

LES COMETES ET LA COMETE DE HALLEY

" Le temps viendra où une étude attentive et poursuivie pendant des siècles fera le jour sur ces phénomènes de la nature. A supposer qu'elle se donnât toute entière à la connaissance du Ciel, une seule vie ne suffirait pas à de si vastes recherches et nous partageons inégalement entre l'étude et le vice le tout petit nombre d'années que nous avons! Aussi faudra-t-il pour résoudre tous ces problèmes de longues successions de travailleurs"

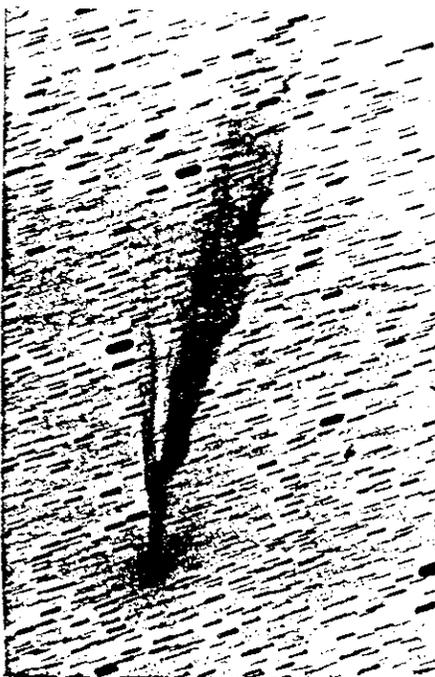
Sénèque, livre VII des "Questions naturelles"  
consacré aux comètes.

INTRODUCTION:

Cette conférence a eu lieu le 26 janvier 1986, surlendemain du survol de la planète Uranus par la sonde américaine Voyager II: le système uranien "possède" maintenant 15 satellites et dix anneaux. Une fois de plus l'exploration "in situ" d'un astre pose plus de questions qu'elle n'en résout. Autrement dit, la nature a beaucoup d'imagination.

Dans le cas des comètes, l'étude de la comète de Halley n'est qu'une étape dans la connaissance de ces astres: pourtant la physique cométaire a déjà bien progressé depuis qu'on a accès aux longueurs d'onde ultra-violettes, radio et infrarouges et plus récemment à l'exploration spatiale. Cette recherche a profondément évolué en quelques années: à l'astronome "horizontal" qui traquait les comètes et décrivait leurs propriétés dans le domaine d'ondes visibles, s'est substitué l'astronome "vertical" qui s'attaque à plusieurs problèmes physiques en utilisant toutes les méthodes possibles.

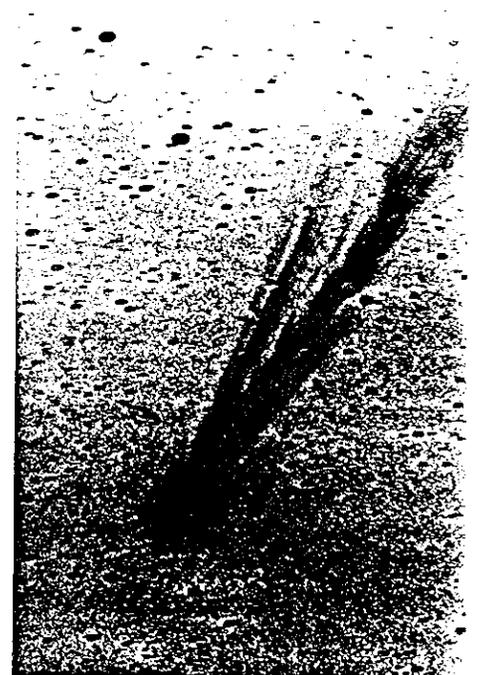
Parmi ces problèmes on peut citer: l'évolution dynamique du nuage de comètes (il y en a entre 100 et 1000 milliards autour du Soleil), les phénomènes à petite échelle, c'est-à-dire l'étude des jets de poussière et de gaz émanant du noyau, les phénomènes à grande échelle, ou l'étude de l'interaction entre le vent solaire et le plasma cométaire (ions et électrons), la composition chimique de l'atmosphère cométaire et son évolution dynamique, la structure interne du noyau...



