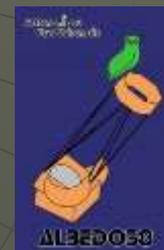
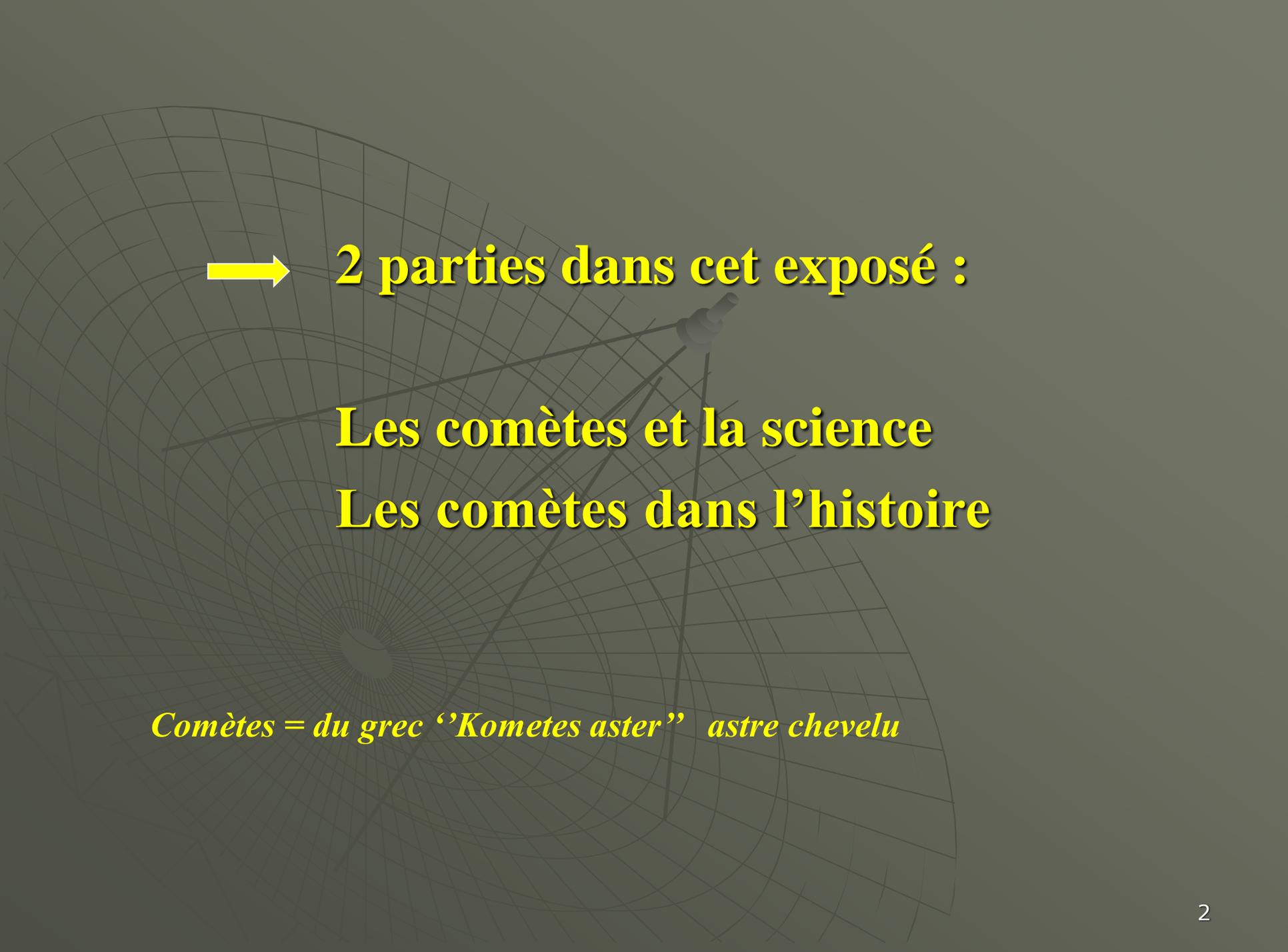


Les Comètes

objets de science et objets historiques



J-L Mainardi
Septembre 2020
Albédo 38



→ **2 parties dans cet exposé :**

Les comètes et la science

Les comètes dans l'histoire

Comètes = du grec "Kometes aster" astre chevelu



1ère partie: **Les comètes et la science**

Les comètes, en tant que phénomènes célestes inattendus , étranges et inexpliqués, ont fait l'objet de crainte et d'effroi entraînant des comportements irrationnels voir délirants.

C'est à partir du XVI^{ème} siècle que le développement de la science a permis d'expliquer l'apparition des comètes et d'en désamorcer la charge émotionnelle.

Soudaineté d'apparition et apparences variées dans le ciel !



Neowise



Hyakutake



Lovejoy



Holmes



Lulin



Mac Naught



Swan

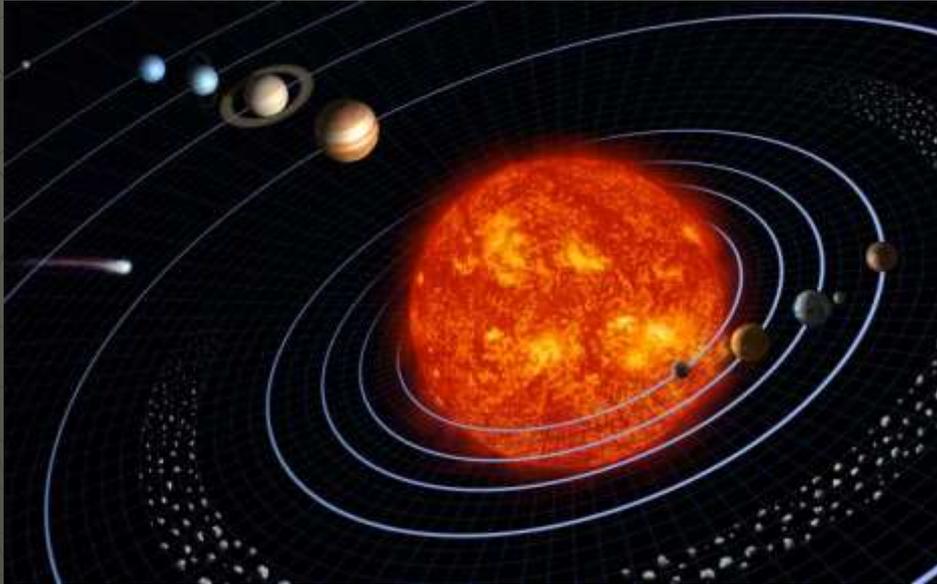


Hale-Bopp



Halley(1986)

Tout vient de la forme de la trajectoire et du Soleil



Orbites des planètes

= ellipses pratiquement circulaires
(excentricités proche de 0) contenues dans le plan écliptique

Orbites des comètes

= ellipses très aplaties
(excentricités de 0,6 à 1) inclinées sur l'écliptique



La dénomination d'une comète

Nomenclature précise fixée par l'IAU : 2 catégories de comètes

Comètes non-périodiques (ou période > 200 ans)

= lettre C/ suivi de l'année + numéro de quinzaine dans l'année (A et B pour Janvier, C et D pour février ...)+ numéro d'ordre dans la quinzaine

Exemple : C/1995 O1 = Hale-Bopp

(1ère comète de la 2ème quinzaine du mois de Juillet)

C/2020 F3 = Neowise

(3 ème comète de la 2ème quinzaine du mois de Mars)

Comètes périodiques

= lettre P précédée d'un numéro d'ordre et suivi du nom du découvreur

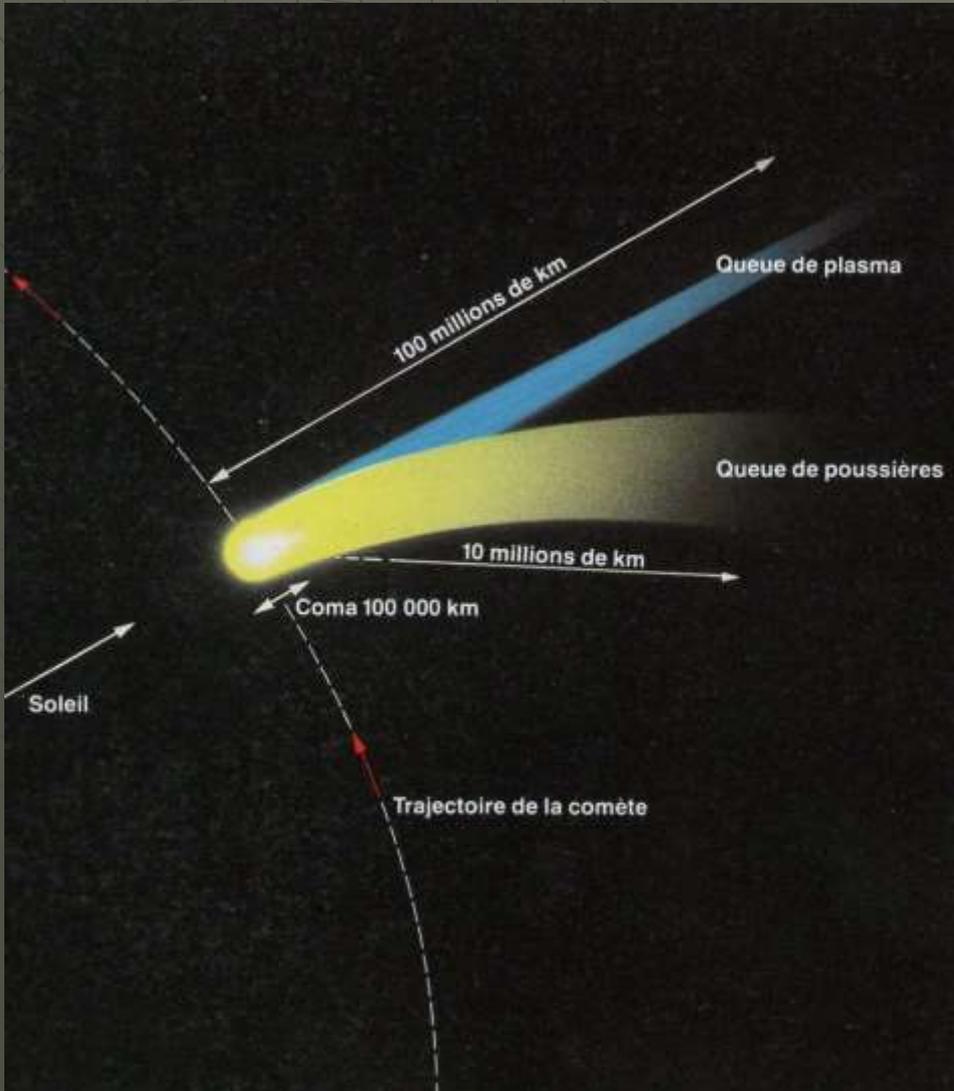
Exemple 1P/ Halley = comète de Halley (76 ans)

