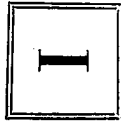


LA PHYSICO-CHEMIE DES COMÈTES

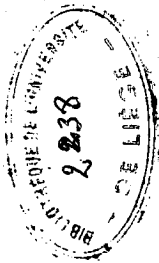


L n'est certes pas nécessaire de vous projeter des photographies de comètes. Tous, vous en avez vu des reproductions dans les livres d'Astronomie, les revues générales et, même, les journaux quotidiens. L'apparition d'une comète brillante continue de susciter l'attention du grand public, tout comme celle des astronomes professionnels. Ceux-ci savent qu'il subsiste encore de sérieuses lacunes dans notre connaissance physique et chimique des comètes, que de nombreux phénomènes restent très énigmatiques et que, par conséquent, aucune occasion ne peut être négligée d'accroître nos données d'observations physiques au sujet de ces fascinants membres du système solaire.

Une comète consiste en un noyau de dimensions restreintes, de l'ordre de quelques kilomètres ; d'une chevelure ou tête diffuse, entourant ce noyau et s'étendant jusqu'à quelques centaines de milliers de kilomètres du noyau ; et d'une queue dirigée à l'opposé du soleil, mesurant des millions de kilomètres. Par suite de son faible diamètre, le noyau paraît ponctuel sauf dans le cas de comètes très voisines de la terre, observées avec de puissants télescopes. Il est dès à présent utile de noter que la dimension de la tête varie suivant la couleur, c'est-à-dire suivant le domaine de longueurs d'onde. La tête d'une comète paraîtra plus petite dans le rouge et le violet extrême que dans la région verte.

Comment pouvons-nous obtenir des renseignements au sujet des phénomènes physiques et chimiques présents dans les comètes ? Nous ne pouvons guère utiliser que les méthodes d'étude de la lumière que nous envoient ces astres. Pourtant, il est bon de remarquer que les propriétés purement géométriques et dynamiques de la trajectoire de la comète doivent aussi être connues : dans notre interprétation des observations de la lumière des comètes, nous devons utiliser les distances héliocentriques, les vitesses radiales par rapport au soleil, les distances périhéliques et aphéliques et les périodes. Comme dans la plupart des autres domaines de l'Astronomie, on ne peut séparer l'étude physique et chimique des comètes de leur étude dynamique classique.

Des renseignements précieux nous sont fournis par la photométrie, c'est-à-dire par la détermination de la luminosité des comètes en différents points de leur trajectoire. Pourtant, la notion de luminosité des comètes est bien vague. Comme nous le verrons dans quelques instants, la lumière reçue de la tête d'une comète est la superposition d'un ensemble disparate de radiations émises en des régions diverses de cette tête ; les intensités relatives varient avec la distance au soleil. Suivant le



domaine spectral couvert par les observations photométriques, l'observateur intègre sur des contributions fort diverses. Des observations visuelles, photographiques et photoélectriques de luminosité ne peuvent être comparées qu'avec une extrême prudence et leur signification physique n'est pas souvent claire. Un important progrès sera accompli lorsque les observations photométriques seront effectuées avec des photomètres sensibles et précis, sur des domaines spectraux bien définis. Comme il apparaîtra clairement plus loin, il sera fort intéressant de savoir comment varient en fonction de la distance héliocentrique, la lumière solaire réfléchie et les radiations émises par des molécules ou atomes bien déterminés. Les magnitudes à présent existantes n'ont qu'un sens physique fort limité.

L'étude de la polarisation de la lumière des comètes fournit aussi des renseignements importants. Cette technique conduisit à penser, il y a déjà une quinzaine d'années, que certaines radiations cométaires résultent d'un phénomène de fluorescence excitée par le rayonnement solaire.

C'est, toutefois, la spectroscopie, c'est-à-dire l'analyse des diverses radiations simples composant le rayonnement cométaire, qui nous a apporté les documents les plus importants. En cela, la spectroscopie cométaire ne diffère guère des autres domaines de spectroscopie appliquée. L'identification des composés présents dans les comètes, la détermination de leurs abondances, l'étude des mécanismes d'excitation, la discussion des conditions physiques telles que la température, toutes ces questions sont traitées comme dans le cas de l'étude spectrographique du soleil, des étoiles, des alliages, des échantillons de pétrole ou de caoutchouc synthétique.

