

Molécules dans l'Univers Où ? Quand ? Comment ? Pourquoi ?

Michel Guélin est Astronome à l'Institut de Radioastronomie Millimétrique (IRAM) et à l'Observatoire de Paris. Directeur de Recherche Émérite au Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), il a beaucoup contribué à la détection de nouvelles molécules dans le milieu interstellaire.

À ce jour, les astronomes ont détecté et identifié près de 200 différentes espèces moléculaires dans les nuages gazeux peuplant l'espace interstellaire, un milieu pourtant particulièrement tenu et froid, peu propice à la formation et la survie de toute molécule. Ces molécules, essentiellement composées de carbone, d'oxygène, d'azote et d'hydrogène, pour la plupart bien connues au laboratoire de chimie, sont

observées dans le Système Solaire, à travers toute notre Galaxie, dans les galaxies voisines ou distantes et, pour certaines, jusque dans des quasars situés aux confins de l'Univers.

Quels types de nuages abritent ces molécules? Quand sont-elles apparues et comment se forment-elles ? Comment les observe-t-on ? Ce sont les questions auxquelles nous tenterons brièvement de répondre. Le Graal, la



Figure 1

Le Soleil en lumière ultraviolette (UV) observé pendant le transit de Venus (qui apparaît en haut comme un disque noir).

Source : NASA/SDO & the AIA, EVE, and HMI teams ; Digital Composition : Peter L. Dove.



Figure 2

Photo montage de Saturne et ses satellites : Dioné, Enceladus, Rhea, Titan, etc.

Source : NASA - JPL image PIA01482.

Figure 3

Image de synthèse montrant les planètes du Système Solaire à la même échelle.

question d'un possible lien de causalité entre les molécules interstellaires, les molécules terrestres et l'origine de la Vie (sur Terre, mais peut-être aussi sur des planètes gravitant autour d'autres étoiles, les «*exo-planètes*») ne sera qu'effleurée à la fin de ce chapitre et abordée dans d'autres chapitres de cet ouvrage *Chimie, aéronautique et espace* (EDP Sciences, 2018).

Mais, avant d'aborder ces questions, commençons par une exploration de l'espace intersidéral, exploration partant de la Terre qui nous permettra de reconnaître les divers types d'objets peuplant l'Univers.

1 L'Univers en quelques clics

1.2. Le Système Solaire

Le Système Solaire se compose essentiellement du Soleil (dont la *Figure 1* donne une vue dans l'ultraviolet), de ses huit planètes, des astéroïdes (rocheux) et objets transneptuniens (planètes naines orbitant au-delà de

l'orbite de Neptune), ainsi que des comètes.

La *Figure 2* montre la planète Saturne et ses satellites, et la *Figure 3* un montage du Système Solaire sur lequel on reconnaît les huit planètes (les quatre premières, à gauche, *rocheuses*, les autres gazeuses) et, tout à droite, trois objets transneptuniens dont les plus connus sont le couple Pluton-Charon (récemment rétrogradé par l'Union Astronomique Internationale au statut de planète naine). La ceinture d'astéroïdes (gros blocs rocheux dont le plus gros est Cérés) orbitent entre Mars et Jupiter.

De nombreuses comètes, certaines périodiques comme la Comète de Halley (*Figure 4*) et la comète Churyumov-Gerasimenko, traversent le Système Solaire.

1.3. Les étoiles et les nébuleuses

Quittons le Système Solaire pour découvrir d'autres étoiles ainsi que des objets étendus et diffus que l'on nomme *nébuleuses*. Celles-ci sont constituées de gaz très



peu dense et de poussières qui peuvent apparaître brillantes, si éclairées par des étoiles proches, ou sombres, si elles se projettent sur un riche fond d'étoiles.

La **Figure 5** montre la constellation d'Orion, dont les trois étoiles centrales forment le Baudrier d'Orion (**Figure 5B**). En dessous du Baudrier, on aperçoit une tache lumineuse rosâtre, la Grande Nébuleuse d'Orion (aussi dénommée Messier 42 ou M42), relativement proche de notre Système Solaire (mais tout de même distante de 1 600 années-lumière), est une véritable pouponnière d'étoiles actuellement en cours de formation.

En haut à gauche d'Orion se trouve Bételgeuse (**Figure 5A**), une étoile Géante

Rouge, c'est-à-dire une étoile en fin de vie et relativement froide, devenue si énorme qu'elle remplirait la moitié de l'orbite de Jupiter. En bas à droite, Rigel, est au contraire une étoile plutôt jeune et massive, qui apparaît bleue, parce que sa température de surface est beaucoup plus élevée que celle du Soleil (qui, lui, paraît jaune) ou que celle de Bételgeuse (qui paraît rouge). Les nébuleuses, tels des nuages, peuvent prendre des formes étranges : tout à côté de Rigel (**Figure 5C**) se trouve la nébuleuse dite de la Tête de Sorcière; elle est composée de gaz et de poussières éclairés par Rigel.

Pour comparaison, la **Figure 6** montre une *nébuleuse obscure*, Barnard 68, située dans la constellation Ophiucus, qui n'est proche d'aucune étoile et apparaît comme une tâche noire sur le concert des étoiles.

1. Année-lumière (ou *a.l.*) : distance que parcourt un objet en une année s'il se déplace à la vitesse de la lumière.

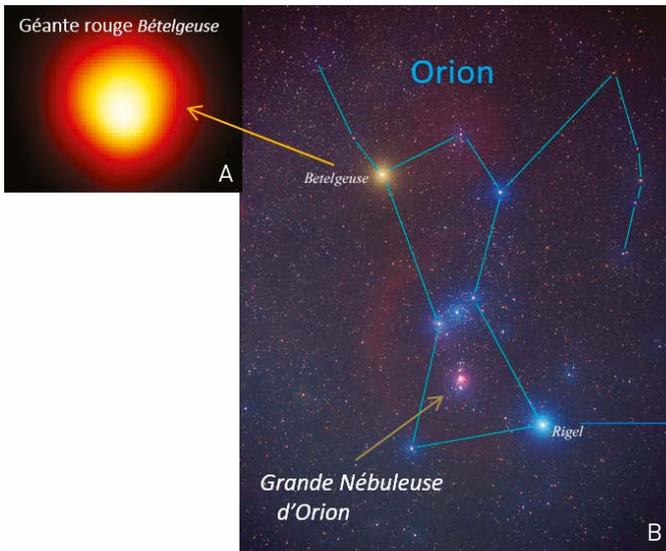


Figure 4

Photographie de la comète de Haley, prise à seulement 600 km de distance par la mission spatiale Giotto lors de son approche du Soleil en mars 1986.

Source : Esa-Max Planck Institute for Solar System Research.

Figure 5

La constellation d'Orion : A) Zoom sur Bételgeuse, étoile géante rouge de la constellation d'Orion ; B) vue d'ensemble de la constellation avec de haut en bas Bételgeuse, le Baudrier, M42 et Rigel ; C) zoom sur la nébuleuse Tête de Sorcière, proche de l'étoile Rigel.

Sources : Betelgeuse: Dupree A. (CfA), Gilliland R. (STScI), NASA ; nébuleuse : Star Shadows Remote Observatory (Steve Mazlin, Jack Harvey, Rick Gilbert, Teri Smoot, Daniel Verschatsel).



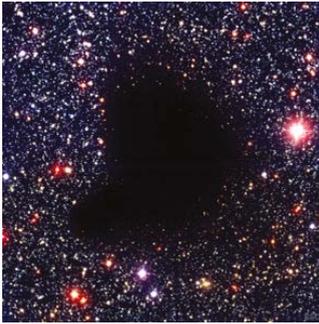


Figure 6

La nébuleuse Barnard 68 de constellation d'Ophiucus apparaît comme une trouée noire sur un riche fond d'étoiles. Nous verrons plus bas que le fond d'étoiles est simplement caché par un nuage des poussières situé au premier plan.

Source : FORS Team, 8.2-meter VLT Antu, ESO.



Figure 7

Vue du ciel nocturne étoilé depuis l'entrée d'une grotte : la partie centrale de notre galaxie, la Voie Lactée, apparaît comme un disque d'étoiles noyées dans un ensemble de nébuleuses brillantes ou obscures, semblables à des nuages.

Source : Jack Fusco.

1.4. Les galaxies

1.4.1. Notre Galaxie : La Voie Lactée

La Voie Lactée, notre galaxie (aussi appelée La Galaxie) ressemble à une immense crêpe épaissie par un œuf en son centre. Elle est constituée de quelque 200 milliards d'étoiles et de très nombreuses nébuleuses brillantes ou obscures (**Figures 7 et 8**) qui forment les *nuages interstellaires*. Le Soleil est situé dans la partie fine de la « crêpe » à égale distance de son centre et du bord.

1.4.2. Les galaxies extérieures

Par-delà notre Galaxie se trouvent d'autres « univers-îles » comme on les appelle quelquefois, c'est-à-dire d'autres galaxies constituées elles aussi de milliards d'étoiles et de nébuleuses. On peut observer à l'œil nu depuis l'hémisphère Sud les Nuages de Magellan (**Figure 9**), situés à environ 100 000 *a.l.* du Soleil, deux « petits » compagnons de la Galaxie.

Beaucoup plus massive que les Nuages de Magellan, la galaxie Messier 31, aussi appelée M31 ou Nébuleuse d'Andromède, est la grande sœur de notre Galaxie. Elle est visible dans le ciel boréal dans la constellation d'Andromède, au nord-est du Grand Carré de Pégase. Son centre apparaît à l'œil nu comme une petite tache brillante. Avec un télescope, on voit un disque plat deux fois plus grand que la Lune et fortement incliné sur le plan du ciel (**Figure 10**). Ce disque entoure un *noyau central* plus épais, constitué de milliards d'étoiles ; des

traînées de nuages interstellaires brillants ou sombres qui se profilent sur ce noyau brillant. Comme le suggère sa forme aplatie, M31 est une galaxie de type *spirale* en rotation sur elle-même. Elle se trouve à 2 millions d'années-lumière du Soleil.

En s'éloignant encore plus de La Voie Lactée, cette fois en direction de la constellation des Chiens de Chasse, on rencontre à 23 millions *d'a.l.* du Soleil la galaxie Messier 51, dite du Tourbillon, une galaxie spirale vue cette fois de face (**Figure 11**). En direction de la Vierge, on trouve une magnifique galaxie de type *elliptique*, le Sombrero (**Figure 12**), dont le gros noyau brillant, de forme elliptique, est traversé par une fine bande sombre : un fin disque de poussières entourant ce noyau, vu par la tranche.

Beaucoup plus loin, à 430 millions d'années-lumière du Soleil, on trouve un couple de galaxies formées d'anneaux brillants qui semblent esquisser un pas de deux (**Figure 13**).

Le nombre de galaxies observables dans l'Univers est colossal et se chiffre en centaines de milliards. Les plus lointaines apparaissent moins lumineuses et plus rouges sur les clichés, sauf lorsqu'elles hébergent en leur centre un *quasar* brillant. Un moyen d'explorer les galaxies distantes dénuées de quasars consiste à se servir du phénomène de *lentille gravitationnelle* qui, telle la lentille optique d'une lunette astronomique, permet d'amplifier la taille et la luminosité des objets éloignés situés derrière un objet très massif.

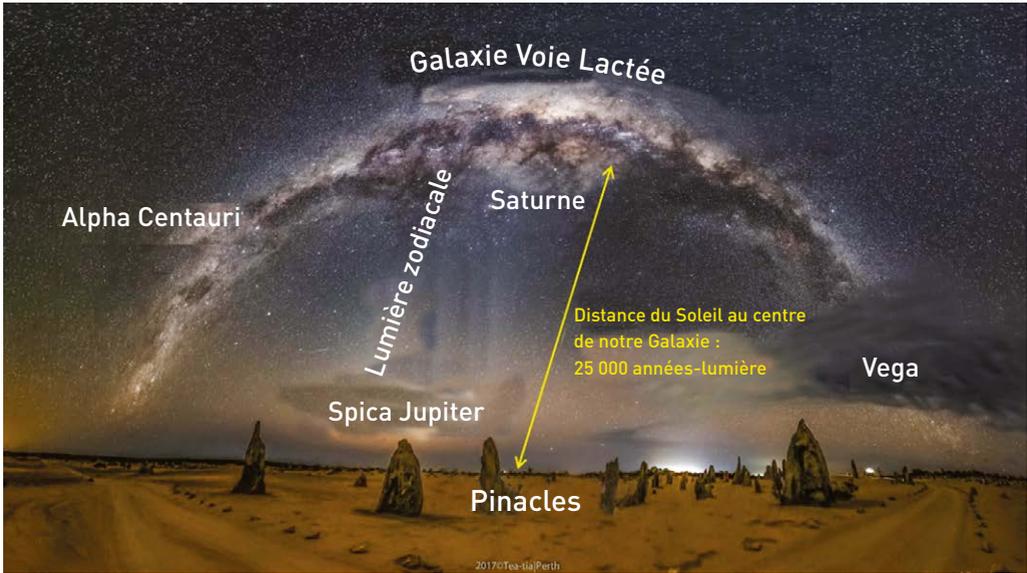


Figure 8

Photographie panoramique de La Voie Lactée, un immense disque constitué d'étoiles (parmi lesquelles le Soleil) et de nuages interstellaires, dont le centre, tout en haut de l'image, se trouve à 25 000 années-lumière du Soleil (ce dernier est à 8 minutes-lumière de la Terre et la Lune à « seulement » 1 seconde-lumière, soit tout de même 300 000 km).

