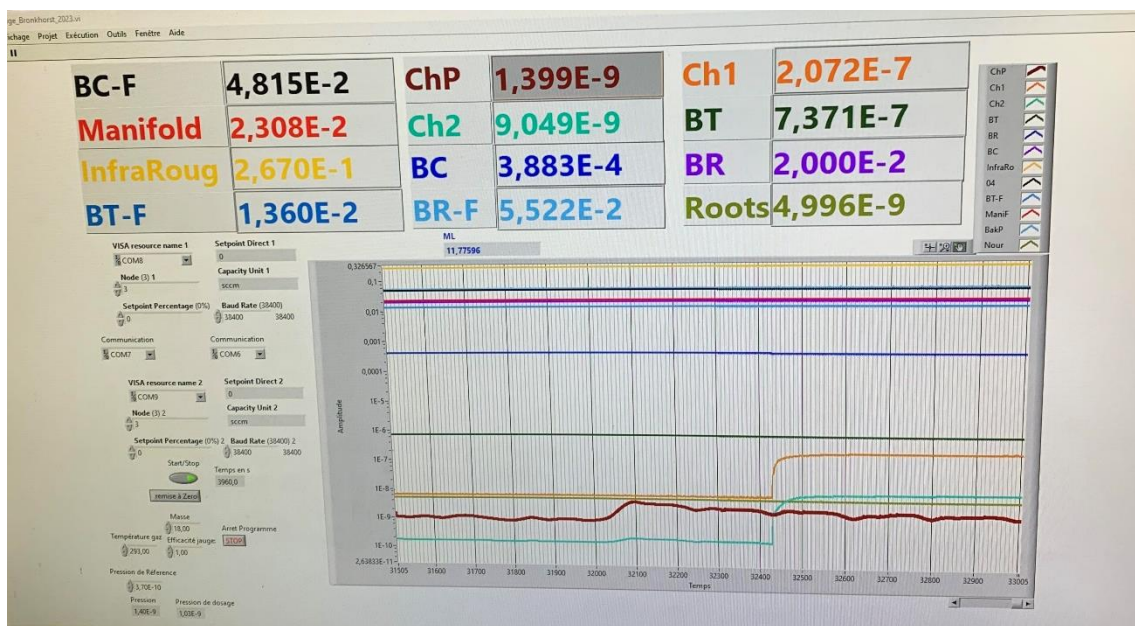
Partie 2 – Expériences

Durant ces 5 semaines de stage, j'ai eu la chance de pouvoir assister à de nombreuses expériences, en collaboration avec Julie Vitorino (doctorante au LERMA CY) et Jessica Perreiro (doctorante à la Universitat Autònoma de Barcelona).

Les résultats des expériences sont mesurés grâce à un spectromètre infrarouge, situé sur le côté de la chambre principale, dont le faisceau de rayons est dirigé vers la surface en or, et grâce à un spectromètre de masse quadripolaire (QMS pour Quadrupole Mass Spectrometer), positionné à l'intérieur de la chambre principale.

Une journée type commence par l'allumage du cryostat, qui est situé au sous-sol.

En premier lieu, il faut laisser la pression dans les différentes parties de VENUS se stabiliser.



Écran d'affichage des différentes pressions

Les pressions que nous regardons le plus sont les suivantes :

ChP = pression chambre principale

Ch1/Ch2 = pression chambres 1et 2

BC = pression jet central (central beam)

BR = pression jet droit (right beam)

BT = pression jet du haut (top beam)

Si en faisant un background du QMS on se rend compte qu'il y a beaucoup d'espèces chimiques, on procède à un dégazage de ce dernier. En effet les molécules peuvent s'accumuler sur la surface en or, et il faut parfois réaliser un étuvage complet afin de les éliminer complètement.

L'étuvage est un procédé consistant à chauffer toute la surface du dispositif à une température suffisante pour propager la chaleur jusqu'à l'intérieur des chambres, afin de permettre à l'eau de s'évaporer et aux hydrocarbures de se détacher des parois en acier.

Le détecteur infrarouge a besoin d'être refroidi à l'azote liquide pour son fonctionnement. Tous les matins nous versions donc de l'azote dans le boîtier à l'aide d'un entonnoir.



