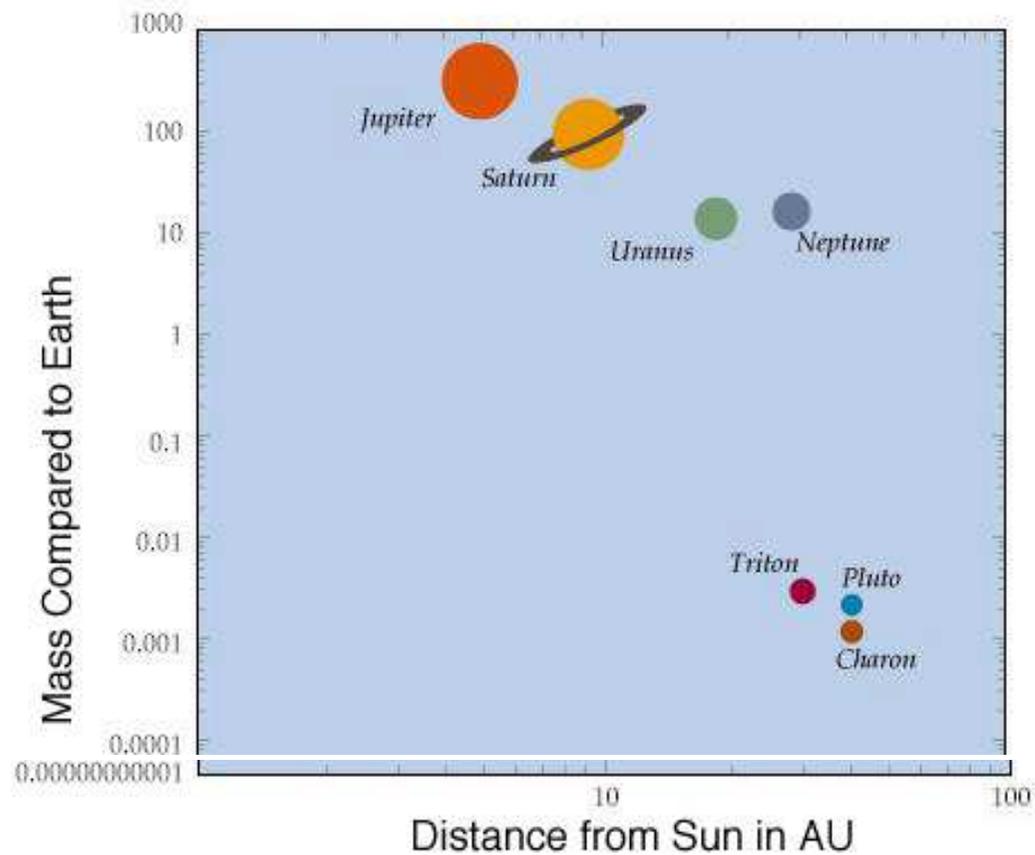


**Pluton et les objets trans-neptuniens:
les nouvelles frontières du Système Solaire**

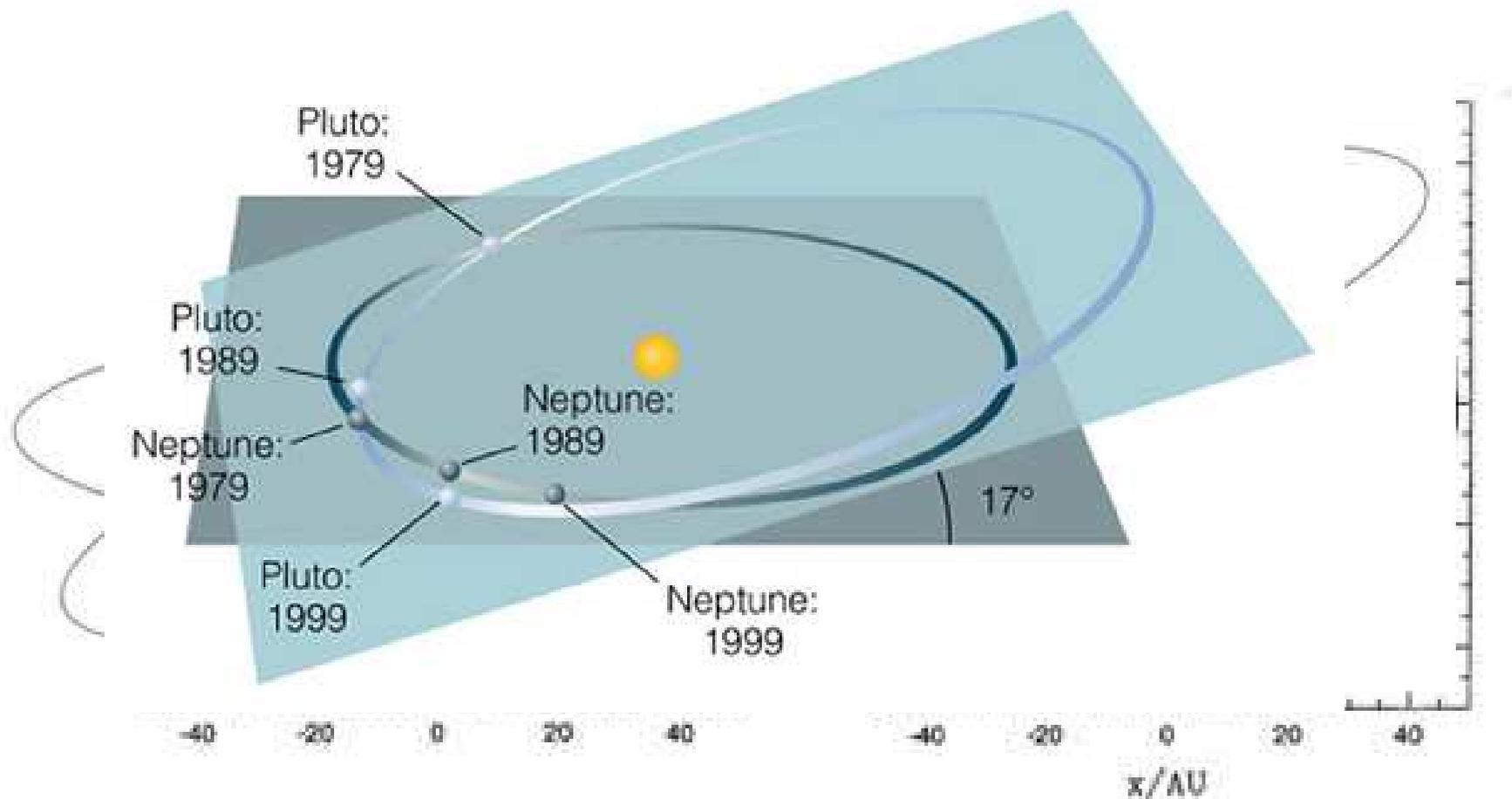
Emmanuel Lellouch

Le Système Solaire extérieur avant 1992



L'orbite de Pluton

- **Elliptique, inclinée, en résonance 3:2 avec Neptune (période = 248 ans)**



Les prémices d'une grande découverte

- Premières spéculations sur l'existence de la ceinture de Kuiper : Edgeworth (1949) et Kuiper (1951).
- 1980 : premiers modèles quantitatifs sur l'origine de comètes.
