

# Astrophysique

## 7 – Les petits corps du système solaire

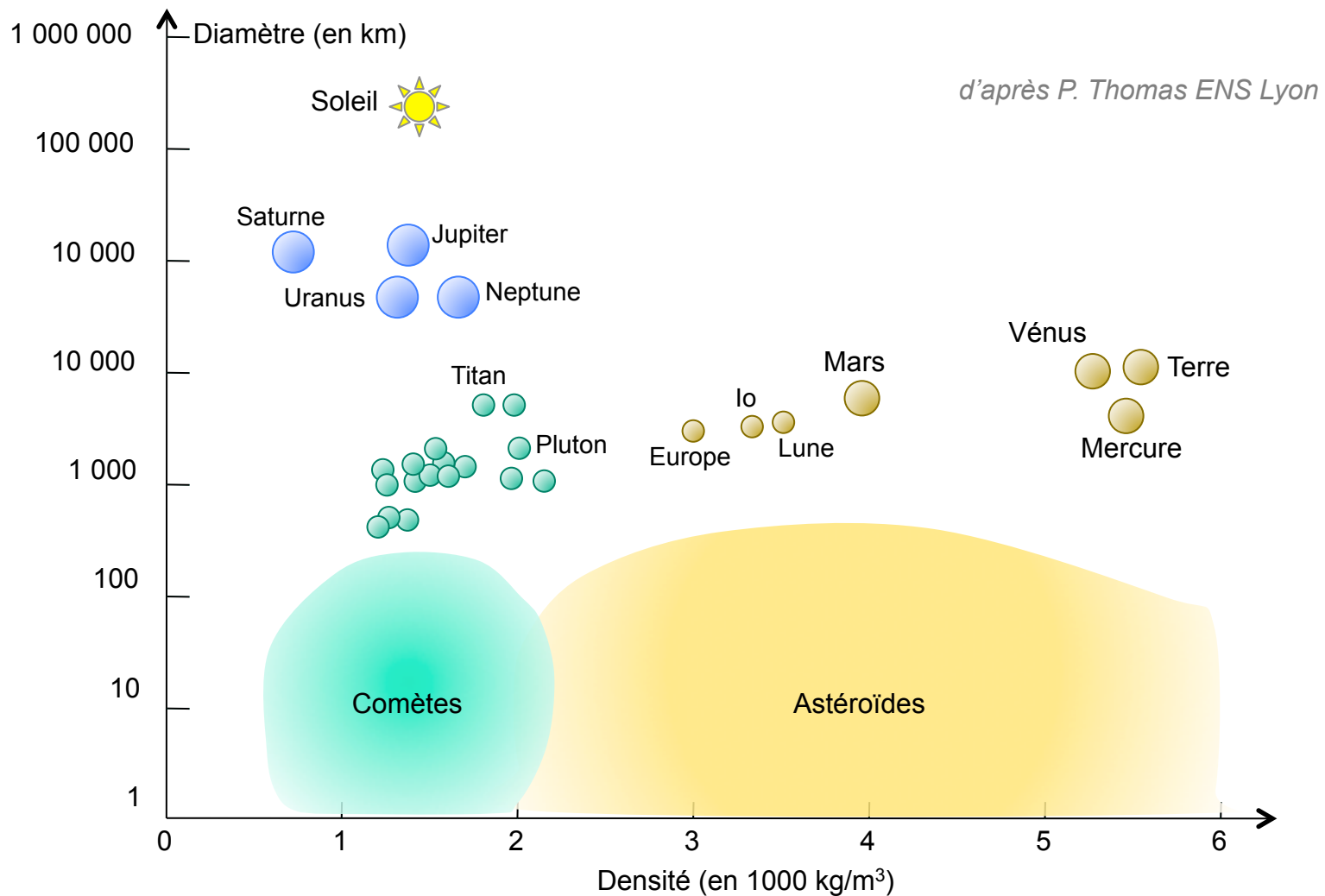


Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

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

# Les objets du système solaire



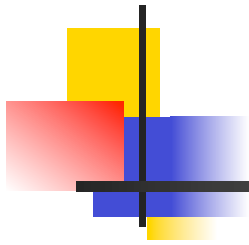


# Planètes naines

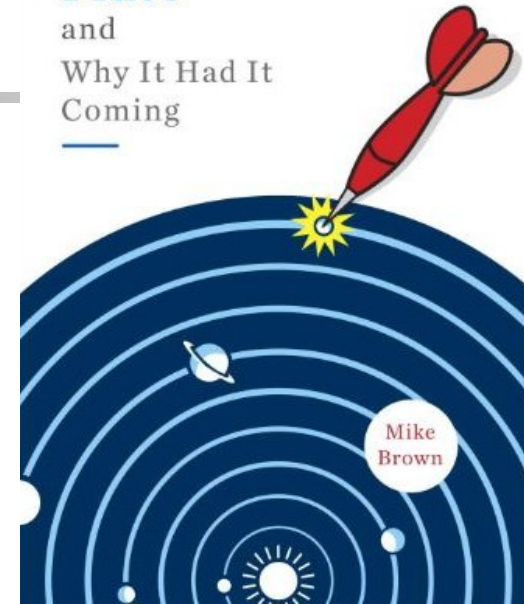
# et petits corps

---

- 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

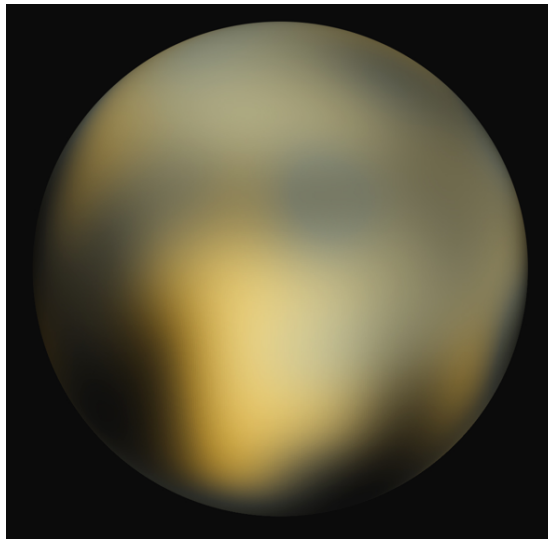


# PLANÈTES NAINES

# Pluton, Charon, Haumea, Makemake,

## ■ (134340) Pluton

- Découvert en 1930 (9<sup>e</sup> 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)

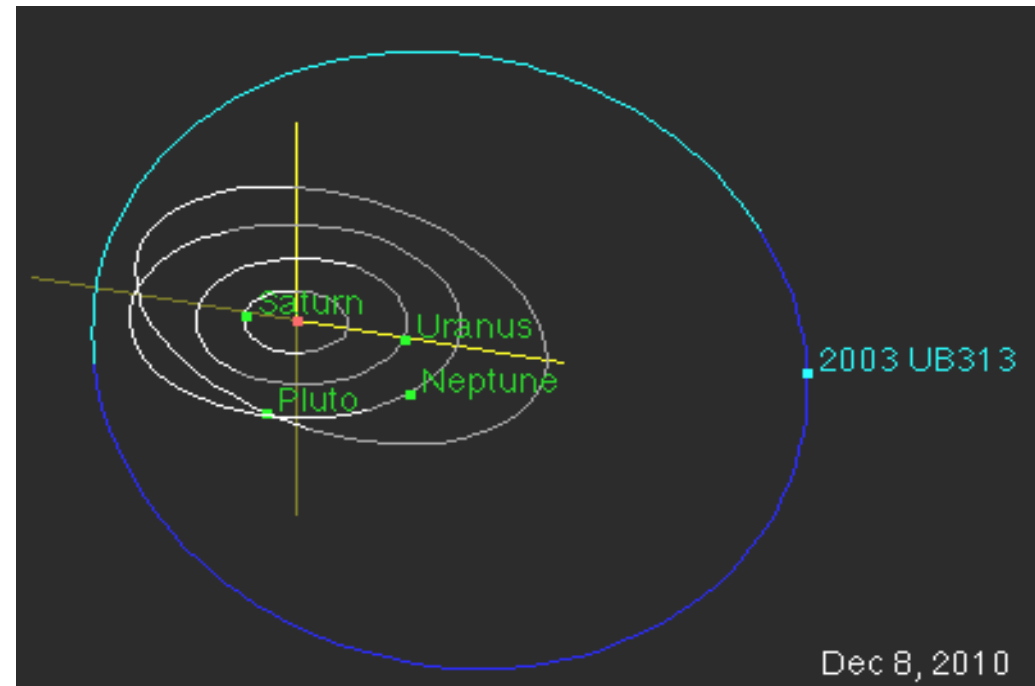
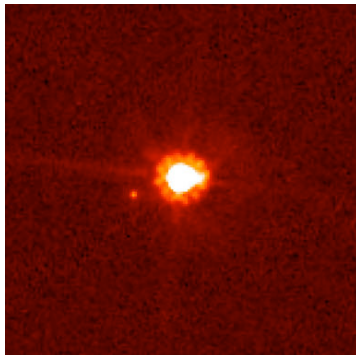
# Éris



