

ASTROPHYSIQUE

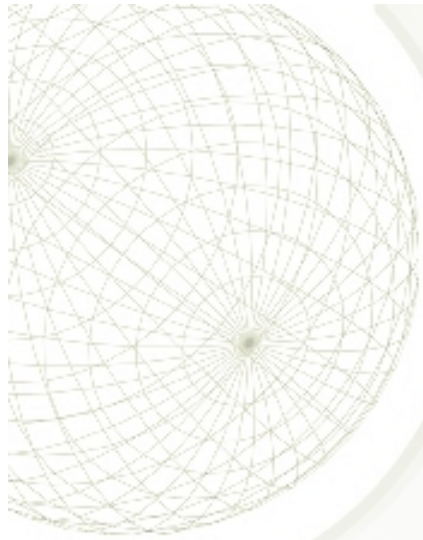
9 – EXOPLANÈTES & PETITS CORPS DU SYSTÈME SOLAIRE



Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie
Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA

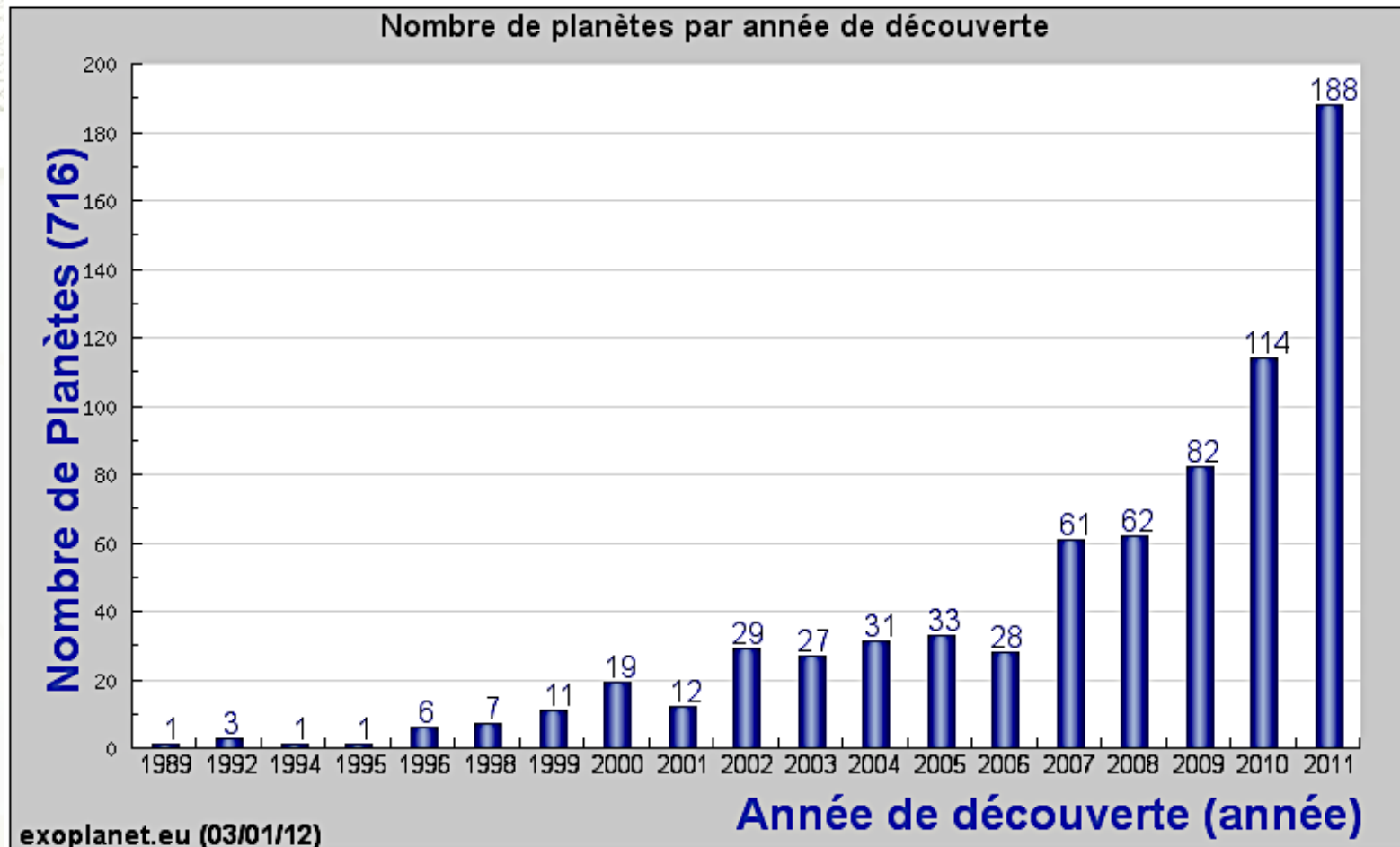




EXOPLANÈTES

PLUS DE 700 EXOPLANÈTES...

- Michel Mayor et Didier Queloz (1995) : 1^o exoplanète confirmée **51 Peg b**
 - Une *Jupiter chaude* : $M \sim 0,5 M_J$ et $D \sim 0,05 \text{ UA}$



BILAN (TRÈS) PROVISoire

- **716 exoplanètes ± confirmées dans 584 systèmes** (au 3 janvier 2012)

■ Astrométrie & vitesses radiales	657 planètes dans 535 systèmes	(79 multiples)
■ Transits	193 planètes dans 173 systèmes	(17 multiples)
■ Microlentilles	13 planètes dans 12 systèmes	(1 multiple)
■ Photométrie & imagerie	29 planètes dans 26 systèmes	(1 multiple)

- Mais aussi

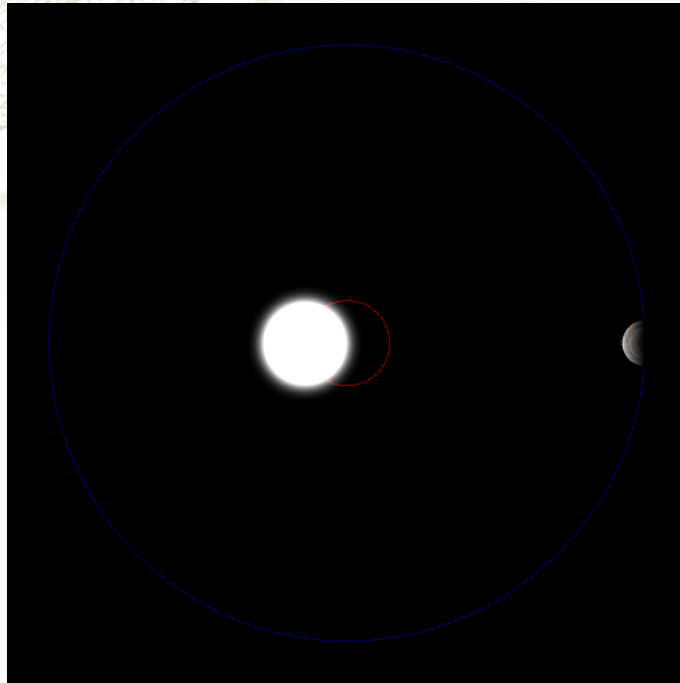
- 145 planètes réfutées (ou non confirmées) dans 141 systèmes
- La mission Corot [**C**ONvection **R**OTation and planetary **T**ransits] de l'ESA (lancée en décembre 2006, prolongée jusqu'en 2013) a annoncé la découverte de 17 exoplanètes
- La mission Kepler de la NASA (lancée en mars 2009 pour 4 ans) surveille la luminosité de 145 000 étoiles
 - 2326 candidats exoplanètes (33 confirmés)
 - 498 fausses alertes

- **Aucune planète n'a été détectée autour de plusieurs dizaines d'étoiles proches**

- → 5% des étoiles seulement auraient des planètes
- mais peut-être 20% des étoiles de métallicité importante (> solaire)