 - la plupart des comètes viennent du “nuage de Oort”, réservoir sphérique à 40000-100000 UA (10^{12} comètes)
 - Les comètes à courte période et faiblement inclinées proviennent d'un anneau dans l'écliptique à $R > 40$ UA:
la ceinture de Kuiper (10^9 comètes)
- 1977 : Kowal découvre 2060 Chiron, astéroïde « égaré » au niveau des planètes géantes: Centaure
- Activité cométaire => 95P/Chiron.
- 1992: Découverte du 1er objet « trans-neptunien »

1992 QB1

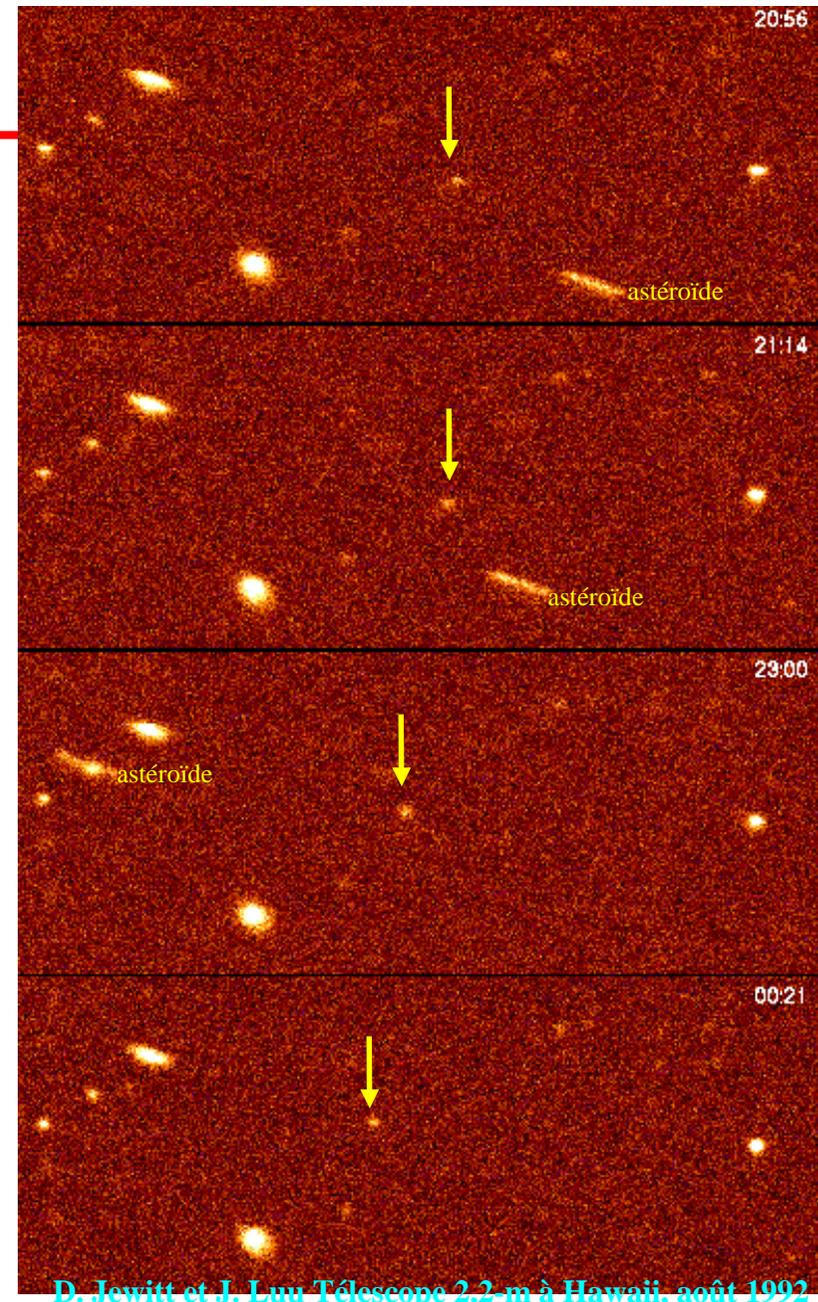
Découverte du premier objet trans-neptunien

