

521.031 : 523.6

## La Physicochimie des Comètes. <sup>(1)</sup>

---

Nos connaissances dans le domaine de la physicochimie des comètes ont fait des progrès considérables depuis 1940. Ces progrès résultent essentiellement de l'application des données de la physique et de la chimie moléculaire moderne aux résultats récents d'observations spectroscopiques. Les astronomes ont été encouragés à consacrer une attention spéciale aux spectres de comètes, non seulement parce que ces astres ont toujours suscité beaucoup d'intérêt, mais aussi parce que les molécules cométaires présentent des analogies frappantes avec les mystérieuses molécules interstellaires. De plus, le problème général des abondances relatives des divers atomes et molécules est, plus que jamais, à l'ordre du jour; les renseignements tirés de l'étude des comètes sont aussi intéressants à ce titre.

Quelles sont les données essentielles d'observation? Un spectre cométaire consiste en bandes moléculaires d'émission superposées à un spectre « solaire » dû à la réflexion et à la diffusion de la lumière solaire par des particules solides et gazeuses. A de faibles distances héliocentriques, on observe, en plus, les raies jaunes d'émission de l'atome de sodium. Il est très probable que des atomes autres que le sodium seront trouvés de façon certaine (\*), lorsque les conditions d'observation seront favorables. On doit s'attendre, notamment, à trouver aux petites distances héliocentriques les raies de résonance du potassium dans la région rouge extrême du spectre.

L'intensité relative des bandes moléculaires et du spectre solaire varie avec la distance de la comète au soleil. Les rares observations spectroscopiques de comètes à grande distance héliocentrique ont révélé essentiellement un spectre solaire, sans aucune trace des bandes usuelles du cyanogène CN ou du carbone C<sub>2</sub>. De ces observations, on déduit habituellement qu'à grande distance du soleil, l'« atmosphère » cométaire est surtout composée de poussière. Cependant, une telle conclusion n'est pas justifiée. Le « spectre solaire » d'une comète lointaine pourrait aussi être dû en partie à la diffusion par des gaz polyatomiques dont les bandes caractéristiques d'émission

---

(1) Conférence faite à la tribune de la S. B. A. le 30 novembre 1946.

(\*) Il reste quelque doute au sujet de l'observation visuelle ancienne de raies d'arc du fer dans la comète 1882 II.

ne se trouvent pas dans le domaine observable. D'ailleurs, dans la suite de cet exposé, nous montrerons que, de toutes les molécules cométaires observées aux faibles distances héliocentriques, seules les polyatomiques ont encore quelque chance d'être abondantes, à la distance moyenne de la comète Schwassmann-Wachmann, par exemple. Les seules molécules triatomiques  $\text{CH}_2$  et  $\text{NH}_2$ , ont leurs raies caractéristiques situées dans le violet ( $\lambda$  4050) ou le rouge ( $\lambda$  6300); elles pourraient bien avoir échappé aux observations spectroscopiques relativement anciennes des comètes éloignées d'autant plus qu'à grande distance héliocentrique, ces molécules pourraient montrer seulement quelques raies isolées très fines. En fait, il y aurait lieu de reprendre l'observation systématique tant photométrique que spectroscopique d'astres tels que la comète Schwassmann-Wachmann. Si la diffusion moléculaire joue un rôle important dans la production du spectre « solaire », la comète devrait être plus bleue que le soleil. Des observations colorimétriques, menées systématiquement, apporteraient, sans doute, la solution de l'énigme des variations considérables de luminosité de la comète Schwassmann-Wachmann.

Les spectres des différentes comètes présentent beaucoup de similarité. Pourtant des différences individuelles sont nettement observées; il arrive que deux comètes situées à la même distance du soleil (c'est-à-dire, ayant donc la même excitation), révèlent des différences appréciables, non seulement dans les intensités relatives du spectre « solaire » et du spectre « moléculaire » considéré globalement, mais encore dans les intensités relatives de bandes appartenant à des molécules différentes. Par exemple, les intensités relatives des bandes de  $\text{C}_2$  et  $\text{CH}$  par rapport à  $\text{CN}$  sont nettement plus faibles dans la comète 1941 *c* que dans 1940 *c* à la même distance héliocentrique. Des variations semblables ont aussi été observées récemment pour les intensités relatives de  $\text{OH}$  et  $\text{NH}$  dans plusieurs comètes. Ainsi donc, les atmosphères cométaires ne possèdent pas toutes exactement la même composition chimique. Notons que de telles comparaisons entre les spectres des différentes comètes ne peuvent se faire que pour une distance héliocentrique déterminée (\*), car les intensités relatives de bandes dues à différentes molécules varient pour une comète déterminée avec la distance au soleil (\*\*).