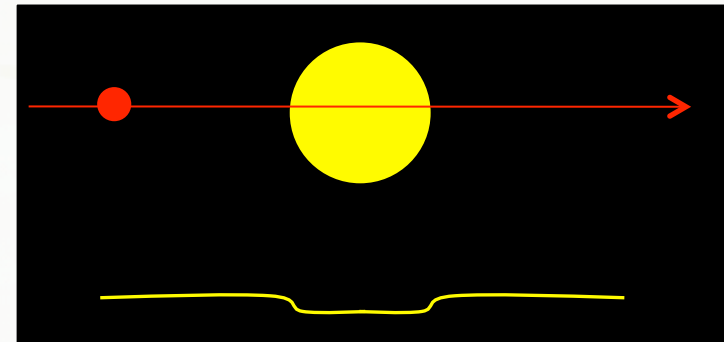
TECHNIQUES DE RECHERCHE

- Vitesses radiales
- Astrométrie : déplacement de l'étoile

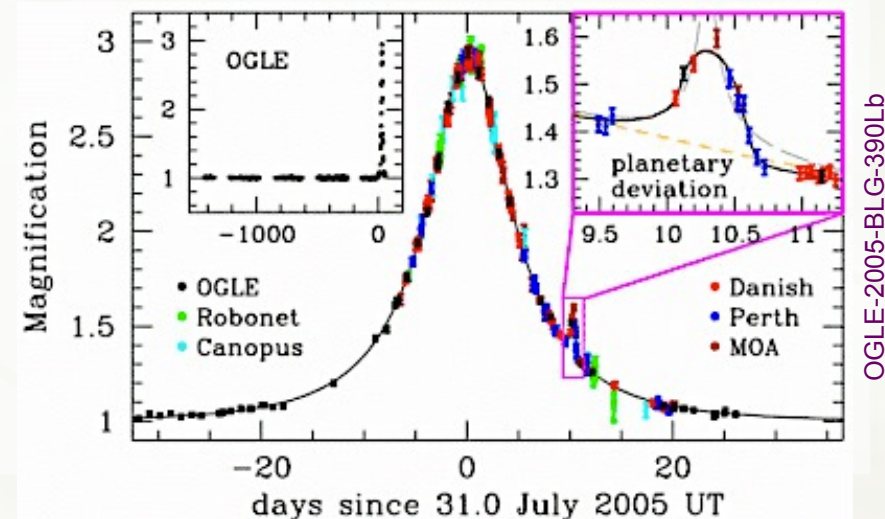


- Imagerie directe

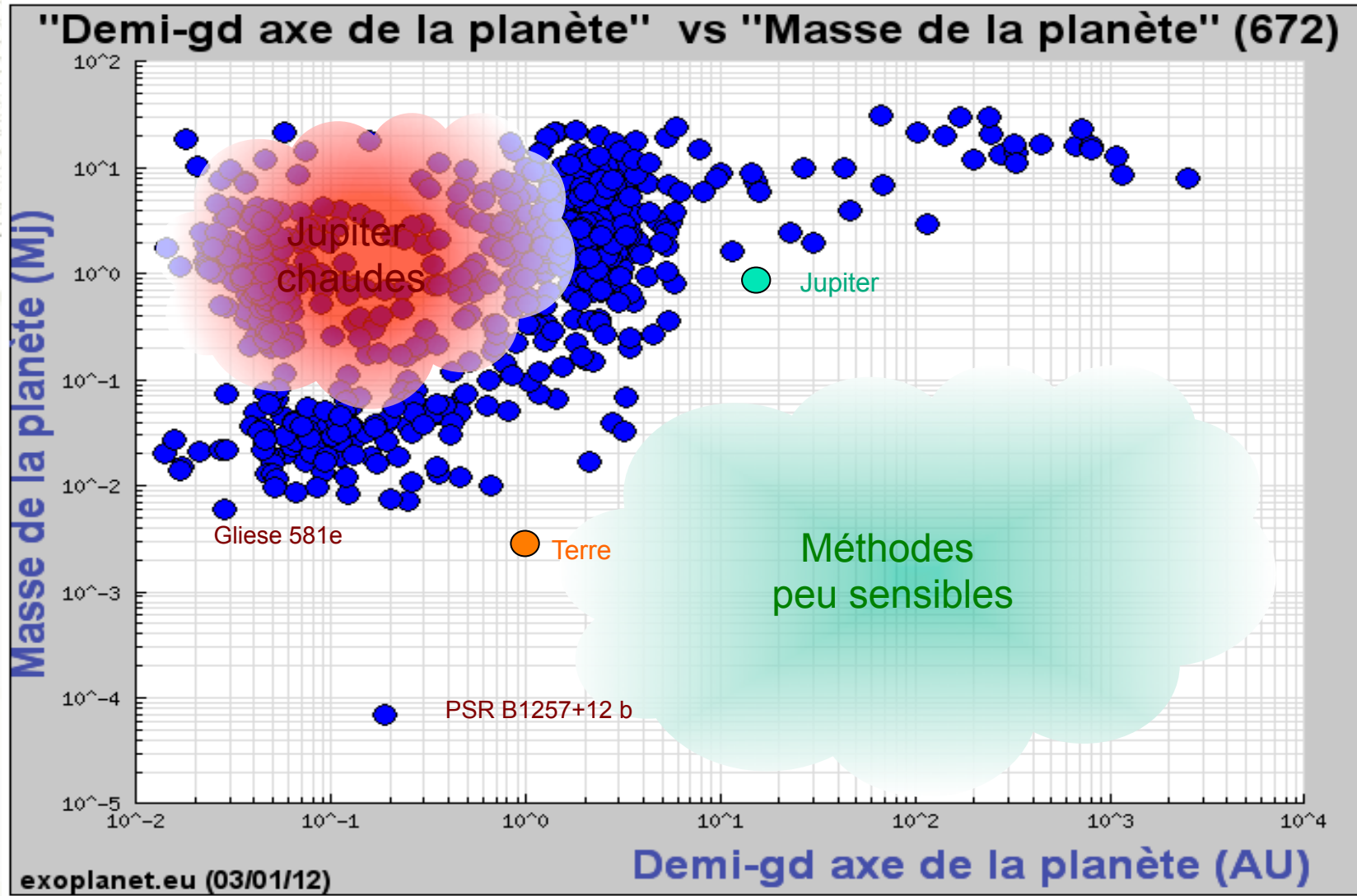
- Transits : occultations de l'étoile par une planète



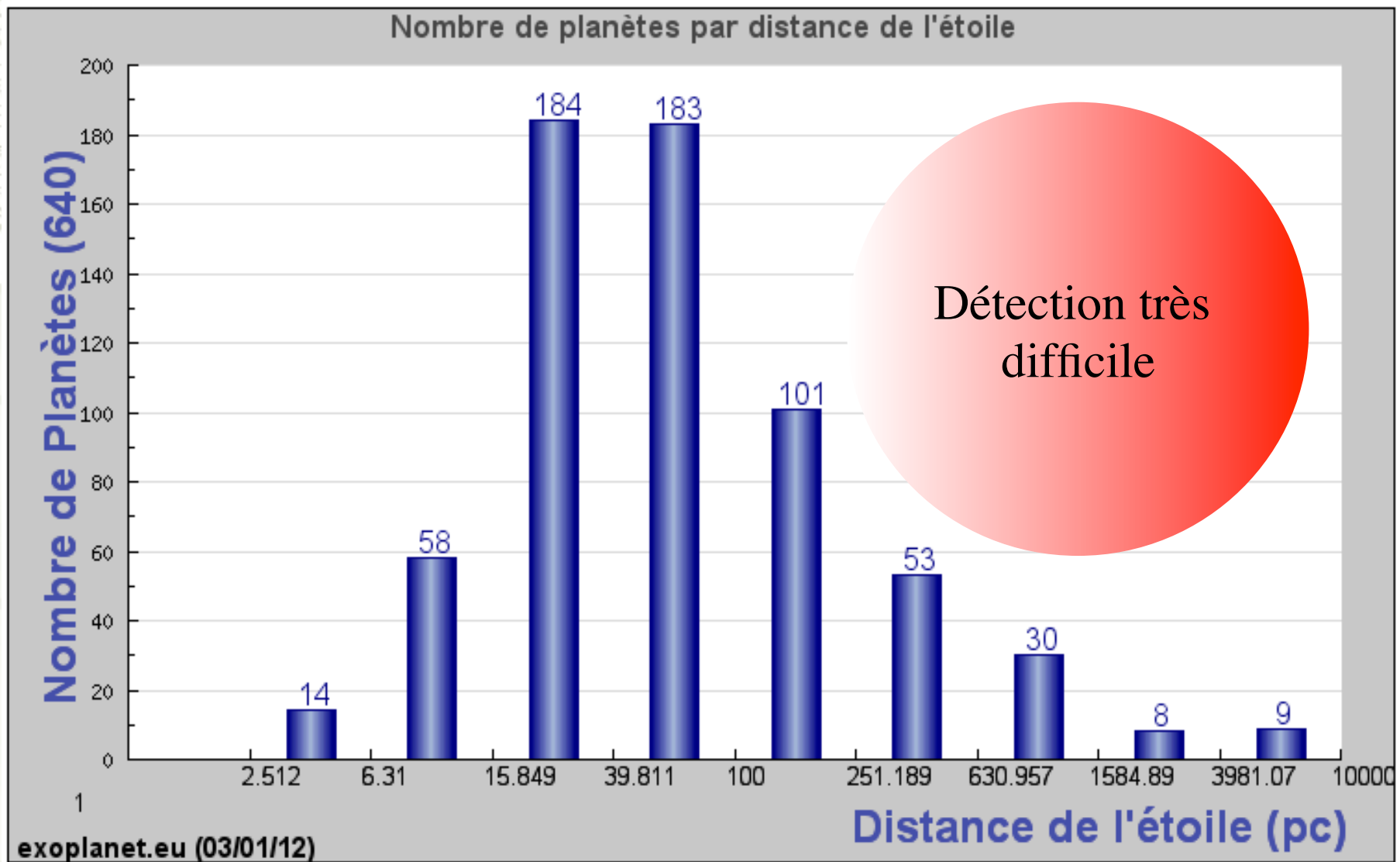
- Microlentille gravitationnelle



DISTRIBUTION



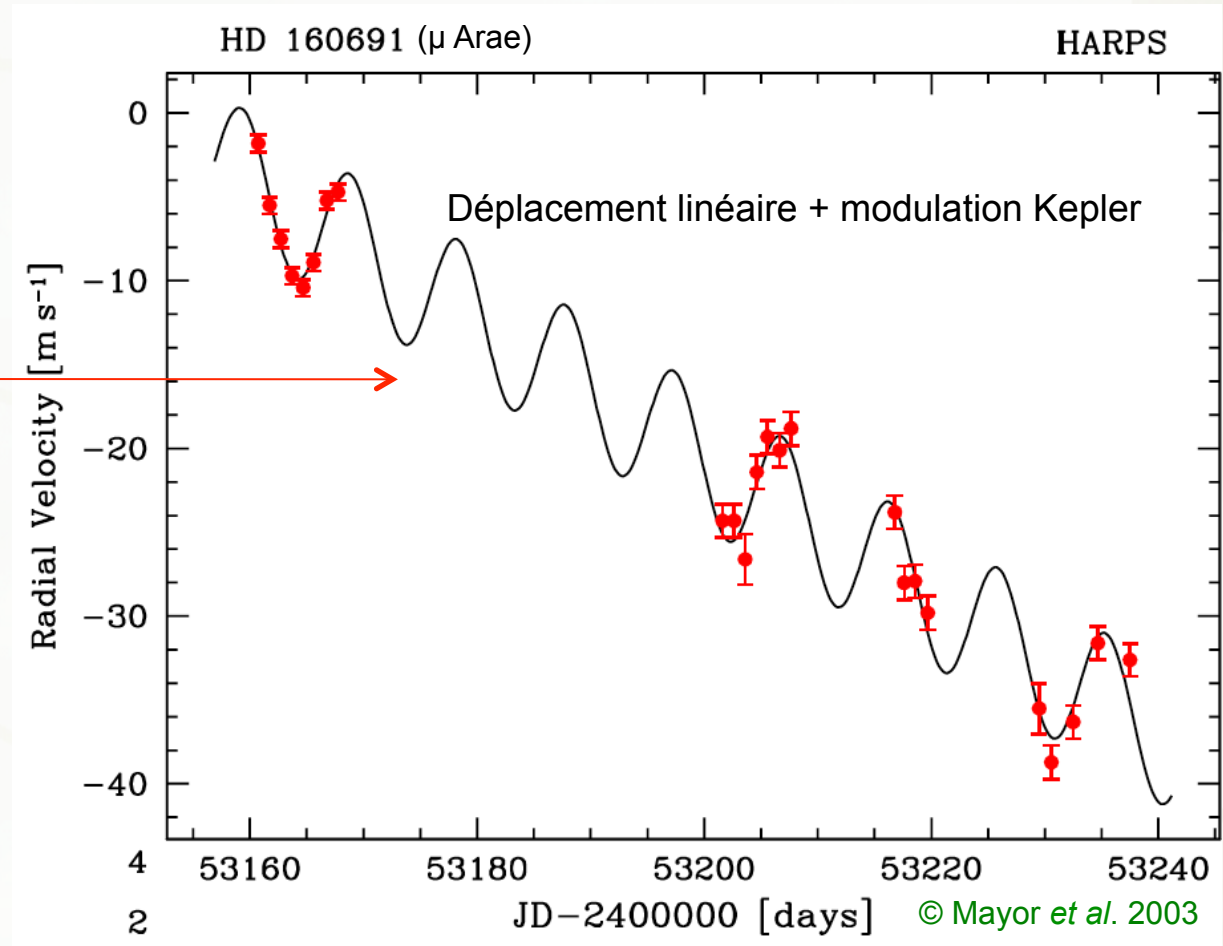
DISTANCE DE L'ÉTOILE



TECHNIQUES DE RECHERCHE : VITESSE RADIALE

- [Effet Doppler]

