

DESCRIPTION D'UNE COMÈTE

Philippe Malburet, Aix en Provence

Les comètes sont maintenant assez bien connues. Les anciens modèles qui ont évolué au cours des temps ont été soit abandonnés soit confortés par les missions spatiales récentes qui permettent d'avoir une bonne idée de ce qu'est une comète. Nous nous proposons, dans cet article, de présenter les différentes parties constitutives d'une comète.

Depuis Edmund Halley, on sait que les comètes ne sont pas des objets sublunaires comme cela était évoqué jusqu'à la fin du Moyen Âge, mais font bien partie du Système solaire, gravitant autour du Soleil. À l'instar des planètes – ou des astéroïdes dont elles constituent une famille spécifique – on sait qu'une comète est constituée de cinq parties principales lorsqu'elle devient visible pour nous, c'est-à-dire lorsqu'elle est relativement proche du Soleil. Toute comète possède les éléments suivants :

- un noyau ;
- une chevelure (ou coma) ;
- une queue de poussière ;
- une queue de plasma ;
- une enveloppe d'hydrogène.



Fig.1. Schéma d'une comète (ici la comète Hale-Bopp).

Le noyau

Il est désormais acquis que le noyau, qui est l'élément central d'une comète, est un astéroïde composé essentiellement de roches et de glaces. C'est vers les années 1950 que l'astronome américain Fred Whipple a émis l'hypothèse qui se révélera correcte, que le noyau était une « boule de neige sale ». Des analyses spectrométriques de la coma montraient en effet la présence de radicaux OH, issus de molécules H₂O (molécules mères) qui ne pouvaient qu'être issues de la sublimation de la glace d'eau. Il fallut attendre les premières missions spatiales pour en avoir la certitude : les missions Giotto, puis les suivantes, confirmèrent cette analyse.

À l'heure actuelle, cinq comètes ont été approchées : Halley par *Giotto* et les sondes *Véga*, Borelly par *Deep Space One*, Wild 2 par la sonde *Stardust*, Tempel 1 par la sonde *Deep Impact* et la comète Hartley par la sonde *Deep Impact* rebaptisée *EPOXI* (voir les photos des fig 1 p 19 et 2 p 22)

Plusieurs paramètres sont désormais connus :

- le noyau est un objet non sphérique, généralement de forme plutôt allongée, dont les plus grandes dimensions peuvent varier entre 1 et 40 km. Il est invisible depuis la Terre ;
- il s'agit d'un corps solide constitué de glaces (eau, monoxyde de carbone, dioxyde de carbone, méthanol et autres composants en moindre quantité) et de matières météoritiques agglomérées, sans doute réparties par moitié ;
- l'albédo est très faible : de l'ordre de 3 à 4 %, ce qui fait que les noyaux cométaires sont parmi les objets les plus sombres que l'on connaisse. Ce fut l'une des principales surprises lorsque ce fait a été découvert sur le noyau de la comète de Halley avec la sonde Giotto ;
- la densité constatée sur les noyaux qui ont pu être étudiés est très faible, entre 0,25 et 1,2 g/cm³ ;
- le matériau cométaire est très poreux et peu conducteur de la chaleur : c'est un corps réfractaire laissant très peu pénétrer la chaleur du Soleil sous la croûte que l'on observe à la surface.

La structure interne d'un noyau est encore mal connue. Deux hypothèses principales sont actuellement en concurrence : celle de l'empilement (*layered pile*) et celle d'une structure fractale (*rubble pile*). On peut sans doute raisonnablement estimer que la vraie réponse sera une synthèse des deux modèles.

Malgré les résultats rapportés par les expériences spatiales (*Giotto* et *Deep Space*) la composition précise des noyaux cométaires est encore largement inconnue. Il faudra prévoir de déposer un module automatique à la surface d'un noyau de manière à étudier in situ directement la croûte cométaire. Ceci est au programme de la sonde *Rosetta* qui devrait

être satellisée autour du noyau de la comète Churyumov-Gerasimenko en 2014. Pour l'heure, l'approche (risquée) des sondes spatiales a permis d'étudier certaines molécules « mères » qui quittent le noyau avant leur transformation par le rayonnement solaire en molécules « filles ». Les résultats les plus certains dont on dispose actuellement sont ceux obtenus par spectroscopie.

