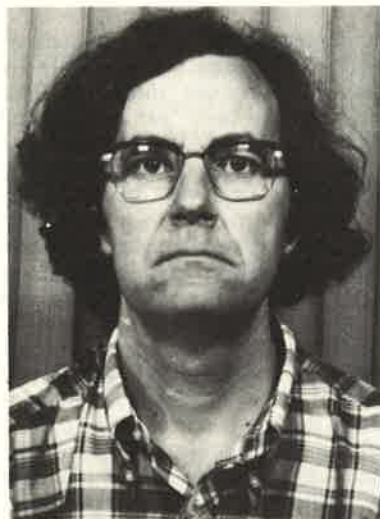


La chimie dans l'espace *

par James Lequeux

(Astronome titulaire à l'observatoire de Paris-Meudon.)

Introduction



La mise en évidence de nombreuses molécules (plus de 50) dans le milieu gazeux très dilué où baignent les étoiles, le milieu interstellaire, est l'un des points marquants de l'astronomie de la dernière décennie. Ces molécules sont importantes à plus d'un titre : d'une part elles ont permis de découvrir des nuages interstellaires composés entièrement de molécules, dont l'existence n'était pas connue auparavant ; d'autre part, elles sont la manifestation d'une chimie très originale, extrêmement différente de la chimie de nos laboratoires en

raison des conditions physiques très particulières qui règnent dans le milieu interstellaire. C'est ce dernier point qui nous intéressera ici.

Bien que la plupart des développements importants dans l'étude des molécules interstellaires soient tout récents, leur découverte est déjà ancienne : dès les environs de 1940, on découvrait trois radicaux libres, CH , CH^+ et CN , par les raies d'absorption très étroites et assez faibles qu'elles donnent dans le spectre d'étoiles devant lesquelles elles sont interposées. Cette découverte n'eut pas un énorme retentissement, d'autant plus qu'on ne pouvait espérer observer en optique beaucoup d'autres molécules ; cependant C. Townes proposa, dans les années 50, d'essayer d'observer des molécules par leur spectre de radiofréquence que la radioastronomie venait d'ouvrir à l'observation astronomique. Grâce à ses efforts le radical OH fut découvert en 1963 par ses transitions à 18 cm de longueur d'onde. En 1967-1968, encore sous l'incitation de Townes, trois nouvelles molécules étaient découvertes, toujours par des radioastronomes : NH_3 , H_2O et l'aldéhyde formique H_2CO . L'observation de molécules polyatomiques dans un milieu aussi dilué que le milieu interstellaire surprit les astronomes mais leur ouvrit de nouveaux espoirs. En 1969, Penzias et Wilson des Bell Telephone Laboratories (plus connus par leur découverte fondamentale du rayonnement isotrope de l'Univers, faite en 1965) construisaient un récepteur très performant en ondes millimétriques qui leur permit de découvrir coup sur coup de nombreuses molécules dont la première fut CO . L'histoire récente des découvertes dans ce domaine est étroitement liée à celle des progrès techniques faits en radioastronomie. Cependant les astronomes spatiaux ne devaient pas en rester là, découvrant en 1969 H_2 , la plus abondante des molécules interstellaires, puis redécouvrant (également par leurs raies ultraviolettes vues en absorption) CO et OH .

Ces molécules interstellaires se manifestent à l'observateur de deux manières différentes. Certaines peuvent être vues, nous l'avons dit, par leurs raies d'absorption dans le spectre d'étoiles : il s'agit de H_2 ,

* Conférence prononcée, le 1^{er} octobre 1979, lors de l'Assemblée annuelle de la Société Chimique de France, à Nice.