Morehouse, 15 oct. 1908  
(observatoire de Juvisy)



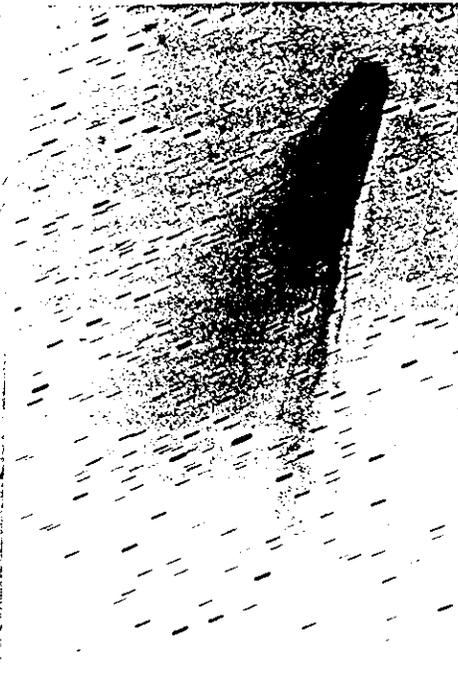
Morehouse, 30 oct. 1908  
(observatoire de Juvisy)



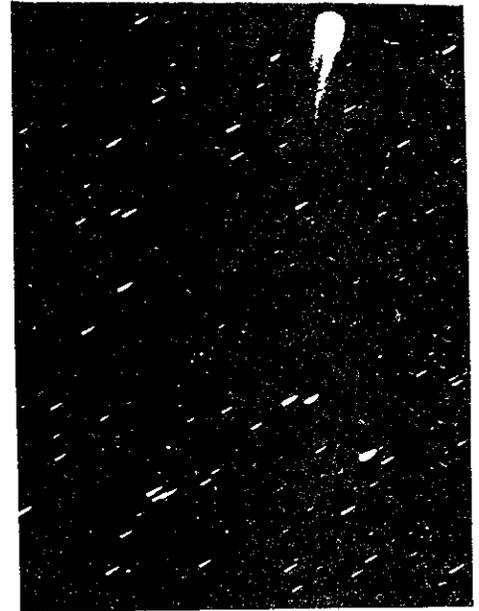
Morehouse, 27 nov 1908  
(observatoire de Juvisy)



Brooks, 23 sept. 1911  
(obs. de Juvisy)



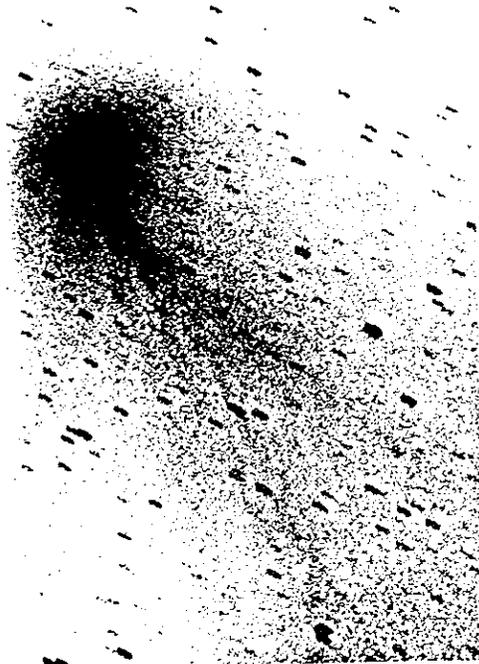
Delevan, 1er oct. 1914  
( obs. de Juvisy)



de Kock-Taraskevopoulos  
23 fév. 1941 (obs. de Meudon)



Arend-Roland, 26 avril 1957  
(obs. de Meudon)