(\*) Il y aurait même lieu (v. plus loin) de considérer l'effet possible de différences de vitesse radiale.

(\*\*) Pour pouvoir discuter les mécanismes physico-chimiques régissant de telles variations avec la distance héliocentrique, il faudrait des données quantitatives d'observation et de laboratoire qu'on ne possède pas encore.

Quelles sont les molécules identifiées dans les comètes ? Leur nombre a doublé depuis 1940. Jusqu'alors, on connaissait CN, C<sub>2</sub>, CH, CO<sup>+</sup> et N<sub>2</sub><sup>+</sup>. Les molécules CN, C<sub>2</sub> et CH étaient localisées essentiellement dans la tête des comètes alors que CO<sup>+</sup> et N<sub>2</sub><sup>+</sup> étaient caractéristiques de la queue. A ces cinq molécules, on en a maintenant ajouté six nouvelles : OH, NH, CH<sup>+</sup>, CH<sub>2</sub>, NH<sub>2</sub> et OH<sup>+</sup>, la dernière restant quelque peu hypothétique. A l'heure actuelle, toutes les raies d'émission intenses des comètes entre  $\lambda$  3070 et  $\lambda$  6700 sont identifiées de façon satisfaisante. Toutefois, il reste encore de nombreuses émissions faibles non identifiées : je suis occupé à leur étude systématique sur la base des spectrogrammes obtenus à l'Observatoire Mc Donald. Je ne m'étonnerais pas, par exemple, si des composés sulfurés étaient un jour identifiés, car le soufre est un élément relativement abondant dans les météorites et, comme nous le verrons plus loin, il semble bien y avoir une relation intime entre les solides des comètes et les météorites.

Examinons brièvement l'aspect général des bandes moléculaires d'une comète (Fig. 1). A l'extrémité ultraviolette du spectre, nous trouvons les bandes de OH et de NH (Fig. 2); OH révèle plusieurs raies fines intenses entre  $\lambda$  3078 et  $\lambda$  3100, alors que NH présente ses lignes caractéristiques entre  $\lambda$  3350 et  $\lambda$  3372 (\*). Entre ces deux groupes caractéristiques, on trouve quelques raies très faibles encore dues à OH. La région  $\lambda\lambda$  3560 — 3600 est complexe. La majeure partie de l'émission y est due à CN et à CO<sup>+</sup>; mais ma discussion des spectrogrammes de Mac Donald indique aussi la présence extrêmement probable, dans cette région, de raies dues à OH<sup>+</sup>; j'ai appris qu'une étude récente de M. Hunaerts conduit à la même conclusion.

La région entre  $\lambda$  3600 et  $\lambda$  3850 ne montre aucune bande d'émission bien caractéristique, quoique probablement le spectre solaire seul ne puisse pas expliquer toute l'émission observée. Nous arrivons ainsi à la fameuse bande du cyanogène, s'étendant d'environ  $\lambda$  3850 à  $\lambda$  3883 (Fig. 3 et 4); nous verrons plus loin comment la structure bizarre de cette bande a pu être récemment interprétée. On observe dans les comètes quatre séquences de bandes du système violet du cyanogène; au contraire le système rouge de CN est absent ou extrêmement faible et les « tail bands » de CN parfois considérées comme présentes, sont définitivement absentes. Il y a dans le bleu-

---

(\*) Ce fut l'un des moments les plus impressionnants de ma carrière astronomique, lorsque j'ai observé et identifié ces belle raies fines de OH et de NH pour la première fois.

violet du spectre cométaire, deux systèmes de bandes de CH, le plus intense entre  $\lambda$  4280 et  $\lambda$  4350, l'autre entre  $\lambda$  3886 et  $\lambda$  3922 : j'ai cherché en vain, sur les clichés obtenus à l'Observatoire Mc Donald et à l'Observatoire Lick une trace du composé carboné du deutérium CD.