Le noyau est animé d'un mouvement de rotation sur lui-même selon un axe dont la direction n'est pas constante notamment du fait des forces non gravitationnelles⁷ qui modifient l'orientation du noyau par rapport au Soleil. Cette rotation est généralement de quelques heures.

La coma

Lorsque le noyau commence à se rapprocher du Soleil, la sublimation des glaces produit le départ de molécules qui vont constituer une véritable atmosphère, appelée chevelure ou coma. Ses dimensions sont considérables par comparaison avec celles du noyau lui-même : alors que ce dernier est de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres, la coma peut prendre une extension en général comprise entre 10 000 et 200 000 km. On rencontre dans cette atmosphère des molécules neutres et des radicaux, des atomes et des ions, mais aussi des poussières entraînées par la sublimation des glaces. C'est le rayonnement UV du Soleil qui va casser les molécules et certains atomes pour donner naissance aux radicaux et aux ions : ainsi, le radical OH provient de la molécule H₂O. Il se forme ainsi un plasma qui va interagir avec le vent solaire, qui en est lui-même un, et donner naissance à la queue de plasma.

Éléments trouvés dans la coma et les queues

Composition	Abondance	Composition	Abondance
H ₂ O	100	HNC	0.004-0.007
CO	2-30	CH ₃ CN	0.01-0.02
CO ₂	2-10	HC ₃ N	0.02
H ₂ CO	0.03-4	N ₂	0.02-0.2
CH ₃ OH	1-7	NH ₂ CHO	0.01-0.08
HCOOH	0.05	H ₂ S	0.1-0.6
CH ₃ OCHO	0.05	H ₂ CS	0.02
CH ₄	0.7-2	CS ₂	0.1-0.2
C ₂ H ₆	0.4	HNC	0.004-0.007
C ₂ H ₂	0.2-0.9	CH ₃ CN	0.01-0.02
Phénanthrène	0.15	HC ₃ N	0.02
NH ₃	0.1-1.5	N ₂	0.02-0.2
HCN	0.05-0.2	NH ₂ CHO	0.01-0.08

Tableau des molécules détectées dans différentes comètes, avec leur abondance relative comparée à H₂O.

⁷ Les forces non-gravitationnelles sont celles, imprévisibles par nature, qui résultent de l'action du Soleil. Lorsque des grains de poussière quittent le noyau, ils sont soumis à une force d'éjection de même nature que la poussée d'une fusée.

La queue de poussière

La queue de poussière (dénommée jadis queue de type II) est formée par les poussières issues de la sublimation des glaces du noyau. La pression de radiation solaire les repousse dans une queue spécifique, généralement de couleur jaune. Les grains, dont l'albédo est assez élevé (de 0,1 à 0,4) sont constitués pour l'essentiel de silicates.

Théorie mécanique de sa formation

Cette queue peut être bien modélisée par l'outil informatique grâce à une approche mécanique de la question. Selon une théorie développée par Friedrich Bessel⁸ (1830) et Fiodor Bredikhin⁹ (1900) puis modélisée par Michael Finston et Ronald Probst¹⁰ (1968) un grain de poussière quitte le noyau sans vitesse initiale sous l'effet de la sublimation des glaces. Tout se passe ensuite comme s'il était soumis à une force unique que l'on peut considérer comme la somme de la force de pression (répulsive et proportionnelle à la section du grain supposé sphérique) et de la force de gravitation (attractive, mais d'intensité plus faible). Ceci permet alors de considérer qu'un grain est soumis à une force unique issue du Soleil : la mécanique newtonienne peut alors être employée pour déterminer le mouvement des grains à l'intérieur de la queue de poussière.

Les grains quittant le noyau sont de tailles et de densités différentes. Soumis à deux forces émanant du Soleil (la force de gravité et la pression de radiation), ils sont donc soumis à une force centrale et vont suivre des trajectoires différentes à des vitesses distinctes. Suivant les lois de Newton, ces trajectoires sont des coniques. Si l'on s'intéresse à leur répartition spatiale, on constate que l'on peut analyser la situation en prenant en compte deux variables : une quantité β (fonction du produit de leur densité par leur diamètre) et le temps t . On obtient ainsi deux types de lieux géométriques :

- Pour des valeurs de β constantes, la variable t produit une répartition selon des lignes dénommées *synchrones* ;
- Pour des valeurs de t constantes la variable β

⁸ **Friedrich Wilhelm Bessel** (1784-1846) était un astronome et mathématicien allemand. Il a en particulier déterminé les premières mesures précises des distances des étoiles. Il émit l'hypothèse que les queues de comètes pouvaient être dues à une force répulsive émanant du Soleil.