Qu'observons-nous lorsque la lumière d'une comète, concentrée par un télescope, sur la fente d'un spectrographe, est décomposée en ses différentes radiations ? Supposons que nous ayons guidé avec grand soin sur le noyau de la comète, de façon que chaque point de la fente corresponde à une région déterminée de la comète durant l'exposition photographique. Le noyau, dont le diamètre angulaire est très faible, nous fournira un spectre très étroit, identique au spectre du soleil, avec ses raies d'absorption caractéristiques. Le noyau de la comète est un solide ou, peut-être, un ensemble de solides, se contentant de réfléchir la lumière solaire, sans y ajouter de contribution visible propre. S'étendant de part et d'autre du spectre du noyau avec des longueurs, intensités et structures diverses, de nombreuses émissions caractéristiques de la tête de la comète révèlent la présence de composés gazeux occupant des régions différentes de la tête. A ces émissions discrètes s'ajoute parfois un spectre continu identique à celui du soleil. Enfin, si la fente du spectrographe couvre aussi une partie de la queue, le spectre révèle des radiations dues à des gaz caractéristiques des queues.

Examinons le spectre d'émission de la tête, en commençant par la région ultraviolette. Nous trouvons d'abord des raies très fines, présentes seulement dans les régions assez proches du noyau et qui sont dues au composé OH. Un peu vers les grandes longueurs d'onde, le groupe caractéristique de NH manifeste la présence de ce composé,

jusqu'à de grandes distances du noyau. Aux environs de la longueur d'onde λ 3569, se trouve une première émission caractéristique du composé CN, à laquelle se superpose très probablement une faible contribution due au composé ionisé OH^+ . Aux environs de λ 3875, se trouve l'émission la plus forte des têtes cométaires, due à CN ; elle s'étend jusqu'à de très grandes distances du noyau, plus loin que toute autre émission. CN présente encore d'autres radiations caractéristiques plus faibles dans la région violette et bleue du spectre. Aux environs de λ 3900, se trouve une émission faible due à CH ; une autre plus intense, due aussi à CH, est présente près de λ 4315. Les raies de CH sont très courtes, montrant que CH est concentré au voisinage du noyau. Quelques raies dues à CH^+ apparaissent aux environs de λ 4200 s'étendant assez loin dans la direction de la queue. Un autre composé, présent seulement dans la région centrale de la tête, quoique moins concentré que CH, est responsable de tout un groupe d'émissions intenses, observées de part et d'autre de λ 4050. Je reviendrai plus tard sur cette émission dont l'origine est encore à présent énigmatique. La région du bleu au jaune est parsemée de bandes brillantes dues au composé C_2 , s'étendant loin dans la tête. Ce sont ces bandes qui causent la coloration verdâtre habituelle des comètes. Dans la région du vert au rouge, se trouvent, ajoutées aux bandes longues de C_2 , des raies courtes, dont certaines sont intenses. La plupart de ces émissions ont été attribuées au composé NH_2 . Lorsque la comète est voisine du soleil, on observe aussi la raie double caractéristique jaune de l'atome de sodium. Les observations dans l'infrarouge photographique n'ont pas encore été très poussées, étant donné les difficultés techniques : deux émissions intenses découvertes récemment au voisinage de λ 7906 et de λ 8106 n'ont pas encore été identifiées avec certitude.

J'ai seulement mentionné les radiations inexpliquées les plus intenses des têtes cométaires, celles qui entourent λ 4050, et celles du domaine infrarouge proche. En fait, il existe, parsemées un peu partout dans le spectre, des émissions plus faibles qui n'ont pas encore été interprétées de façon satisfaisante. On en trouve dans l'ultraviolet, entre λ 3600 et λ 3850 ; distribuées au sein des radiations de C_2 ; dans la région jaune-rouge. Certaines de ces émissions non identifiées s'étendent loin dans la tête, mais la plupart sont concentrées au voisinage du noyau.