Dans la région de  $\lambda$  4050, se trouve un groupe de raies qui, dans certaines comètes, peuvent devenir extrêmement intenses par rapport aux autres émissions moléculaires. C'est notamment le cas à grande distance héliocentrique : ainsi dans la comète 1942 *a* (Whipple), à une distance héliocentrique 1,5 — 1,8 U.A., le groupe  $\lambda$  4050 est intense, alors que CH est à peine visible et C<sub>2</sub> très faible. Ce groupe a fait l'objet d'un grand nombre de publications; il a été successivement attribué à CH (Bande de Raffety), C<sub>2</sub> (système de Deslandres-d'Azambuja), CN (« tail bands »), NaH, etc.; mais aucune de ces identifications n'est satisfaisante. Après avoir fait une étude très soignée du groupe, à partir de nouvelles observations effectuées à l'Observatoire Mc Donald, j'ai tiré les conclusions suivantes en juin 1942 :

- a. — si le groupe est dû à une molécule diatomique, ce ne peut être qu'à un hydrure ionisé, la seule molécule vraisemblable étant NH<sup>+</sup>, de spectre encore inconnu. Mais cette identification rencontre des difficultés tant astronomiques que physiques;
- b. — plus probablement, le groupe  $\lambda$  4050 est dû à une molécule polyatomique composée d'éléments cosmiquement abondants. La molécule CH<sub>2</sub> suggérée par Herzberg est particulièrement probable tant pour des raisons astronomiques que physiques.

Durant l'été 1942, Herzberg réussit à obtenir le spectre de CH<sub>2</sub> en laboratoire, prouvant de façon indiscutable que le groupe  $\lambda$  4050 est dû à cette molécule triatomique et identifiant, de ce fait, la première molécule polyatomique des comètes.

Entre la bande de CN près de  $\lambda$  4200 et les fortes raies du CH, on observe un groupe de trois raies  $\lambda\lambda$  4231, 4238 et 4254. Ces raies sont particulièrement intéressantes parce qu'elles sont présentes jusqu'à une certaine distance dans la queue. Le groupe a été observé dans de nombreuses comètes et je l'avais suivi attentivement dans la Comète Cunningham. J'ai pu montrer qu'il s'agissait de CH<sup>+</sup>.

Dans le vert, les bandes de Swan de C<sub>2</sub> sont proéminentes. Dans la même région, on observe aussi quelques émissions qui ne sont pas dues à C<sub>2</sub> et qui ne sont pas encore expliquées. Dans certaines comètes, les bandes de la molécule isotopique C<sub>12</sub>C<sub>13</sub> sont observées; ces

bandes isotopiques sont floues, à l'opposé de celles de  $C_{12}C_{12}$  qui ont une tête bien piquée.

Enfin, il restait, dans le domaine visible, aux environs de  $\lambda$  6300 un groupe de raies intenses qui, par leur comportement semblable à celui de la bande de  $CH_2$  près de  $\lambda$  4050 semblait dû également à une molécule polyatomique. Ces raies rouges ont été attribuées récemment à  $NH_2$ .

Récapitulant les identifications nous voyons donc que, à part quelques lignes relativement faibles non encore identifiées, les bandes d'émission des têtes de comètes sont dues aux molécules suivantes :

$OH$ ,  $NH$ ,  $CN$ ,  $CH$ ,  $CH^+$ ,  $C_2$ ,  $CH_2$ ,  $NH_2$ ,  $OH^+$  (?)

Depuis longtemps, on sait d'ailleurs que  $CO^+$  et  $N_2^+$  caractérisent les queues de comètes; ces molécules sont aussi présentes dans la tête, mais seulement au voisinage du noyau.

