

# OBSERVER LES MOLÉCULES DANS L'ESPACE

Germain Lesœur

## Partie des programmes de physique-chimie associée

Programme de spécialité physique de première : Partie 3.A. Identification des groupes caractéristiques par spectroscopie infrarouge

Programme de spécialité physique de terminale : Partie 1.B. Analyser un système chimique par des méthodes physiques

**Mots-clés** : espace, spectroscopie, molécules, télescopes

## INTRODUCTION

À ce jour, les astronomes ont détecté et identifié près de 200 espèces moléculaires différentes dans l'espace. La quête spatiale continue et les questions sont multiples. Où se situent ces molécules ? Comment les observe-t-on ? Comment sont-elles apparues ? Ultimement, il est bien question d'établir, ou non, un lien de causalité entre les molécules interstellaires, les molécules terrestres et l'origine de la vie sur Terre.

## CARACTÉRISTIQUES DU MILIEU INTERSTELLAIRE

### Où se trouvent les molécules dans l'espace ?

L'espace est loin d'être complètement vide, on y trouve une très grande diversité de milieux à des densités très variables. Dans les galaxies, le milieu le plus commun est le nuage interstellaire, nom générique donné aux accumulations de gaz et de poussières. Dans ces



Figure 1 – Nuage de la Tête de Cheval, dans la grande nébuleuse d'Orion, visible en réflexion. Source : optique : Aldo Mottino & Carlos Colazo, DAC, Córdoba ; infrarouge : Hubble Legacy Archive.

nuages, la densité de particules varie de  $10$  à  $10^3$  voire  $10^6$

particules par centimètre cube. Dans la plupart des cas, bien que peu denses, ces milieux absorbent une quantité de lumière extérieure suffisante pour rendre la structure détectable.

On trouvera également des molécules dans d'autres milieux plus denses : les nébuleuses, zones plus concentrées des nuages interstellaires où naissent les étoiles, mais aussi les atmosphères stellaires et les atmosphères planétaires.

Dans ces milieux, la densité de molécules est parfois si élevée que l'absorption est suffisante pour rendre la structure totalement opaque dans le domaine du visible. La structure devient alors visible par réflexion d'une lumière externe ; c'est le cas de la nébuleuse de la Tête de Cheval (Figure 1).

Pour rappel, l'air à pression atmosphérique possède une masse volumique  $\rho = 1000 \text{ g.m}^{-3}$ . Sa masse molaire moyenne est de  $29 \text{ g.mol}^{-1}$ . On en déduit donc sa densité de particules :

$$N_A \times 1000/29 = 10^{24} \text{ particules.m}^{-3}$$

soit  $10^{18} \text{ particules.cm}^{-3}$ .

## Comment les molécules se forment dans l'espace ?

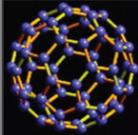
Longtemps les astronomes ont pensé que les conditions physiques dans l'espace interstellaire (très faible densité gazeuse, températures très basses, rayonnement UV intense) entravaient la formation et la survie de toute molécule. Pourtant, il n'en est rien puisqu'on y trouve quelques 200 espèces moléculaires ! Il y a plusieurs raisons à cela.

Les poussières éjectées par les étoiles absorbent efficacement les UV émis par les étoiles lointaines et protègent les molécules de la destruction par photodissociation. La surface de ces poussières peut également agir comme catalyseur à la formation de molécules. D'autre part, les objets astronomiques évoluent sur des centaines de milliers ou millions d'années, ce qui augmente proportionnellement la probabilité d'existence de molécules avec un taux d'apparition faible. Ensuite, la faible densité et les faibles températures diminuent le nombre de chocs et donc les destructions par agitation. Cela rallonge donc paradoxalement la durée de vie de toutes les molécules, notamment les molécules instables dans nos conditions terrestres. À l'inverse, dans les conditions opposées des atmosphères stellaires, température et densité sont suffisamment élevées pour rendre possibles les étapes de formation élémentaires à 3 particules, ce qui n'est pas considéré comme probable dans des conditions terrestres.