## ■ (136199) Éris

- *Déesse grecque de la discorde*
- Découverte en 2003 (2003UB<sub>133</sub>), 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)

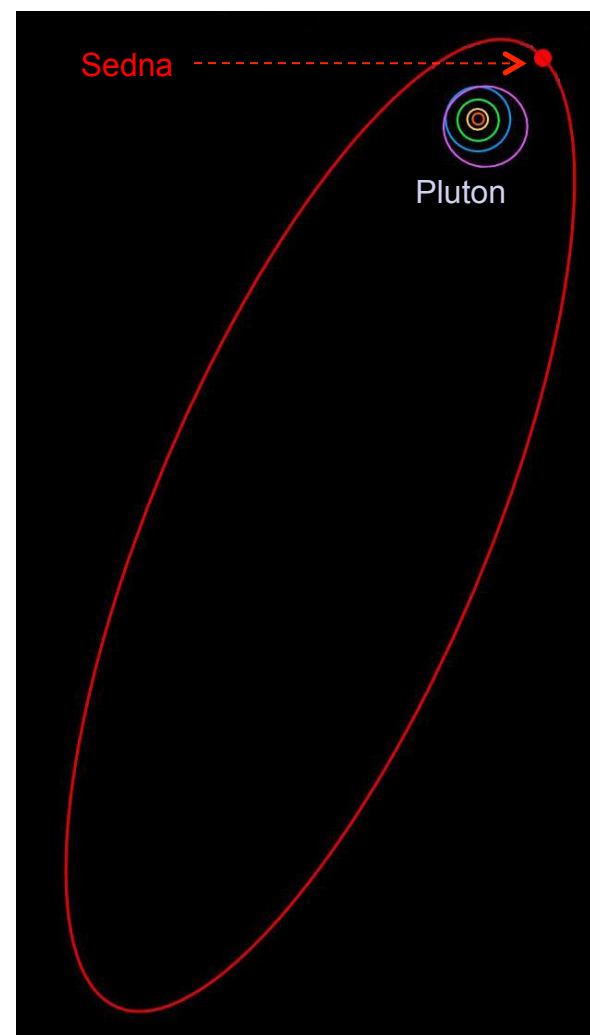
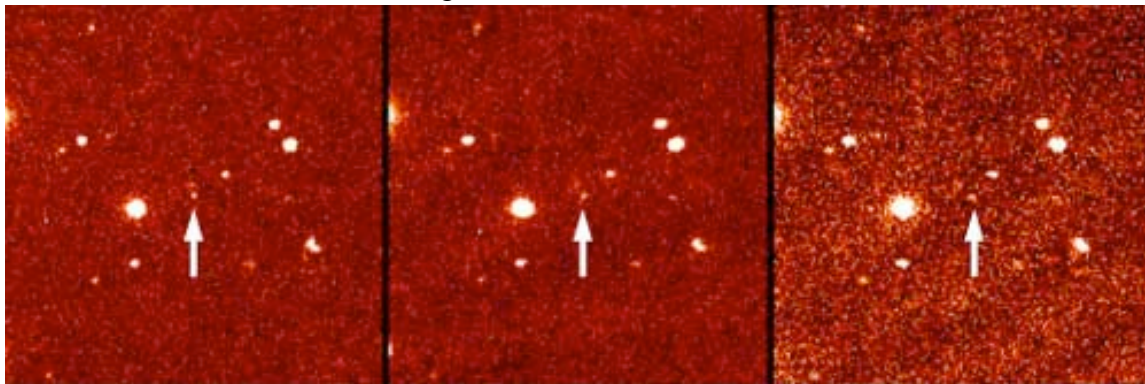