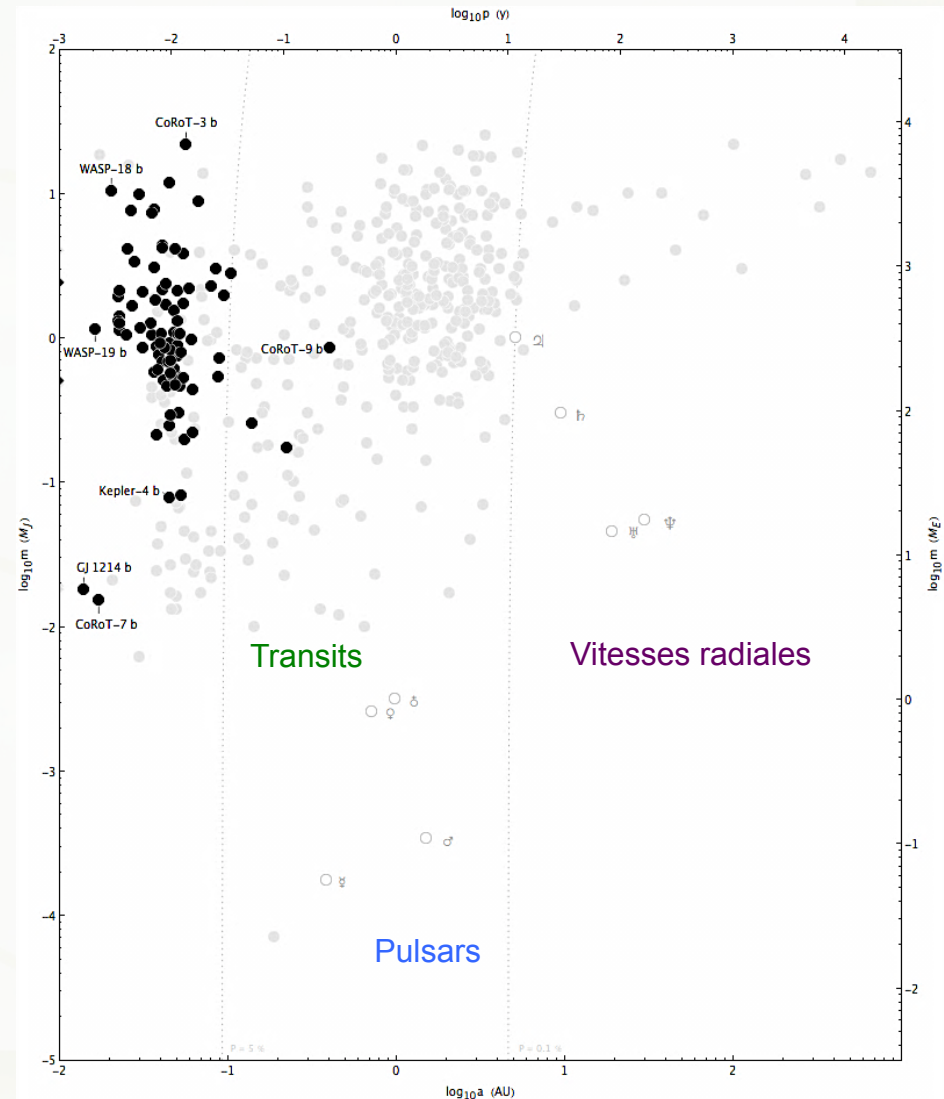
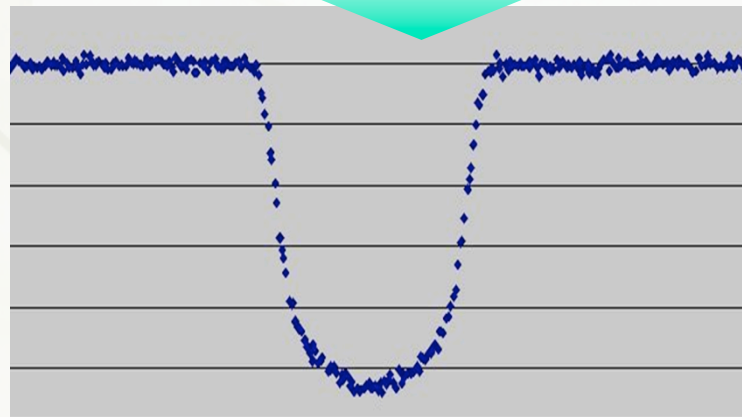
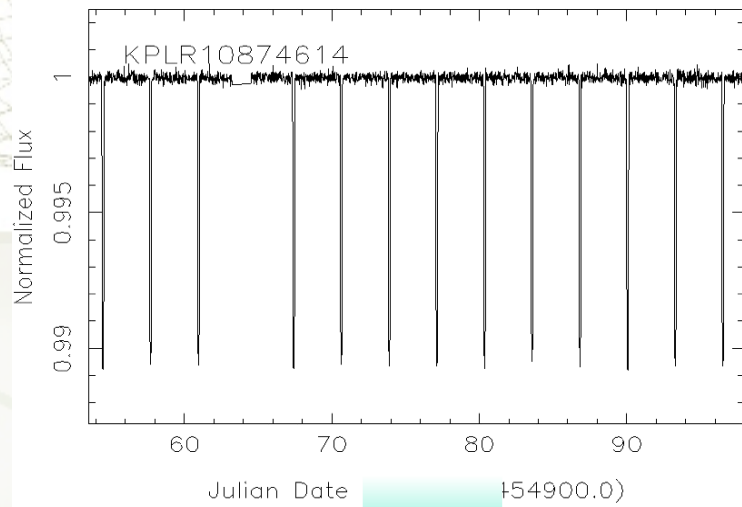
- Ici, découvertes de
 - μ Ara *b* en 2000
 - 1,68 M_J
 - 1,50 UA
 - μ Ara *c* en 2004
 - 0,03 M_J
 - 0,09 UA
 - μ Ara *d* en 2004
 - 0,52 M_J
 - 0,92 UA
 - μ Ara *e* en 2006
 - 1,81 M_J
 - 5,23 UA



HARPS = High Accuracy Radial velocity Planet Searcher à La Silla (3.6 m ESO)