CO, OH, CH, CH⁺, CN et C₂ observées dans des transitions électroniques issues du niveau fondamental. Faute d'objets infrarouges assez brillants et malgré l'amélioration de la sensibilité des détecteurs, les transitions de vibration sont difficilement observables de cette façon dans le milieu interstellaire, bien qu'il y ait des exceptions. En radio, certaines molécules comme OH et H₂CO peuvent également être observées en absorption devant des radio-sources donnant un rayonnement continu. Mais la plupart des molécules observées en radio le sont en émission, dans des transitions de rotation ou dans d'autres transitions correspondant à des niveaux de basse énergie (inversion, dédoublement A ou K etc...) : bien que basse, la température du milieu interstellaire est néanmoins suffisante

(quelques dizaines de degrés K) pour que quelques-uns des niveaux d'énergie les plus bas puissent être excités ; leur désexcitation produit les raies d'émission observée.

Il importe de remarquer que les molécules symétriques, n'ayant pas de moment dipolaire, ont un spectre de rotation et de vibration totalement interdit : elles ne peuvent être observées en principe que par leurs transitions électroniques qui malheureusement tombent en général dans des domaines spectraux peu accessibles. On ne s'étonnera donc pas qu'en plus de H₂ seul un très petit nombre figure dans la liste des molécules interstellaires détectées, ce qui ne veut pas dire qu'elles n'existent pas dans le milieu interstellaire.

II. Identification des molécules interstellaires ; remarques générales

Le tableau 1 donne la liste des molécules interstellaire connues en octobre 1979. Cette liste contient 53 molécules. Il faudrait ajouter que de nombreuses molécules isotopiquement substituées sont également observées dans le milieu interstellaire : par exemple, CO est connu sous la forme de ¹²C¹⁶O, ¹³C¹⁶O, ¹²C¹⁷O, ¹²C¹⁸O et même ¹³C¹⁸O. L'identification de presque toutes ces molécules est certaine. En effet elles sont en général observées dans plusieurs transitions, et souvent dans des substitutions isotopiques. Presque toutes ont été fabriquées au laboratoire et leur spectre hertzien obtenu, souvent au prix de grandes difficultés. Un exemple intéressant d'identification laborieuse concerne le radical ionisé HCO⁺. En 1970, Buhl et Snyder découvraient par hasard une raie interstellaire intense à la fréquence de 89,190 GHz. Se basant sur ses travaux antérieurs sur la chimie ions-molécules, W. Klemperer suggérait qu'il s'agissait de la transition J = 1-0 de HCO⁺ ; cette molécule n'était pas connue au laboratoire mais on pouvait avoir une idée approximative de son moment d'inertie connaissant les distances interatomiques et donc estimer grossièrement les fréquences de rotation. Il est possible de connaître avec une meilleure précision le déplacement isotopique de ces raies lorsque ¹²C est remplacé par ¹³C dans HCO⁺ : en supposant que la raie à 89,190 GHz est bien due à HCO⁺, Herbst et Klemperer précisaient que la raie correspondante de H¹³CO⁺ devait se trouver à 86,720 GHz. De fait Snyder et ses associés observaient astronomiquement une raie à la fréquence, voisine, de 86,754 GHz. L'identification de HCO⁺ a été confirmée simultanément par deux travaux également remarquables : d'une part Kraemer et Dierksen effectuaient à Munich des calculs *ab initio* très précis de la configuration de HCO⁺ et prédisaient une fréquence de 89,19 GHz qui est celle observée ; d'autre part, Woods et ses collaborateurs de l'Université de Wisconsin réussissaient à fabriquer HCO⁺ au laboratoire et à obtenir son spectre hertzien, en parfait accord avec le résultat astronomique. Cet édifice était couronné par la prédiction et la découverte subséquente d'une raie de la substitution deutériée DCO⁺.

Toutes les identifications ne sont pas aussi pénibles. Souvent on est aidé par l'observation d'une structure hyperfine, que permet l'extrême finesse des raies interstellaires.