# Sedna



- (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

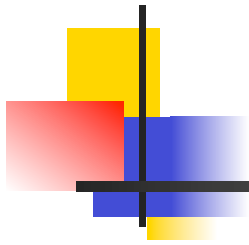


# Les objets transneptuniens

## Les plus grands objets transneptuniens connus



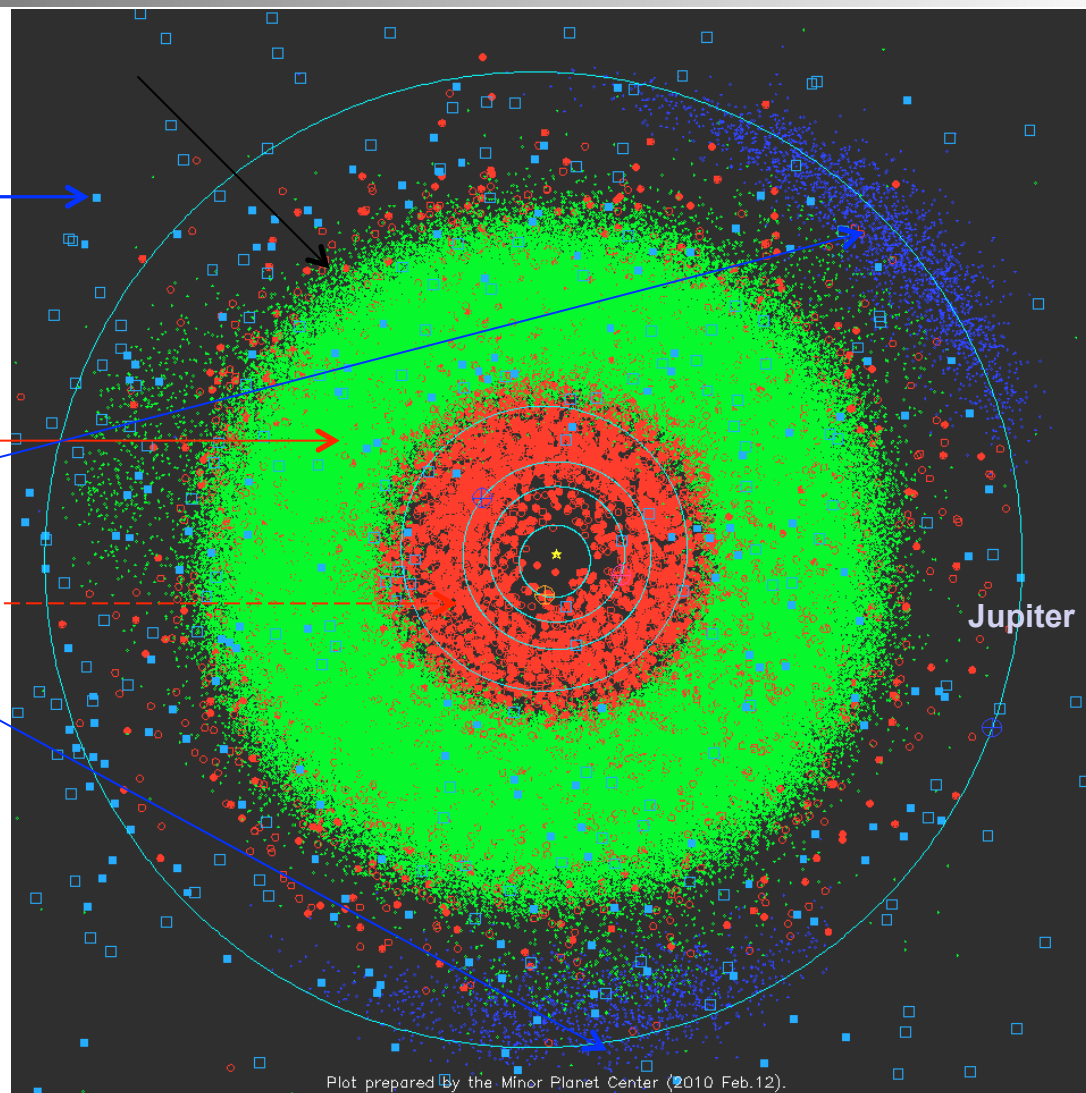




# PETITS CORPS

# Les petits corps du système solaire « interne »

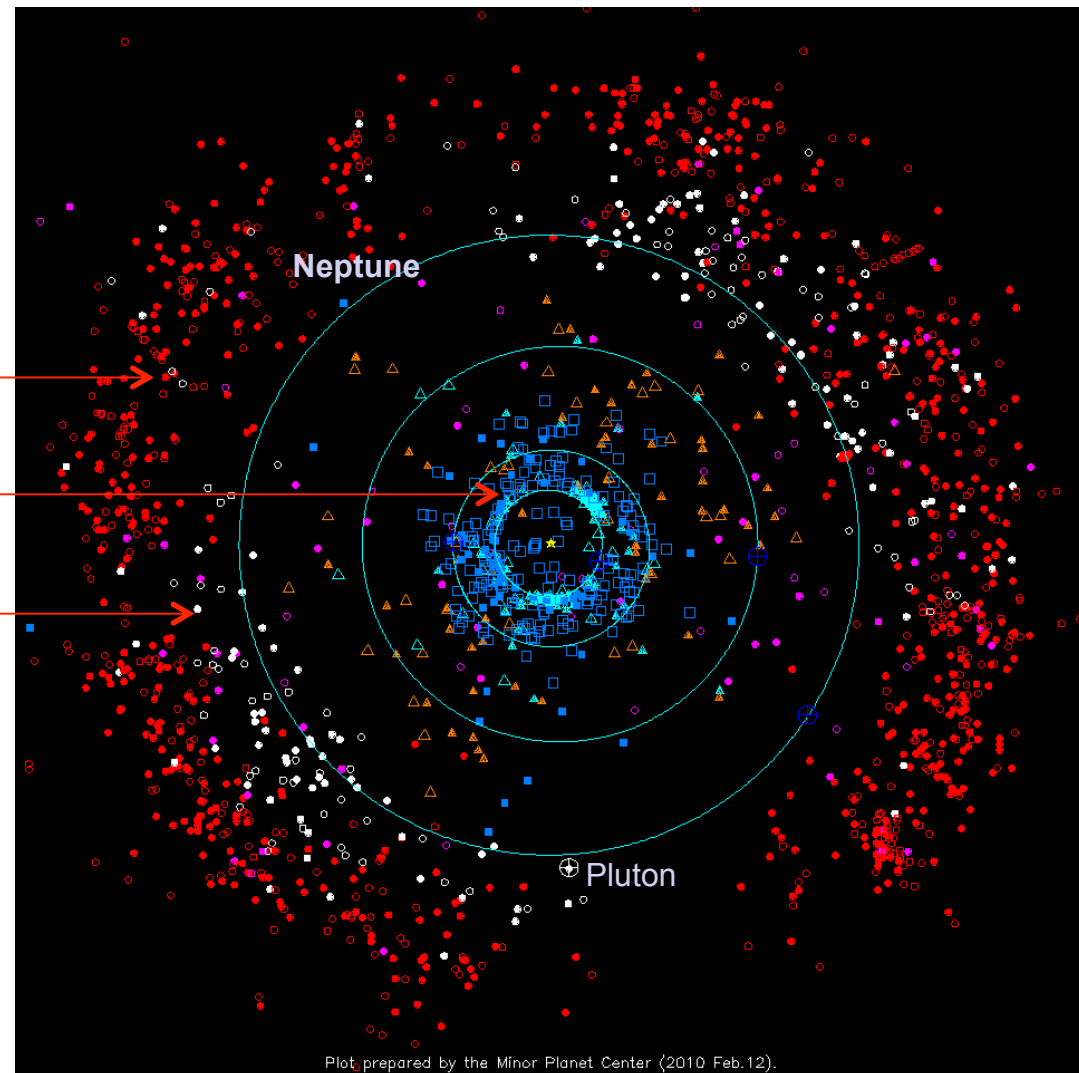
- Comètes
  - Courte période (< 200 ans)
  - Longue période (> 200 ans)
- Astéroïdes
  - Ceinture entre Mars et Jupiter
  - Troyens
  - Géocroiseurs
- Planètes naines
  - Cérès
  - Pluton et Charon
  - Eris, Makemake, Haumea...



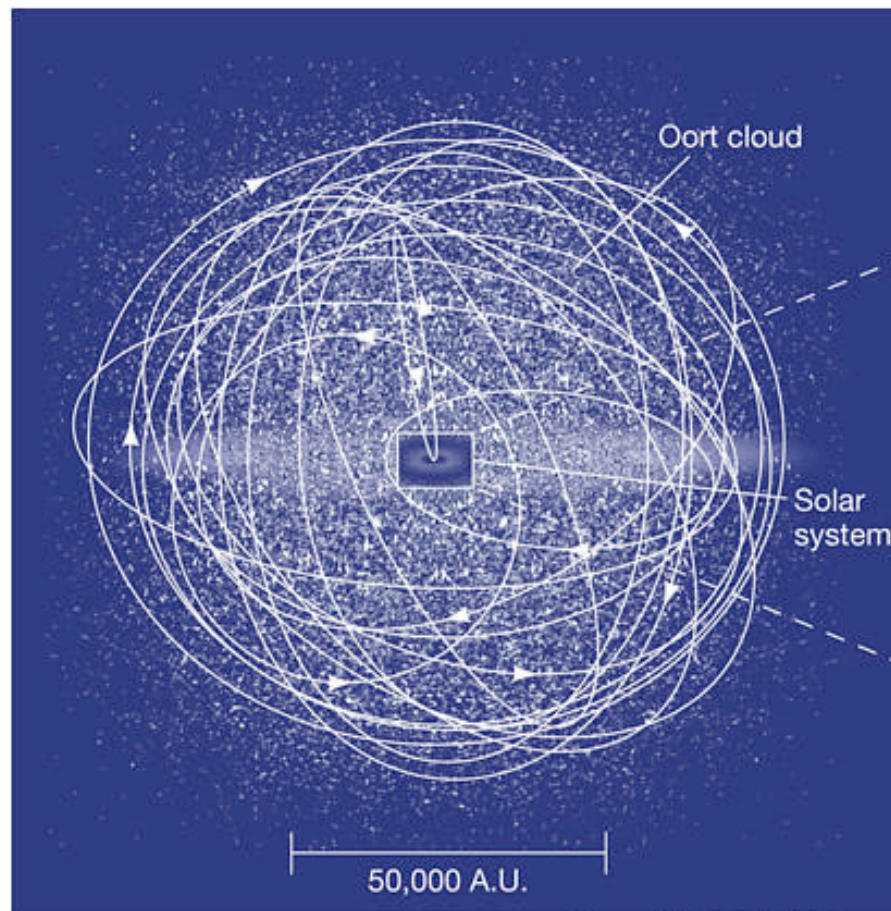
Plot prepared by the Minor Planet Center (2010 Feb.12).