Source : Jingyi Zhang.

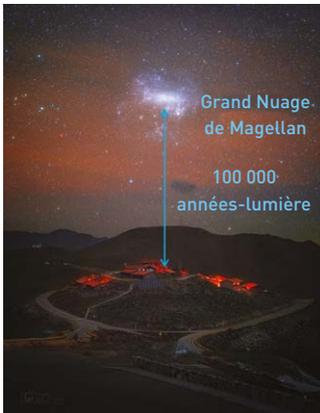


Figure 9

Le Grand Nuage de Magellan dans le ciel austral photographié depuis l'Observatoire de Las Campanas au Chili.

Source : Yuri Beletsky (Carnegie Las Campanas Observatory, TWAN).



Figure 10

La Galaxie d'Andromède, M31, la galaxie spirale géante la plus proche de notre Galaxie. Elle est entourée de deux petits compagnons.

Source : Dieter Beer & Patrick Hochleitner.



Figure 11

Image composite (rayons X, visible, infrarouge) de galaxie des Chiens de Chasse, M51, à 23 millions d'années-lumière de la Galaxie.

Données d'image : rayons X : NASA/CXC/SAO ; optique : Detlef Hartmann ; Infrarouge : NASA/JPL-Caltech.



Figure 12

La galaxie M104 dont la forme rappelle un sombrero. On voit un fin disque de gaz et de poussières entourer le noyau brillant constitué de milliards d'étoiles.

Données d'image : NASA, ESO, NAOJ, Giovanni Paglioli - Processing: R. Colombari.

Figure 13

Image du couple de galaxies Arp147 en lumière visible.

Source : NASA, ESA, and M. Livio (STScI).

La **Figure 14** montre un champ de galaxies observé par le télescope spatial Hubble, télescope NASA/ESA évoluant au-dessus de l'atmosphère terrestre et fournissant des images d'une acuité inégalée. On y distingue, en plus des nombreux disques de galaxies,

plusieurs arcs concentriques de couleur bleue ou rouge : ces arcs sont les caustiques résultant de la distorsion de l'image d'objets brillants lointains, situés derrière l'amas de galaxies Abell 2218, par le champ gravitationnel de cet amas – un effet prédit par

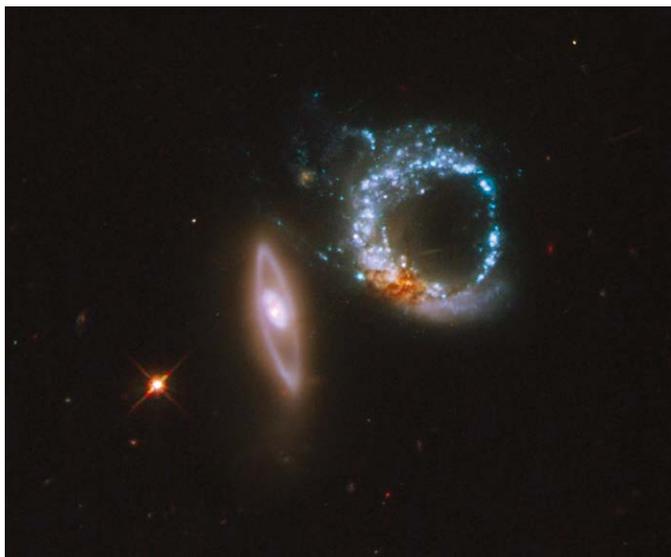


Figure 14

Image de l'amas de galaxies Abell 2218 prise par le télescope spatial Hubble. L'effet de lentille gravitationnelle grossit les images d'un facteur 10 ou plus et permet d'observer des objets plus lointains situés derrière le centre de l'amas.

Source : NASA/ESA.

la Théorie de la Relativité d'Einstein dans laquelle les rayons lumineux sont déviés en passant au voisinage d'une concentration importante de masse, comme par une gigantesque lentille de verre. Ici, l'amas de galaxies est situé à 2,3 milliards d'années-lumière, et la galaxie brillante et les objets qui l'entourent situés encore beaucoup plus loin (l'un d'eux aux confins de l'Univers, à 13 milliards d'a.l.).

Enfin, la **Figure 15** montre l'image d'un champ du ciel observé par le télescope Hubble avec une sensibilité exceptionnelle (*Hubble Deep Field*). L'image permet de recenser les diverses populations de galaxies (spirales/elliptiques, géantes/naines, normales/quasars,...) à des distances variant de quelques centaines de millions à une dizaine de milliards d'a.l. (pour les plus rouges). Au-delà de 10 milliards d'a.l., les objets sont trop rouges pour être visibles sur ce cliché et ne sont observables qu'aux longueurs d'onde infrarouges et submillimétriques.

2 Où trouve-t-on des molécules dans l'univers ?

On les observe principalement dans les nuages interstellaires diffus, mais aussi dans les cœurs sombres des nuages et plus particulièrement dans les régions les plus denses où se forment les étoiles, les *cœurs protostellaires*.

On détecte aussi des molécules dans les atmosphères stellaires, comme par exemple l'atmosphère du Soleil, dans les atmosphères planétaires, comme celles de la Terre, de Mars ou de Vénus, et dans les atmosphères cométaires.

Enfin, de nombreuses espèces moléculaires sont observées dans les enveloppes gazeuses éjectées par les étoiles évoluées, c'est-à-dire les étoiles ayant brûlé l'essentiel de l'hydrogène qui leur sert de combustible pour rayonner, ou dans les disques circumstellaires dits *protoplanétaires* où se forment les planètes.

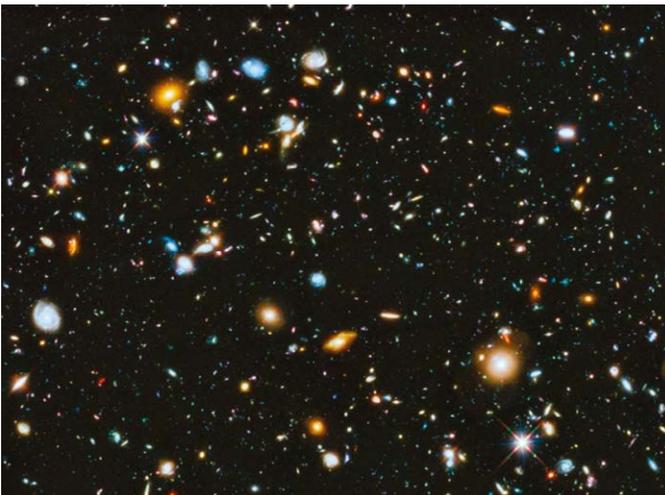


Figure 15

Image du Hubble Ultra Deep Field, un champ situé dans la constellation de la Grande Ourse, où des milliers de galaxies sont visibles, certaines jusqu'à 10 milliards d'a.l.

Source : NASA, ESA, Teplitz H. et Rafelski M., (IPAC/Caltech), Koekemoer A. (STScI), Windhorst R. (ASU), Levay Z. (STScI).

Figure 16

Distribution des espèces moléculaires au cœur et en périphérie de la nébuleuse obscure B68 située dans la constellation d'Ophiucus. L'image de gauche (A) a été prise en lumière visible et l'image de droite (B) dans l'infrarouge. On distingue dans l'infrarouge quelques-unes des étoiles situées derrière le cœur du nuage.

La densité la température du gaz et l'opacité visuelle sont : $n=10-10^3 \text{ cm}^{-3}$, $T=20-100 \text{ K}$ et $A_V < 1$, respectivement, dans la partie diffuse, et $n=10^3-10^6 \text{ cm}^{-3}$, $T=10-20 \text{ K}$ et $A_V \geq 1$ dans le cœur sombre.

Source : FORS Team, 8.2-meter VLT Antu, NTT, SOFI ESO.

2.1. Les molécules des nuages interstellaires diffus

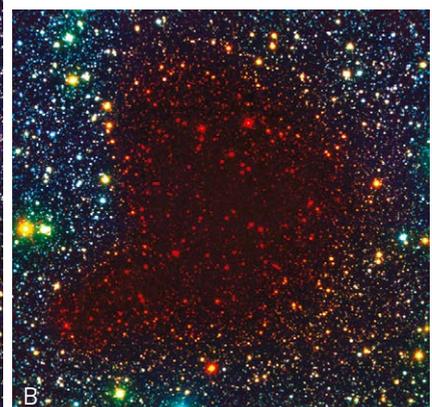
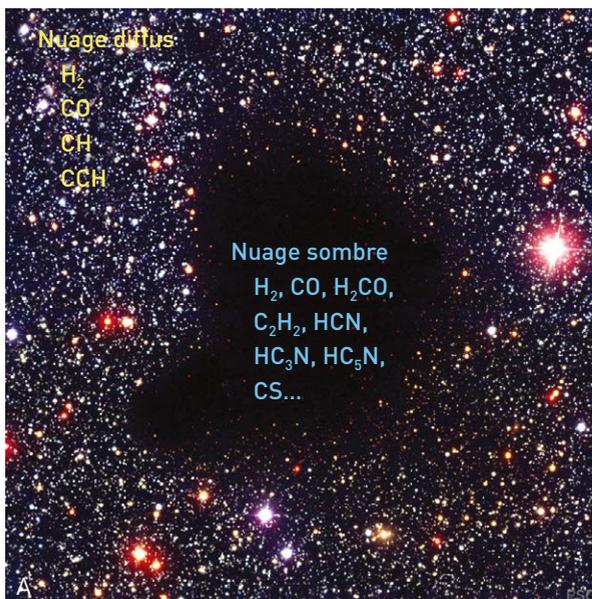
La **Figure 16A**, qui reprend la **Figure 6**, montre la structure d'un nuage interstellaire relativement dense et compact. Il est composé de gaz et de poussières. Ces dernières sont essentiellement des grains de silicium ou de carbone (recouverts de molécules comme H_2O , CO , etc.) de très petite taille (quelques dixièmes de micron), qui absorbent la lumière visible provenant des étoiles situées à l'arrière-plan.

L'absorption est moindre en périphérie du nuage, où la couche de gaz et de poussière est plus tenue (la partie dite *diffuse* du nuage), mais est totale au centre aux longueurs d'onde visibles.

Les étoiles de l'arrière-plan réapparaissent toutefois dans l'infrarouge (**Figure 16B**) aux longueurs d'onde de l'ordre d'un micron, qui sont plus

grandes que le diamètre des poussières et sont donc peu absorbées, y compris dans la partie centrale du nuage. Une analyse spectrométrique de la lumière des étoiles situées dans l'arrière-plan permet, après identification des raies d'absorption, de connaître la composition chimique du gaz du nuage : dans la partie périphérique diffuse, on trouve essentiellement des molécules diatomiques ou des petits *radicaux libres* provenant de la *photodissociation*² de l'acétylène (principalement de l'hydrogène sous forme atomique H ou moléculaire H_2 , mais aussi du monoxyde de carbone CO , les radicaux méthylidyne CH et éthyne C_2H), tandis que dans la partie sombre centrale, qui est protégée du rayonnement UV des étoiles, on trouve des raies

2. Photodissociation : réaction de dissociation d'une molécule initiée par un photon (qui apporte son énergie).



Seeing Through the Pre-Collapse Black Cloud B68 (VLT ANTU + FORS 1 - NTT + SOFI)

d'émission d'espèces moléculaires plus complexes tels l'acétylène C_2H_2 , le cyanure d'hydrogène ou d'acétylène HCN et HC_3N , des longues chaînes rectilignes d'atomes de carbone (comme le diacétylène C_4H_2 et le radical C_4H , le tr-iacétylène, etc.), du formaldéhyde H_2CO , ainsi que des ions comme le formylium HCO^+ et le diazénylium N_2H^+ . Notons que H_2 est aussi présent en abondance, mais parce que homonucléaire, donc non polaire, il est très difficile à observer dans les nuages obscurs, faute de transitions dans le domaine radio.