2P/Encke (3,3 ans-comète avec la plus petite période)

Remarque : si une comète périodique a disparu et ne réapparaît plus alors le P est remplacé par un D

Exemple : 3D/ Biela (Période = 6,65 ans-observée 5 fois)

Morphologie type

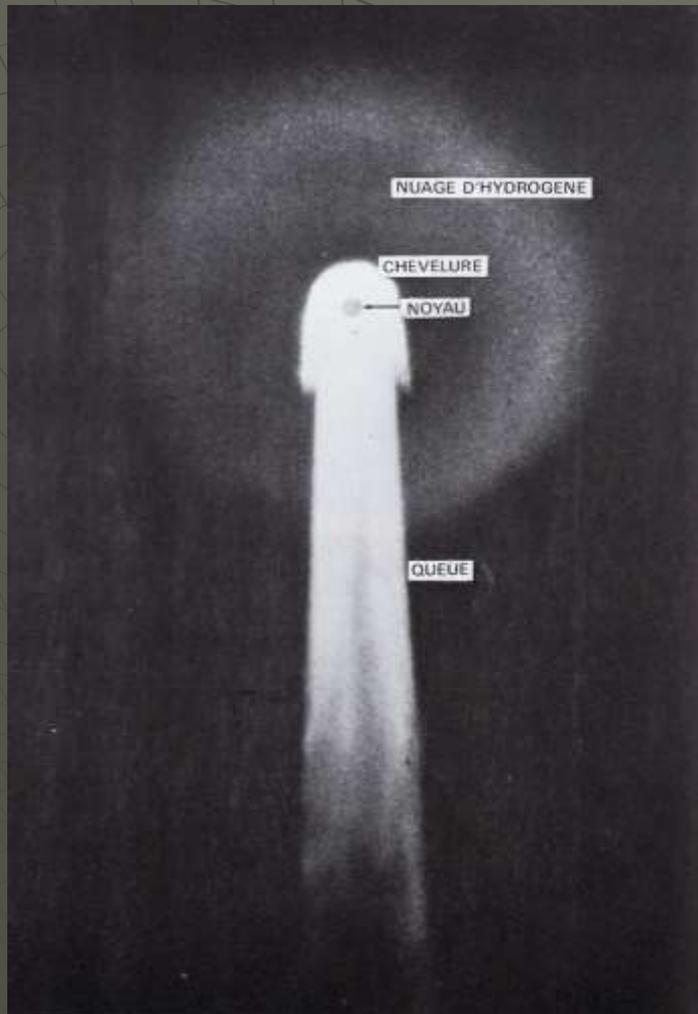


La Tête



Les 2 queues

Les parties constitutives



La tête de la comète :

- Noyau
- Chevelure
- Nuage d'hydrogène

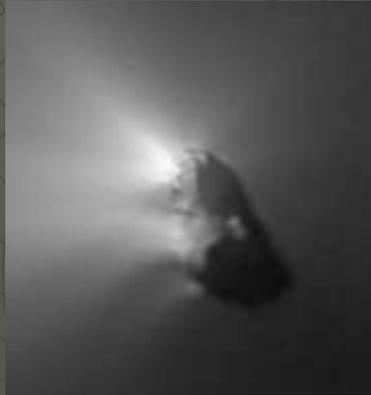
La ou les queues de la comète :

- Queue de poussière
- Queue ionique

Retenir que le soleil est le moteur de l'activité cométaire !

Le noyau d'une comète

- 5 noyaux de comètes ont été photographiés par des sondes spatiales
- Les noyaux cométaires tournent sur eux même (1/10 éme à 2 tours /jour)
- Les noyaux de comètes sont très sombres : albédo de l'ordre de 0,05



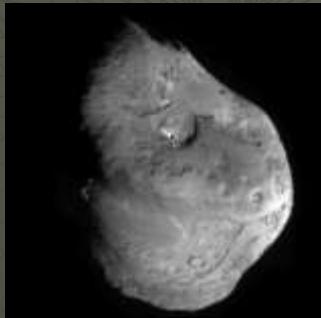
Halley -16 x 8 x 7 km
(Giotto-1986)



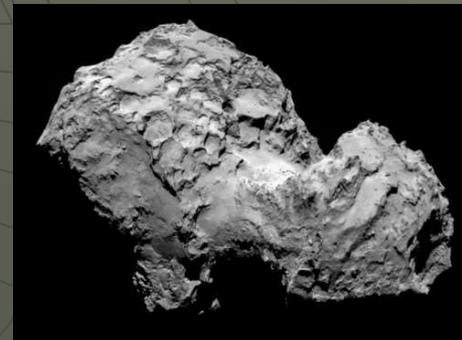
Borrelly -8 x 3 x 3 km
(Deep Space-2001)



Wild 2- # 5 km
(Stardust 2004)



Tempel 1- # 6,5 km
(Deep-Impact 2005-Stardust 2011)



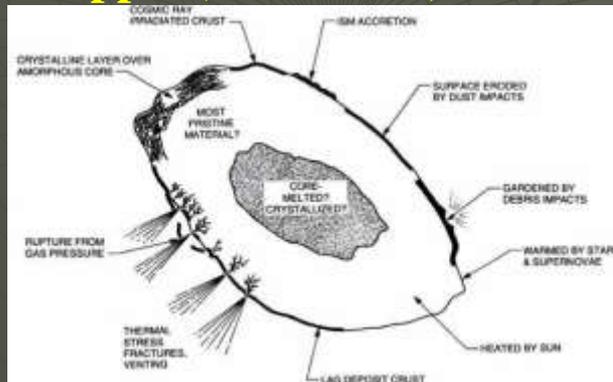
Churyumov-Gerasimenko
(Rosetta-2014)- 7 x 3 x 2 km

La Boule de neige sale de Whipple (1950)

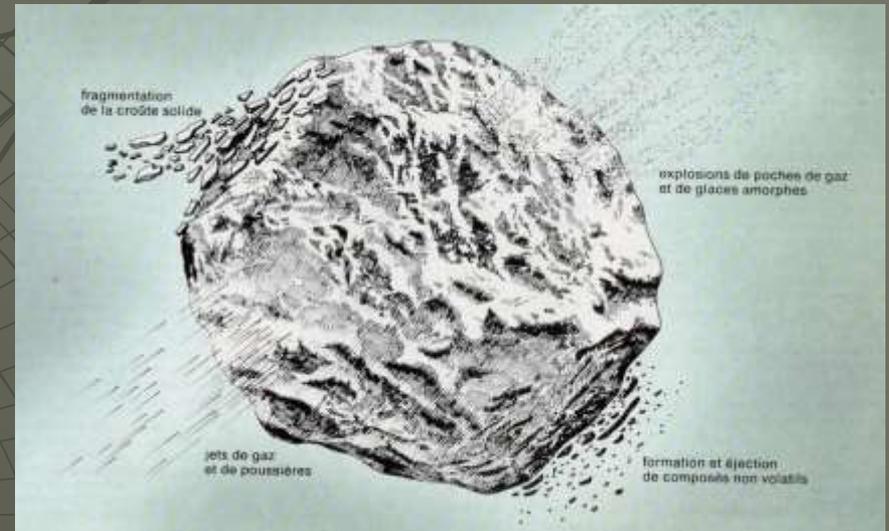
- Modèle de la ” boule de neige sale ” (1950)= avancée décisive dans la compréhension des comètes et de leur fonctionnement
- Selon ce modèle, les noyaux des comètes sont constitués d'un ensemble cohérent de glaces solides (H₂O-CO₂) de molécules chimiques adsorbées et de particules rocheuses



Fred Whipple (1906-2004) et son modèle



Modèle actualisé



- La difficulté d'étude des comètes provient de la méconnaissance de la composition précise des *molécules -mères* c'est-à-dire des espèces chimiques présentes dans le noyau inactif

Les données de Rosetta sur 67P

Masse négligeable
(Terre= $5,98 \cdot 10^{24}$ kg)

Dim # 6 x 3 km

Le noyau des comètes tourne sur lui-même

Texture Meringue ?

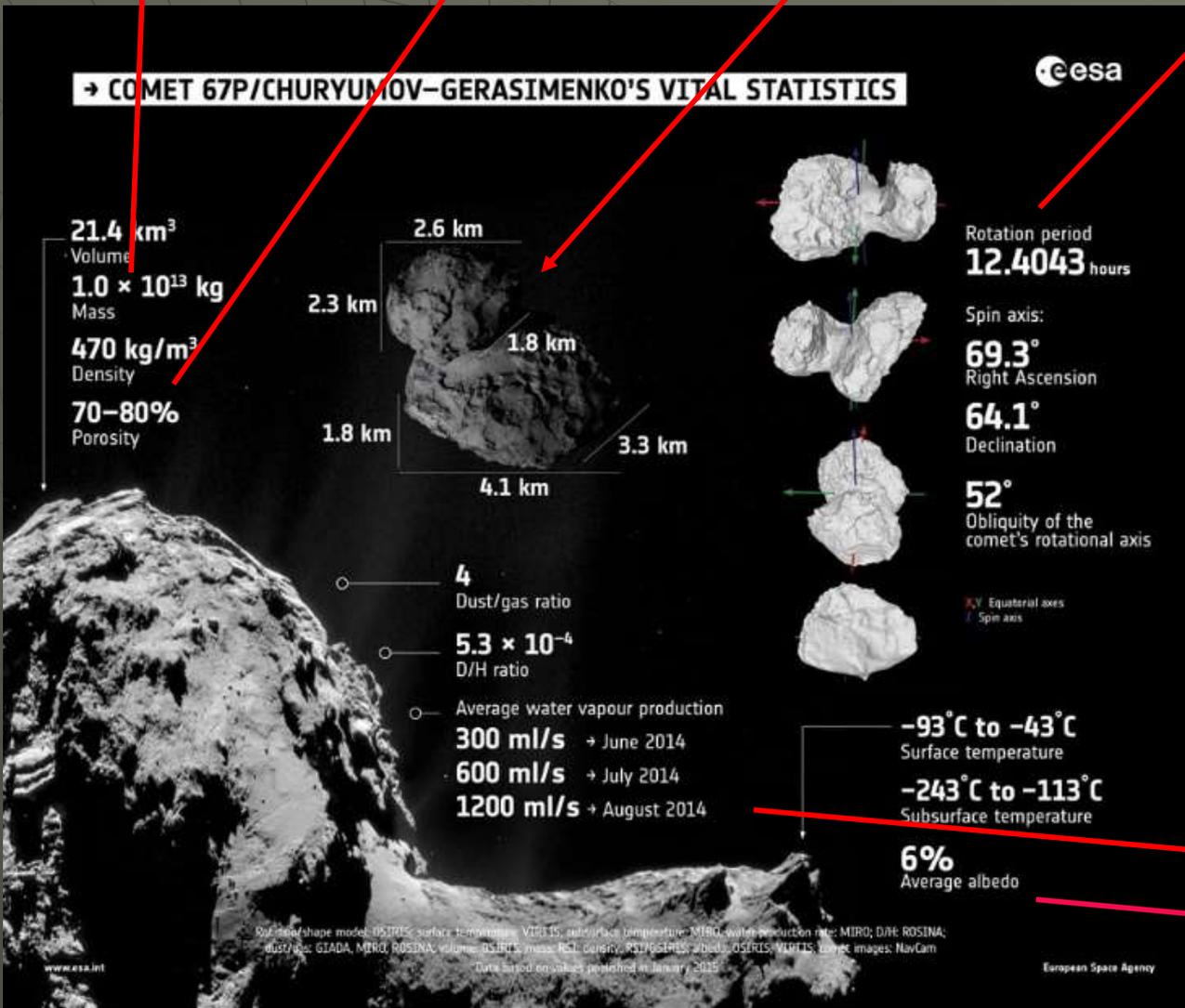
Composition:
Les molécules- mères:

Gaz:
H2O majoritaire
CO et CO2
NH3-CH4-CH3OH
CH2O-H2S-HCN-SO2-CS2

+ macromolécules organiques
CHON
+ poussières silicatées

1,2 kg d'eau par seconde

Albédo = 0,06
Corps très sombre voir noir



Noyau cométaire versus Astéroïde



Comète 67/P- Churyumov-Gerassimenko :
(6 x 3 km)

Essentiellement glaces + molécules
organiques + poussières silicatées

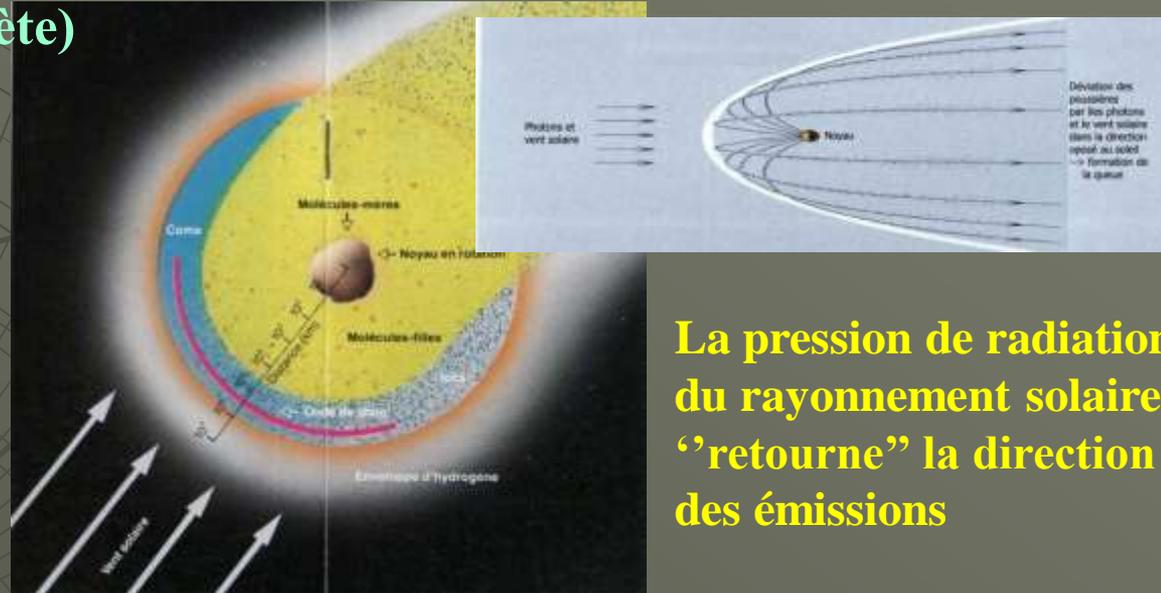


Astéroïde Itokawa (0,6 x 0,3 x 0,3 km)

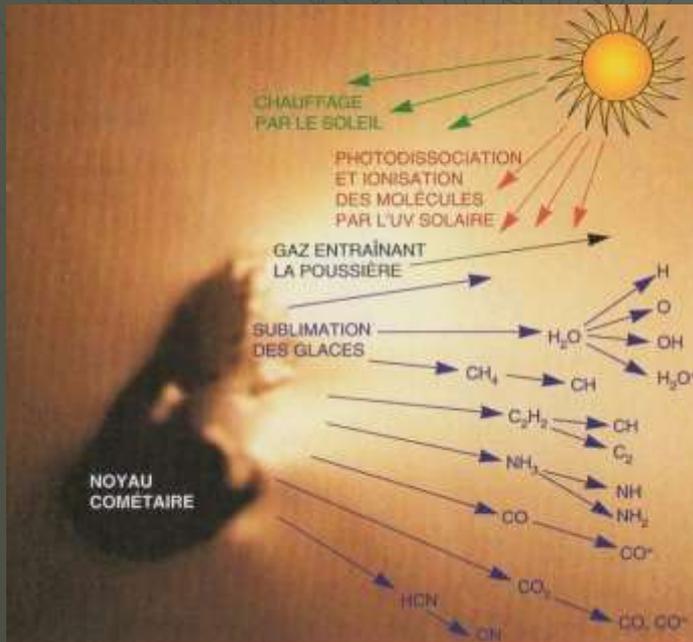
Essentiellement roches silicatées et
régolite

Se rapprochant du Soleil, le noyau s'échauffe et la Chevelure (Coma) apparait

- Elle occupe un volume plus ou moins sphérique de 10^5 km autour du noyau (sorte d'atmosphère de la comète)

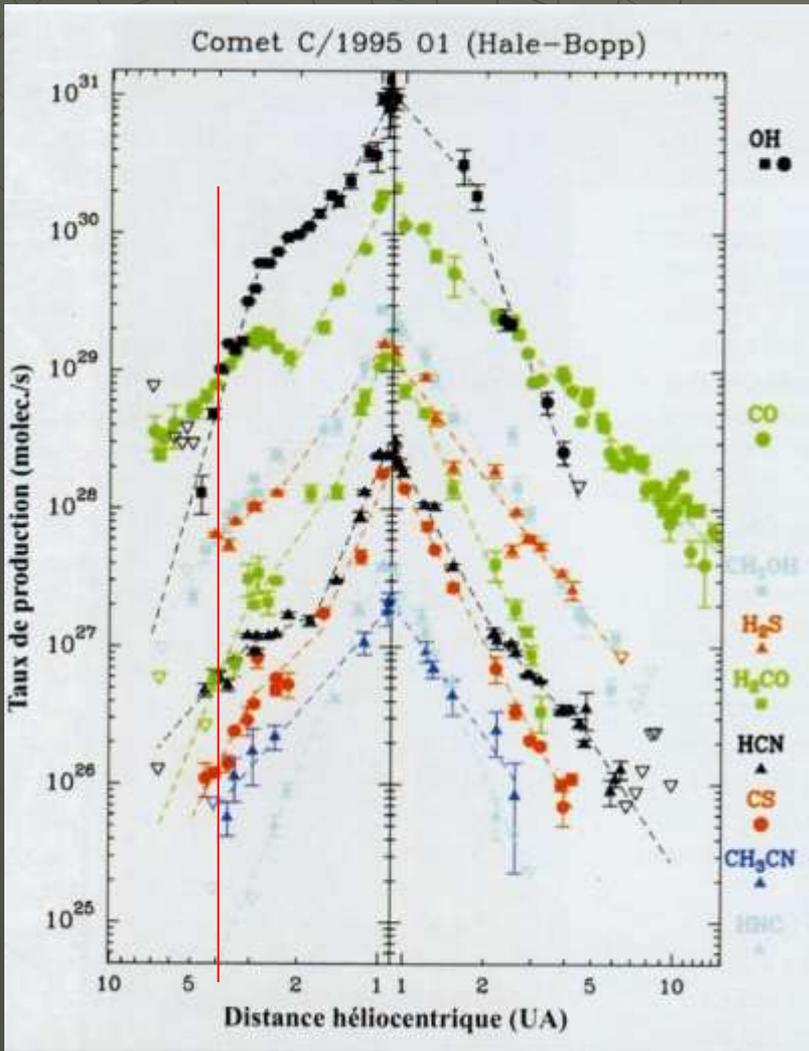


La pression de radiation du rayonnement solaire "retourne" la direction des émissions

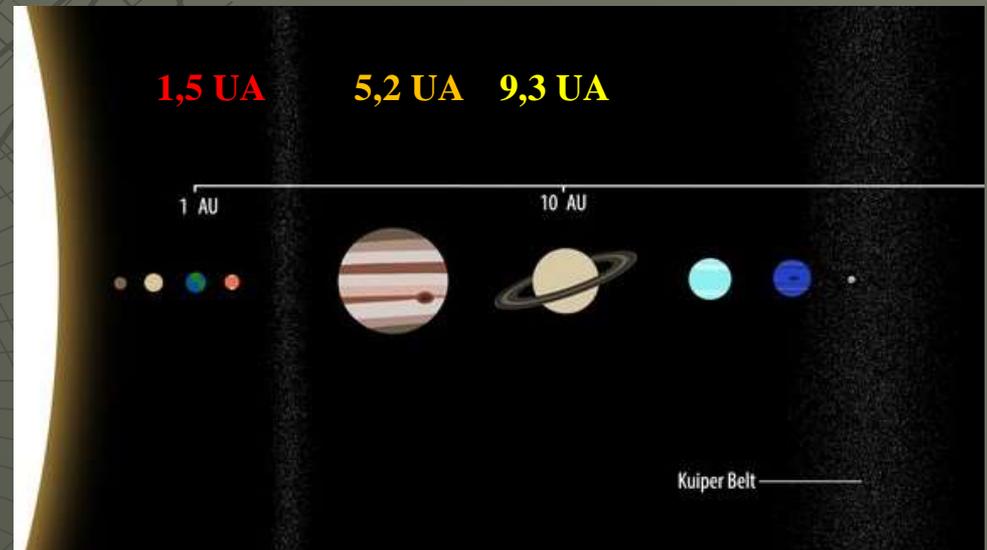


- Le rayonnement solaire entraîne la **sublimation** des glaces, ce qui libère les molécules mères et les poussières minérales contenues dans les glaces
- Sous l'impact des rayons UV les molécules- mères sont photo- dissociées et photo- ionisées et donnent les molécules -filles :
- En particulier: l'eau donne OH et H*
CO et CO2 donnent CO⁺
C2H2 donne C2

Taux de production des différentes molécules –filles versus distance au soleil



- Le taux de production des différentes molécules dépend de la distance au soleil :
- Par exemple la production de OH devient prédominante à partir de 4 UA

