

# Chimie Interstellaire



**James Lequeux**

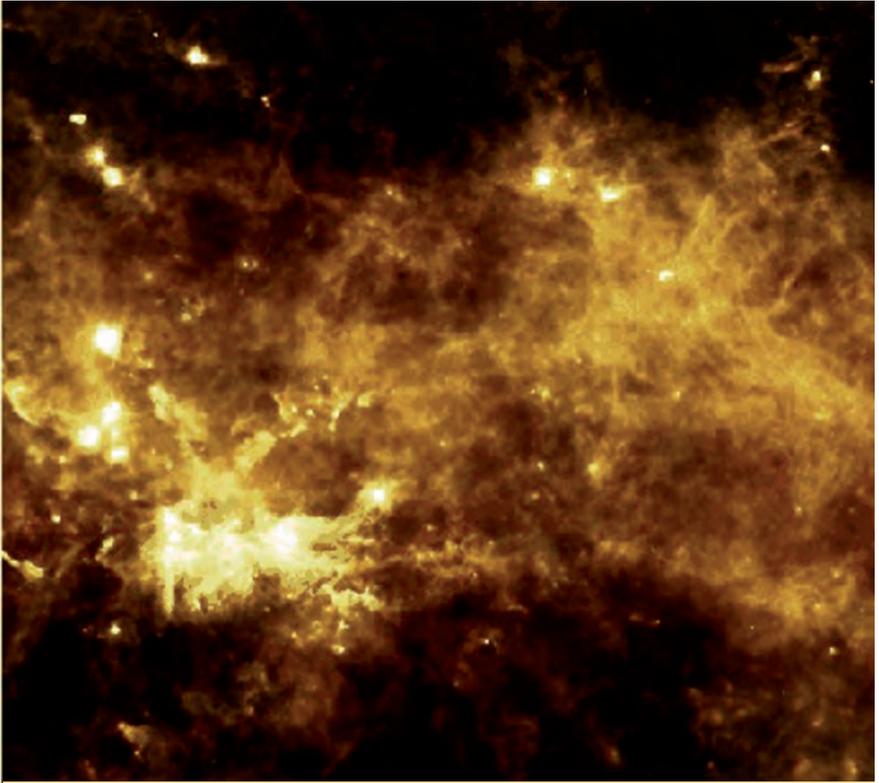
*Observatoire de Paris*

Il y a un siècle, on soupçonnait à peine l'existence de gaz et de poussières entre les étoiles. Aujourd'hui, on sait que cette matière interstellaire contient plus de cent-soixante molécules différentes. Comment se sont-elles formées ? En quoi la chimie interstellaire diffère-t-elle de celle de nos laboratoires ? Joue-t-elle un rôle dans la naissance de la vie ?

## **Le milieu interstellaire**

Le milieu dilué qui remplit l'espace entre les étoiles joue un rôle fondamental, puisque c'est à partir de lui que se forment les étoiles. Sa structure est extrêmement variée et chaotique, depuis des "nuages" très froids et opaques jusqu'à des régions chaudes, neutres ou ionisées par le rayonnement ultraviolet des étoiles. Le milieu interstellaire est agité par les vents violents émis par les étoiles massives et les explosions de supernovae. Le champ magnétique de la galaxie joue également un grand rôle pour le façonner : sa structure est plus souvent en filaments ou en nappes qu'en nuages plus ou moins sphériques. La turbulence est la règle plutôt que l'exception dans ce milieu, ce qui complique singulièrement son étude.

La composition élémentaire du milieu interstellaire est semblable à celle du Soleil : 70% d'hydrogène en masse, 28% d'hélium et environ 2% d'éléments plus lourds, où dominent l'oxygène, l'azote, le carbone, et dans une moindre mesure le néon, le magnésium, le silicium, le soufre et le fer. Ces éléments lourds se trouvent en partie en phase gazeuse et en partie sous forme de poussières de silicates ou de graphite, qui peuvent être recouvertes de glaces dans les endroits les moins exposés au rayonnement. Ces poussières sont bien mélangées au gaz, si bien que les images que l'on peut maintenant obtenir de la distribution de ces poussières, grâce à leur émission thermique dans l'infrarouge moyen et lointain (Figure 1), sont semblables à celles de la distribution du gaz.



*Figure 1.* Une image en infrarouge lointain de la distribution des poussières dans un champ d'environ  $2^\circ \times 2^\circ$  de la Voie lactée, obtenue avec le satellite HERSCHEL.  
Fausses couleurs : bleu,  $70 \mu\text{m}$  ; vert :  $160 \mu\text{m}$  ; rouge :  $350 \mu\text{m}$ .  
D'après Molinari *et al.* (2010) *Astronomy & Astrophysics*, 518, L100.