A première vue, on peut s'étonner de ce qu'un objet de température assez basse, comme l'atmosphère d'une comète, puisse contenir des radicaux comme  $OH$ ,  $CN$ ,  $CH$ ,  $NH$ ,  $C_2$ ,  $CH_2$ ,  $NH_2$  qui ne sont pas « chimiquement stables ». En fait, ces composés sont « physiquement stables », car leur état électronique fondamental possède une énergie inférieure à l'énergie des deux atomes séparés. Des molécules sont considérées comme « chimiquement stables » si elles peuvent exister pendant un temps appréciable, même si elles entrent en collision à des températures basses. A ce titre,  $OH$ ,  $CH$ ,  $CN$ , etc., ne sont pas chimiquement stables; mais elles peuvent être présentes dans les atmosphères des comètes, car, par suite des basses pressions régnant dans ces atmosphères, les collisions y sont pratiquement absentes. Une fois qu'un radical tel que  $CH$  a été formé par la photodissociation d'une molécule plus complexe, chimiquement stable, ce radical n'aura aucune chance de recombinaison par collision.

Quelle est l'origine de ces molécules cométaires, physiquement stables mais chimiquement instables. L'atmosphère gazeuse d'une comète est engendrée par la libération de « molécules parentes » qui se trouvaient à l'état occlus dans les particules solides. Ces molécules parentes doivent naturellement être des composés chimiquement stables. Les molécules observées résultent de la dissociation et de l'ionisation des composés parents. D'après les molécules identifiées dans les spectres cométaires, nous pouvons penser que les composés suivants sont présents à l'état occlus dans les solides cométaires : eau ( $H_2O$ ), gaz ammoniac ( $NH_3$ ), dicyanogène ( $C_2N_2$ ), méthane ( $CH_4$ ), azote ( $N_2$ ), oxyde ou bioxyde de carbone ( $CO$  ou  $CO_2$ ). C'est

là à peu près tout ce que nous pouvons dire avec quelque degré de certitude. A ce stade, on peut être tenté, à juste titre, de rapprocher de ces conclusions, les résultats des études de gaz occlus libérés par les météorites lorsqu'on les chauffe ou qu'on les brise dans le vide. On sait que les météorites contiennent aussi de grandes quantités de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ , etc. Il n'est peut-être pas entièrement légitime d'identifier les solides météoritiques et cométaires, mais leur comparaison est en tout cas très utile. Par exemple, on sait qu'il existe des différences de composition chimique entre les gaz occlus dans les différents types de météorites, tout comme il se présente des différences de composition chimique parmi les comètes.

Par quel mécanisme les bandes moléculaires sont-elles émises dans une comète ? Résultent-elles de collisions électroniques ou de l'un ou l'autre processus de photodissociation par la lumière solaire ? Ou bien sont-elles simplement dues à une pure fluorescence excitée par la radiation solaire ? L'argumentation suivante permet de décider sans la moindre ambiguïté en faveur d'une pure fluorescence. Supposons qu'une raie moléculaire déterminée ne puisse être excitée que par une longueur d'onde coïncidant avec une forte raie d'absorption du spectre solaire. Dans ce cas, il y aura peu d'énergie disponible dans le rayonnement solaire pour exciter la raie cométaire en question. En conséquence, celle-ci sera faible ou absente. Ceci est exactement ce que l'on observe. Par exemple, les bandes cométaires dues au cyanogène CN ont une distribution d'intensité très anormale, différant de tout ce qu'on a jamais trouvé en laboratoire. Chacun des maxima et minima observés dans les bandes cométaires a pu être expliqué parfaitement en tenant compte de la distribution d'intensité dans le spectre solaire. Naturellement, ce qui compte pour les gaz cométaires, c'est la radiation solaire telle qu'elle est reçue par la comète, c'est-à-dire légèrement déplacée en longueur d'onde, dans un sens ou dans l'autre, par l'effet Doppler dû à la vitesse radiale relative du soleil de la comète. Cet effet de vitesse radiale est très apparent dans les observations spectroscopiques de certaines comètes récentes.

Les spectroscopistes de laboratoire feront sûrement un rapprochement entre cette explication des profils de bandes de fluorescence cométaire et celle des multiples complexes obtenus en laboratoire dans les vapeurs diatomiques d'iode, brome, soufre, sélénium, tellure, etc., lorsque celles-ci sont excitées par une radiation qui n'est pas parfaitement monochromatique. En fait, les deux types d'observation sont

essentiellement identiques. Notons, toutefois, que le phénomène cométaire est plus pur puisque, par suite des basses pressions régnant dans les comètes, aucun effet de collision ne peut y jouer de rôle perturbateur. Les atmosphères cométaires ont des densités si faibles qu'une molécule n'y subit pratiquement aucune collision au cours de sa « vie ». (Cette notion de durée de vie sera discutée un peu plus loin). Dans le cas d'une comète telle que la comète Cunningham (Fig. 5), le spectre continu est beaucoup plus faible que l'émission moléculaire, de sorte que la luminosité de la comète est presque entièrement due à un phénomène de fluorescence.