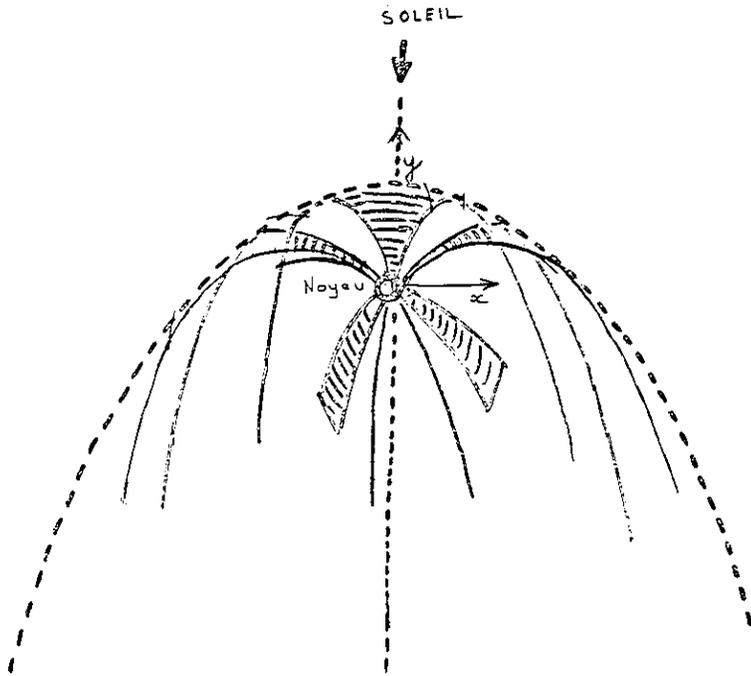
Humason, 25 août 1962  
(Obs. St Michel de Haute Provence)

Il y a deux types de comètes, celles qui contiennent beaucoup de poussières et celles qui sont purement gazeuses.

PHENOMENES A PETITE ECHELLE - EFFET DE FONTAINE ET ROTATION DES JETS.

1- Prenons le cas d'une comète dont le noyau ne tourne pas. Les jets de poussière émis par le noyau sont repoussés par la pression de radiation du Soleil, de la même manière que les jets d'eau d'une fontaine retombent sous l'action de la pesanteur. La trajectoire des poussières est une parabole d'équation:

$$\begin{aligned} x &= V_0 \sin^2 \theta t \\ y &= V_0 \cos^2 \theta t - \gamma t^2 / 2 \quad \text{soit } y = x \cotg^2 \theta - (\gamma / 2V_0^2) (x^2 / \sin^2 \theta) \end{aligned}$$



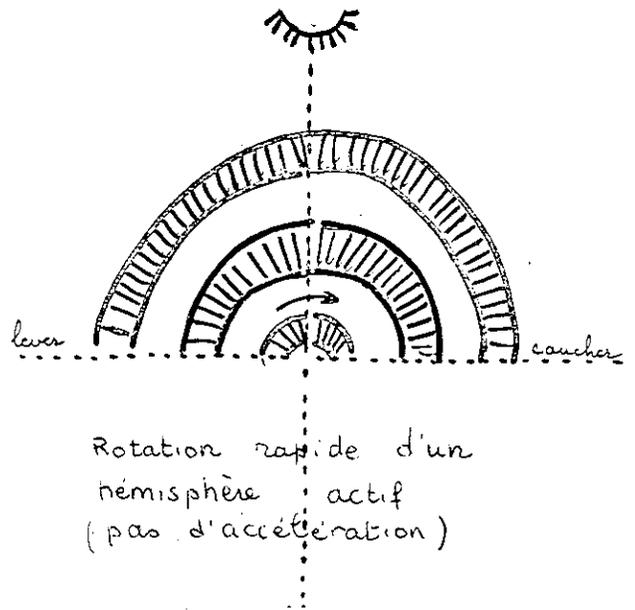
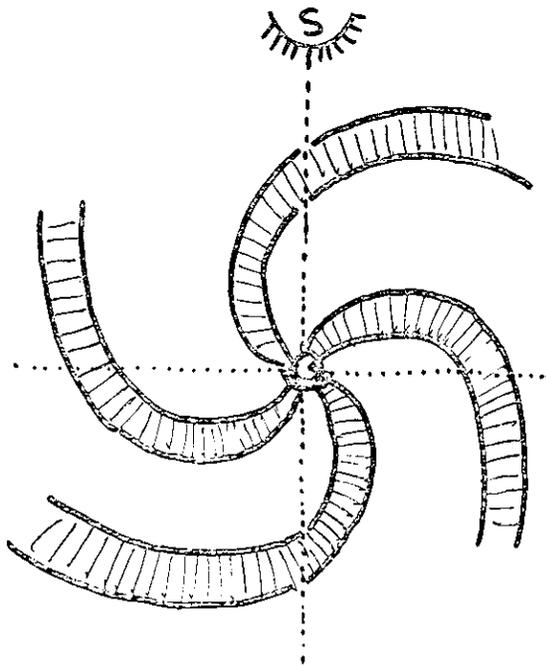
où  $\theta$  est l'angle de tir par rapport à la verticale,  $V_0$  la vitesse initiale et  $\gamma$  l'accélération due à la pression de radiation.