La densité du milieu interstellaire est extrêmement faible : elle va de quelques atomes par centimètre cube à quelques milliers ou dizaines de milliers d'atome  $\text{cm}^{-3}$  dans les régions denses (si l'on excepte celles qui sont en train de s'effondrer en formant des étoiles). Quant à la température, elle est très basse dans les régions neutres mais peut atteindre 1000 K dans les régions comprimées par l'expansion des nébuleuses ionisées, les vents et les explosions stellaires ; ces régions sont souvent soumises à un fort rayonnement ultraviolet qui dissocie en partie les molécules préexistantes (régions de photodissociation).

### **Les molécules interstellaires**

Si les premières molécules interstellaires ont été découvertes à partir de 1940 par leurs raies dans le domaine visible et ultraviolet (CH, CH<sup>+</sup>, CN, OH), la plupart ont été observées après 1963 grâce à leurs raies de rotation

dans le domaine radio, des ondes centimétriques aux ondes submillimétriques. Le spectre radio de certaines régions du milieu interstellaire comprend des millions de raies moléculaires, qui se chevauchent les unes les autres malgré leur grande finesse, ce qui rend souvent leur identification délicate (Figure 2). De plus, beaucoup de molécules interstellaires sont instables au laboratoire, ce qui rend difficile la mesure de la longueur d'onde de leurs raies. La molécule avec le plus grand nombre d'atomes qui soit identifiée est HC<sub>11</sub>N, une molécule linéaire, mais il y a certainement des molécules plus complexes. Cependant, on n'a identifié aucun acide aminé avec certitude. Les molécules symétriques, qui n'ont pas de moment dipolaire, ne donnent que des raies de rotation très faibles si bien que les catalogues en contiennent très peu, essentiellement H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub> et O<sub>2</sub>, molécule qui a été très difficile à découvrir car peu abondante.

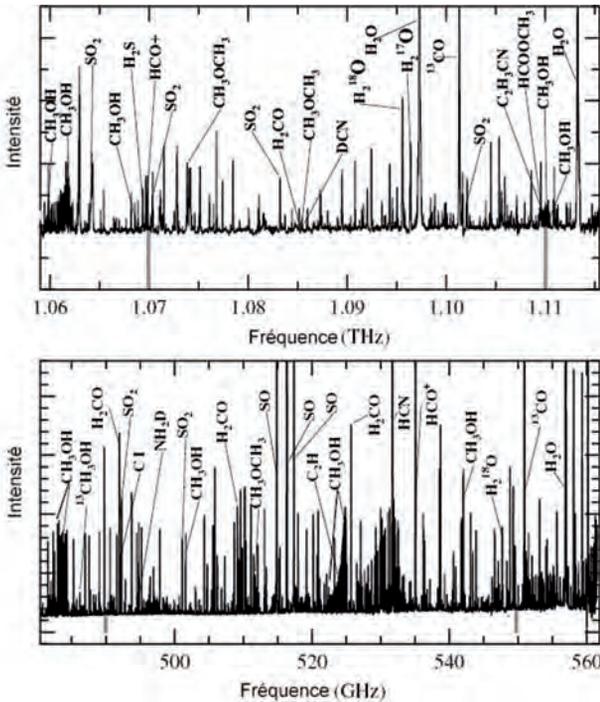
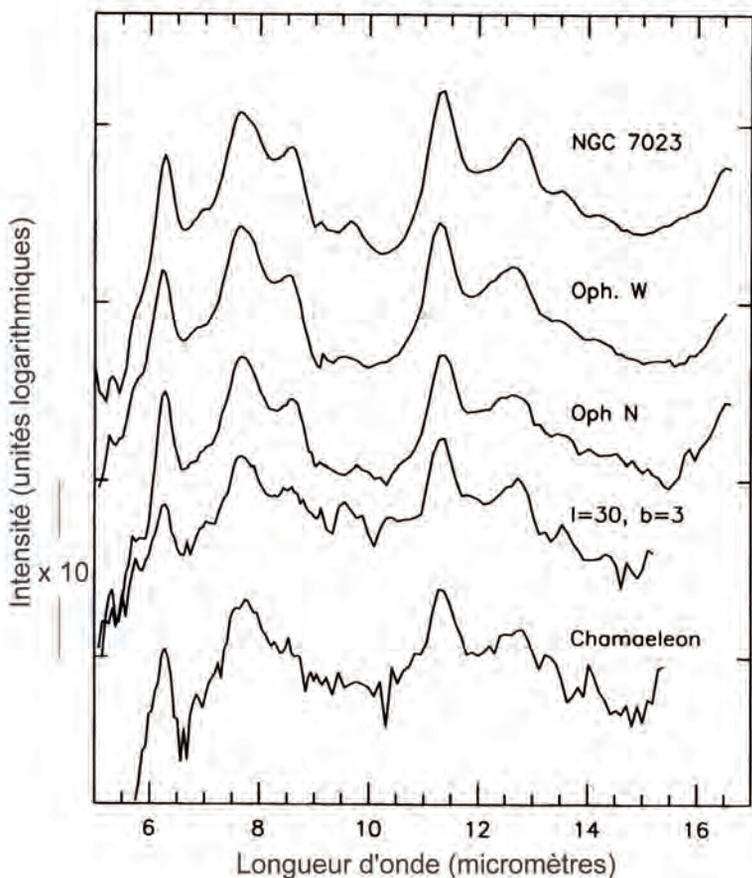