Refroidissement du système infrarouge

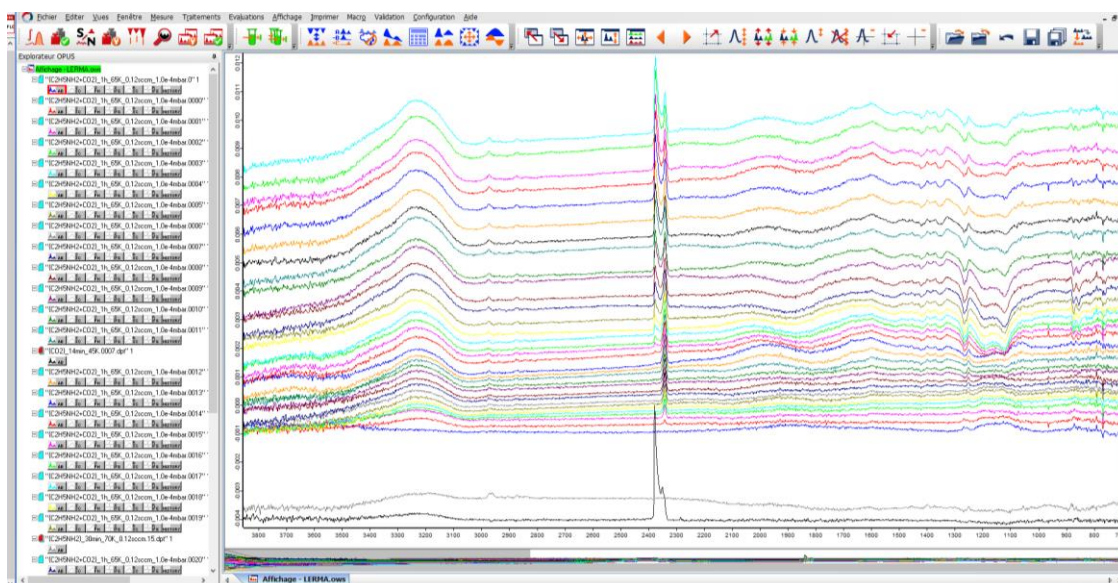
Les jets de fumée qui sortent sur le côté permettent de réguler la pression. Un dégazage naturel se fait lors du refroidissement, pouvant projeter une petite quantité d'azote liquide autour de l'entonnoir.

Après cette étape, il faut tester les différents jets pour s'assurer qu'il n'y a pas de fuite pouvant compromettre les expériences de la journée. Par exemple si nous devons expérimenter

l'éthylamine ($C_2H_5NH_2$) sur l'eau (H_2O), nous testions les deux jets séparément en envoyant des molécules et en s'assurant que la pression respective à chacun des jets restait stable.

S'il y a suspicion de fuite, de l'éthanol est appliqué sur les différentes parties adjacentes au jet. Si l'on voit apparaître une augmentation de la masse de l'éthanol à l'écran, c'est que la fuite est confirmée.

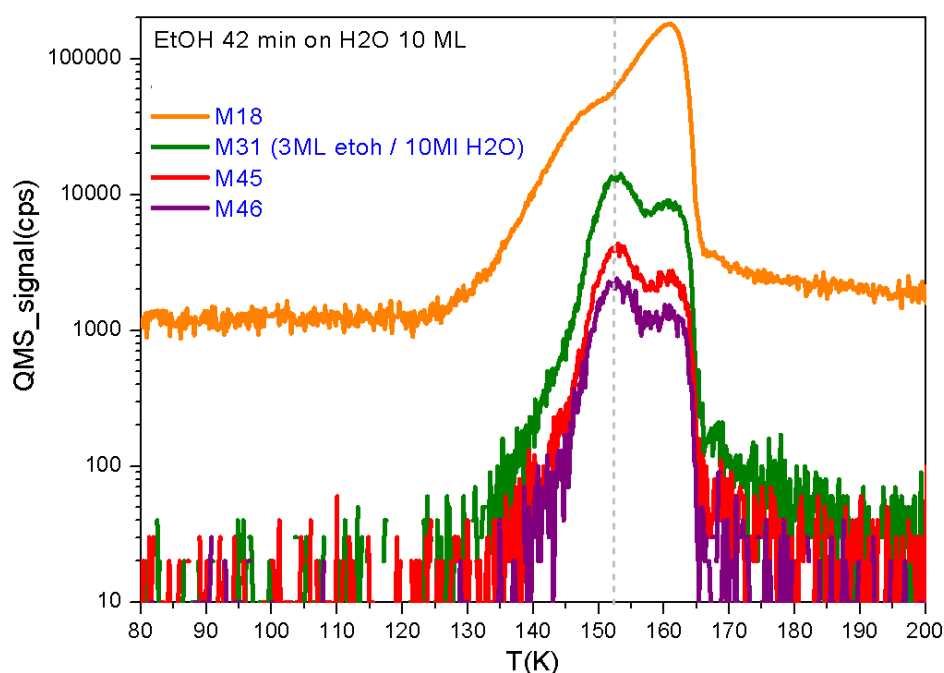
Une fois que cela est fait, nous pouvons commencer la déposition de molécules, séparément l'une après l'autre (exemple : $H_2O / C_2H_5NH_2$) ou en Co-dépôt (exemple $CO_2 / C_2H_5NH_2$).



