

# ANATOMIE SPECTRALE

## D'UNE COMETE

M.Nicolet

Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique, Uccle

Conférence du 7/11/85

### LE DOMAINE DU VISIBLE

L'étude physique des comètes a débuté dès que l'on a pu s'attacher à l'analyse spectrale de ce que l'oeil détecte généralement : une chevelure masquant un noyau central et pouvant être suivie de l'apparition d'une queue.

Ce fut un Florentin, Donati qui, en 1864, fut le premier observateur d'un spectre cométaire. Ce spectre détecté visuellement se présentait sous forme de trois bandes que Huggins (1881), grâce à des observations photographiques, mit en correspondance avec une émission de carbone analogue à celle d'une décharge dans un gaz tel que l'éthylène ( $C_2H_2$ ). L'analyse expérimentale subséquente permit, en fin de compte, l'identification de ces bandes dominant l'émission cométaire dans le visible vers 516 nm, au système de Swan de la molécule diatomique  $C_2$ . Alors que Janssens photographiait la queue de la grande comète de 1881, Huggins observait spectrographiquement, outre l'émission de la molécule  $C_2$ , celle des raies jaunes D du sodium à 589 nm lors de son approche du soleil alors qu'il

décelait, parmi d'autres bandes non identifiées à l'époque, une composante de lumière solaire réfléchiée résultant, comme on le sait aujourd'hui, d'une réflexion par des particules solides. Du côté des courtes longueurs d'onde du spectre obtenu par Huggins, les bandes violettes (388 nm) furent associées au spectre de laboratoire résultant de l'excitation (et de la dissociation) du cyanogène  $C_2N_2$ , c'est-à-dire en fait du radical CN.

Il semble bien que Copeland ait détecté au spectroscopie (Copeland et Lohse, 1882), l'émission spectrale propre à des atomes tels que le fer et le nickel lors de l'approche à environ un million de kilomètres du soleil de la Grande Comète de 1881. (Comète Teblutt). Mais, aujourd'hui, on se réfère surtout aux études datant seulement de quelque vingt ans effectuées par Preston (1967) et Slaughter (1969) de la Comète Ikeya-Seki 1965 f lors de son passage au périhélie à moins de 0,2 unités astronomiques (30 millions de kilomètres) du soleil. Cette faible distance héliocentrique a permis une émission généralisée de radiations monochromatiques d'éléments métalliques dans le domaine observable allant de 300 nm à 800 nm, car lorsque les températures de radiation sont supérieures à 1000 K, les atomes sont susceptibles d'être vaporisés à partir des grains de poussière. Ce sont, en particulier, les raies du sodium (NaI) à 589 et 330 nm, du calcium ionisé (CaII) à 393 nm, du chrome (CrI) à 358 nm, du manganèse (MnI) à 403 nm, du fer (FeI) à différentes longueurs d'onde de 344, 357, 358, 372, 375, 381, 382, 386 à 405 nm, du nickel (NiI) de 388, 345, 346, 352, 357 à 362 nm et du cuivre (CuI) à 325 nm.

C'est au début de ce siècle lors de l'observation de la Comète Daniel (1907) et de la Comète Morehouse (1909) que le spectre d'une queue cométaire révéla la présence (Fowler, 1910; Baldet, 1911) de molécules ionisées, le monoxyde d'azote ( $CO^+$ ) à 427 nm et l'azote ( $N_2^+$ ) à 391 nm.

Les observations de Huggins (1881) avaient déjà indiqué la présence d'émissions caractéristiques vers 430 nm et 400 nm. L'identification ne fut définitive que par l'étude de la structure de rotation de la molécule CH (Nicolet, 1938) à 431,5 nm et de la molécule  $C_3$  (Douglas, 1951) à 404 nm.

## VERS L'ULTRAVIOLET

Lorsque le miroir du télescope fut soumis à l'aluminisage, il permit l'observation spectrale jusqu'à 300 nm. De là, la découverte dans le spectre de la Comète Cunningham (1940) des émissions (Swings, Elvey et Babcock, 1941) des molécules NH et OH respectivement à 336 nm et 309 nm.