Il paraît souhaitable de ranger ce mécanisme d'excitation fluorescente des bandes cométaires brillantes dans le cadre des divers processus d'excitation des molécules observées dans les objets astronomiques. On sait, en effet, que certaines molécules sont observées en émission dans la chromosphère solaire (notamment la molécule CN dont la distribution en hauteur mérite de nouvelles recherches), dans l'atmosphère terrestre, (c'est-à-dire, dans les spectres du ciel nocturne, de l'aurore boréale, du crépuscule et des éclairs) dans les comètes et dans une étoile, Mira Ceti à une certaine phase (bandes de AlO) Ces bandes d'émission sont, en général, des transitions permises; mais on observe aussi des transitions interdites de  $N_2$  (et peut-être de  $O_2$ ) dans le ciel nocturne. Les mécanismes d'excitation sont, essentiellement semblables à ceux qui produisent l'émission de raies atomiques. Certaines bandes sont émises par un pur effet de fluorescence (cas des bandes cométaires; probablement aussi cas de l'émission de  $N_2^+$  dans le ciel crépusculaire (\*) et de l'émission de AlO dans o Ceti); d'autres bandes résultent de la recombinaison d'atomes ou d'ions (ciel nocturne); d'autres encore sont excitées par chocs électroniques (aurore boréale).

Il est aussi intéressant d'examiner une autre question souvent considérée dans les travaux sur les spectres cométaires. Les raies de CH, CN,  $CH^+$ , OH et NH observées dans les comètes correspondent aux faibles énergies de rotation, ce que l'on exprime en disant que

---

(\*) Il serait désirable d'étudier, avec une résolution suffisante, la distribution d'intensité au sein de la bande d'émission crépusculaire de  $N_2^+$  et de comparer cette distribution à celle de  $N_2^+$  dans les comètes (fluorescence) et dans les aurores (collision électronique). Une telle étude permettrait de décider du processus d'excitation; si la bande est réellement excitée par fluorescence, les raies de Fraunhofer du spectre solaire devraient affecter son profil, tout comme elles affectent le profil des bandes cométaires.

la température rotationnelle déduite de ces bandes est basse (de l'ordre de 300° K). Au contraire, les bandes de Swan de  $C_2$  sont bien développées et présentent le genre de distribution d'intensité que l'on trouverait à une température de l'ordre de 3000° K. Dans le cas d'objets de faible densité comme les atmosphères cométaires, le concept de température n'a, évidemment, guère de sens. On déclare toujours que la distribution rotationnelle à basse température de CH et CN, comparée à la distribution rotationnelle à haute température de  $C_2$ , est due au fait que CH et CN, molécules hétéronucléaires ont un dipole permanent, alors que  $C_2$ , molécule homonucléaire, n'en a pas. En conséquence, le spectre de rotation pure de CH et CN est « permis », alors que celui de  $C_2$  est « interdit ». En d'autres termes, les états rotationnels excités de CH et CN sont dépeuplés par émission de transitions rotationnelles pures, alors que les molécules  $C_2$  peuvent s'accumuler dans les états rotationnels excités sans aucune chance de transition vers le bas. Il y a lieu de préciser ces considérations d'ordre général en introduisant les ordres de grandeur des probabilités de transition. En fait, quoique le spectre de rotation pure de CH ou CN soit « permis » au sens usuel du terme, les probabilités effectives des transitions rotationnelles pures sont extrêmement faibles, lorsqu'elles sont comparées aux probabilités de raies permises ou même interdites dans le domaine visible habituel. Ceci est dû à la présence d'un facteur  $v^3$  dans la formule de la probabilité de transition. Par exemple, la probabilité de la transition entre les deux niveaux rotationnels les plus bas de CN est comprise entre  $10^{-7}$  et  $10^{-5}$  (comparer cette valeur à la probabilité 0.016 de  $N_1$  [O III] ou à 2,8 de  $\lambda$  4363 [O III] !). On sait que l'intervalle moyen entre deux collisions est approximativement  $10^8$  secondes dans la région nucléaire et  $10^6$  secondes dans la tête. Dans la région du noyau, les collisions sont donc plus fréquentes que les dé-excitations par émission infrarouge. Mais les processus de collision, tout comme ceux d'émission infrarouge, sont bien moins fréquents que les processus d'absorption dans la région bleue (environ 20 processus d'absorption par seconde à une distance héliocentrique  $r = 1$  U.A. et 90 processus à  $r = 0.6$  U. A.). Les probabilités dans le cas du spectre infrarouge interdit de  $C_2$  seraient encore plus petites que celles de CN, le facteur de réduction étant de l'ordre de  $10^6$ . En tout cas, maintenant que le mécanisme d'excitation par fluorescence a été définitivement prouvé, il serait hautement souhaitable d'étudier la distribution des molécules cométaires sur les niveaux de rotation suivant la méthode des cycles ou tout autre procédé. Notre image qualitative