Spectres d'absorption infrarouges obtenus pendant la co-déposition de l'éthylamine ($C_2H_5NH_2$) avec le dioxyde de carbone (CO_2).

Après la déposition, nous effectuons une courbe de TPD (Thermal Programmed Desorption) obtenue grâce au QMS. Ce procédé consisté à augmenter progressivement la température afin de faire apparaître les différentes chimies entre les molécules ainsi que la désorption de ces dernières sous la forme d'une courbe.

Par exemple, l'eau et l'éthanol (C_2H_6O) se lient très fortement et désorbent en même temps, alors qu'individuellement, leur température de désorption n'est pas la même.



Courbe TPD de l'éthanol (dépôt de 42 min) sur l'eau (dépôt de 50 minutes)

Des expériences de calibration pouvaient aussi être réalisées, préalablement au dépôt afin de déterminer le temps de déposition nécessaire afin de former une monocouche sur la surface.

Ces calibrations sont souvent réalisées lorsqu'on effectue un changement d'espèce à déposer (exemple : remplacement de la fiole d'éthanol par une fiole d'éthylamine), car même si ces molécules ont déjà été étudiées, les conditions de pression changent au fil du temps, nécessitant un nouveau calibrage.

À la suite de ce TPD, une nouvelle expérience est réalisée, en changeant quelques paramètres, tel que le temps (exemple : dépôt de 10 minutes de l'éthanol au lieu de 42 min).

En collaboration avec Jessica, les expériences avaient pour but de confirmer ses calculs de chimie quantique sur les forces de liaison entre atomes (« binding energy ») et leur comportement. Une partie calcul était donc préalablement nécessaire aux expériences.

Un dégazage de l'eau était parfois nécessaire avant de tester les jets (en cas de changement de fiole ou après une inutilisation prolongée). Dans ce cas, la fiole était plongée 3 à 4 fois dans de l'azote liquide afin que l'eau passe de l'état liquide à solide, puis la fiole était ensuite chauffée à l'aide d'un pistolet à air chaud afin qu'elle retrouve sa forme liquide et que les gaz prisonniers

s'évaporent. La fiole étant reliée au manifold (pompe), les gaz indésirables étaient aspirés et évacués.



Dégazage de la fiole d'eau dans de l'azote liquide

Conclusion

Ce stage m'a permis de découvrir le domaine de l'astrochimie, qui m'était inconnu jusqu'à ce jour. Quand on entend le terme « laboratoire d'astrophysique », on ne s'imagine pas vraiment quelles expériences sont menées à l'intérieur, ou ce que font les personnes qui y travaillent.

Le LERMA fait partie du peu de laboratoires qui réalisent des expériences, grâce à des dispositifs recréant les conditions du milieu interstellaire. D'habitude, en astrophysique on travaille essentiellement sur ordinateur, à faire des calculs. Le fait de pouvoir porter une blouse et de participer activement à des expériences est quelque chose que j'ai beaucoup apprécié. Découvrir ce que font réellement les chercheurs et comment ils organisent leur journée a été très instructif.

La recherche de molécules pré-biotiques, permettant d'expliquer comment s'est formé la vie sur Terre, est vaste et complexe.