Un nouveau bond dans l'observation spectrale des comètes fut accompli après 1970 grâce à l'utilisation des techniques spatiales permettant de détecter le spectre au-dessous de 300 nm, en particulier de la région s'étalant de 300 nm à 100 nm. Les deux comètes brillantes Tago-Sata-Kosaka (1969) et Bennett (1970) furent l'occasion d'observations spectrales nouvelles de première importance. Ainsi, la détection (Code, Houck et Lillie, 1972) de la radiation Lyman-alpha de l'hydrogène (HI) à 121,6 nm indiquait que l'hydrogène était un important constituant des atmosphères cométaires (Bertaux et Blamont, 1970). De là, une enveloppe d'atomes d'hydrogène émettant à 121,6 nm pouvait s'étendre à plusieurs dizaines de millions de kilomètres et ainsi couvrir un domaine équivalent à celui de l'ensemble des chevelures et des queues associées observé dans le visible. Au delà de la raie de résonance Lyman-alpha de l'hydrogène, l'analyse spectrale de la Comète Kohoutek (1973) permit (Feldman, Tabacs, Fastie et Donn, 1974) de reconnaître la présence d'oxygène atomique neutre (OI) à 130,4 nm, celle du carbone atomique neutre (CI) à 156,1 et 165,7 nm et, dans le cas de la Comète West (1975), la présence, entre autres choses, (Feldman et Brune, 1976) du carbone ionisé (C II) à 133,5 nm. Enfin, le soufre atomique neutre (SI) fut détecté, également dans le spectre de la Comète West (1975) par la raie apparaissant à 181,4 nm (Smith, Stecher et Caswell, 1980). D'ailleurs, la détection simultanée des bandes de CO à 151 nm, de CS à 257,6 nm et de CN<sup>+</sup> à 218,1 nm permit d'ajouter ces trois constituants neutres ou ionisés à la liste des molécules dont le spectre était déjà connu dans le visible et le proche ultraviolet.

## PRINCIPAUX ÉLÉMENTS DU SPECTRE COMÉTAIRE

Comme il n'est pas possible de détailler ici toute l'anatomie spectrale d'une comète, un tableau regroupe en fonction de la longueur d'onde, les principales radiations observées, à l'exception des raies métalliques citées plus haut dans le texte.

On peut constater qu'une série de molécules ionisées dont nous n'avons pas signalé la présence doit être rappelée à l'attention. Il s'agit des molécules ionisées de la vapeur d'eau ( $\text{H}_2\text{O}^+$ ) observée vers 620 nm (Herzberg et Lew, 1974), du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2^+$ ) observé vers 350 nm (Swings et Page, 1950), du radical CH ( $\text{CH}^+$ ) vers 422,5 nm (Swings, 1941) et du radical  $[\text{OH}](\text{OH}^+)$  vers 366,5 nm (Swings et Page, 1950). On notera également dans ce tableau la présence de transitions interdites de l'oxygène neutre atomique OI à 630, 557,7 et 297 nm et du carbone neutre atomique  $[\text{C I}]$  à 193 nm.

Enfin, on retiendra encore la présence dans le spectre cométaire de la molécule triatomique  $\text{NH}_2$  se manifestant vers 570 nm. (Swings, McKellar et Minkowski, 1943) de même que celles très probables résultant de l'observation radio de l'acétonitrile méthyle ( $\text{CH}_3\text{CN}$ ) vers 6 nm (Ulich et Conklin, 1975) et de l'acide cyanhydrique (HCN) vers 3,3 nm (Huebner, Snyder et Buhl, 1974).