⁹ **Fiodor Aleksandrovitch Bredikhine** (1831-1904) était un astronome russe, professeur d'astronomie à Moscou et directeur de l'observatoire de cette ville, puis de Poulkovo. Il s'est intéressé aux comètes et particulièrement à leurs queues, reprenant les idées de Bessel et définissant des lieux géométriques appelés synchrones et syndynames.

¹⁰ In *Astronomical Journal*, Vol 154, octobre 1968.

produit une répartition selon les *syndynames* (ou syndynes).

La superposition des synchrones et des syndynames permet une très bonne modélisation, dans le plan cométaire, de la queue de poussière. La forme de la queue est donnée par la réunion de ces deux ensembles de lieux géométriques (figure 2).

Les trois images suivantes montrent des photographies de la comète de Halley prises à trois dates distinctes. On a reproduit en dessous les tracés synchrones-syndynames correspondants : on notera que ces tracés modélisent bien la forme générale de la queue de poussière qui, progressivement, se referme au fur et à mesure que le plan de l'orbite de la comète change d'inclinaison par rapport à un observateur terrestre.

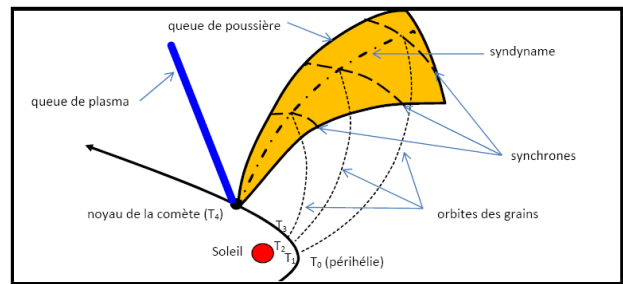
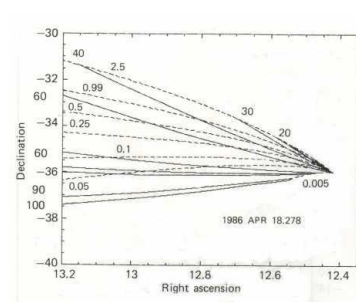
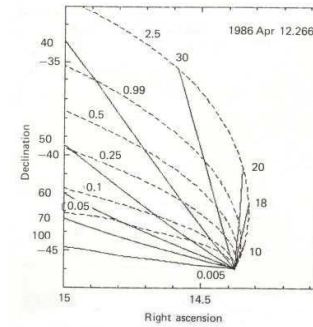
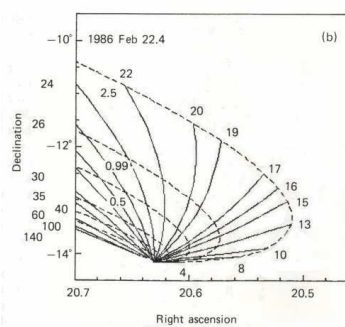
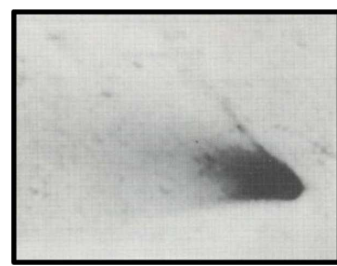
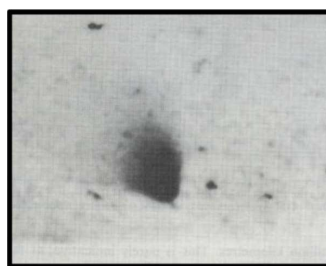


Fig.2. Des grains de même taille ont quitté le noyau aux époques T_1 , T_2 et T_3 . Ils se retrouvent sur la même syndyname lorsque le noyau est soumis à une force centrale ; il décrit une conique dont le Soleil est le foyer. Ils se retrouvent également sur trois synchrones distincts puisque partis à des dates distinctes.



H. Pederson (ESO-Wide Field CCD Camera)

Dessins Ph. Lamy et Ph. Malburet

Fig.3. Interprétations de la queue de la comète de Halley à trois dates différentes. De gauche à droite : le 22 février 1986, le 12 avril 1986 et le 18 avril 1986. Les syndynames sont représentés en lignes discontinues, alors que les synchrones sont en traits pleins.

