

Astrophysique

7 – Les petits corps du système solaire

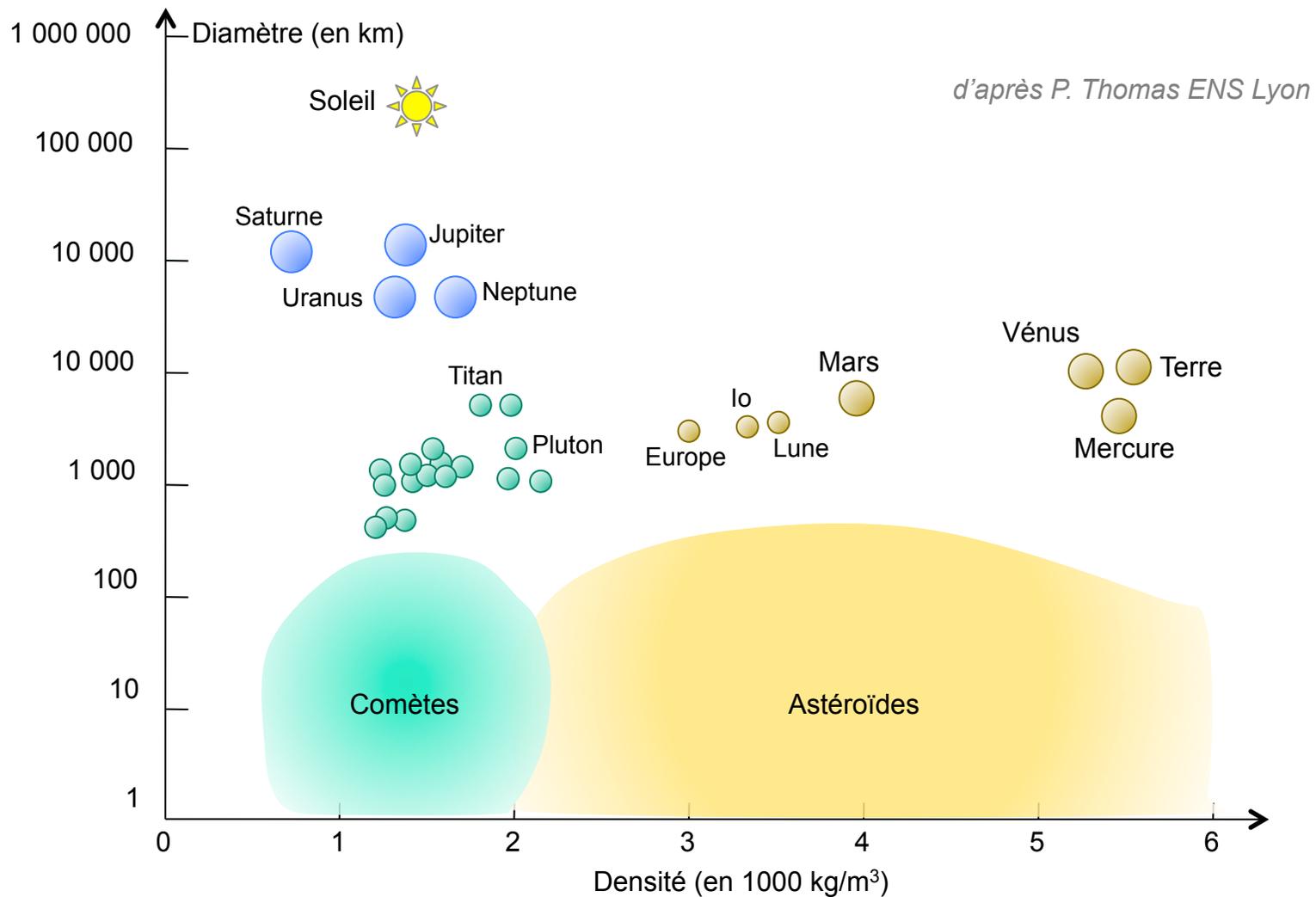


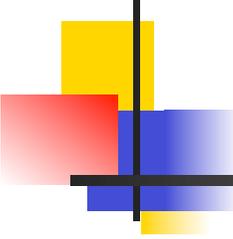
Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA

Les objets du système solaire

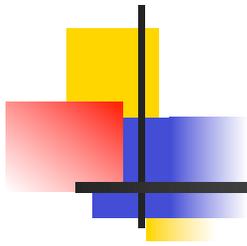




Planètes naines

et petits corps

- Définition
 - Objet orbitant autour du Soleil
 - Assez massif pour être ~ sphérique
 - N'a pas fait place nette autour de son orbite
- Cinq exemples aujourd'hui reconnus
 - Cérès (de loin le plus gros objet de la ceinture d'astéroïdes)
 - Pluton
 - Makemake
 - Haumea
 - Éris
- Bien d'autres en attente
 - Charon (satellite ou binaire?)
 - Sedna
 - Quaoar
 - Orcus
 - Varuna
 - ...
- Petit corps : pas assez massif pour être sphérique
 - Astéroïdes
 - Comètes
 - Objets de la ceinture de Kuiper (orbites quasi circulaires et peu inclinées)
 - Objets épars, allant au delà de la Ceinture de Kuiper (orbites excentriques et forte inclinaison)



How I Killed
Pluto
and
Why It Had It
Coming

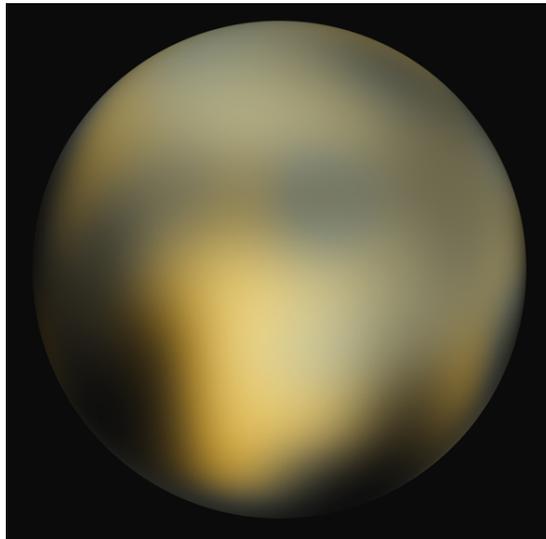


PLANÈTES NAINES

Pluton, Charon, Haumea, Makemake,

■ (134340) Pluton

- Découvert en 1930 (9^e planète, jusqu'en 2006), masse $\sim 1/500 M_{\text{Terre}}$



- Orbite très elliptique (actuellement plus près du Soleil que Neptune)
- 30 à 49 UA, inclinaison 17°

■ Charon

- Satellite relativement gros découvert en 1978 → plutôt système binaire

■ (136108) Haumea

- *Déesse hawaïenne de la fertilité*
- Découvert en 2004
- Orbite peu excentrique (35 UA à 52 UA) inclinée à 28°
- Rotation très rapide et variations rapides de luminosité → forme sans doute elliptique (1000 km x 2000 km?)
- Deux satellites → masse $\sim 1/1500 M_{\text{Terre}}$
- Spectre → glace en surface (roche dessous)

■ (136472) Makemake

- *Dieu créateur des Pascuans*
- Découvert en 2005
- Orbite peu excentrique (39 UA à 53 UA) inclinée à 29°
- Diamètre entre 1200 et 1900 km
- Spectre → méthane (et probablement azote)

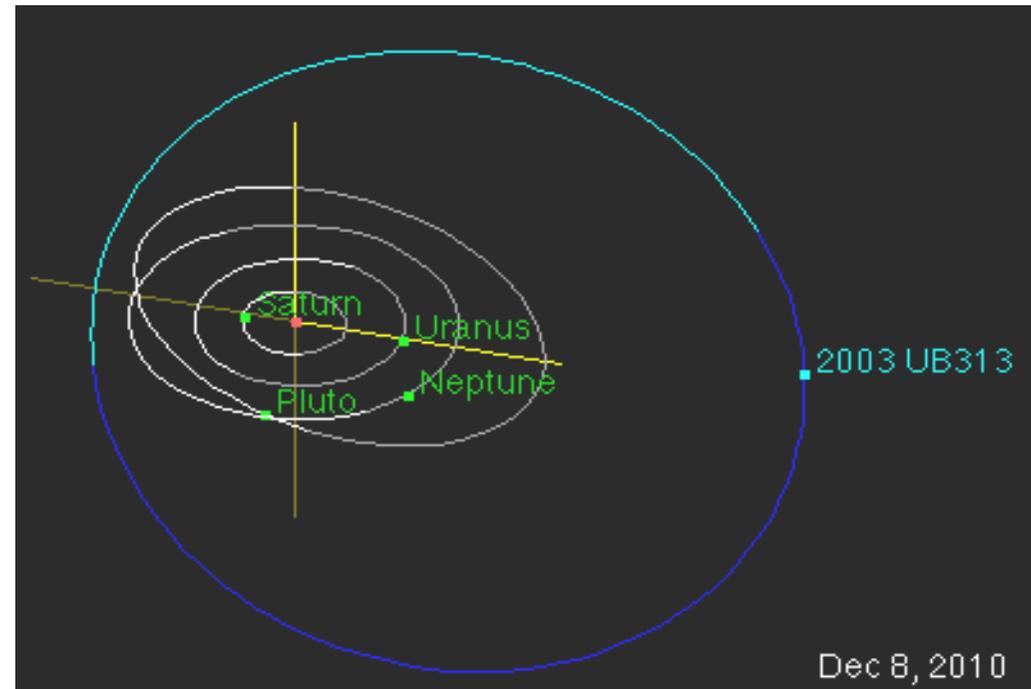
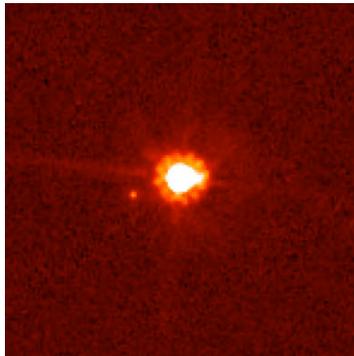
Éris