## PROCESSUS AERONOMIQUES

L'anatomie spectrale révèle donc la présence de molécules polyatomiques telles que  $\text{CH}_3\text{CN}$ , HCN,  $\text{H}_2\text{O}$ , ... de radicaux comme OH,  $\text{C}_2$ , CN,  $\text{C}_3$ , CH, NH, et  $\text{NH}_2$ , dans la chevelure d'une comète, d'ions tels que  $\text{CH}^+$ ,  $\text{CN}^+$ , et en particulier  $\text{N}_2^+$ ,  $\text{CO}^+$ ,  $\text{CO}_2^+$  et  $\text{H}_2\text{O}^+$  dans les queues cométaires, de transitions interdites de l'oxygène et du carbone atomiques, sans oublier les raies des éléments métalliques (Fe, Ni, Cr, etc) pour une comète approchant le soleil (0,1 unité astronomique).

## Radiations observées dans les spectres cométaires

Longueur d'onde (nm)	Atome Molécule	Désignation	Constituant
121,6	HI	Lyman-alpha	Hydrogène atomique neutre
130,4	OI	Multiplet fondamental	Oxygène atomique neutre
133,5	CII	Multiplet fondamental	Carbone atomique neutre
151	CO	4e système positif	Monoxyde de carbone neutre
156 166	CI CI	Multiplet fondamental	Carbone atomique neutre
182	SI	Multiplet fondamental	Soufre atomique neutre
218	CN <sup>+</sup>	2e système de résonance	Radical CN ionisé
219	CO <sup>+</sup>	Premier système négatif	Monoxyde de carbone neutre
231	C <sub>2</sub>	Bandes de Mulliken	Molécule de carbone neutre
258	CS	Bandes fondamentales	Sulfite de soufre
289	CO <sub>2</sub> <sup>+</sup>	Bandes ultraviolettes	Dioxyde de carbone
297,2	[OI]	Raie ultraviolette	Oxygène atomique neutre
309	OH	Bande fondamentale	Hydrogène neutre
318	CN <sup>+</sup>	Premier système de résonance	Radical CN ionisé
336	NH	Système fondamental	Radical NH neutre
351	CO <sub>2</sub> <sup>+</sup>	Système fondamental	Dioxyde de carbone ionisé
357	OH <sup>+</sup>	Système fondamental	Radical OH ionisé
389	CN	Système UV fondamental	Radical CN neutre
391,5	N <sub>2</sub> <sup>+</sup>	Système fondamental	Molécule d'azote ionisée
395	CO <sup>+</sup>	Système fluorescence	Monoxyde de carbone ionisé
404	C <sub>3</sub>	Système fondamental	Carbone triatomique neutre

422	CH <sup>+</sup>	Système fondamental	Radical CH <sup>+</sup> ionisé
427	CO <sup>+</sup>	Système principal	Monoxyde de carbone ionisé
431,5	CH	Système principal	Radical CH neutre
516	C <sub>2</sub>	Bandes de Swan	Molécule C <sub>2</sub> neutre
557,7	[OI]	Raie verte	Atome d'oxygène neutre
620	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	Système principal	Vapeur d'eau ionisée
630	[OI]	Raie rouge	Atome d'oxygène neutre
656,3	HI	Raie H-alpha	Hydrogène neutre
785	CN	Système infrarouge	Radical CN neutre
110,7 GHz	CH <sub>3</sub> CN	Radio observation	Acétonitrile
88,6 GHz	HCN	Radio observation	Acide cyanhydrique

En vue d'une interprétation globale des divers processus aéronomiques intervenant dans une atmosphère cométaire, il est requis d'interpréter son anatomie spectrale en considérant l'ensemble des éléments qui constituent la structure générale d'une comète.

Le point de départ doit être, en tout cas, l'existence d'un noyau solide en rotation, à peu près sphérique de quelques kilomètres de diamètre (5 à 15 km). Celui-ci est constitué d'un conglomérat glacé appelé souvent "boule de neige sale" (Wipple, 1950). Au fur et à mesure que le noyau s'approche du soleil, la sublimation se manifeste. De là les divers gaz et poussières couvrent une région de plus en plus étendue de l'ordre de 10 000 à 100 000 kilomètres formant ainsi la tête (coma) de la comète alors que peut apparaître dans la direction antisolaire, une queue de plusieurs dizaines de millions de kilomètres constituée généralement de deux composantes; l'une caractérisée par la poussière, l'autre constituée par le gaz ionisé. Néanmoins, la persistance des gaz après le passage au périhélie exige que les divers produits volatiles puissent subsister. De là, l'idée essentielle (Delsemme et Swings, 1952) que la sublimation générale est pratiquement celle résultant de la glace d'eau. Ainsi, les substances qui se trouvent dans le noyau, doivent être sous forme d'hydrates (ou clathrate,