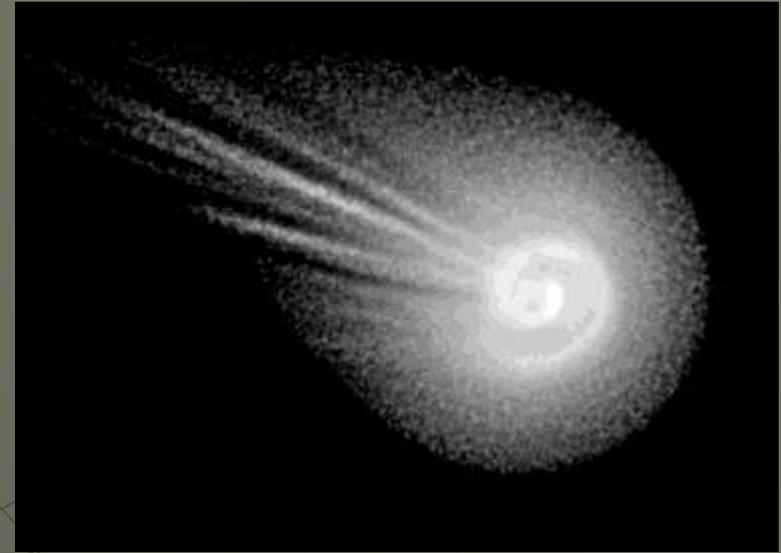


- Il s'ensuit que les comètes ne deviennent visibles qu'au niveau de Jupiter /Saturne



Comète 17P/Holmes (de droite à gauche : 1, 11 et 18 novembre 2007) - Photo Michel Nodding

Comète 17P /Holmes

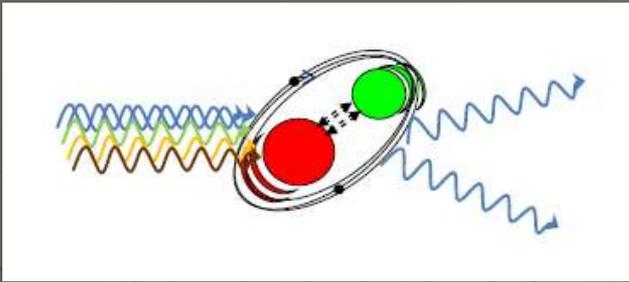


Comète Neowise C/2020 F3

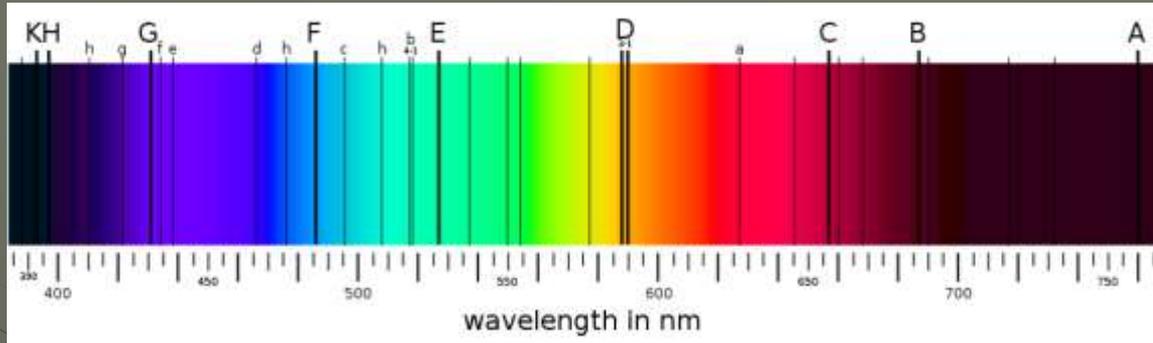
24 Juillet 2020

[Télescope 82 cm-60 images CCD de 10 s
P Martinez- Obs Beslesta-Ariège]

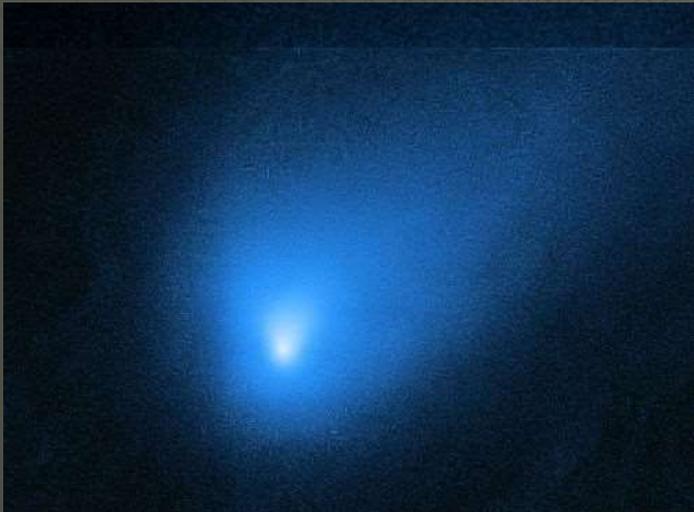
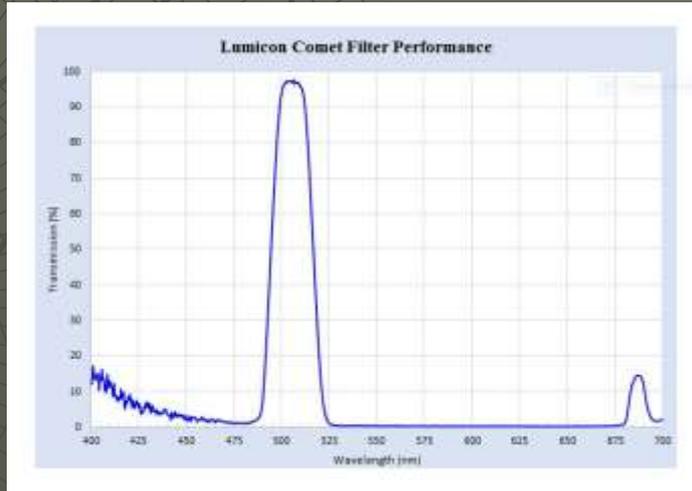
- **La taille et l'aspect de la chevelure peuvent varier au-cours de l'approche de la comète vers le Soleil =variation du taux de production des molécules dépendant des particularités de constitution des comètes et de la rotation du noyau**



La fluorescence



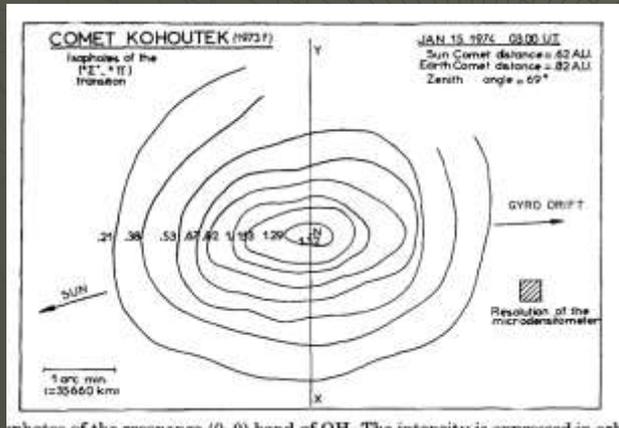
Chevelure verte = fluorescence des composés C2
 = Raies de la bande de SWAN (511 et 514 nm)



Chevelure bleue = fluorescence des ions CO⁺
 (427 nm)

Le halo d'hydrogène constitué d'atomes H

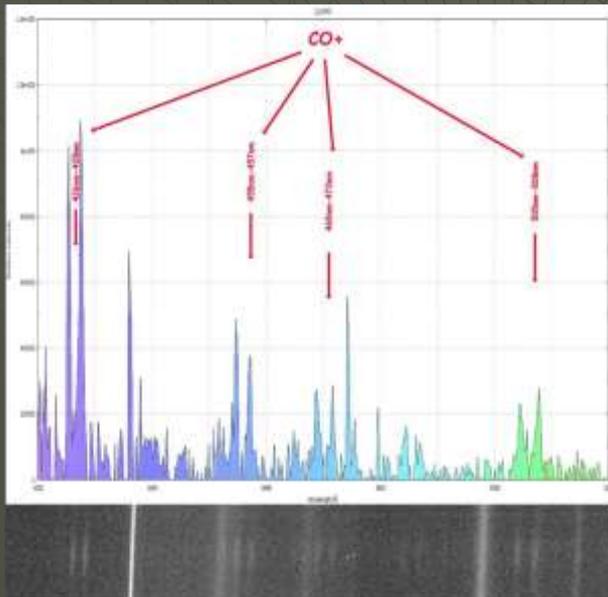
- Il entoure la chevelure d'un halo sphérique de diamètre $\approx 10^7$ km
- Ce halo n'est visible qu'en UV donc on ne peut pas le voir à l'œil nu



La queue bleue rectiligne de plasma ionique

Longueur # 10^7 km- queue de Type I

- La couleur est due principalement à la fluorescence des ions CO^+ (427 nm) et H_2O^+ formant la queue ionique



- L'orientation de la queue ionique est déterminée par le vent solaire magnétisé - (flux de protons - électrons et ondes d'Alfven) en provenance du Soleil (# 400 km/s)
- Les inhomogénéités dans les queues ioniques proviennent des variations de l'activité magnétique solaire

La queue de poussière -queue Type II jusqu' à # 10⁸ km de longueur

- C'est la pression de radiation de la lumière solaire sur les grains cométaires qui détermine la forme et l'extension de la queue



Hale-Bopp C/1995 O1



Mac-Naught C/2006 P1

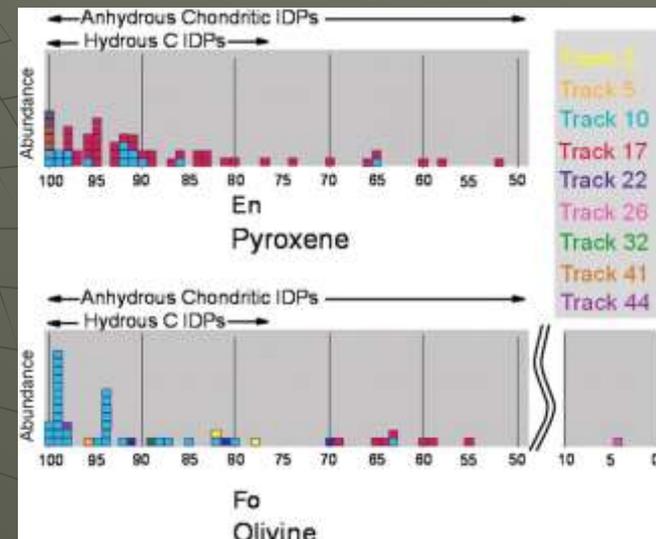
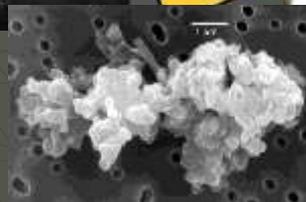
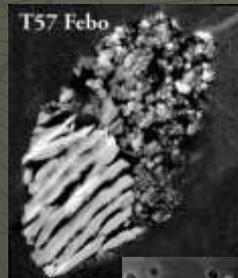