■ (136199) Éris

- *Déesse grecque de la discorde*
- Découverte en 2003 (2003UB₁₃₃), identifiée comme planète naine en 2005
- Actuellement à 97 UA (~ aphélie), périhélie 38 UA, orbite inclinée de 44°
- Diamètre entre 2400 et 3000 km → plus grande que Pluton ? → X° planète ?
- Masse 1/300 masse de la Terre (Éris a un satellite, *Dysnomie*, déesse de l'anarchie)
- Albédo très élevé (0,86)
- Spectre → méthane

Dysnomie et Éris (HST)

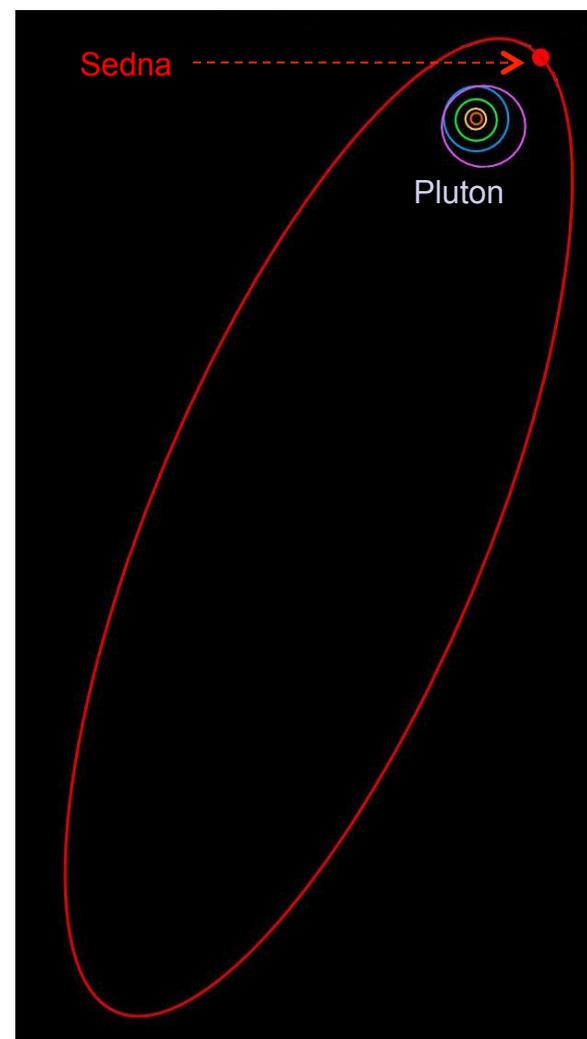
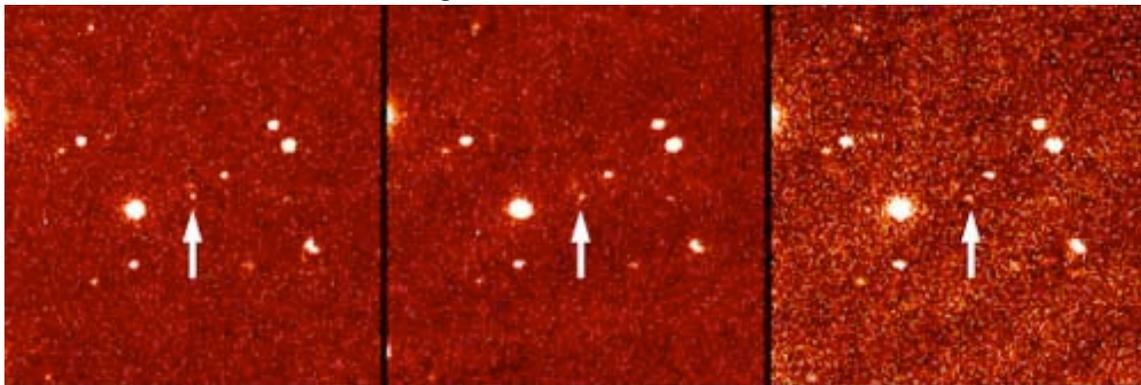


Sedna



- (90377) Sedna
 - *Déesse Inuit des eaux glacées*
 - Découverte en 2003
 - Actuellement à 90 UA
 - Diamètre entre 1200 et 1800 km
 - Objet très rouge
 - Orbite **très elliptique**
(périhélie 76 UA, aphélie 960 UA)
 - → peut-être 50 à 100 objets similaires?

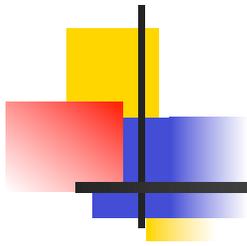
Découverte de Sedna : 3 images à 3h d'intervalle