Enfin, autour de certaines étoiles extrêmement chaudes, le rayonnement UV d'origine thermique permet la formation de complexes très lourds comme le fullerène (Figure 2) ou d'autres arrangements de cycles benzéniques.

H <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> *	<u>c-C<sub>3</sub>H</u>	C <sub>5</sub> *	C <sub>3</sub> H	C <sub>3</sub> H	CH <sub>3</sub> C <sub>3</sub> N	CH <sub>3</sub> C <sub>4</sub> H	CH <sub>3</sub> C <sub>5</sub> N	HC <sub>3</sub> N
AlF	<u>C<sub>2</sub>H</u>	<u>I-C<sub>3</sub>H</u>	C <sub>4</sub> H	I-H <sub>2</sub> C <sub>4</sub>	CH <sub>2</sub> CHCN	HC(O)OCH <sub>3</sub>	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CN	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO	<u>c-C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>*</u>
AlCl	<u>C<sub>2</sub>O</u>	<u>C<sub>3</sub>N</u>	C <sub>4</sub> Si	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> *	CH <sub>3</sub> C <sub>2</sub> H	CH <sub>3</sub> COOH	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> O	(CH <sub>2</sub> OH) <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OCH
C <sub>2</sub> **	<u>C<sub>2</sub>S</u>	<u>C<sub>3</sub>O</u>	I-C <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> CN	HC <sub>3</sub> N	C <sub>7</sub> H	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CHO	CH <sub>3</sub> OC(O)CH <sub>3</sub>
CH	CH <sub>2</sub>	<u>C<sub>3</sub>S</u>	<u>c-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub></u>	CH <sub>3</sub> NC	CH <sub>3</sub> CHO	C <sub>6</sub> H <sub>2</sub>	HC <sub>7</sub> N	CH <sub>3</sub> CHCH <sub>2</sub> O	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OCH <sub>3</sub>
<u>CH<sup>+</sup></u>	HCN	<u>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub><sup>+</sup></u>	H <sub>2</sub> CCN	CH <sub>3</sub> OH	CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub>	CH <sub>2</sub> OHCHO	C <sub>8</sub> H	<u>i-C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>CN</u>	<u>C<sub>60</sub>*</u>
CN	HCO	NH <sub>3</sub>	CH <sub>4</sub> *	CH <sub>3</sub> SH	c-C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	I-HC <sub>2</sub> H <sup>*</sup>	CH <sub>3</sub> C(O)NH <sub>2</sub>		<u>C<sub>70</sub>*</u>
CO	<u>HCO<sup>+</sup></u>	<u>HCCN</u>	HC <sub>3</sub> N	<u>HC<sub>3</sub>NH<sup>+</sup></u>	H <sub>2</sub> CCHOH	<u>CH<sub>3</sub>CHCHO</u>	<u>C<sub>3</sub>H<sub>2</sub></u>		<u>C<sub>60</sub><sup>+</sup>*</u>
<u>CO<sup>+</sup></u>	<u>HCS<sup>+</sup></u>	<u>HCNH<sup>+</sup></u>	HC <sub>2</sub> NC	NC <sub>2</sub> CHO	<u>C<sub>6</sub>H<sup>+</sup></u>	CH <sub>2</sub> CCHCN	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	CH <sub>3</sub> C <sub>6</sub> H	n-C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> CN
CP	<u>HOC<sup>+</sup></u>	HNCO	H <sub>2</sub> OOH	NH <sub>2</sub> CHO	CH <sub>3</sub> NCO	H <sub>2</sub> NCH <sub>2</sub> CN	<u>CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>SH</u>		<u>HC<sub>11</sub>N</u>
SiC	H <sub>2</sub> O	HNCS	H <sub>2</sub> CNH	C <sub>3</sub> N	HC <sub>3</sub> O	CH <sub>3</sub> CHNH	<u>CH<sub>3</sub>NHCHO</u>		
HCl	H <sub>2</sub> S	<u>HOCO<sup>+</sup></u>	H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O	I-HC <sub>4</sub> H <sup>*</sup>		CH <sub>3</sub> SiH <sub>3</sub>			
KCl	HNC	H <sub>2</sub> CO	H <sub>2</sub> NCN	I-HC <sub>4</sub> N					
NH	HNO	H <sub>2</sub> CN	<u>HNC<sub>3</sub></u>	<u>C-H<sub>2</sub>C<sub>3</sub>O</u>					
NO	MgCN	H <sub>2</sub> CS	SiH <sub>4</sub> *	<u>H<sub>2</sub>CCNH</u>					
NS	MgNC	<u>H<sub>2</sub>O<sup>+</sup></u>	<u>H<sub>2</sub>COH<sup>+</sup></u>	<u>C<sub>4</sub>N<sup>+</sup></u>					
NaCl	N <sub>2</sub> H <sup>+</sup>	<u>c-SiC<sub>3</sub></u>	<u>C<sub>4</sub>H<sup>-</sup></u>	HNCHCN					
OH	N <sub>2</sub> O	CH <sub>3</sub> *	HC(O)CN	SiH <sub>3</sub> CN					
PN	NaCN	<u>C<sub>3</sub>N</u>	HNCNH						
SO	OCS	PH <sub>3</sub>	CH <sub>3</sub> O						
<u>SO<sup>+</sup></u>	SO <sub>2</sub>	HCNO	<u>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></u>						
SiN	c-SiC <sub>2</sub>	HOCN	<u>H<sub>2</sub>NCO<sup>+</sup></u>						
SiO	CO <sub>2</sub>	HSCN	NCCNH <sup>+</sup>						
SiS	NH <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> Cl						
CS	<u>H<sub>2</sub><sup>+</sup> (*)</u>	<u>C<sub>3</sub>H<sup>+</sup></u>							
HF	SiCN	HMgNC							
		HCCO							