S'imprégner du milieu a d'abord été un défi, étant donné la quantité d'informations à assimiler. C'est ce qui a motivé mon intérêt lors de la première semaine de stage à effectuer des recherches sur le sujet, recherches que j'ai regroupé dans un dossier de 48 pages tant il y avait à découvrir.

L'Univers ne pourra jamais être étudié dans son entièreté, raison pour laquelle il est considéré comme infini. Pourtant, c'est grâce au travail sans relâche des chercheurs, comme au LERMA, que petit à petit, les briques permettant de construire l'édifice de la connaissance, s'assemblent.

ANNEXES

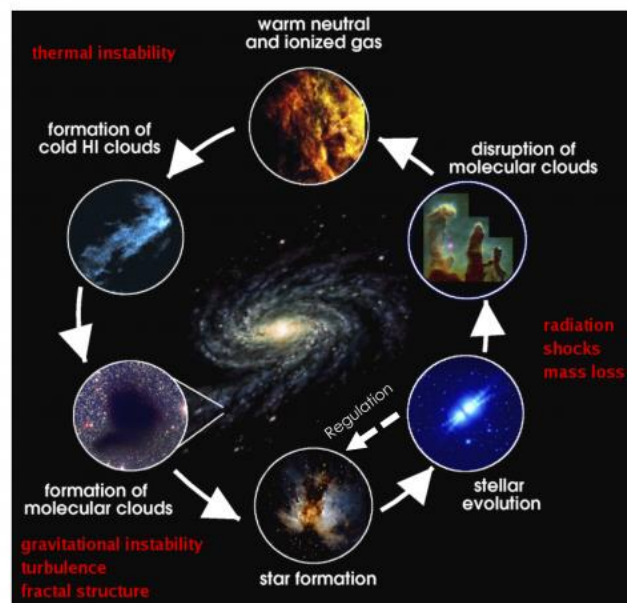
Annexe 1

Phases du milieu interstellaire

Phase	Densité cm ⁻³	Température K	Masse M _⊙	Traceur principal
Milieu ionisé (HII) chaud = HIM (Hot Ionized Medium)	~0.005	≥ 3 10 ⁵	10 ⁸	Rayons X, OVI
Milieu ionisé (HII) tiède = WIM (Warm Ionized Medium)	0.6	8000	10 ⁹	H α , NII, SII, radio
Milieu atomique (HI) tiède = WNM (Warm Neutral Medium)	0.5	5000	2X10 ⁹	HI 21 cm, C ⁺ , O
Milieu atomique (HI) froid = CNM (Cold Neutral Medium)	30	100	2X10 ⁹	HI 21 cm (abs)
Nuage moléculaire (H ₂) = GMC (Giant Molecular Cloud)	100-10 ⁸	10-100	10 ⁹	CO, H ₂ , etc. (em et abs)
Régions HII	0.3-10 ⁴	10 ⁴	5x10 ⁷	H α , NII, SII, radio

Crédit: Observatoire de Paris

Annexe 2



Crédit: 2013 Steward Observatory Radio Astronomy Laboratory

La première moitié du cycle (du haut en bas de la figure, dans le sens inverse des aiguilles d'une montre) est une séquence de condensation depuis la phase diffuse et tiède vers le gaz moléculaire froid et dense où vont se former les étoiles.

La deuxième moitié du cycle (de bas en haut dans le sens inverse des aiguilles d'une montre) est une séquence de ré-expansion où les effets de la mécanique des étoiles ramènent le gaz dans la phase diffuse.