Les objets transneptuniens

Les plus grands objets transneptuniens connus

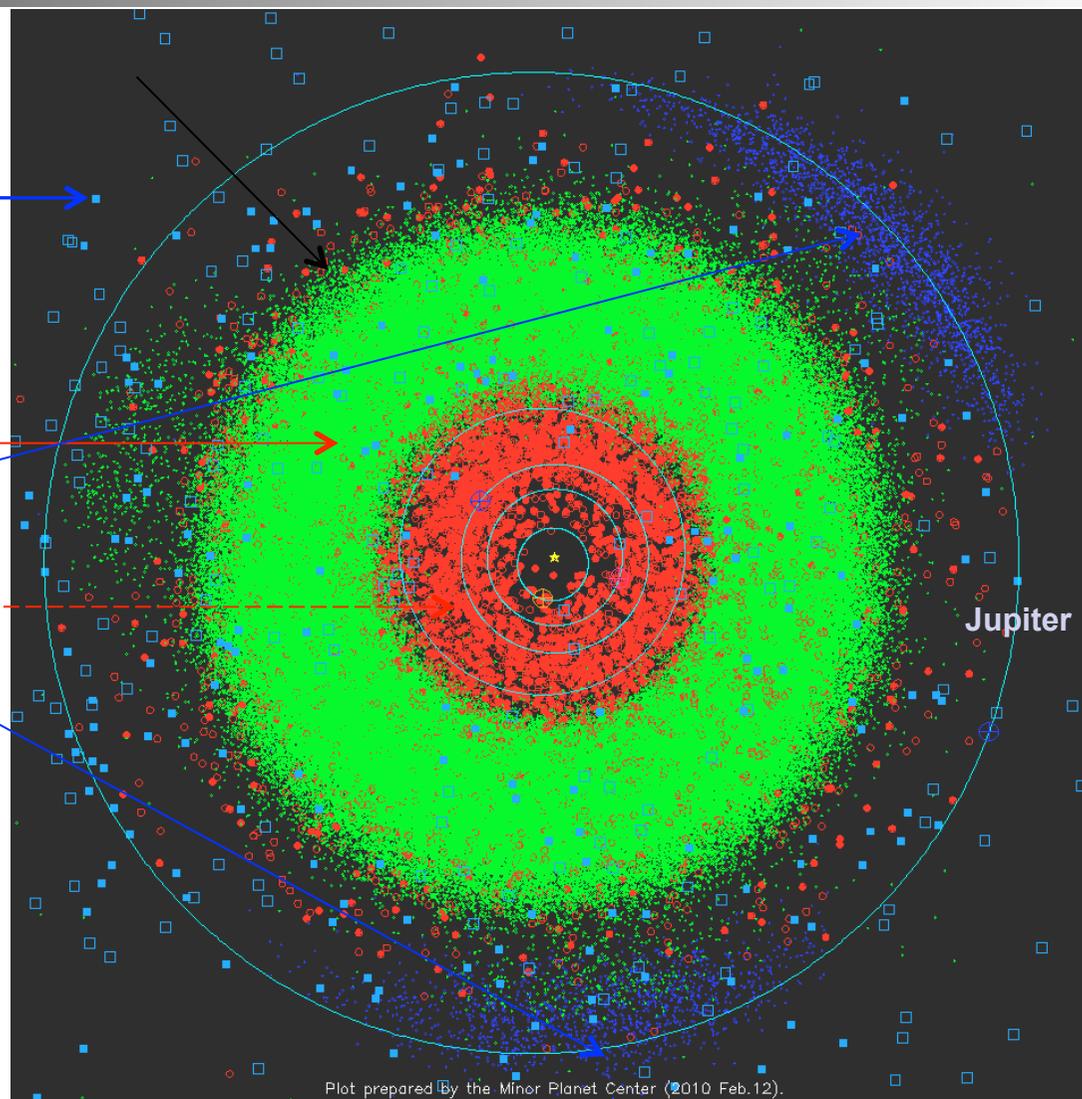




PETITS CORPS

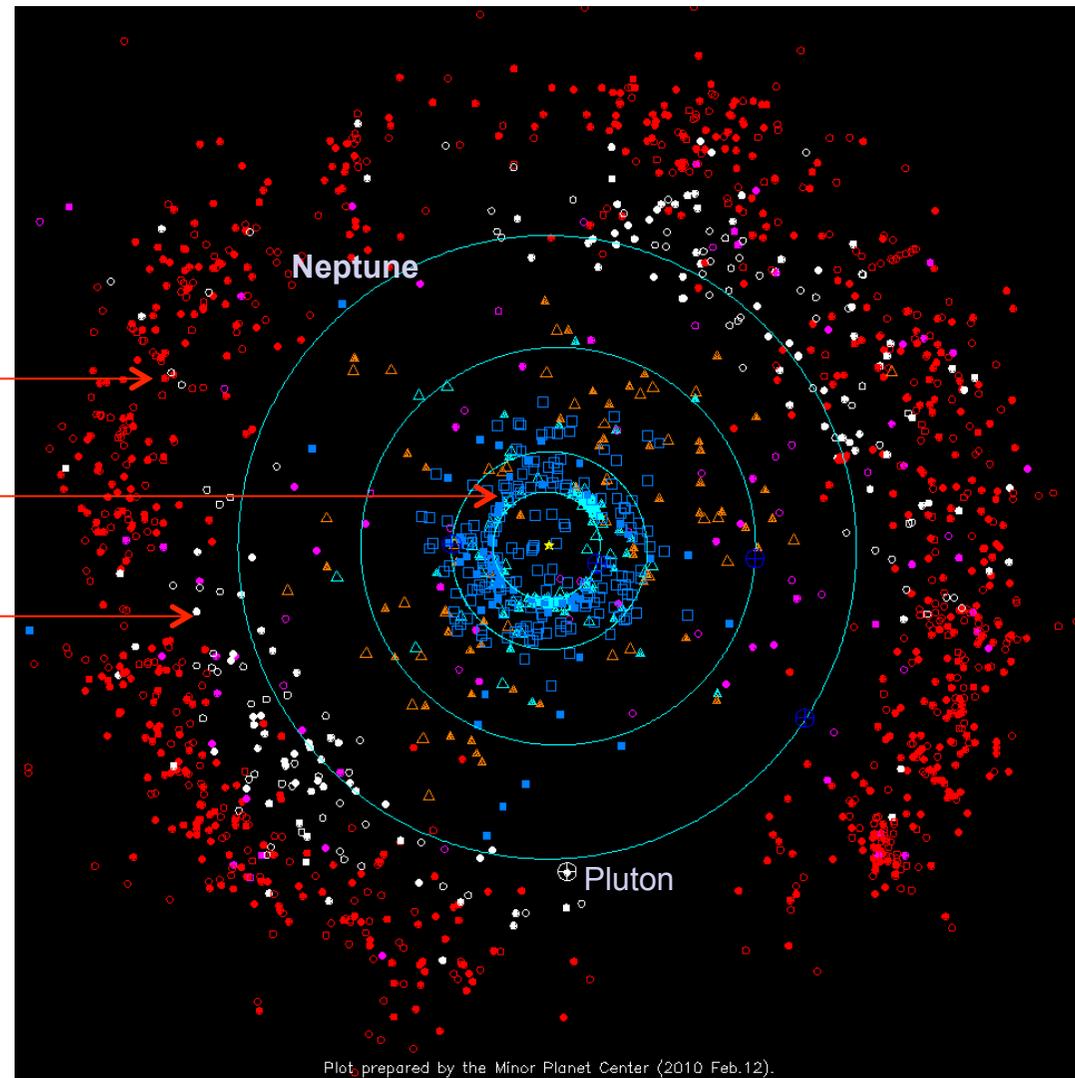
Les petits corps du système solaire « interne »

- Comètes
 - Courte période (< 200 ans)
 - Longue période (> 200 ans)
- Astéroïdes
 - Ceinture entre Mars et Jupiter
 - Troyens
 - Géocroiseurs
- Planètes naines
 - Cérès
 - Pluton et Charon
 - Eris, Makemake, Haumea...

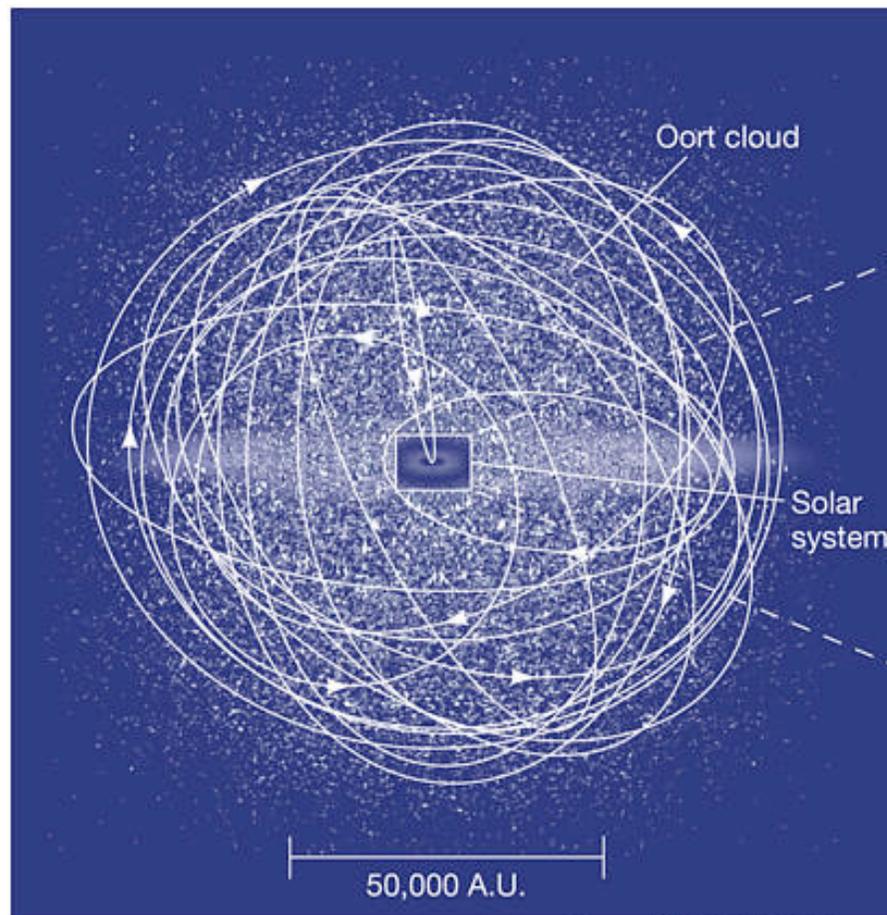


Le système solaire et les objets transneptuniens

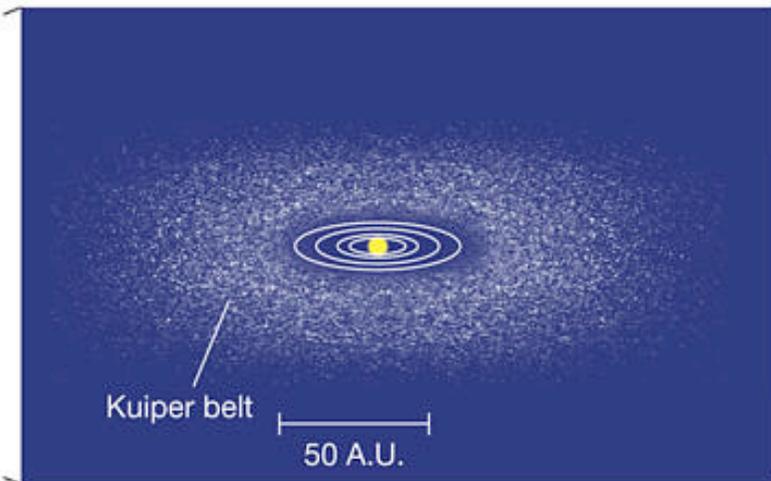
- Ceinture de Kuiper →
- Astéroïdes →
- Plutinos →
- *Rayon orbite Neptune 30 UA*



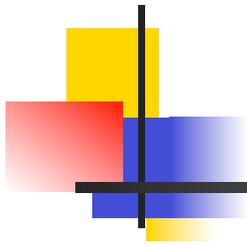
Le système solaire « externe »



- L'étoile la plus proche, Proxima du Centaure, se trouve à 300 000 UA



Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.