TiO	Si <sub>2</sub> C
HD	AlN
FeO	SiNC
O <sub>2</sub>	HCP
<u>CF<sup>+</sup></u>	CCP
<u>SiH</u>	AlOH
AlO	<u>H<sub>2</sub>O<sup>+</sup></u>
<u>OH<sup>+</sup></u>	<u>H<sub>2</sub>Cl<sup>+</sup></u>
<u>CN<sup>-</sup></u>	KCN
<u>SH<sup>+</sup></u>	FeCN
SH	HO <sub>2</sub>
<u>HCl<sup>+</sup></u>	TiO <sub>2</sub>
N <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> N
	<u>ArH<sup>+</sup></u>



**MOLÉCULES INTERSTELLAIRES IDENTIFIÉES AU 1/10/2017**  
(source CDMS)

pas (encore) détecté H<sub>2</sub>NCH<sub>2</sub>COOH (acide aminoacétique ou glycine)

Figure 2 – Liste des molécules observées dans le milieu interstellaire et circumstellaire. Les molécules à ossature carbonée linéaire sont soulignées, les cycles sont en rouge. Les formes portant un groupe caractéristique organique sont en vert. Un modèle 3D du fullerène C<sub>60</sub> est également dessiné.

## Quelles molécules a-t-on identifiées dans le milieu interstellaire ?

À ce jour, plus de 200 espèces moléculaires différentes ont été identifiées par spectroscopie dans le milieu interstellaire (Figure 2). Ces formes moléculaires sont bien différentes de celles observées sur Terre. On y trouve par exemple de nombreux radicaux libres, ou encore plus de molécules à chaînes linéaires carbonées que de cycles organiques à l'inverse des proportions terrestres.

## Les molécules de la vie

Un des objectifs de la recherche de molécules dans l'espace est de déterminer si d'autres planètes possèdent des conditions favorables à la Vie, ou même directement de la Vie.

Pour répondre à cette question, on a commencé par déterminer où il y avait de l'eau et si cette eau ressemblait à l'eau sur Terre, à travers son degré de deutération, rapport de la quantité de deutérium sur la quantité d'hydrogène sans neutron. Si on a pu trouver de l'eau sur Mars, sur Titan et sur de nombreux astéroïdes autour de Jupiter, des mesures infrarouges précises de la sonde Rosetta ont montré que l'eau qui y était présente n'avait pas la même origine que l'eau terrestre.

