

Entre les étoiles

par James Lequeux

L'espace entre les étoiles n'est pas vide, comme on l'a cru longtemps. Il contient du gaz et des poussières. Il a fallu longtemps pour s'apercevoir de la présence de cette matière interstellaire. Bien sûr on savait depuis 1864, grâce à l'anglais William Huggins (1824-1910), que certaines nébuleuses comme celle d'Orion étaient constituées non pas d'agglomérations d'étoiles mais de gaz lumineux. Mais ce n'est qu'en 1904 que l'astronome allemand Johannes Franz Hartmann (1865-1936), étudiant des spectres obtenus à diverses époques de l'étoile double δ Orionis, dont les composantes s'éloignent et se rapprochent périodiquement de nous, a constaté qu'il y avait, en plus des raies spectrales stellaires dont la longueur d'onde variait au cours du temps en raison de l'effet Doppler-Fizeau, des raies qui restaient fixes : elles ne pouvaient donc provenir que d'un milieu extérieur à l'étoile, interposé entre celle-ci et nous. On réalisa bientôt qu'elles étaient dues à un gaz interstellaire invisible optiquement. Comme ces raies se montraient le plus souvent multiples, ce gaz ne pouvait pas être distribué uniformément mais se trouvait distribué dans des « nuages » animés de diverses vitesses d'éloignement ou de rapprochement par rapport à nous.

Le milieu interstellaire contient aussi des poussières. Leur mise en évidence a été encore plus difficile que celle du gaz et a dû attendre 1930, date à laquelle l'américain Robert J. Trumpler (1886-1957) a réalisé que la lumière des étoiles était atténuée et rougie par l'extinction due à ces poussières, et ceci d'autant plus qu'elles sont plus éloignées. Cette extinction est très importante

dans la Voie lactée, notre Galaxie. Avant sa découverte, on pensait que nous occupions une position à peu près centrale dans la Voie lactée : mais nous savons maintenant que nous sommes loin du centre, qui est caché à notre vue par l'extinction interstellaire. La bande obscure qui sépare en deux la Voie lactée dans le ciel d'été est due à l'extinction par des poussières ; certains « trous » dans la distribution des étoiles sont également dûs à l'extinction. Ce n'était pas du tout évident avant 1930.

La densité de la matière interstellaire est extrêmement faible, inférieure à celle du gaz résiduel dans les meilleurs vides obtenus en laboratoire ; si l'on parvient à observer cette matière, c'est que les trajets à travers la Galaxie sont immenses. Elle constitue cependant une grande fraction de la masse de notre Galaxie et d'autres galaxies. La matière interstellaire est importante non seulement par ses effets sur la lumière des étoiles, mais parce que les étoiles se forment à partir d'elle. Elles y réinjectent une grande partie de leur masse pendant leur évolution, particulièrement dans ses phases finales, la chauffent et l'agitent continuellement. L'étude de la matière interstellaire utilise les techniques d'observation les plus variées, des ondes radio aux rayons gamma (planche couleur n° 1.1). Les traits les plus frappants révélés par ces observations sont la grande hétérogénéité de la distribution de ce milieu et des conditions physiques qui y règnent, ainsi que son état d'agitation constante. Il est donc impossible de se contenter d'une conception statique de ce milieu en perpétuel bouleversement.

Les différents aspects de la matière interstellaire

Dans notre Galaxie, et probablement dans toutes les galaxies spirales et irrégulières, une grande partie de la matière interstellaire est condensée en « nuages ». Ce terme, bien qu'universellement utilisé par les astronomes, est trompeur : en effet, si ces entités peuvent être quelquefois plus ou moins sphériques, elles apparaissent le plus souvent sous forme de nappes ou de filaments (planche couleur n° 1.2).