Le spectre des queues présente des émissions bien caractéristiques qui, dans le domaine du violet au vert sont dues aux ions CO^+ et N_2^+ . Dans l'ultraviolet, outre des bandes de CO^+ et N_2^+ , apparaissent des émissions assez intenses dues à CO ; celles-ci n'ont été découvertes que tout récemment. On n'a guère de bonne observation de la région jaune-rouge et aucune du domaine infrarouge. Il reste quelques radiations faibles, non interprétées, dans la région ultraviolette et violette.

Pour certaines des émissions encore inexpliquées, les observations sont excellentes ; pour d'autres, il vaudrait mieux postposer les discussions d'identification jusqu'à ce que de meilleures observations aient été effectuées. Le groupe de raies près de λ 4050 a été observé dans de très nombreuses comètes ; les longueurs d'onde sont connues avec une

assez bonne précision. On a tenté d'attribuer ce groupe à toutes sortes de composés diatomiques, tels que NaH ou NH^+ , ou à de nouvelles bandes de molécules présentes dans les comètes, telles que CH ou CN. Ces essais infructueux, basés sur des molécules diatomiques, ont donné lieu à de nombreuses publications. Il paraît très probable, à l'heure actuelle, que le groupe λ 4050 soit dû à une molécule polyatomique. Il est logique d'envisager comme possibilités les meilleures, les composés polyatomiques contenant des éléments cosmiquement abondants, à savoir H, C, N, et O. Parmi ceux-ci, on est tenté d'envisager, d'abord les molécules que l'on trouve à l'état occlus dans les météorites (ce sont d'ailleurs les mêmes gaz qui sont présents dans les roches superficielles terrestres). Des expériences de laboratoire et des considérations théoriques avaient amené à penser que le groupe λ 4050 est dû au composé CH_2 . Mais cette possibilité doit, à présent, être abandonnée. Des recherches en cours semblent plutôt indiquer que le groupe λ 4050 est émis par une molécule non encore connue au laboratoire, la molécule triatomique C_3 .

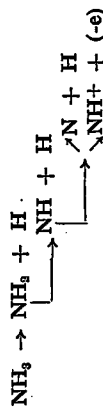
Les émissions observées entre λ 5900 et λ 6600 sont, en partie, présentes dans le chalumeau oxygène-ammoniac, dont le spectre, aux environs de 6300, a été attribué à NH_2 . Les émissions des têtes cométaires dans la région visible paraissent bien être dues, en partie, à NH_2 ; toutefois, certaines raies longues observées dans le visible ne peuvent pas être expliquées de cette façon. Quant aux nombreuses raies faibles inexplicées parsemant la région λ 3600- λ 6000, leur identification sera, sans doute, trouvée au moyen de comparaisons avec les spectres obtenus dans les phénomènes de flammes, combustions ou explosions, ou avec les spectres d'étoiles froides. Il est intéressant de remarquer que de nombreuses flammes ou explosions révèlent des molécules semblables à celles que l'on trouve dans les comètes; il semble bien que certaines bandes observées dans des flammes et non encore attribuées avec certitude à des composés déterminés, soient aussi présentes dans les comètes. Bien entendu, les conditions d'excitation sont si différentes dans les flammes et dans les comètes qu'une identité entre deux émissions n'est pas toujours facile à établir; mais il y a de grands espoirs dans cette voie. Les étoiles froides, aussi bien celles à oxygène (désignées par M ou S) que celles à carbone (désignées par R ou N) constituent aussi des objets de comparaison fructueux pour l'étude des comètes. C'est ainsi que le groupe λ 4050 qui se présente en émission dans les comètes, apparaît en absorption dans certaines étoiles carbonées N. L'étude des étoiles N, jointe à celle des comètes et aux travaux de laboratoire conduira certainement à l'identification prochaine de la molécule responsable du groupe λ 4050. Certaines étoiles N révèlent dans l'ultraviolet aussi bien que dans la région du violet au vert-jaune, des bandes d'absorption non encore expliquées qui semblent correspondre étroitement avec certaines émissions cométaires non identifiées. Les effets isotopiques (présence de l'isotope 13 du carbone, en plus de C_{12}) sont analogues dans les comètes et les étoiles carbonées, quoique plus prononcés dans ces dernières. L'identification des émissions inexplicées des comètes ne peut progresser efficacement que par la combinaison de résultats tirés de travaux physiques et physico-chimiques de