Autre piste, parmi les nombreuses molécules identifiées dans les nuages interstellaires, certaines contiennent la fonction amide. Cela leur permettrait de se polymériser en polyamides à l'image des polypeptides à l'origine de la formation des protéines. Aucun acide aminé n'a cependant été détecté en dehors du Système Solaire pour l'instant mais la présence d'urée est un signe encourageant vers cette liaison.

## PRINCIPES ET CONTRAINTES DE L'OBSERVATION

### Comment identifier les molécules ?

Rappelons qu'à son échelle, l'état énergétique d'une molécule est quantifié : ses vibrations, ses rotations et la position de ses électrons sont déterminées par des valeurs distinctes et discrètes d'énergie. Le domaine du visible donne accès aux transitions électroniques, le domaine infrarouge correspond aux transitions vibrationnelles et les longueurs d'onde millimétriques sont caractéristiques des transitions rotationnelles. Ce sont ces dernières transitions de rotation qui sont les plus étudiées en spectroscopie spatiale, elles sont très fines et leur longueur d'onde – ou plus souvent leur fréquence – est mesurée avec une précision exceptionnelle, laissant peu de doute sur leur identification.

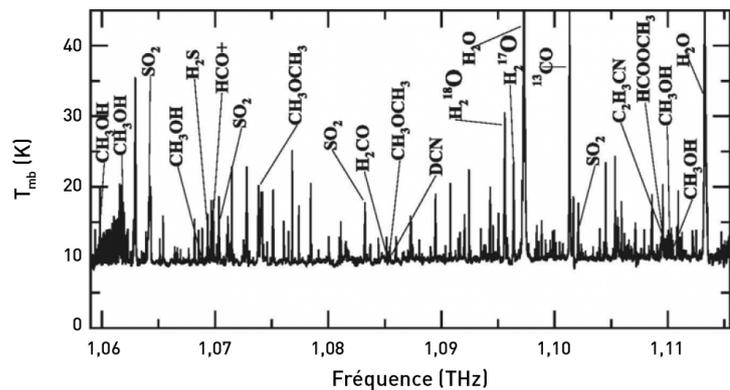


Figure 3 – Portion du spectre de raies d'émission en sub-mm de la Nébuleuse d'Orion. De nombreuses molécules organiques simples sont identifiées.

En spectre d'émission, même des sources peu lumineuses sont observables en submillimétrique et en millimétrique (Figure 3). En revanche, pour obtenir des spectres en absorption, on utilise astucieusement des étoiles ou des quasars situés derrière l'objet étudié comme sources lumineuses (Figure 4).

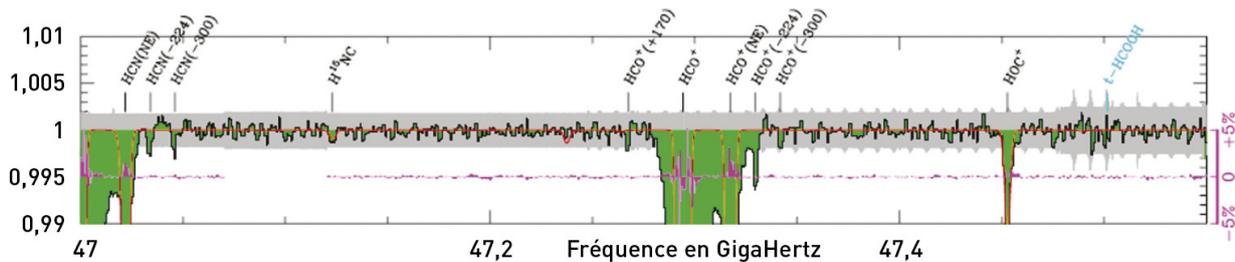


Figure 4 – Portion d'un spectre d'absorption d'une galaxie spirale lointaine, obtenu grâce à la lumière d'un quasar distordue par lentille gravitationnelle. Source : A&A/S. Muller.