Toutes ces paraboles sont tangentes à la parabole enveloppe, dit "parabole de sûreté" en balistique, dont l'équation est:

$$y = (V_0^2 / 2\gamma) - (\gamma / 2V_0^2) x^2$$

Plus  $\gamma$  est grand, plus la parabole est étroite.

2- Si le noyau tourne lentement, mais qu'on peut négliger la pression de radiation, les poussières décriront des spirales d'Archimède. Dans la réalité, les deux effets se conjuguent.



lente rotation sans accélération.

Un troisième effet s'ajoute aux précédents: l'activité du noyau est surtout concentrée dans l'hémisphère éclairé. Lorsque le noyau ne possède qu'un hémisphère actif, il est aisé de déterminer la période de rotation, car l'émission se fait sous forme de nappes concentriques:  $T = d / V_0$ , où  $T$  est la période de rotation et  $d$  l'intervalle entre deux nappes successives.

La période de rotation a été déterminée pour une quarantaine de comètes: elle est en moyenne de 15 heures, mais peut varier de 4 à 66 heures. Dans le cas de la comète de

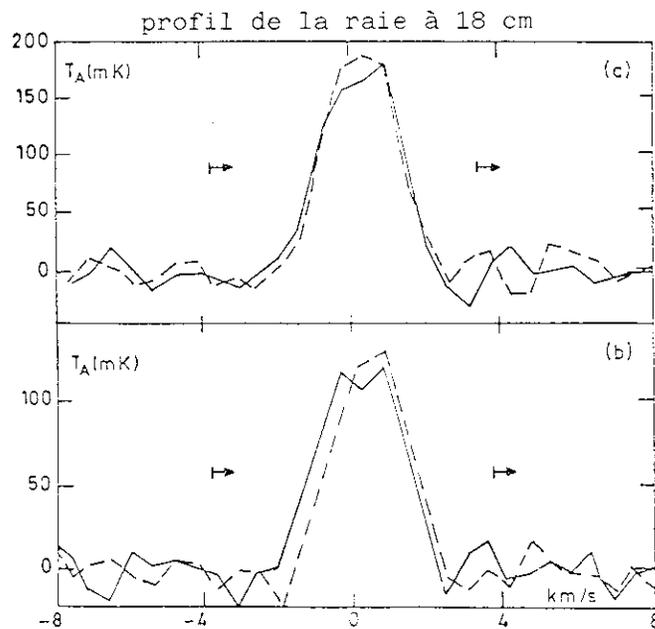
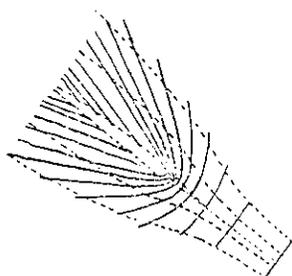
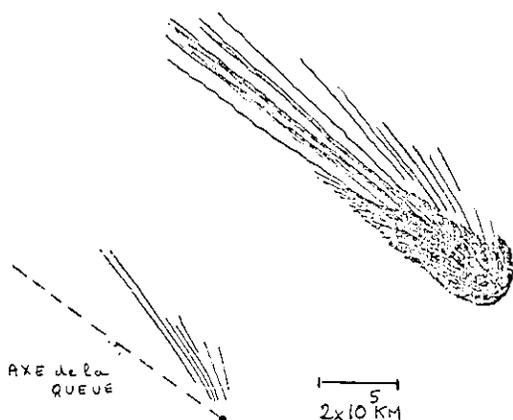
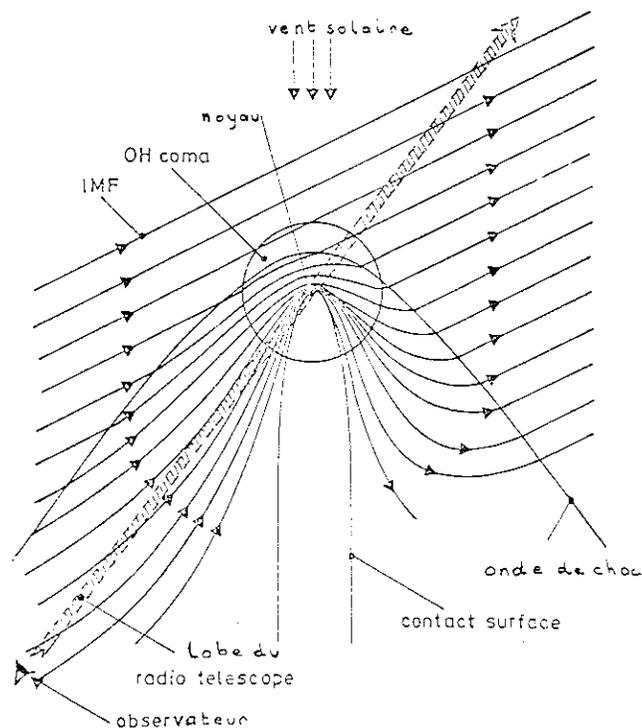
Halley, à partir de photos prises en 1910, on a pu accroître le contraste par un procédé mathématique (dérivée rotationnelle) et mettre en évidence des jets spiraux pour aboutir à une période de rotation de 52 heures (2,17 jours).