laboratoire et des observations d'objets célestes divers tels que comètes, étoiles froides, planètes et matière interstellaire. En fait, il nous manque encore beaucoup de données spectroscopiques expérimentales. Il semble bien probable que les spectres d'ions tels que NH^+ , CN^+ et C_2^+ , totalement inconnus encore, doivent jouer un rôle dans les comètes. On ne connaît rien, au laboratoire, des molécules doublement ionisées: or il est vraisemblable que CH^{++} , CO^{++} , CO_2^{++} soient présents dans les comètes. La situation n'est guère meilleure en ce qui concerne les composés polyatomiques: nous attendons du spectroscopiste de laboratoire des données sur les spectres de CH_2 , C_2H , C_3 , CH_3 , etc...; des analyses des spectres de NH_2 , SiO_2 , NO_2 , etc...

On remarquera que les combinaisons di- ou triatomiques observées dans les têtes de comètes — OH, NH, CN, CH, NH_2 ,... — ne sont pas ce que les chimistes appelleraient des molécules stables. Ce sont, en effet, des radicaux qui ne sont physiquement stables que par suite des faibles densités régnant dans les atmosphères cométaires. Mais ces radicaux doivent, eux-mêmes, provenir de molécules chimiquement stables, que nous appellerons molécules parentes ou primaires, libérées par les solides constituant les noyaux cométaires. Par exemple, il paraît logique de penser que le radical observé NH_2 résulte de la photodissociation, sous l'action du rayonnement solaire, de molécules primaires NH_3 (ammoniaque) chimiquement stables, libérées par les solides du noyau. Une molécule NH_3 produite à la surface du noyau à un instant déterminé n'a qu'une vie limitée. Après un temps moyen t_0 , elle sera dissociée ou ionisée par rayonnement solaire et fournira, par exemple,



A son tour, le radical NH_2 ne vivra qu'un temps moyen fini t_1 , après quoi il sera soit dissocié, soit ionisé. Des séries de transformations photochimiques telles que



s'établiront, dont la similarité avec les séries de désintégrations radioactives est évidente. S'il paraît probable que les radicaux cométaires NH_2 et NH résultent de la photodissociation du gaz ammoniaque NH_3 et que OH provienne de la molécule d'eau, nous sommes encore ignorants au sujet des molécules parentes des radicaux cométaires CH, CN et C_2 ; naturellement, on pense à CH_4 et C_2N_2 . En tout cas, si l'on veut discuter théoriquement les comportements de diverses molécules en fonction de la distance héliocentrique, ou d'autres paramètres comme la distance périhélique, la période ou l'âge de la comète, il faut étudier les systèmes d'équations différentielles, semblables à ceux qui ont été discutés dans le cas des séries de transmutations, adaptés au cas de la photochimie. C'est ainsi qu'on pourra, par exemple, discuter théoriquement la variation de l'intensité relative des bandes

de CN et de CH en fonction de la distance héliocentrique. En cela, les comètes diffèrent entièrement des atmosphères stellaires où les considérations d'équilibre de dissociation sont, en général, permises. Il n'est pas possible d'appliquer aux comètes les équations habituelles régissant l'ionisation ou la dissociation : de graves erreurs ont été commises en procédant de cette façon. Lorsque plusieurs effets photochimiques peuvent se produire, par exemple une photodissociation et une photoionisation, leur efficacité relative doit être examinée avec soin, compte tenu de la quantité d'énergie solaire disponible dans les diverses régions spectrales. Par exemple, la molécule C_2 peut dissocier par absorption de photons voisins de λ 2000, alors que son ionisation requiert λ 1000. Ainsi donc, la molécule C_2 se brisera beaucoup plus souvent en $C + C$, qu'en C_2^+ + électron. Pour l'examen de ces efficacités relatives, nous avons besoin des chaleurs de dissociation, potentiels d'ionisation et courbes d'énergie potentielle des diverses molécules, tous renseignements pour lesquels l'astronome dépend du physicien ou du physico-chimiste. La comparaison avec les résultats de laboratoire doit, d'ailleurs, se faire avec prudence. La plupart des molécules cométaires se trouvent sur les niveaux de vibration et rotation les plus bas ; elles ne peuvent être dissociées ou ionisées que par absorption de radiation solaire correspondant à ces niveaux. Au contraire, dans certaines expériences de laboratoire, les molécules ont des populations appréciables sur des niveaux de vibration et rotation élevés. En quelque sorte, la dissociation et l'ionisation de la plupart des molécules cométaires sont ralenties par rapport à ce qu'elles sont en laboratoire. On n'en est qu'à la période préliminaire de ces études théoriques ; mais il est certain qu'elles fourniront des renseignements précieux aux physico-chimistes et physiciens autant qu'aux astronomes. Les radicaux ne sont pas faciles à manipuler en laboratoire ; leur étude dans les astres se révélera féconde.