Figure 2. Portion du spectre submillimétrique d'une source moléculaire dans Orion, obtenu avec le satellite HERSCHEL. De nombreuses molécules sont identifiées, mais de nombreuses raies restent sans identification.

D'après Bergin *et al.* (2010) *Astronomy & Astrophysics*, 521, L20.

Comme on peut s'y attendre au vu de la composition en éléments du milieu interstellaire, la plupart des molécules interstellaires identifiées sont formées des éléments les plus abondants, en particulier H, C, N et O : par

exemple CO, OH, H<sub>2</sub>O, HCN, CH<sub>3</sub>OH, etc. Il existe tous les intermédiaires entre les molécules simples et les poussières. On a par exemple découvert dans le milieu interstellaire des molécules polyaromatiques hydrogénées semblables à celles qui sont produites dans les combustions incomplètes (Figure 3) ; elles comportent quelques dizaines à quelques centaines d'atomes. Plus récemment, on a découvert des fullerènes, qui sont des pellicules sphériques ou ellipsoïdales comportant des cycles carbonés hexagonaux et pentagonaux : la molécule C<sub>60</sub> a exactement l'aspect d'un ballon de football.



*Figure 3.* Série de spectres de différentes régions du milieu interstellaire obtenus dans l'infrarouge moyen avec le satellite ISO, montrant les bandes caractéristiques des molécules polyaromatiques hydrogénées ; les deux spectres du bas correspondent à un milieu relativement diffus.

D'après Lequeux, J. (2002) *Le milieu interstellaire*, EDP Sciences et CNRS Éditions.

## Chimie en phase gazeuse

Contrairement à ce qui se passe au laboratoire, la densité du milieu interstellaire est si faible que, lorsque deux atomes se rencontrent, il n'y a pas, pendant la réaction, de collision avec un troisième corps (atome, molécule ou un corps solide), qui serait susceptible de fournir de l'énergie ou d'évacuer l'énergie éventuellement émise par la réaction. Les réactions possibles en phase gazeuse sont nécessairement exothermiques dans les milieux froids, où la température ne dépasse pas quelques dizaines de K ; la réaction  $H + H \rightarrow H_2$  est impossible en phase gazeuse bien qu'elle soit très exothermique, car l'énergie qu'elle produit ne peut pas être évacuée. Par ailleurs, la plupart des réactions neutre-neutre, même exothermiques, présentent une barrière de potentiel qui repousse les partenaires qui tentent de se combiner, et ne peuvent pas se produire. En revanche, les réactions ion-neutre ne présentent pas de barrière de potentiel et sont généralement possibles. La chimie interstellaire dans les gaz à basse température est donc essentiellement une chimie ionique. Dans les nuages denses et obscurs où la lumière ultraviolette ne pénètre pas, une faible ionisation est produite par les rayons cosmiques, et les ions ainsi formés, essentiellement  $H_2^+$ ,  $H^+$  et  $He^+$ , sont les points de départ d'une chimie très complexe qu'il n'est pas possible de détailler ici.

Dans le milieu diffus ou les régions de photodissociation, où pénètre l'ultraviolet, c'est l'ion  $C^+$  qui est le point de départ de la chimie. Lorsque la température est suffisamment élevée, ce qui se produit dans les régions de photodissociation, ou au passage d'une onde de choc ou enfin dans certaines régions turbulentes où une grande quantité d'énergie est libérée pendant peu de temps (c'est ce que l'on appelle l'intermittence), certaines réactions endothermiques peuvent se produire comme :  $C^+ + H_2 \rightarrow CH^+ + H - 0,4 \text{ eV}$ .  $CH^+$  intervient ensuite dans de nombreuses réactions.

La destruction des molécules interstellaires est surtout due à la photodissociation par le rayonnement ultraviolet, mais certaines molécules peuvent se trouver gelées à la surface des grains de poussière froids. Tout n'est pas encore compris dans les processus qui interviennent dans la chimie interstellaire, malgré l'énorme travail fait au laboratoire et par la théorie pour déterminer les taux des réactions chimiques, de photodissociation et de collage sur les grains.