Les anti-queues

Certaines comètes (Arend-Roland en 1956) présentent une sorte de dard, appelé anti-queue, dans la direction solaire, ce qui posa longtemps un problème d'interprétation. La théorie mécanique exposée ci-dessus permet de très simplement en rendre compte. Les grains les plus gros ne quittent le voisinage du noyau que très lentement. Ces grains s'alignent sur des syndynames très resserrés et lorsque la Terre traverse le plan de l'orbite cométaire, ceux-ci apparaissent sous la forme d'un jet relativement court, contenu dans ce plan et qui, par effet de perspective, semble dirigé vers le Soleil.

La queue de plasma

La queue de plasma, aussi appelée queue de gaz, queue ionique ou queue de type I, est constituée des gaz sublimés par échauffement solaire des glaces

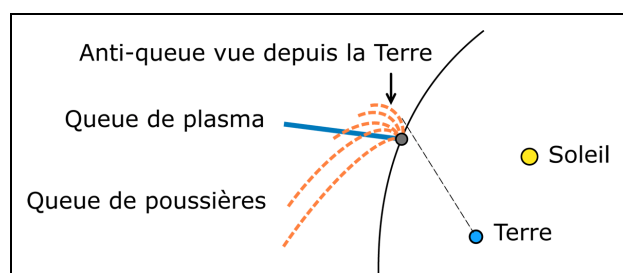


Fig.4. La comète Arend-Roland et son « anti-queue ».

Photo K.W. Schirrick, 1957

contenues dans la croûte du noyau et ionisés par l'action du rayonnement ultraviolet. Comme tout plasma, cette queue est électriquement neutre et transporte un champ magnétique.

Les ions formés au sein de la coma sont ainsi repoussés dans la direction antisolaire et donnent naissance à une queue rectiligne qui paraît filamenteuse. Ce sont les ions CO^+ (qui lui donnent sa couleur bleutée) et H_2O^+ qui dominent le spectre.

Le physicien suédois Hannes Alfvén (1908-1995) étudia les déplacements des particules électrisées dans un plasma et en déduisit le mode de formation de la queue ionique des comètes (figure 5). La tête de la comète, symbolisée par le cercle gris, pénètre dans le champ magnétique interplanétaire dont les lignes de force sont parallèles (a). Au fur et à mesure de la progression de la tête, les lignes de force se déforment (b) et (c) jusqu'à donner naissance à un faisceau qui sera la queue de plasma (d).

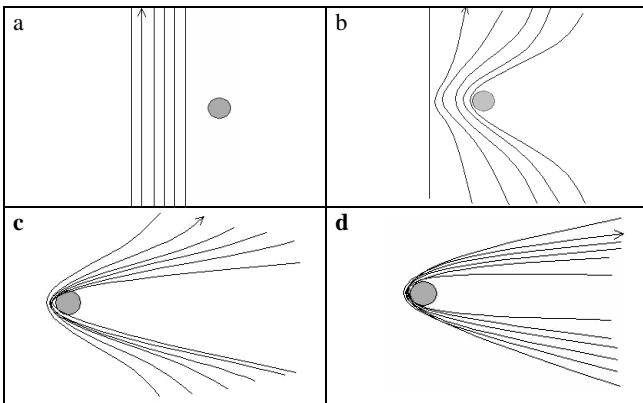
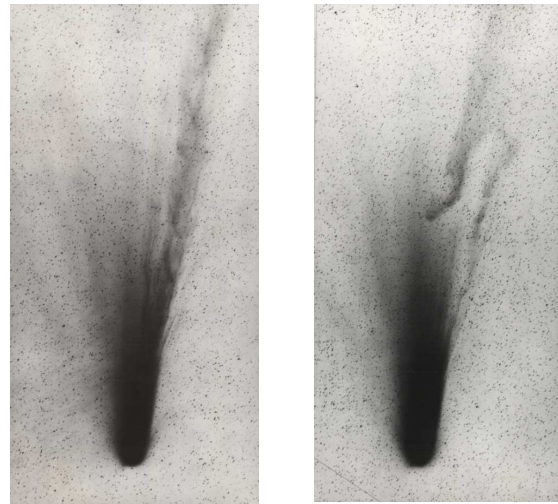


Fig.5. Hypothèses de Alfvén sur la formation de la queue de plasma d'une comète.