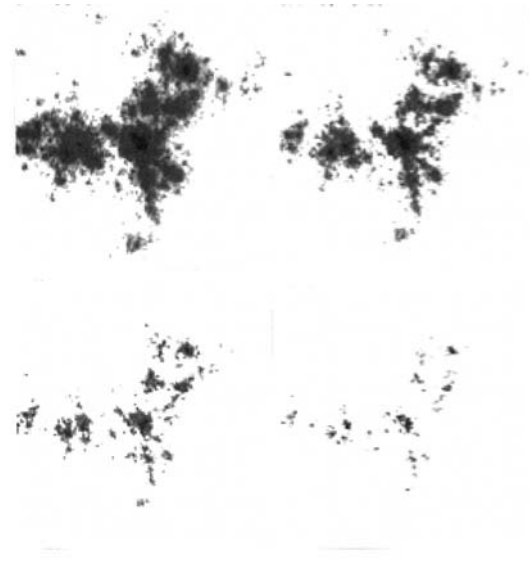
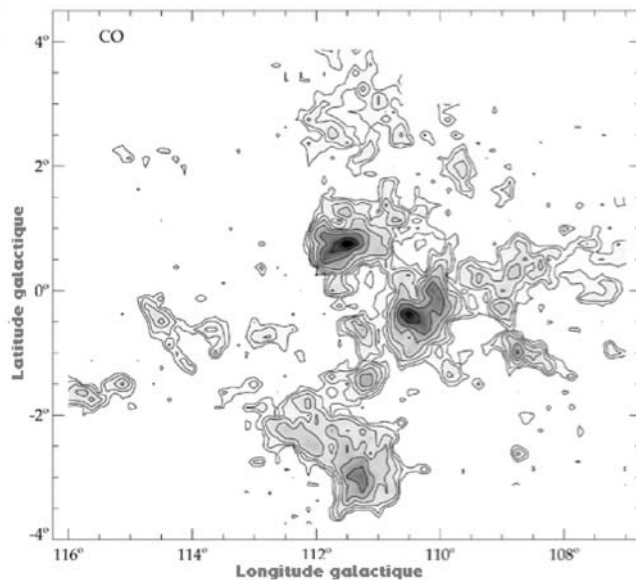
Lorsque la densité est faible (de 1 à 1 000 atomes par centimètre cube), on y trouve essentiellement de l'hydrogène neutre sous forme atomique. Les nuages sont alors appelés *nuages diffus*. La température de ce gaz va de quelques dizaines à quelques centaines de degrés kelvin (K).

Lorsque la densité est plus grande (de 10^3 à 10^7 molécules par centimètre cube, ou davantage), les atomes se combinent en molécules, principalement en molécules d'hydrogène H_2 : on a alors affaire à des *nuages moléculaires*. La température y est généralement de l'ordre de 10 K, mais peut être plus élevée dans certaines circonstances; c'est dans ces nuages que se forment les étoiles. Ces nuages sont opaques à la lumière, mais deviennent progressivement transparents quand on va vers l'infrarouge de plus en plus lointain (planche couleur n° 1.3).

Au voisinage des étoiles chaudes, la matière interstellaire est ionisée par leur rayonnement ultraviolet et devient lumineuse: elle forme alors des *nébuleuses gazeuses* brillantes, ou *régions HII*, dont la Nébuleuse d'Orion (planche couleur n° 1.4) est le prototype le mieux étudié. Ces nébuleuses subsistent tant que les étoiles chaudes les ionisent; elles sont d'ailleurs souvent dispersées par divers phénomènes après une dizaine de milliers d'années, bien avant la mort des étoiles ionisantes qui survient plusieurs millions d'années après leur naissance.