Neowise C/2020 F3

Poussières cométaires : dimension jusqu'à quelques mm minéraux silicatés (Olivine et Pyroxène) qui sont éclairés par les rayons du Soleil (spectre continu)



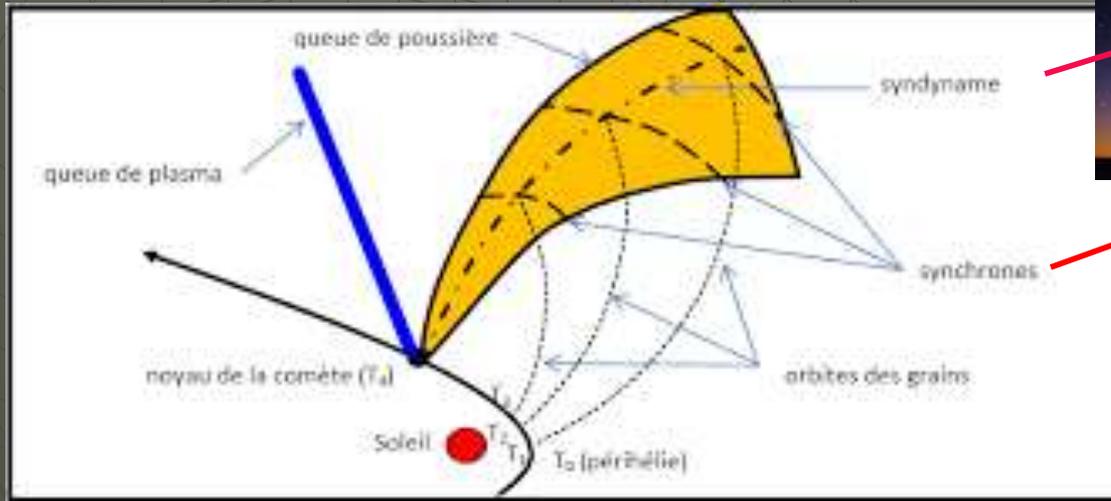
Traces dans l'aerogel



Comète Wild 2-Stardust

L'orientation de la queue de poussière par rapport au Soleil

- Ce sont surtout les particules de taille micrométrique qui subissent la pression de radiation



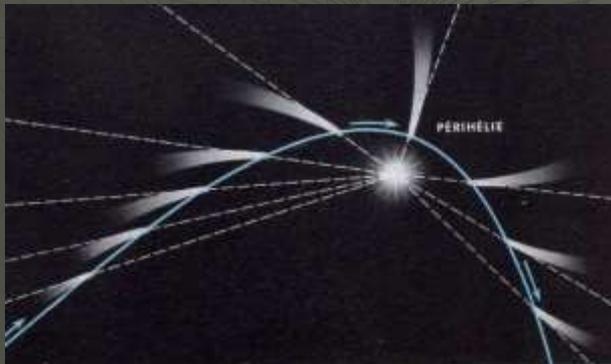
synchrones
de Mac-Naught
C/2006 P1



Syndynames de
Bennett-
C/1969 Y1



Comète Arend-Roland
C/1956 R1



- La queue est toujours à l'opposé du Soleil

- La présence d'une anti-queue qui semble dirigée vers le soleil est du à un effet de perspective quand la comète traverse l'orbite de la Terre et à l'accumulation de particules millimétriques restant à proximité de l'orbite de la comète



Météore

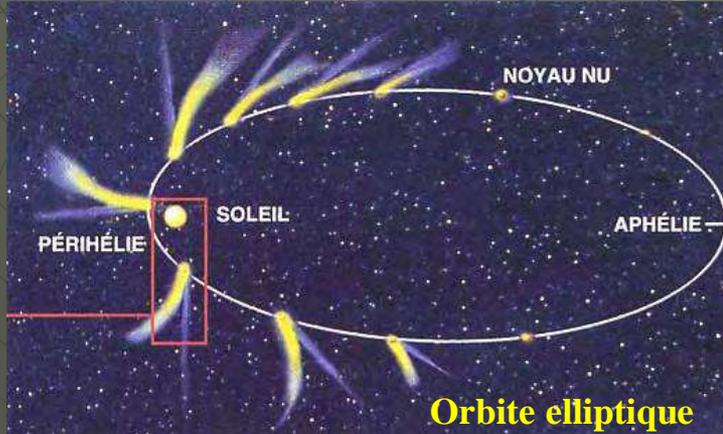


Comète

Sens du mouvement ?

L'orbite des comètes

- Les comètes font partie du Système Solaire: elles suivent les Lois de Kepler: les orbites peuvent être elliptiques (majorité), paraboliques ou hyperboliques



[Excentricité e :
cercle $e = 0$ - ellipse $e < 1$ - parabole $= 1$ - hyperbole $e > 1$]

- Les orbites sont elliptiques plus ou moins allongées et donc de plus ou moins longues périodes :

$$a^3 / T^2 = 1$$

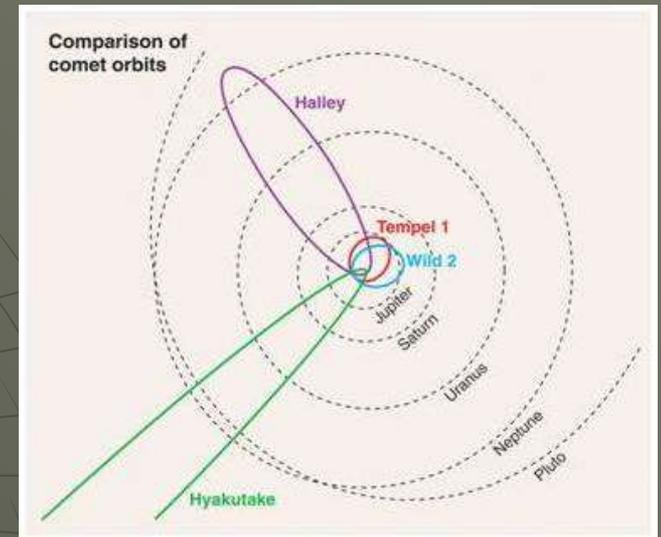
a = demi-grand axe en UA et T = période en ans

Exemple : Comète de Halley

$T = 76$ ans et $a = 18$ UA (2,7 milliards de Km)

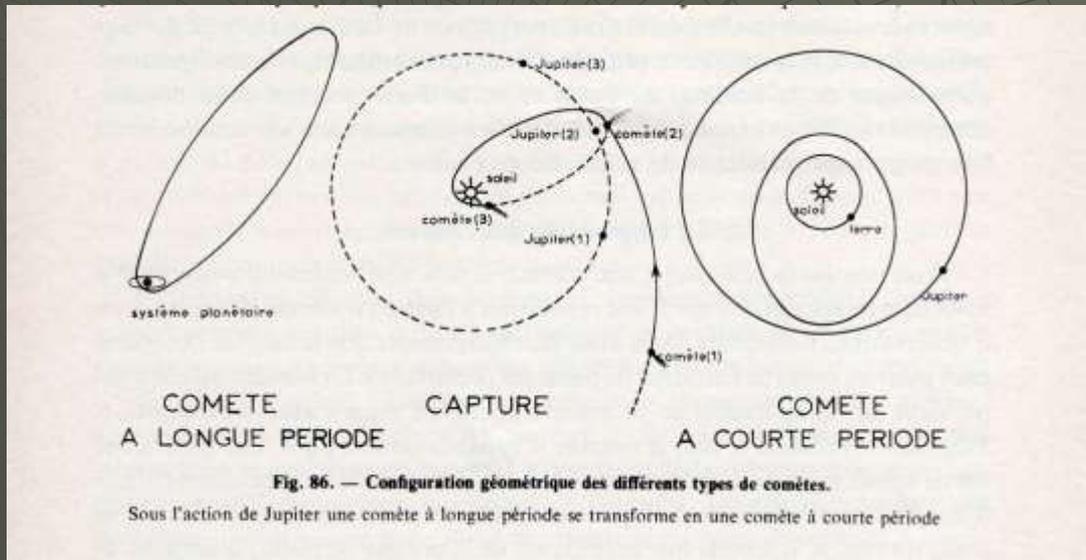
- Elles orbitent le plus souvent en dehors du plan de l'écliptique
- C'est la comète D/Lexell (découverte par Messier en Juin 1770) qui s'est approchée le plus de la Terre : $0,0146$ UA = 2,2 millions de km $-m = -1$)

Les comètes passent la majorité de leur vie invisibles car loin du Soleil : elles ne sont pas réchauffées et ne dégazent donc pas !



Modification de l'orbite d'une comète

- Les comètes ont une masse négligeable (par rapport aux planètes) et sont très sensibles aux forces gravitationnelles
- En passant à proximité d'une planète géante (Saturne-Jupiter), l'orbite d'une comète sera modifiée par les effets gravitationnels (capture):
 - De comète à période longue elle peut devenir comète à période courte
 - D'orbite elliptique elle peut acquérir une orbite hyperbolique et quitter le Système Solaire
- Les émissions des jets cométaires peuvent aussi avoir un "effet fusée " et influencer sur les caractéristiques de l'orbite décrite



Comète 67P

Vie et Mort d'une comète

- A chaque passage près du Soleil (périhélie) une comète perd de la masse : environ 5 millions de tonnes de glaces de poussières et de gaz par passage (perte de 1m d'épaisseur) :
- En conséquence elle devient de moins en moins active (épuiement des matières volatiles) donc de moins en moins visible : *exemple comète Halley*