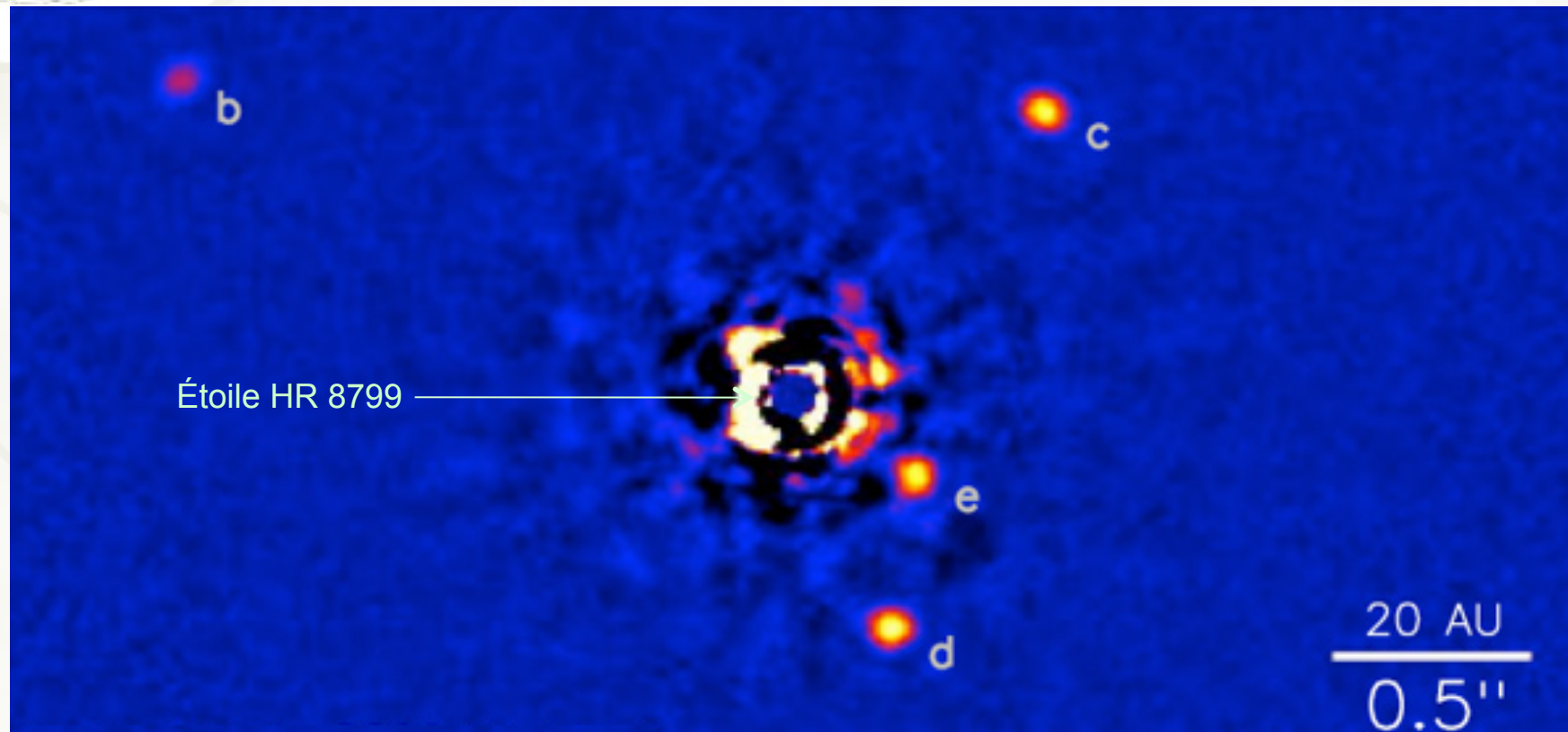
TECHNIQUES DE RECHERCHE : TRANSIT

- Courbe de lumière

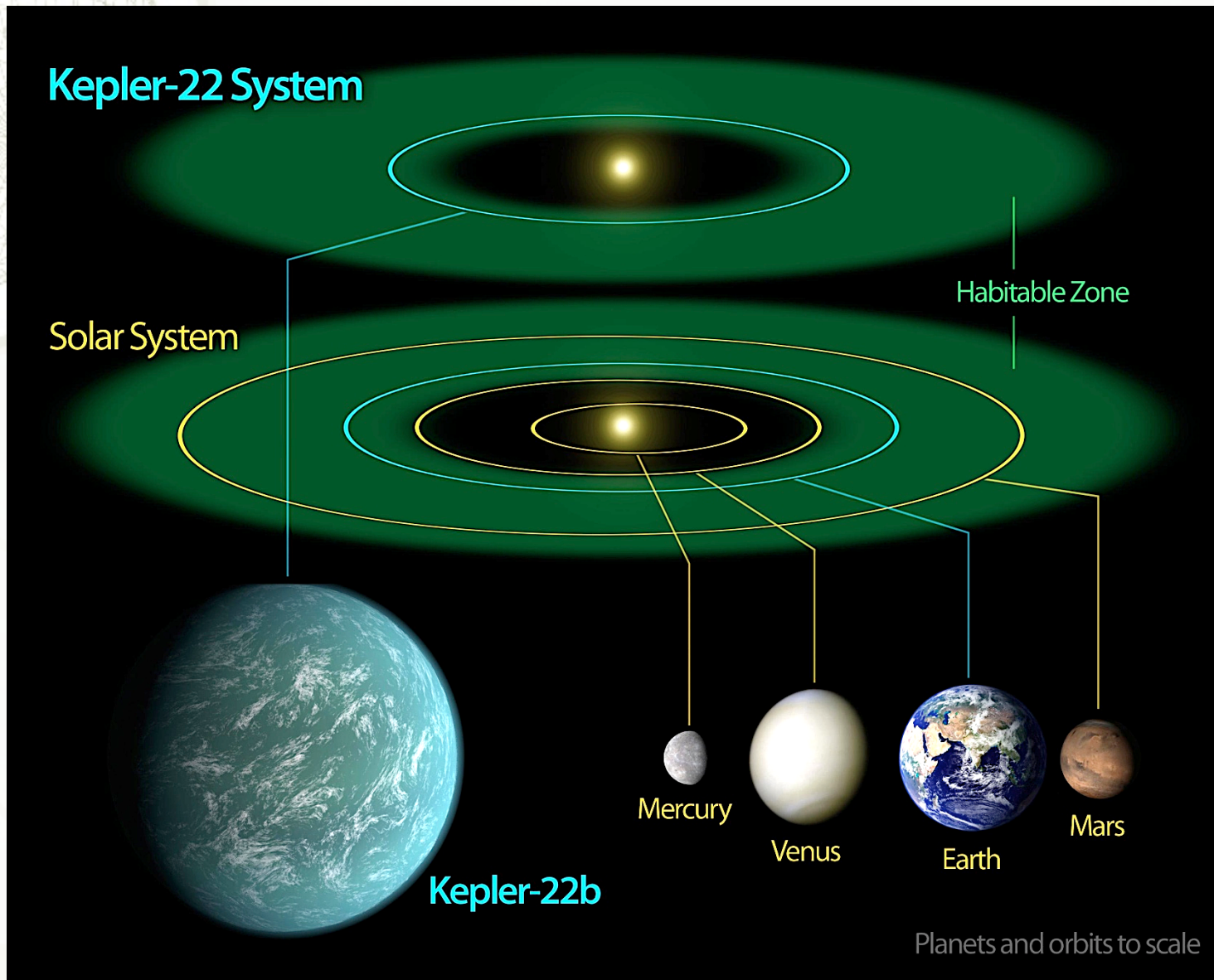


TECHNIQUES DE RECHERCHE : IMAGERIE DIRECTE

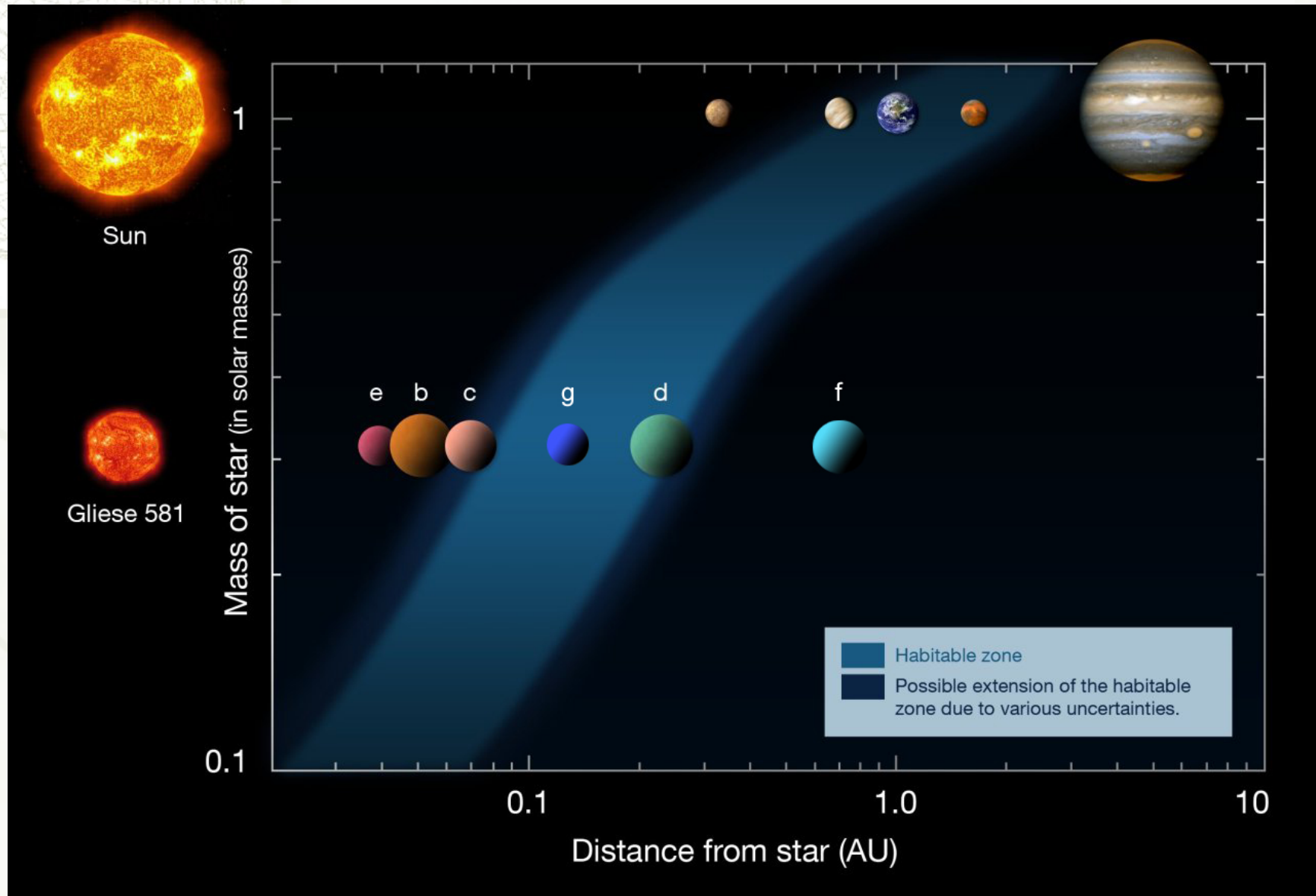
- Difficulté technique: luminosité de l'étoile TRÈS supérieure à celle des planètes [même avec un coronographe!]
- Étoile HR 8799 *b*, *c*, *d* et *e* [Marois *et al.* nov. 2010, au Keck en infrarouge proche]

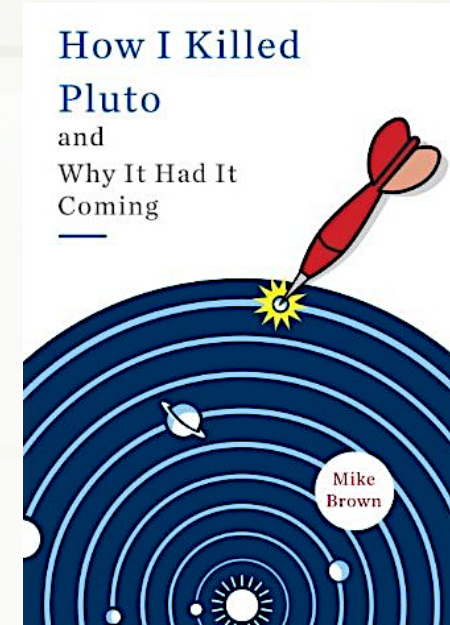
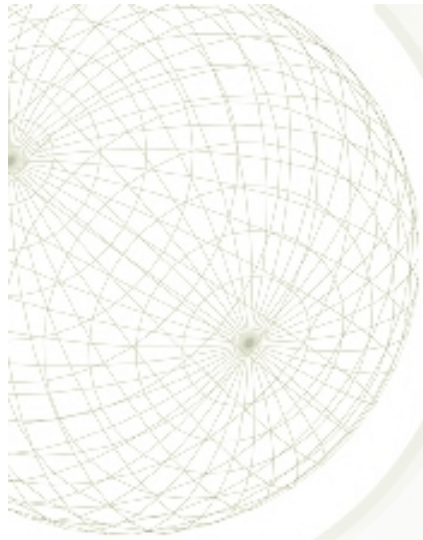


KEPLER 22



D'AUTRES TERRES ?





PLANÈTES NAINES DU SYSTÈME SOLAIRE



PLANÈTES NAINES

■ Définition

1. Objet orbitant autour du Soleil
2. Assez massif pour être ~ sphérique
3. 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

ET PETITS CORPS

■ Bien d'autres en attente

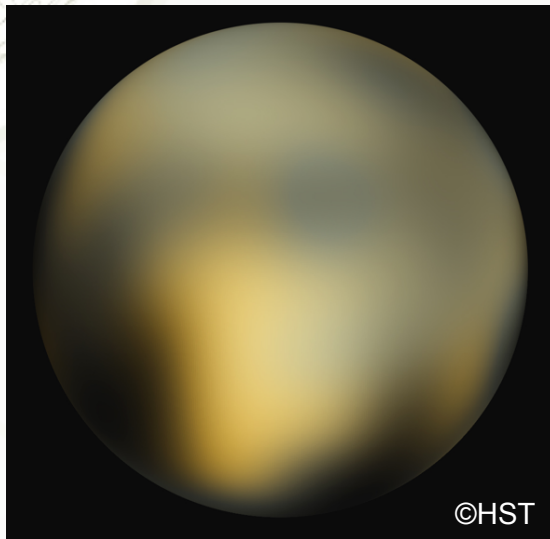
- Charon (satellite ou binaire?)
- Sedna
- Quaoar
- Orcus
- Varuna
- ...