L'examen au tableau 1 montre que la plupart des molécules interstellaires sont faites des atomes H, C, N et O, et que quelques unes contiennent S et Si. Ceci n'a rien de surprenant : C, N et O sont les éléments les plus abondants dans l'Univers après l'hydrogène, leurs abondances respectives en nombre d'atomes par rapport à H étant environ 4.10⁻⁴, 10⁻⁴ et 6.10⁻⁴. (Une grande partie du carbone interstellaire est d'ailleurs sous forme de CO, la molécule la plus abondante après H₂. Les autres molécules sont nettement plus rares sauf peut-être C₂H₂ et CH₄.) Puis viennent Si (3.10⁻⁵) et S (10⁻⁵). Le magnésium et le fer sont un peu plus abondants que Si et S et forment sans doute des molécules interstellaires d'abondance difficile à prévoir. Mais même les plus simples ne sont pas identifiables pour l'instant, leur spectre hertzien étant trop mal connu ; j'exclus bien entendu les gaz rares de cette discussion, malgré la grande abondance de He et Ne. Il n'est donc pas besoin de *Deus ex machina* pour rendre compte de la prédominance des molécules organiques dans le milieu interstellaire. Malgré cette prédominance, il est pour le moins prématuré de prétendre, comme on le fait trop souvent, que les molécules interstellaires ont quoi que ce soit à voir avec l'origine de la vie sur la Terre : on ignore jusqu'à quel point l'atmosphère terrestre primitive a gardé souvenir du milieu interstellaire.

Plusieurs faits remarquables ressortent à l'examen du tableau 1. D'une part, on constate l'abondance des radicaux libres et autres espèces instables, ce qui en réalité n'a rien de surprenant étant donné la très faible densité du milieu interstellaire. La présence d'ions moléculaires (CH⁺, HCO⁺, N₂H⁺) d'ailleurs assez abondants, est plus surprenante : c'est une des clés de notre compréhension de la chimie interstellaire. Aucune molécule cyclique n'a été détectée malgré beaucoup d'efforts, mais par contre les longues chaînes linéaires acétyléniques paraissent abondantes, la plus longue connue étant HC₉N de formule développée :



Enfin, mais ceci n'apparaît pas sur le tableau 1, les substitutions deutériées sont quelquefois à peine moins abondantes que la molécule hydrogénée correspondante, bien que le rapport D/H interstellaire

Tableau 1. Liste de molécules.

2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
- H ₂ CH - CH ⁺ CN - CO CS OH SO NS SiO SiS C ₂ NO	H ₂ O HCO - HCO ⁺ - CCH HCN HNC - N ₂ H ⁺ H ₂ S OCS SO ₂ HNO	H ₂ CO NH ₃ HNCO H ₂ CS - C ₃ N C ₂ H ₂ HNCS	HCOOH - HC ₃ N CH ₂ NH NH ₂ CN H ₂ CCO CH ₄ - C ₄ H	HCH ₂ OH NH ₂ CHO CH ₃ CN HCH ₂ SH	CH ₃ C ₂ H CH ₃ CHO - HC ₅ N CH ₃ NH ₂ CH ₂ CHCN	CH ₃ COOH	(CH ₃) ₂ O CH ₃ CH ₂ OH CH ₃ CH ₂ CN - HC ₇ N		- HC ₉ N

ne soit que $1,5 \cdot 10^{-5}$. Nous tenterons d'expliquer tous ces faits dans le reste de l'exposé. Auparavant, il est utile de résumer les conditions physiques qui règnent dans le milieu interstellaire. C'est ce qui est fait dans le tableau 2 où l'on donne l'ordre de grandeur des quantités intéressantes dans le cas des nuages interstellaires diffus, qui constituent la composante la plus anciennement connue où se

trouvent les molécules observées en absorption dans l'ultraviolet ou le visible, et les nuages moléculaires plus denses, totalement opaques à la lumière, découverts par leurs émissions dans les raies moléculaires radio. Ces derniers nuages étant plus intéressants du point de vue de la chimie car des molécules très complexes peuvent s'y former, nous ne parlerons pas de la chimie dans les nuages diffus.