### Quels télescopes pour observer ?

Suivant le domaine de longueur d'onde étudié, on fait appel à différents types de télescopes. Leur résolution est cependant dictée par la taille du télescope, les bords de l'appareil entraînant toujours de la diffraction.

Plusieurs stratégies sont possibles : des très larges télescopes, VLT situés au Chili, à un ensemble de plusieurs télescopes travaillant de concert en mode interférométrique, comme l'IRAM en Espagne (Figure 5). NOEMA en France, possède ainsi 9 antennes et offre une résolution de 0,4 secondes d'arc. Ses miroirs de 15 mètres de diamètre ont des aspérités de moins de 40 microns, ce qui permet de travailler avec une résolution suffisante jusqu'à des longueurs d'onde de 0,8 mm.



Figure 5 – Deux systèmes de télescopes actuels. À gauche, l'ensemble de VLT [source : ESO] ; à droite, l'ensemble de IRAM utilisé en configuration interférométrique [source : DiVertiCimes].

Ces télescopes sont placés en altitude pour deux raisons. La première, évidente, est de s'éloigner des sources de pollution lumineuse urbaine. La seconde est de limiter la hauteur d'atmosphère traversée par la lumière, très fortement absorbée par la vapeur d'eau en dessous de  $\lambda = 1 \text{ mm}$ . Cette contrainte de l'absorption atmosphérique a poussé les télescopes vers toujours plus d'altitude et la construction du très ambitieux ALMA, situé à 5000 m d'altitude sur un vaste plateau de l'Atacama, opérant à 0,3 mm.

La dernière stratégie a ensuite tout simplement été d'envoyer les télescopes directement dans l'espace. Citons les télescopes Planck (miroir de 1,5 m de diamètre), Herschel (3,5 m de diamètre), et bien sûr de Hubble (2,4 m de diamètre), opérant dans l'infrarouge proche, le visible et l'UV proche.

### Le télescope spatial James Webb

Le prochain télescope spatial à être lancé, par la NASA, sera le télescope spatial James Webb ou JWST. Il dispose d'un pouvoir de résolution de 0,1 seconde d'arc, ce qui lui permet de distinguer un ballon de football placé à une distance de 550 km. Cette capacité est à peu près équivalente à celle du télescope spatial Hubble pourtant doté d'un miroir d'un diamètre bien inférieur, mais en réalité le JWST travaille à des longueurs d'onde plus grandes donc avec une diffraction plus gênante, nécessitant donc un diamètre de miroir plus grand.

L'une des missions principales du télescope JWST (Figure 6), et qui prend le relais du télescope spatial Hubble, est l'étude des systèmes planétaires et de la formation de la Vie. Pour cela, le JWST relèvera le spectre infrarouge d'une exoplanète en transit devant son étoile, et par ses raies d'absorption nous permettra de déduire la composition moléculaire de son atmosphère et surtout la présence éventuelle d'eau liquide grâce à sa résolution inégalée.

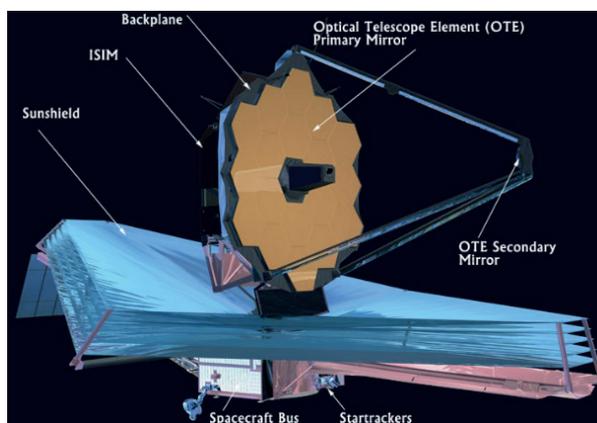


Figure 6 : Vue du JWST, avec son miroir primaire déplié et le bouclier thermique déployé en-dessous. Source : [jwst.nasa.gov](http://jwst.nasa.gov)

Une des contraintes de travail du JWST est intéressante à relever : le rayonnement solaire mais aussi la propre température de fonctionnement de l'appareillage provoquent un rayonnement de corps noir parasite dans le domaine de travail de l'infrarouge. Il a donc été nécessaire de mettre en place un bouclier thermique particulièrement efficace assurant le fonctionnement du spectroscopie dans la partie froide, à 300 Kelvin plus froide que la face chaude.