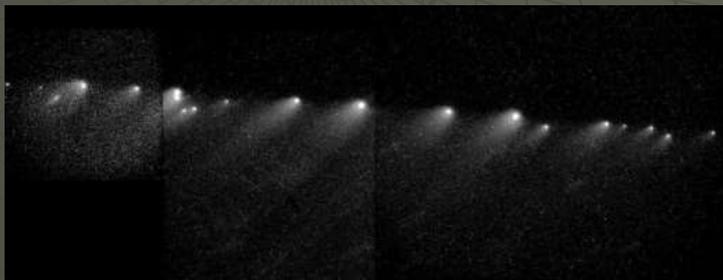


Halley 1910



Halley 1986

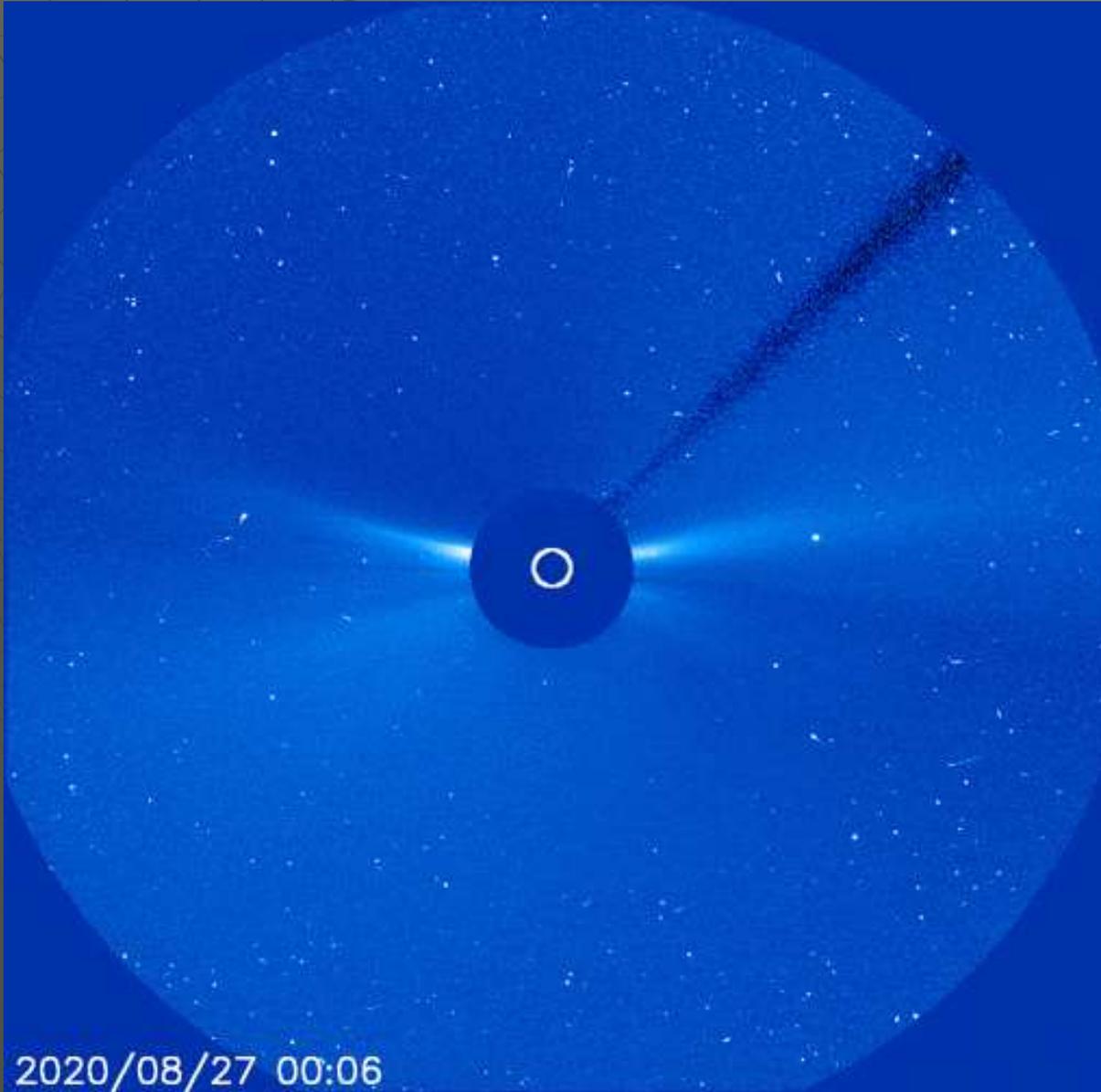
- Par ailleurs lors du passage près d'une planète géante ou à proximité du Soleil les forces de gravité peuvent briser une comète par effet de marée (comète = "meringue")



Comète Shoemaker-Levy D/1993 F2- impact 16 juillet 1994-



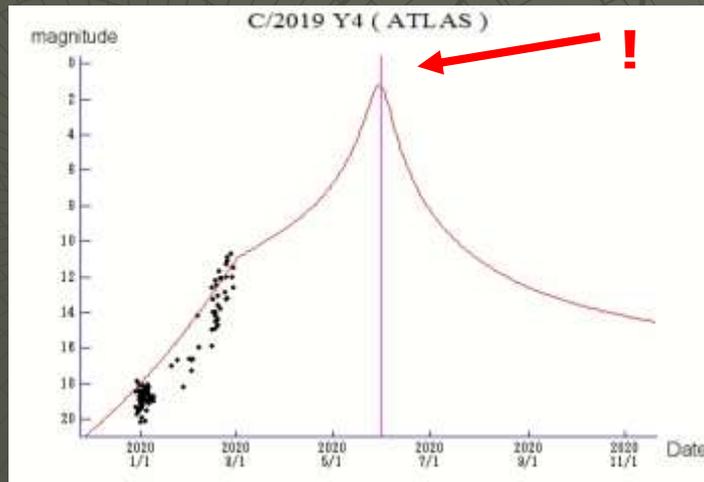
Vie et Mort d'une comète



**Exemple d'une comète
qui passe très près
du Soleil :**

*Comète sun-grazer
ou comète du groupe de
Kreutz
(Périhélie <0,01 UA)*

2020/08/27 00:06



Brisure en plusieurs morceaux

Comète Atlas C/2019 Y4 –fragmentation en plusieurs morceaux



Comète West-C/1975 V1- (1975-1976) : $m_v = -1$
la comète s'est brisée en 4 morceaux en 1976 au périhélie

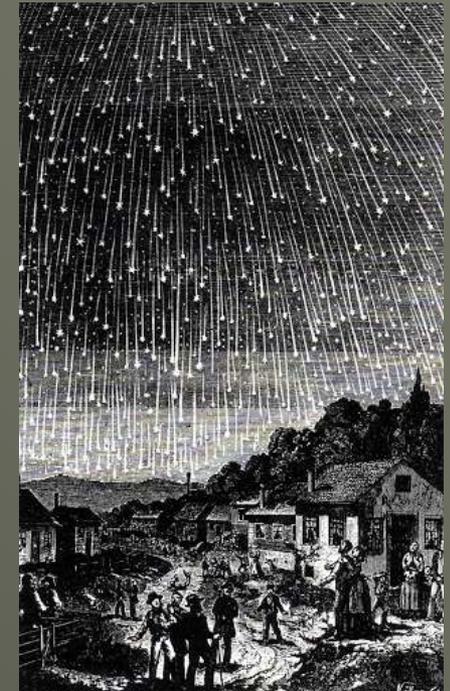
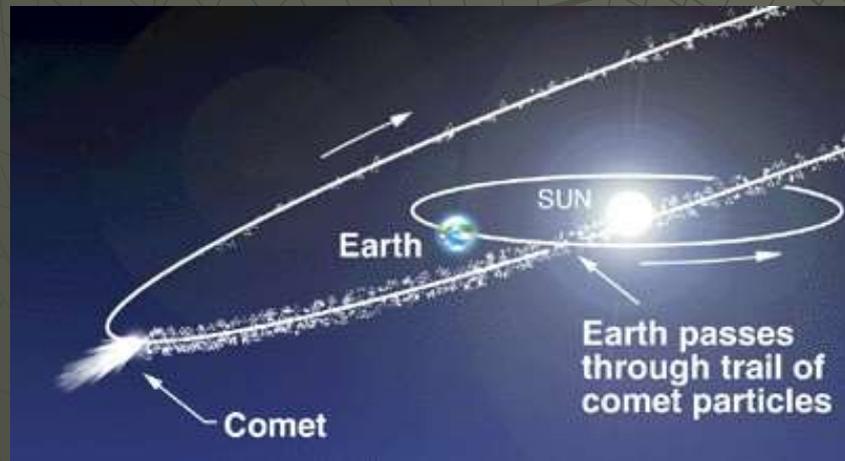


Figure 4. En mars 1976, le noyau de la comète West (1975 VI) a éclaté. Cette séquence de cinq photographies est le plus bel exemple à ce jour d'un phénomène, certes peu fréquent, mais qui a entraîné la désintégration de plusieurs comètes. (Clichés A.B. Murray et G.E. Koscielski, observatoire de l'université du Nouveau-Mexique.)

Les étoiles filantes

- * Tout le long de son orbite une comète disperse des débris rocheux
- * Quand la Terre croise une orbite de comète, les trainées de particules rocheuses pénètrent dans la haute atmosphère (80 à 100 km) et brûlent : ce sont les étoiles filantes

Exemple : Les Perséides proviennent de la comète 109P/ Swift-Tuttle



La comète 3D/ Biela a disparu mais une pluie d'étoiles filantes a eu lieu quand la Terre a croisé son orbite en 1872

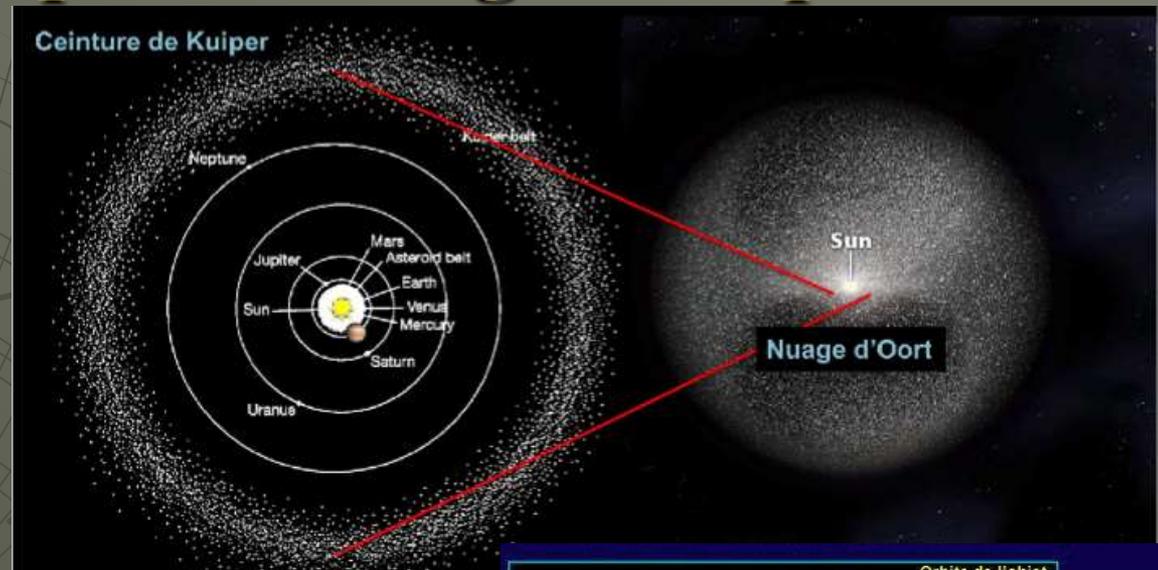
La lumière zodiacale

- Les composantes les plus fines des poussières cométaires (< 2 microns) sont très sensibles à la pression de radiation du rayonnement
- Elles sont dispersées facilement hors de l'orbite cométaire et participent en partie à la constitution de la lumière zodiacale



