

# LE SPECTRE DE LA COMÈTE D'ENCKE, 1947 i

par P. SWINGS

Institut d'Astrophysique, Université de Liège  
et McDonald Observatory, Fort Davis, Texas

**SOMMAIRE.** — *Des spectres de la Comète périodique d'Encke, couvrant la région de  $\lambda$  3 000 à  $\lambda$  6 700, ont été obtenus en octobre 1947 à l'Observatoire McDonald. On y observe des bandes de OH, NH, CN, CH<sub>2</sub>, CH, CH<sup>+</sup>, C<sub>2</sub> et NH<sub>2</sub>, ainsi que quelques émissions non identifiées ; il n'y a guère de spectre solaire. Un intense dégagement de NH et CN a été observé le 9 octobre. La Comète d'Encke ne diffère spectroscopiquement, en aucun point essentiel, des comètes dont on observe la première apparition au voisinage du Soleil. On étudie le problème général de l'extension des bandes moléculaires au sein de la tête en tenant compte des processus d'excitation et des dimensions et distributions des solides cométaires. Ce dernier facteur présente aussi de l'importance pour l'explication des comportements des différentes bandes dans les diverses comètes. Le problème de la régénération des gaz primaires des comètes périodiques est discuté.*

## GÉNÉRALITÉS

En 1818, ENCKE, étudiant l'orbite d'une comète observée cette année, trouva que la période était de 3,3 années et que la comète de 1818 était identique à celle découverte par MÉCHAIN à Paris en 1786 et à celles observées en 1795 et 1805. On l'a observée à plus de quarante retours. Comme comparaison, la comète de Halley, dont la période est de 76,0 années, n'en était qu'à son troisième retour prédit lors de son passage de 1909-1911.

L'orbite de la Comète d'Encke a été l'objet de laborieuses recherches poursuivies après ENCKE, surtout par les astronomes de Pulkovo (BACKLUND, MATKIEWICZ, IDELSON). Cette orbite indiquait une accélération de mouvement, peut-être due à la présence d'un milieu résistant dans la partie de l'espace parcouru par la comète : celle-ci arrivait au périhélie environ 2 heures avant le temps calculé pour le passage. De toutes les comètes à courte période, la Comète d'Encke est celle qui passe le plus près du Soleil, en fait plus près que Mercure. En 1947, sa distance périhélique a été 0,34 u. a. (passage au 26 novembre).

Il semble bien que la Comète d'Encke ait circulé autour du Soleil dans une orbite proche de son orbite actuelle, depuis environ 10 000 années, s'étant approchée du Soleil plusieurs milliers de fois à 0,4 u. a. ou moins. WHIPPLE croit, en effet, avoir observé des météores d'orbite périodique 3,3 années qui étaient associés à la Comète d'Encke il y a environ 10 000 ans. Le long de l'orbite de la comète il y aurait un essaim

vaste et diffus de particules dont les orbites, par suite de perturbations, s'éloignent progressivement de celle de la comète.

Des déterminations photométriques ont été effectuées à de nombreux passages, depuis 1786 <sup>(1)</sup>. D'après S. VSESSVIATSKY <sup>(2)</sup>, la magnitude absolue <sup>(3)</sup> de la comète aurait décliné légèrement depuis 1786, à raison d'environ 1 magnitude (ou un peu moins) par siècle. Ce résultat a été critiqué par W. KOSLOV <sup>(4)</sup>, qui considère impossible une détermination de la diminution graduelle de brillance de la comète, étant donné l'imprécision des observations. Malgré les critiques de KOSLOV, VSESSVIATSKY maintient que le déclin lent de la comète est indubitable.

En tout cas, ce déclin doit être lent. La magnitude absolue  $M$ , qui était 9,0 en 1786, était environ 10,1 en 1914, environ 10 en 1924 (9,6 d'après VSESSVIATSKY, 10,3 d'après VORONTSOV-VELYAMINOV), environ 10,3 en 1947. La Comète d'Encke a une magnitude plutôt faible (on a observé des comètes de  $M = 0$  à  $M = 15$ ). Certains auteurs ont exprimé l'avis que les comètes à courte période faiblissent rapidement et ne peuvent survivre plusieurs centaines de révolutions autour du Soleil. Cette opinion est sûrement fautive, si la suggestion de WHIPPLE est correcte.

On peut se demander comment les gaz de la comète sont affectés par les nombreux passages près du Soleil, suivis de refroidissements à des températures très basses. L'atmosphère d'une comète est un phénomène purement temporaire ; cette atmosphère doit être régénérée continuellement pour se manifester dans le spectre. Par exemple, la vie des molécules de CN et  $C_2$  avant leur photodissociation ou photo-ionisation, n'est de l'ordre que de quelques heures. Tous les réchauffements et refroidissements de la Comète d'Encke ont-ils produit des scissions, la disparition des plus petits météorites du noyau, des changements d'abondances relatives des molécules primaires ? Au fait, les gaz n'ont-ils pas en majeure partie été dégagés et dissipés au cours des passages antérieurs ?

L'étude spectroscopique de cette comète de courte période, malgré sa magnitude relativement faible et les difficultés d'observation, m'a paru mériter un effort spécial. J'ai procédé aux premières observations spectroscopiques en octobre 1947 à l'Observatoire McDonald. J'espère pouvoir réobserver cet objet à quelques retours futurs au voisinage du Soleil. Il serait intéressant aussi d'obtenir le spectre de la comète lorsqu'elle est fort éloignée du Soleil et de le comparer à celui d'un objet comme la Comète Schwassmann-Wachmann, qui ne s'approche jamais du Soleil.

Quoique sachant par les publications antérieures sur le spectre de la Comète

<sup>(1)</sup> HOLETSCHEK, Untersuchungen über die Grösse und Helligkeit der Kometen und ihrer Schweife, IV Teil.

<sup>(2)</sup> S. VSESSVIATSKY, *Russian Astr. Journal*, 4, 298 (1927) ; 6, 84 (1928).

<sup>(3)</sup> Magnitude apparente rapportée à  $r = \rho = 1$  moyennant loi de variation proportionnelle à  $r^{-n} \rho^{-2}$  ( $n \simeq 4$ ).