Dans la partie diffuse des nuages, la densité particulière est typiquement de 100 particules par centimètre cube (alors que dans l'atmosphère terrestre elle est plutôt de 10^{20} part/cm³). La température y est très froide : de 20 à 100 kelvins (K), soit -253 à -173 °C. Dans le cœur sombre du nuage, la densité particulière (essentiellement des molécules H_2) est nettement plus forte sans toutefois dépasser 10^6 part/cm³ ;

la température y est encore plus basse, de l'ordre de 10 K, le rayonnement des étoiles pénétrant difficilement.

2.2. Les molécules des nuages « denses » pré-stellaires et des cœurs protostellaires « chauds »

Zoomons maintenant sur la Grande Nébuleuse d'Orion, M42, aperçue sur la **Figure 5**. On reconnaît en haut à gauche de la **Figure 17** les sept étoiles brillantes formant la constellation d'Orion, telle que l'a imaginée Ptolémée au 11^e siècle avant Jésus-Christ, et en bas à gauche le chasseur mythique Orion, transformé par Zeus en un champ d'étoiles et représenté ici par Helvétius³. La rangée supérieure de la **Figure 17** montre des zooms successifs sur M42 (indiqué par une flèche), zooms qui révèlent la présence en son sein (Orion KL) d'une véritable pouponnière d'étoiles. Des étoiles se forment actuellement à partir

3. Helvétius : philosophe et poète du 18^e siècle.

Figure 17

A-D) Zooms successifs sur la Grande Nébuleuse d'Orion dans la constellation du même nom. Le centre de cette nébuleuse est une véritable pouponnière d'étoiles constellée de cœurs proto-stellaires chauds ; E) la constellation d'Orion d'après Helvétius ; F) émission moléculaire (en bleu et jaune) dans le nuage Orion B, ré-interprétée par Audrey Pety ; G) Orion B et la nébuleuse de la Tête de Cheval, près de l'étoile ζ Ori du Baudrier d'Orion.

Source : Rogelio Bernal Andreo (Deep Sky Colors) ; Jérôme et Audrey Pety.

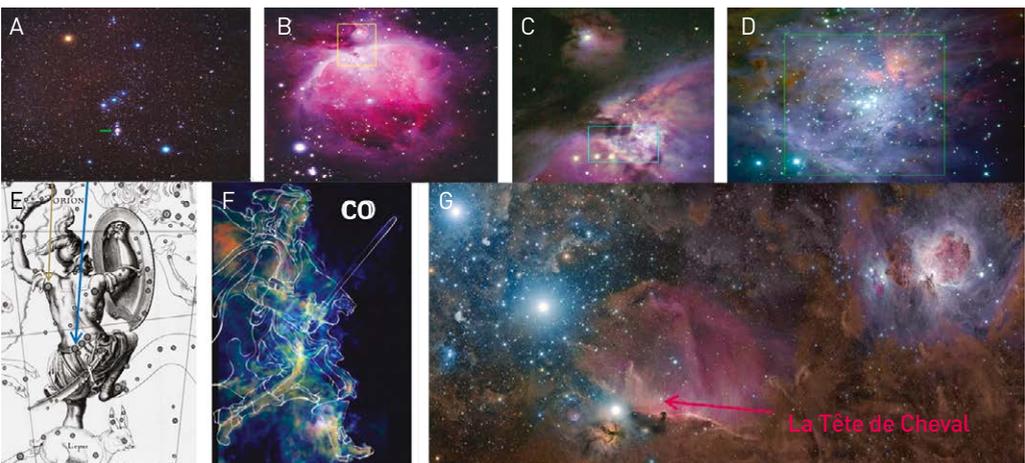




Figure 18

Le complexe de nuages de la « Tête de Cheval » dans Orion B.
Source : John Chumack.



Figure 19

Émission moléculaire (CO en bleu et CS en orange) dans le complexe nébuleux de la Tête de Cheval, observé avec le télescope de 30-m de l'IRAM par J. Pety et collaborateurs. Le gaz moléculaire suit de près le tracé de la poussière (les pattes avant du cheval apparaissent mieux toutefois).

Source : IRAM/A&A Jérôme Pety.

Figure 20

Les nuages de gaz et de poussières de la Tête de Cheval, vus en lumière visible et infrarouge par le télescope spatial Hubble. Ces nuages sont riches en molécules et radicaux libres.

Source : optique : Aldo Mottino & Carlos Colazo, OAC, Córdoba ; infrarouge : Hubble Legacy Archive.

d'un immense nuage de gaz et de poussières, dense et relativement « chaud », qui recouvre la nébuleuse. Ce nuage apparaît en lumière visible tantôt brillant, tantôt sombre, suivant son orientation par rapport aux étoiles.

Une autre méthode de cartographier les nuages interstellaires consiste à observer aux longueurs d'onde millimétriques l'émission radio des molécules qu'ils contiennent, par exemple celle du monoxyde de carbone CO, dont la raie de rotation fondamentale a pour longueur d'onde 2,6 mm. La **Figure 17G** montre à côté de M42 (visible à droite sur cette dernière image qui est tournée de 90 degrés par rapport à la **Figure 17A**) les trois étoiles du Baudrier d'Orion et un ensemble de nébuleuses brillantes, dont Orion B sur lequel se découpe la silhouette noire de la nébuleuse de La Tête de Cheval. La nébuleuse Orion B

apparaît sur l'image adjacente (**Figure 17F**), qui montre en bleu et orange les émissions du monoxyde de carbone CO et du monosulfure de carbone CS. Ici, CO trace plutôt le gaz diffus et CS le gaz dit « dense ». Il est frappant de voir qu'ensemble ces deux molécules semblent tracer l'une l'enveloppe, l'autre le squelette d'un nuage dont la forme évoque la silhouette d'Artémis, la déesse qui tua Orion et l'envoya au ciel.

La **Figure 18** montre une vue agrandie de la Tête de Cheval, prise par le télescope spatial Hubble en lumière visible. La nébuleuse, riche en poussières, se détache en noir sur un fond brillant d'étoiles et de nuages situé dans l'arrière-plan. Elle est surtout constituée de gaz moléculaire (CO, CS, etc.), comme le montre la carte de la **Figure 19**, observée par le radiotélescope de Pico Véléta aux longueurs d'onde millimétriques. La **Figure 20**,



obtenue par le télescope spatial Hubble, montre un agrandissement saisissant de la Tête sur lequel on distingue très bien la forme tridimensionnelle de ce pilier de gaz et de poussières, éclairée par des étoiles proches.

Les **Figures 21** et **22** présentent une portion du spectre sub-millimétrique (sub-mm) du cocon central de la Grande Nébuleuse d'Orion, Orion KL, ainsi que celui d'un autre nuage dense où se forment actuellement des étoiles, situé près du Centre Galactique : Sagittarius B2. Comme expliqué dans le paragraphe 2.3 ci-dessous, les molécules plongées dans un milieu très froid émettent des raies dites *de transition de rotation* aux longueurs d'onde millimétriques (mm)

et sub-mm. Contrairement aux raies *de transition électronique* (par exemple les fameuses raies D émises dans le jaune par les atomes de sodium chauffés à haute température), ces raies de rotation sont très étroites et leur longueur d'onde (on parle plutôt de *fréquence* en radio) peut être mesurée avec une précision exceptionnelle (10^{-9}) laissant peu de doute quant à leur identification (rappelez-vous comment, dans l'album de Tintin *L'Étoile Mystérieuse*, l'astronome Hyppolyte Calys identifie un nouveau métal, le calystène, par simple examen d'un spectre de raies visibles).

Les spectres sub-mm d'Orion KL et de SgrB2, comme celles d'autres nuages moléculaires pré-stellaires ou proto-stellaires dits « chauds », sont

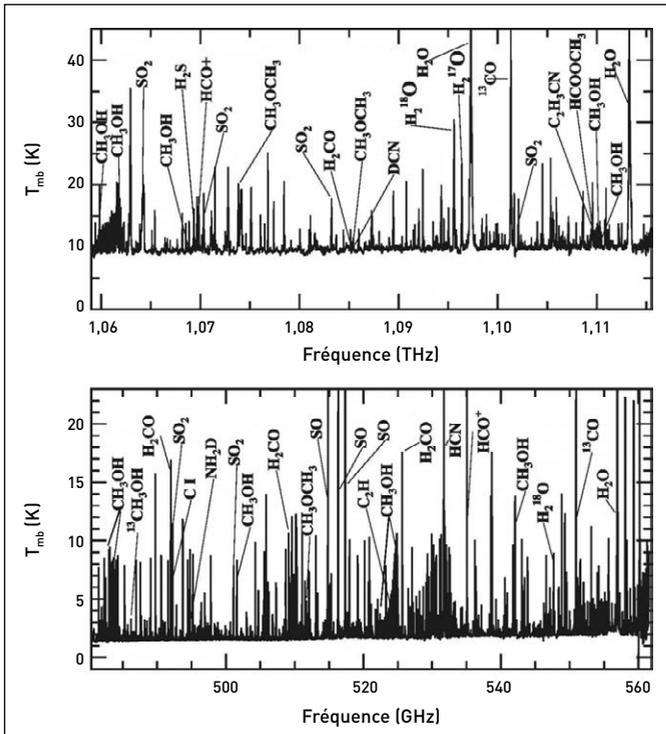
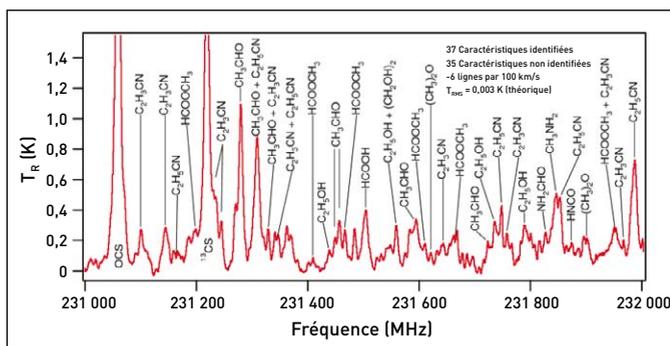


Figure 21

Portions du spectre de raies sub-mm de la Nébuleuse Orion KL. L'abscisse représente la fréquence (l'inverse de la longueur d'onde), exprimée en Giga- ou Terahertz, et l'ordonnée l'intensité des raies. Chaque raie correspond à une transition de rotation d'une espèce moléculaire, transition dont la fréquence peut être mesurée très précisément au laboratoire. Parmi la grande variété de molécules identifiées, notons CO, HCN, SO, l'eau, le formaldéhyde et le méthanol.

Figure 22

Portion du spectre millimétrique de SgrB2, un nuage proche du centre de la Voie Lactée qui est exceptionnellement riche en molécules organiques. Parmi les espèces détectées on reconnaît des aldéhydes, éthers, acides, ainsi que l'alcool éthylique C_2H_5OH .



particulièrement riches en raies et l'on y identifie plus de cent espèces moléculaires différentes (sans compter leurs différents *isotopomères*). SgrB2 est particulièrement riche en molécules organiques, certaines comportant plus de dix atomes, ce qui est remarquable compte tenu des conditions ambiantes très peu propices à leur survie.

2.3. Les molécules circumstellaires

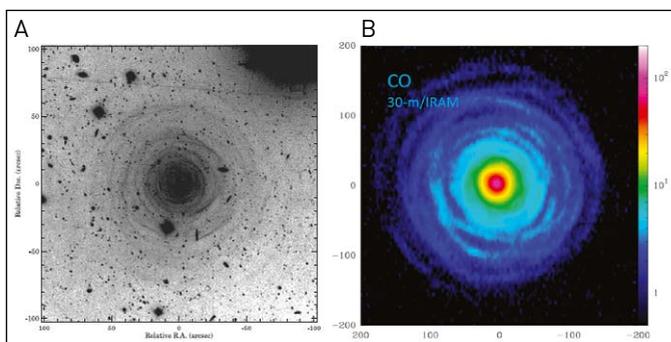
Les enveloppes gazeuses éjectées par les étoiles sont une autre catégorie de sources astronomiques riches en espèces moléculaires. Les étoiles perdent de leur masse tout au cours de leur existence (le vent solaire en est un exemple), mais l'essentiel de cette perte intervient au cours

des dernières phases, quand les étoiles sont dites évoluées. Nous avons déjà noté dans la constellation d'Orion une étoile évoluée, la *géante rouge* Betelgeuse.