Certains composés trouvés dans les comètes sont les mêmes que ceux qui sont présents dans l'espace interstellaire : c'est le cas de CH, CN et CH^+ . En revanche, les molécules C_2 abondantes dans les comètes, ne sont pas observées dans l'espace interstellaire ; mais cette absence peut s'expliquer théoriquement. Certaines considérations théoriques mentionnées pour les molécules cométaires s'appliquent aux molécules interstellaires. Il est possible que, dans certaines régions de l'espace interstellaire, les molécules soient aussi produites par évaporation à partir des solides ; mais, dans d'autres, il est probable que les molécules résultent de l'association de deux atomes lors de la collision de ceux-ci, avec émission de rayonnement. En tout cas, la comparaison des phénomènes physiques concernant les molécules cométaires et interstellaires est fort instructive. Dans le cas de l'absorption interstellaire aussi, il reste des raies ou bandes non identifiées ; une, au moins, est sûrement due à une molécule, mais les autres sont peut-être produites par des solides à basse température.

Les spectres moléculaires ne fournissent pas seulement des renseignements qualitatifs sur les molécules présentes ; ils pourront aussi nous donner les abondances de ces molécules. Mais le problème des abondances est hérissé de difficultés, tant théoriques que d'observation.

Tout d'abord, on ne connaît guère encore la probabilité d'émission des molécules considérées : c'est là un renseignement important, attendu des spectroscopistes de laboratoire. D'ailleurs, les quantités de radiation solaire des domaines spectraux causant la luminescence, la dissociation et l'ionisation ne sont pas toujours bien connues, surtout dans l'ultra-violet lointain. Une estimation assez grossière conduit à envisager une abondance moyenne de l'ordre de 10^6 molécules de C_2 par centimètre cube dans une tête cométaire, et une abondance de l'ordre de 1 molécule de CO^+ par centimètre cube dans les queues. Passer de telles abondances partielles, qu'on peut estimer à partir des observations, aux abondances totales serait une chose dangereuse, car il se peut qu'il existe de nombreuses molécules n'émettant pas dans le domaine spectral observé jusqu'à présent.

Il est cependant possible de se faire une idée de l'abondance totale maximum, par le procédé indirect suivant. Dans les conditions d'équilibre thermodynamique, les bandes moléculaires permettent de déterminer les températures des molécules. En effet, les molécules présentent des vibrations et rotations d'autant plus prononcées que la température est plus élevée. Le spectre reflète ces vibrations et rotations et permet de déterminer la « température de vibration » et la « température de rotation ». Dans des conditions d'équilibre thermodynamique, les températures de vibration et rotation doivent évidemment être identiques ; elles doivent être les mêmes pour toutes les bandes de toutes les molécules de l'enceinte en équilibre ; elles doivent aussi être égales à la température cinétique, à la température déduite de l'excitation électronique des atomes, bref à la température déterminée par tout autre moyen. On peut tenter de déterminer les températures de vibration et de rotation des molécules cométaires : les résultats sont très disparates. Toutes sortes de valeurs sont trouvées de 50° K à plusieurs milliers de degrés, suivant qu'on fait appel à l'une ou l'autre bande. Ceci revient à dire que la notion de température n'a aucun sens pour les atmosphères cométaires ; que l'équilibre n'est pas assuré ; ou encore que les densités sont trop faibles pour assurer une fréquence suffisante des collisions. On en déduit que la limite supérieure de la densité totale doit être de l'ordre de 10^{10} molécules par centimètre cube. C'est là, en fait, un vide extrêmement poussé.