<sup>(4)</sup> W. KOSLOV, *Russian Astr. J.*, 6, 81 (1928).

d'Encke que les bandes moléculaires y apparaissent, je fus surpris de trouver sur mes premiers spectrogrammes que le spectre solaire était absent. Je m'attendais à une pénurie relative en molécules gazeuses, comparativement à une comète « fraîche ». Au fait, il n'y a guère de différence notable entre le spectre de cette « vieille » comète ayant passé tant de fois près du Soleil, et celui des comètes « nouvelles » que j'ai observées dans des conditions instrumentales analogues (1941 I, 1941 IV, 1941 VIII, 1942 IV, 1943 I et 1947 n).

La comète était un objet d'observation plutôt difficile en octobre 1947. Les poses ne pouvaient guère dépasser 3 heures avant l'aube. L'objet était bas sur l'horizon Est. La brillance de surface était assez faible. J'ai donc dû me contenter d'une résolution spectrale assez réduite. Les données d'observation sont résumées dans le tableau I.

TABLEAU I

## DONNÉES D'OBSERVATION

DATE	RÉGION SPECTRALE	DISTANCE HÉLIOCENTRIQUE	MAGNITUDE	DURÉE DE POSE	QUALITÉ DU CLICHÉ
Octobre 1947					
9,45	3 000-4 500	1,09	10	160 min.	moyen
10,44	3 000-4 800	1,07	9,5	206 (1)	mauvais
14,49	3 800-6 000	1,01	9	220 (1)	bon
17,45	3 000-5 000	0,95	8,5	150	bon
19,46	3 950-6 300	0,92	8	135	bon
20,45	3 880	0,91	8	150	faible
Novembre					
1,48	3 880-6 620	0,70	7	89	bon (2)

(1) Nuageux par intermittences.

(2) Prolongé un peu trop à l'aube.

Les anciennes mesures du diamètre de la tête de la Comète d'Encke semblent bien indiquer une contraction de la tête lorsque l'objet se rapproche du Soleil. Cette contraction, approximativement proportionnelle à  $r^2$ , est du type exigé par la théorie de WURM<sup>(5)</sup>. En cela, la comète se comporterait donc de façon parfaitement normale ; la luminosité de la tête serait due essentiellement à une émission moléculaire. D'autre part, des observations récentes de J. GADOMSKI<sup>(6)</sup> sembleraient indiquer que le développement de la comète en octobre-novembre 1947 différait de celui des autres comètes.

(5) MITT. *Hamburger Sternwarte in Bergedorf*, Band 8, 51 (1943), p. 74.

(6) Circulaires 1115 et 1118 de l'U. A. I.

## OBSERVATIONS SPECTROSCOPIQUES ANTÉRIEURES

Les premières observations spectroscopiques visuelles de la Comète d'Encke datent de 1871. TIETJEN, HUGGINS, VOGEL, YOUNG et HARKNESS observèrent les bandes de  $C_2$  et CN dans 1871 V. KONKOLY (1875 II), TACCHINI (1881 VII) et TRÉPIED (1885 I) observèrent visuellement les bandes de SWAN.

Les premières observations photographiques sont dues à TIKHOV (?) (1914 VI, 1924 III et 1928 II), qui observa les bandes de  $C_2$ , de CN et du groupe  $\lambda$  4 050 à Poulkova au moyen du prisme objectif (astrographe de BREDIKHIN à prisme UV d'angle  $13^\circ$ ). TIKHOV obtint sept spectrogrammes : deux de 1914 VI, un de 1924 III et quatre de 1928 II. La distance héliocentrique varie de 0,73 à 1,10. La dispersion moyenne de  $H_\gamma$  à  $H_\beta$  est  $440 \text{ \AA/mm}$ . Ce matériel a été étudié de façon minutieuse par VSESSVIATSKY (8), qui a mesuré les émissions sur des microphotogrammes et a tenté d'établir une liste des radiations de la comète et de leurs identifications. Les émissions principales sont celles de CN,  $C_2$  et  $CH_2$ . Les radiations non identifiées trouvées vers  $\lambda$  3 720 et  $\lambda$  3 830 ne sont, sans doute, pas cométaires, mais bien plutôt des régions du spectre solaire séparant des raies d'absorption (9). Les décalages présumés pour les bandes de SWAN n'ont, sans doute, pas de réalité physique. Des raies non identifiées apparaîtraient à  $\lambda$  3 950 (attribuée, à tort, à NO), à  $\lambda$  4 795 et  $\lambda$  4 920-4 929 ; la réalité de ces émissions paraît très douteuse. Le spectre soi-disant continu étudié par VSESSVIATSKY n'est probablement pas réel et ne semble apparaître que par suite de la faible résolution du prisme objectif utilisé. Certaines caractéristiques paraissant bizarres à VSESSVIATSKY en 1938 sont maintenant aisément explicables par suite des progrès de la spectroscopie cométaire au cours des 10 dernières années, notamment l'identification de  $CH_2$  et de  $NH_2$ .

Lors de l'apparition de 1937 (VI), le spectre fut obtenu à Lyon par J. DUFAY et à l'Observatoire Yerkes par VAN BIESBROECK et HENYEY.

J. DUFAY (10) emploie un prisme objectif dont la dispersion varie de  $99 \text{ \AA/mm}$  pour  $\lambda$  4 000  $\text{\AA}$  à  $415 \text{ \AA/mm}$  pour  $\lambda$  6 000 ; deux clichés couvrent la région  $\lambda$  3 800 à  $\lambda$  4 800, un autre couvre  $\lambda$  4 800 —  $\lambda$  6 600. Jusqu'à présent, DUFAY a seulement publié de brèves remarques au sujet des radiations de CN, CH,  $CH_2$ , et  $NH_2$ . Il a bien voulu me communiquer une liste complète de longueurs d'onde mesurées sur ses trois clichés (11). Ceux-ci sont très supérieurs, comme dispersion, à ceux de TIKHOV.