Le vent violent qui est issu en permanence des étoiles chaudes et massives creuse dans le milieu interstellaire des cavités plus ou moins sphériques, qui se présentent sous la forme de *bulles* remplies d'un gaz ténu et très chaud (planche couleur n° 1.2). Elles sont limitées par une onde de choc, à l'arrière de laquelle se trouve de la matière comprimée. L'explosion qui termine la vie des étoiles de grande masse (plus de 8 fois la masse du soleil environ), produit des restes de supernovae de structure analogue. D'autres restes de supernovae sont pleins et non creux, on les nomme les *plérions*. Tous ces restes grossissent pendant quelques dizaines de milliers d'années avant de se disperser dans le milieu avoisinant. Les grandes bulles, dont la masse est bien supérieure, peuvent subsister bien plus longtemps. Lorsqu'elles ont suffisamment grossi pour se rencontrer, elles s'interpénètrent et forment un milieu très dilué (quelques 10^{-3} ion par centimètre cube) et très chaud (environ $5 \cdot 10^5$ K) qui baigne les nuages interstellaires.

Figure 1.1. Structure fractale du milieu interstellaire. À gauche, carte d'un complexe de nuages moléculaires obtenue dans la raie de CO à 115 GHz par Ungerechts et ses collaborateurs avec le radiotélescope de 1 m de diamètre du Center for Astrophysics à Harvard. À droite, simulation numérique par Pfenninger et Combes de nuages fractals, c'est-à-dire où les structures sont géométriquement semblables à elles-mêmes aux différentes échelles. Le nombre $N(>L)$ de structures plus grandes que la dimension L est proportionnel à L^{-D} . D est la dimension fractale, qui va de 1,5 en bas à droite à 3,0 en haut à gauche. On constate que le complexe de nuages moléculaires est très semblable à un nuage synthétique de dimension fractale 2,5, en haut à droite.



Il existe aussi un *milieu interstellaire diffus* partiellement ionisé, de densité environ 0,25 atome par centimètre cube, où la température est de l'ordre de 8000 K. Les masses totales des nuages diffus, des nuages moléculaires et de ce milieu ténu sont à peu près égales, $1,5 \cdot 10^9$ masses solaires chacune dans la Galaxie. La masse du milieu très chaud est beaucoup plus faible. Ces différentes composantes sont approximativement à l'équilibre de pression les unes avec les autres.

Il y a des interactions importantes et des échanges continus d'énergie et de masse entre les différentes composantes du milieu interstellaire, et également des échanges entre ce milieu et les étoiles, entre celui d'une galaxie et le milieu intergalactique qui l'entoure, et finalement entre la matière de galaxies qui se rencontrent et se fusionnent. Le milieu interstellaire forme donc un ensemble extrêmement complexe, agité et en évolution permanente; les observations les plus fines montrent d'ailleurs que ses différentes composantes ont une structure hiérarchisée, probablement fractale (figure 1.1), ce qui rend son étude difficile. Il n'est pas surprenant qu'il reste encore beaucoup de travail pour interpréter de façon satisfaisante les observations d'un ensemble aussi compliqué, et pour en faire une théorie cohérente.

Enfin le milieu interstellaire, qui est assez bon conducteur, est parcouru par des courants électriques qui y créent un *champ magnétique* faible, de l'ordre de quelques 10^{-10} tesla. Il y circule aussi des *photons* de toutes longueurs d'onde, et des particules chargées de haute énergie, les « *rayons cosmiques* ». Tout ceci a une grande importance pour la physique et notamment pour le bilan thermique du gaz interstellaire. Pour compliquer encore les choses, il y a des échanges de masse entre les poussières et le gaz, soit par évaporation des poussières, soit par accrétion de gaz sur leur surface. Il n'est pas facile de se faire une image claire de ce milieu incroyablement complexe et dont beaucoup d'aspects sont autant de casse-tête pour les spécialistes. Pour résoudre les problèmes qu'il pose, il est nécessaire d'utiliser une panoplie étendue de moyens d'observation au sol et dans l'espace, et de faire appel à toutes sortes d'aspects de la physique et même de la chimie. Nous allons cependant tenter de comprendre un peu mieux le milieu interstellaire en examinant de plus près ses différentes composantes.