■ 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)

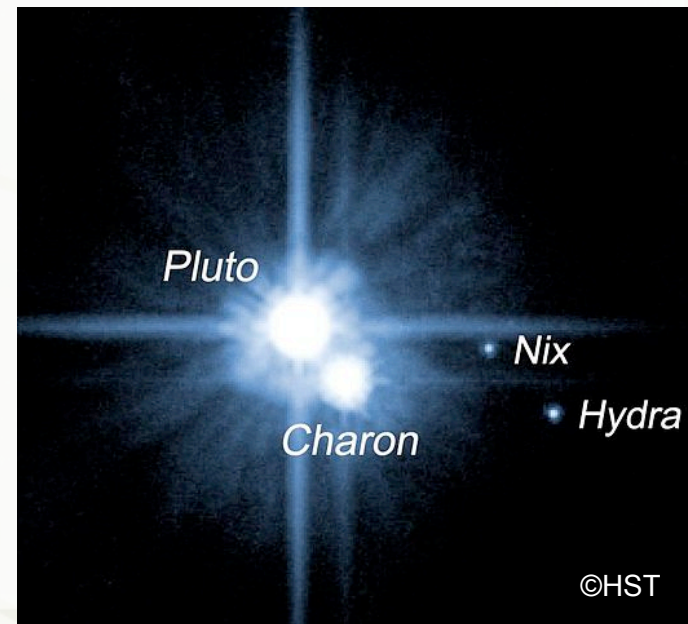
PLUTON & CHARON

- (134340) Pluton
 - Découvert en 1930 (9^e planète, jusqu'en 2006), masse $\sim 1/500 M_{\oplus}$



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

- Charon
 - Satellite relativement gros (1/2 taille) découvert en 1978 → plutôt système binaire
- Petits satellites
 - Nix (2005)
 - Hydra (2005)
 - S/2011 (134340) 1

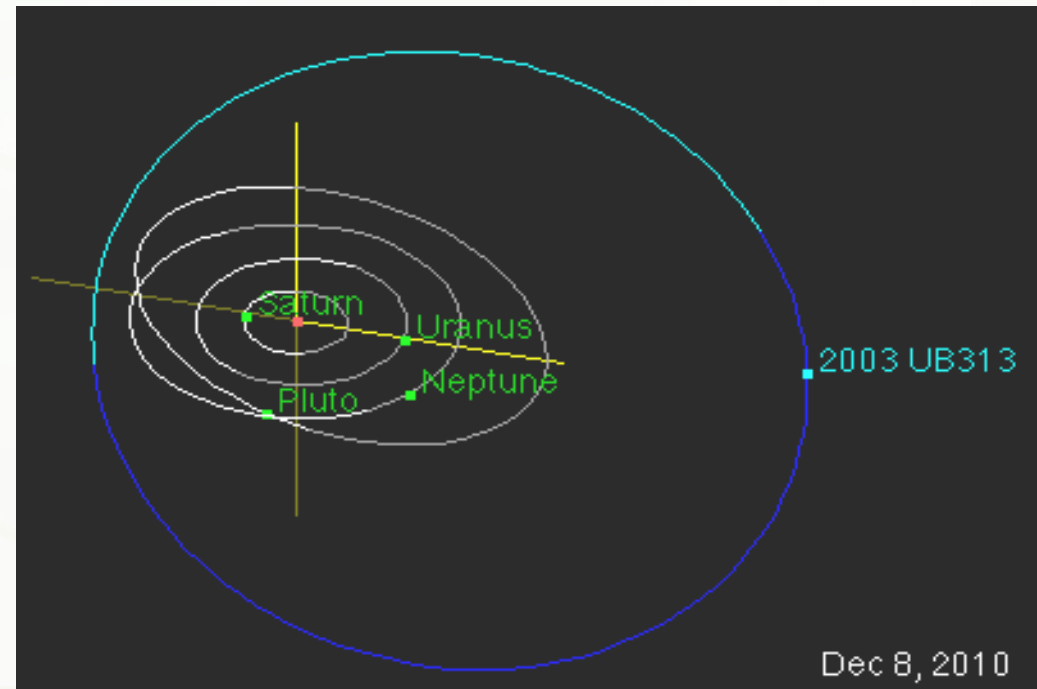
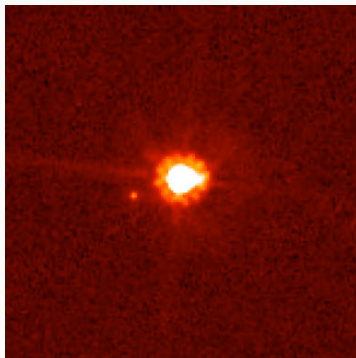


ÉRIS

■ (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

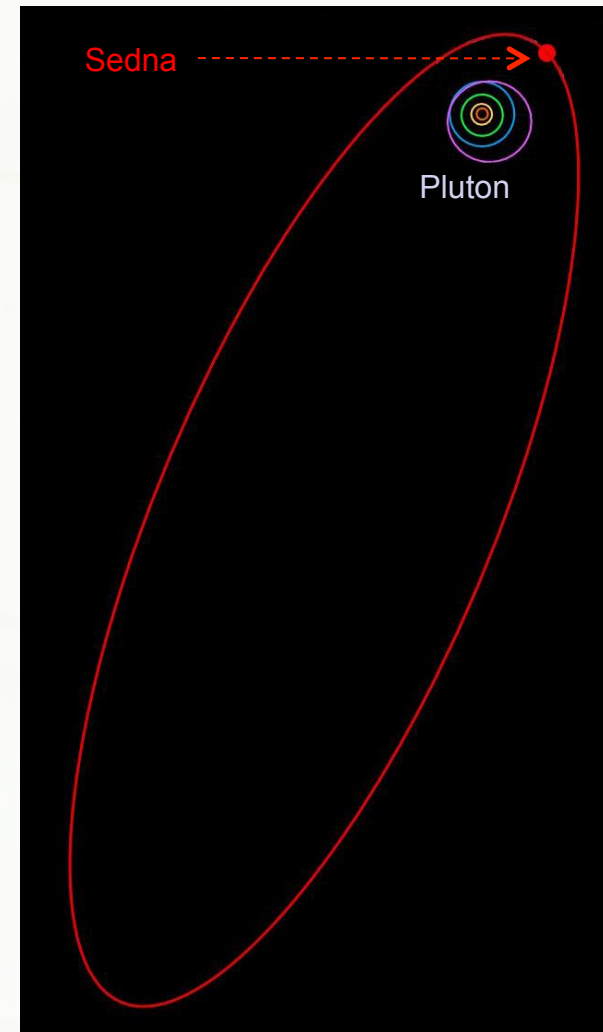
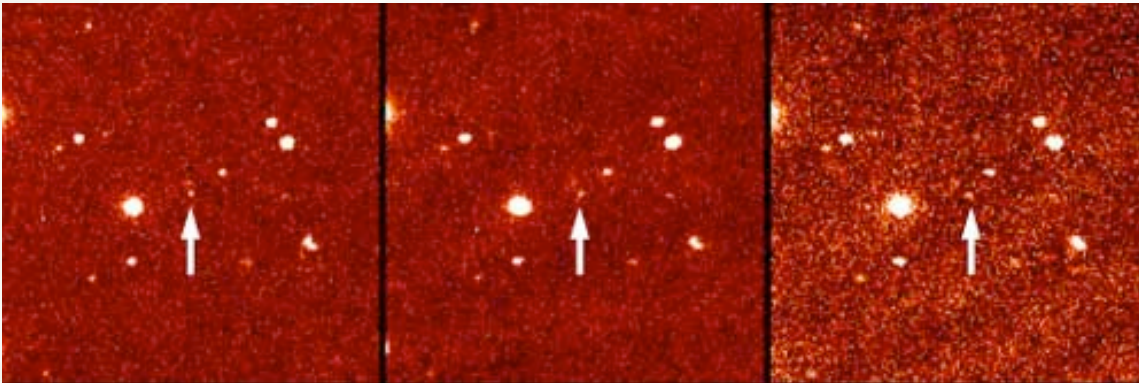
Dysnomie et Éris (HST)



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?

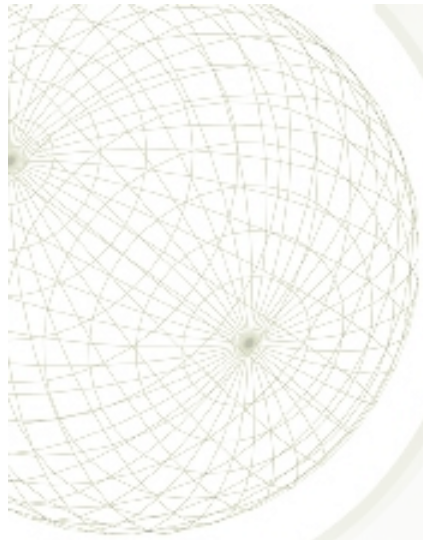
Découverte de Sedna : 3 images à 3h d'intervalle