III. Chimie de catalyse interstellaire

A priori, les molécules interstellaires peuvent se former en phase gazeuse ou par catalyse sur la surface solide des grains interstellaires, dont l'existence est mentionnée au tableau 2, et qui sont responsables

Tableau 2. Conditions dans le milieu interstellaire.

Nuages diffus

Surtout atomes (H);
Densité $\approx 1 - 100 \text{ at. cm}^{-3}$;
Température $\approx 50-300 \text{ K}$;
Champ UV important.

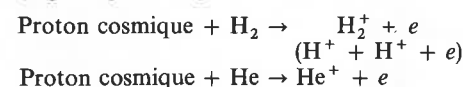
Nuages moléculaires

Surtout molécules (H_2) + He;
Grains de poussière;
Densité $\approx 10^3-10^7 \text{ mol. cm}^{-3}$;
Température $\approx 7-50 \text{ K}$;
Pas ou peu d'UV;
Ionisation faible, par particules cosmiques.

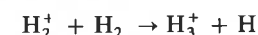
IV. La chimie interstellaire en phase gazeuse

La chimie interstellaire en phase gazeuse obéit à des conditions très restrictives. La faible température du milieu et l'absence de rayonnement énergétique (au moins dans les nuages moléculaires) n'autorisent que les réactions exothermiques, ou très faiblement endothermiques. Par ailleurs, la plupart des réactions neutres-neutres présente une faible barrière d'activation qui ne peut être franchie à basse température, et ne peut donc avoir lieu. Une telle barrière ne semble pas exister dans les réactions où l'un des produits de départ est un ion, si bien que la chimie interstellaire est essentiellement une chimie ionique. La faible densité ne permet pas de réactions à trois corps la probabilité de collision triple étant infime. On a cru longtemps que ceci interdisait les réactions d'association directe, dont l'énergie en excès est évacuée au laboratoire par collision avec un 3^e corps ou une paroi, mais nous verrons plus loin qu'il n'en est rien : certaines réactions d'association avec désexcitation radiative paraissent suffisamment rapides pour être efficaces.

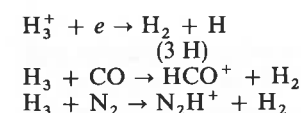
Pour amorcer les réactions en phase gazeuse, il est nécessaire de fabriquer des ions. Cette ionisation initiale, d'ailleurs très faible, est due, dans les nuages moléculaires, à l'action des protons énergétiques (la principale composante du rayonnement cosmique) sur H_2 ou He :



On a ensuite la réaction rapide :



H_3^+ est le point de départ de l'essentiel de la chimie interstellaire. Il est détruit surtout par les réactions :

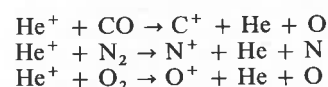


Ces deux dernières réactions sont en pratique des impasses, HCO^+ et

de l'absorption de la lumière dans les nuages interstellaires. Ces grains sont constitués d'un noyau de silicates entouré d'un manteau de « glace » (H_2O , NH_3 , CH_4 solides etc...), et leur température est de l'ordre de 10 à 30 K. La molécule H_2 ne peut se former que sur les grains : en effet l'association radiative de deux atomes H dans l'état fondamental est impossible, la molécule H_2 se formant alors dans l'état répulsif $^3\Sigma_u$ et ne pouvant descendre radiativement dans l'état stable $^1\Sigma_g$, puisque la transition correspondante est interdite. Il faut donc qu'elle se forme sur les grains, à partir d'atomes d'hydrogène qui s'y trouvent absorbés : l'énergie d'association est alors transférée au grain de poussière sous forme d'énergie de vibration. La théorie de ce processus permet d'ailleurs de rendre compte de façon satisfaisante des propriétés observées de l'abondance de H_2 . D'autres molécules se forment-elles de la même manière ? C'est probable mais la nature et les propriétés de surface des grains sont trop mal connus pour qu'on puisse faire des prédictions quantitatives. Néanmoins il paraît difficile d'imaginer que les molécules les plus abondantes telles que CO , H_2O , NH_3 , CH_4 etc... puissent se former entièrement sur les grains, et la chimie en phase gazeuse est une quasi-certitude pour de nombreuses espèces, comme on le verra plus loin. Il faut mentionner que les travaux expérimentaux récents de Greenberg et de ses associés à l'Université de Leyde suggèrent des possibilités intéressantes de formation par catalyse de certaines molécules complexes.