L'étoile CW Leonis, dans la constellation du Lion, est une étoile évoluée un peu plus massive que le Soleil, mais surtout bien plus vieille : elle ressemble au Soleil comme il sera dans quelque 5 milliards d'années et aura le double de son âge actuel. Après avoir brûlé ses réserves d'hydrogène, le principal composant des étoiles jeunes, CW Leo s'est considérablement dilatée (son rayon dépasse celui de l'orbite de Mars) et sa surface s'est refroidie. Elle est devenue une géante rouge. L'étoile éjecte actuellement dans l'espace une grande partie de ses couches externes et est entourée de ce fait d'une enveloppe gazeuse de forme sphérique et très riche en poussières. Cette poussière ne permet plus de discerner l'étoile elle-même qui est enfouie dans son enveloppe, une grosse boule opaque, entourée de coquilles semblables à des poupées russes (Figure 23A). Observée dans les raies de rotation de CO, l'enveloppe paraît plus

Figure 23

L'enveloppe de l'étoile CW Leo, observée dans le visible avec le VL de l'ESO (A), dans la raie 1,3 mm du monoxyde de carbone avec le radiotélescope de l'IRAM (B). Les coordonnées x et y sont exprimées en secondes d'arc et relatives à la position de l'étoile. Les échelles diffèrent d'un facteur 2 : l'enveloppe s'étend deux fois plus loin en CO qu'en optique. Source : A&A/Leao et Cernicharo.



étendue avec un cœur brillant entouré de coquilles. L'analyse du champ de vitesse révélé par le décalage doppler de la raie de CO permet de reconstituer la morphologie de l'enveloppe en 3D.

L'enveloppe paraît deux fois plus étendue dans le monoxyde de carbone : quelque 20 000 fois l'orbite terrestre ! Sa masse ne dépasse cependant pas quelques dixièmes de la masse du Soleil. Sa composition élémentaire est voisine de celle du Soleil, enrichie toutefois en carbone et azote, les produits de la nucléosynthèse⁴ à l'intérieur de l'étoile. Ces produits, rejetés dans l'espace, enrichiront peu à peu le milieu interstellaire en éléments lourds : seuls l'hydrogène et l'hélium proviennent du Big Bang, le carbone et les

éléments plus lourds ont été progressivement synthésés, puis éjectés par les générations successives d'étoiles. Une soixantaine d'espèces moléculaires ont été identifiées dans l'enveloppe de CW Leo.

2.4. Les molécules des nébuleuses planétaires

L'image optique de la nébuleuse planétaire, dite « le Papillon » (**Figure 24A**), est superposée sur la **Figure 24B** à une cartographie de cet objet observé par l'interféromètre NOEMA dans une raie du monoxyde de carbone. L'objet apparaît en CO comme un anneau dense orange dans la partie centrale : c'est lui qui focalise le jet de gaz émis par l'étoile située au centre de la nébuleuse dans les deux directions opposées.

Outre CO, de nombreuses espèces moléculaires sont

4. Nucléosynthèse : réaction nucléaire se produisant à l'intérieur des étoiles dont les produits sont des noyaux atomiques.

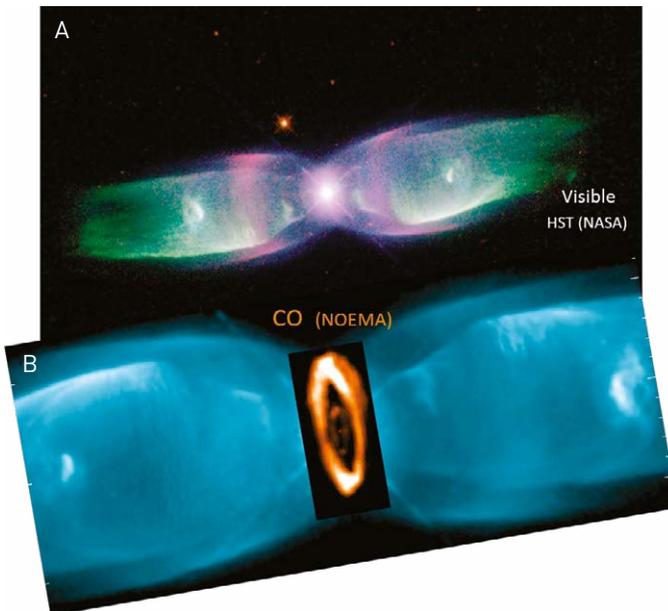


Figure 24

A) Photographie de la nébuleuse planétaire du Papillon dans la constellation du Scorpion ; l'étoile centrale est une naine blanche extrêmement chaude en fin de vie ; B) carte de l'émission du monoxyde de carbone de la nébuleuse du Papillon (anneaux oranges), insérée dans l'image optique : le gaz dense tracé par le CO focalise les jets de gaz ionisé issus de l'étoile centrale (point rouge au centre des deux anneaux).

Source : ESA/Hubble & NASA, remerciement : Judy Schmidt ; IRAM/Castro-Carrizo.



Figure 25

La galaxie d'Andromède dans le visible.

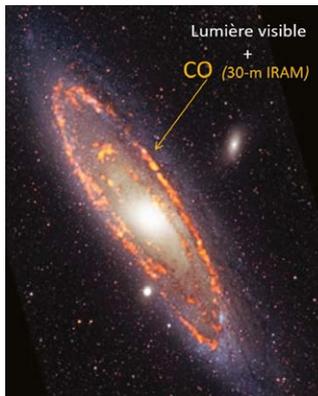


Figure 26

La distribution du gaz moléculaire tracé par le monoxyde de carbone CO (en orange) sur l'image optique de la Figure 25.

Source : IRAM/M. Guélin.

observées dans les nébuleuses planétaires, qui sont les restes d'enveloppes circumstellaires après que la géante rouge, ayant presque épuisé son combustible, se soit effondrée sur elle-même. L'étoile, devenue une *naine blanche*, est devenue extrêmement chaude ($>100\,000\text{ °C}$) et rayonne beaucoup d'UV. Ce dernier est la cause d'une chimie particulière au cours de laquelle apparaissent des cycles d'atomes de carbone pentagonaux ou hexagonaux (benzéniques), isolés ou agencés, parfois formant des complexes lourds comme le *Buckminster Fullerene*, C_{60} , une molécule de forme sphérique semblable à un ballon de football qui consiste en un agencement de 60 atomes de carbone. L'identification de certains ensembles de raies infrarouges (dites *bandes diffuses*) couramment observées dans les Nébuleuses Planétaires, avec des transitions de vibration d'hydrocarbures aromatiques polycycliques, ou *HAP* (qui sont un agencement de cycles benzéniques courant dans les résidus de combustion incomplète de matières organiques), fait débat dans la communauté astrochimique.

2.5. Les molécules dans les galaxies extérieures

Revenons à l'image optique de la Galaxie d'Andromède M31 en lumière visible (Figure 25). La Figure 26, sur laquelle on a tracé en orange les régions où l'on détecte l'émission millimétrique du monoxyde de carbone CO, montre que le gaz moléculaire suit fidèlement

les traînées noires, visibles sur l'image optique, causées par des nuages interstellaires gazeux riches en poussières. Comme dans le cas des nuages sombres de la Voie Lactée, CO n'est pas la seule molécule observée : on y détecte CS, HCN, HC_3N , H_2CO , HCO^+ , etc. Nous reviendrons là-dessus plus loin.

La présence de molécules dans les nuages interstellaires denses n'est pas restreinte à notre Galaxie et à M31. Elle est observée dans toutes les galaxies extérieures, qu'elles soient de type *spirale*, *elliptique* ou simplement *irrégulière*. Ces nuages suivent le tracé des *bras spiraux*, qui apparaissent souvent comme des chapelets de perles brillantes (les étoiles jeunes) sur des traînées obscures. C'est le cas en particulier dans M51, une galaxie aux bras spiraux particulièrement bien marqués, où l'émission mm de CO suit fidèlement le tracé des bras (Figure 27).

Nombre de molécules interstellaires sont observées dans les galaxies très distantes, certaines jusqu'aux confins mêmes de l'Univers. La Figure 28 montre les spectres millimétriques observés dans la direction d'un quasar⁵ situé à quelque 10 milliards d'années-lumière du Soleil. La ligne de visée vers ce quasar est interceptée par une galaxie spirale, distante de 6 milliards d'a.l.

5. Quasar : galaxie particulière où le trou noir central est dit « actif » émettant ainsi deux jets opposés de matière. Ce sont les objets les plus brillants de l'Univers.

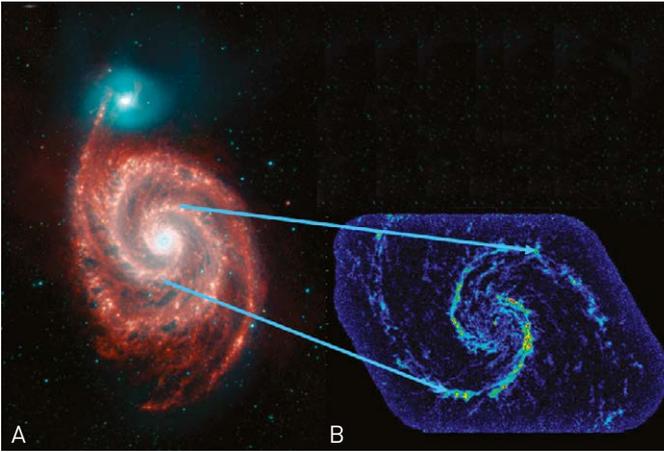


Figure 27

La galaxie M51. A) Image composite mettant en évidence les bras spiraux de la galaxie ; B) la partie centrale de l'image, vue dans la raie du monoxyde de carbone CO à 2,6 mm de longueur d'onde par l'interféromètre NOEMA.

Source : IRAM/J.Pety.

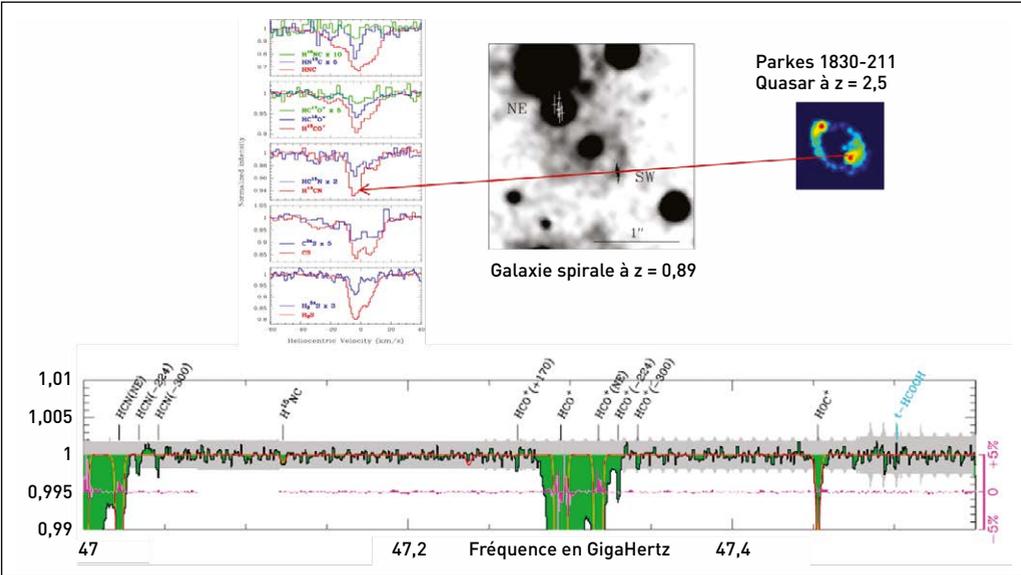


Figure 28

A) Image du quasar lointain PKS1830-218, distordue par un effet de lentille gravitationnelle causé par une galaxie spirale interceptant la ligne de visée. La galaxie, de redshift $z=0,89$, est distante de quelque 6 milliards d'a.l. de la Voie Lactée. Le gaz de ses bras spiraux absorbe le rayonnement millimétrique provenant du quasar, donnant naissance à des raies d'absorption correspondant aux transitions de rotation des molécules HCO^+ , HCN , CS et H_2S (observations faites avec l'interféromètre NOEMA du Plateau de Bure) ; B) spectre submillimétrique de la même source observé par ALMA, montrant des profils de raie complexes qui révèlent la présence de plusieurs nuages moléculaires dans les bras de la galaxie.

Source : A&A/S. Muller.

Cette dernière, très massive, distord l'image ponctuelle du quasar comme le ferait une gigantesque loupe (nous avons déjà vu sur la **Figure 14**

les effets d'une lentille gravitationnelle) et la transforme en deux virgules brillantes, disposées symétriquement par rapport au quasar. Par

chance, ces deux images apparaissent exactement derrière des bras spiraux de la galaxie qui sont riches en gaz moléculaire. Le gaz des bras absorbe le rayonnement du quasar, si bien que l'on observe un spectre millimétrique riche en *raies d'absorption*, tout comme le spectre d'Orion de la **Figure 21** l'était en *raies d'émission*.