des températures rotationnelles des comètes restera correcte dans ses grandes lignes; mais un traitement théorique plus rigoureux serait désirable.

Chaque espèce de molécule possède une certaine distribution au sein de la comète : CH, CH<sub>2</sub> et NH<sub>2</sub> ne sont observées qu'au voisinage immédiat du noyau, alors que OH, NH, CN et C<sub>2</sub> s'étendent beaucoup plus loin. Quant aux molécules ionisées, elles sont présentes surtout dans la queue jusqu'à d'énormes distances du noyau; pourtant, dans la tête, elles ne sont observées que très près du noyau. La distance à laquelle une espèce de molécules peut s'éloigner du noyau dépend de la vitesse moyenne de ces molécules et de leur durée de vie. Certaines molécules comme CO<sup>+</sup> et N<sub>2</sub><sup>+</sup> ont des vitesses initiales (\*) faibles, mais de très longues vies. D'autres comme CN et C<sub>2</sub> ont de grandes vitesses initiales, et les cas intermédiaires sont aussi observés. Les vitesses ne sont pas dues à l'agitation thermique, car des molécules comme CN et CO<sup>+</sup> qui ont approximativement la même masse, ont des vitesses initiales très différentes. Ces vitesses doivent donc résulter des mécanismes de photodissociation des molécules parentes.

Quant à la vie moyenne d'une espèce déterminée de molécules avant la photodissociation ou photo-ionisation par le rayonnement solaire, elle dépend non seulement des caractéristiques physiques des molécules considérées, mais encore de la quantité d'énergie solaire disponible dans le domaine spectral requis pour la dissociation ou l'ionisation.

Par exemple, si comme il semble bien, les ions CO<sup>+</sup> et N<sub>2</sub><sup>+</sup> sont produits par la photo-ionisation de CO et N<sub>2</sub>, les radiations solaires requises doivent être de longueur d'onde inférieure à  $\lambda$  880, c'est-à-dire plus courte que la limite de Lyman de l'atome d'hydrogène. Nous ignorons quel rayonnement la photosphère émet dans l'ultra-violet lointain. Mais nous savons, en tout cas, que la plupart des atomes d'hydrogène de la couche renversante solaire doivent se trouver à leur état électronique normal et que, par conséquent, les raies et le continuum de Lyman doivent être très intenses en absorption. Ainsi donc le rayonnement photosphérique solaire filtré par la couche renversante est trop faible pour expliquer la photo-ionisation observée de CO et N<sub>2</sub>. On a pensé à d'autres mécanismes responsables de la

---

(\*) Par suite de l'accélération continue par pression de radiation, les vitesses finales des molécules CO<sup>+</sup> et N<sub>2</sub><sup>+</sup> peuvent devenir considérables à grande distance du noyau.

formation de  $\text{CO}^+$  et  $\text{N}_2^+$ ; mais il semble bien qu'on ne puisse échapper à la conclusion que le soleil nous envoie, dans le domaine de  $\lambda < 880 \text{ \AA}$ , beaucoup plus d'énergie qu'un corps noir à  $6000^\circ \text{ K}$ . Cet excès d'ultraviolet est, sans doute, fourni par la couronne et la chromosphère. Le problème de la présence de  $\text{N}_2^+$  dans la haute atmosphère terrestre est tout-à-fait analogue à celui des comètes, de sorte que des travaux sur l'ionosphère du genre de ceux de M. Nicolet peuvent s'appliquer immédiatement aux comètes.