Le milieu interstellaire neutre

Peu spectaculaire en lumière visible, le gaz neutre n'a été bien étudié qu'à partir des années 1970 en utilisant principalement des techniques radioastronomiques et spatiales très variées.

LES NUAGES DIFFUS

Les nuages diffus sont la composante la mieux connue du milieu interstellaire. Relativement transparents à la lumière, ils se manifestent par des raies d'absorption que l'on observe dans le spectre à haute résolution d'étoiles situées à l'arrière. Ces raies sont peu nombreuses dans le domaine visible : les principales sont les raies D du sodium, les raies H et K du calcium ionisé une fois, celles du calcium neutre, du titane ionisé une fois, et de trois radicaux moléculaires simples (CN, CH et CH⁺). Mais elles sont très nombreuses dans l'ultraviolet lointain (figure 1.2).

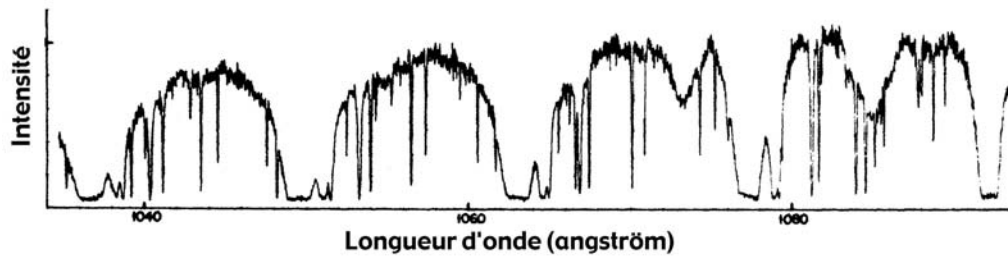


Figure 1.2. Une portion du spectre ultraviolet dans la direction de l'étoile ζ Ophiuchi. On y voit un très grand nombre de raies d'absorption fines, toutes dues au milieu interstellaire interposé devant l'étoile. Seules quelques raies larges sont stellaires. Les bandes larges sont dues à l'hydrogène moléculaire, qui est présent en assez grande quantité dans cette direction. Spectre obtenu par Morton avec le satellite COPERNICUS.

La présence d'ions dans ce milieu dit « neutre » s'explique par le fait que le rayonnement ultraviolet des étoiles chaudes peut pénétrer assez facilement dans les nuages diffus si sa longueur d'onde est supérieure à 91,2 nanomètres, la limite d'ionisation de l'hydrogène atomique, et ioniser un certain nombre d'éléments : le carbone et les métaux (seuls l'oxygène, l'azote, les gaz rares et bien entendu l'hydrogène restent à l'état neutre). En revanche, les radiations de plus courte longueur d'onde sont totalement absorbées par l'hydrogène atomique, qui est très abondant. Comme les éléments ionisés ne représentent guère que 1 % de la masse totale du gaz, celui-ci est globalement presque neutre. Les raies d'absorption interstellaires observées dans le spectre des étoiles sont fines, indiquant des températures basses et des mouvements internes faibles, mais sont généralement multiples : comme nous l'avons dit, la matière interstellaire est principalement distribuée en nuages ou en sous-nuages isolés, dont chacun produit une composante de la raie décalée en longueur d'onde par effet Doppler-Fizeau.

En 1951, la découverte de la raie radio à 21 centimètres de longueur d'onde émise par l'hydrogène atomique a montré que cet élément est le principal constituant des nuages diffus, et a permis d'en préciser les caractéristiques et leur distribution dans la Galaxie, où ils sont concentrés le long de bras spiraux. La raie à 21 centimètres permet également de déterminer la température de ces nuages grâce à la comparaison de leur observation en absorption devant des sources d'ondes radio situées à l'arrière-plan (les raies d'absorption radio sont sensibles à la température) et en émission (raies insensibles à la température) à côté de ces sources.