Chacune des raies d'absorption peut alors être identifiée avec des transitions rotationnelles de molécules connues, comme nous l'avons fait pour la **Figure 21**. Il est à noter que cette fois les fréquences des raies observées sont très différentes de celles mesurées au laboratoire, car la galaxie spirale, très éloignée, s'éloigne de nous à grande vitesse du fait de l'expansion de l'Univers ($v=cz$, où c est la vitesse de la lumière et $z=0,89$ le *redshift*⁶ de la galaxie). À cause de l'effet Doppler, la fréquence apparente des transitions est divisée par $1+z=1,89$ et les raies sont décalées d'autant vers le rouge. On distingue ainsi sur les spectres de la **Figure 28** les raies des molécules HCN, HNC, HCO⁺ et HOC⁺. Le monoxyde de carbone CO, l'eau H₂O et le formaldéhyde H₂CO sont également observés mais ne sont pas visibles sur cette portion du spectre. Au total une trentaine d'espèces moléculaires différentes sont détectées

dans la galaxie distante de 6 milliards d'années-lumière !

Les molécules CO et H₂O sont détectées dans des quasars encore bien plus lointains. Beaucoup d'autres espèces (H₂, CO₂, CS, etc.) sont certainement présentes, mais leur émission, plus faible, est plus difficile à observer. De fait, nous observons la lumière que ces quasars ont émise il y a plus de dix milliards d'années : la formation de molécules dans l'espace interstellaire ne date pas d'hier !

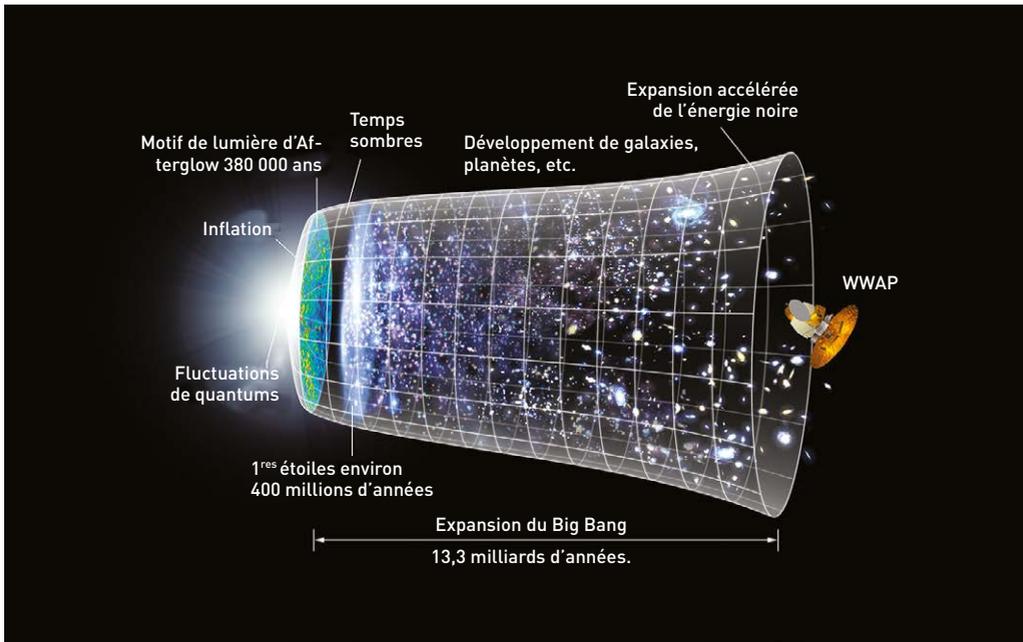
3 Quand ? L'origine des molécules de l'espace

3.1 Apparition des premières molécules

La **Figure 29** illustre de façon schématique l'évolution de l'Univers depuis le Big Bang⁷ (à gauche sur la figure) il y a 13,7 milliards d'années, jusqu'à nos jours (à droite). Les fuseaux blancs représentent l'évolution de la taille de l'Univers : tout d'abord une phase d'expansion très rapide de 0 à 300 000 ans, suivie d'une longue phase d'expansion lente, enfin une phase de ré-accélération. L'image à l'extrême gauche montre la structure du *fond diffus cosmologique*, le rayonnement fossile du Big Bang il y a 380 000 ans, tel qu'il apparaît aujourd'hui sur les images radio observées

6. Redshift : décalage de fréquence entre un signal reçu et ce même signal émis dû à l'expansion de l'Univers. En effet, la fréquence d'un signal est modifiée à grande distance car celui-ci se propage dans l'espace en expansion.

7. Big Bang : début supposé de l'Univers ; à ce moment, l'Univers qui est contenu dans un volume infiniment petit et infiniment dense et chaud, explose. Il entame ainsi son expansion qui mènera, 13,7 milliards d'années plus tard, à l'Univers tel qu'il est aujourd'hui.



par les satellites WMAP de la NASA et PLANCK de l'ESA. Elle montre ce que l'on peut observer au plus près du Big Bang : un mur opaque remarquablement uniforme, rayonnant comme un *corps noir* à une température de 2,7 K. Elle est suivie d'une courte phase, l'Âge Obscur, où l'espace est peuplé seulement de matière noire et de gaz neutre. Puis apparaissent les premières étoiles et la matière se ré-ionise sous l'effet de leur rayonnement. Quelques centaines de milliers d'années plus tard, les premières galaxies se forment à partir des étoiles, du gaz et de la matière noire. Suit enfin une longue phase d'évolution au cours de laquelle les galaxies grandissent par cannibalisme, phase qui se prolonge jusqu'à l'époque actuelle.

Comme nous venons de le voir, des molécules comme H_2 , CO, H_2O , présentes dans

quelques-unes des galaxies ou quasars les plus distants connus, ont dû se former au début de la ré-ionisation de l'Univers, il y a 10 ou 12 milliards d'années. Des molécules beaucoup plus complexes se sont certainement formées dès cette époque dans les atmosphères stellaires et les nuages interstellaires.

3.2. Le bestiaire moléculaire

Une liste (non exhaustive) des molécules interstellaires identifiées à ce jour est présentée dans sur la [Figure 30](#). Elle contient environ 200 espèces moléculaires, qui vont depuis l'espèce la plus légère, l'hydrogène moléculaire H_2 (de très loin la plus abondante), aux espèces les plus massives, les *fullerènes* C_{60} et C_{70} , qui sont des agencements de cycles pentagonaux et hexagonaux d'atomes de carbone formant une sphère. C_{60} , dont la structure 3D est

Figure 29

Représentation schématique de l'expansion de l'Univers du Big Bang à nos jours, marquant les différentes étapes de cette évolution.

Source : NASA/WMAP Science Team.

H2	C3*	C4*	C5*	CSH	C6H	CH3CN	CH3CH	CH3CSN	HC9N
AlF	C2H	L-C3H	C4H	L-H2C4	CH2CHCN	HC(O)OCH3	CH3CH2CN	(CH3)2CO	C7H5OCH
AlCl	C2O	C3N	C4N	C7H4*	CH3C2H	CH3COOH	(CH3)2O	(CH2OH)2	CH3COCH3
C2**	C2S	C3O	L-C3H2	CH3CN	HC5N	C2H	CH3CH2OH	CH3CH2CHO	CH3COOCH3
CH	CH2	C3S	CH3CN	CH3NC	CH3CHO	CH3NH2	CH3CH2NH2	CH3CH2O	CH3CH2NH2
CH+	HCN	C2H2*	H2CCN	CH3OH	CH3NH2	CH2OHCHO	C8H	L-C3H7CN	C9H
CN	HCO	NH3	CH4*	CH3SH	c-C2H4O	L-HC6H*	CH3C(O)NH2	C10H	C11H
CO	HCO+	HCCN	HC3N	HC3NH+	H2CCOH	C(O)C(O)O	C8H6	C9H8	n-C3H7CN
CO+	HCS+	HCCNH+	HC2NC	H2CCHO	CH2CCHCN	H2NCH2CN	C10H6	C11H8	C12H
CP	H2CS	HNCO	HC(O)OH	NH2CHO	CH3NCO	CH3CH2CN	C10H10	C11H12	C12H14
SiC	H2O	HNC	H2CNH	CSN	HC5O	CH3CHNH	C10H14	C11H16	C12H18
HCl	H2S	HOCO+	H2C2O	LHC4H*		CH3SH3			
KCl	HNC	H2CO	H2NCN	LHC4N					
NH	HNO	H2CN	HNC3	C4H5N					
NO	MgCN	H2CS	SH4*	H2CCNH					
NS	MgNC	H3O+	H2COH+	C5H					
NaCl	N2H+	c-SiC	HNCHCN	SiH3CN					
OH	N2O	CH3*	HC(O)CN						
PN	NaCN		HNCNH						
SO	OCs	PH3	CH3O						
SOH	SO2	HCNO	NH4+						
SiN	c-SiC2	H2CN	C4H5O						
SiO	CO2*	H5CN	HCCNH+						
SiS	NH2	H2O2	CH3Cl						
CS	H2O*	C3H+							
HF	SiCN	HMgNC	HCCO						



MOLECULES INTERSTELLAIRES IDENTIFIEES AU 1/10/2017 (source CDMS)

pas (encore) détecté: H2NCH2COOH (acide aminoacétique ou glycine)

Figure 30

Molécules interstellaires et circumstellaires identifiées à ce jour. Les espèces à ossature carbonée linéaire sont soulignées. Les ions positifs sont en jaune, les ions négatifs en bleu. Les cycles sont en rouge. La figure à droite représente la structure 3D du fullerène C₆₀.

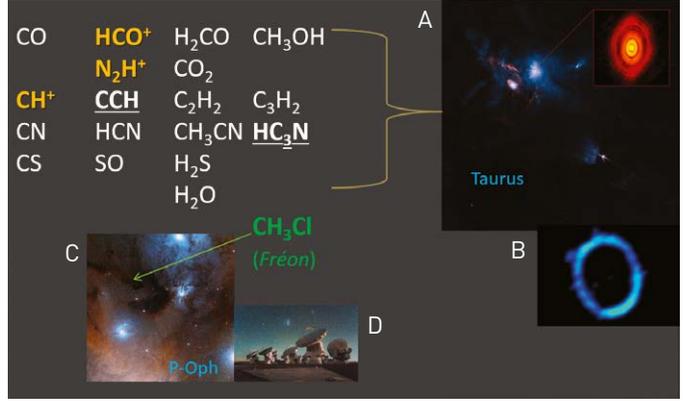
représentée à la droite de la table. C₆₀ est parfois dénommé *footballène* du fait de sa forme caractéristique. Les HAP, que nous avons évoqués plus haut, et la glycine, C₂H₅NO₂, le plus simple des acides aminés, ne sont pas mentionnés dans cette liste, leur identification en dehors du Système Solaire étant controversée.

On notera la présence dans la liste d'un grand nombre d'espèces organiques constituées d'une chaîne *linéaire* d'atomes de carbone (dont la plus courte est C₂, la plus longue HC₁₁N) et très peu de cycles organiques (comme c-C₃H₂ ou le benzène C₆H₆ - les molécules cycliques sont marquées en rouge).

Figure 31

A) Molécules détectées dans les disques protoplanétaires ; B-C) images de quelques disques protoplanétaires entourant des étoiles jeunes dans les constellations du Taureau et d'Ophiucus ; D) vue partielle de l'interféromètre submillimétrique ALMA (Chili) qui a détecté du fréon dans un tel disque.

Source : Saxton B. (NRAO/AUI/NSF) ; NASA/JPL-Caltech/UCLA ; ALMA ; IRAM.