(7) *Bull. Acad. Sciences de Russie*, A., p. 223 et 279 (1924) ; *Astr. Nachr.*, 223, 279 (1925).

(8) *Bull. Obs. Pulkova*, 15, n° 6 (1938).

(9) De telles « radiations » apparaissent nettement sur mes clichés de la Comète Cunningham ; voir *Monthly Notices R. A. S.*, 103, cliché 2 faisant face à p. 86 (1943).

(10) J. DUFAY, *Comptes Rendus*, 206, 1550 et 1948 (1938) ; 222, 51 (1946) ; *Ap. J.*, 91, 91 (1938).

(11) Actuellement à l'impression dans les *Annales d'Astrophysique*.

G. VAN BIESBROECK et L. HENYEVY (12) ont employé un « spectrographe nébulaire ». Une pose de 3 h. 45 m. obtenue lorsque la comète était à une distance héliocentrique 1,14 révèle  $C_2$ , CN,  $CH_2$  et des radiations ultra-violettes, qui à ce moment-là étaient inexplicables, mais qu'on sait maintenant dues à NH et OH.

#### DESCRIPTION GÉNÉRALE DES SPECTROGRAMMES

Mon but principal était d'obtenir les caractéristiques essentielles de cette vieille comète à très courte période. Ce n'est certes pas un objet favorable à des mesures précises de longueurs d'onde ou de profils, pas plus qu'à la découverte d'émissions anormales. Les observations n'en ont pas moins été faites dans tout le domaine de  $\lambda$  3 000 à  $\lambda$  6 700, avec l'espoir qu'elles apporteraient peut-être une contribution à certains problèmes de physique cométaire considérés comme importants à l'heure actuelle. A cause de la faiblesse et du caractère diffus de la comète, il était difficile de guider exactement sur le centre du noyau. Je ne décris ici que les meilleurs clichés.

SPECTROGRAMME DU 14 OCTOBRE (CLICHÉ II). — La bande (0,0) de CN révèle la structure habituelle : maximum près de P (3), minimum près de P (5), maximum en R (1) et minimum près de R (3). Sous le microscope, la branche R révèle de R (3) à R (12) une structure très semblable à celle de la comète 1941 I. La résolution est trop faible pour révéler les raies de rotation individuelles de la branche R. Les bandes de  $CH_2$ , CN, CH et  $C_2$  ont leur apparence habituelle. Il n'y a pas de spectre continu ou solaire.

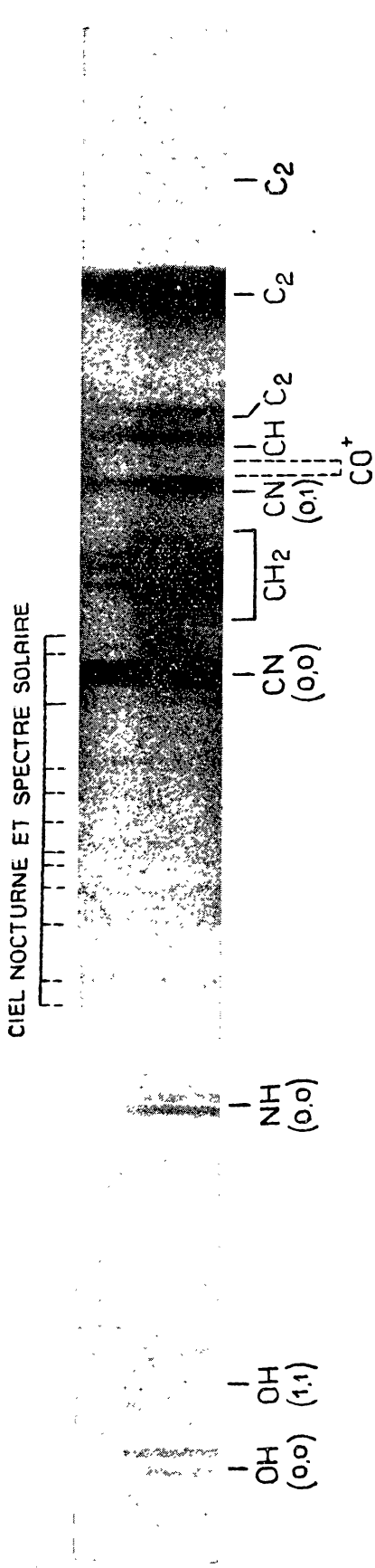
SPECTROGRAMME DU 17 OCTOBRE (CLICHÉ 1). — Le spectre du ciel nocturne et un peu de spectre solaire perturbent l'apparence du spectre cométaire. La bande (0,0) de OH a une distribution d'intensité intermédiaire entre celle de la comète 1941 I, de distance héliocentrique moindre, et celle de 1941 VIII, de distance héliocentrique plus élevée. La bande (1,1) de OH est faible.

La bande (0,0) de NH est assez intense. La remarque concernant la distribution d'intensité parmi les raies de rotation de OH s'applique aussi à NH.

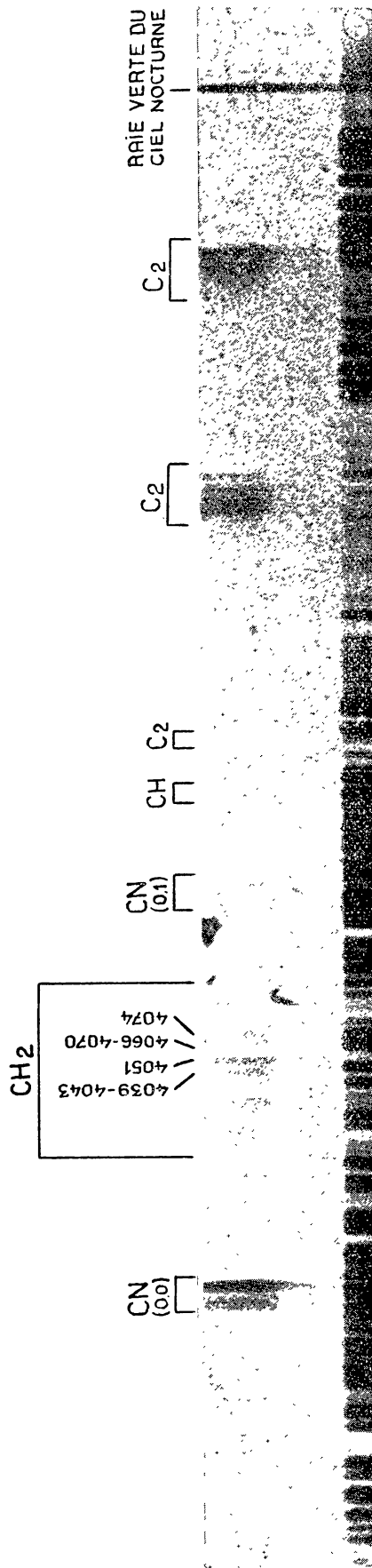
En plus des émissions habituelles (CN,  $CH_2$ , CH,  $C_2$ ), le spectre montre aussi une trace de  $CO^+$ , mais ceci peut être dû à un défaut de guidage. Les raies de OH montrent une concentration nucléaire plus élevée que les raies de NH et même, semble-t-il, que celles de CN et  $C_2$ .