Les raies d'absorption sont dues à des atomes et à des ions très variés, et permettent de déterminer la composition chimique des nuages diffus. On constate qu'ils sont déficients, par rapport au

Soleil, en éléments comme le silicium et certains métaux. Ces éléments se retrouvent dans les poussières qui sont intimement mélangées avec le gaz. Les nuages diffus contiennent aussi de l'hydrogène moléculaire en quantité variable, et aussi un assez grand nombre d'autres molécules dont les principales sont le monoxyde de carbone CO et l'hydroxyle OH, une molécule très instable au laboratoire.

La présence de ces molécules, dont certaines sont connues depuis longtemps et qui ont été bien étudiées ces dernières années avec les instruments de l'Institut de Radioastronomie millimétrique (IRAM), en particulier l'interféromètre situé au Plateau de Bure, dans les Hautes Alpes¹, reste un mystère: en effet, elles sont rapidement détruites par le rayonnement ultraviolet qui baigne les nuages, et il est nécessaire qu'elles soient formées en permanence *in situ* pour compenser cette destruction. Sans doute existe-t-il dans les nuages diffus des régions suffisamment denses pour que les molécules s'y forment, mais on ne les a pas observées. Il faudrait aussi que certaines régions du nuage soient temporairement portées à haute température, car certaines molécules abondantes comme l'ion moléculaire CH⁺ ne semblent pas pouvoir être formées autrement. Peut-être la turbulence qui paraît régner dans le milieu interstellaire est-elle susceptible de créer par intermittence des régions denses et chaudes de faible durée de vie, où pourrait se produire une chimie particulière très active. Les ondes de choc créées par l'explosion des supernovae pourraient jouer le même rôle. Il y a là tout un champ de recherches auquel notre pays participe activement².

Des poussières sont intimement mélangées avec le gaz des nuages. Nous venons de voir qu'elles sont constituées des éléments déficients dans le gaz, essentiellement le carbone, l'oxygène, et les métaux dont les plus abondants sont le silicium et le fer. Elles sont chauffées par le rayonnement des étoiles, et rayonnent l'énergie ainsi reçue dans l'infrarouge lointain, où on peut les observer avec les satellites spécialisée (IRAS, ISO, et aujourd'hui SPITZER et bientôt HERSCHEL et PLANCK): le ciel en infrarouge lointain est dominé par cette émission, dont on peut voir à quel point elle est irrégulière, formant souvent des structures filamenteuses ressemblant à des cirrus (voir planche couleur n° 1.2). Ces structures

1. Liszt H., Lucas R. (2002) *Astronomy & Astrophysics* 384, 1054 et articles cités.

2. Voir par exemple Joulain K., Falgarone E., Pineau des Forêts G., Flower D. (1998) *Astronomy & Astrophysics* 340, 241.

sont en partie reliées au champ magnétique : en effet, les électrons libres résultant de l'ionisation des éléments lourds des nuages les rendent conducteurs de l'électricité, et leur structure subit l'effet du champ magnétique qu'ils créent d'ailleurs en grande partie. Ce phénomène complexe fait l'objet de nombreuses études, mais n'est pas encore bien élucidé.

Les processus de chauffage et de refroidissement des nuages diffus sont assez bien connus. Les échanges thermiques directs entre le gaz et les poussières y sont peu importants, mais on a compris en 1972 que les poussières jouent un rôle dominant dans le chauffage du gaz. Le rayonnement ultraviolet qui les frappe leur arrache des électrons. Ceux-ci, dont l'énergie est une partie importante de celle du photon incident, se mettent en équilibre thermique avec les électrons libres déjà présents dans le milieu, qui sont ainsi chauffés. Les collisions entre les électrons et les ions, puis entre les ions et les atomes neutres, produisent un transfert d'énergie tel que ces différentes composantes sont finalement en équilibre thermique. Quant aux pertes d'énergie qui compensent ces gains, elles sont largement dominées par l'émission d'une raie du carbone une fois ionisé, dans l'infrarouge lointain à une longueur d'onde de 158 μm (micromètre).