## Chimie sur les grains de poussière

Les observations dans l'infrarouge ont montré que les poussières interstellaires se couvrent de produits glacés lorsqu'elles sont à l'abri du rayonnement des étoiles. On y a détecté de la glace d'eau, mais aussi  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}$  et  $\text{CO}_2$ , l'alcool méthylique et d'autres produits (Figure 4). Les atomes et molécules qui se collent à la surface de ces grains et s'y déplacent peuvent évidemment participer à des réactions chimiques qui sont proches de celles que nous observons dans nos laboratoires, puisqu'il peut y avoir transfert d'énergie avec le grain. La principale est la réaction de formation de la molécule d'hydrogène à partir de deux atomes H, mais il est clair que certains produits glacés comme  $\text{CO}_2$  ont dû se former *in situ*. Lorsque les grains se trouvent soumis à un rayonnement stellaire ou sont détruits par le passage d'une onde de choc, le manteau de glace s'évapore et les molécules ainsi libérées se retrouvent dans le gaz interstellaire, s'ajoutant à celles formées en phase gazeuse.

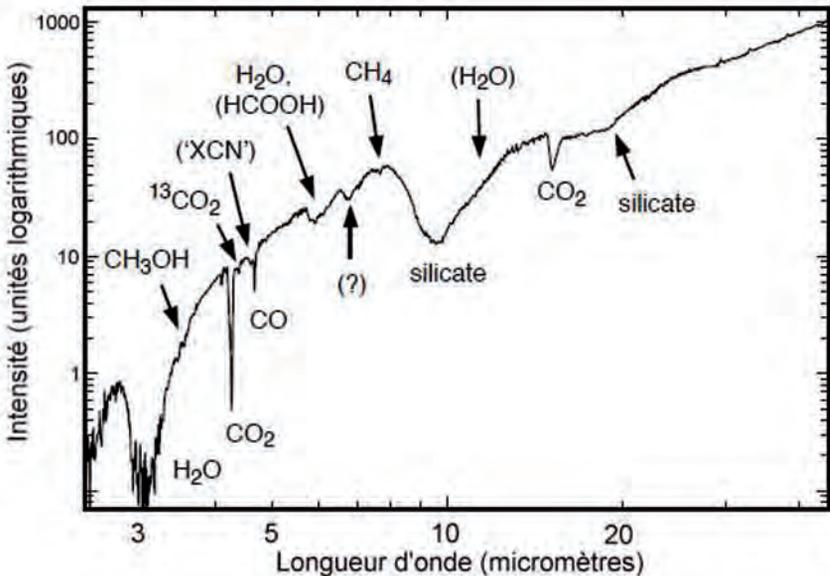


Figure 4. Spectre produit par les grains interstellaires interposés devant une source infrarouge intense, observé avec le satellite ISO. On observe les bandes des silicates dont est formé le noyau des grains, ainsi que divers produits glacés déposés sur ce noyau.

D'après Whittet *et al.* (1996) *Astronomy & Astrophysics*, 315, L157.

## Molécules interstellaires et origine de la vie ?

Comme beaucoup de molécules interstellaires sont des molécules organiques, on peut se demander si les molécules pré-biotiques comme les acides aminés ne sont pas issues du milieu interstellaire. C'est tout à fait possible, bien que ces molécules soient très difficiles à identifier ; mais comment sont-elles parvenues jusqu'à nous ? Le système solaire s'est formé il y a 4,6 milliards d'années à partir d'un nuage interstellaire, et même si les molécules n'ont pas pu subsister sur la Terre qui a été soumise au début à des conditions très rudes, on les retrouve dans les comètes qui sont des morceaux de la matière primitive. Peut-être la chute de comètes a-t-elle pu ensemençer la Terre avec ces molécules pré-biotiques ?

Nous sommes ici dans le domaine de la spéculation, mais il n'est pas interdit de rêver. Cependant, le vrai problème est la naissance de la vie, qui implique de former les molécules très complexes que sont les ADN, molécules dont la présence dans le milieu interstellaire est fort improbable.

**J. L.**

### *Pour en savoir (un peu) plus*

Le seul ouvrage récent en français qui traite de chimie interstellaire est :

*Le milieu interstellaire* de **J. Lequeux** avec le concours de **E. Falgarone** et **Ch. Rytter**, (2002) - coll. Savoir actuels, EDP Sciences et CNRS Editions.

Une liste récente des molécules interstellaires se trouve dans :

*<http://www.astro.uni-koeln.de/cdms/molecules>*

Cependant les observations avec le satellite HERSCHEL sont en train de renouveler complètement notre connaissance du milieu interstellaire et de sa chimie. On pourra consulter une série d'articles récents (en anglais) correspondant aux observations faites avec ce satellite :

*[http://www.aanda.org/index.php?option=com\\_toc&url=/articles/aa/abs/2010/13/contents/contents.html](http://www.aanda.org/index.php?option=com_toc&url=/articles/aa/abs/2010/13/contents/contents.html)*