Objets difficiles à observer :

Flux varie avec $p \cdot D^2 \cdot R^{-4}$

Un objet à une taille et albédo donnés est 10^4 plus faible au delà de Neptune ($R=30$ U.A.) que dans la ceinture d'astéroïde ($R=3$ U.A.)

distance = 41,2 UA
magnitude = 23,5
 10^7 plus faible qu'une étoile à l'œil nu
D=240 km



La nomenclature

- **Dénomination provisoire pour les astéroïdes**

Année de la découverte + quinzaine de la découverte (de A à Y sauf I), puis numéro d'ordre (A à Z sauf I, puis A1, B1, etc...): 1992B1 = 27ème « astéroïde » découvert entre le 16 et le 31 aout 1992

- **Quand l'orbite est bien connue (multi-opposition)**

- **Numéro d'astéroïde**

- **Pour les plus remarquables (i.e. brillants): un vrai nom (dieux de la création dans diverses mythologies) :
Varuna, Quaoar, Orcus, Sedna, Deucalion...**

- **Exemple de nom complet: 2000 WR106 = (20000) Varuna**

- **L'ensemble forme « les objets trans-neptuniens », ou « les objets « de Kuiper », ou la ceinture « de Kuiper » (ou « de Edgeworth-Kuiper », mieux nommée « le disque de Kuiper »**

Populations associées

- **Les Centaures**

Objets « intermédiaires » entre les comètes à courte période et les objets de Kuiper.

Orbites : $5 < a < 30$ UA (i.e. de Jupiter à Neptune), assez elliptiques, peu stables (quelques millions d'années)

Indication d'activité cométaire (Chiron)

Taille: de quelques dizaines de km à ~ 200 km

- **Les comètes à courte période**

$P_{\text{orb.}} < 200$ ans

En particulier les comètes « de la famille de Jupiter » ($P_{\text{orb.}} < 20$ ans, peu inclinées)