Le mécanisme de cette émission est le suivant (figure 1.3) : l'impact d'un électron sur un ion de carbone excite celui-ci sur le premier niveau d'énergie au-dessus du niveau fondamental (au repos). Bien que le retour à l'état fondamental avec excitation d'un photon à 158 μm soit très peu probable (on dit que la transition est *interdite*, ce qui n'est pas strictement vrai), l'atome de carbone excité finira par se désexciter ainsi au bout d'un temps plus ou moins long car il n'a pas d'autre possibilité. Si la densité était plus grande, ce qui serait le cas même dans un bon vide de laboratoire, l'atome excité aurait bien plus de chances de se désexciter par collision avec une autre particule, et l'on n'observerait pas la raie à 158 μm . En astronomie, cette raie est bien observée en provenance du milieu diffus de notre Galaxie et des autres galaxies proches.

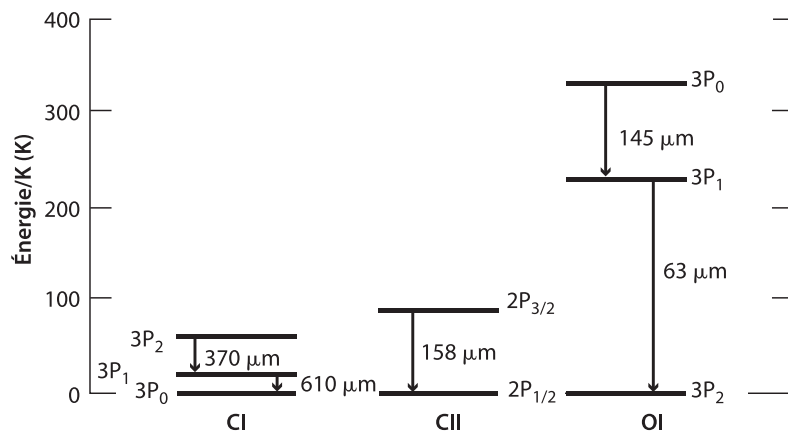


Figure 1.3. Niveaux d'énergie dans le fondamental du carbone neutre CI, de l'ion carbone CII et de l'atome d'oxygène OI. L'énergie, en ordonnées, est exprimée sous la forme de la température du gaz qui est nécessaire pour exciter le niveau supérieur par collisions avec d'autres particules. Les différents niveaux d'énergie sont repérés par leurs nombres quantiques, et on a indiqué la longueur d'onde des photons émis lorsqu'ils se désexcitent. On constate que CI est plus facile à exciter que CII, et lui-même que OI. Il n'y a pas de carbone neutre dans le milieu interstellaire diffus.

LES NUAGES MOLÉCULAIRES

Lorsque la densité du milieu interstellaire devient grande, la plupart des atomes se combinent entre eux pour former des molécules, et l'on a affaire à des nuages moléculaires. Optiquement, ce sont des objets totalement opaques et sombres en raison des poussières qu'ils contiennent : ils sont donc difficiles à observer. On ne les voit que dans de rares cas, en projection sur un fond d'étoiles ou sur des nébuleuses gazeuses auxquelles ils sont parfois associés (la Tête de cheval : planche couleur n° 1.5). Quelquefois, ils sont éclairés par la lumière d'une étoile située à proximité (*nébuleuses par réflexion* : planche couleur n° 1.7). L'observation optique ne peut pas nous apprendre grand-chose sur les nuages moléculaires, et l'essentiel de nos connaissances sur ces objets provient d'observations dans l'infrarouge moyen et lointain et en radio, principalement dans le domaine millimétrique. Environ 130 molécules différentes y ont été détectées, sans parler de très nombreuses substitutions isotopiques¹. La plupart de ces nuages ont d'ailleurs été découverts par des recherches systématiques dans la raie de la molécule CO à 2,6 mm de longueur d'onde (figure 1.1).