SPECTROGRAMME DU 19 OCTOBRE (CLICHÉ III). — La distribution d'intensité parmi les raies de  $CH_2$  diffère de façon appréciable des distributions dans 1942 IV

(12) G. VAN BIESBROECK and L. HENYEVY, *Ap. J.*, **86**, 622 (1937).



CLICHÉ I. — Région ultraviolette et violette de la Comète d'Encke ; 17 octobre 1947, 10 h 45 mn TU ;  $r = 0,95$  ;  $m = 8,5$  ; exposition de 150 minutes.



CLICHÉ II. — Région de  $\lambda$  3 800 à  $\lambda$  5 600 de la Comète d'Encke ; 14 octobre 1947, 10 h 20 mn TU ;  $r = 1,01$  ;  $m = 9$  ; exposition de 3 heures (interruptions par nuages).



( $r \sim 1,7$ ) et 1943 I ( $r \sim 1,4$ ). Il serait désirable de comparer soigneusement cette distribution dans diverses comètes de distances héliocentriques et vitesses radiales différentes. Toutefois, j'ai préféré postposer cette étude jusqu'à ce que les données de laboratoire au sujet de  $\text{CH}^2$  soient plus complètes.

La séquence  $\Delta v = +1$  des bandes de SWAN ne semble pas révéler la présence de l'isotope  $\text{C}_{13}$ . L'émission de  $\text{NH}_2$  est assez forte (voir aussi cliché IV). Deux raies non identifiées apparaissent vers  $\lambda 4\ 333$  et  $\lambda 4\ 351$ . Il n'y a pas de spectre continu ou solaire d'intensité appréciable.

SPECTROGRAMME DU 20 OCTOBRE (TROP FAIBLE POUR ÊTRE REPRODUIT). — Une résolution plus élevée a été tentée avec l'espoir d'obtenir la structure fine de la branche R de CN (0,0). La résolution de 1,2 Å ne permet évidemment pas de séparer toutes les raies R dont les intervalles sont d'environ 0,7 — 0,8 Å. Mais la présence des raies de Fraunhofer réduit l'intensité de certaines raies R à un point tel que des raies individuelles peuvent être trouvées, même avec une résolution insuffisante, pour montrer la structure complète de rotation (pour obtenir celle-ci McKELLAR a employé  $\Delta\lambda = 0,5$  Å). Sous le microscope le spectrogramme montre une structure de rotation proche de celle reproduite dans la note de McKELLAR<sup>(13)</sup>. L'accord est complet avec la théorie de l'excitation par résonance et il n'est donc pas utile de donner le détail de la structure. Le spectre est trop faible pour qu'on puisse y vérifier le décalage d'environ 0,09 Å observé par McKELLAR entre les longueurs d'onde de laboratoire et de la comète. Cette question est importante, puisqu'un tel décalage fournirait une détermination de la vitesse des molécules CN à l'endroit considéré de la tête. Les observateurs devront avoir ce problème en vue lorsqu'une comète suffisamment brillante pourra être étudiée.

SPECTROGRAMME DU 1<sup>er</sup> NOVEMBRE (CLICHÉ IV). — L'exposition, de 89 minutes, a malheureusement été prolongée trop tard à l'aube et le spectre solaire est assez intense. La bande (0,0) de  $\text{N}_2^+$  caractéristique de l'émission crépusculaire est présente. Les bandes habituelles sont présentes, y compris l'émission assez faible de  $\text{CH}^+$ . Il n'y a guère de trace certaine de bande de  $\text{C}_{12}$   $\text{C}_{13}$ . L'émission de  $\text{NH}_2$  dans le rouge est intense. Les raies habituellement observées entre les séquences  $\Delta v = +1, 0, -1$  et  $-2$  de  $\text{C}_2$  se retrouvent; elles sont dues, au moins en partie, à  $\text{NH}_2$ . Deux longues raies fines non identifiées, dont l'aspect diffère fortement de celui des raies de CH, apparaissent à  $\lambda 4\ 333,5$  et  $\lambda 4\ 350,6$ ; deux autres plus faibles se trouvent près de  $\lambda 4\ 414,2$  et  $\lambda 4\ 426,5$ . Ces raies s'étendent à grande distance dans la tête. Elles ne sont pas incluses dans la liste de DUFAY. Étant donné la finesse de ces raies, on serait tenté de les attribuer à un hydrure et non à une molécule telle que  $\text{CN}^+$  ou  $\text{C}_2^+$  non encore

<sup>(13)</sup> A. McKELLAR, *Ap. J.*, **99**, 162 (1944), cliché V face à la p. 167.



étudiée au laboratoire. Cet hydrure ne peut être neutre, sinon on l'aurait observé dans les étoiles froides. La suggestion la plus vraisemblable est  $\text{NH}^+$ , qui, dans la région violette, doit avoir une transition  ${}^2\Delta \rightarrow {}^2\Pi$  analogue à celle de la molécule isoélectronique CH. Toutefois, on peut objecter que si les raies considérées sont dues à  $\text{NH}^+$ , on aurait déjà trouvé l'une ou l'autre d'entre elles en absorption interstellaire. L'obtention du spectre de  $\text{NH}^+$  en laboratoire est hautement désirable.