COMÈTES

Un côté spectaculaire

- Les comètes les plus brillantes atteignent des magnitudes proches de zéro (exceptionnellement -1, Sirius: -1,5) et couvrent 30° à 70° sur le ciel



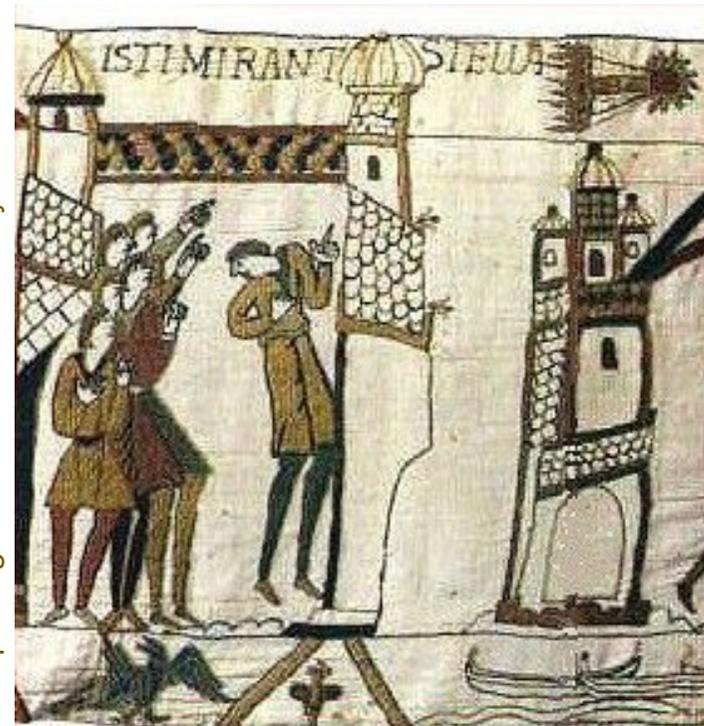
- Les comètes brillantes ont toutes de très longues périodes (à part Halley)

■ Les noms des comètes

- C/1995 O1 (Hale-Bopp)
 - C = période > 200 ans (2520 ans)
 - 1995 = année de découverte
 - O1 = 1^o comète de la 2^e quinzaine de juillet (découverte le 23-07-1995)
 - Alan Hale et Thomas Bopp, les astronomes amateurs qui l'ont (indépendamment) découverte
- 103P/Hartley
 - 103P = 103^e comète de la liste des comètes de période <200 an (6,5 ans)
 - Hartley (Malcolm) son découvreur en 1986
- Il y a bien sûr des exceptions
 - 1P/Halley et 2P/Encke nommés d'après ceux qui ont calculé leur orbite
 - 3D/Biela observée fragmentée en 1846 et 1852 et apparemment détruite depuis
 - Comètes nommés d'après l'instrument qui les a découvertes (LINEAR, SoHO)

La comète de Halley

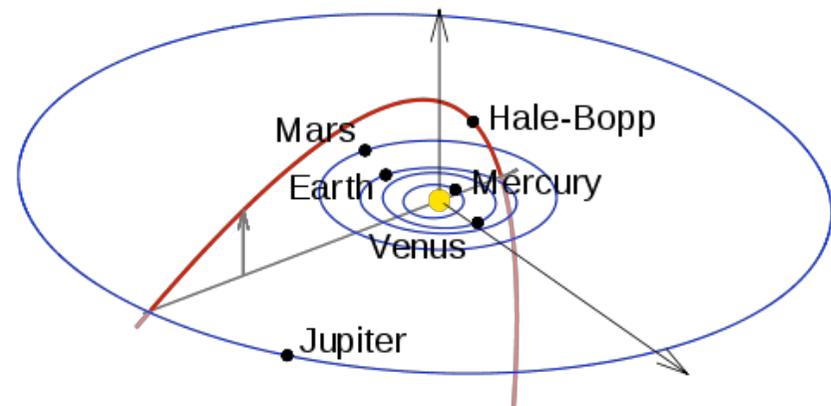
- Edmond Halley (1656-1742) utilisa en 1705 les lois de Newton pour calculer les orbites de 24 comètes
- Il remarqua que les comètes de 1456, 1531, 1607 (comète de Kepler) et 1682 avaient pratiquement la même orbite
- Il fit l'hypothèse qu'il s'agissait de la même comète, ayant donc une période de 76 ans
- → Il en prédit le retour pour 1758
- Clairaut, Lalande et Lepaute calculèrent que les perturbations de Jupiter et Saturne la retarderaient, et prédirent son passage pour le début de 1759
- Elle passa à son périhélie le 13 mars 1759
- Lacaille proposa dès son retour de lui donner le nom de Halley
- Ce fut le premier objet (hormis les planètes) dont on put démontrer qu'il orbitait autour du Soleil...
- ... validant ainsi les théories de Newton de la dynamique et de la gravitation



Le passage de la comète de Halley en 1066

Caractéristiques des orbites

- ~1800 apparitions cométaires ont été répertoriées (~900 comètes différentes)
 - 40% des comètes sont périodiques ⇔ orbites elliptiques
 - dont une centaine à courte période (<200 ans)
 - orbites proches de l'écliptique
 - Les autres ont des orbites paraboliques ou hyperboliques
 - dues apparemment à une perturbation – par les planètes géantes – d'une trajectoire à l'origine elliptique
 - mais dans un plan quelconque
 - L'éjection de matière par la comète modifie aussi sa trajectoire (effet fusée)
- Exemple : Comète Hale-Bopp
 - Période 2520 ans
 - Périhélie 0.9 UA
 - Aphélie 371 UA
 - (*Neptune 30 UA*)
 - Inclinaison % écliptique 89°

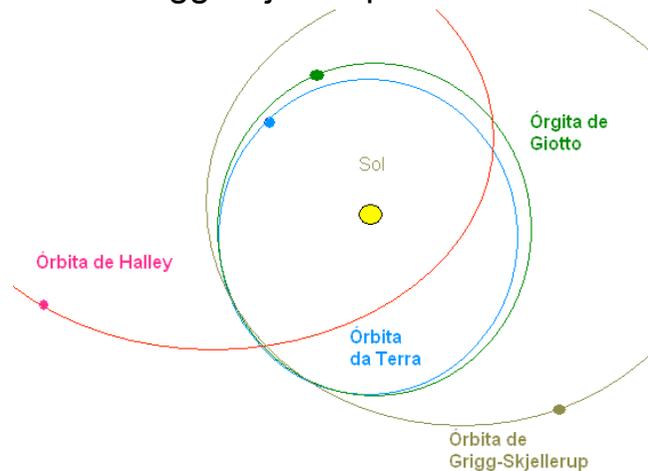


Sondes vers les comètes



■ Rencontres avec la comète de Halley

- **Vega** (Венера Галлей) 1 et Vega 2 explorèrent Vénus en 1985 avant de se diriger vers Halley, frôlée à 9000 km
- **Giotto** (ESA) passa à 600 km de Halley en 1986, puis à 200 km de la comète 26P/Grigg-Skjellerup en 1992



- **Sakigake** et **Suisei** passèrent à 9 millions et à 150 000 km

■ *Deep Impact* (NASA)

- Lancée en janvier 2005 à la rencontre de la comète 9P/Tempel
- Impacteur le 4 juillet 2005
- Rebaptisée *Epoxi*
- Passée à 700 km de la comète 103P/Hartley 2 en novembre 2010



Rosetta

- Sonde de l'ESA lancée en mars 2004
 - survol de Mars à 250 km en février 2007
 - passages près de la Terre en mars 2004, novembre 2007 (pris pour un astéroïde) et novembre 2009
 - survol des astéroïdes **2867 Šteins** à 800 km en septembre 2008 puis **21 Lutetia** à 3160 km en juillet 2010
- Mise en orbite prévue en octobre 2014 à 25 km d'altitude autour de la comète 67P/Tchourioumov-Guerassimenko
- Atterrissage prévu en novembre 2014 (atterrisseur *Philae*)



21 Lutetia vu par *Rosetta*



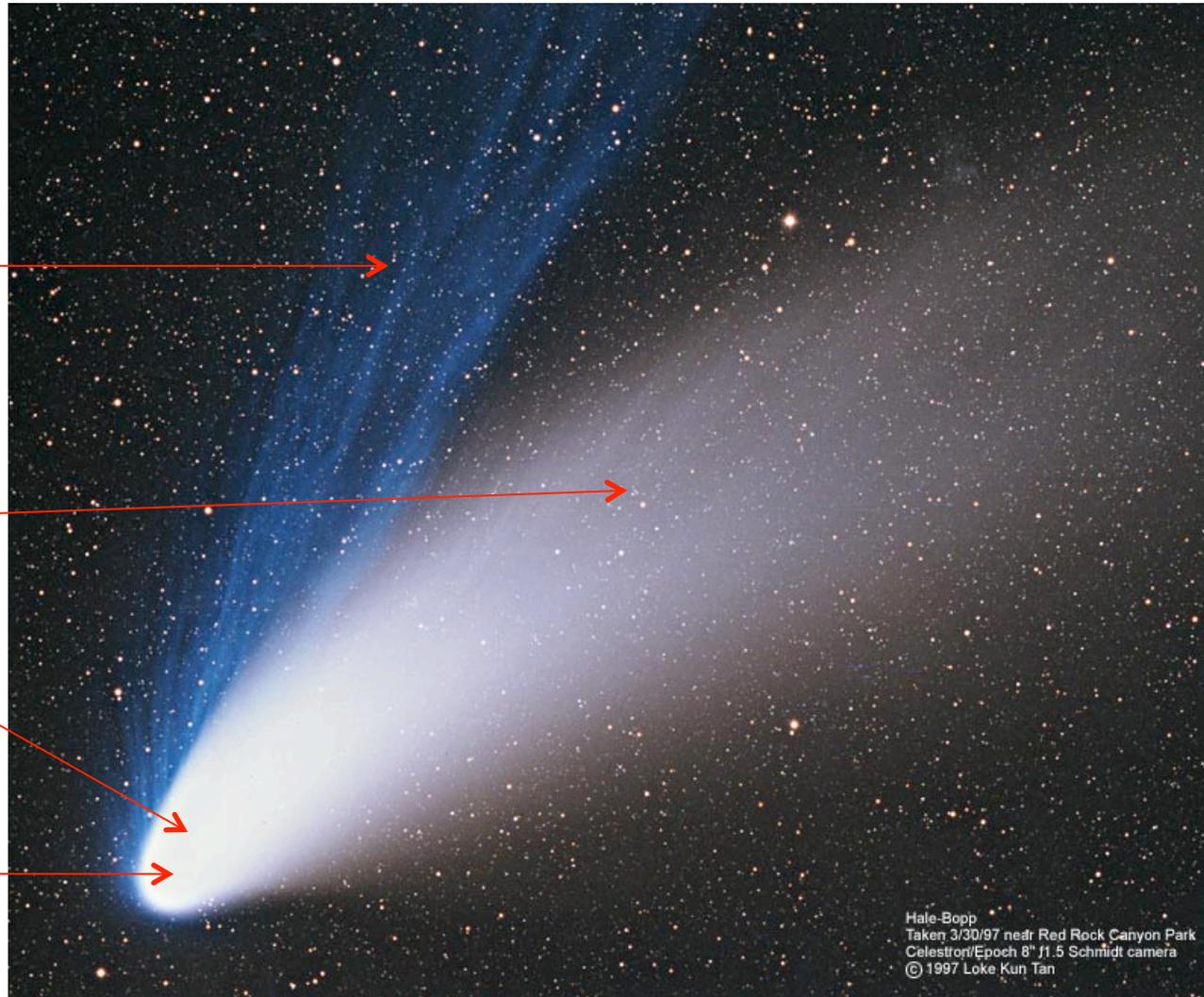
Structure des comètes

Queue de
plasma
(ionique)