A une telle densité, les collisions sont rares. Si une molécule devient ionisée par absorption de rayonnement solaire, il n'y a aucune chance que l'ion recapture un électron dans la suite. De même les recombinaisons de deux atomes sont excitées. Ceci met encore l'accent sur le fait qu'on ne peut certes pas utiliser les équations classiques des équilibres de dissociation et d'ionisation. On remarquera aussi que les réactions chimiques ne jouent aucun rôle dans les atmosphères cométaires ; nous sommes en présence de phénomènes photochimiques purs. Du fait des très basses densités, la photochimie dans les comètes est particulièrement pure, puisque les collisions et réactions ne jouent aucun rôle perturbateur. Bien entendu, ces considérations concernent seulement les atmosphères et non les régions au voisinage immédiat des solides du noyau où des collisions et des réactions doivent être présentes. Il doit se produire

à la surface des solides des réactions à basse température auxquelles on n'a pas, jusqu'ici, accordé une attention suffisante.

Au sein des bandes moléculaires d'émission dans les comètes, les distributions sont remarquables. Elles diffèrent complètement de celles qu'on trouve dans les spectres de laboratoire, même à basse température. L'interprétation de ces structures de bandes a suscité bien des discussions. Il y a une dizaine d'années, une interprétation convaincante a été trouvée, dont la vérification dans le détail a été effectuée au cours des dernières années. La complexité de structure des bandes cométaires est due au fait que la lumière solaire qui excite ces bandes par fluorescence est, elle-même, complexe.

Le spectre solaire est, en effet, parsemé de nombreuses raies d'absorption ; lorsqu'une des raies d'absorption coïncide avec une longueur d'onde permettant d'exciter une radiation cométaire, il n'y aura guère d'énergie disponible pour produire cette raie cométaire qui sera absente ou faible. Il est ainsi possible d'expliquer tous les profils observés dans les bandes moléculaires si l'on tient compte du déplacement dopplérien du spectre solaire dû à la vitesse radiale relative du soleil et de la comète. Le phénomène de fluorescence observé dans les comètes est semblable aux phénomènes étudiés dans le laboratoire, avec la différence que les conditions sont plus simples dans les comètes, du fait de l'absence de collision, c'est-à-dire de cause perturbatrice. D'autres astres (nébuleuses, étoiles chaudes, étoiles variables à longue période, haute atmosphère terrestre, etc...) manifestent aussi des effets de fluorescence qui, comme ceux des comètes, sont élémentaires comparés aux phénomènes de laboratoire.

Les considérations qui précèdent montrent bien la prudence avec laquelle on doit procéder aux identifications dans les comètes : des coïncidences de longueurs d'onde ne peuvent être qu'un premier indice en faveur d'une identification. En particulier, une identification complète requiert la préparation de « profils synthétiques » tenant compte du mécanisme d'excitation (fluorescence avec effet de vitesse radiale), de la température de rotation, de la largeur instrumentale des raies : le spectre d'une molécule dans une comète peut être très différent du spectre en laboratoire. En outre, les caractéristiques physiques de la molécule envisagée doivent être examinées avec soin. Prenons comme exemple, le cas de la molécule O_2 d'oxygène. Lorsque les premiers spectres ultraviolets des queues des comètes furent obtenus, des émissions intenses ne purent être expliquées immédiatement. Celles-ci coïncidaient étrangement avec plusieurs bandes d'un système de O_2 appelé système de Schuman-Runge. Malgré les coïncidences frappantes, l'attribution des émissions à O_2 parut immédiatement douteuse.

En effet, la molécule O_2 est aisément dissociée, comme le prouvent les phénomènes ionosphériques : on ne devrait donc pas s'attendre à trouver une émission de O_2 dans la queue, à de grandes distances du noyau. D'ailleurs, la pression de radiation semblait insuffisante pour expulser O_2 à de grandes distances du noyau. Enfin, les intensités relatives au sein des bandes auraient été anormales. En fait, il fut trouvé, plus tard, que ces nouvelles émissions cométaires ultraviolettes

étaient dues à l'ion triatomique CO_2^+ : dans ce cas, aucune objection du genre de celles soulevées dans le cas de O_2 n'était valable.