OBSERVATION DU 9 OCTOBRE. — Le matin du 9 octobre, au début de l'observation, j'ai constaté la présence d'un noyau brillant dans la partie centrale de la tête. Son diamètre était, sans doute, inférieur à  $3''$  (1 000 km). J'ai guidé sur ce noyau, qui a montré les bandes de CN, NH et, peut-être, OH, mais pas de continuum. L'expansion des gaz de ce noyau devait être lente (guère plus de 100 m/sec), car je n'ai pas observé d'augmentation appréciable de la dimension du noyau au cours de plus de 2 heures : toutefois, la qualité des images n'était pas élevée. Le 10 octobre, il n'y avait plus trace de ce noyau brillant, quoique la qualité des images était, par moments, au moins égale à celle du 9 octobre ; le ciel était parfois même plus limpide que la veille et il n'y avait pas de lune. Nous avons donc eu affaire à une espèce de dégagement de gaz dans la partie centrale de la tête. En 24 heures, ce dégagement avait pu s'étendre dans un volume suffisant pour ne plus être perceptible : une expansion à la vitesse de 100 m/sec. aurait rempli une sphère de 1 700 km de diamètre (environ  $48''$ ).

Tout observateur de comète est anxieux d'observer un dégagement subit de gaz et d'en suivre l'évolution, puisque c'est là une méthode de détermination des vitesses d'expansion des molécules. La valeur habituellement adoptée pour ces vitesses est de l'ordre du km/sec<sup>(14)</sup>, en accord, d'ailleurs, avec les expériences de laboratoire. Mon observation semblerait indiquer une vitesse plus faible ; une telle observation isolée ne mérite, toutefois, qu'une faible confiance.

#### CONCLUSION GÉNÉRALE

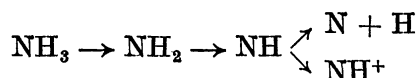
La Comète d'Encke ne diffère spectroscopiquement, en aucun point essentiel, des comètes dont on observe la première apparition au voisinage du Soleil. Elle appartient à la famille de comètes dont la luminosité est due à peu près exclusivement à l'émission de molécules gazeuses et non à la réflexion ou diffusion par des solides.

REMARQUES SUR LES BANDES DE OH, NH ET  $\text{CH}^+$ . — Les bandes de OH et NH apparaissent sur mes premiers clichés, correspondant à une distance héliocentrique  $r \simeq 1,1$ . On doit remarquer que OH était nettement visible sur les clichés ultraviolets des comètes 1941 I ( $r \leq 1,05$ ), 1941 VIII ( $1,25 \leq r \leq 1,51$ ) et 1942 IV ( $1,6 < r < 1,8$ ),

<sup>(14)</sup> N. T. BOBROVNIKOFF, *Lick Obs. Public.*, 17, 309 (1931) ; H. VON SCHEWICK, *Zs. f. Aph.*, 21, 142 (1942).

à des distances héliocentriques supérieures à 1 unité astronomique. En fait, OH était beaucoup plus intense que NH dans 1941 VIII à  $r \approx 1,4$ . Il est logique de penser que la molécule primaire de OH est H<sub>2</sub>O qui, à distance  $r > 1$ , est vraisemblablement à l'état de glace.

Dans le cas de NH, il semble logique d'adopter comme substance primaire l'ammoniac NH<sub>3</sub> et comme série de transformations photochimiques (15<sup>a</sup>) :



NH<sub>2</sub> peut être considéré comme identifié de façon raisonnablement sûre. En fait, les raies de NH<sub>2</sub> et de NH sont relativement intenses dans la Comète d'Encke. Il est, dès lors, surprenant que le NH<sub>3</sub> ne soit pas trouvé parmi les gaz extraits des météorites pulvérisés et chauffés dans le vide (15<sup>b</sup>). NH<sub>3</sub> n'est pas non plus mentionné parmi les gaz extraits des roches terrestres (16). Par suite des densités très faibles régnant dans toutes les régions des comètes (17), on a l'habitude de considérer que la chimie cométaire consiste exclusivement en photodissociations ou photo-ionisations et que des réactions n'y prennent pas place. Ainsi donc on ne pourrait pas imaginer que NH et NH<sub>2</sub> soient formés par combinaisons chimiques de gaz présents dans les météorites, tels que N<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>. On peut toutefois se demander si ce point de vue extrême peut être adopté au voisinage immédiat des endroits où les gaz primaires se dégagent des solides cométaires. Les raies de CH<sup>+</sup> sont très faibles dans la Comète d'Encke. Au contraire de l'absorption interstellaire où CH<sup>+</sup> est parfois aussi ou même plus intense que CH, les raies cométaires de CH<sup>+</sup> sont toujours beaucoup plus faibles que celles de CH. On est tenté de penser qu'une faible proportion seulement des molécules CH cométaires disparaissent par photo-ionisation, la majeure partie d'entre elles disparaissant par photodissociation. J'ai montré précédemment (17<sup>a</sup>) que dans le cas des molécules

(15<sup>a</sup>) Dans une telle série, chaque état a une durée de vie moyenne déterminée (fonction de  $r$ ). La détermination théorique des abondances relatives au sein des comètes, à une distance héliocentrique déterminée, relève d'études de séries de photodissociations, en complète analogie avec les séries de désintégrations radioactives. En cela, le problème cométaire diffère complètement de celui des atmosphères d'étoiles, des nébuleuses et de l'espace interstellaire. Ce point a récemment été développé par WURM (*loc. cit.*). Toutefois, l'interprétation des observations est compliquée et douteuse, non seulement à cause des incertitudes en ce qui concerne les séries de photodissociations, mais encore par suite des vaporisations très différentes de différentes molécules à chaque température.

(15<sup>b</sup>) MERRILL, *Proc. Amer. Phil. Soc.*, **65**, 119 (1926).