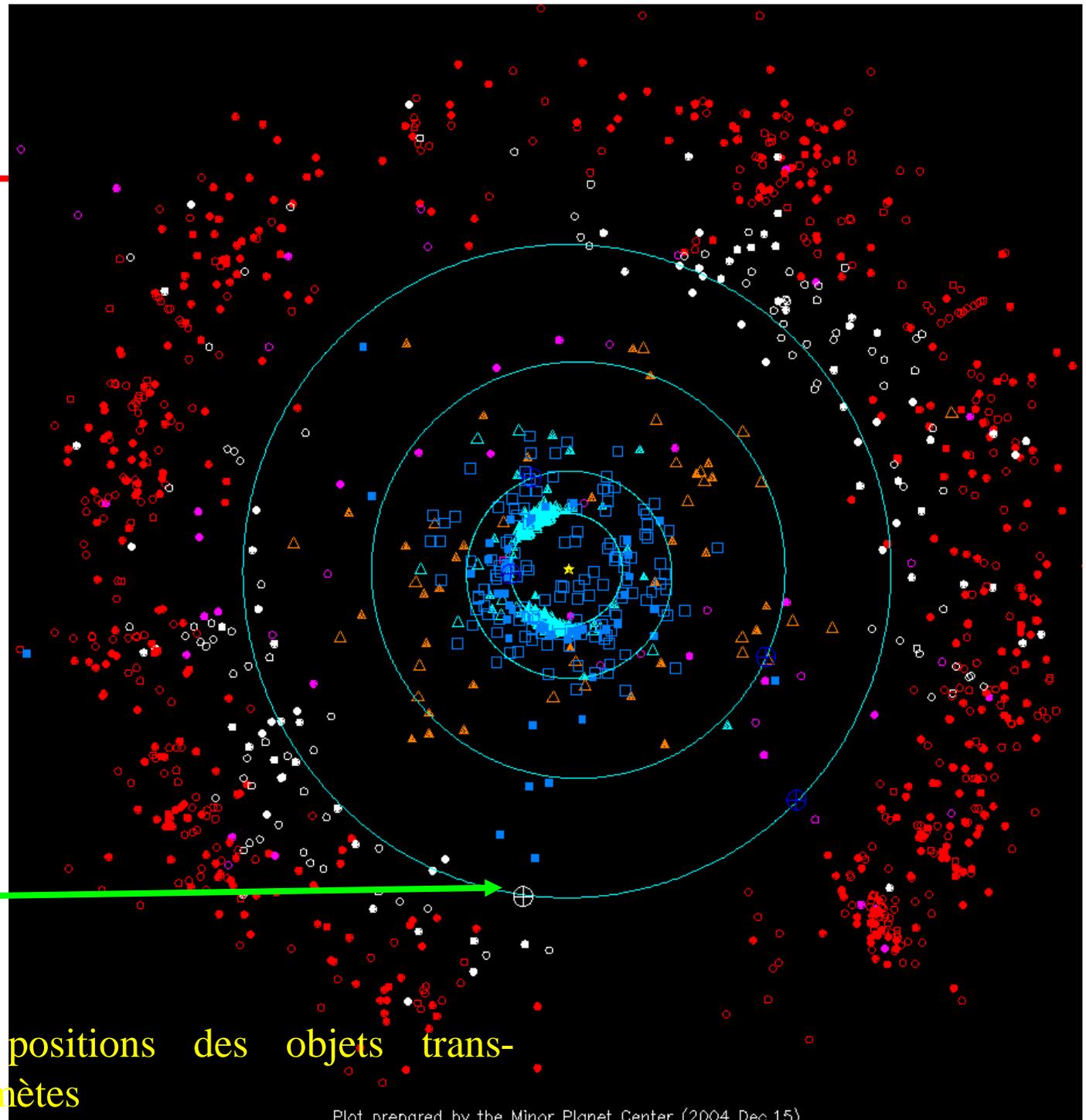
Origine: Centaures

État des lieux

- **Objets très faibles : magnitudes comprises entre 19 et 27**
→ télescopes de 2-4 m + CCD nécessaires
- **Suivi INDISPENSABLE pour bonne détermination de l'orbite afin de:**
 - Ne pas perdre l'objet
 - Pouvoir le « classifier » dynamiquement (orbite circulaire? Elliptique? Inclivée?)
- **Actuellement (31 mai 2005)**
 - 886 OTN (+ 12 *satellites*)
 - 151 Centaures
 - Environ la moitié des objets n'ont été observés que pendant une opposition (i.e. < 1 année)
- <http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/Unusual.html>

Triangles = Centaures
Carres bleus = Cometes
Rond blancs = Plutinos
Rouges=Classiques
Violets=Diffuses

Pluton



Instantané des positions des objets trans-Neptuniens et comètes

Estimations de la population

30 UA < Δ < ? UA

~900 TNOs Δ < 50 UA

> 100 Δ > 50 UA

Mais seule une petite partie du ciel a été explorée...