Le JWST possède, entre autres instruments de mesure, deux spectroscopes travaillant chacun avec des spécificités différentes et sur des domaines différents de l'infrarouge – proche et moyen infrarouge. Leur design reste fidèle à celui d'un spectroscopie classique avec dispersion des longueurs d'onde, puis focalisation vers un ensemble de détecteurs. En revanche, la qualité de leurs optiques les rend exceptionnels (Figure 7).

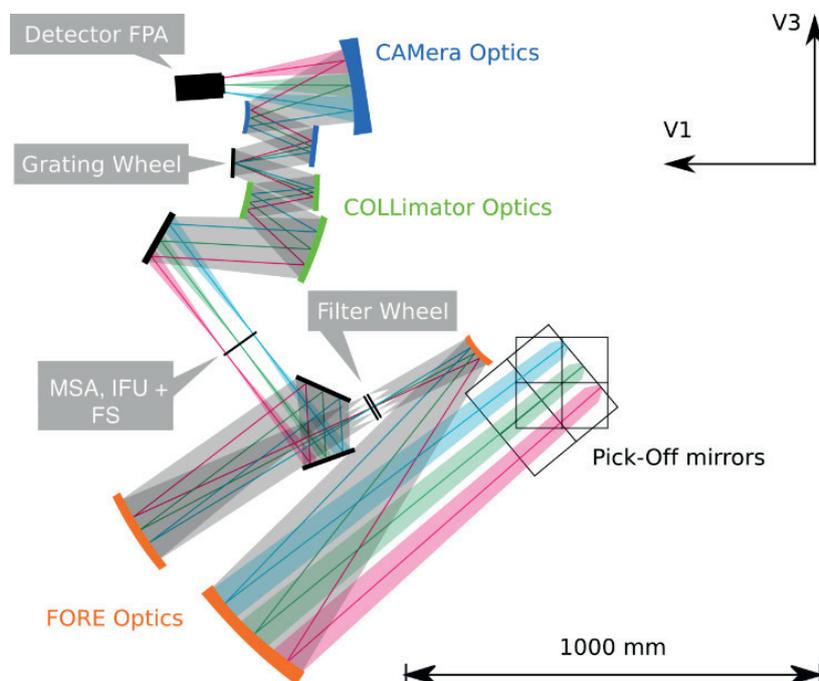


Figure 7 : Chemin de rayons lumineux de différentes longueurs d'onde à travers le spectroscopie NIRSpec schématisé à l'échelle. Après avoir été dispersés, les rayons pénètrent dans le système grâce à des miroirs « Pick-Off Mirrors », situés en bas du schéma, puis sont filtrés et focalisés vers une surface de 250 000 détecteurs pouvant travailler simultanément à l'analyse de rayons provenant d'une centaine de sources différentes. Source : [jwst-docs.stsci.edu](http://jwst-docs.stsci.edu)

## CONCLUSION

Depuis les premières missions lunaires, l'exploration spatiale s'est en réalité toujours concentrée sur l'observation depuis la Terre. Aujourd'hui, la spectroscopie embarquée atteint des précisions inégalées et si les réponses aux questions de l'émergence de la vie restent encore lointaines, les observations nous mènent vers des découvertes de nouvelles molécules dans les milieux extra-terrestres grâce à des prouesses technologiques.

## SOURCE PRINCIPALE

Chimie, aéronautique et espace, EDP Sciences, 2018, ISBN : 978-2-7598-2283-6, « Molécules dans l'Univers, Où ? Quand ? Comment ? Pourquoi ? » par Michel Guélin.

**Germain Lesœur** est professeur agrégé de physique-chimie

**Comité éditorial** : Danièle Olivier, Jean-Claude Bernier, Grégory Syoen