Comme le plasma solaire (le vent solaire), le plasma cométaire transporte un champ magnétique qui peut entrer en conflit avec le vent solaire : si les polarités de l'un et de l'autre s'opposent, la queue de plasma se coupe pour se reconstituer dans les heures qui suivent, ainsi que cela a été observé pour la comète de Halley (aussi bien lors du retour de 1910 que lors de celui de 1985-86).

On sait en effet que le vent solaire est un plasma issu du Soleil. Ce dernier est constitué par des zones de polarités opposées, séparées par un feuillet neutre et qui se développent en quittant le Soleil comme une robe de ballerine. En conséquence, lorsque le plasma solaire entre en contact avec le plasma cométaire, il peut se produire un conflit de polarité qui détermine la rupture de la queue de plasma.

L'interaction des queues de comètes avec le vent solaire a été mise en évidence en 1951 par l'astronome allemand Ludwig Biermann (1907-1986).



9 mars 1986.

10 mars 1986.

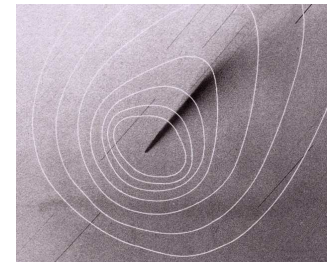
Fig.6. Comète de Halley photographée à un jour d'intervalle. On distingue nettement sur la figure (a) la queue de plasma rectiligne, sur la droite du cliché. Sur le cliché (b) la queue de plasma (dont on voit le lambeau qui se détache), se reconstitue quelques heures après la séparation du lambeau initial.

Photos H.E. Schuster, télescope Schmidt de l'ESO (Chili)

L'enveloppe d'hydrogène

Les premières observations de comètes dans l'ultraviolet depuis des fusées Aerobee, largement confirmées par des observations spatiales, ont montré l'existence d'un halo d'hydrogène atomique de très grandes dimensions (il peut s'étendre sur plusieurs centaines de millions de kilomètres) qui s'étire au-delà de la queue de plasma. La découverte dès 1970 de cette enveloppe d'hydrogène et de radicaux OH renforça l'hypothèse de la boule de neige sale proposée par F. Whipple. Elle fut confirmée par les analyses spectrales effectuées dans l'espace par les sondes spatiales.

Fig.7. Superposition des isophotes de la raie Lyman α du halo d'hydrogène sur un cliché de la comète Bennett pris à l'OHP réalisée par J.L. Bertaux, J.E. Blamont et M. Festou.



Le fonctionnement d'une comète

Éléments orbitaux

Comme tout corps appartenant au système solaire, le mouvement des comètes se fait sur une conique parfaitement définie par six paramètres qui sont :

- T , l'instant du passage au périhélie ;
- a , le demi-grand axe (ou q , distance au périhélie) ;
- e , l'excentricité ;
- i , l'inclinaison du plan de l'orbite cométaire sur l'écliptique ;
- Ω , la longitude du nœud ascendant ;
- ω , l'argument de latitude du périhélie.

Ce mouvement est parfaitement décrit par les lois de Kepler. Par convention, si $i > 90^\circ$, la comète est dite rétrograde, et directe dans le cas inverse. Ces divers éléments permettent d'en déduire notamment la période P.

Lorsqu'une nouvelle comète est découverte, il faut au moins trois observations pour déterminer une orbite osculatrice (méthode de Gauss), en faisant l'hypothèse qu'elle se trouve sur une orbite parabolique ($e = 1$). Les observations suivantes servent à déterminer une orbite plus proche de la réalité, ce qui permet de calculer la vraie excentricité et d'affiner les autres paramètres.

Le mouvement d'une comète

À l'instar des autres astres du système solaire, une comète est soumise à la force gravitationnelle du Soleil (problème des deux corps). En général elle décrit une orbite elliptique. Il peut cependant advenir que la comète subisse l'action gravitationnelle d'une planète massive, notamment avec Jupiter. Le mouvement est alors perturbé : la valeur de l'excentricité change. Si celle-ci devient supérieure à 1, la trajectoire est une hyperbole et la comète quittera le système solaire.