D'ailleurs, lorsqu'on examine le problème de l'ionisation au sein des comètes, une grande prudence est requise. Etant donné les basses densités cométaires et l'extension relativement faible des molécules à partir du noyau, un ion  $\text{CH}^+$ , une fois qu'il aura été produit à partir de  $\text{CH}$  (par absorption d'un photon de longueur d'onde inférieure à  $\lambda 1110$ ), n'aura guère de chance, au cours de sa vie, de capturer un électron et d'ainsi redevenir une molécule neutre  $\text{CH}$ .

Nous n'avons encore que des idées fort vagues au sujet des abondances relatives des diverses molécules cométaires et, par conséquent, au sujet du détail des mécanismes de formation, photodissociation et photo-ionisation. En effet, les intensités observées dépendent non seulement des abondances, mais encore des forces oscillantes (facteur «  $f$  ») et de l'intensité de la radiation solaire. Nous avons des valeurs expérimentales plus ou moins approximatives pour  $f(\text{OH})$ ,  $f(\text{CN})$  et  $f(\text{CH})$  et des valeurs théoriques (assez grossières) pour  $f(\text{NH})$  et  $f(\text{C}_2)$ . Tout ce que nous pouvons dire à l'heure actuelle, c'est que les abondances de ces cinq molécules sont du même ordre de grandeur. Par exemple, il est certain que les bandes de  $\text{OH}$  sont plus faibles que celles de  $\text{CN}$ , mais le facteur  $f(\text{OH})$  est beaucoup plus petit que  $f(\text{CN})$  et le rayonnement solaire est beaucoup plus faible près de  $\lambda 3090$  (absorption de  $\text{OH}$ ) que près de  $\lambda 3880$  (absorption de  $\text{CN}$ ). On ne connaît rien des facteurs  $f$  de  $\text{CH}^+$ ,  $\text{CO}^+$ ,  $\text{N}_2^+$  et  $\text{OH}^+$ ; nous pouvons seulement estimer les ordres de grandeur des  $f$  par comparaison avec les  $f$  des mêmes transitions électroniques des molécules isoélectroniques neutres correspondantes. On ne sait absolument rien des  $f$  de  $\text{CH}_2$  et de  $\text{NH}_2$ . Certaines régions de la tête révèlent simultanément  $\text{CH}$  et  $\text{CH}^+$ ; mais comme nous ne connaissons pas suffisamment bien les forces oscillantes et comme aucune mesure d'intensité de ces bandes cométaires n'existe, il est impossible d'estimer l'ionisation moyenne de  $\text{CH}$ .

L'espace interstellaire, où règne une basse température, contient aussi les molécules  $\text{CN}$ ,  $\text{CH}$  et  $\text{CH}^+$ . Toutefois, la molécule  $\text{C}_2$ , si abondante dans les comètes, n'y est pas observée. Il y a cependant

quelqu'analogie entre les mécanismes réglant les abondances des molécules dans les comètes et dans l'espace interstellaire : dans chaque cas, les molécules normales et ionisées sont en présence d'atomes neutres et ionisés, de molécules plus lourdes et de solides, le tout étant exposé à un rayonnement stellaire. Je sortirais de mon sujet en traitant, en détail, le sujet des molécules interstellaires. Pourtant, étant donné les relations étroites entre le problème des molécules cométaires et celui des molécules interstellaires, il me paraît souhaitable de mentionner mon point de vue au sujet de ces molécules, point de vue que je partage avec le Dr. Paul W. Merrill. Les molécules CH, CN et CH<sup>+</sup> manifestant des raies stationnaires fines ne devraient pas être qualifiées d'« interstellaires » au même titre que les poussières interstellaires ou que les atomes interstellaires de Ca<sup>+</sup>, Ca, Na, Ti<sup>+</sup>, K et Fe. L'intensité des raies moléculaires stationnaires ne croît pas, même statistiquement, avec la distance de l'étoile. D'ailleurs, on n'a pas trouvé de raie de CH, CH<sup>+</sup> ou CN dans les spectres à faible dispersion d'étoiles lointaines même dans ceux où les raies stationnaires de Ca<sup>+</sup> et Na sont très intenses.