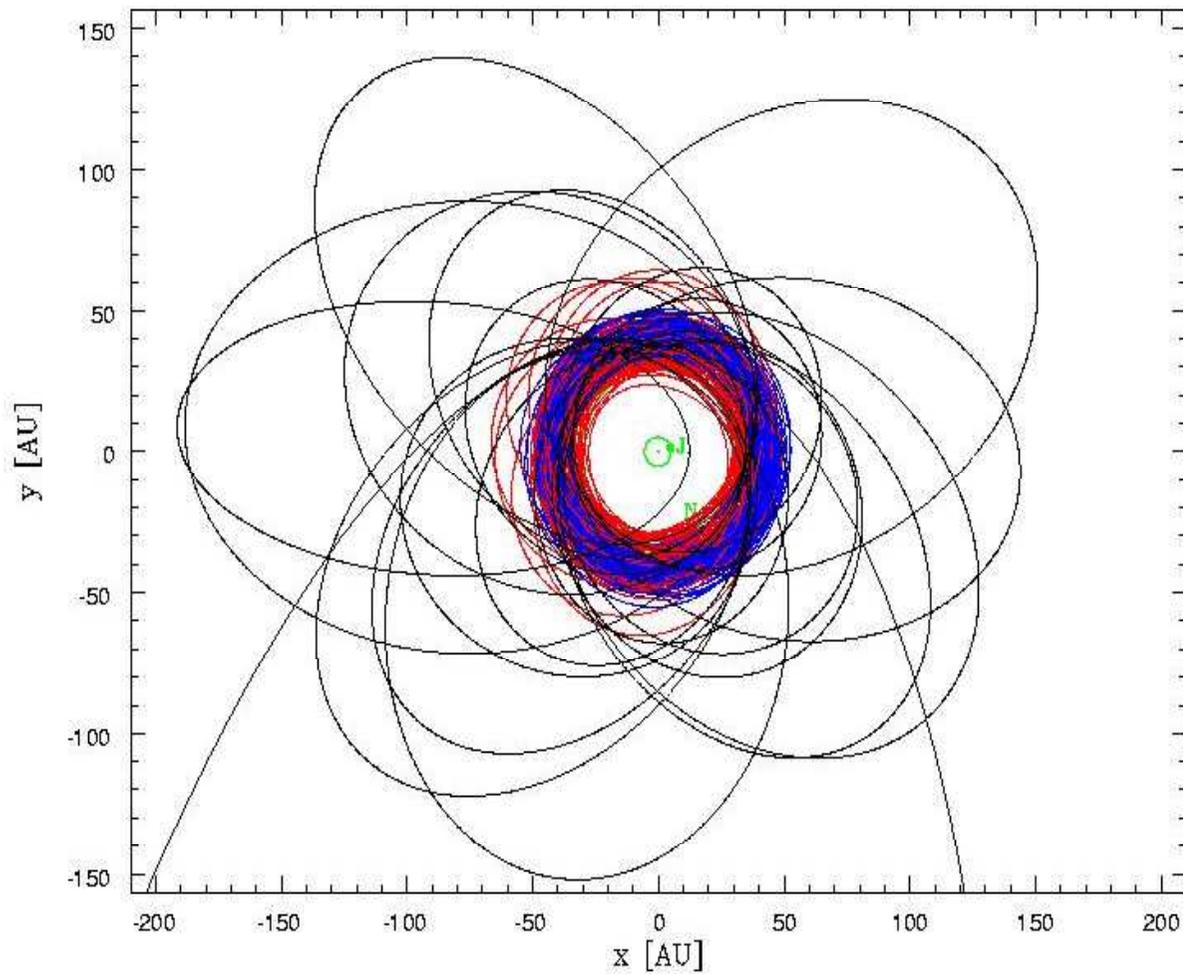
En extrapolant : **~40 000 $D \geq 100$ km entre 30 et 50 UA**

~ 10^9 objets de taille cométaire

~ 0-1 « Pluton » de plus

~qq x 0.1 masses terrestres *au total*

Trajectoires des TNOs



Trajectoires des
TNOs dans le plan
de l'écliptique

Rouge = Plutinos
Bleu = Classiques
Noir = Diffusés

Structure dynamique

les Plutinos :

situés dans la résonance 3:2 avec Neptune ($a \approx 40$ UA)

caractéristiques dynamiques proches de celles de Pluton ($e=0.25$, $i=17^\circ$):
 $0.1 < e < 0.3$ $0 < i < 20^\circ$

Par extension: les objets résonnants (dans d'autres résonances)

les objets classiques :

orbites circulaires ou peu elliptiques: $0 < i < 30^\circ$, $40 < a < 48$ UA

les objets du disque diffusé :