N_2H^+ ne semblant pas à l'origine d'espèces plus complexes. L'observation de grandes quantités de HCO^+ et N_2H^+ dans les nuages moléculaires a donc surtout l'intérêt de montrer la validité du schéma ci-dessus.

Quant à He^+ , il peut former des ions intéressants par diverses réactions :



C^+ peut d'ailleurs être formé également par photoionisation du carbone par le rayonnement ultraviolet résiduel d'origine stellaire dans les régions extérieures des nuages interstellaires. C'est aussi le point de départ de nombreuses réactions.

A ce stade, il ne m'est pas possible de décrire, même de façon très succincte, la formation de molécules plus complexes. Je voudrais cependant donner, à titre d'exemple, le schéma communément admis pour la formation de H_2O et de CO (figure 1). Les réactions sont indiquées symboliquement dans la figure par le produit de départ et une flèche près de laquelle figure l'autre produit de départ. Elles sont toutes du type $\text{A}^+ + \text{B} \rightarrow \text{C}^+ + \text{D}$, et se produisent grosso modo

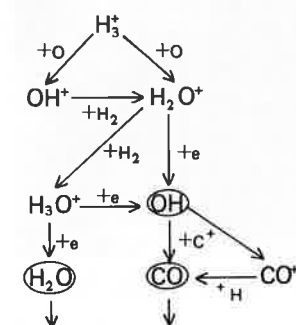


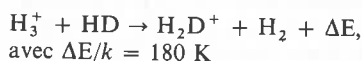
Figure 1. Réactions de départ de la chimie ionique dans les nuages moléculaires.

avec le taux de Langevin de l'ordre de $10^{-9} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; on trouve aussi des réactions de recombinaison dissociative du type $A^+ + e \rightarrow C + D$, beaucoup plus rapides, avec un taux de quelque $10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. De nombreux auteurs ont construit des réseaux de réactions complétant celui de la figure 1 qui rend compte, de façon plus ou moins satisfaisante, de l'abondance des principales molécules simples, soit à l'équilibre, soit dans des modèles d'évolution dynamique.

Une des meilleures indications en faveur de la prépondérance des réactions ioniques en phase gazeuse est, indirectement, l'existence d'enrichissements considérables en deutérium. Examinons par exemple le cas du rapport $\text{DCO}^+/\text{HCO}^+$, qui est de l'ordre de 1/100 ou davantage, alors que le rapport $[\text{D}/\text{H}]$ interstellaire est seulement de $1,5 \cdot 10^{-5}$. Dans les nuages moléculaires, tout l'hydrogène est essentiellement sous forme moléculaire, si bien que l'on a :

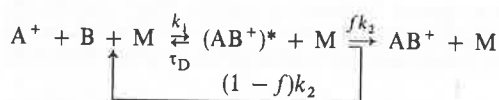
$$\text{HD}/\text{H}_2 \approx 2[\text{D}/\text{H}] = 3 \cdot 10^{-5}$$

HD peut être considéré comme un réservoir quasi inépuisable de deutérium, compte tenu de la faible abondance des molécules susceptibles d'effectuer un échange isotopique avec elle. La principale de ces molécules est H_3 , et on a :