LES OBJETS TRANSNEPTUNIENS

Les plus grands objets transneptuniens connus

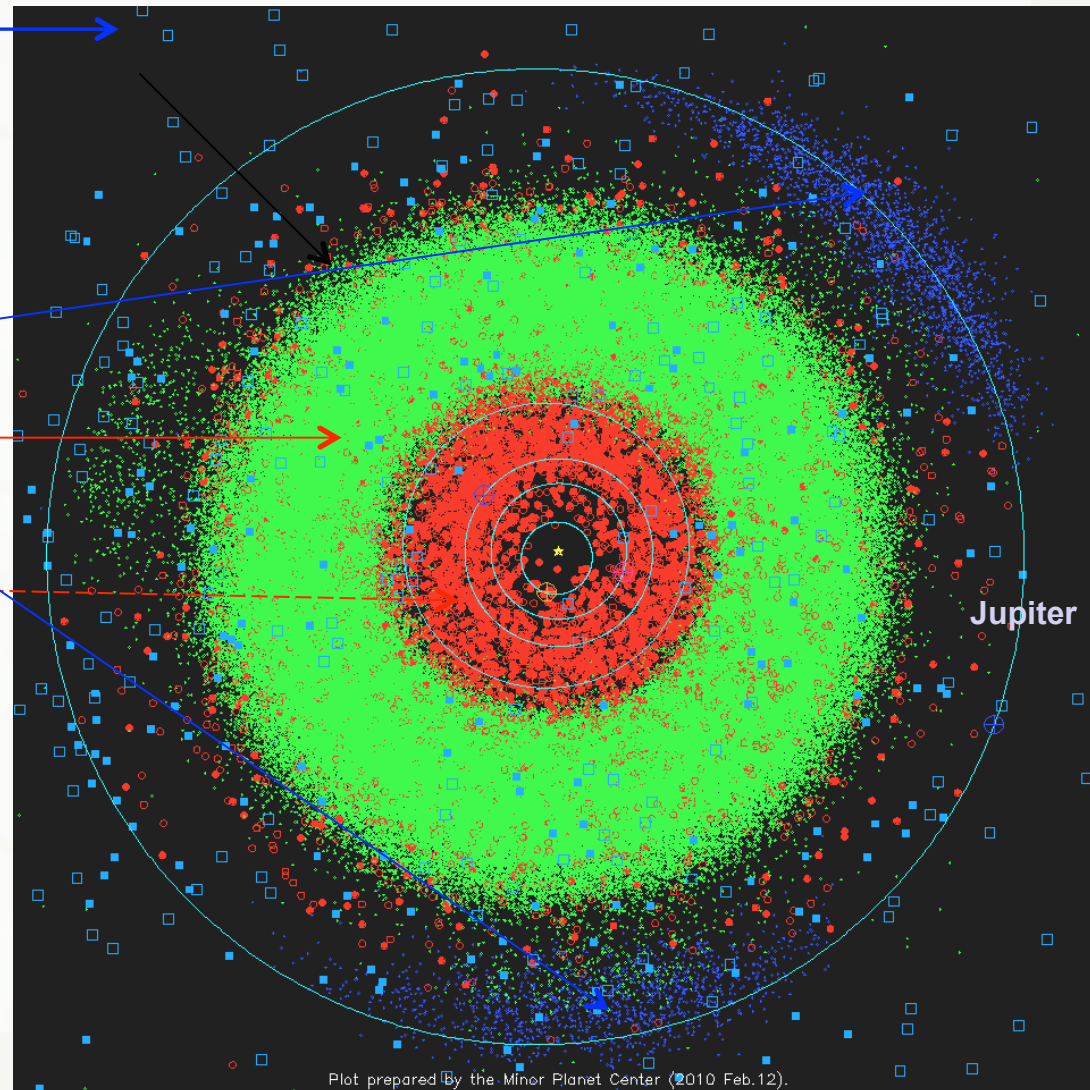




PETITS CORPS

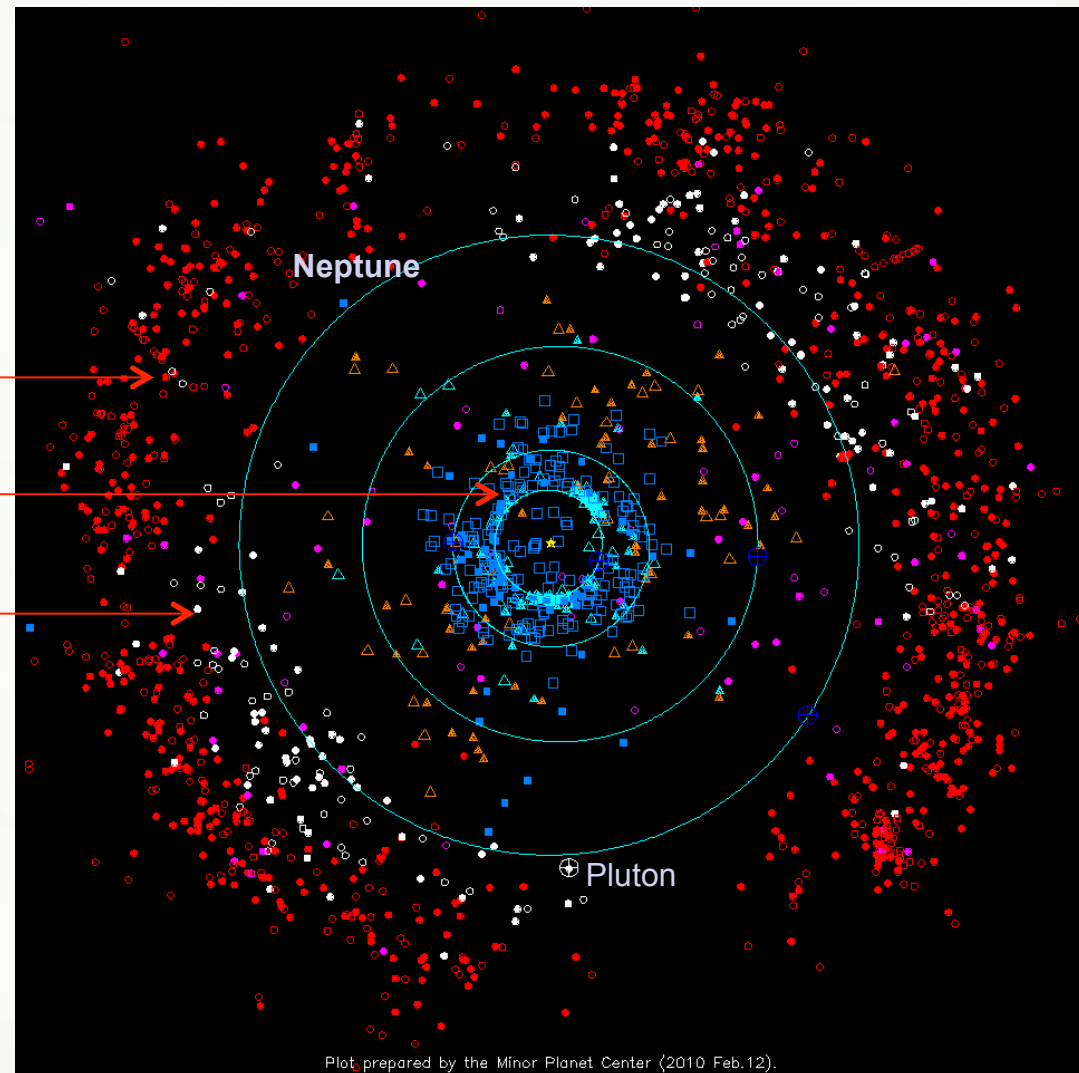
LES PETITS CORPS DU SYSTÈME SOLAIRE « INTERNE »

- 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...

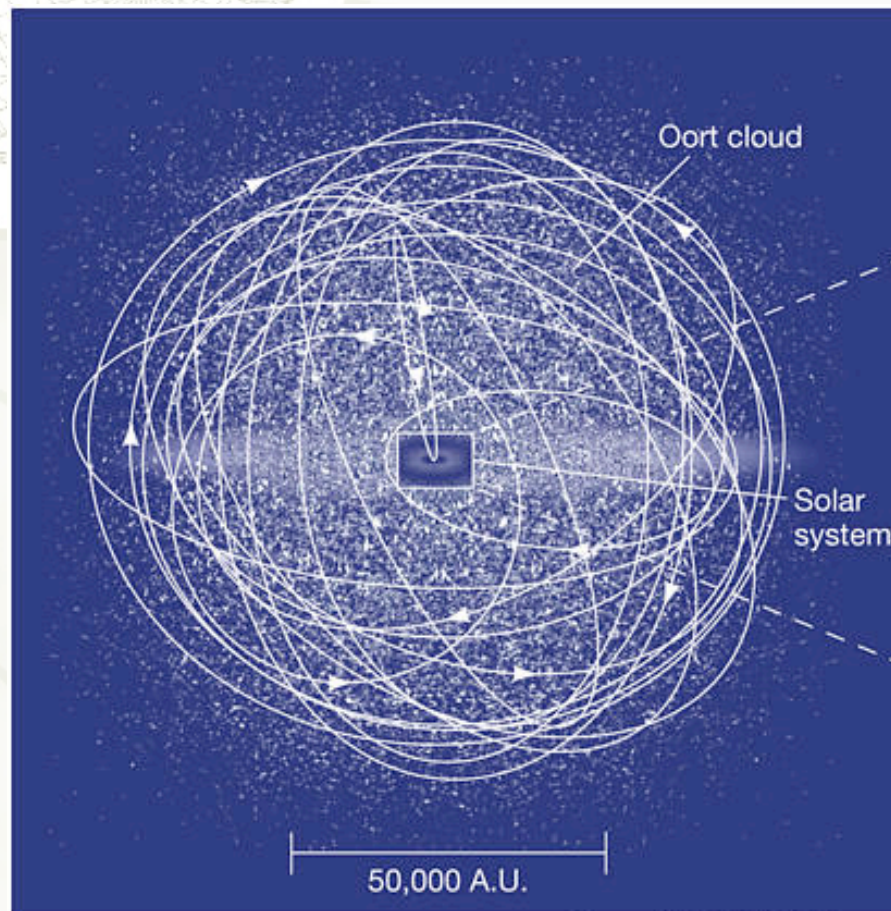


LE SYSTÈME SOLAIRE ET LES OBJETS TRANSNEPTUNIENS

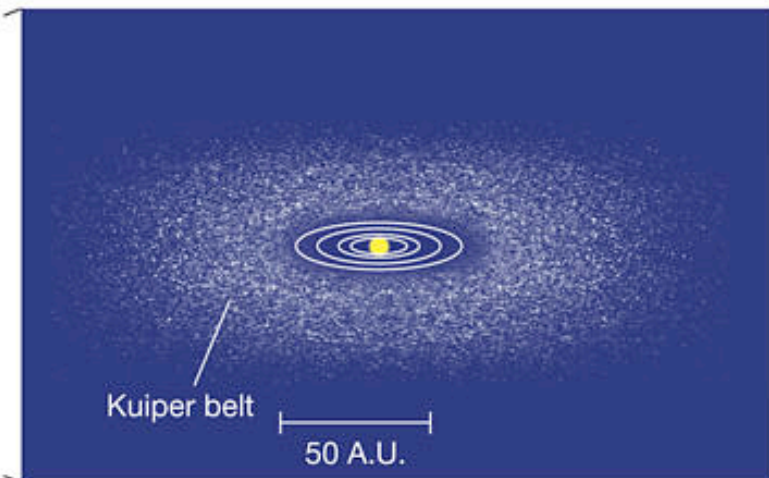
- Ceinture de Kuiper
- Astéroïdes
- Plutinos
- *Rayon orbite Neptune 30 UA*



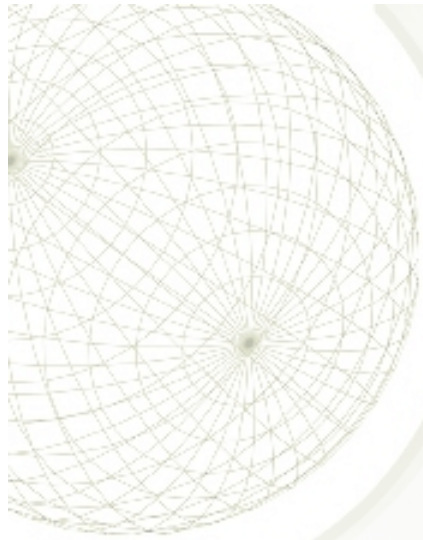
LE SYSTÈME SOLAIRE « EXTERNE »