# Le système solaire et les objets transneptuniens

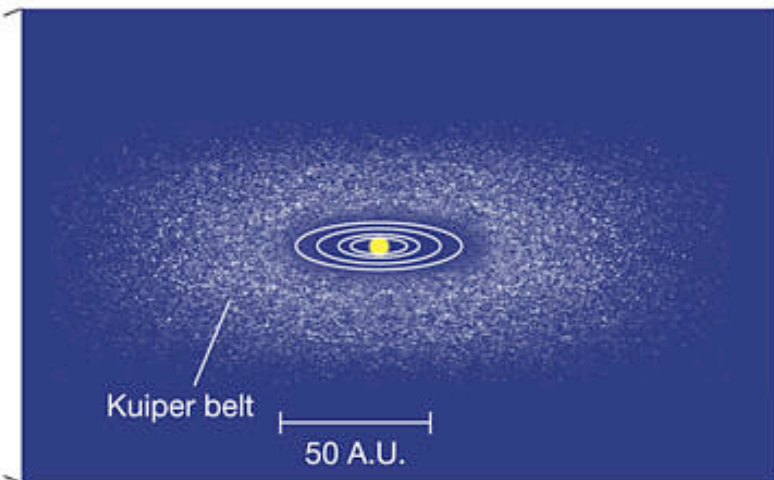
- Ceinture de Kuiper →
- Astéroïdes →
- Plutinos →
- *Rayon orbite Neptune 30 UA*



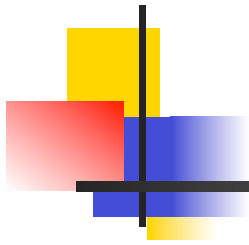
## Le système solaire « externe »



- 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  $30^\circ$  à  $70^\circ$  sur le ciel



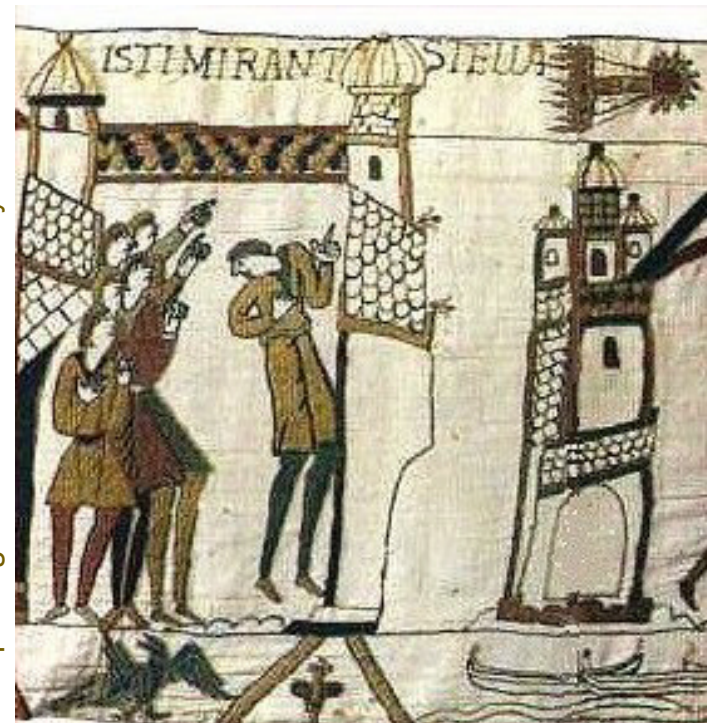
- Les comètes brillantes ont toutes de très longues périodes (à part Halley)

### ■ Les noms des comètes

- C/1995 O1 (Hale-Bopp)
  - C = période > 200 ans (2520 ans)
  - 1995 = année de découverte
  - O1 = 1<sup>o</sup> comète de la 2<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> 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

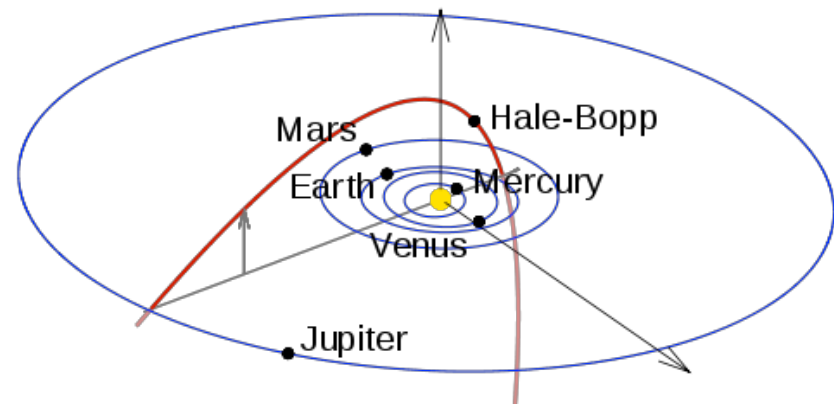
- Edmond Halley (1656-1742) utilisa en 1705 les lois de Newton pour calculer les orbites de 24 comètes
- Il remarqua que les comètes de 1456, 1531, 1607 (comète de Kepler) et 1682 avaient pratiquement la même orbite
- Il fit l'hypothèse qu'il s'agissait de la même comète, ayant donc une période de 76 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°**



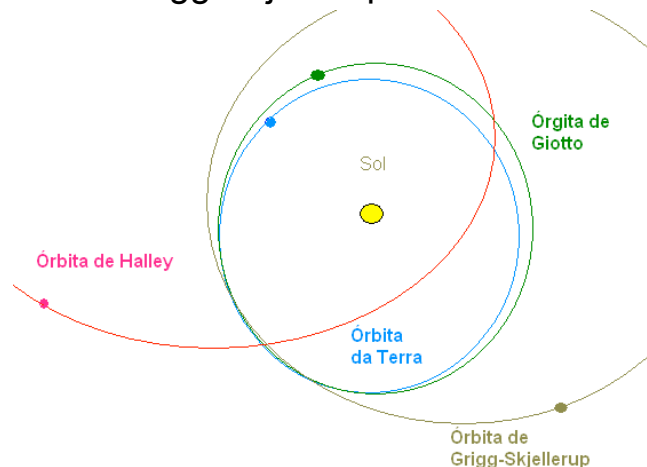


# Sondes vers les comètes



## ■ Rencontres avec la comète de Halley

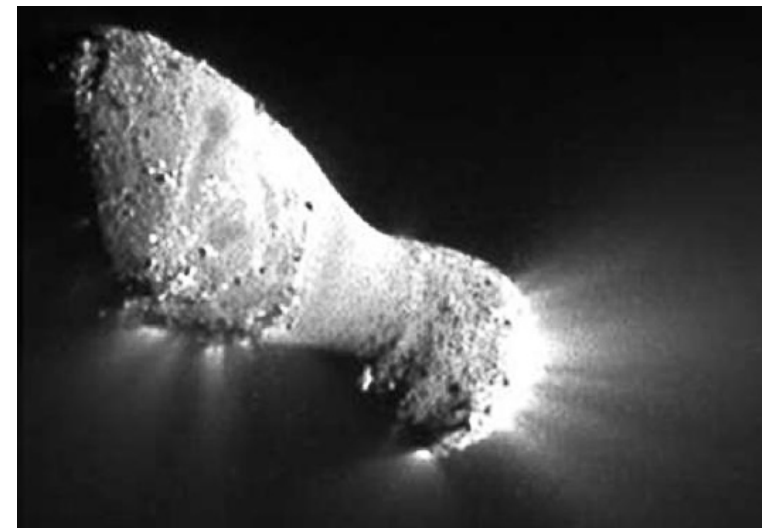
- **Vega** (Венера Галлей) 1 et **Vega 2** explorèrent Vénus en 1985 avant de se diriger vers Halley, frôlée à 9000 km
- **Giotto** (ESA) passa à 600 km de Halley en 1986, puis à 200 km de la comète 26P/Grigg-Skjellerup en 1992



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

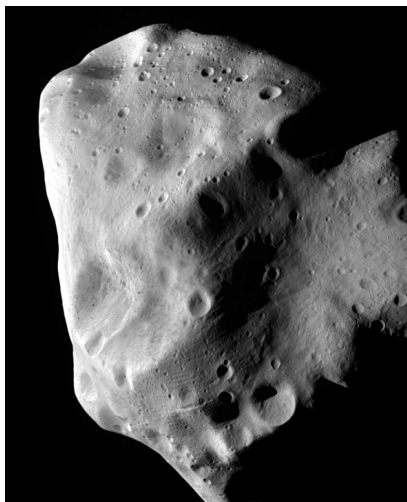
## ■ *Deep Impact* (NASA)