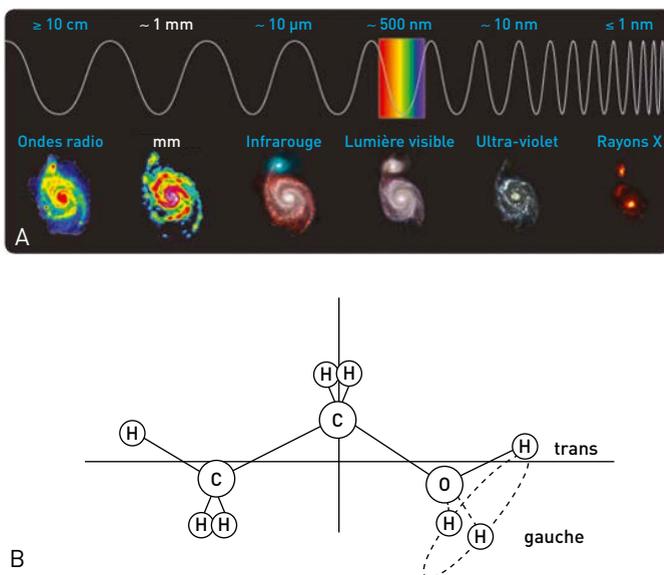
Dans les conditions prévalant dans l'atmosphère terrestre, les chaînes linéaires, très instables, sont au contraire rares et les cycles organiques prédominants. Bien que la plupart des molécules interstellaires organiques soient couramment étudiées dans les laboratoires de chimie, une vingtaine d'entre elles, surtout des radicaux libres, étaient inconnues jusqu'à leur observation dans l'espace ; leur spectre a été caractérisé pour la première fois à partir de spectres astronomiques. C'est le cas de CH et CN (les toutes premières molécules découvertes dans l'espace interstellaire), ainsi que celui des radicaux acétyléniques C₂H, C₄H et C₆H.

La liste comporte une vingtaine de cations (marqués en jaune - comme HCO⁺ et HCNH⁺, le monoxyde de carbone et l'acide cyanhydrique protonés) et six anions (en violet - comme C₄H⁻ et C₆H⁻). Elle comporte des composés *tautomères*, comme HCN et HNC, CH₃CN et CH₃NC, MgCN et MgNC, ainsi que des composés réfractaires ou métalliques, comme SiO, TiO et FeO.

La **Figure 31** liste les espèces moléculaires identifiées dans

Figure 33

A) Images de la galaxie M51 dans différents domaines de longueur d'onde. Le domaine visible est représenté par un arc-en-ciel ; B) représentation d'une molécule d'alcool éthylique illustrant les deux configurations (trans et gauche) de cet alcool. La molécule peut tourner sur elle-même autour de son petit axe (b). Les changements de moment angulaire donnent naissance à des raies rotationnelles millimétriques.



des nuages, absorbent efficacement l'UV émis par les étoiles lointaines et protègent les molécules déjà formées d'une rapide destruction par *photodissociation*. Mieux, elles jouent un rôle de catalyseur en fournissant une surface sur lesquelles des atomes et/ou des molécules peuvent s'attacher, se rencontrer et réagir. C'est sur les grains de poussière que se forme l'hydrogène moléculaire et nombre de molécules plus complexes comme le formaldéhyde H_2CO ou le méthanol CH_3OH .

La seconde clé est le temps. La durée de vie de la plupart des objets astronomiques, en particulier les nuages interstellaires, se chiffre en centaines de milliers, voire en millions d'années. Elle est plus que suffisante pour que des atomes et des molécules, même rares, puissent se rencontrer dans un milieu de très faible densité, et pour qu'ils aient le temps de réagir

chimiquement, pourvu que la réaction soit exothermique et n'ait pas de barrière d'énergie d'activation.

La troisième, paradoxalement, est la très faible densité. Celle-ci ne fait pas qu'allonger les temps de formation, elle prolonge aussi considérablement la durée de vie des molécules formées. Aussi, comme le montre la **Figure 33**, trouve-t-on dans les nuages interstellaires nombre d'ions et de radicaux libres qui ne survivraient pas dans des conditions terrestres. Ces ions et radicaux réagissent plus rapidement avec d'autres molécules que ne le font les espèces stables neutres, car leurs réactions présentent rarement une barrière d'énergie d'activation – un handicap majeur dans un milieu aussi froid que le milieu interstellaire.

Notons, enfin, que les atmosphères d'étoiles comme le Soleil, Betelgeuse ou CW Leo sont suffisamment

denses et chaudes pour que des réactions ternaires⁸ s'y produisent très rapidement et forment, directement à partir d'atomes, une palette de molécules physiquement stables dans les proportions définies par l'équilibre thermodynamique : CO, CS, C₂H₂, HCN, SiC, SiO, SiS, etc. Les molécules ainsi formées sont éjectées dans le milieu interstellaire froid. Une bonne partie se condense sous forme de grains de poussière. Les autres vont constituer les germes de la formation de molécules plus complexes, soit en migrant sur la surface des grains, soit libres dans le gaz, au moyen de réactions binaires⁹, comme dans le cas des réactions ion-molécule, neutre-neutre, ou d'association radiative¹⁰ mentionnées dans le **Tableau**.

Il reste que même pour les réactions intrinsèquement rapides, qui se produisent au

taux « maximum » de Langevin (2 10⁻⁹ cm³s⁻¹), les temps de réaction sont très longs, car la densité gazeuse dans les nuages interstellaires est très faible et la température du gaz très basse. Les réactifs sont très peu abondants, puisque la concentration de CO, la molécule la plus abondante après H₂, est environ 10⁴ fois plus faible que celle de H₂ et n'est que d'une particule par cm³ dans les nuages dits « denses ». Le temps caractéristique de transformation d'un ion H₃⁺ en HCO⁺ par collision avec une molécule de CO, un cas très favorable, est alors de l'ordre de 400 ans.

3.4. Comment les observe-t-on ?

L'identification des molécules interstellaires se fait par l'analyse de spectres observés dans la direction de sources astronomiques. Si les sources sont très brillantes, comme des étoiles ou des quasars, on observera des spectres de raies *en absorption, a)* dans le domaine visible pour les transitions électroniques (du même type que celles produisant les raies D de l'atome de sodium évoquées plus haut), *b)* dans

8. Réaction ternaire : réaction chimique mettant en jeu trois espèces ou molécules.

9. Réaction binaire : réaction chimique mettant en jeu deux espèces ou molécules.

10. Association radiative : type de réaction chimique par laquelle deux espèces ou molécules se lient en rayonnant de l'énergie.

Tableau

Réactions de formation de molécules de les nuages interstellaires.

• sur des grains de poussière	$H + H \rightarrow H_2$ (H ₂ CO, CH ₃ OH, CH ₃ CH ₂ OH,...)
• réactions binaires ion-molécule (éventuellement suivie d'une recombinaison)	$H_3^+ + CO \rightarrow HCO^+ + H_2$ $\rightarrow CO, CS, HCN, HC_3N, \dots$ <i>réactions rapides au taux de Langevin L</i>
• réactions binaires neutre-neutre (atome, radical, H ₂ ,...)	$C_2H + C_2H_2 \rightarrow C_4H + H_2$ <i>réactions au taux $\leq L/10$</i>
• Association radiative	$C_4H + e^- \rightarrow C_4H^- + h\nu$ 

Figure 34

Le Télescope VLT situé au Chili à 2 600 m d'altitude permet d'observer dans les domaines du visible et de l'infrarouge proche ou moyen.

Source : ESO.



Figure 35

Radiotélescope de l'IRAM de 30 m de diamètre, situé à 2 900 m d'altitude au sud de l'Espagne, et permettant des observations dans le domaine des longueurs d'onde millimétriques et sub-millimétriques.

Source : IRAM.

l'infrarouge pour des transitions vibrationnelles (correspondant à des changements d'amplitude de vibration de deux atomes de la molécule), enfin *c*) aux longueurs d'onde sub-millimétriques (*sub-mm*) ou millimétriques (*mm*) pour les transitions rotationnelles (correspondant à des changements de moment angulaire) d'une molécule à l'état gazeux. Si les sources sont peu brillantes, on observera seulement des spectres sub-mm ou mm *en émission*.

Suivant le domaine de longueur d'onde étudié, on fait appel à différents types de télescopes. Dans le domaine visible et l'infrarouge, on utilisera des télescopes optiques à miroirs argentés, opérant seuls ou groupés, comme pour le Very Large Telescope (VLT) de l'ESO, un ensemble de quatre télescopes équipés de miroirs de 8 m de diamètre, situé dans le désert

d'Atacama à 2 600 m d'altitude au Chili (Figure 34).

Dans les domaines mm et sub-mm, on utilise des radiotélescopes dont la surface réfléchissante principale est constituée de panneaux d'aluminium ou de fibre de carbone recouverts d'un conducteur. La longueur d'onde étant bien plus grande que pour le domaine visible, pour obtenir une résolution angulaire comparable les miroirs réflecteurs doivent être beaucoup plus grands (mais peuvent être moins précis) que ceux des télescopes optiques. C'est pourquoi on en fait souvent travailler plusieurs de concert dans un mode dit *interférométrique*.

La Figure 35 montre le télescope de 30 m de diamètre de l'IRAM, situé en Espagne dans la Sierra Nevada à 2 900 m d'altitude. La surface de son miroir suit la forme d'un paraboloïde avec une précision de

55 microns, soit l'épaisseur d'un cheveu.

L'IRAM est un institut de recherche franco-germano-espagnol spécialisé dans la construction et l'opération de radiotélescopes. Il a construit et opère un second observatoire, NOEMA (*Figure 36*), et a participé à la construction d'ALMA.

NOEMA est situé dans les Alpes, près de Gap, à 2 550 m d'altitude sur un plateau. Il est constitué de neuf antennes (deux autres sont en construction) dont les miroirs de 15 m de diamètre d'une précision de 40 microns. Ces antennes abritent des détecteurs cryogéniques de haute sensibilité reliés en phase pour des observations en mode interférométrique. Dans ce mode, les neuf antennes permettent de simuler une antenne unique d'un diamètre de 760 m et de résoudre deux sources ponctuelles

séparées de 0,4 secondes d'arc (ce qui revient à distinguer deux pièces d'un centime placées côte à côte à 5 km de distance). La précision des surfaces des réflecteurs permet d'observer jusqu'à des longueurs d'onde aussi courtes que 0,8 mm. La transparence de l'atmosphère terrestre se dégradant fortement en dessous de 1 mm (à cause de l'absorption des ondes par la vapeur d'eau), les observatoires sont situés en altitude.

Si l'IRAM regroupe les efforts de trois pays, il a fallu faire travailler ensemble les instituts de trois continents, Europe, Amérique et Asie, pour construire et opérer un instrument encore plus ambitieux : ALMA. ALMA opère un réseau de radiotélescopes capables d'observer à des longueurs d'onde aussi courtes que 0,3 mm. Pour ce faire, il a été

Figure 36

L'interféromètre mm/sub-mm de l'IRAM situé à 2550 m d'altitude dans les Hautes-Alpes.

Source : DiVertiCimes.



Figure 37

Interféromètre sub-mm ALMA
situé à 5 000 m d'altitude dans
le désert de l'Atacama au Chili.
Source : ESO/NRAO.



Figure 38

Miroir primaire de 3,5 m de
diamètre du télescope Herschel,
qui a observé sans discontinuer
dans l'infrarouge lointain de 2009
à 2013. Son instrumentation ultra-
sensible était refroidie à 4 K, ce qui
explique sa durée de vie limitée.
Source : ESA.



érigé à 5 000 m d'altitude sur
un vaste plateau dans le désert
de l'Atacama, tout au nord du
Chili. L'instrument principal,
un interféromètre (Figure 37),
est composé de 50 antennes
de 12 m de diamètre. Sa sensi-
bilité est inégalée dans le
domaine sub-mm.

En dessous de 0,3 mm de
longueur d'onde et tant que

l'on n'atteint pas le domaine
visible entre 0,7 et 0,4 microns,
l'atmosphère terrestre devient
si opaque qu'il devient impos-
sible d'observer depuis le sol,
même sur les plus hautes
montagnes. Il faut avoir
recours à des télescopes
embarqués sur des avions, ou
mieux sur des satellites. Citons
les télescopes spatiaux Planck
(miroir de 1,5 m de diamètre) et
Herschel (3,5 m de diamètre,
Figure 38) de l'ESA (avec une
participation mineure de la
NASA), opérant dans l'infra-
rouge lointain, et Hubble (2,4 m
de diamètre, Figure 39) de la
NASA (participation ESA) opé-
rant dans l'infrarouge proche,
le visible et l'UV proche. Citons
enfin le JWST de la NASA (par-
ticipation ESA), qui doit être
placé sur orbite en 2020. Son
miroir primaire hexagonal de
6,5 m de diamètre permettra
d'observer dans l'infrarouge
proche et moyen avec une sen-
sibilité inégalée l'atmosphère
des exo-planètes.