- 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)

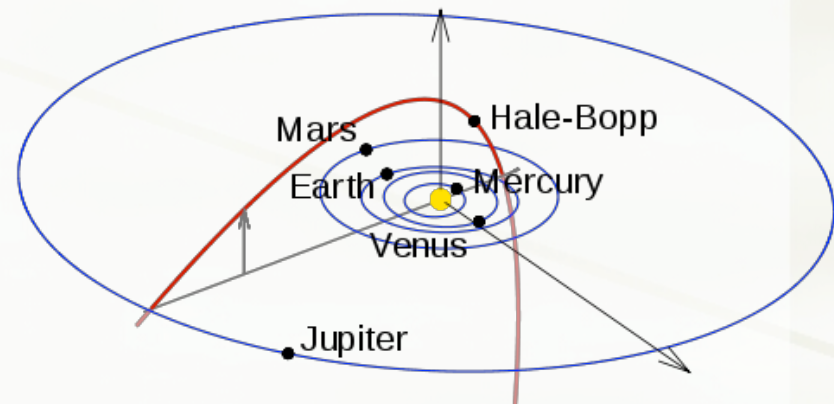
- Les noms des comètes

- C/1995 O1 (Hale-Bopp)
 - C = période > 200 ans (2520 ans)
 - 1995 = année de découverte
 - O1 = 1° comète de la 2° 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° comète de la liste des comètes de période <200 ans (6,5 ans)
 - Malcolm Hartley, 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)

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°**



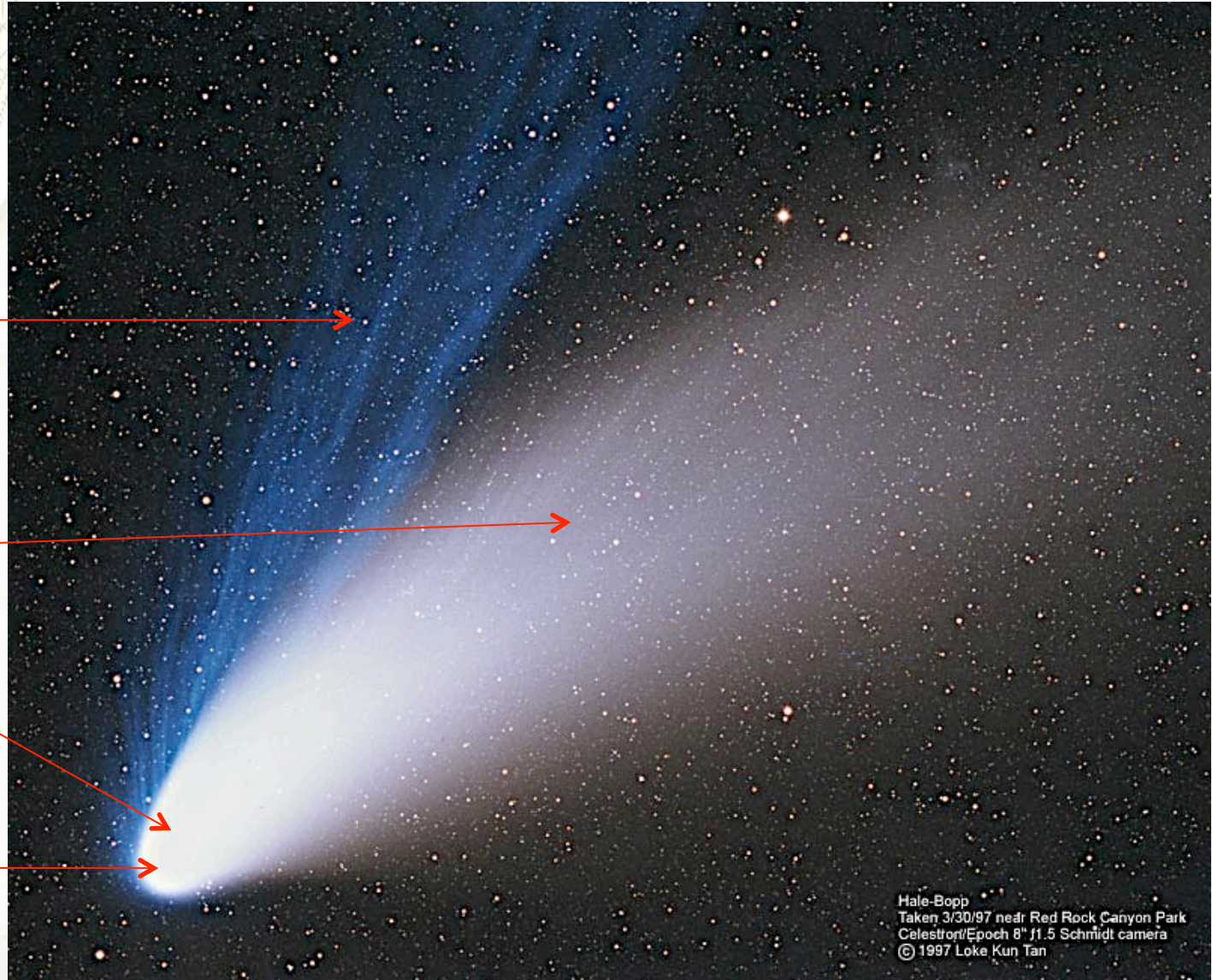
STRUCTURE DES COMÈTES

Queue de plasma
(ionique)

Queue de poussière

Chevelure
ou coma

Noyau



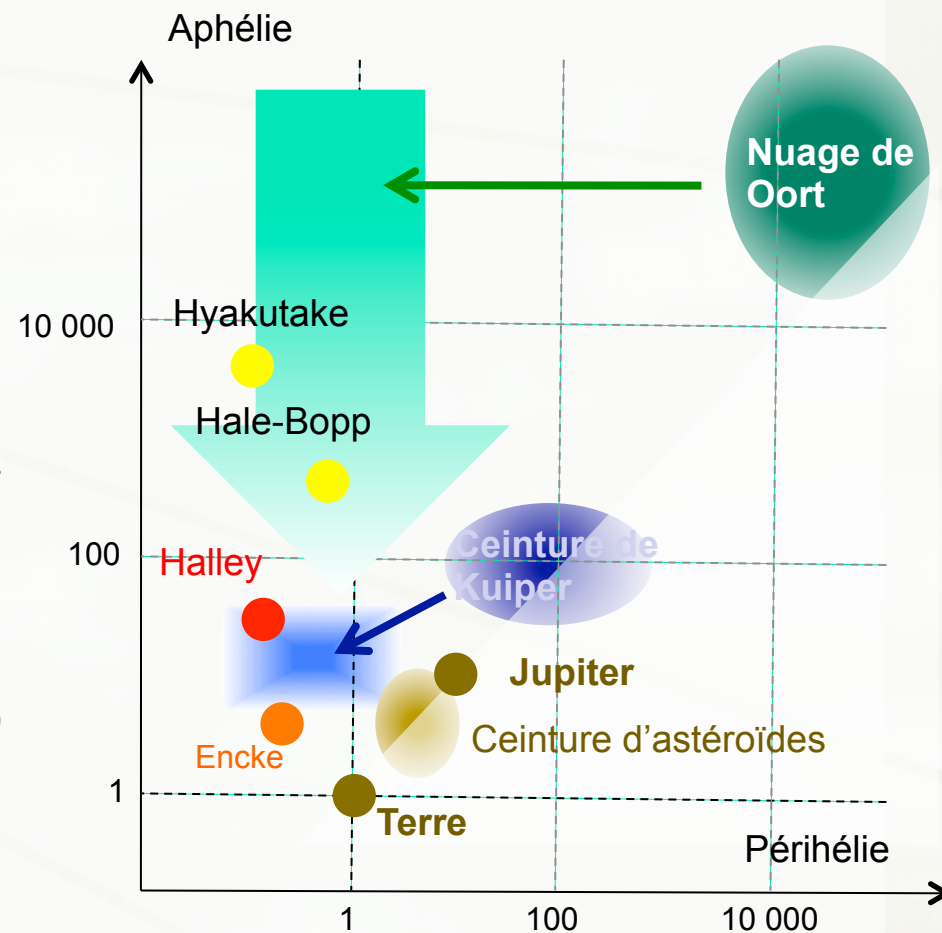
NOYAUX DE COMÈTES

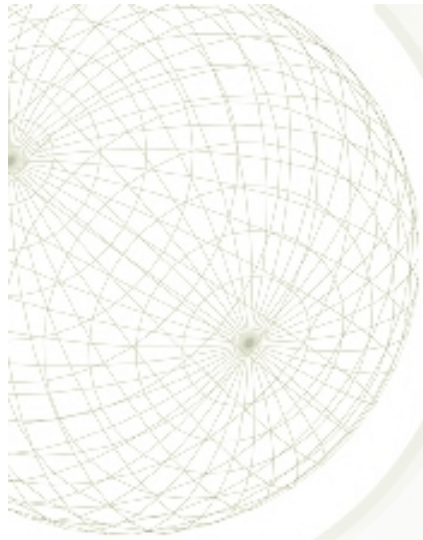
- Théorie de Whipple 1950 : une boule de neige sale qui serait un conglomérat de roches, de poussières agglomérées de glace et de gaz congelés.
 - dimension ~quelques dizaines de km
 - aspect plutôt irrégulier
 - fragile, peut se briser (Biela, Shoemaker-Levy 9 avant son impact avec Jupiter)
- Première image d'un noyau (Halley) en 1986 par la sonde Giotto, et analyse chimique :
 - 80 % eau,
 - 10 % de CO
 - 2,5 % de méthane et ammoniac
 - traces d'hydrocarbures, de fer et de sodium
 - noyau très sombre riche en carbone
- Noyau de la comète 103P/Hartley par la sonde DeepImpact/Epoxi (novembre 2010)



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 ?
 - **ceinture de Kuiper** (30 à 100 UA) au-delà de Neptune → comètes de courte période, de faible inclinaison, injectées par perturbation gravitationnelle
 - **nuage de Oort** (40 000 à 100 000 UA) → comètes de longue période, d'inclinaison quelconque