(16) NIKOGOSJAN, *Mém. 3<sup>e</sup> conf. Minéralogie* (en russe), p. 55 (1940); cité par B. A. VORONTSOV-VELYAMINOV, *Astr. J. Soviet Union*, **22**, 317 (1945).

(17) On peut, en partant de l'intensité des bandes, estimer les densités partielles en C<sub>2</sub>, CN, etc., comme l'a fait WURM. Mais on ne peut, à l'heure actuelle, en déduire les densités totales qui dépendent des séries de photodissociations, au sujet desquelles on n'a encore qu'une idée trop imprécise; d'ailleurs, une assimilation complète des gaz cométaires aux gaz occlus dans les météorites paraît dangereuse. On peut seulement dire que les densités totales sont extrêmement faibles, car les températures de rotation déduites des différentes molécules (p. ex. CN et C<sub>2</sub>) sont très différentes.

(17<sup>a</sup>) *Ap. J.*, **95**, 270 (1942).

cométaires, il n'est pas permis d'employer les formules d'ionisation habituelles par un rayonnement dilué. Certains résultats de B. VORONTSOV-VELYAMINOV (<sup>17b</sup>), basés sur une telle équation d'ionisation, soulèvent des doutes sérieux.

L'EXTENSION DES BANDES MOLÉCULAIRES AU SEIN DE LA TÊTE. — Considérons le cas simplifié où toutes les molécules émanent d'un noyau ponctuel. L'extension  $E$  des raies d'une molécule AB au sein de la tête sera définie par

$$(1) \quad E = Vd,$$

où

$V$  = vitesse moyenne d'expulsion de AB, supposée constante ;

$d$  = durée moyenne de vie des molécules AB, avant photodissociation ou photo-ionisation.

La formule (1) n'est applicable que si l'émission de AB est due à l'excitation directe de AB par le rayonnement ou par des corpuscules issus du Soleil. Dans le cas de la plupart des bandes du domaine habituel (OH, NH, CH, CH<sup>+</sup>, système bleu de CN), il n'y a guère de doute que l'émission résulte d'une fluorescence excitée par le rayonnement solaire. Le facteur  $d$  dépend de la molécule et de la distance du Soleil ; la dépendance de  $d$  vis-à-vis de la distance héliocentrique est la même ( $r^{-2}$ ) pour toutes les molécules. Dans le cas général,  $V$  est la somme de trois termes : vitesse thermique (à la température du noyau), vitesse acquise par pression de radiation, vitesse acquise par suite du ou des processus de photodissociation de la molécule primaire. La vitesse thermique est très faible pour les molécules envisagées ici, comme on le conclut immédiatement de la très faible extension de la molécule CO<sup>+</sup> dans la tête : cette molécule CO<sup>+</sup> a une longue vie, comme le prouvent les mouvements dans la queue (<sup>18</sup>) (où la vitesse de CO<sup>+</sup> est acquise par pression de radiation). La pression de radiation, dans le cas de OH, NH, CH, CN, est négligeable. En résumé  $V$  est une simple caractéristique moléculaire, résultant du reliquat d'énergie rayonnante solaire, convertie en énergie cinétique, lors des photodissociations conduisant à la molécule considérée (<sup>19</sup>).

En résumé, quelle que soit la distance héliocentrique, les extensions relatives des bandes de deux molécules au sein de la tête devraient être les mêmes pour toutes les comètes, si ces deux molécules émanent d'un seul noyau ponctuel et si le processus d'excitation est identique.

Dans leur étude du spectre de la Comète 1943 I, D. BARBIER et D. CHALONGE (<sup>20</sup>) ont trouvé que les raies de OH s'étendent plus loin dans la tête que les raies d'intensité comparable de CN. Ils concluent que : « il est probable que, de toutes les molécules

(<sup>17b</sup>) *Loc. cit. et Ap. J.*, 104, 226 (1946).

(<sup>18</sup>) A. KOPFF, *Handb. der Astroph.*, 4, p. 464-474.

(<sup>19</sup>) En laboratoire, une molécule telle que CN est libérée à partir de HCN ou C<sub>2</sub>N<sub>2</sub> avec une vitesse de l'ordre de 2 km/sec (A. V. JAKOVLEVA, *Acta Physicochim. U. R. S. S.*, 10, 433 (1939)).

(<sup>20</sup>) D. BARBIER et D. CHALONGE, *Annales d'Astrophysique*, 6, 41 (1943).

constituant la tête des comètes, ce sont celles de OH qui atteignent la plus grande distance du noyau ».

La Comète d'Encke (Cliché II, comparer OH et NH) ne vérifie pas cette conclusion de BARBIER et CHALONGE. J'ai réexaminé minutieusement la collection de spectres cométaires de l'Observatoire McDonald. Dans le cas des nombreux et excellents spectrogrammes de la Comète 1941 I où le guidage a été effectué avec grand soin, il n'y a aucun doute que les raies de OH s'étendent beaucoup moins loin dans la tête que les raies d'intensité analogue de NH (surtout) et de CN. Il me reste quelque doute dans le cas d'autres comètes où l'extension de OH semble être différente. D'ailleurs, le cliché de BARBIER et CHALONGE est excellent et leur résultat ne peut être mis en doute.

Quoique de telles différences paraissent, à première vue, bizarres, elles ne sont pas du tout impossibles et peuvent simplement résulter de notre hypothèse d'un noyau unique générateur de gaz. Il se peut que les molécules primaires de OH, NH et CN soient dégagées en proportions différentes à des températures différentes. Il y a des comètes où les solides sont distribués dans un vaste volume de la tête: 1943 I semble bien être de ce type d'après l'intensité de son spectre solaire <sup>(21)</sup>. Il se peut que comparativement aux solides de la région centrale, les solides périphériques dégagent OH de façon privilégiée par rapport à NH ou CN <sup>(22)</sup>; ce serait, sans doute, le cas si ces solides périphériques étaient plus petits, donc plus chauds, que les solides centraux. Dans ces conditions, on pourrait trouver pour OH un gradient global de densité plus faible que pour NH ou CN, alors que l'inverse serait vrai dans le cas d'un noyau ponctuel unique. Autrement dit, les extensions relatives de différentes bandes dans la tête dépendraient non seulement de caractéristiques moléculaires, mais encore de la distribution des solides dans la tête.