par exemple  $\text{CH}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) contrôlant la vaporisation générale. A la distance d'une unité astronomique, une telle vaporisation correspondrait à quelque 30 tonnes par seconde, ce qui correspond à un total de l'ordre de  $10^{30}$  molécules par seconde.

Il apparaît donc que la tête d'une comète doit d'abord être constituée d'une zone restreinte (de 1000 à 10 000 kilomètres suivant diverses estimations) entourant le noyau où les collisions entre atomes et molécules définissent encore les propriétés du gaz comme dans l'atmosphère terrestre. De là, la radiation solaire donne lieu aux divers processus aéronomiques subséquents à la photodissociation et à la photoionisation comme des réactions chimiques et ioniques. Au-delà d'une distance critique, les processus radiatifs doivent dominer et donner lieu, par exemple, à la photodissociation des constituants primaires et secondaires où les produits (radicaux et atomes) possèdent des énergies cinétiques liées à la longueur d'onde photolytique de la radiation ultraviolette solaire. Cette région diffère toutefois de l'exosphère terrestre, car le champ de la pesanteur n'intervient pas. Dans le cas de la photoionisation, il faut introduire l'action simultanée du vent solaire se manifestant avec ses photons à grande vitesse (plusieurs centaines de kilomètres par seconde) qui interagissent par des échanges de charge avec des éléments neutres et dirigent les éléments ionisés dans une direction antisolaire. Certains rapprochements peuvent donc être faits avec les conditions que l'on retrouve dans l'étude de la queue magnétique de la terre.

C'est dans un tel contexte qu'il faut s'attaquer au problème de l'interprétation de l'ensemble des émissions spectrales cométaires.

Depuis que le mécanisme des émissions cométaires a été attribué (Zanstra, 1928) à la fluorescence des gaz sous l'effet de la radiation solaire, c'est-à-dire à un processus par lequel une molécule (ou un atome) absorbant un photon solaire à une certaine longueur d'onde peut réémettre ce photon isotropiquement dans l'espace à la même longueur d'onde (résonance) ou à une longueur d'onde différente (fluorescence), les déductions de l'analyse spectrale ont été poussées dans leurs conséquences jusqu'à l'extrême limite de leurs possibilités. Tout d'abord, le mécanisme d'excitation par absorption

de radiations monochromatiques solaires dépend de la structure fine du spectre de Fraunhofer (Swings, 1941) qui détermine ainsi la distribution au sein d'une bande moléculaire de l'intensité des diverses rotations. De plus, la vitesse radiale de la comète par rapport au soleil modifiant les correspondances spectrales provoque des changements dans la distribution des raies de rotation au sein d'une bande. Au surplus, comme la vitesse radiale est un paramètre variable, elle doit être considérée avec attention, en particulier lorsque la résolution spectrale étant bien définie, permet une analyse détaillée de chaque raie de rotation.

Enfin, il faut tenir compte de la variation de la distance de la comète au soleil, car le carré de la distance détermine, dans des conditions spectrales identiques, le nombre de processus d'absorption par unité de temps lié à chaque atome ou à chaque molécule en fonction de leurs propres paramètres spectroscopiques (probabilités des transitions d'absorption et d'émission, durées de vie,...)