PHENOMENES A GRANDE ECHELLE

Dans le cas des comètes purement gazeuses, comme la comète Brooks, la structure de la queue ionisée est déterminée par l'interaction du vent solaire avec les ions cométaires. Cette interaction, de type magnétohydrodynamique, relève de la physique des plasmas.

Dans le cas de la Terre, le vent solaire est fortement dévié par le champ magnétique terrestre (de l'ordre de 0,3 gauss). Dans le cas d'une comète, le champ magnétique intrinsèque est très faible, voire inexistant et l'onde de choc est très proche du noyau. Par contre, le champ magnétique entraîné par le vent solaire est amplifié par empilement en amont du noyau et les modèles théoriques prédisent un facteur d'amplification environ égal à 10.

\* Ce champ a été mis en évidence par effet Zeeman dans la comète Austin en 1982: en observant le profil de la raie à 18 cm de la molécule OH avec le radiotélescope de Nançay, on a mesuré un décalage en fréquence des composantes polarisées circulairement gauche et droite, correspondant à un champ d'intensité 50 gammas (un gamma =  $10^{-5}$  gauss). Cette intensité était 10 fois supérieure à celle du champ interplanétaire ambiant.



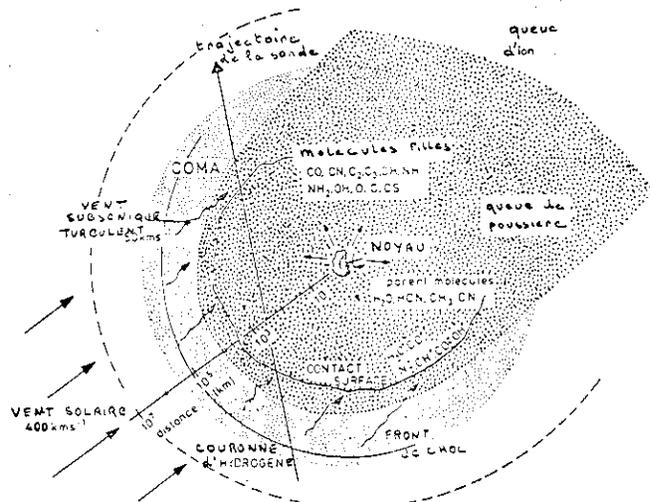
Les jets issus du noyau sont constitués d'ions ( $CO^+$  principalement) qui s'écoulent le long des lignes de champ magnétique. Ils se rabattent le long de l'axe de la queue en un ou deux jours;