L'hydrogène moléculaire est certainement le principal constituant de ces nuages, qui ne contiennent guère d'hydrogène atomique (détectable par la raie à 21 cm) ; mais on ne peut malheureusement l'observer que dans des circonstances exceptionnelles. En effet, cette molécule symétrique ne possède pas de transitions permises dans les domaines radio et infrarouge qui seraient susceptibles d'être excités

1. Liste dans <http://www.cv.nrao.edu/~awootten/>

aux basses températures des nuages moléculaires. En revanche, les molécules asymétriques telles que CO, même si elles ne sont présentes qu'en faible quantité dans les nuages moléculaires, ont une grande variété de transitions de rotation et de vibration, qui sont utiles pour détecter le gaz moléculaire et étudier des régions interstellaires de densités et conditions d'excitation différentes.

Contrairement à la plupart des autres molécules, les molécules d'hydrogène ne peuvent pas se former directement en phase gazeuse par rencontre de deux atomes d'hydrogène. La formation ne peut se faire que sur la surface des grains de poussière (un phénomène de catalyse). Cependant les circonstances de cette formation et ses relations avec la nature et la température des grains sont encore très mal connues : des travaux de laboratoire tendant à reproduire ce qui se passe dans la nature, tels que ceux qui sont réalisés à l'université de Cergy-Pontoise, permettent cependant de progresser dans notre compréhension de ce phénomène fondamental¹.

La plupart des molécules interstellaires sont synthétisées par une chimie fort différente de celle de nos laboratoires, en raison des conditions physiques (faible densité et basse température) qui règnent dans les nuages moléculaires. Cette chimie fait principalement intervenir des ions, les réactions entre les espèces neutres étant souvent inefficaces. Il n'y a pourtant pas beaucoup d'ions présents dans ces nuages, où la lumière ultraviolette pénètre mal ou pas du tout : cependant, des particules chargées d'énergie relativement grande (les rayons cosmiques) y circulent et ionisent de faibles quantités d'hydrogène moléculaire et d'hélium ; les ions ainsi formés servent de point de départ à la chimie des molécules. Bien que les réactions chimiques soient lentes, les nuages moléculaires subsistent assez longtemps pour que des molécules assez complexes, comprenant jusqu'à 13 atomes, puissent y être synthétisées. Comme l'hydrogène, le carbone, l'azote et l'oxygène sont les éléments les plus abondants dans l'Univers (en excluant l'hélium, chimiquement inerte), il est normal que la plupart des molécules interstellaires soient des molécules organiques, formées par définition de ces éléments. Cependant, il serait très risqué d'affirmer qu'il y a un rapport quelconque entre les constituants des nuages moléculaires et l'origine de la vie.

1. Voir par exemple Amiaud L., Momeni A., Dulieu F., Fillion J.H., Matar E., Lemaire J.-L. (2008) *Physical Review Letters* 100, 056101.

Bien que de nombreuses études aient été faites depuis plus de 30 ans sur la chimie du milieu interstellaire, tous les problèmes ne sont pas résolus, loin de là. Par exemple, on peut s'étonner de la quasi-absence de la molécule d'oxygène O_2 (qui vient cependant d'être enfin détectée après beaucoup d'efforts par un groupe franco-finlandais-suédois avec le satellite ODIN¹), et de la faible abondance de la molécule d'eau, alors que les modèles de chimie interstellaire prédisent qu'elles devraient être abondantes. Cette anomalie, et d'autres qui semblent liées, pourrait être due à une bifurcation chaotique dans la chimie qui peut se produire dans un domaine assez étendu de conditions physiques. Elle pourrait aussi impliquer que les molécules manquantes sont détruites par l'effet d'un rayonnement ultraviolet. Or les nuages moléculaires paraissent totalement opaques à ce rayonnement. On est donc conduit à imaginer que ces nuages sont faits de fragments denses entre lesquels les photons ultraviolets peuvent parvenir à circuler, ou bien qu'ils sont continuellement mélangés par la turbulence si bien que leurs différentes parties sont successivement apportées à la surface où le rayonnement ultraviolet peut faire son effet. Encore un domaine où les recherches sont actives en France².