Queue de
poussière

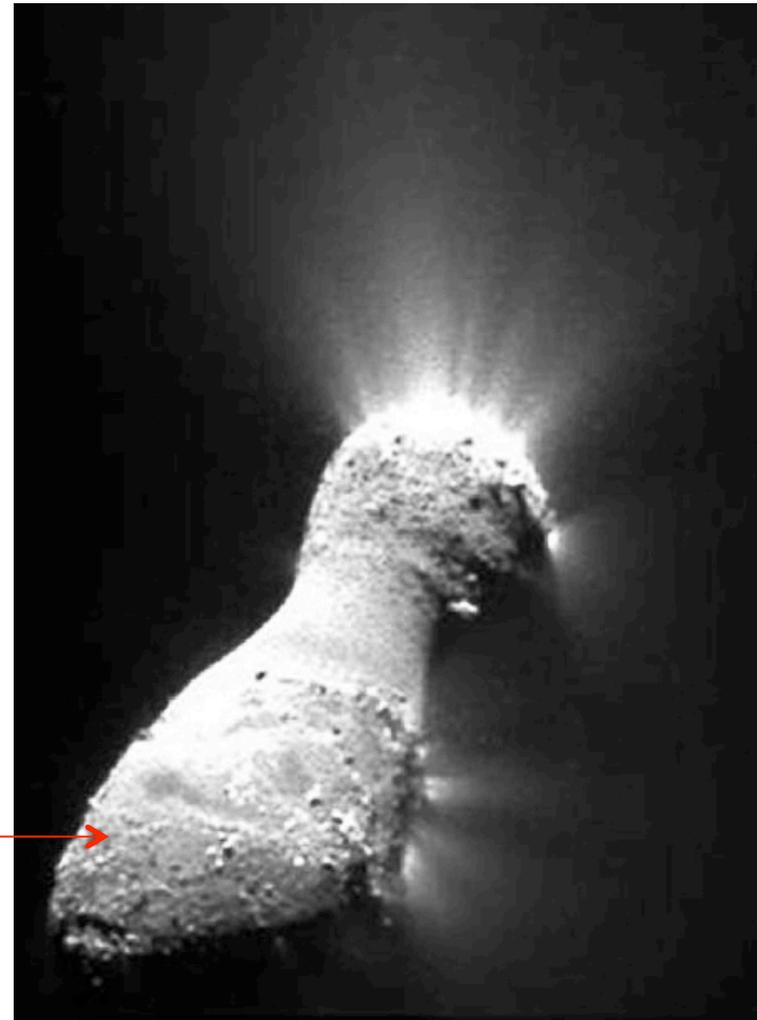
Chevelure
ou coma

Noyau



Noyaux de comètes

- Théorie de Whipple 1950: une boule de neige sale qui serait un conglomérat de roches, de poussières agglomérées de glace et de gaz congelés.
 - Dimension ~quelques dizaines de km
 - aspect plutôt irrégulier
 - fragile, peut se briser (Biela, Shoemaker-Levy 9 avant son impact avec Jupiter)
- Première image du noyau en 1986 par la sonde Giotto, pas très précise
- Noyau de la comète 103P/Hartley par la sonde Epoxi (novembre 2010)

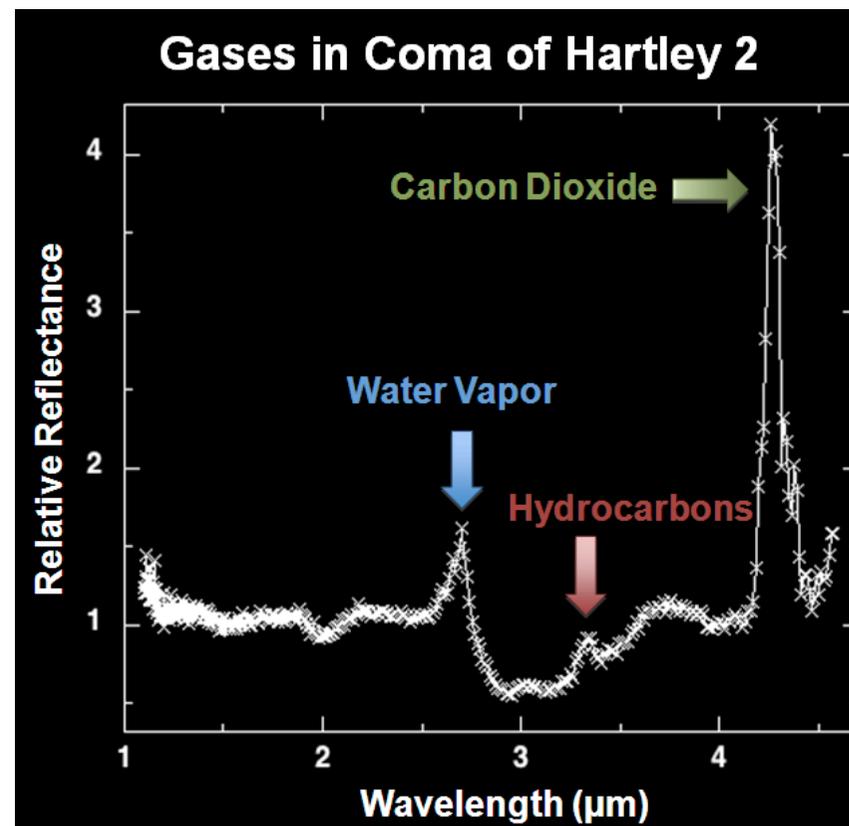


Composition des noyaux de comètes

- Pas encore de mesure directe de la composition des noyaux cométaires,
- Déduite des gaz observés dans la coma
- Estimation
 - 26% de silicates,
 - 23% de molécules organiques,
 - 9% de particules carbonées
 - 42% mélange de molécules volatiles dominé par l'eau (près de 34%).
- Giotto (comète de Halley) 

Chevelure des comètes

- Loin du Soleil, une comète n'est qu'un petit noyau de glaces à peu près invisible
 - En se rapprochant du Soleil (2 à 5 UA), la température augmente, ce qui vaporise les glaces (CO puis H₂O) et libère les poussières
 - Cela crée une sorte d'atmosphère, la coma ou chevelure, composée
 - d'eau
 - de monoxyde et de dioxyde de carbone
 - d'hydrocarbures
 - Le rayon de la coma varie de 10 000 à 100 000 km lorsque la comète est active
 - → une comète disparaît peu à peu
- Spectre infrarouge de la chevelure de la comète 103P/Hartley