Ce problème de l'extension des molécules dans la tête est important pour la physique cométaire et je me propose d'y revenir ultérieurement <sup>(23)</sup>. Je signalerai, ici encore, le renseignement important que peut fournir l'extension des bandes, au sujet du mécanisme d'excitation. Considérons les systèmes bleu et rouge de CN. Si ces deux systèmes étaient émis directement par excitation de CN, les facteurs  $V$  et  $d$  seraient évidemment les mêmes. Or, on constate que les bandes infrarouges de CN récemment découvertes dans 1947 N à  $\lambda$  7 906 et  $\lambda$  8 106 sont concentrées près du noyau, alors que les bandes violettes s'étendent loin dans la tête. Il faut donc que le processus d'excitation soit différent, autrement dit que le système rouge de CN ne soit pas excité par fluorescence ni, en fait, par aucune action directe du Soleil (radiation ou corpuscules) sur CN. Ceci est confirmé par le rapport d'intensité des bandes infrarouges et bleues de CN. Étant donné la faible force oscillante de la bande rouge (2,0) de CN à  $\lambda$  7 906, par

<sup>(21)</sup> P. SWINGS, *Monthly Notices R. A. S.*, 103, 86 (1943), cliché 4.

<sup>(22)</sup> On devrait plutôt parler ici des molécules parentes de OH, NH et CN.

<sup>(23)</sup> En vue d'études de ce genre, il serait peut-être opportun de publier un atlas de bons spectres de différentes comètes.

rapport à la bande bleue (0,0) à  $\lambda$  3 880 <sup>(24)</sup>, on doit s'attendre à ce que  $\lambda$  7 906 soit très faible par rapport à  $\lambda$  3 880, si les deux bandes sont excitées par fluorescence. Ceci n'est pas le cas. Il y a tout lieu de penser que l'excitation des molécules CN au niveau supérieur  $^2\Pi$  du système rouge résulte de la photodissociation de la molécule parente de CN. Dans ce cas, l'extension des raies du système rouge serait donnée par la formule (1) appliquée, non à CN, mais à la molécule tri- ou polyatomique, dont la dissociation produit les radicaux CN à l'état  $^2\Pi$ . Il y a tout lieu de penser que, pour une telle molécule polyatomique, le produit  $Vd$  est beaucoup plus petit que pour CN. Il y aurait donc deux mécanismes d'excitation bien distincts dans les comètes : fluorescence et photodissociation.

COMPARAISON ENTRE LES SPECTRES DE DIFFÉRENTES COMÈTES. — Lorsque deux comètes observées à la même distance héliocentrique et ayant la même vitesse radiale par rapport au Soleil <sup>(25)</sup> présentent des intensités relatives nettement différentes de certaines bandes, il est de coutume d'attribuer ces différences à des abondances relatives différentes des gaz occlus <sup>(26)</sup>. Une telle conclusion ne paraît pas nécessairement requise. Il y a aussi lieu de considérer les dimensions et la distribution spatiale des solides dont se dégagent les molécules. A très grande distance du Soleil, tous les solides d'une comète sont à très basse température et tous les « gaz » qu'ils contiennent, sauf l'hydrogène et l'hélium, se trouvent à l'état solide <sup>(27)</sup>. Lorsque la comète se rapproche du Soleil, les solides de petites dimensions (ordre du centimètre) pourront prendre assez rapidement la température d'équilibre

$$T(^{\circ}\text{K}) = 289 r^{-\frac{1}{2}}$$

à laquelle la quantité d'énergie rayonnée est égale à l'énergie absorbée. Toutefois, un gros solide mettra un temps assez long pour hausser sa température de façon appréciable. WURM a montré que, pour que la température d'un solide de 100 mètres de diamètre augmente de 100°, il faut un temps de l'ordre de plusieurs mois, autrement dit un temps long par rapport à celui que passe la comète au voisinage du Soleil. Si ce point de vue de WURM est adopté, les molécules H<sub>2</sub>O <sup>(28)</sup>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> resteraient effectivement à l'état solide pendant tout le passage de la comète. La formation continue d'une atmosphère gazeuse ne serait pas due à un dégagement de gaz occlus, mais bien à un phénomène d'évaporation. Comme l'évaporation des diverses substances à partir des solides varie différemment avec la température, on comprend aisément que

<sup>(24)</sup> A. S. KING and P. SWINGS, *Ap. J.*, 101, 119 (1945).

<sup>(25)</sup> Cette vitesse peut affecter l'émission totale de certaines molécules telles que CN et CH. Cf A. McKELLAR, *Rev. Mod. Phys.*, 14, 179 (1942).

<sup>(26)</sup> Des parties différentes d'une tête de comète peuvent, en fait, révéler des différences spectrales.

<sup>(27)</sup> Remarque de HARTECK, communiquée par K. WURM, *Mitt. Hamburger Sternw. Bergedorf*, n° 51 (1943).

<sup>(28)</sup> L'apparition des bandes de OH à grande distance du Soleil paraît difficile à comprendre dans cette hypothèse ; la glace possède en effet une très faible tension de vapeur à basse température.

des solides de dimensions différentes fourniront des abondances relatives différentes des molécules primaires, donc aussi de CN, CH, C<sub>2</sub>, etc. La distribution spatiale des solides de diamètres divers au sein de la comète (l'un vis-à-vis de l'autre et par rapport au Soleil) affectera le dégagement gazeux. Deux comètes de même masse totale observées à la même distance du Soleil pourront avoir des magnitudes et des spectres différents si leurs solides ont des diamètres moyens différents. Il n'y aurait même rien d'étonnant à ce qu'une comète périodique possède des spectres différents à deux passages successifs : il suffirait que des solides de diamètres différents aient été soumis au rayonnement solaire lors des deux passages.

Peut-être est-ce dans cette voie qu'il faille trouver l'explication des différences considérées comme énigmatiques par TIKHOV et VSESSVIATSKY, entre les spectres de la comète d'Encke en 1914, 1924 et 1928 ? Dans 1914 VI, C<sub>2</sub> est faible par rapport à CN, alors que dans 1924 III et 1928 II, l'intensité de C<sub>2</sub> est normale.