\* La sonde américaine ICE a permis de mesurer, in situ, le champ magnétique de la comète Giacobini-Zinner, en septembre 1985. Ce dernier est effectivement drapé autour du noyau et amplifié jusqu'à une intensité de 60 gammas.

SPECTROSCOPIE

La spectroscopie permet d'étudier la composition chimique de la coma (ou chevelure); la coma interne se compose surtout de molécules mères, comme H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CO, NH<sub>3</sub>, HCN, CH<sub>4</sub>. La coma externe provient de la dissociation de ces molécules complexes en radicaux: OH, NH, NH<sub>2</sub>, CN, CH, en ions comme H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, CO<sub>2</sub><sup>+</sup>, CO<sup>+</sup>, CH<sup>+</sup>, et en atomes simples tels que H, C, S, O.

Parmi les molécules neutres, trois ont fait l'objet d'études récentes approfondies dans la comète de Halley. Il s'agit de OH, HCN et H<sub>2</sub>O.



1- La molécule OH en radioastronomie (ondes décimétriques).

Elle a déjà été étudiée à l'aide du radiotélescope de Nançay dans une vingtaine de comètes. L'émission a lieu à 18 cm de longueur d'onde. Les molécules OH sont excitées par le rayonnement UV solaire: c'est le mécanisme de fluorescence. Après plusieurs cascades, les molécules retombent au niveau fondamental où a lieu l'émission radio.