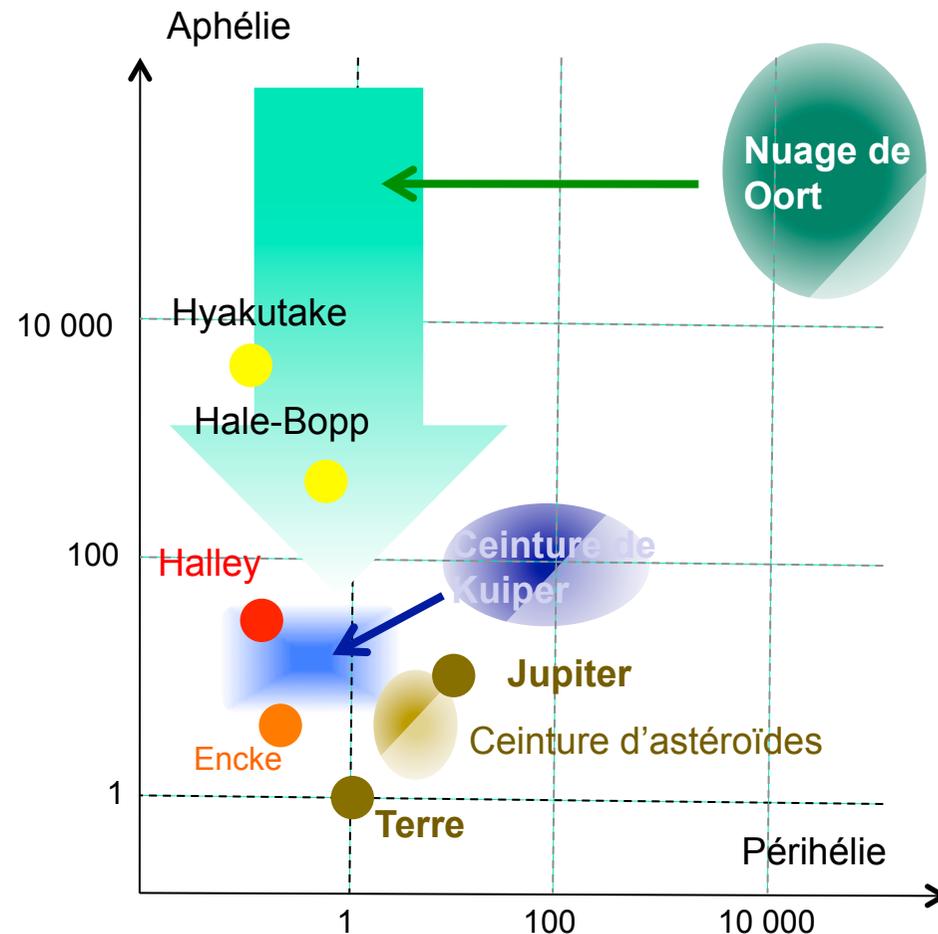
Queues de comètes

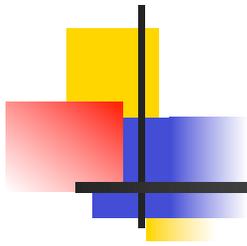
- Partie la plus visible des comètes
- Queue de poussières
 - particules de poussière éjectées du noyau lors de la vaporisation du noyau
 - repoussées par la pression de rayonnement du Soleil → direction opposée au Soleil
 - courbée car la trajectoire de la comète est courbe
 - peut s'étendre sur plusieurs millions de kilomètres
 - les grains de poussière se dispersent
 - quand la Terre traverse une ancienne queue de comète, ces grains brûlent dans l'atmosphère (étoiles filantes)
- Queue de plasma
 - atomes ionisés lors de la vaporisation (spectre souvent dominé par le bleu de l'ion CO⁺)
 - repoussée par le vent solaire (e⁻ et p⁺)
 - rectiligne, sur des dizaines de millions de kilomètres



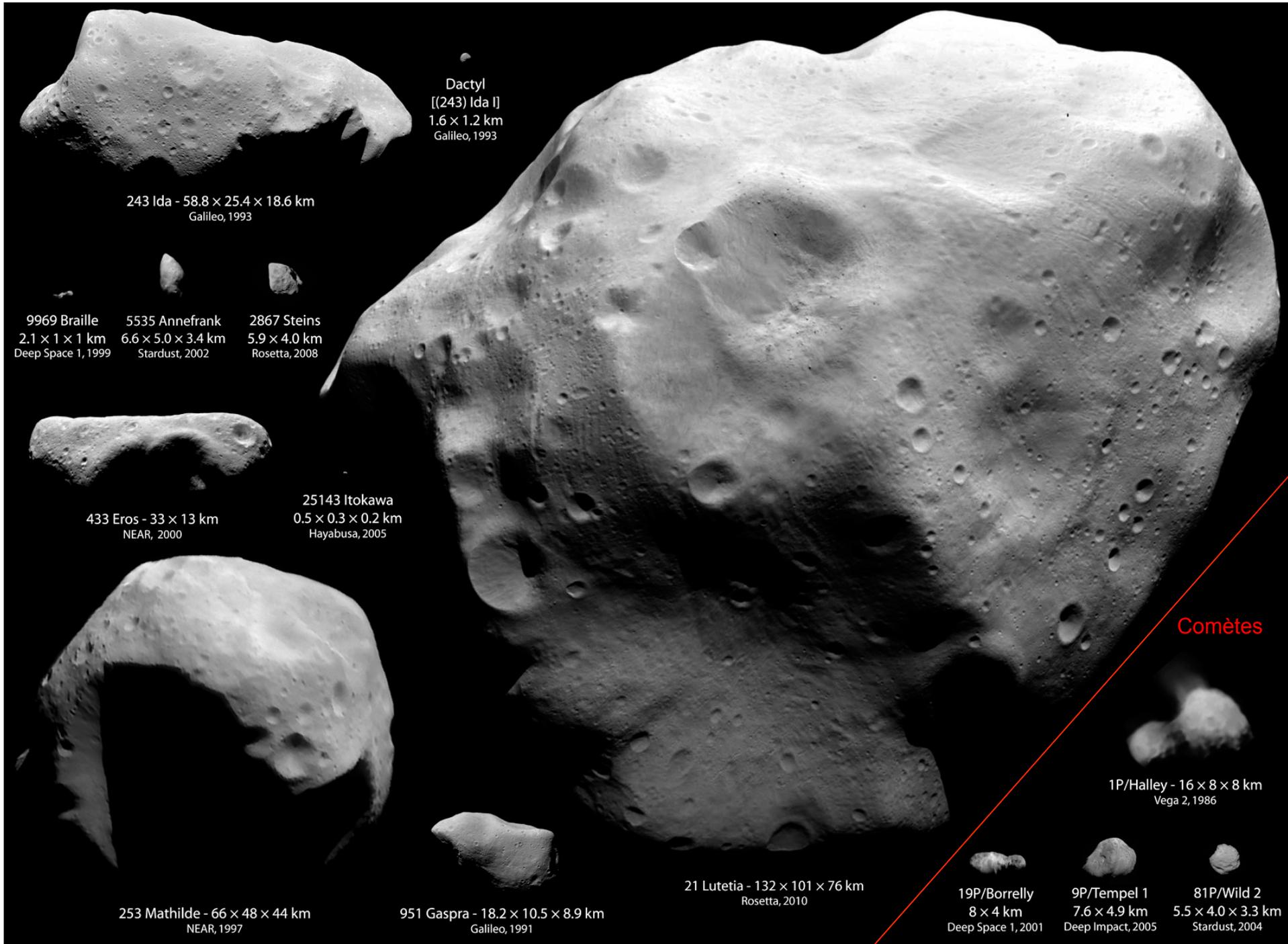
L'origine des comètes

- À chaque passage près du Soleil, les comètes perdent de la masse
- À chaque passage près des planètes géantes, les comètes risquent d'être déviées loin du Soleil
- → il doit exister un mécanisme alimentant en comètes « nouvelles » le système solaire interne
- Deux réservoirs ?
 - La ceinture de Kuiper (30 à 100 UA) au-delà de Neptune → comètes de courte période, de faible inclinaison, injectées par perturbation gravitationnelle
 - Le nuage ~ sphérique de Oort (40 000 à 100 000 UA) → comètes de longue période, d'inclinaison quelconque





ASTÉROÏDES



Dactyl
[[243] Ida I]
1.6 × 1.2 km
Galileo, 1993

243 Ida - 58.8 × 25.4 × 18.6 km
Galileo, 1993

9969 Braille
2.1 × 1 × 1 km
Deep Space 1, 1999

5535 Annefrank
6.6 × 5.0 × 3.4 km
Stardust, 2002

2867 Steins
5.9 × 4.0 km
Rosetta, 2008



433 Eros - 33 × 13 km
NEAR, 2000

25143 Itokawa
0.5 × 0.3 × 0.2 km
Hayabusa, 2005



253 Mathilde - 66 × 48 × 44 km
NEAR, 1997



951 Gaspra - 18.2 × 10.5 × 8.9 km
Galileo, 1991

21 Lutetia - 132 × 101 × 76 km
Rosetta, 2010

Comètes



1P/Halley - 16 × 8 × 8 km
Vega 2, 1986



19P/Borrelly
8 × 4 km
Deep Space 1, 2001



9P/Tempel 1
7.6 × 4.9 km
Deep Impact, 2005



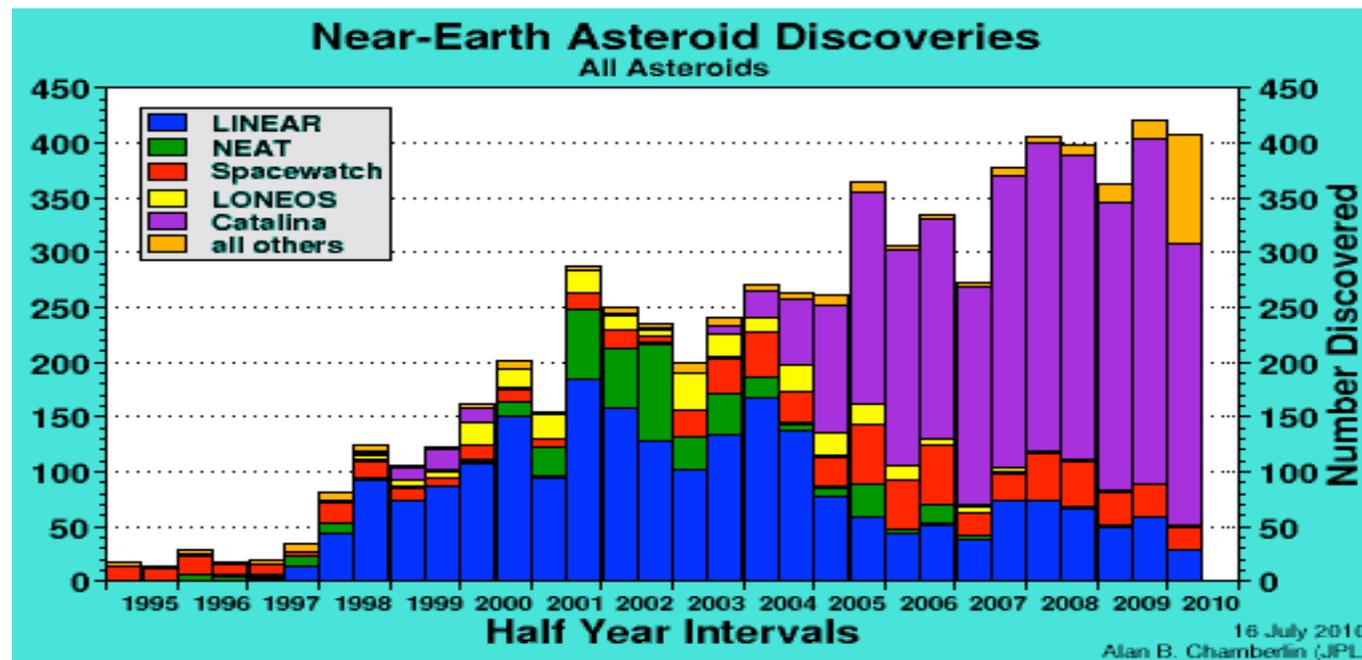
81P/Wild 2
5.5 × 4.0 × 3.3 km
Stardust, 2004