3.5. Comment les identifie- t-on ?

Nous avons vu que les raies
observées dans les spectres

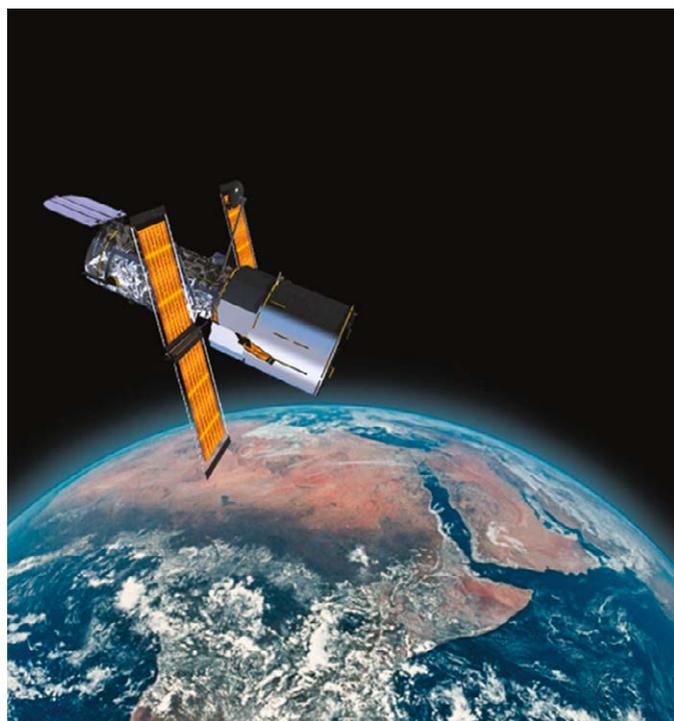


Figure 39

Image de synthèse représentant le télescope spatial Hubble, en orbite depuis 1990, observant dans le visible, l'ultra-violet et l'infrarouge proche.

Source : NASA.

astronomiques étaient identifiées en comparant ces spectres avec ceux de molécules obtenus au laboratoire. Prenons comme exemple le spectre mm de la source Sgr B2 présenté sur la **Figure 22**, spectre dans lequel la raie de fréquence 231,79 GHz est identifiée avec la transition de rotation $J_{k-1,k+1} \rightarrow J'_{k-1,k+1} = 22_{5,18} \rightarrow 22_{4,19}$ de l'éthanol (ou alcool éthylique $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) sous forme gazeuse.

Les nombres J , $k-1$ et $k+1$ définissent les niveaux d'énergie de rotation de la molécule. Cette énergie est quantifiée et ne peut prendre que des valeurs discrètes, tout comme le fait l'énergie électronique des atomes. Ces niveaux d'énergie, pour une molécule diatomique comme CO, qui tourne sur elle-même autour d'un axe perpendiculaire

à l'axe $\text{C}=\text{O}$, peuvent être décrits par un seul nombre quantique, J , dont la valeur est 0 pour le niveau le plus bas (pas de rotation), 1 pour le niveau situé juste en dessus, puis 2, etc. Pour une molécule non linéaire comme CH_3CN , dite *toupie symétrique* (parce qu'elle possède un axe linéaire $\text{C}-\text{C}\equiv\text{N}$ et trois atomes d'hydrogène symétriquement disposés autour de cet axe), il faut ajouter à J , qui décrit le moment angulaire de rotation autour d'un axe perpendiculaire à la droite CCN , un deuxième nombre quantique, k , qui décrit le moment angulaire de rotation autour de CCN (ce moment n'est plus nul, du fait de la présence de trois atomes H en dehors de l'axe). Enfin, pour une molécule dite *toupie asymétrique* comme l'éthanol (sa structure 3D est présentée

Figure 40

Diagramme des niveaux d'énergie rotationnelle en fonction du nombre quantique rotationnel pour la molécule d'éthanol $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ (ultrason).

Source : ApJ.

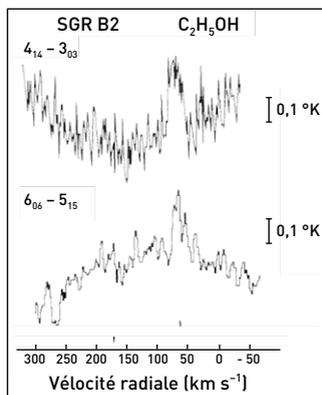
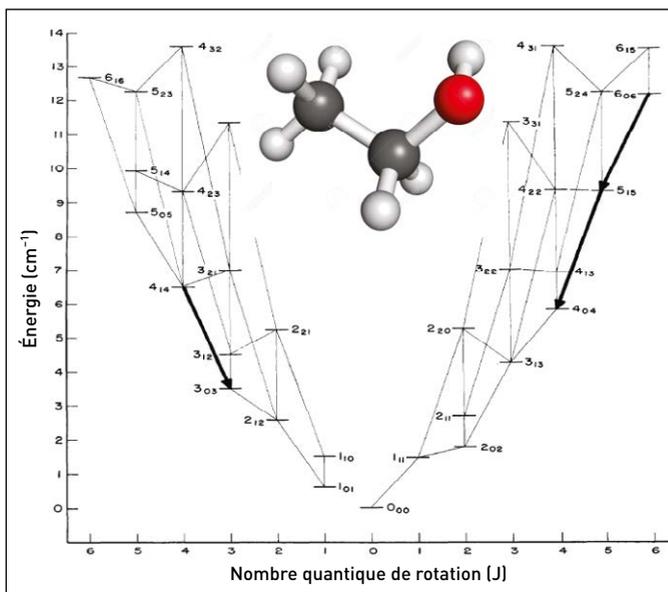


Figure 41

Première détection de l'éthanol dans l'espace. L'abscisse représente la vitesse de la source relative au (LSR du) Soleil, mesurée par effet Doppler ; l'ordonnée l'intensité du rayonnement. Les deux raies visibles sur ces spectres à la vitesse +50 km/s correspondent à deux transitions rotationnelles marquées en gras sur le diagramme de la **Figure 40**.

Source : ApJ.

au centre de la **Figure 40**), il faut trois nombres quantiques J , $k-1$ et $k+1$ pour décrire les états d'énergie. Le diagramme de la **Figure 40** montre les niveaux d'énergie de rotation permis pour l'éthanol pour les différentes valeurs de J , $k-1$ et $k+1$ (J en abscisse, l'énergie de rotation divisée par hc et exprimée en cm^{-1} , en ordonnée). Seuls les niveaux d'énergie les plus bas, qui peuvent être peuplés par collision dans des nuages très froids, sont représentés. Les transitions rotationnelles permises sont indiquées par des traits obliques. Elles correspondent à l'émission d'un photon dans le domaine millimétrique. Notons la transition $4_{14} \rightarrow 3_{03}$ (à 3 mm de longueur d'onde) dont la fréquence mesurée au laboratoire est $90117,601 \pm 0,003$ MHz ; la raie correspondante, détectée dans la source Sgr B2 (voir les spectres de la **Figure 41**), a permis la

première identification de l'éthanol dans l'espace.

À partir de l'intensité de plusieurs raies, on peut calculer la quantité de gaz éthanol présent dans la source Sgr B2 (10^{28} litres d'alcool pur !) et la température du nuage (environ 40 K, soit -233 °C). Puisqu'on observe aussi des raies de la vapeur d'eau dans cette source, on peut s'amuser à calculer le degré alcoolique (le rapport alcool sur eau) de cette source du Centre Galactique : 0,1 %.

Parmi les nombreuses molécules identifiées dans la source Sgr B2, (**Figure 30**), certaines contiennent la fonction *amide*, $\text{C}(\text{=O})\text{-NH-}$ (tel le formamide, l'acétamide et l'urée, voir la **Figure 42**), et sont susceptibles de se polymériser pour former des polyamides. La même fonction $\text{-C}(\text{=O})\text{-NH-}$ est appelée *liaison peptide* lorsqu'elle relie entre elles deux molécules d'acides aminés. Elle joue un

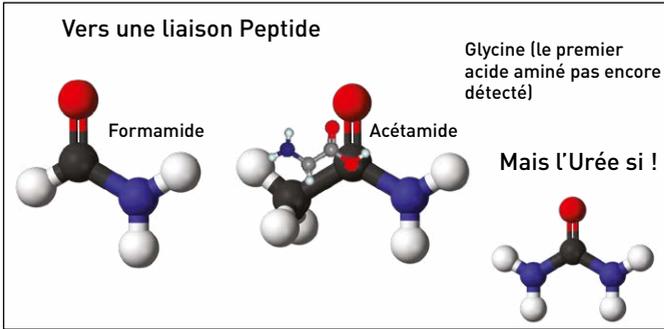


Figure 42

Quelques molécules d'intérêt biologique détectées dans les nuages interstellaires. Parmi elles, des amides et l'urée. Aucun acide aminé n'a encore été détecté.

rôle capital car elle permet la formation des protéines par polymérisation. Aucun acide aminé n'a pour l'instant été détecté au-delà du Système Solaire, malgré une recherche poussée de la glycine, le plus simple des acides aminés, dans Sgr B2 et Orion KL. Sans doute les raies sont-elles simplement trop faibles, car on a détecté dans ces sources des molécules d'une complexité similaire. La détection de l'urée est un signe encourageant.

4 La Terre a réuni les conditions favorables à l'apparition de la Vie. Pourquoi? En est-il de même sur d'autres planètes ou exoplanètes ?

La vie sur Terre est basée sur la chimie du carbone, un des rares éléments à pouvoir former 4 liaisons covalentes, et sur l'eau, une molécule polaire qui, sous forme liquide, devient un solvant incomparable permettant de dissoudre et transporter de nombreux composés organiques. Le cycle de réactions entre l'eau et le carbone, via la photosynthèse et la combustion, permet de stocker, puis

de restituer l'énergie rayonnée par le Soleil. La vie est apparue sur la surface de la Terre parce que l'eau liquide, le carbone et les molécules organiques y sont abondants. Mais qu'en est-il dans les autres corps gravitant dans le Système Solaire et dans les exoplanètes ?

4.1. Les autres corps du Système Solaire

L'eau est omniprésente dans le système solaire : sur Mars, dans les comètes, les astéroïdes, à la surface d'Europe (Figures 43-46), sur Ganymède, où le satellite Hubble a détecté un vaste océan sous une croûte de glace. Depuis longtemps, les radioastronomes ont détecté de la vapeur d'eau dégagée par les comètes lorsqu'elles se rapprochent du Soleil. À partir de mesures du degré de deutération de l'eau (le rapport D/H où D, le deutérium, est une variante isotopique de l'hydrogène H), ils ont spéculé que l'eau des océans terrestres pourrait avoir été apportée sur Terre, lorsque celle-ci était jeune, par des chutes de comètes. Des mesures infrarouges plus précises, par exemple par la



Figure 43

Photographie de Mars, avec sa calotte de glace au pôle Nord.



Figure 44

La comète Churyumov-Gerasimenko (Tchouri) vue par la mission spatiale Rosetta de l'ESA.

Source : ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team ; MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA.

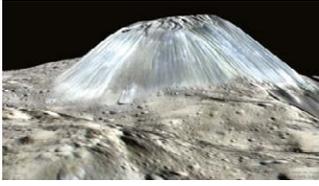


Figure 45

Image de synthèse représentant une montagne de glace sur Cérés, le plus gros astéroïde gravitant entre Mars et Jupiter.

Source : Dawn Mission, NASA, JPL-Caltech, UCLA, MPS/DLR/IDA

sonde Rosetta sur la comète Churyumov-Gerasimenko (**Figure 46**), ont depuis infirmé cette hypothèse : elles montrent que le rapport D/H dans les comètes est trois fois plus grand que dans les océans terrestres et qu'il se rapprochait de celui mesuré sur les astéroïdes orbitant entre Mars et Jupiter. L'eau terrestre a donc probablement la même origine que celle présente sur les autres planètes rocheuses et les astéroïdes, et ne provient pas, comme on a pu le penser, d'un nuage très froid extérieur au Système Solaire.

Titan, le plus gros satellite de Saturne (**Figure 47A**), suscite un grand intérêt dans la communauté scientifique à cause de son épaisse atmosphère semblable, pense-t-on, à l'atmosphère qui régnait sur Terre avant que les premiers êtres vivants ne libèrent l'oxygène. Avec celle de la Terre primordiale, elle est la seule du Système Solaire à contenir beaucoup d'azote et de méthane, mais aussi des

traces d'éthane, de propane et de plusieurs autres hydrocarbures. Le méthane y est observé sous forme gazeuse dans des nuages, mais aussi sous forme liquide, formant des lacs. La sonde Cassini/Huygens qui a exploré l'atmosphère et la surface de Titan a détecté HCN et HC₃N dans la haute atmosphère, ainsi qu'un halo bleu-vert induit par des ions négatifs (**Figure 47B-C**).