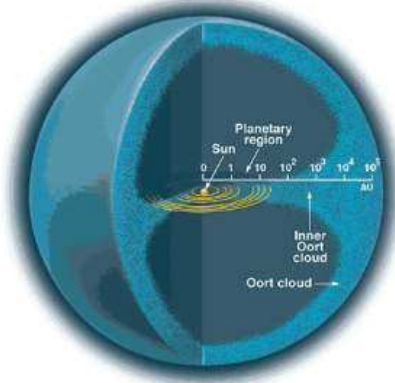
Cependant, on constate souvent, dans le cas des comètes périodiques, de forts écarts entre les paramètres déjà connus et ceux lors du retour suivant. En effet, les forces de gravitation ne sont pas les seules à agir. On sait que le dégazage d'une comète libère du gaz et des poussières. Ce phénomène provoque un véritable effet de réaction, modifiant parfois de manière conséquente le mouvement. Cet effet porte le nom de « forces non gravitationnelles ». Bien entendu, rien ne permet de les prévoir : il y a donc toujours des incertitudes quant aux variations que va subir un noyau cométaire au cours de son périple.

Le nuage d'Oort

Étudiant 46 comètes en 1950, l'astronome néerlandais Jan Hendrik Oort (1900-1992) a formulé l'hypothèse que les comètes pourraient provenir d'une région située à la limite externe du Système solaire, dans une vaste enveloppe comprise entre 30 000 et 100 000 UA du Soleil. Pour ce faire il a étudié la distribution des inverses des demi-grands axes et constaté un pic de valeurs lorsque a est supérieur à 20 000 UA. Bien qu'aucune observation directe de ce nuage d'Oort n'ait pu être réalisée, cette hypothèse est actuellement bien admise par les spécialistes.

Le mécanisme par lequel un noyau de comète quitte les parties lointaines du nuage d'Oort est assez mal connu. L'une des hypothèses serait une perturbation d'ordre gravitationnel. Une étoile « proche » pourrait avoir un effet perturbateur sur les noyaux

les plus rapprochés, ce qui aurait pour effet de projeter ce noyau en direction du Soleil. Lorsque celui-ci arrive à proximité de la Terre, on assiste à la venue d'une comète dite « nouvelle ».



Credit ESO

Fig.8. Représentation du nuage d'Oort selon une échelle logarithmique. Les cercles jaunes sont les orbites des planètes.

La fin d'une comète

La durée de vie d'une comète est grande. Cependant on a assisté à des « fins » de comètes.

Cela a été le cas pour la comète West. Lors de son passage au périhélie, les forces de cohésion du noyau n'ont sans doute pas été suffisantes et le noyau s'est fragmenté après : on a assisté à sa disparition en direct.

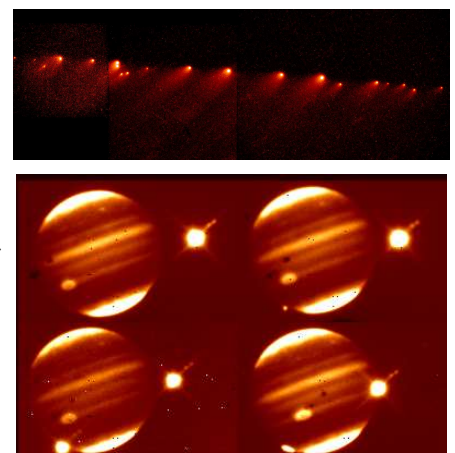
De la même manière, le noyau de la comète Shoemaker-Levy après être passé à proximité de Jupiter, s'est fragmenté en petits éléments le long de l'orbite. Lors du retour suivant, ces fragments ont pénétré dans l'atmosphère de Jupiter, y provoquant de véritables petits cataclysmes dont la marque est restée quelques temps dans la haute atmosphère.

La sonde Soho, dont l'objectif était d'étudier la couronne solaire en continu, a assisté, ici encore en direct, au véritable plongeon mortel de petites comètes dans le Soleil.



Source : New Mexico State University.

Fig.9. Fragmentation du noyau de la comète West (mi-avril 1976).



HST

JPL/NASA

Fig.10. Fragmentation du noyau de la comète Shoemaker-Levy 9. Sur le cliché inférieur, on assiste à l'éclat de lumière produit par la pénétration des fragments de cette comète dans l'atmosphère de Jupiter (16 juillet 1994).