Au contraire, il y a des étoiles rapprochées, observées à grande dispersion, où les raies stationnaires des molécules sont plus intenses que celles de Ca<sup>+</sup> ou Na. Il y a encore d'autres raisons physiques qui font penser que les raies stationnaires des molécules apparaissent dans des régions relativement peu étendues, qui sont liées en quelque sorte à certaines étoiles. Les travaux théoriques à ce sujet — y compris les miens ! — n'ont pas accordé une attention suffisante à ce point de vue. Il est probable que les abondances moléculaires interstellaires habituellement citées sont erronées, peut-être d'un facteur mille ou plus. Les conditions de présence des molécules — c'est-à-dire de formation suffisamment poussée sans trop de dissociation en atomes ou d'association en solides — sont, sans doute, plus strictes que celles qui concernent les atomes ou les poussières. A l'heure actuelle, il faut être prudent lorsqu'on essaie d'établir des relations entre les molécules observées CH, CH<sup>+</sup>, CN et la fumée interstellaire. Je pense que l'espace interstellaire contient des régions essentiellement atomiques (elles-mêmes de divers types : par exemple, régions à hydrogène ionisé et à hydrogène normal), d'autres essentiellement « enfumées », d'autres encore, plus restreintes.

---

(\*) Je serais fort étonné si la dernière raie interstellaire fine, non encore identifiée,  $\lambda$  3579, n'était pas, un jour, attribuée à CH<sup>++</sup> (CH doublement ionisé).

tes, où les délicates conditions de présence des molécules sont remplies.

Le domaine de la physicochimie des comètes pose encore de nombreux problèmes, tant du point de vue observations photométriques et spectroscopiques, que du point de vue théorique et expérimental. Il faudrait continuer systématiquement la « spectroscopie locale » de surfaces cométaires. Il faudrait rechercher l'isotope  $N_{15}$  au moyen de  $C_{12}N_{15}$ ; continuer la recherche de CD; continuer les identifications du domaine visible; repérer exactement, par étude spectrophotométrique, les radiations non identifiées qui sont noyées dans le domaine des bandes de  $C_2$ ,  $CH_2$  et  $NH_2$ ; étudier à plus grande résolution, la région de la bande principale de  $OH^+$ . Il faudrait surtout étendre les observations vers le rouge extrême et l'infrarouge photographique. Ces nouvelles observations pourraient fournir la réponse aux questions suivantes :

- Y a-t-il émission de  $H_2O$ , HCN ( $\lambda$  7912),  $C_2H_2$  ( $\lambda$  7887),  $CH_4$ ,  $NH_3$ ,  $CO_2$  ?
- Trouve-t-on dans les régions nucléaires les plus denses une émission de  $N_2$  semblable à celle de la haute atmosphère ( $\lambda$  10440) ?

L'astronome s'occupant des comètes a besoin de l'aide du physicien et du chimiste pour de nombreuses questions. Il faudrait poursuivre les travaux sur les gaz occlus dans les météorites. Certains spectres devraient être étudiés, comme  $NH^+$ ,  $C_2^+$ ,  $CN^+$ ,  $CH^{++}$ . Il faudrait analyser le spectre de  $NO_2$  : sur la base des données actuelles de laboratoire, on ne peut pas exclure l'identification de  $NO_2$ , mais on ne peut, non plus, l'assurer. Il faudrait trouver le spectre de  $CH_3$  et analyser ceux de  $CH_2$  et  $NH_2$ . Quant aux intensités absolues (forces oscillantes), nous les désirons pour toutes les molécules cométaires !

Sans aucun doute, la collaboration de l'astronomie, de la physique et de la chimie qui a déjà accru considérablement nos connaissances au sujet des comètes, peut encore fournir des résultats fort intéressants dans ce domaine.

P. SWINGS.

*Institut d'Astrophysique de  
l'Université de Liège.*

Le 30 novembre 1946.