Cône de Lumière zodiacale dans le plan de l'écliptique

Les 2 "Réservoirs" de comètes : Ceinture de Kuiper et Nuage de Öpik-Oort



La Ceinture de Kuiper (anneau plat)

(orbite de Pluton - 40 à 100UA)

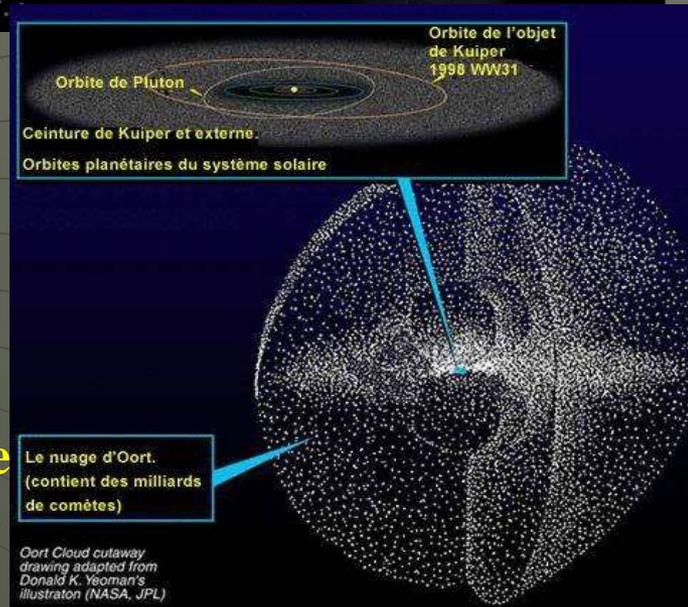
= l'origine des comètes périodiques

Le Nuage de Öpik-Oort (sphérique)

(20 000 à 100 000 UA ou 0,5 à 1,5 AL)

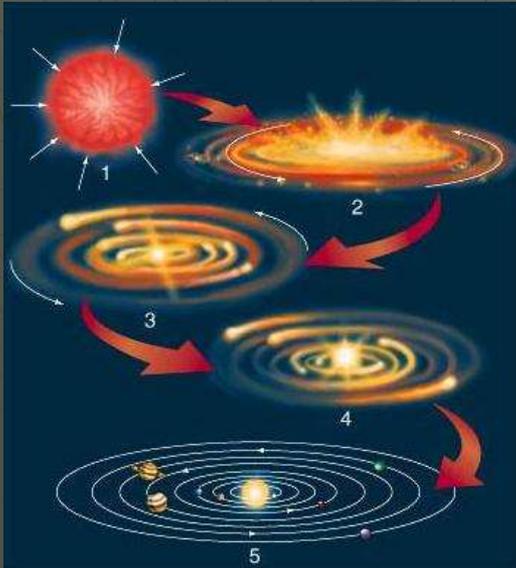
3 masses terrestres mais plusieurs milliards de comètes !

= origine des grandes comètes spectaculaires

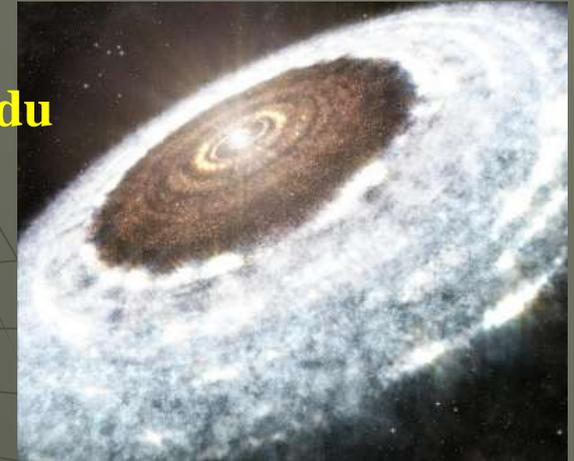


Les comètes , témoins des premiers instants du système solaire

- Les comètes sont des objets de petite taille, maintenues très loin du Soleil jusqu'au moment où, déstabilisées , elles tombent vers le Soleil.
- Ce sont en quelque sorte des "fossiles" des premiers temps du système solaire, à peine "sortis du congélateur" où elles "dormaient" depuis plus de 4 Ga.



Les comètes se sont formées au tout début de la formation du Système solaire, au niveau de Neptune/Uranus mais le jeu des effets gravitationnels les a rejetées plus loin vers Kuiper et Oort)



Les comètes renferment la matière primitive avec laquelle le Système Solaire s'est créé il y a 4,7 milliards d'années

Les comètes et l'eau sur Terre

Il y a plus de 4,5 milliards d'années la Terre s'est formée par accrétion et est passée à l'état de magma : il n'y avait pas d'eau sur Terre !



Question fondamentale :

D'où vient l'eau sur Terre?

Des Astéroïdes?

Des Comètes ?

De Theia ?



Sur Terre Eau = 71 % surface

Le rapport D/H (eau lourde Deutérium/ eau légère)

D/H Océan terrestre = $1,56 \cdot 10^{-4}$

D/H Météorite (Chondrite) = $1,4 \cdot 10^{-4}$

D/H Comètes Nuage de Oort = $2,9 \cdot 10^{-4}$

D/H Comètes Kuiper = $2 \cdot 10^{-4}$

D/H Churyumov = $5,3 \cdot 10^{-4}$

L'eau provient-elle des astéroïdes ou des comètes ?

on ne sait toujours pas !

La collision Comète-Terre ?

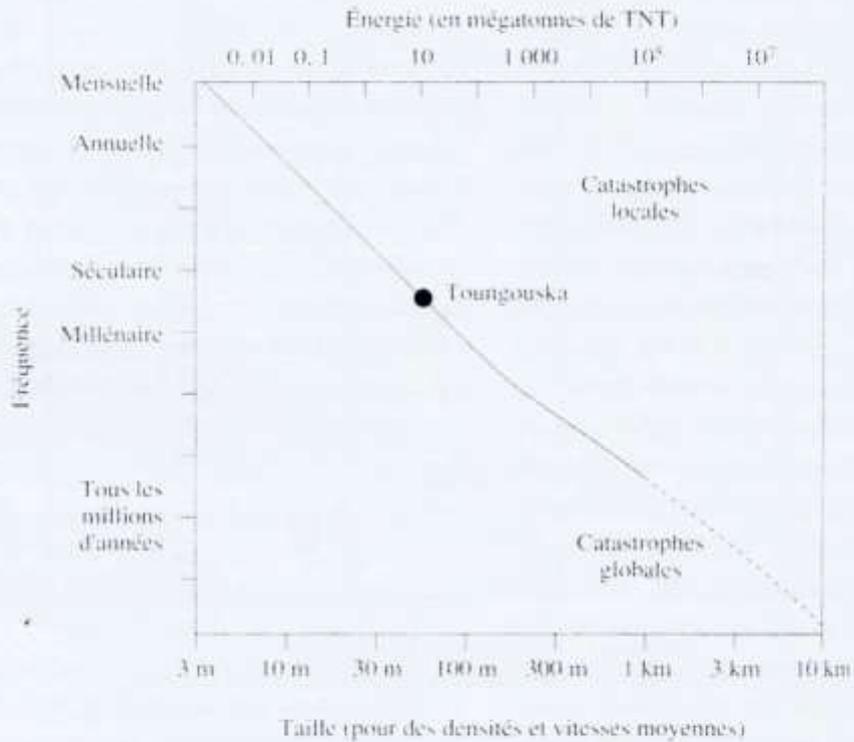
- Oscillation du Soleil autour du plan galactique
-extinction cyclique du vivant sur la Terre –traversée de nuages galactiques-déstabilisation du Nuage de Oort ?

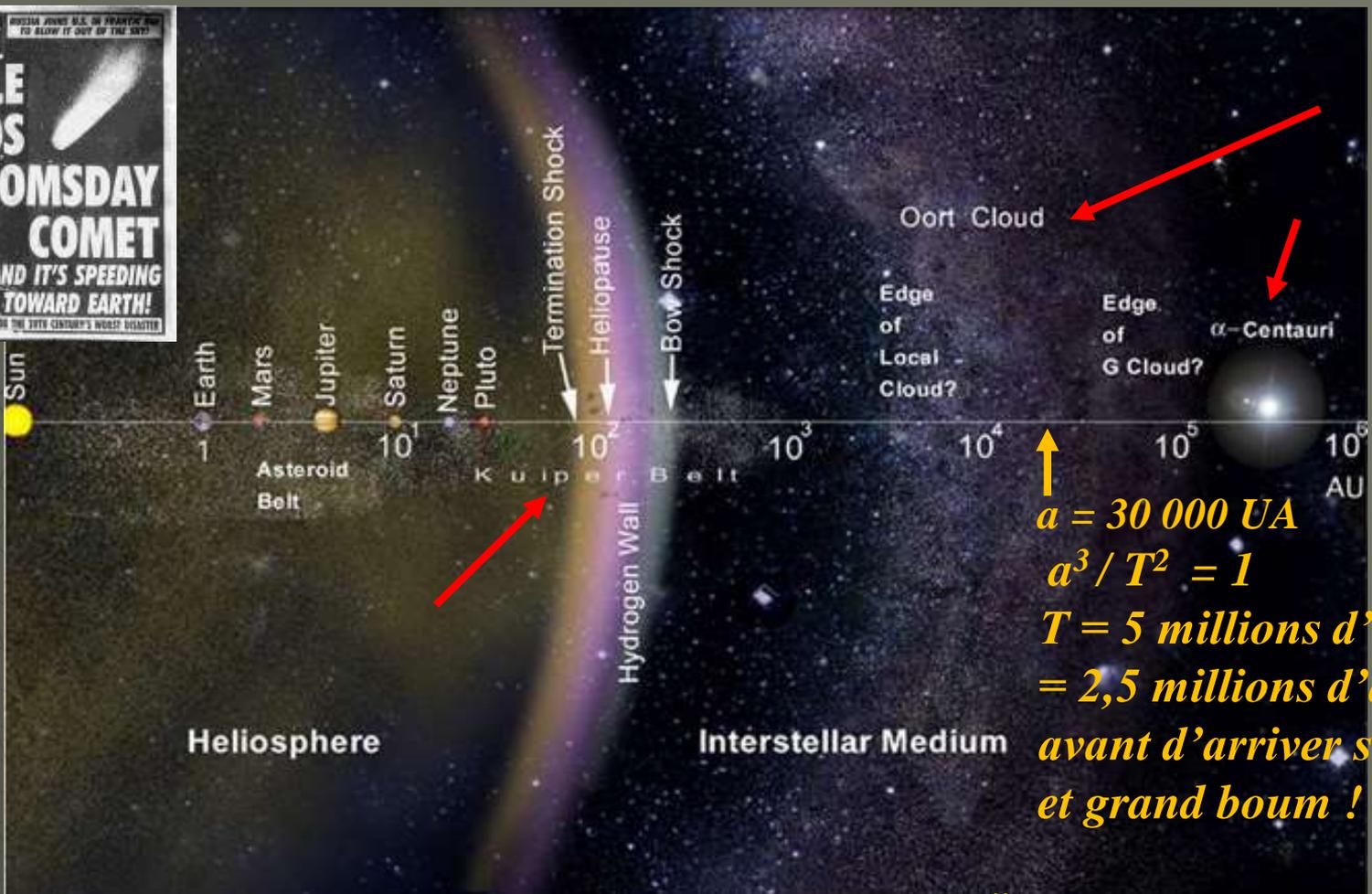
- Némésis: l'Etoile double du Soleil

- Naine brune de masse # 60 Jupiter (mv de 20 à 25)
- Orbite de 90000 UA

- Elle s'approche du Nuage de Oort et le perturbe tous les 26 millions d'années

- Excès de comètes à longue période pendant 2 millions d'année (déstabiliserait environ 100 millions de comète à chaque passage !)