Les sources de chauffage et de refroidissement dans les nuages moléculaires diffèrent profondément de celles dans les nuages diffus. Comme ces nuages sont opaques au rayonnement, sauf au rayonnement radio et infrarouge lointain qui ne peut guère agir que dans des circonstances exceptionnelles, on doit faire intervenir les seules particules qui sont susceptibles d'y pénétrer profondément : ce sont les rayons cosmiques (particules chargées), dont nous avons vu qu'elles produisent une faible ionisation à l'origine de beaucoup de réactions de la chimie interstellaire. Les électrons éjectés par ces ionisations ont une énergie non négligeable ; d'autres électrons sont accélérés par interaction électrostatique (coulombienne) avec les particules cosmiques. Ils se mettent en équilibre thermique avec les ions et molécules du gaz dont ils assurent ainsi le chauffage. Le refroidissement du gaz se fait essentiellement par l'émission de raies de rotation par les molécules, particulièrement CO. Dans les régions les plus profondes des nuages moléculaires où les particules

-
1. Larsson B., Liseau R., Pagani L. et al. (2007) *Astronomy & Astrophysics* 466, 999.
 2. Voir par exemple Lee H.-H., Roueff E., Pineau des Forêts G., Shalabiea O.M., Terzieva R., Herbst E. (1998) *Astronomy & Astrophysics* 334, 1047, et Lesaffre P., Gérin M., Hennebelle D. (2007) *Astronomy & Astrophysics* 469, 949.

cosmiques ont du mal à pénétrer, la seule source de chauffage du gaz est la collision des molécules avec les grains de poussière, qui sont eux-mêmes bien difficiles à chauffer : la température est alors extrêmement basse, quelques degrés K seulement.

Le milieu interstellaire ionisé

LES NÉBULEUSES GAZEUSES

Les nébuleuses gazeuses sont appelées également *régions HII*, ce qui signifie que l'hydrogène y est ionisé : l'hydrogène neutre est désigné par H ou HI, comme l'oxygène neutre par O ou OI, etc., tandis que les espèces correspondantes ionisées 1 fois le sont par H^+ ou HII, O^+ ou OII, etc. ; l'oxygène 2 fois ionisé est O^{++} ou OIII, etc. Les régions ionisées se développent le plus souvent au voisinage immédiat des nuages moléculaires, ce qui n'a rien d'étonnant puisque les étoiles chaudes et massives, productrices d'ultraviolet ionisant, se forment justement dans ces nuages.

Le spectre des nébuleuses gazeuses s'étend de l'ultraviolet aux ondes radio et comprend un continuum auquel se superposent des raies d'émission intenses (figure 1.4). En ultraviolet, le continuum est dominé par le rayonnement des étoiles ionisantes, soit direct, soit diffusé par les poussières, alors que l'émission propre du gaz est importante dans le visible et devient prépondérante en infrarouge et en radio. Les raies sont pour une part émises par l'hydrogène et l'hélium à la suite de recombinaisons ions-atomes ; elles existent aussi en ondes radio. Pour l'autre part, ce sont, comme celle du carbone ionisé à $158 \mu\text{m}$ émise par les nuages diffus (figure 1.3), les raies « interdites » de divers ions excités par collisions avec les électrons libres. De telles raies, très intenses, sont observées dans l'infrarouge moyen et lointain en avion et à partir de satellites. De l'étude de ces raies on peut déduire la température (de l'ordre de 10 000 K) et la densité du gaz (de 10 à 10 000 particules par centimètre cube).