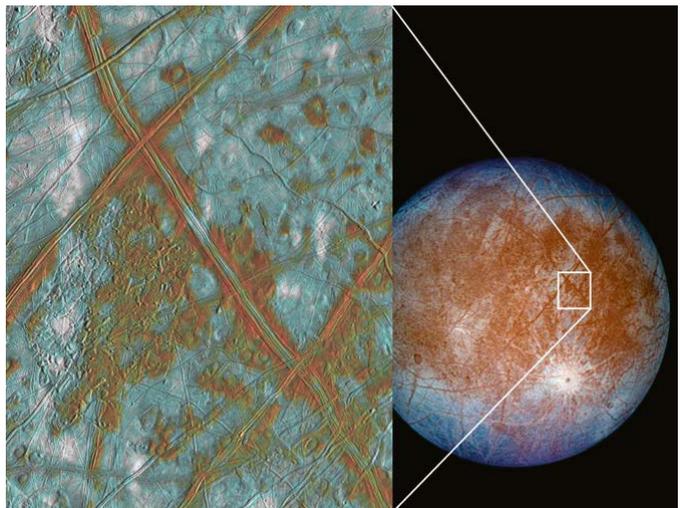
4.2 Les exo-planètes

Nous avons vu que le carbone et l'eau étaient présents il y a quelque 12 milliards d'années dans les toutes premières galaxies. De fait, ce sont les premières étoiles massives, formées durant la période de Ré-ionisation, qui ont synthétisé à partir de l'hydrogène, puis éjecté dans le milieu interstellaire, le carbone, l'oxygène et tous les éléments primaires lourds. Les éléments dits secondaires, comme l'azote, apparaissent plus tard, après que

Figure 46

Image de la surface glacée d'Europe, satellite de Jupiter, prise par le satellite Galileo. Le télescope Hubble y a observé des geysers qui montrent qu'il y a de l'eau liquide sous la glace.

Source : NASA/JPL/University of Arizona.



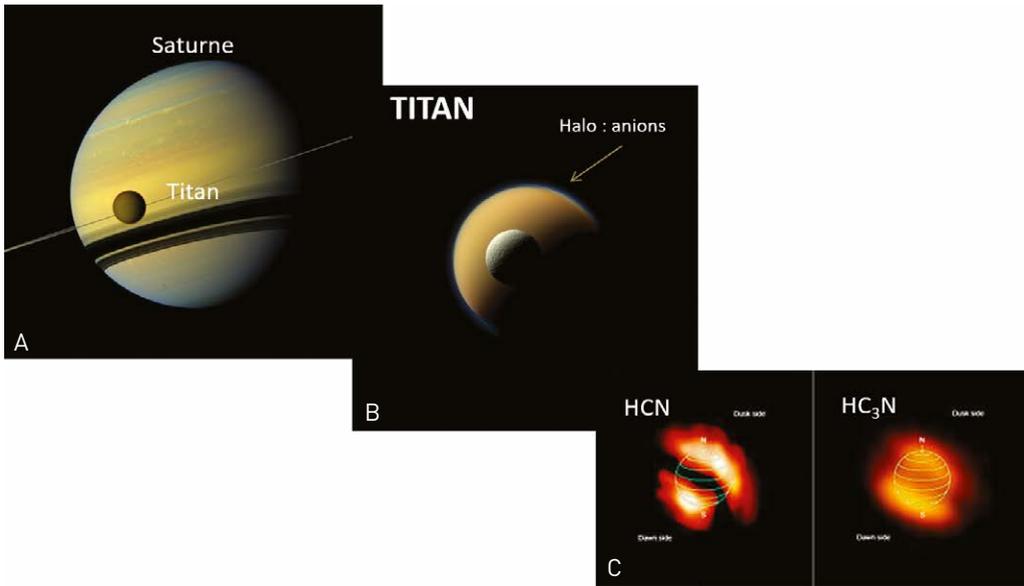


Figure 47

A) Représentation de synthèse de Saturne derrière son satellite naturel Titan, qui abrite une mer de méthane ; B) photographie de Titan montrant un halo bleu qui révèle la présence d'anions dans la haute atmosphère ; C) l'atmosphère de Titan vue dans des raies de HCN et en HC₃N.

Source : NASA.

les étoiles de faible masse (comme CW Leo), qui évoluent plus lentement, ont commencé elles aussi à éjecter la matière synthétisée en leur sein. La composition élémentaire du gaz interstellaire évolue donc lentement avec le temps, au fur et à mesure que de nouvelles étoiles naissent et disparaissent. Elle reste cependant remarquablement similaire sur de vastes échelles, et reste très proche de celle du Soleil dans les milliards d'étoiles de même type présentes dans le disque galactique.

Distante de seulement 25 années-lumière du Soleil, Fomalhaut (*La Bouche du Poisson*) est un premier exemple d'étoile de masse comparable au Soleil, qui montre les signes évidents d'un système planétaire en cours de formation. L'étoile apparaît entourée d'un anneau de poussières au bord duquel on observe une planète géante

(**Figure 48**). Sa composition chimique est identique à celle du Soleil. Bien que seulement deux fois plus massive que ce dernier, Fomalhaut est cependant bien plus chaude et rayonne plus d'UV, ce qui, malheureusement (?) rend son environnement peu propice à l'apparition de toute sorte de vie.

Y-a-t-il d'autres exo-planètes, orbitant autour d'étoiles de même température (ou moins chaudes) que le Soleil, qui réuniraient des conditions plus favorables à la vie? La réponse est oui. Plus de 3 000 exo-planètes ont été repérées à ce jour, soit à partir d'observations depuis le sol, soit à l'aide du télescope spatial Kuiper de la NASA. Beaucoup plus le seront dans les années qui viennent. Certaines de ces planètes ont des masses comparables à celle de la Terre et orbitent dans la zone dite « habitable », ni trop près, ni trop loin de l'étoile, là où

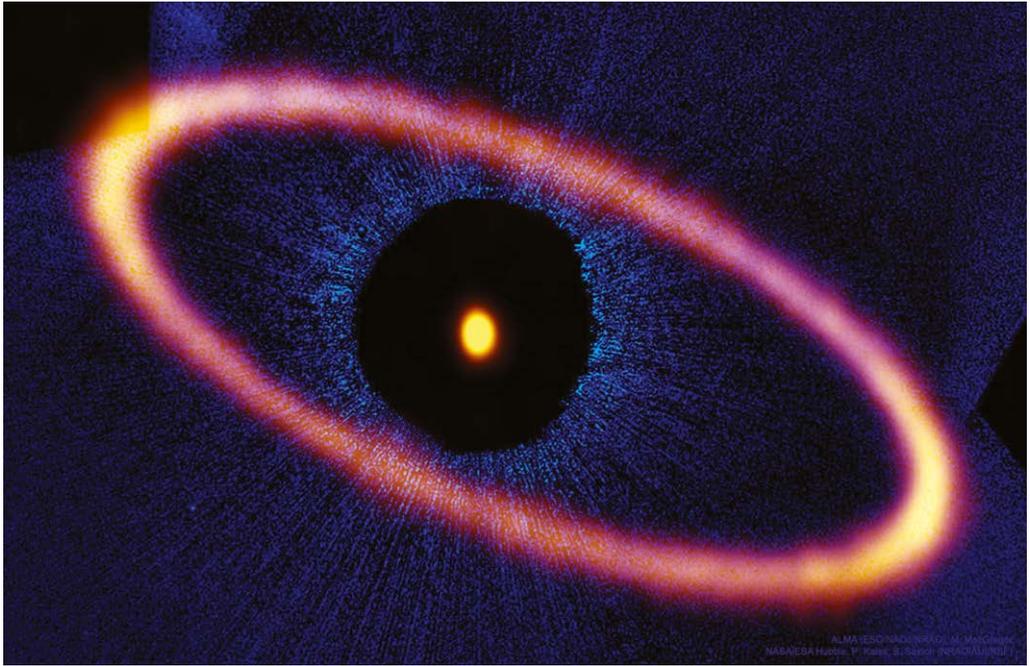


Figure 48

Photographie de l'étoile Fomalhaut à 25 a.l. du Soleil (ici au centre de l'image, cachée par un masque donnant naissance à une irisation bleue), entourée d'un disque jaunerosé de poussières, probablement un résidu de la formation d'un système planétaire (une exoplanète géante a été détectée près du bord intérieur de l'anneau).

Source : ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), MacGregor M. ; NASA/ESA Hubble, Kalas P. ; Saxton B. (NRAO/AUI/NSF).

l'on s'attend à trouver de l'eau sous forme liquide.

Cela serait le cas pour deux ou trois des sept planètes gravitant autour de l'étoile 2MASS_J23062928-0502285, distante de 40 a.l. du Soleil (cette étoile est aussi dénommée Trappist-1). Trappist-1 est onze fois moins massive que le Soleil, mais, parce qu'elle est plus petite, sa température de surface est la même que celle de celui-ci. Son spectre visible et UV serait elle aussi similaire.

On connaît les orbites des sept planètes, ainsi que leur période de rotation (voir **Figures 49 et 50**). Les planètes dénommées *e* et *f* sont rocheuses comme la Terre (donc ont probablement une composition chimique similaire), ont une taille proche de celle de la Terre, et orbiteraient dans la zone habitable

(de fait, bien plus près de leur étoile que la Terre, car Trappist-1 rayonne beaucoup moins fort). Il pourrait bien y avoir un océan d'eau liquide sur l'une de ces planètes. Le télescope spatial JWST, particulièrement bien adapté à ce type d'étude, devrait nous le dire d'ici quelques années.

Que les conditions nécessaires à l'apparition de la vie sur Trappist-1 *d* ou *e* soient réunies, rien n'est moins sûr, d'autant plus que leur proximité de l'étoile expose les atmosphères de ces planètes à des tempêtes stellaires qui pourraient bien les avoir dispersées. Il reste que nous savons que le Système Solaire n'est pas une exception et qu'une large fraction des étoiles de type solaire, un type très commun, possèdent des planètes, souvent plusieurs planètes. Il doit donc y avoir dans la Galaxie des

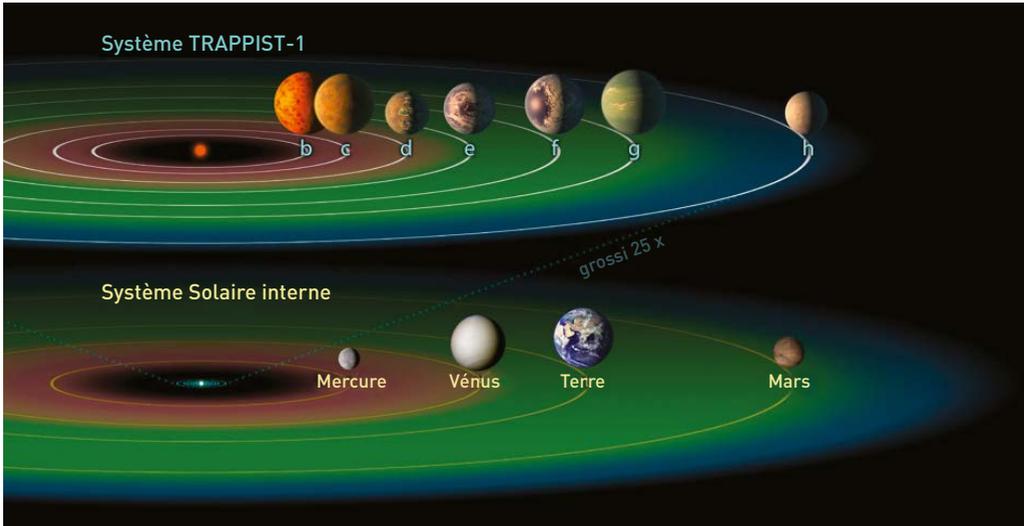


Figure 49

Le système stellaire Trappist-1 (vue d'artiste) comparé au Système Solaire interne. Les zones habitables sont marquées en vert. Celle du Soleil s'étend vingt-cinq fois plus loin pour Trappist-1, car le Soleil est plus massif et rayonne beaucoup plus d'énergie.

Source : NASA/JPL-Caltech.

milliards de systèmes planétaires semblables à notre Système Solaire et des milliards de planètes rocheuses dans la zone habitable. Nous savons aussi que l'eau, le carbone et des molécules organiques sont omniprésents dans notre Galaxie, ainsi que dans les milliards de galaxies extérieures. Que les conditions nécessaires à l'apparition vie, évoquées ci-dessus, soient réunies de très

nombreuses fois dans notre Galaxie, comme dans des galaxies extérieures, paraît évident. Trouver où elles le sont est une autre question.

Dans le cadre du programme SETI, des astronomes ont bien tenté de capter des signaux radio caractéristiques d'une vie intelligente (comme des émissions de télévision !) en provenance d'une certaine d'étoiles proches du Soleil, mais pour l'instant, sans succès.



Figure 50

Vue d'artiste représentant Trappist-1 et les orbites de ses sept planètes rocheuses.

Source : NASA/JPL-Caltech/Hurt R.