- 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*



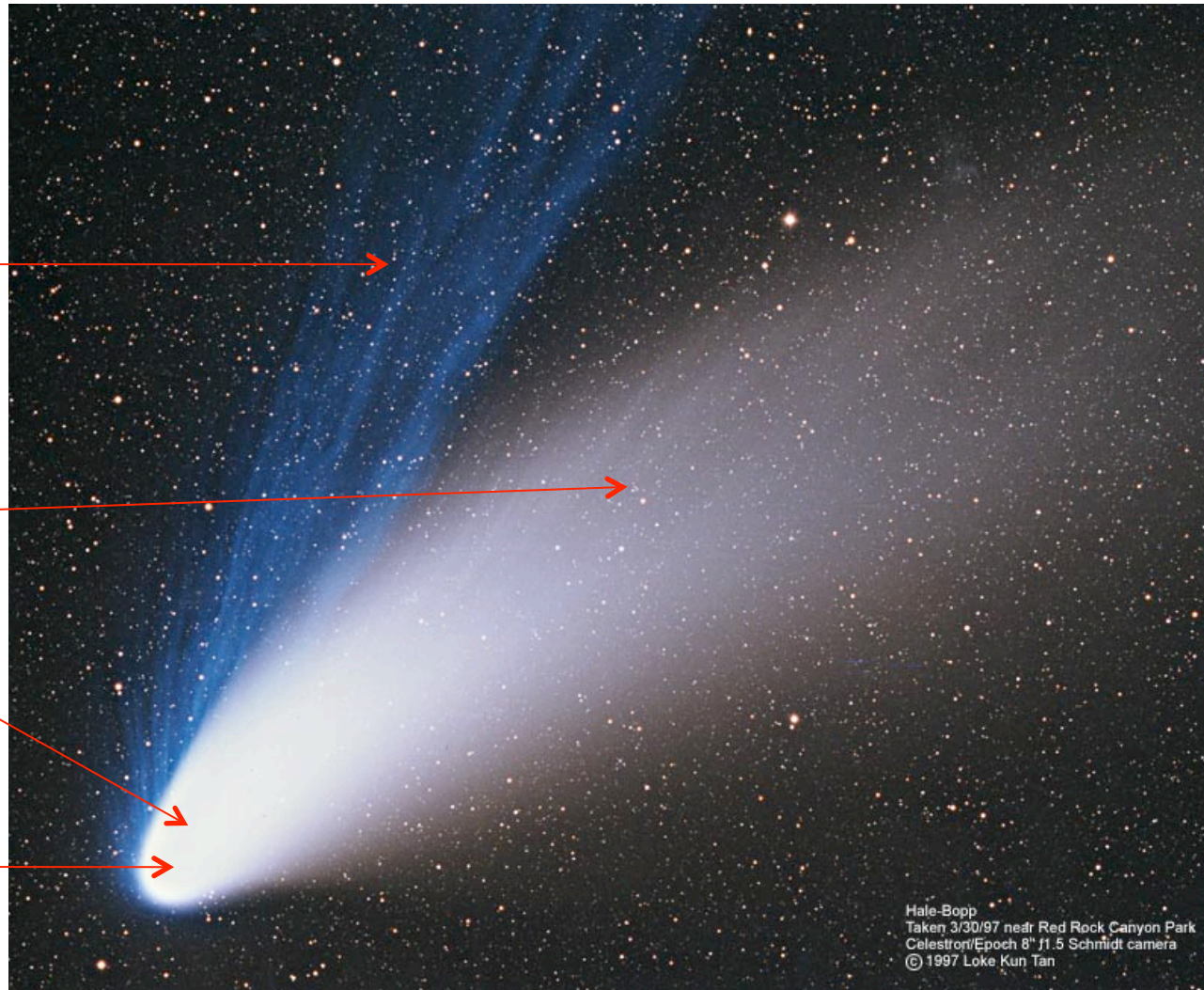
# Structure des comètes

Queue de  
plasma  
(ionique)

Queue de  
poussière

Chevelure  
ou coma

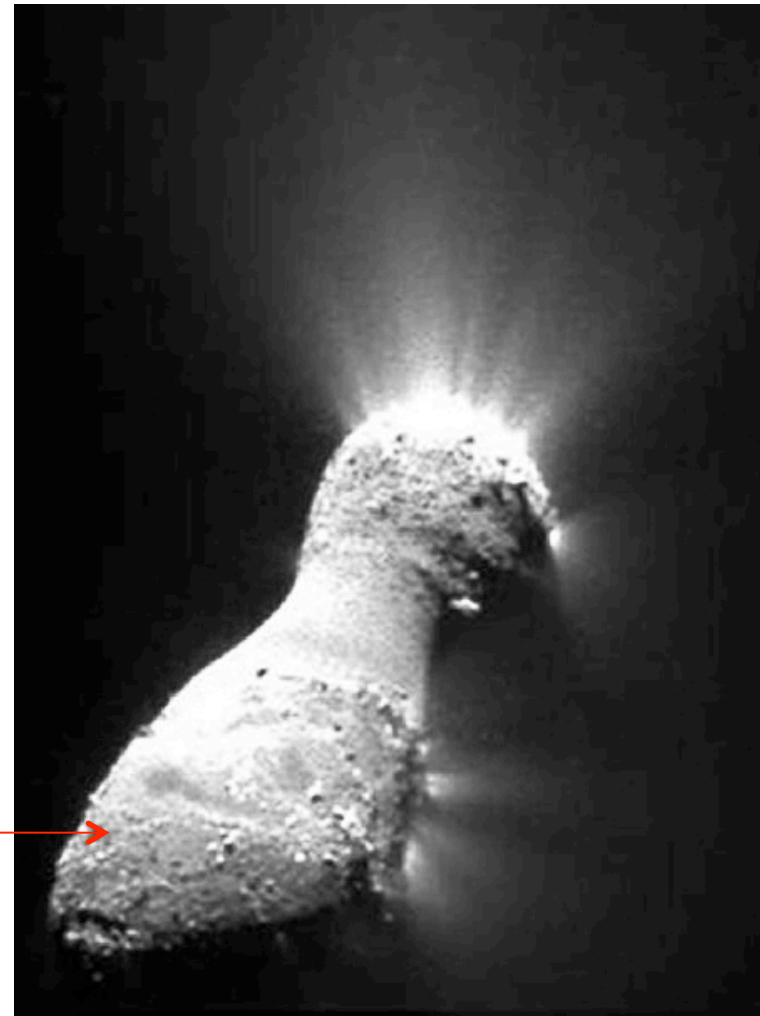
Noyau



Hale-Bopp  
Taken 3/30/97 near Red Rock Canyon Park  
Celestron/EPOCH 8" f1.5 Schmidt camera  
© 1997 Loke Kun Tan

## 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) →



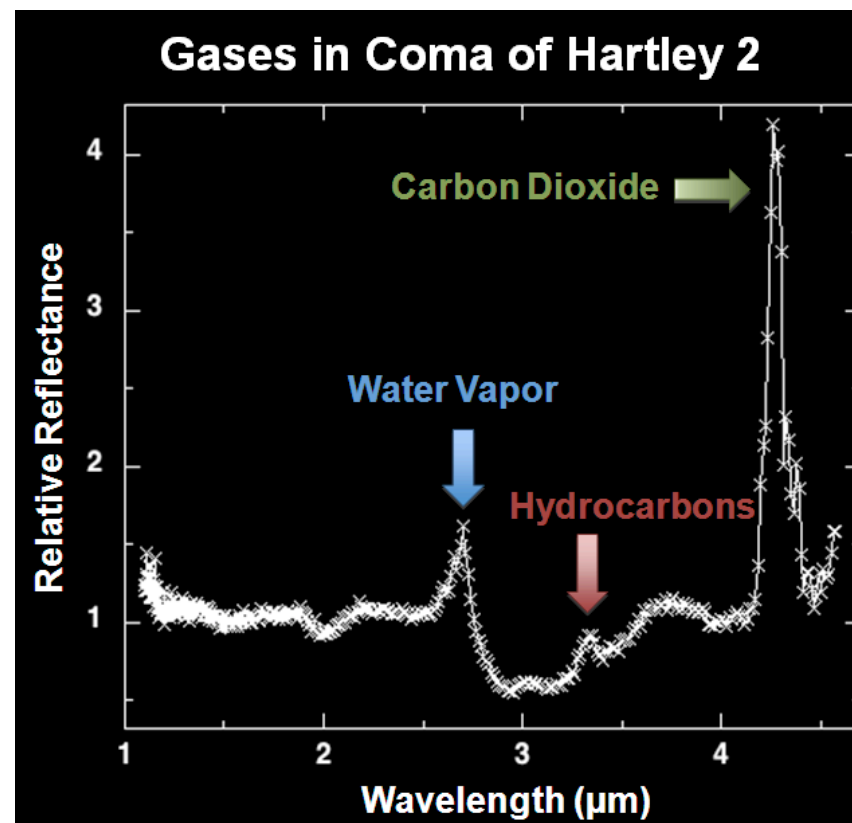
# Composition des noyaux de comètes

- 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) →
  - 80 % eau,
  - 10 % de CO
  - 2,5 % de méthane et ammoniac
  - traces d'hydrocarbures, de fer et de sodium
  - noyau très sombre (couche de poussière?) riche en carbone