L'atmosphère d'une comète est un phénomène temporaire. Elle doit être continuellement régénérée par libération de gaz du noyau. Si cette libération cessait, la tête disparaîtrait après quelques heures, la queue quelques jours. Dans le champ de rayonnement solaire, chaque molécule observée a une vie limitée, déterminée par les possibilités de photodissociation de cette molécule et par l'intensité du rayonnement solaire. La vie moyenne est d'autant plus courte que la comète est plus proche du soleil. Du fait de la réduction de la vie des molécules proportionnellement au carré de la distance héliocentrique, la tête des comètes devient plus petite (mais plus brillante) au voisinage du soleil. Dans le cas de la comète 1948 I, des mesures soigneuses de l'extension du groupe $\lambda 4050$ dans la tête montrent que, de 0,9 à 2,2 unités astronomiques, l'extension varie de 4.100 kilomètres à 22.000 kilomètres, soit un rapport de 5,3, alors que le carré des distances héliocentriques varie d'un facteur 6.

Quelle est la signification physique de l'extension des molécules au sein de la tête et de la queue ? Supposons que les molécules soient produites dans un noyau ponctuel. L'extension d'une espèce déterminée de molécules sera le produit de leur vitesse moyenne par leur vie moyenne. Nous négligerons, ici, toute vitesse acquise par effet électromagnétique, quoique cette question, jusqu'ici peu étudiée, mérite une investigation soignée. La vitesse moyenne sera la somme de cinq composantes : vitesse thermique (v_t), vitesse produite lors de la photodissociation d'une molécule parente (v_a), vitesse acquise lors d'une photo-ionisation (v_i), vitesse due à la pression de radiation (v_r), vitesse causée par un phénomène explosif (v_e). La vitesse thermique v_t correspondant à la température de la surface du noyau est extrêmement faible. La vitesse v_a est due au fait que l'énergie solaire absorbée par la molécule parente est supérieure à son énergie de dissociation, le reliquat étant converti en énergie cinétique et en énergie d'excitation des molécules formées. Des expériences de laboratoire ont montré que les vitesses ainsi obtenues sont de l'ordre de 1 ou 2 Km/sec, en accord avec les observations cométaires. La composante v_a n'existe évidemment que pour les molécules résultant d'une photodissociation de molécule parente comme CN, CH, OH, etc... Elle doit être nulle pour des ions tels que CO^+ , N_2^+ , CO_2^+ si ceux-ci, comme les observations l'indiquent, sont dus à l'ionisation directe des molécules chimiquement stables CO, N_2 , et CO_2 . Dans le cas de ces trois ions caractéristiques des queues, nous devons, en principe, considérer la composante v_i due à la photo-ionisation ; mais v_i est certainement très faible, le reliquat d'énergie étant accaparé par l'électron. Au voisinage immédiat du noyau, les ions CO^+ , N_2^+ , et CO_2^+ ont de faibles vitesses d'expansion. Ils sont, toutefois, fortement accélérés par pression de radiation, atteignant des vitesses appréciables et sont présents à grande distance du noyau, dans la direction opposée au soleil. L'effet de la pression de radiation dépend de la quantité de rayonnement solaire disponible dans le domaine spectral absorbable par la molécule, ainsi que de la

probabilité de cette absorption. Dans le cas de CO^+ , N_2^+ et CO_2^+ , l'accélération due à la pression de radiation est, de beaucoup, supérieure à l'accélération de gravité correspondant à l'attraction solaire : la pression de radiation peut donc fournir de grandes vitesses aux ions CO^+ , N_2^+ et CO_2^+ . Au contraire, pour CN ou C_2 , les accélérations de radiation et de gravité sont, à peu près, égales et les molécules CN et C_2 se distribuent à peu près symétriquement autour du noyau. Quant à la composante v_e résultant d'une expulsion violente, on ne peut pas en dire grand chose à l'heure actuelle ; elle ne s'appliquerait d'ailleurs pas au cas général.

La durée de vie d'une espèce déterminée de molécules dans le champ de rayonnement solaire dépend de la quantité de radiation solaire dans les domaines spectraux où se produisent la photodissociation et la photo-ionisation des molécules envisagées, ainsi que de leurs probabilités de photodissociation et photo-ionisation. La durée moyenne de vie du radical CN est certainement beaucoup inférieure à celle de la molécule ionisée CO^+ . En fait, les molécules des queues peuvent être qualifiées de phcforésistantes.