Annexe 3

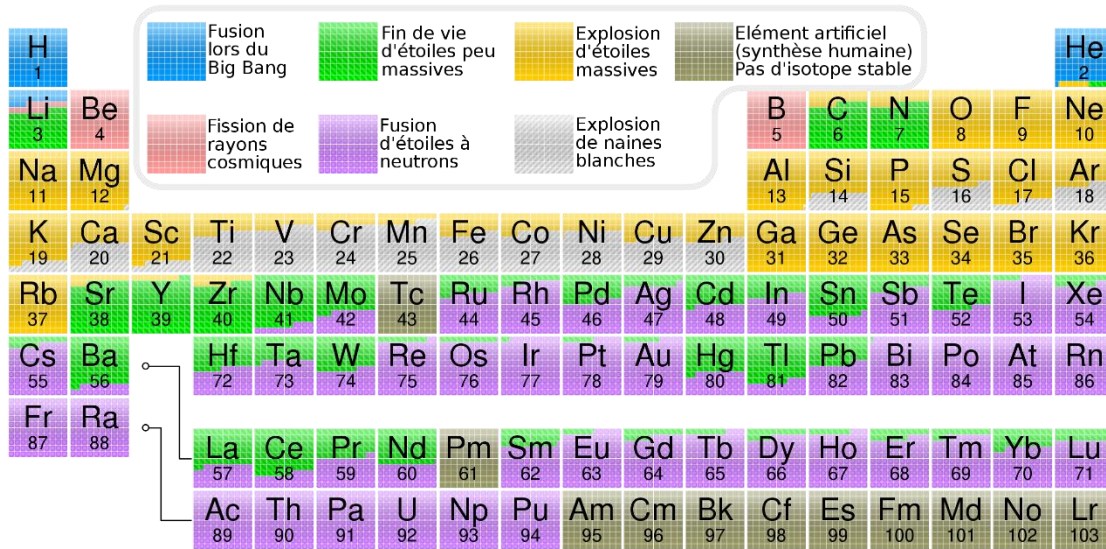
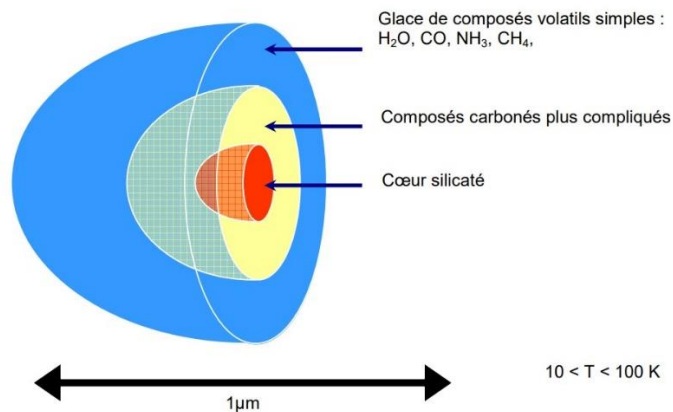


Tableau périodique de la création des molécules dans le milieu interstellaire

On a identifié plus de 200 molécules dans le milieu interstellaire, dont notamment du glycolaldéhyde, un sucre nécessaire à la synthèse de l'ARN.

Annexe 4

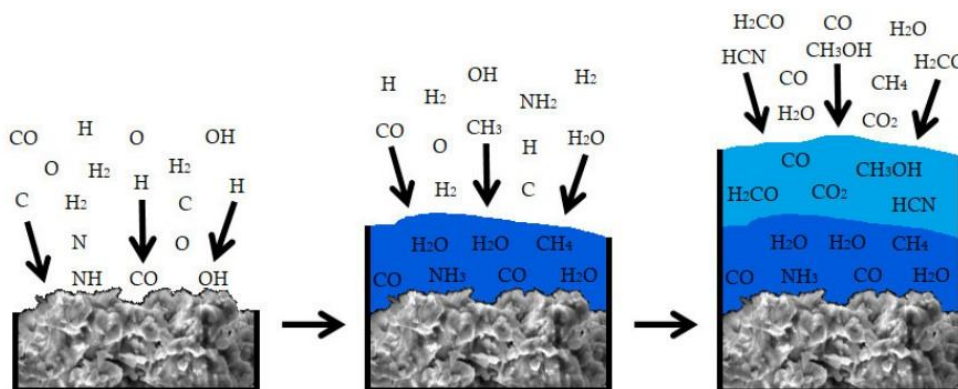
Modèle de grain de poussière interstellaire



Crédits : JP. Maratrey – *Astrochimie*, août 2007

Annexe 5

La chimie en phase solide se fait dans les régions où la matière est la plus condensée : les nuages moléculaires denses.



Adsorption des molécules à la surface d'un grain de poussière interstellaire

Crédits : Hope Ishii, University of Hawaii

Annexe 6



Dispositif FORMOLISM