orbites très elliptiques ($e > 0.5$) et inclinées

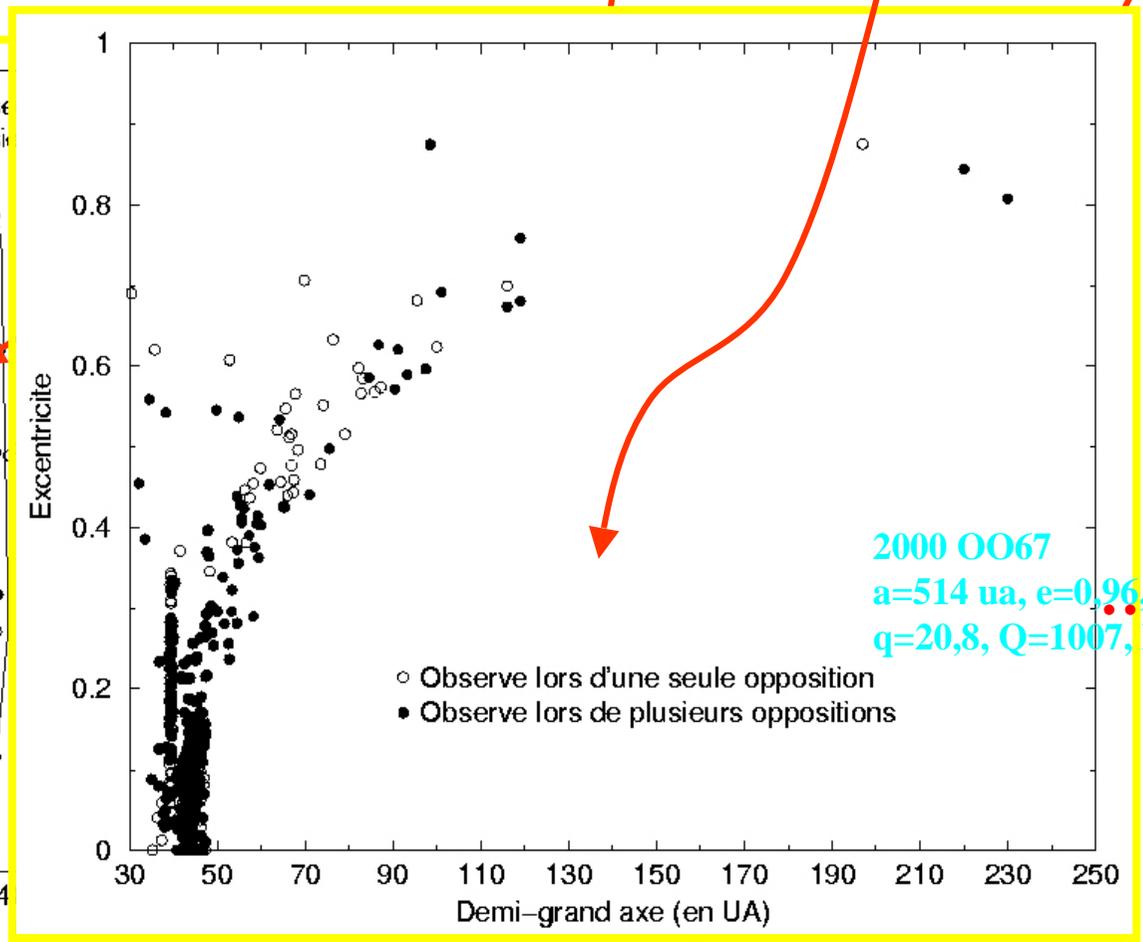
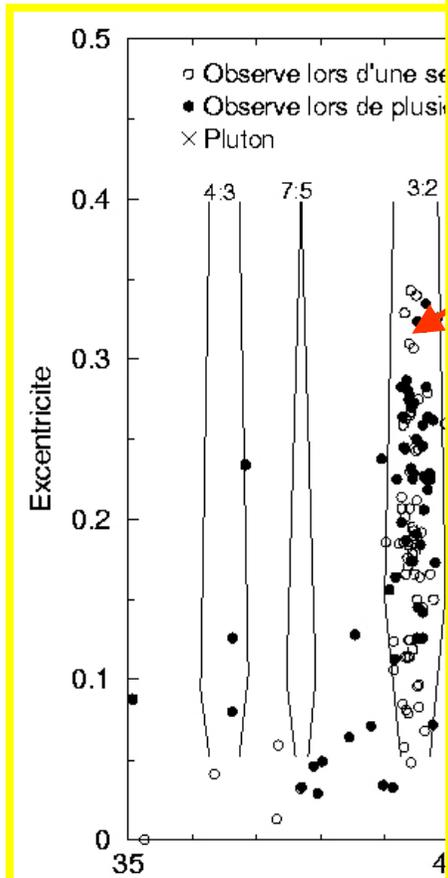
Ex. 2000 0067 : $q=20$ UA, $Q=1000$ UA

+ les objets « inclassifiables », « très diffusés », « du nuage de Oort »