Donc, les conditions aéronomiques d'une comète exigent en vue de leur interprétation, une connaissance détaillée de tous les aspects de la photochimie. L'irradiance solaire doit être connue avec une haute précision, ce qui n'est pas encore le cas surtout si l'on doit utiliser la structure spectrale de l'irradiance pour l'étude des problèmes de fluorescence dans l'ultraviolet. En outre, la dépendance en fonction de la longueur d'onde des différents mécanismes photochimiques primaires devrait être connue avec beaucoup plus de précision. En effet, il se pose encore des questions liées à la nature exacte et des proportions relatives des molécules-mères qui donnent lieu par voie directe ou indirecte aux éléments observés par leur spectre. Ainsi, le spectre visible où apparaissent simultanément les émissions de  $C_2$ ,  $C_3$ , CH et CN se caractérise par des bandes d'aspects différents. Alors se manifestent par une distribution de raies de rotation imitant quasi une distribution boltzmannienne équivalente à 3000 - 3500°K, les raies des bandes de CN ont une tendance à se distribuer suivant une température qui serait au voisinage de 300 K et la molécule CH est caractérisée par la présence de quelques raies de rotation individuelles. Le radical  $C_2$  est une molécule diatomique homonucléaire et ne peut émettre



dans l'infrarouge par passage entre deux états de rotation. Il en résulte que les états de rotation de l'état électronique fondamental sont peuplés par pompage radiatif après chaque processus d'absorption de la radiation solaire. En d'autres termes, lors de son processus de fluorescence, après une émission dans le visible s'effectuant par le passage d'un état déterminé de rotation de l'état électronique supérieur vers un état (différent de celui de départ) de rotation de l'état électronique normal, la molécule  $C_2$  ne peut émettre dans l'infrarouge en vue de retrouver son état de rotation de départ. Dans le cas de la molécule CN, il semble que la durée de vie sur un état de rotation de l'état électronique fondamental serait de l'ordre de quelque centmillième de seconde. En conséquence, si le mécanisme d'absorption de la radiation solaire par le radical CN requiert plus de  $10^{-5}$  secondes, il n'y aura pas de phénomène de pompage radiatif. Dans le cas du radical CH, on sait que, les conditions spectroscopiques des hydrures s'appliquant, la durée de vie sur un état de rotation est très courte.

S'il n'est pas possible de passer en revue, au cours de cette conférence, l'ensemble des processus aéronomiques jouant un rôle au sein d'une multi-atmosphère cométaire, il est peut-être utile de rappeler brièvement quels sont les types de processus qui peuvent être envisagés a priori. Tout d'abord, la photodissociation d'une molécule XY en ses produits X + Y est un processus où X ou (et) Y peuvent être non seulement dans des états excités, mais acquièrent, en fonction de la longueur d'onde, un excès d'énergie qui est distribuée parmi les divers degrés de liberté des produits. De là, des énergies cinétiques spécifiques à chaque longueur d'onde agissant dans le cadre de la photodissociation et des vitesses caractéristiques dans la tête cométaire des radicaux et des atomes provenant d'une certaine molécule-mère.

La photoionisation,  $XY + \text{radiation ultraviolette de courte longueur d'onde}$ , donne lieu à un ion moléculaire  $XY^+ + e$  ou à un ion atomique  $X + Y^+ + e$  peut amener dans les régions les plus proches du noyau à un transfert de charge  $XY^+ + VZ \rightarrow VZ^+ + XY$  ou à un interchangeement d'ions

$XY^+ + VZ \rightarrow VX + ZY^+$ . Une molécule  $XY^+$  peut être également dissociée par le processus dit de recombinaison dissociative  $XY^+ + e \rightarrow X^* + Y^*$  où les atomes  $X^*$  et  $Y^*$  peuvent être dans un état excité généralement métastable comme  $O(^1D)$  émettant à 630 nm. Au voisinage du noyau, il est même possible d'envisager pour l'un ou l'autre constituant des réactions chimiques rapides du type  $X + YZ \rightarrow YX + Z$ . Un processus enfin dont il faut tenir compte est celui qui est lié à l'action (transfert de charge) des photons solaires  $H^+$  sur les produits moléculaires ou atomiques neutres de la tête cométaire. Un tel processus est toujours à mettre en parallèle avec les processus de photodissociation et de photoionisation qui sont différents suivant la nature des molécules-mères. En conséquence, la composition chimique des comètes est reflétée dans le comportement dynamique d'une comète. Mais il faut insister sur le fait que trop de paramètres sont loin d'être connus avec certitude. De nombreux travaux de laboratoire sont requis en vue d'arriver à une estimation précise des probabilités de dissociation et d'ionisation par la radiation ultraviolette solaire ou par la collision avec des particules constituant le vent solaire.