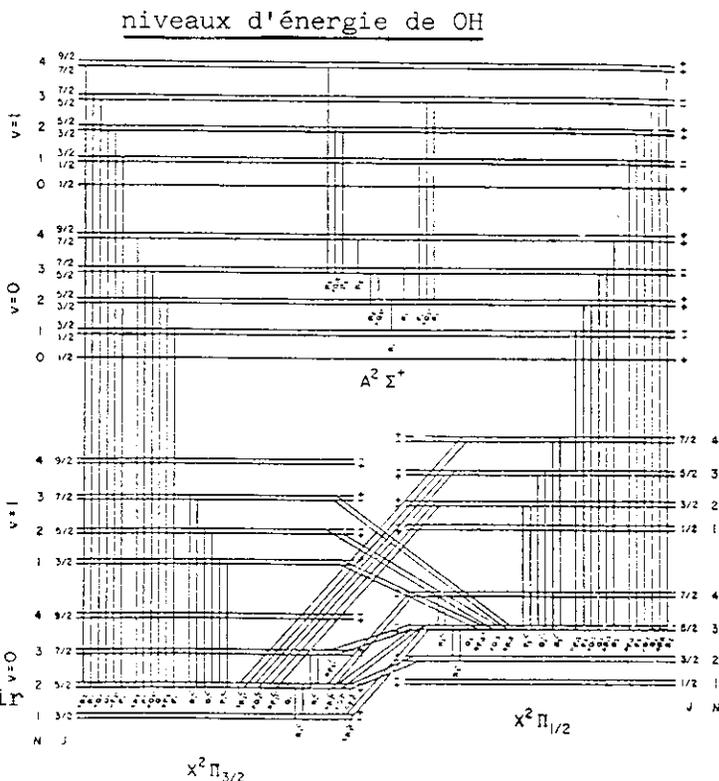
profil de la raie à 18 cm

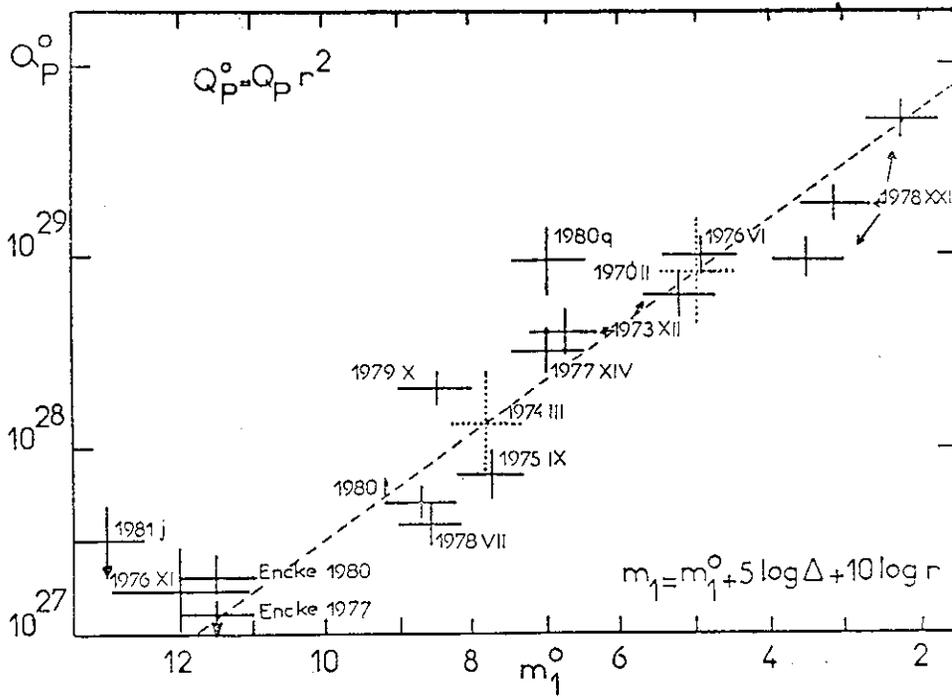


La production intrinsèque de gaz peut varier d'un facteur 1000 d'une comète à l'autre (voir le graphique de la page suivante); les plus petites n'émettent que 10<sup>27</sup> molécules OH par seconde (soit 30 kg), les plus grosses dépassent 10<sup>30</sup> molécules par seconde (soit) 30 tonnes.

L'atout majeur de la radioastronomie est sa grande résolution spectrale (voir le profil de la raie à 18 cm observé dans la comète de Halley, ci-dessus: l'axe des abscisses est directement gradué en km s<sup>-1</sup>) qui permet de mesurer la vitesse d'expansion du gaz cométaire avec une précision voisine de 100 m s<sup>-1</sup>.

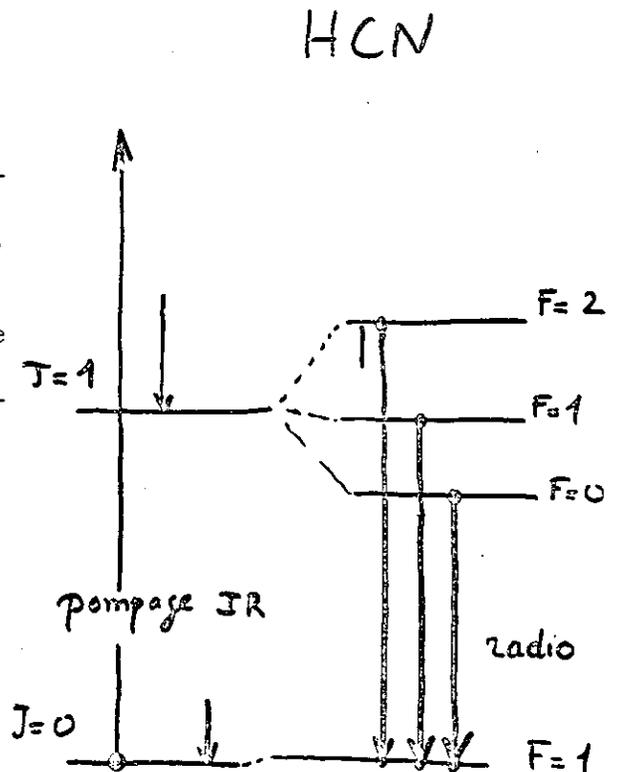
Les mesures quotidiennes de l'intensité du signal radio provenant de la comète de Halley révèlent des variations considérables du dégazage d'un jour à l'autre: on pense qu'elles sont dues à la libération de poches de gaz successives à la surface du noyau en rotation.