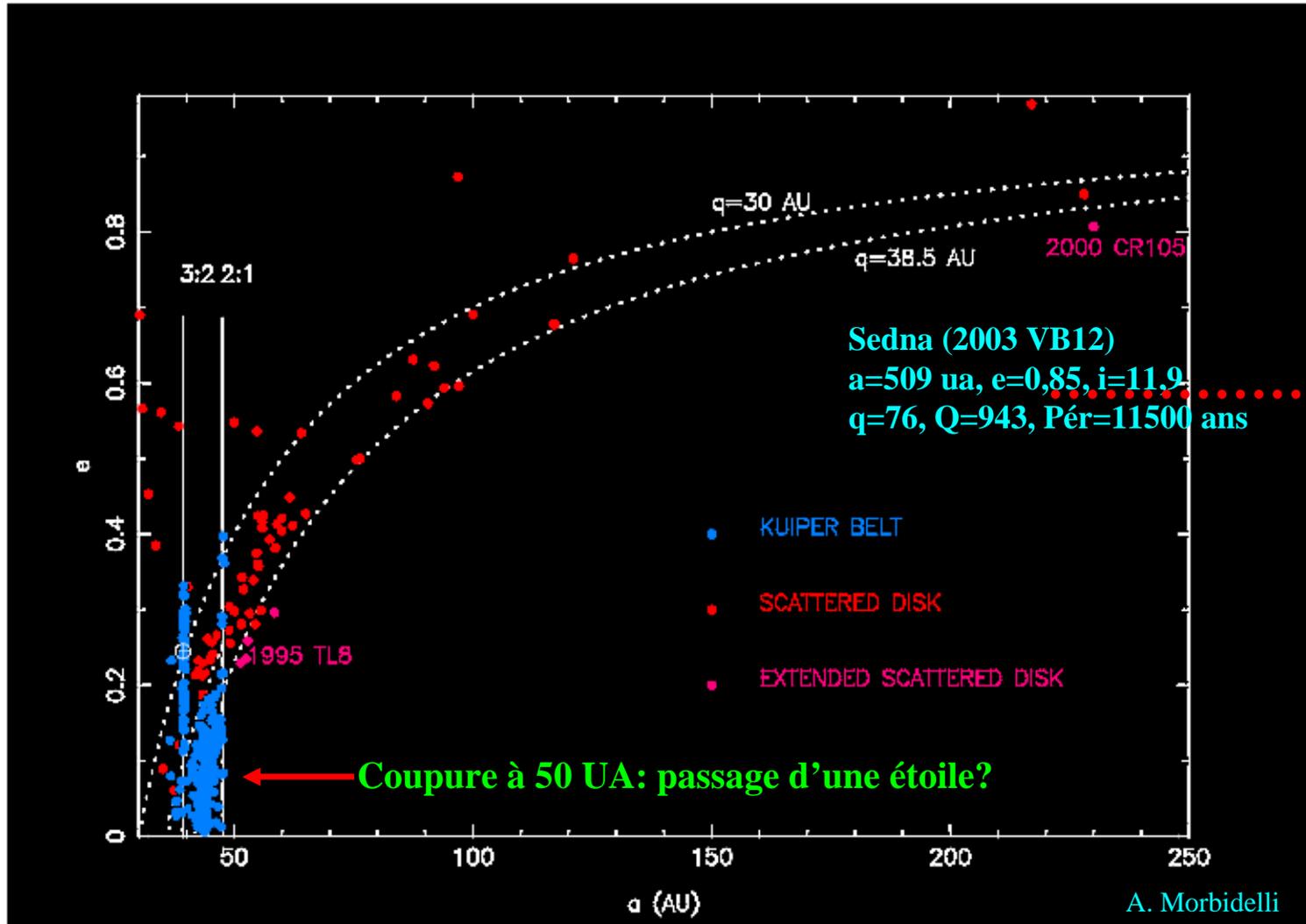
Sedna: $q=76$ UA , $Q=943$ UA, n'interagit pas avec Neptune

Structure dynamique

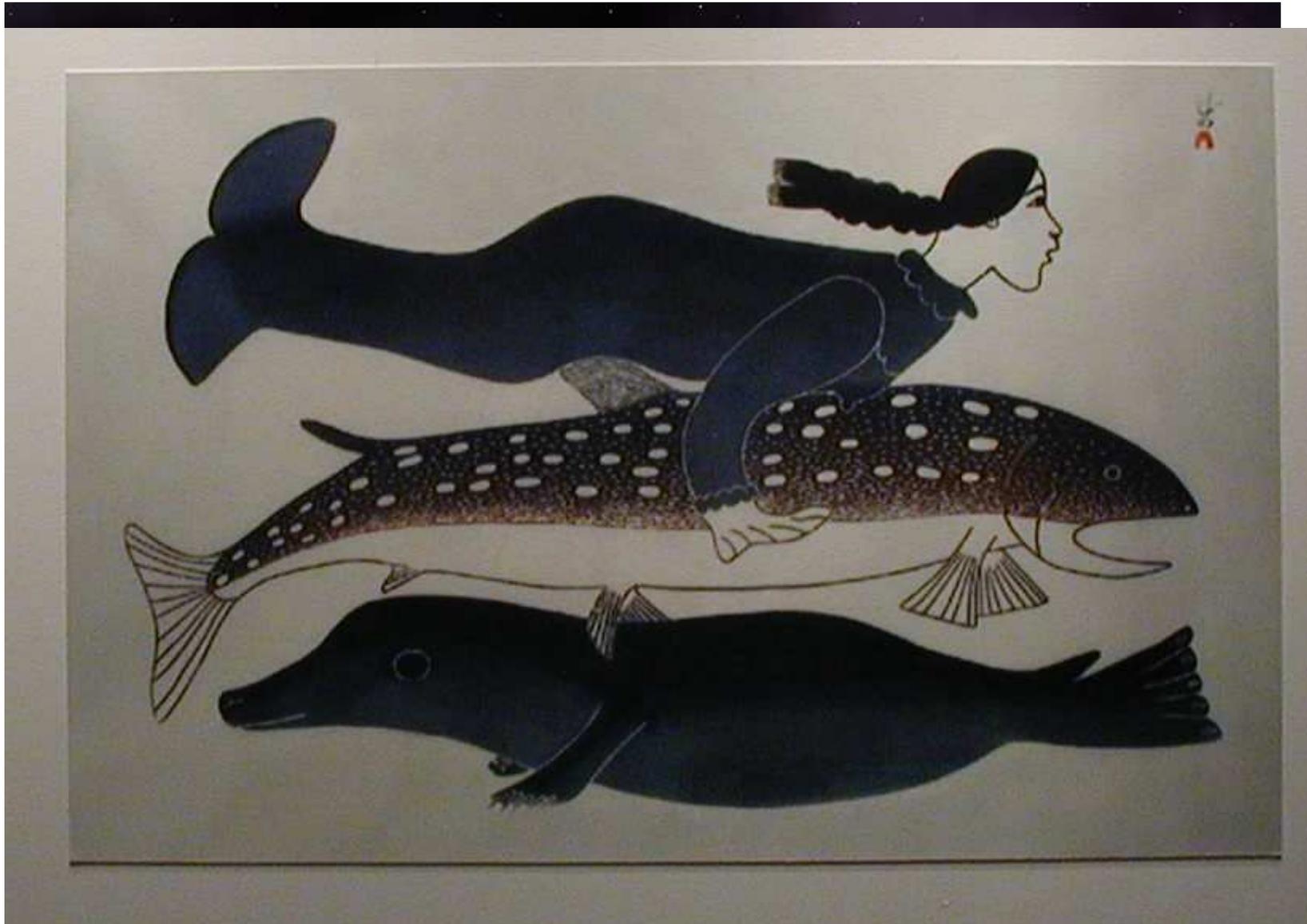
3 catégories dynamiques d'objets :
résonants, diffusés, classiques