Détection et surveillance des astéroïdes



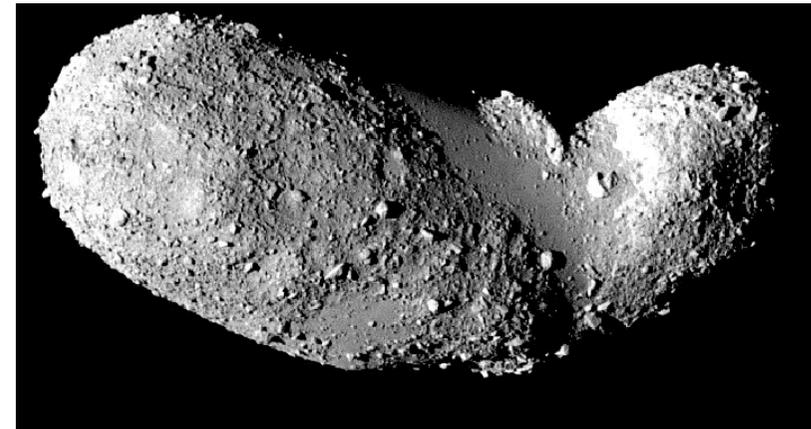
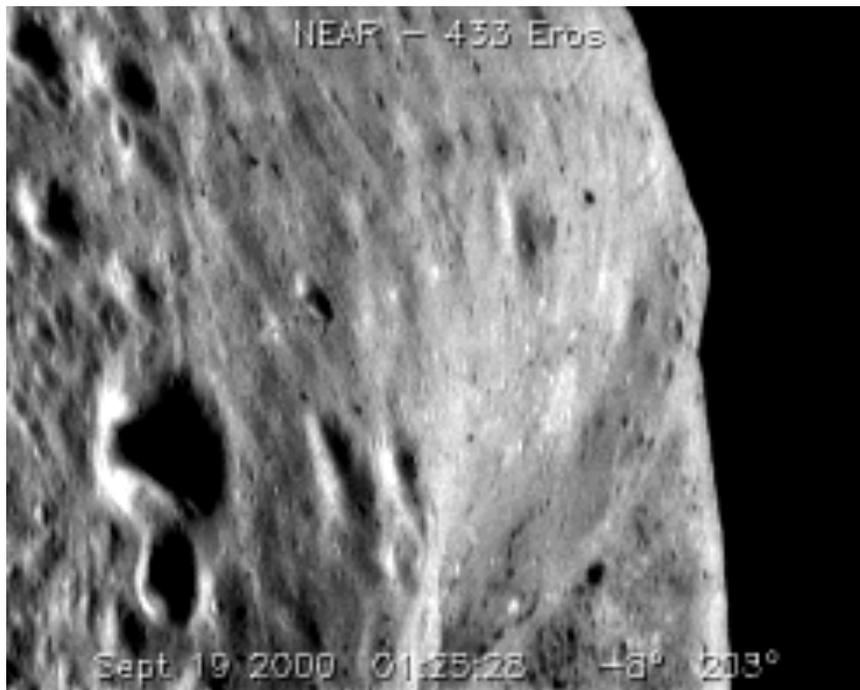
■ Programmes

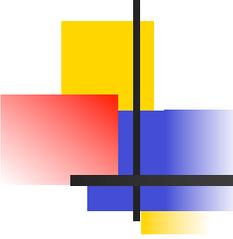
- LINEAR (Lincoln Lab du MIT)
- NEAT (Near Earth Asteroid Tracking, NASA)
- LONEOS (Lowell Obs.)
- Catalina Sky Survey (Arizona et Australie)
- Projet de 4 télescopes de 1,8m à Hawaï, champ de 3° et caméra de 1,3 Gpixels
- PS1 en fonction, PS2 en construction
- Poses de 60s (→ mag limite 24)
- → image complète du ciel tous les 4 jours
- → 100 000 astéroïdes attendus



Sondes vers les astéroïdes

- NEAR-Shoemaker (NASA)
 - Lancée en 1996 vers l'astéroïde (253) Mathilde puis vers (433) Eros, un des plus gros géocroiseurs
 - Cartographie (en orbite) au cours de l'année 2000, puis atterrissage en 2001
- Hayabusa (Japon)
 - Lancée en 2003 et posée en 2005 sur l'astéroïde (25143) Itokawa
 - Revenue sur terre en 2010 avec des échantillons de la surface

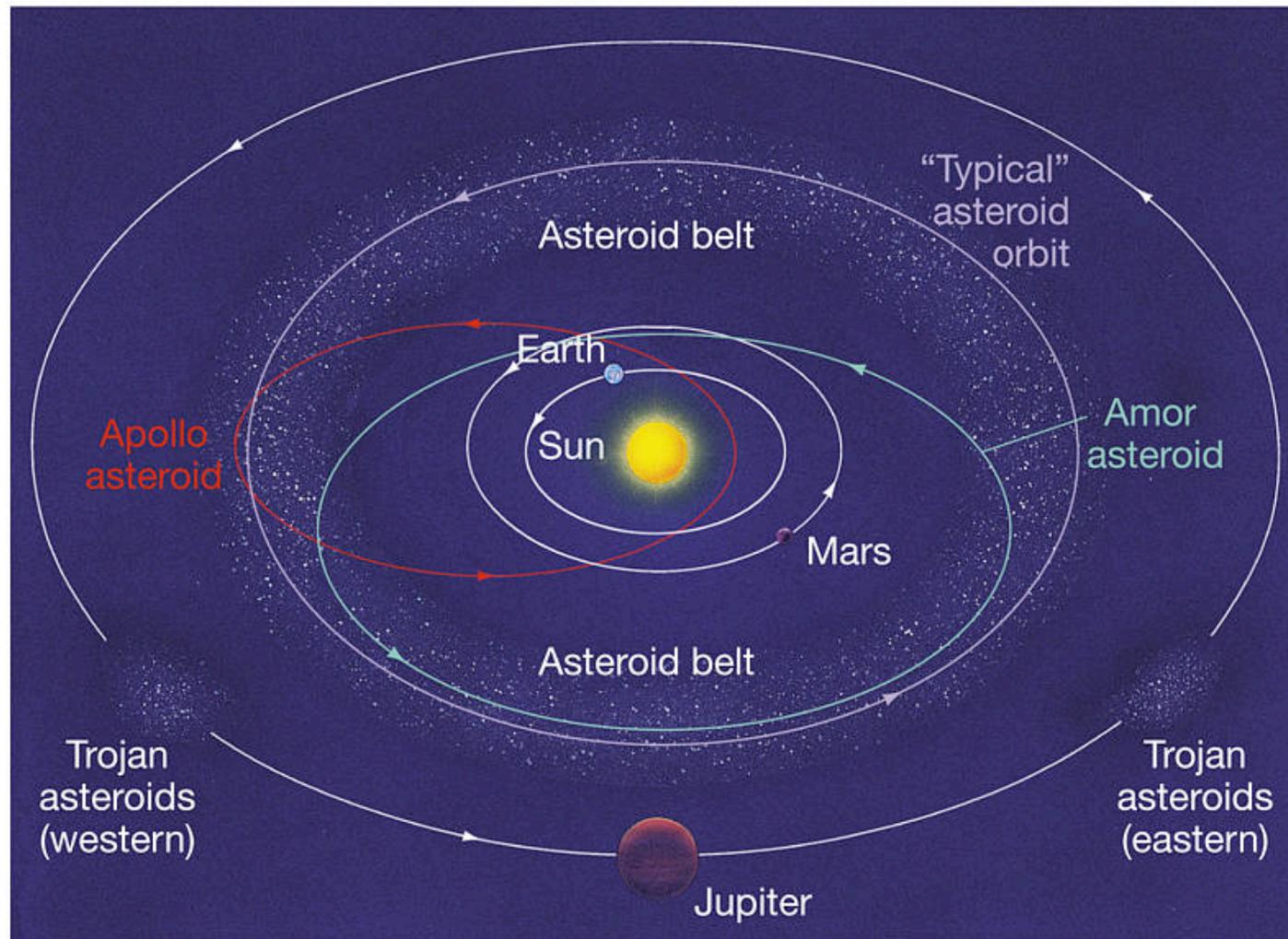




Les astéroïdes

- Orbites en général peu excentriques
- Plusieurs centaines de milliers d'objets au moins
- Masse totale < 1/10 masse de la Lune
- Trois types différents
- Type C : carbonates
 - 75% des astéroïdes
 - orbites extérieures
- Type S : silicates et métaux (Fe, Ni, Mg)
 - 15% des astéroïdes
 - orbites intérieures
- Type M : métaux (nickel et fer)
 - 10% des astéroïdes
- Les noms des astéroïdes
 - Nom provisoire: année de découverte, lettre de la quinzaine (puis A, B...Z, A1, B1...)
Ex: 1989AC
 - Nom définitif: numéro d'ordre et nom attribué
Ex: (4179) Toutatis
- Principales familles
 - Groupe principal entre Mars et Jupiter (ceinture d'astéroïdes)
 - Les « Troyens », suivant une orbite planétaire 60° en avant ou en arrière de la planète (points de Lagrange)
 - Les « Centaures », entre les orbites des planètes géantes (suite à une éjection?)