## 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 H<sub>2</sub>O) 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



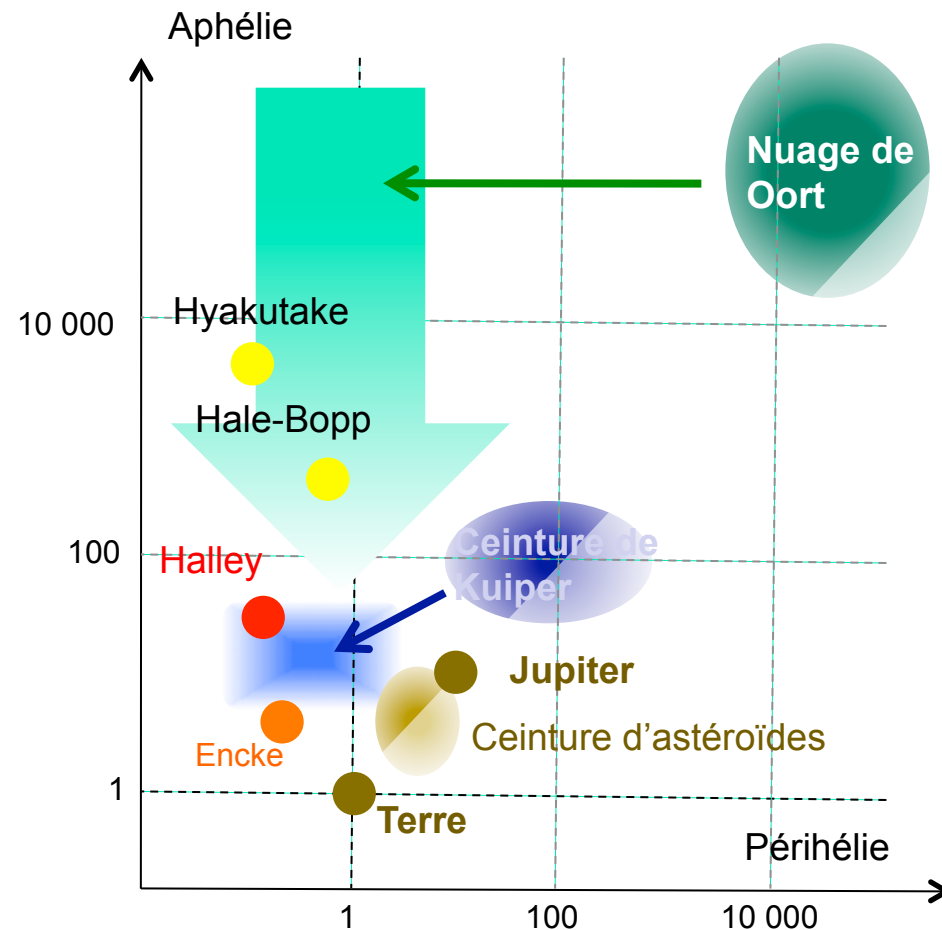
# Queues de comètes

- 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<sup>+</sup>)
  - repoussée par le vent solaire (e<sup>-</sup> et p<sup>+</sup>)
  - rectiligne, sur des dizaines de millions de kilomètres

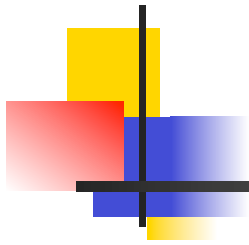


# L'origine des comètes

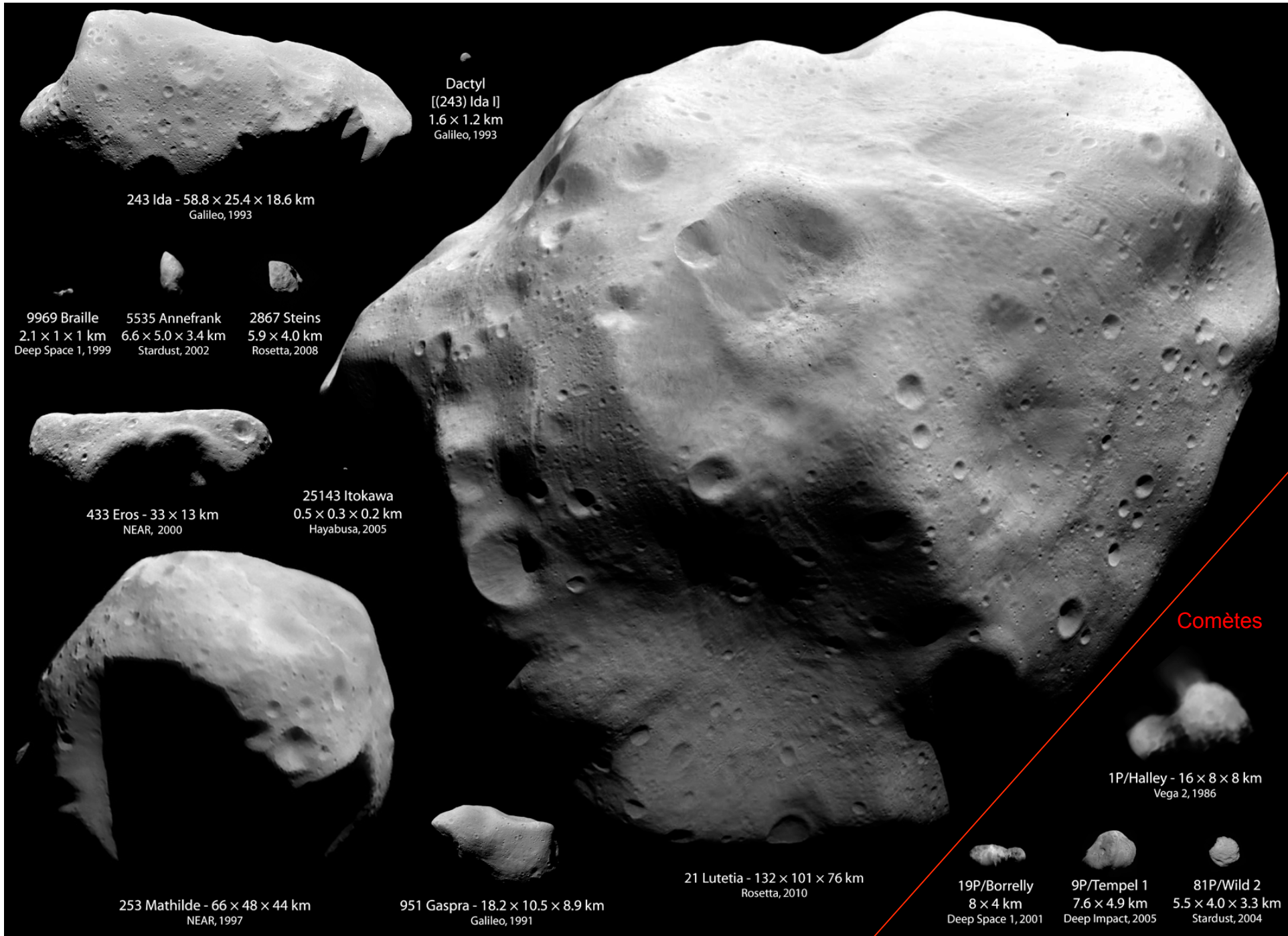
- À chaque passage près du Soleil, les comètes perdent de la masse
- À chaque passage près des planètes géantes, les comètes risquent d'être déviées loin du Soleil
- → il doit exister un mécanisme alimentant en comètes « nouvelles » le système solaire interne
- Deux réservoirs ?
  - La ceinture de Kuiper (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