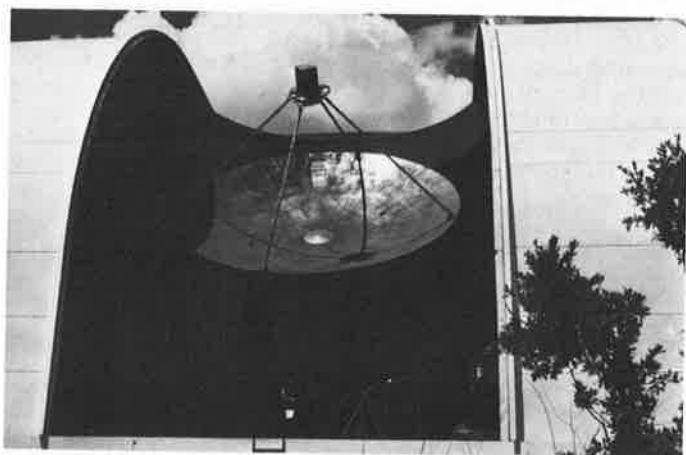
V. Association radiative et synthèse des chaînes carbonées

Au laboratoire, un très grand nombre de réactions chimiques sont des réactions d'association stabilisées par collision avec un 3^e corps ou une paroi : les deux molécules de départ forment une molécule excitée qui se désexcite par collision. On a, par exemple, dans le cas d'une réaction ionique :



Il est facile de voir que si les taux partiels de réactions sont les k_1 et k_2 indiqués ci-dessus, τ_D étant la durée de vie de la molécule excitée vis-à-vis de sa désexcitation spontanée vers les produits de départ et f la fraction des molécules excitées qui se désexcitent par collision sur la molécule finale, le taux global de la réaction $A^+ + B \rightarrow AB^+$ est :

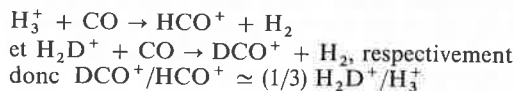
$$k_c = k_1 k_2 f \tau_D$$



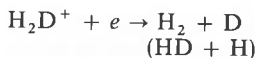
Le radiotélescope de l'observatoire Mc Donald (Texas).

Ce radiotélescope de 5 m est le premier instrument explorant le domaine millimétrique. Il a été utilisé largement pour l'observation des molécules interstellaires.

HCO^+ et DCO^+ sont, on l'a vu, formées à partir de H_3^+ et H_2D^+ par :



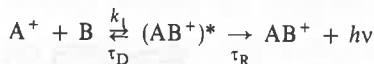
L'enrichissement est limité par la principale réaction de destruction de H_2D^+ (et de H_3^+) qui est la recombinaison dissociative :



Si la densité électronique est grande, cette réaction détruit très vite H_2D^+ et $\text{H}_2\text{D}^+/\text{H}_3^+$ est peu différent de D/H : l'enrichissement ne peut avoir lieu. Pour qu'il soit important, il faut que la densité électronique soit très faible. A partir de l'observation du rapport $\text{DCO}^+/\text{HCO}^+$, Guélin et ses collaborateurs trouvent une ionisation relative $e/\text{H} \approx 4 \cdot 10^{-8}$ seulement. Ainsi non seulement l'existence de cet énorme fractionnement isotopique, qui ne pourrait se produire sur des grains, confirme l'importance de la chimie ionique en phase gazeuse, mais on peut en déduire des renseignements essentiels sur l'état physique des nuages moléculaires. De nombreuses autres molécules (HCN , HNC , N_2H^+ , NH_3 et H_2CO) montrent un important enrichissement en deutérium et sont donc aussi synthétisées essentiellement en phase gazeuse.

Si l'on mesure k_c et si l'on connaît f , on peut, en supposant que k_1 et k_2 sont égaux au taux de Langevin, estimer τ_D .