$a = 30\,000\text{ UA}$
 $a^3 / T^2 = 1$
 $T = 5\text{ millions d'années}$
 $= 2,5\text{ millions d'années}$
avant d'arriver sur la Terre et grand boum !

Système Solaire- Ceinture de Kuiper-Nuage de Öpik-Oort et α Centaure :

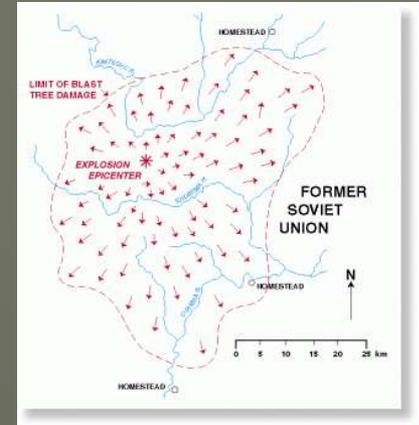
Le nuage de Öpik-Oort se trouve aux confins du Système Solaire à proximité des étoiles proches

Alpha centauri et Proxima centauri , étoile la plus proche du Système Solaire, sont à 4,37 al du Soleil soit 276 359 UA

(Rappel : 1 al = 63240 UA et 1 UA = 150 millions de km)

Toungouska (Sibérie)

30 Juin 1908 - 7 h 17 min du matin-près de la ville de Vanavara



Forêt détruite sur un rayon de 30 km

- Bolide de Toungouska # 10 mégatonnes eq TNT
(Bombe Hiroshima= 0,0125 mégatonne eq TNT)
- Séisme enregistré : magnitude # 5
- Dégâts catastrophiques dans rayon de 30 km
- Bruit entendu dans rayon de 1500 km
- Nombreux incendies-Heureusement zone inhabitée
- Confusion avec aurores boréales
- Explosion entre 6 et 9 km d'altitude
- Pas de cratère d'impact trouvé

Morceau d'une comète ?

Diamètre : 50 m - 60000 T ?

L'éclat d'une comète (magnitude)

Eclat d'une comète = f (quantité de poussières émises + fluorescence)

La quantité de poussières émises dépend du taux de dégazage (formation OH) et de la composition de la comète

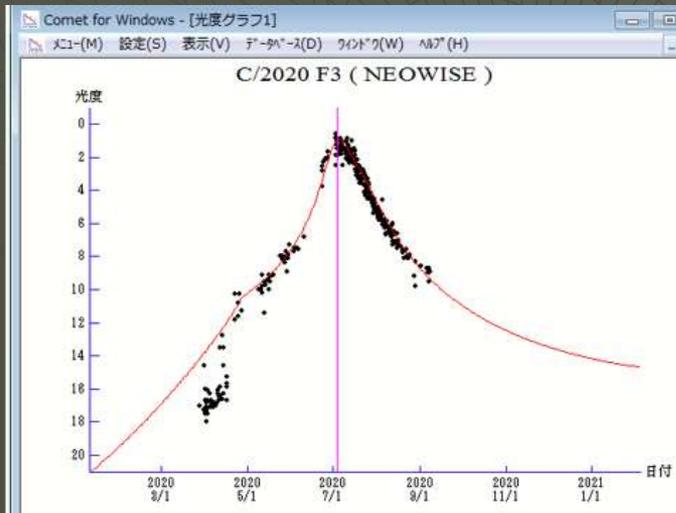
La luminosité d'une comète varie en $1 / (\Delta^2 \cdot R^4)$

$$m = m_0 + 5 \log \Delta + 2,5 n \log R$$

Avec Δ = distance Terre-Comète en UA - R = distance Comète-Soleil en UA,

n compris entre 4 et 6 dépendant de la composition ($n=2$ si uniquement poussières - $n=4$ si comète active avec volatils)

m_0 est la magnitude pour $R = 1$ UA



Hale-Bopp $m_0 = -1,3$

Ikeya-Seki $m_0 = -10$

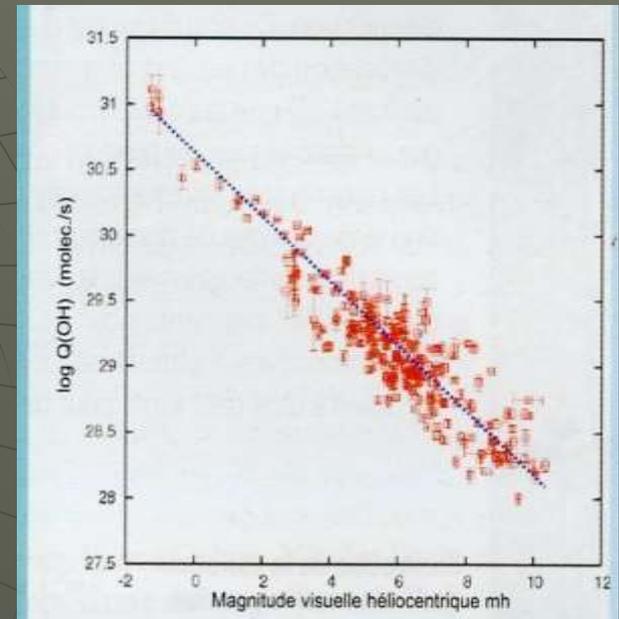
Halley $m_0 = -3$

Tycho $m_0 = -1,8$

De Chezaux $m_0 = 0,5$

Comète de 1811 $m_0 = -0,2$

Neowise $m_0 = 6$



Neowise : $m = 6,0 + 5 \log \Delta + 10 \log R$ - (Seiichi Yoshida)

Les Comètes Périodiques

Des petites taches grises de rien du tout !

Numéro & Nom	Période orbitale	Date du périhélie	Distance du périhélie	Inclinaison orbitale	Magnitude
1P Halley	76,1 ans	09-02-1986	0,587 UA	162,2 °	5,5
2P Encke	3,30 ans	28-12-2003	0,340 UA	11,8 °	9,8
6P d'Arrest	6,51 ans	01-08-2008	1,346 UA	19,5 °	8,5
9P Tempel 1	5,51 ans	07-07-2005	1,500 UA	10,5 °	12,0
19P Borrelly	6,86 ans	14-09-2001	1,358 UA	30,3 °	11,9
21P Giacobini-Zinner	6,52 ans	21-11-1998	0,996 UA	31,8 °	9,0
26P Grigg-Skjellerup	5,09 ans	22-07-1992	0,989 UA	21,1 °	12,5
27P Cronmelin	27,89 ans	01-09-1984	0,743 UA	29,0 °	12,0
45P Honda-Mrkos					
-Pajdusakova	5,29 ans	28-12-1995	0,528 UA	4,3 °	13,5
46P Wirtanen	5,46 ans	21-10-2013	1,063 UA	11,7 °	9,0
55P Tempel-Tuttle	32,92 ans	28-02-1998	0,982 UA	162,5 °	9,0
73P Schwassmann	5,36 ans	02-06-2006	0,937 UA	11,4 °	11,7
-Wachmann 3					
75P Kohoutek	6,24 ans	28-12-1973	1,571 UA	5,4 °	12,1
76P West-Kohoutek					
-Ikemura	6,46 ans	01-06-2000	1,596 UA	30,5 °	10,6
81P Wild 2	6,39 ans	25-09-2003	1,583 UA	3,2 °	6,5
95P Chiron	50,7 ans	14-02-1996	8,46 UA	7 °	
107P Wilson-Harrington	4,29 ans	26-03-2001	1,000 UA	2,8 °	9,0

- Les comètes périodiques ont une magnitude > 5 (sauf Halley)
Les périhélies sont de l'ordre de 1
- D'une façon générale les comètes périodiques ont un demi-axe $a < 34$ UA et des excentricités comprises entre 0,2 et 0,8-Ceinture de Kuiper

2P/Comète Encke



- **Période = 3,3 ans - découverte en 1786 par Mèchain**
Périhélie= 0,4 UA - Aphélie = 4,1 UA- a= 2,2 UA- excentricité e = 0,84
Dernier périhélie= 26 juin 2020- magnitude apparente = 5,5

Les Grandes Comètes

Le spectacle est au rendez-vous !

- Qu'est-ce qu'on appelle une "Grande Comète" ?
 - spectaculaire à l'œil nu
 - queue de poussière bien développée : (plusieurs degrés dans le ciel)
 - visible pendant plusieurs semaines (magnitude < 2)
- Les Grandes Comètes ont des périodes $T > 200$ ans- Elles s'approchent davantage du soleil à leur périhélie et ont un plan orbital plus incliné sur l'écliptique

Comète
de 1577



Donati (1858)

Grande Comète de 1965

Comète Ikeya-Seki - C/1965 S1



- groupe de Kreutz- périhélie à 450 000 km du Soleil)
- Magnitude = 2 (intégrée = -10)
- Visible pendant 2 mois
- Queue de plus de 45 °
- Brisure du noyau en 2 morceaux

Grande Comète de 1997 - Comète Hale-Bopp - C/1995 O1



- Découverte par Alan Hale et Thomas Bopp le 23 Juillet 1995 au télescope 400 mm à $m_v = 10,5$ près de M 70 à 7,15 UA du soleil



AG M 70

- Magnitude - 0,8 en mars-Avril 1997
- Restée visible à l'œil nu pendant 18 mois
- Passage au plus près de la Terre = 1,315 UA
- Périhélie : 1^{er} Avril 1997 à 0,915 UA
- Dimension du noyau # 60 km
- Queue de 40 °
- Prochain retour = année 4385

A suivre ...

(2éme partie)

Les Comètes dans l'Histoire

*Histoire qui ne sera pas ...
sans queue ni tête !*