La ceinture d'astéroïdes



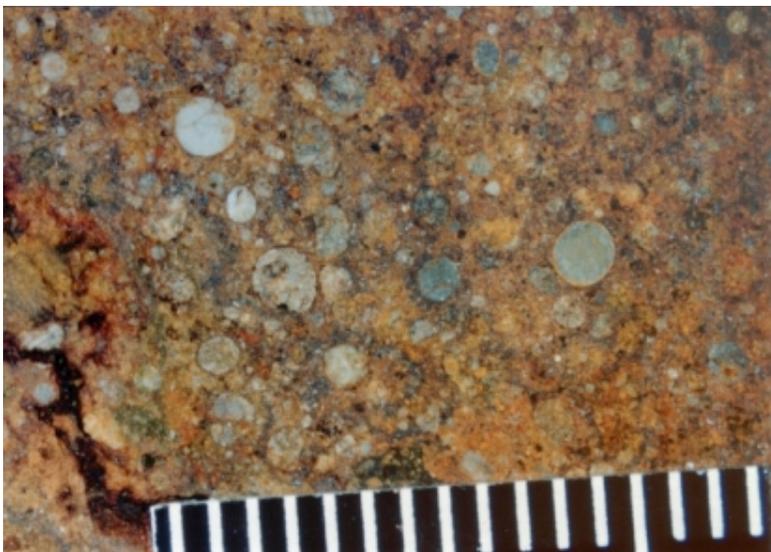
Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

Les météorites

■ Classification

■ Météorites rocheuses (**silicates**)

- Chondrites (86%), contenant de petites sphérules, les chondrules



- Achondrites (8%) ←

■ Météorites métalliques (6%) ←

■ Datation

■ Potassium-argon

■ Plomb – plomb

- Uranium 238 -> plomb 206 (1/2 vie 4,5 Md ans)
- Uranium 235 -> plomb 207 (1/2 vie 0,7 Md ans)
- Comparaison abondances initiales % abondances actuelles → âge
(Normalisation avec le plomb 204 non radiogénique)

■ → âges ~ 4,5 milliards d'années

Peut-être des fragments d'astéroïdes différenciés

- enveloppe pierreuse
- cœur métallique

Quand le ciel tombe sur la tête... les météorites

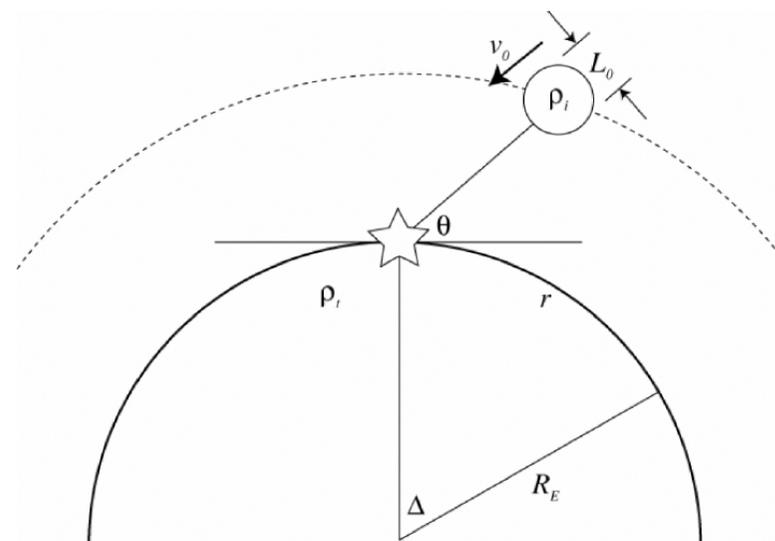
■ Fréquence sur Terre

- 500 objets par an (de taille > pierre) survivent à la traversée de l'atmosphère
- 1 impact d'un objet de 10 m tous les ans libérant l'énergie d'Hiroshima
- 1 impact d'un objet de 1 km tous les 500 000 ans
- dernier impact d'un objet de 10 km il y a 65 millions d'années (→ dinosaures)

■ Énergie libérée

- Densité : 4 à 8 tonnes/m³
 - Vitesse de l'impact : 10 à 70 km/s
 - → Énergie d'un impact
- $E = \frac{1}{2} mV^2 > 10^{14} \text{ J} \times (\text{Diamètre}/10 \text{ m})^3$
(Hiroshima = 15 kt TNT = $6,3 \times 10^{13} \text{ J}$)

■ Freinage par l'atmosphère



■ Énergie de l'impact →

- Onde de choc (tremblement de terre)
- Fusion locale des matériaux
- Creusement d'un cratère
- Éjection de matériaux

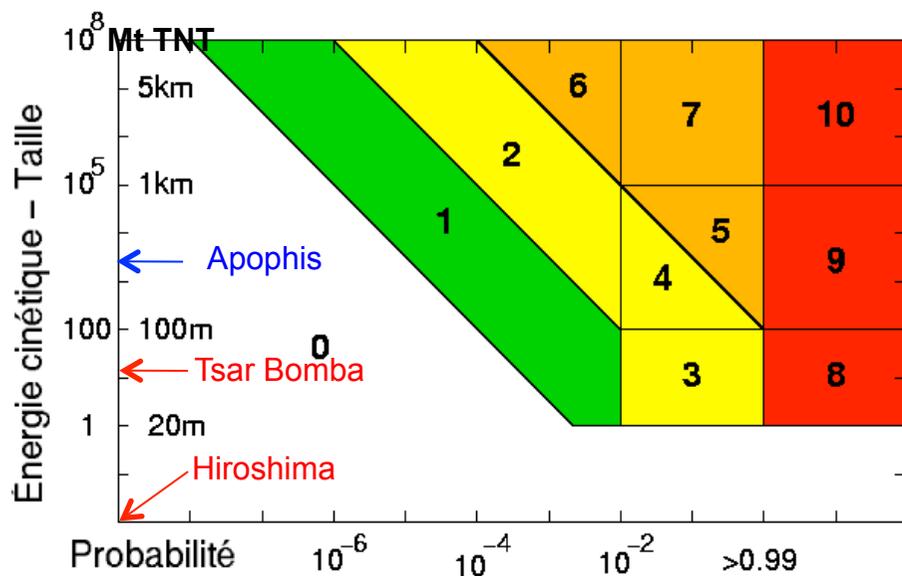
Peut-on s'en protéger ?

■ Échelle de Turin

- 0 risque nul
- 1-4 risque très faible, à surveiller
- 5 risque de dégâts régionaux
- 6-7 risque de dégâts mondiaux
- 8 destruction régionale probable
- 9-10 destruction mondiale probable

■ Le niveau maximal atteint fut 4

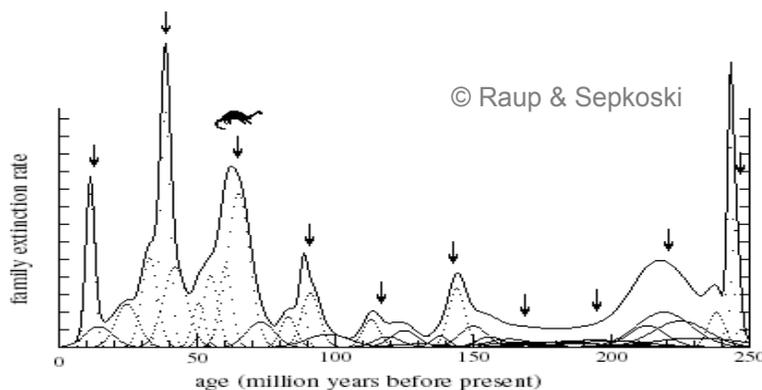
- attribué en 2004 à (99942) *Apophis*, astéroïde de 250 m devant passer en 2029 entre la terre et la Lune et risquant en 2036 d'entrer en collision
- risque rétrogradé à 0 depuis 2006
- Un projet de déviation d'*Apophis* à son prochain passage est à l'étude



Némésis, planète X, Nibiru, etc.



- Némésis (R.A. Muller 1984)
 - **Objectif** : expliquer des vagues périodiques d'extinctions des espèces vivantes à intervalles de 26 000 ans



- **Hypothèse** : le Soleil a un compagnon (système binaire)
 - orbite de période 26 000 ans → demi grand-axe de 90 000 UA
 - perturbation périodique du nuage de Oort → « pluie » de comètes sur la Terre

- Mais
 - Étoile pas détecté → naine (brune?) de masse $\ll 0.6 M_{\odot}$
 - → visible avec Pan-STARRS
 - Périodicité des extinctions très critiquée

Planète X

- Après plané pour des r
- → pl la ce



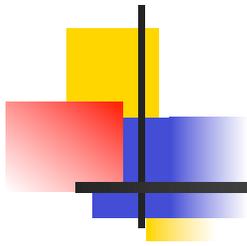
e 10°
oposée
oations
anus
jets de

Nibiru

- Cons 2012 Terre avert terre:
- NB: I

ée en
que la
(mais
; extra-

A



Merci de votre attention !