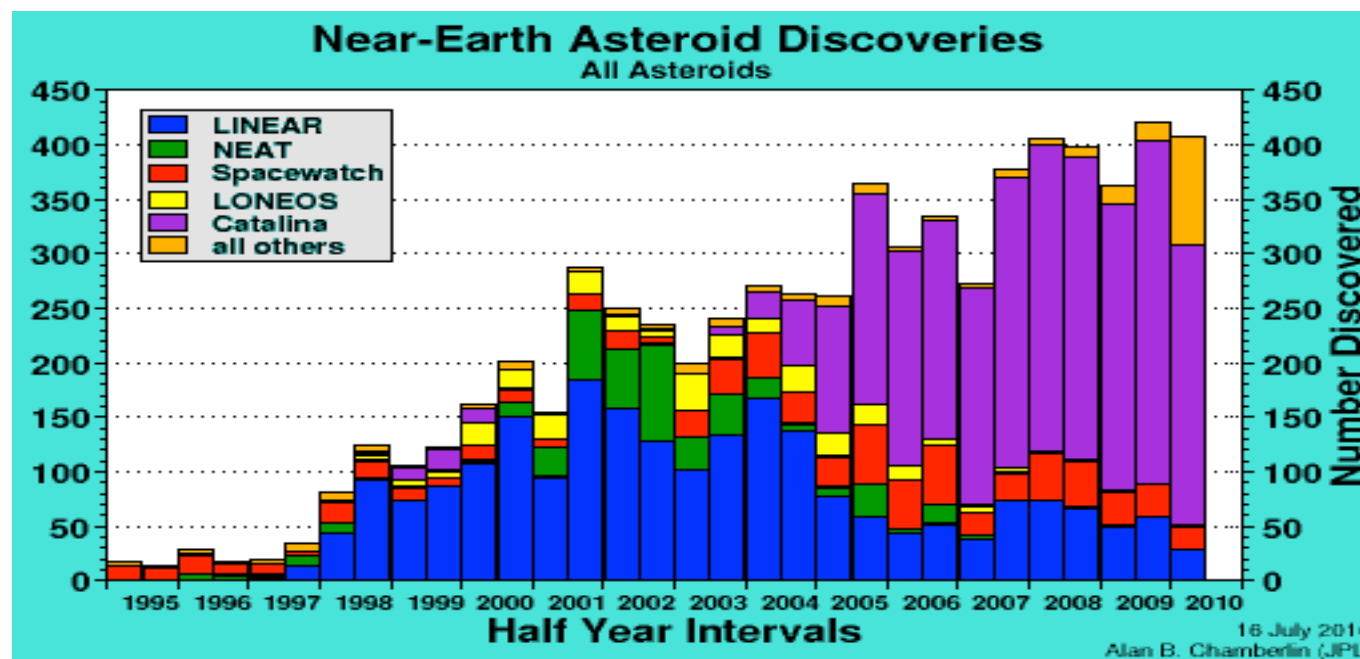
81P/Wild 2  
5.5 × 4.0 × 3.3 km  
Stardust, 2004

# Détection et surveillance des astéroïdes



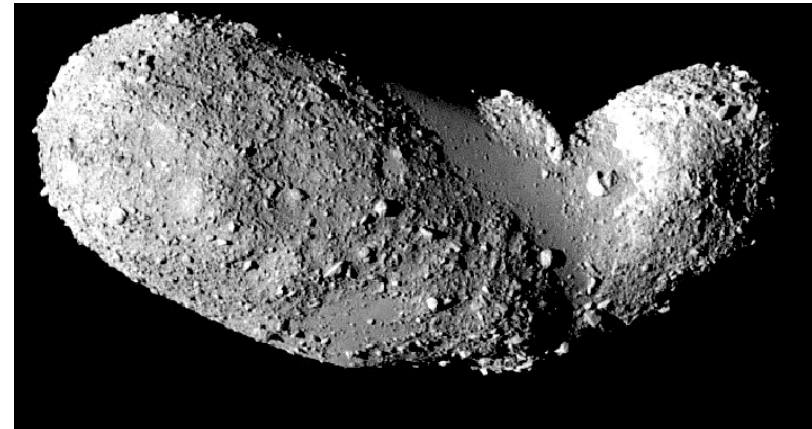
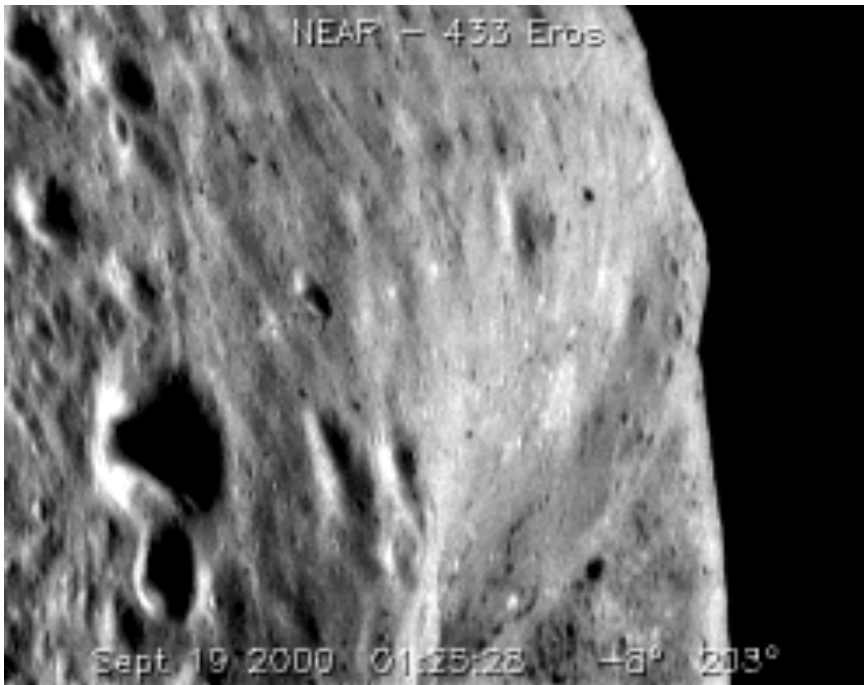
## ■ Programmes