Les molécules gazeuses parentes proviennent du noyau composé de solides. Ceux-ci ne sont pas tout petits : des comètes sont passées très près du soleil sans être complètement vaporisées. De petits solides doivent se mettre presque instantanément en équilibre thermique, leur énergie rayonnée étant égale à l'énergie solaire absorbée. Leur température T , exprimée en degrés Kelvin, est $T = 289/\sqrt{r}$ (r = distance héliocentrique). Mais les gros solides ne suivent certainement pas cette loi. Leur échauffement n'est que progressif. En fait, l'étude de cet échauffement en surface et en profondeur, compte tenu de la conductibilité thermique, constitue un problème mathématique fort compliqué. On imagine facilement que des solides de dimensions ou constitutions différentes s'échauffent différemment ; qu'il puisse se présenter des différences avant et après passage au périhélie, par suite des temps de relaxation ; que des mouvements des solides relatifs au soleil et relatifs l'un à l'autre au sein du noyau soient associés à des effets thermiques. Quel que soit le mécanisme physique de production des gaz, il est certain que cette production est définie, en majeure partie, par les effets thermiques et occasionnellement par des phénomènes mécaniques brutaux tels que des effondrements, produits par l'échauffement.

A grande distance du soleil, les solides sont certainement à température extrêmement basse et les gaz sont congelés. Au fur et à mesure que la comète se rapproche, l'évaporation des glaces d'ammoniaque, eau, CO_2 , etc. — auxquelles sont mêlés des poussières ou métaux — produit les molécules parentes. Il n'est pas étonnant que les molécules primaires soient produites à des rythmes très différents au fur et à mesure que la distance héliocentrique diminue. Peut-être peut-on expliquer ainsi l'apparition tardive du CO^+ et des queues ? La question de OH reste fort obscure. Les bandes de OH sont encore présentes à plus de 1,5 unités astronomiques du soleil ; or, la glace de H_2O a une très faible pression de vapeur à basse température. Mais, peut-être, le radical OH provient-il d'une molécule autre que H_2O ? On remarquera

que, pour l'explication des phénomènes cométaires, nous devons recourir aux recherches physiques et chimiques aux basses températures.

Je voudrais soulever le dernier point suivant. Il y a soixante-dix ans, deux astronomes, Lohse et Copeland, ont annoncé qu'ils avaient observé visuellement des raies brillantes du fer et du nickel dans une comète au voisinage du soleil. Cette observation a souvent été mise en doute, malgré la bonne réputation de Lohse et Copeland. Une objection est que les intensités relatives des raies de Fe et Ni mentionnées par Lohse et Copeland diffèrent fortement des valeurs de laboratoire. Cette critique n'est peut-être pas fondée. Les atomes de Fe et Ni devaient se trouver à une température peu élevée (inférieure à 1000 dK) et n'absorber le rayonnement solaire qu'à partir de niveaux électroniques assez bas. D'ailleurs, le rayonnement excitateur contient de nombreuses raies d'absorption, en particulier celles de Fe et Ni. Il se peut fort bien que des raies faibles en laboratoire soient intensifiées par rapport aux raies fortes et que les raies de Fraunhofer aient produit des anomalies au sein des multiplets. Une étude non encore complétée semble indiquer que les identifications de Lohse et Copeland sont, en fait, raisonnables.

Le temps me manque pour discuter l'importance de ces considérations pour l'évolution du système solaire. J'espère avoir montré que l'étude des comètes ne peut se poursuivre efficacement que moyennant une coopération intime avec la physique et la physico-chimie ; qu'elle a des contacts étroits avec des problèmes très divers comme les propriétés des gaz solidifiés, les phénomènes de fluorescence, la combustion et les flammes, les séries de désintégrations radioactives, etc...

Notre connaissance physique des comètes, malgré les progrès réalisés au cours des dernières années, en est encore à ses débuts. Il nous manque encore de nombreuses observations, de multiples travaux expérimentaux et des recherches théoriques. Parmi les nombreux problèmes passionnants de l'Astrophysique, l'étude physique des comètes occupe une place de choix.