Considérons maintenant la même réaction dans le milieu interstellaire en l'absence de 3^e corps M. On a cette fois l'association radiative :



dont le taux global est :

$$k_R = k_1 \frac{\tau_D}{\tau_D + \tau_R}$$

τ_R peut être estimé par la théorie du rayonnement, k_1 est supposé égal au taux de Langevin et τ_D est connu par l'étude précédente au laboratoire : il est donc possible de calculer k_R même si l'observation directe de la réaction d'association radiative n'est pas possible, ce qui est le cas au laboratoire. Smith et Adams, de l'Université de Birmingham, ont ainsi estimé le taux d'un certain nombre de

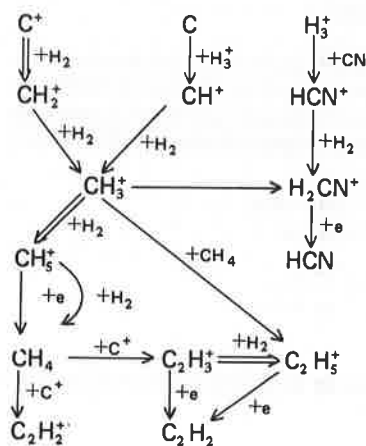
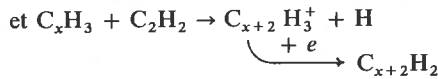
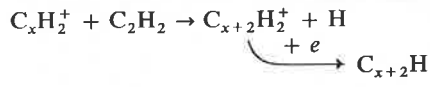


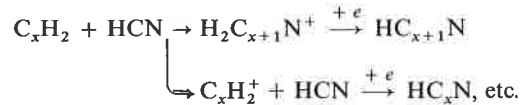
Figure 2. Quelques réactions possibles conduisent aux produits de départ des longues chaînes carbonées et cyanopolynes. Les réactions d'association radiative directe sont indiquées par des doubles flèches.

réactions d'association radiative d'intérêt astrophysique, Ils ont constaté que ce taux croît fortement lorsque la température décroît et après une extrapolation aux basses températures, ont obtenu dans certains cas des valeurs de k_R aussi grandes que 10^{-9} à 10^{-11} $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à 20 K. C'est considérablement supérieur à ce qu'on croyait auparavant, et certaines réactions d'association radiative jouent probablement un rôle capital en chimie interstellaire. C'est le cas pour la synthèse de longues chaînes carbonées, d'après plusieurs auteurs (Huntress, Mitchell, Prasad, Herbst, Bohme, Schiff). La figure 2 montre les premières étapes du processus, qui aboutissent à la formation de l'acétylène C_2H_2 des ions C_2H_2^+ , C_2H_3^+ , C_2H_5^+ et H_2CN^+ , ainsi que de l'acide cyanhydrique HCN, qui paraissent les principaux points de départ de la formation des chaînes carbonées et des cyanopolynes. Ces premières étapes, elles-mêmes incertaines (des réactions importantes sont de plus volontairement omises dans la figure 2) font intervenir des réactions d'association radiative représentées par des doubles flèches. La suite des opérations est également incertaine, plutôt d'ailleurs par excès que par manque de possibilités. On peut envisager la formation de longues chaînes carbonées (dont

seules les plus simples ont été observées) par des réactions du type



tandis que les cyanopolynes peuvent être formés par action de HCN sur les ions précédents :



D'autres réactions faisant intervenir C_2H_5^+ et H_2CN^+ ont également été proposées. On voit que les possibilités ne manquent pas pour expliquer les longues chaînes carbonées qui ont paru pourtant si mystérieuses lors de leur récente découverte.

Conclusions et prospective

Les quelques exemples que nous venons de voir montrent que le milieu interstellaire est un laboratoire naturel particulièrement intéressant parce qu'il y existe des conditions physiques très différentes de celles que l'on peut réaliser sur Terre. Cet intérêt est aussi grand pour les physiciens (je n'en ai pas parlé) que pour les chimistes. La présence de nombreuses espèces instables, l'existence d'une chimie très particulière dominée par des réactions ioniques et des réactions d'association radiative directe en sont les traits principaux. Il ne fait pas de doute que ce domaine ne peut manquer de se développer dans le cadre d'une coopération plus étroite entre les radioastronomes et les physico-chimistes.