2- La molécule HCN en radioastronomie (ondes millimétriques)

Le schéma de fluorescence de HCN (ci-contre) montre que cette molécule est excitée par le flux infra-rouge du Soleil. La cascade de photons peuple le niveau rotationnel excité ( $J=1$ ) d'où les molécules HCN retombent au fondamental ( $J=0$ ) en émettant une raie millimétrique de 3,3 mm de longueur d'onde (en fait, cette raie est triple en raison de la structure fine de la molécule). Elle a été détectée pour la première fois grâce au radiotélescope de l'Institut de Radioastronomie Millimétrique situé à Grenade, en Espagne. Son intensité fluctue davantage que celle de OH, confirmant l'existence de sursauts et de jets à la surface du noyau; la durée de vie très courte des molécules mères comme HCN reflète directement la sublimation des glaces cométaires.

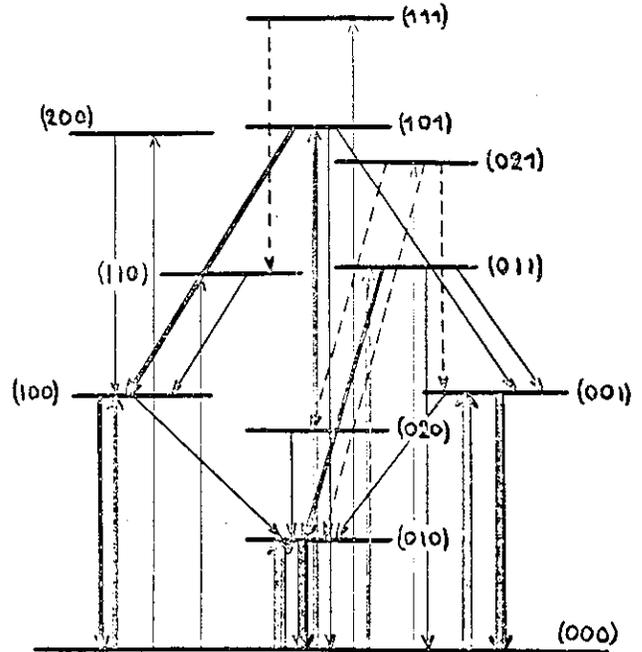


H<sub>2</sub>O

3- La molécule H<sub>2</sub>O en infra-rouge

Cette molécule joue un rôle fondamental en astrophysique; elle est un des parents présumés du radical OH dans les comètes. On tente depuis une dizaine d'années de la mettre en évidence directement dans les atmosphères cométaires. De la surface de la Terre, c'est quasiment impossible, à cause de la grande quantité de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère.

C'est grâce à un avion de recherche stratosphérique, appelé KAO (Etats-Unis) que l'on a pu détecter plusieurs transitions IR de la molécule H<sub>2</sub>O dans la comète de Halley. Comme pour HCN, le pompage de H<sub>2</sub>O se fait par fluorescence IR (voir le schéma ci-contre) et les raies observées appartiennent à la transition de vibration moléculaire  $v = 1 \rightarrow 0$ , à 2,6 microns de longueur d'onde. L'identification de l'eau ne fait pas de doute, car les deux espèces para et ortho sont présentes.



En CONCLUSION, les dernières mesures posent autant de problèmes qu'elles n'en résolvent, car il n'est pas certain qu'on ait identifié les molécules-mères de CN (HCN) et de OH (H<sub>2</sub>O). Espérons que les spectromètres de-masse embarqués à bord des sondes spatiales Giotto et Véga apporteront quelques éléments de réponse complémentaires.

2'

Eric GERARD

(conférence prononcée le 26 janvier 1986 lors de l'A.G. du CLEA)



Dessin de la comète de Halley effectué par Jean-Claude Merlin le 14 novembre 1985 au Creusot au moyen de son télescope de 400 mm. (20h 50 TU)