- 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



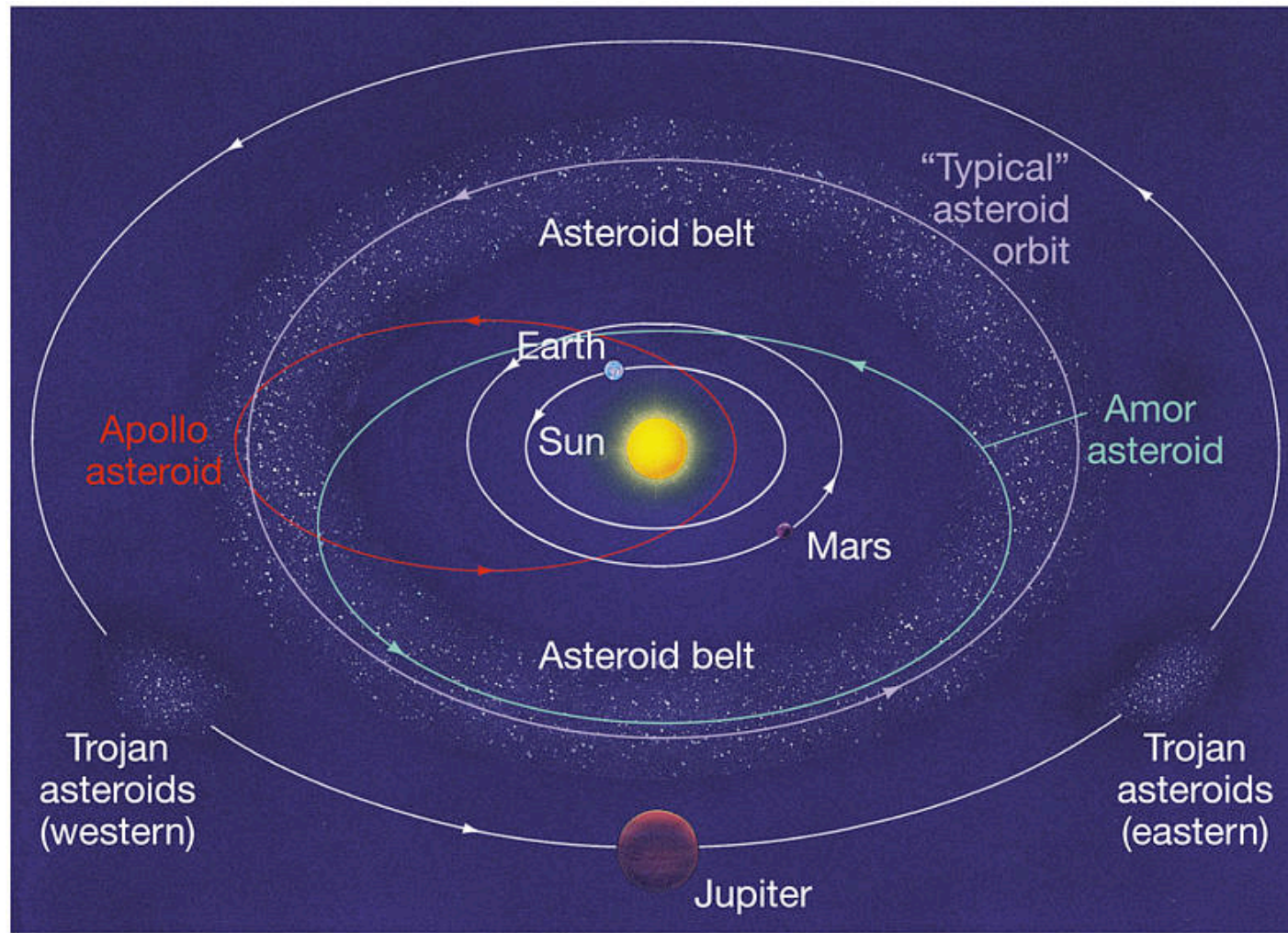


# Les astéroïdes

---

- 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



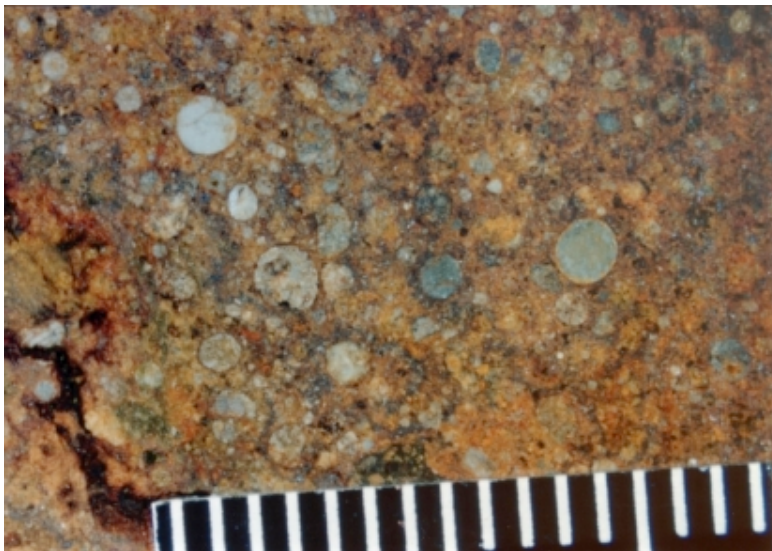
Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

# 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 ( $\frac{1}{2}$  vie 4,5 Md ans)
- Uranium 235 -> plomb 207 ( $\frac{1}{2}$  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

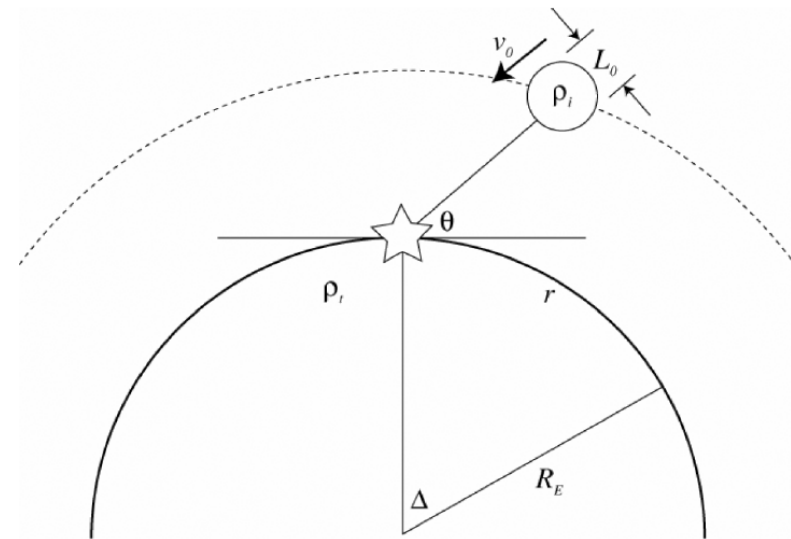
## ■ Fréquence sur Terre

- 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/m<sup>3</sup>
  - 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



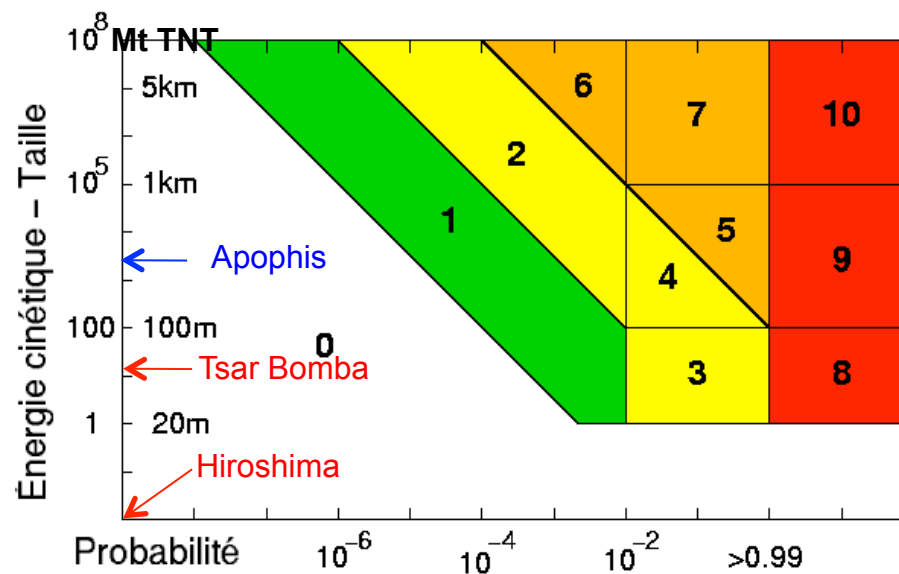
# Peut-on s'en protéger ?

## ■ 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

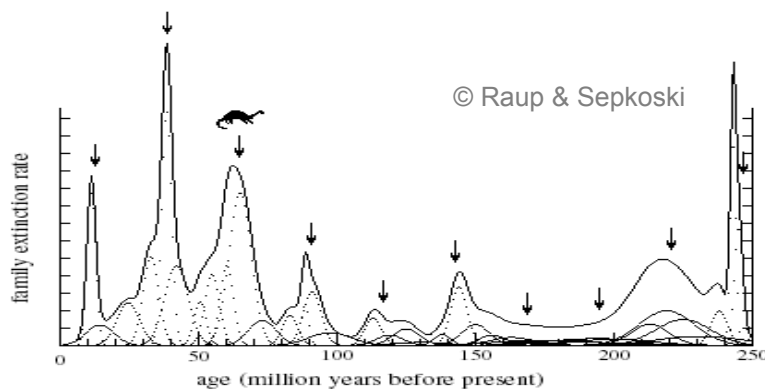
- attribué en 2004 à (99942) *Apophis*, astéroïde de 250 m devant passer en 2029 entre la terre et la Lune et risquant en 2036 d'entrer en collision
- risque rétrogradé à 0 depuis 2006
- Un projet de déviation d'*Apophis* à son prochain passage est à l'étude



# 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



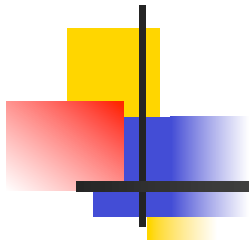
e 10°  
oposée  
ations  
anus  
jets de

## Nibiru

- Cons 2012 Terre avert terre:
- NB: I

ée en  
que la  
(mais  
; extra-

A



Merci de votre attention !