Le diamètre de 100 mètres considéré pour le météorite cométaire paraît raisonnable comme dimension moyenne. Il y a évidemment des solides plus petits, quoique de la fine poussière ne soit guère à considérer en général <sup>(29)</sup>. VORONTSOV-VELYAMINOV <sup>(30)</sup> suggère que les noyaux des comètes HALLEY et PELTIER (1936 II) ont un diamètre de l'ordre de 30 km et consistent en solides ayant un diamètre moyen de l'ordre de 100 mètres ; quoique les hypothèses sur lesquelles sont basés les calculs de VORONTSOV-VELYAMINOV laissent parfois à désirer, l'ordre de grandeur du résultat est, sans doute, correct. Quant à F. BALDET <sup>(31)</sup>, il se représente le noyau cométaire comme une grosse météorite ayant un diamètre de l'ordre de 400 mètres.

On peut trouver un argument en faveur des basses températures calculées par WURM, dans les faibles vitesses d'agitation thermique que possèdent les molécules de CO<sup>+</sup>. Que la vitesse thermique de CO<sup>+</sup> soit faible <sup>(32)</sup> est requis pour expliquer que les fins détails de structure dans les queues puissent se maintenir jusqu'à très grandes distances de la tête <sup>(33)</sup>. Les molécules CO<sup>+</sup> proviennent simplement de CO par une photo-ionisation ne fournissant guère d'énergie cinétique <sup>(34)</sup>. De même l'autre molé-

<sup>(29)</sup> WURM insiste sur le fait que quelques comètes sont passées à travers la couronne solaire sans être détruites. De la poussière serait vaporisée au voisinage immédiat du Soleil.

<sup>(30)</sup> *Astr. J. Soviet Union*, 22, 317 (1945).

<sup>(31)</sup> F. BALDET, *Conf. Act. Sci. et Ind.*, n° 16 (1930).

<sup>(32)</sup> La « température de rotation » des molécules CO<sup>+</sup>, obtenue au moyen de la distribution d'intensité parmi les raies de rotation de chaque bande de CO<sup>+</sup> est aussi très basse, comme il apparaît nettement sur les spectrogrammes de queues obtenus avec spectrographes à fente (d'une étude, non encore publiée, du spectre de la queue de 1941 I).

Mais, étant donné la très faible densité, la « température de rotation » des molécules cométaires n'a rien de commun avec la « température cinétique » : nous sommes très loin des conditions d'équilibre thermodynamique ! Les températures des solides déterminent les natures et quantités de dégagements gazeux, ainsi que les vitesses des molécules primaires dégagées, mais pas les températures de rotation des molécules observées.

<sup>(33)</sup> K. WURM, *Loc. cit.*

<sup>(34)</sup> Si CO<sup>+</sup> provient de CO<sub>2</sub>, il est nécessaire de supposer que la dissociation de CO<sub>2</sub> ne fournit pas d'énergie cinétique.

cule des queues,  $N_2^+$ , provient de la molécule chimiquement stable  $N_2$  par simple photo-ionisation. Il est logique de penser que les molécules primaires dégagées des solides quittent ces derniers avec une énergie cinétique correspondant à la température des solides. Au contraire, CN, CH,  $C_2$ , OH, NH,  $CH_2$  et  $NH_2$  résultent de la photodissociation de molécules primaires et reçoivent, du fait de cette formation, un reliquat d'énergie sous forme cinétique.

D'autre part, une objection à l'hypothèse de WURM est qu'il n'est pas nécessaire que toute la masse du solide soit réchauffée par le Soleil : la croûte extérieure, exposée au Soleil, peut atteindre une température de beaucoup supérieure à la majeure partie de la masse. Des calculs basés sur la conductibilité thermique des météorites seraient, sans doute, possibles.

Le problème de la régénération de la surface dégageant les molécules a été envisagé par divers auteurs. Si la suggestion de WHIPPLE, d'après laquelle la Comète d'Encke est passée plusieurs milliers de fois tout près du Soleil, est correcte, on peut se demander si les processus considérés d'habitude suffisent. Ceux-ci sont surtout : rotation et libration des solides ; collisions entre les solides avec fissures, ruptures et pulvérisations. Considérant la très lente diffusion des gaz au sein des météorites, VORONTSOV-VELYAMINOV déclare que la luminosité des comètes périodiques diminuerait de façon catastrophique si les solides cométaires ne se brisaient pas mutuellement par collision, de façon continue. Mais si l'atmosphère gazeuse est seulement alimentée par des phénomènes violents de frictions, collisions et fractures, on explique difficilement que, depuis 150 ans, la magnitude absolue de la Comète d'Encke ait à peine changé. Une régénération plus régulière et moins violente des surfaces paraît plus satisfaisante. On peut se demander si une telle régénération ne se produit pas régulièrement, de façon continue, durant la longue période passée par les comètes, dans le vide, à basse température, loin du Soleil. Durant cette période, des atomes, des molécules et des poussières contenant des gaz rencontrant les solides cométaires se congèlent à la surface de ces solides. D'ailleurs, lors de telles rencontres, une surface « fraîche » est aussi, en quelque sorte, renouvelée par l'effet des collisions.

Une telle façon de renouveler la provision de substances primaires n'exclut pas le fait qu'un noyau cométaire puisse se craqueler et se désagréger. Il arrive qu'un noyau se brise en deux et que la désagrégation se continue jusqu'à la transformation de la comète en un essaim de météorites (Comète de Biela). Qu'occasionnellement une craquelure due au choc de deux solides produise une surface fraîche et libère des gaz paraît une explication logique de l'augmentation occasionnelle subite d'une comète.

En terminant, je désire exprimer ma gratitude à MMrs O. STRUVE et G. KUIPER, qui ont bien voulu me permettre d'utiliser le télescope de l'Observatoire McDonald pour l'étude de la Comète d'Encke.

*Manuscrit reçu le 23 mars 1948.*