Il n'est pas possible au cours de cet exposé d'entrer dans les détails mais en terminant nous voudrions souligner quelques aspects des principaux processus aéronomiques en considérant les mécanismes liés à la présence d'une molécule-mère telle que la vapeur d'eau.

Tout d'abord, sous l'effet de la radiation ultraviolette solaire, l'eau vaporisée provenant du noyau peut être photodissociée ou photoionisée sous diverses formes en fonction du domaine de longueurs d'onde intervenant dans l'un ou l'autre processus. Les mécanismes qui peuvent apparaître dans le processus de photodissociation sont les suivants : à partir de 256 nm,  $H_2O \rightarrow H_2 + O(^3P)$ ,

c'est-à-dire une molécule d'hydrogène et un atome d'oxygène à l'état normal;

de 242 nm,  $H_2O \rightarrow OH + H$ ,

un radical OH et un atome H, à l'état normal;

de 176 nm,  $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}(^1\text{D})$ ,

une molécule d'hydrogène et un atome d'oxygène dans le premier état métastable;

de 136 nm,  $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH}(^3\Sigma) + \text{H}$ ,

un radical OH excité et un atome d'hydrogène à l'état normal;

de 130 nm,  $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O} + \text{H} + \text{H}$ ,

deux atomes d'hydrogène et un atome d'oxygène

ou  $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}(^1\text{S})$

une molécule d'hydrogène et un atome d'oxygène dans le second état métastable

La photoionisation peut apparaître à des longueurs d'onde inférieures à 100 nm, c'est-à-dire :

à partir de 98 nm,  $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{e}$

et de 69 nm,  $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH}^+ + \text{H} + \text{e}$

Il n'est pas possible actuellement de déterminer avec une précision suffisante quelles sont les probabilités relatives des divers mécanismes dans chaque domaine de longueur d'onde, sauf dans un cas, celui du domaine de la radiation solaire Lyman-alpha de l'hydrogène à 121,6 nm. Les résultats expérimentaux indiquent que les pourcentages respectifs suivants peuvent être adoptés (Nicolet, 1984) :

$\text{OH}(^3\Pi) + \text{H}$ , 70%

$\text{OH}(^3\Sigma) + \text{H}$ , 8%

$\text{H} + \text{O}(^1\text{D})$ , 10%

et  $\text{O} + \text{H} + \text{H}$ , 12%

Comme Lyman-alpha est une émission solaire intense dont l'irradiance varie d'environ  $2,5$  à  $5 \times 10^{11}$  photons  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  à la distance d'une unité astronomique pour les diverses conditions d'activité solaire,

elle joue un rôle essentiel dans la photodissociation de  $H_2O$  avec la proportion des produits que nous venons d'indiquer. En même temps, l'apport à la photodissociation de la région spectrale 200 - 175 nm qui donne lieu essentiellement à  $OH + H$  n'est pas négligeable. En tous cas, la durée de vie de la molécule  $H_2O$  avant photodissociation, dans le champ de la radiation solaire, à la distance héliocentrique d'une unité astronomique, est de l'ordre de 1 à 2 jours en fonction des conditions de l'activité solaire. Le radical  $OH$  a également une durée de vie relativement courte dans le champ de radiation du soleil du même ordre de grandeur que celle de  $H_2O$ . En effet, le radical  $OH$  absorbe fortement vers 150 nm et à Lyman-alpha. Les différents processus donnent lieu à des atomes d'oxygène à l'état normal  $O(^3P)$  et dans les états métastables  $O(^1D)$  et  $O(^1S)$  alors que les atomes d'hydrogène acquièrent des vitesses respectives  $v_H = 8,26$  et 17 kilomètres par seconde. En simplifiant, on peut dire qu'on obtient :