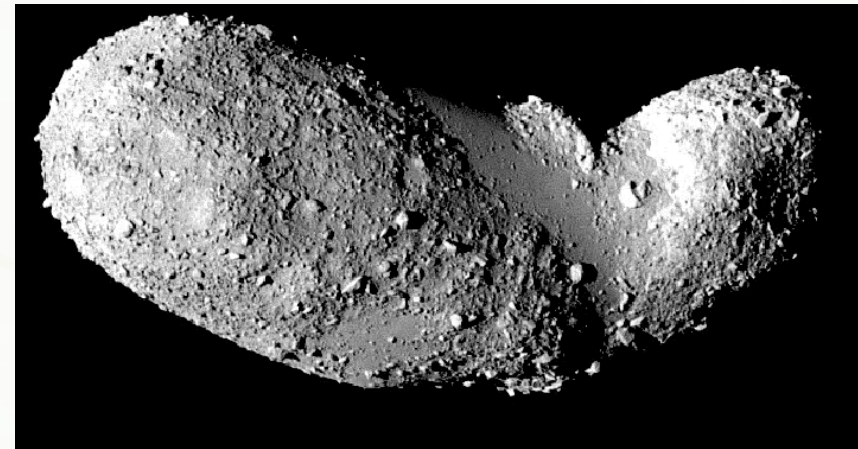
ASTÉROÏDES

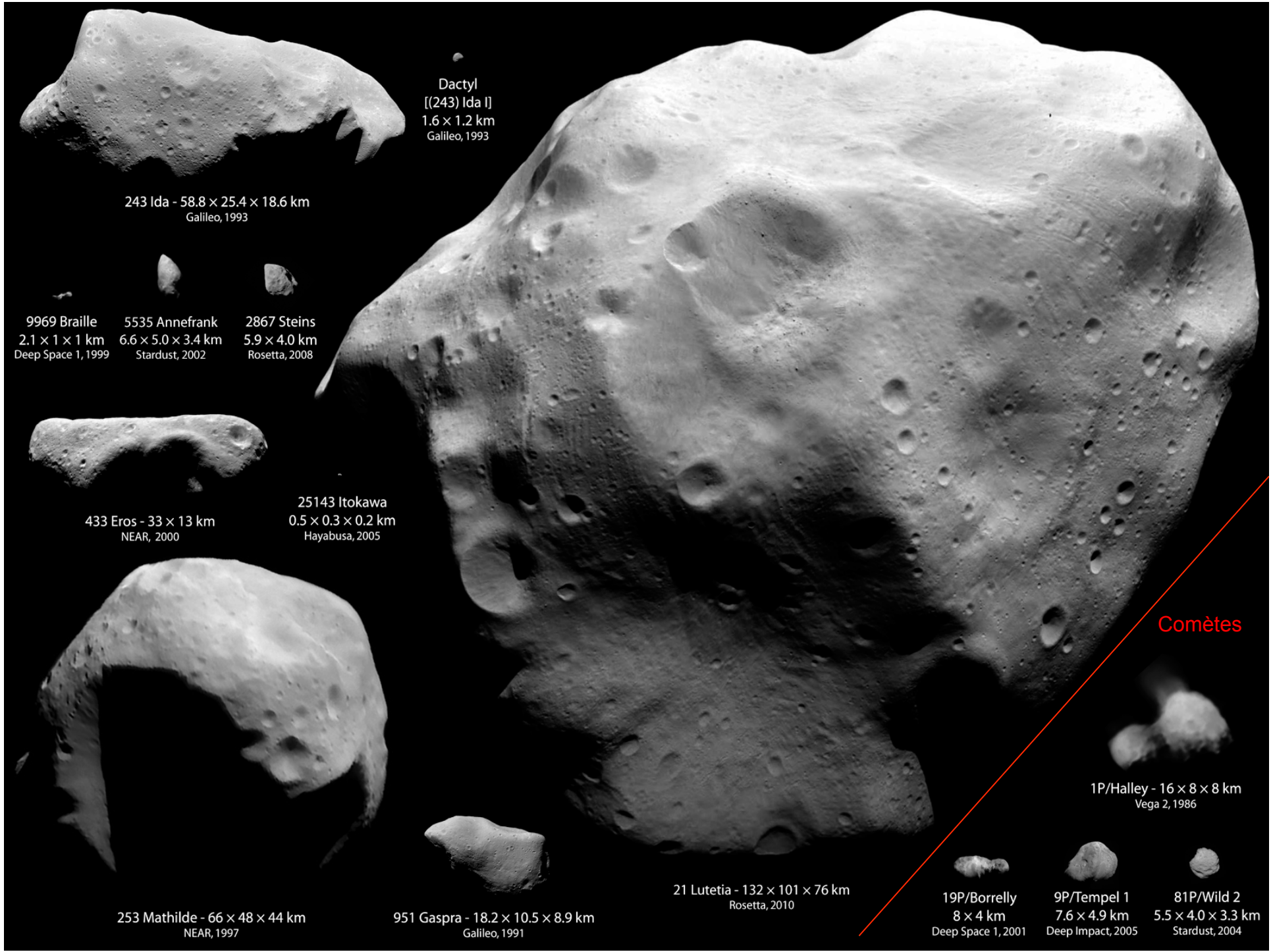
LES ASTÉROÏDES

- 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?)

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





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



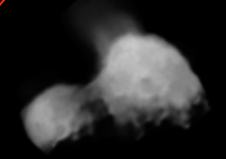
253 Mathilde - 66 × 48 × 44 km
NEAR, 1997



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

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

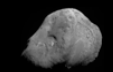
Comètes



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

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)

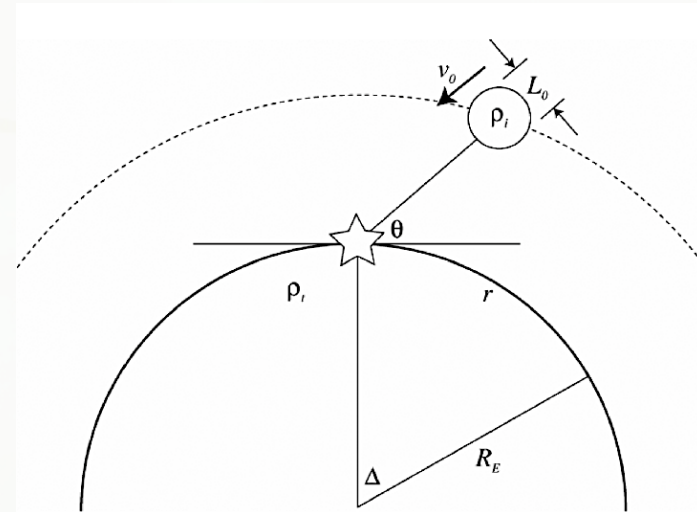
■ Énergie libérée

- 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 = $6,3 \times 10^{13}$ J)

■ Freinage par l'atmosphère



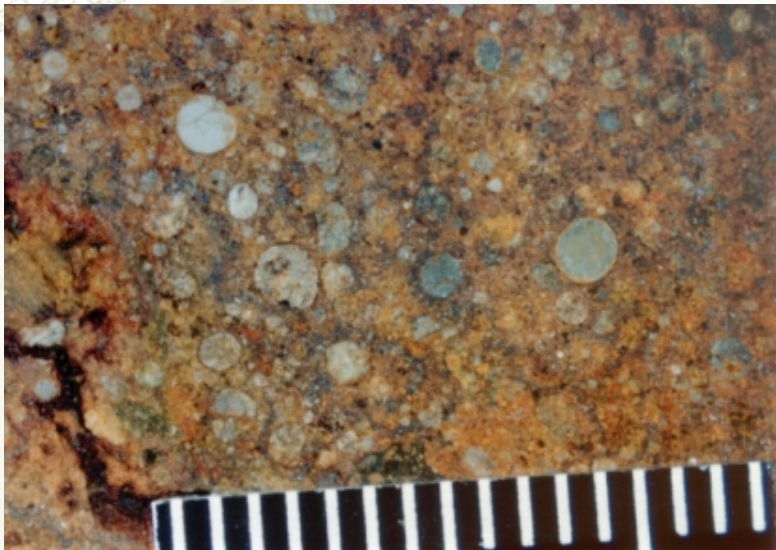
■ Énergie de l'impact ⇒

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

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 \Rightarrow âge
(normalisation avec le plomb 204 non radiogénique)
- \Rightarrow âges ~ 4,5 milliards d'années

Peut-être des fragments d'astéroïdes différenciés

- enveloppe pierreuse
- cœur métallique

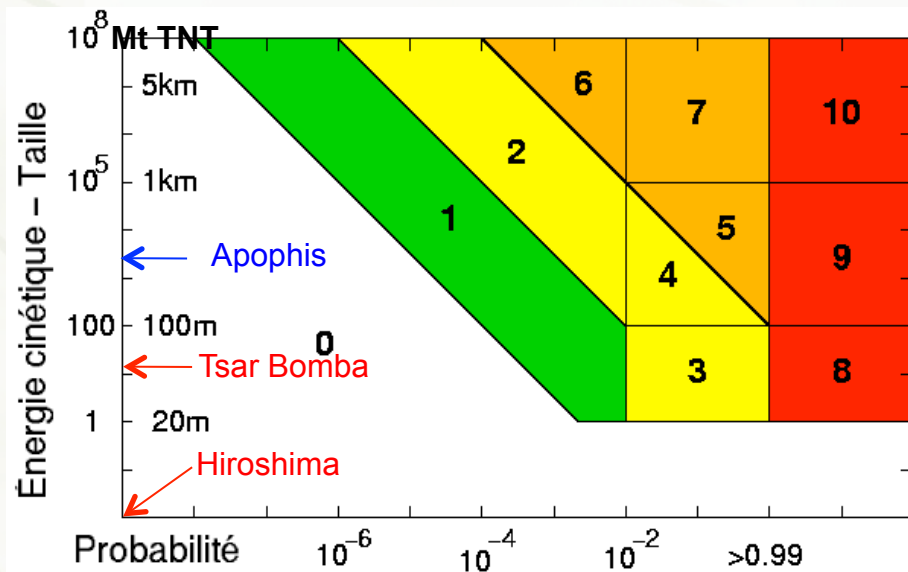
PEUT-ON SE PROTÉGER DES MÉTÉORITES ?

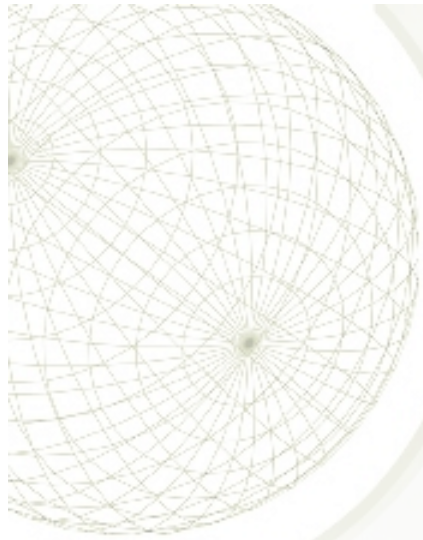
■ Échelle de Turin

- 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
- projet à l'étude pour dévier *Apophis* à son prochain passage





Merci de votre attention !