Du côté de l'observation, les quelques rares radiotélescopes millimétriques en existence se trouvaient tous jusqu'à ces derniers temps hors de l'Europe continentale. Ils sont utilisés au maximum de leurs possibilités par une communauté internationale importante, parmi lesquelles figurent une douzaine de chercheurs français, des observatoires de Paris-Meudon et de Bordeaux et du laboratoire de Physique de l'École Normale Supérieure. De leur côté, ces trois Instituts viennent de terminer ensemble la construction d'un récepteur millimétrique très performant placé au foyer d'un radiotélescope de 2,5 m situé à Bordeaux ; cette opération dote pour la première fois la communauté française d'un moyen d'observation national puissant malgré ses faibles dimensions, et qui sera largement ouvert à tous les chercheurs, même non-astronomes. Ceci n'est qu'une étape vers un complexe instrumental européen beaucoup plus important dont la construction a été décidée le 2 avril 1979 par le CNRS et la Max Planck Gesellschaft : l'Institut de Radio Astronomie Millimétrique (IRAM), dont le siège est à Grenoble. Deux très grands

instruments sont en construction, qui seront achevés respectivement en 1983-84 et 1985-86 : un radiotélescope de 30 m de diamètre, qui sera situé près du sommet de la Sierra Nevada, en Espagne, et un interféromètre comprenant 3 antennes mobiles d'environ 15 m de diamètre placé sur le Plateau de Bure, près de Gap. Les données moléculaires qu'ils permettront d'obtenir seront sans aucun doute précieuses pour la chimie interstellaire.

L'exploitation de ces données n'est pas concevable sans un effort simultané d'études en laboratoire et de recherches théoriques. Au laboratoire, il est nécessaire d'essayer de fabriquer des espèces nouvelles prévisibles dans le milieu interstellaire et d'en faire la spectroscopie hertzienne aux fins d'identification. Par ailleurs, l'étude en laboratoire des réactions intéressantes ions-molécules et d'association radiative devrait être très fructueuse. Sur le plan théorique, des calculs ab-initio de la structure des molécules de plus en plus complexes (particulièrement d'espèces très instables) devrait permettre d'en déterminer les constantes de rotation, toujours dans des buts d'identification ; des études de chimie quantique devraient permettre d'estimer, dans certains cas, des taux de réaction. Certaines collaborations existent déjà sur le plan national et européen (Laboratoires de spectroscopie hertzienne des Universités de Lille et de Giessen, en ce qui concerne la spectroscopie de laboratoire, École Normale Supérieure de Jeunes Filles et Institut Max Planck de Physique et d'Astrophysique de Munich pour les calculs ab initio). D'autres sont à créer. De telles collaborations, la puissance des instruments de l'IRAM et l'expérience de nos chercheurs devraient mettre l'Europe en position de force pour développer ce domaine nouveau et passionnant.

Bibliographie sommaire

Articles de revue

- B. Zuckerman et P. Palmer, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 1974, **12**, 279.
- W. D. Watson, in *Atomic and Molecular Physics and the Interstellar Matter*, ed. R. Balian, P. Encrenaz, J. Lequeux, p. 177. North Holland, Amsterdam (1975).
- E. Herbst, Klemperer, *Physics Today*, 1976, **29**, 32.
- W. D. Watson, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 1978, **16**, 585.

Réactions ion-molécule

- W. T. Huntress, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 1977, **33**, 495.

- M. Guélin, W. D. Langer, R. L. Snell et H. A. Wootten, *Astrophys. J. Letters*, 1977, **217**, L165.

Réactions d'association

- D. Smith et N. G. Adams, *Astrophys. J. Letters*, 1978, **220**, L87.
- H. I. Schiff et D. K. Bohme, *Astrophys. J.*, 1979, **232**, 740.
- W. T. Huntress et G. F. Mitchell, *Astrophys. J.*, 1979, **231**, 456.
- G. F. Mitchell, W. T. Huntress et S. S. Prasad, *Astrophys. J.*, 1979, **233**, 102.