à 150 nm,  $O(^3P) + H$ , avec  $v_H = 8$  km/s

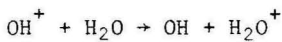
à Lyman-alpha  $O(^1D) + H$ , avec  $v_H = 26$  km/s  
et environ dix fois moins,

$O(^1D) + H$ , avec  $v_H = 17$  km/s

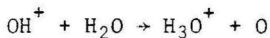
On peut rappeler ici que l'atome  $O(^1D)$  donne lieu à la transition interdite  $^1D - ^3P$  correspondant à une émission à 630 nm dans le rouge et l'atome  $O(^1S)$  à  $^1S - ^1D$  correspondant à 557 nm dans le vert et également à  $^1S - ^3P$  dans l'ultraviolet à 297 nm.

L'atome d'hydrogène, étant également soumis au champ de radiation solaire est photoionisé à des longueurs d'onde inférieures à 91 nm dans un laps de temps de l'ordre de 6 mois à une unité astronomique. Dans le cas du transfert de charge avec un proton solaire,  $H + H^+ \rightarrow H^+ + H$ , l'ionisation est plus rapide, moins d'un mois, dès que la concentration des protons solaires dépasse 1 électron par  $cm^3$ . La recombinaison de l'ion d'hydrogène,  $H^+ + e \rightarrow H$  + ultraviolet, est beaucoup

moins rapide et ne peut être qu'un processus secondaire dans l'ensemble des réactions aéronomiques. Par exemple, le transfert de charge  $H^+ + H_2O \rightarrow H + H_2O^+$  peut apparaître en moins de 10 jours si la concentration dans une certaine région de la tête de la comète des molécules de vapeur d'eau est de quelque 100 molécules par  $cm^{-3}$ . La photoionisation directe de  $H_2O$  requiert environ un mois à une unité astronomique et celle conduisant à  $OH^+$  environ dix fois plus de temps. L'ion  $OH^+$  peut réagir avec la vapeur d'eau et donner lieu soit à un transfert de charge :

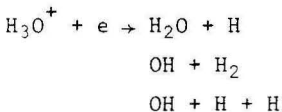
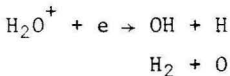
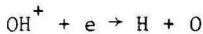


ou à la formation d'un ion triatomique (Aikin, 1974)



qui vient d'être détecté récemment (1985).

Ces différents ions  $OH^+$ ,  $H O^+$  et  $H O^+$  peuvent disparaître par recombinaison dissociative :



Une concentration électronique au-delà de 20 électrons par  $cm^3$  n'accorde à ces ions qu'une durée de vie inférieure à un jour.

Ces quelques exemples liés au comportement cométaire de  $H_2O$  dont la concentration au voisinage du noyau peut atteindre  $10^{10}$  molécules par  $cm^3$  montrent qu'un réseau complexe de processus aéronomiques interviennent

et que celui-ci se modifie profondément lorsqu'on passe de la région proche du noyau à l'extrémité de la chevelure de la comète.

En fin de compte, s'il apparaît que l'anatomie spectrale d'une comète conduit à la détermination de la nature des produits résultants de l'évaporation de son noyau et permet ainsi de déduire un ensemble de propriétés générales définissant l'évolution d'une atmosphère cométaire, elle souligne néanmoins les limites des connaissances actuelles et, de là, la nécessité d'un examen plus approfondi des propriétés spectrales. Un tel examen est lié à des progrès qui doivent être accomplis à la fois dans le cadre d'observations plus quantitatives dépendant d'une calibration absolue et dans le domaine expérimental ou théorique une meilleure connaissance photochimique des principales molécules cométaires. C'est, en tout cas, ce que requiert l'aéronomie quantitative d'une atmosphère cométaire.

Une information de base et des références générales et détaillées peuvent être obtenues dans "Comets" édité par L.L. Wilkening, The University of Arizona Press, Tucson, Arizona, 1982, 766 pages et dans "Les Comètes et la Comète de Halley", Ciel et Terre, Vol. 101, pp. 105-229, 1985.