La coupure du disque

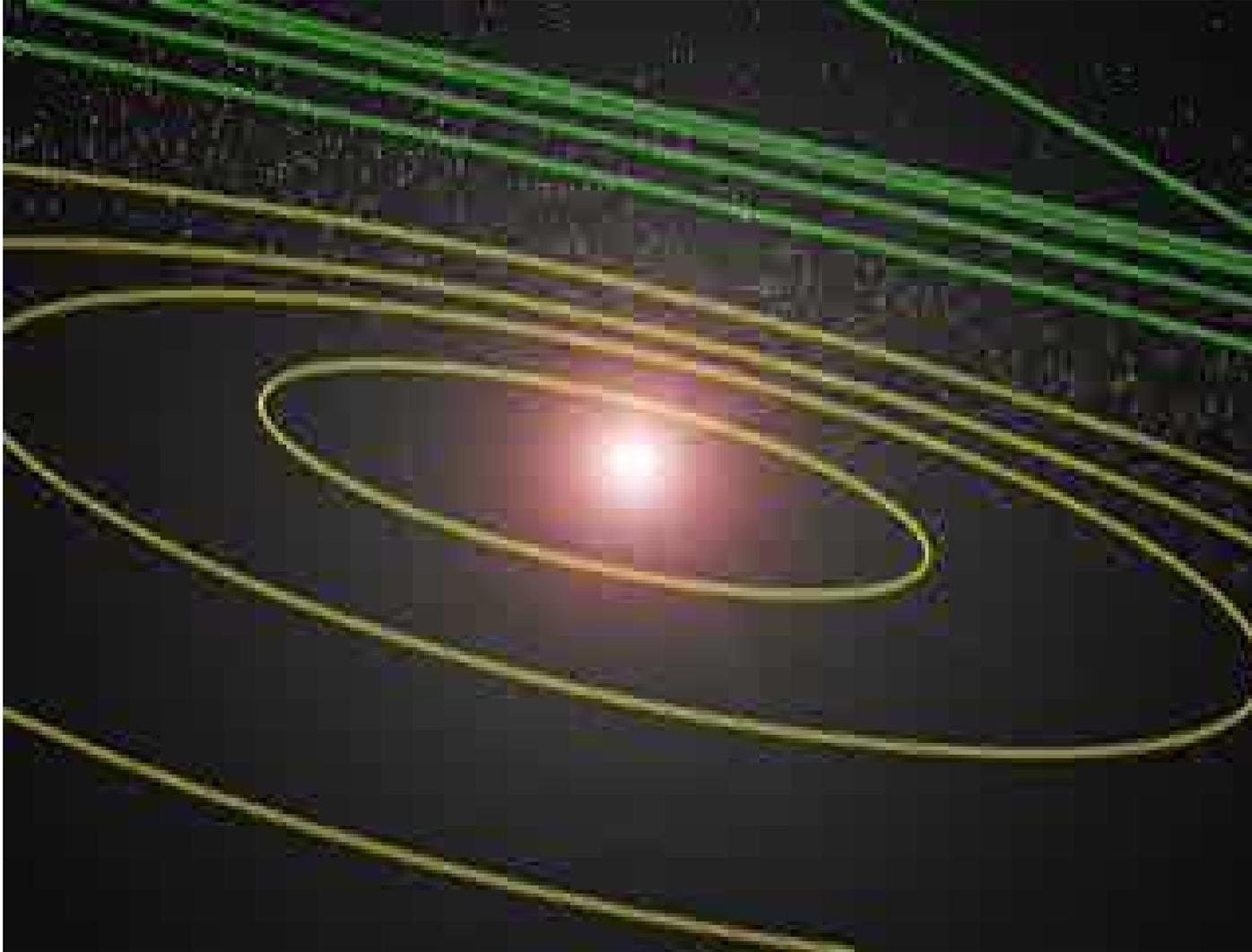


Sedna (2003 VB12)

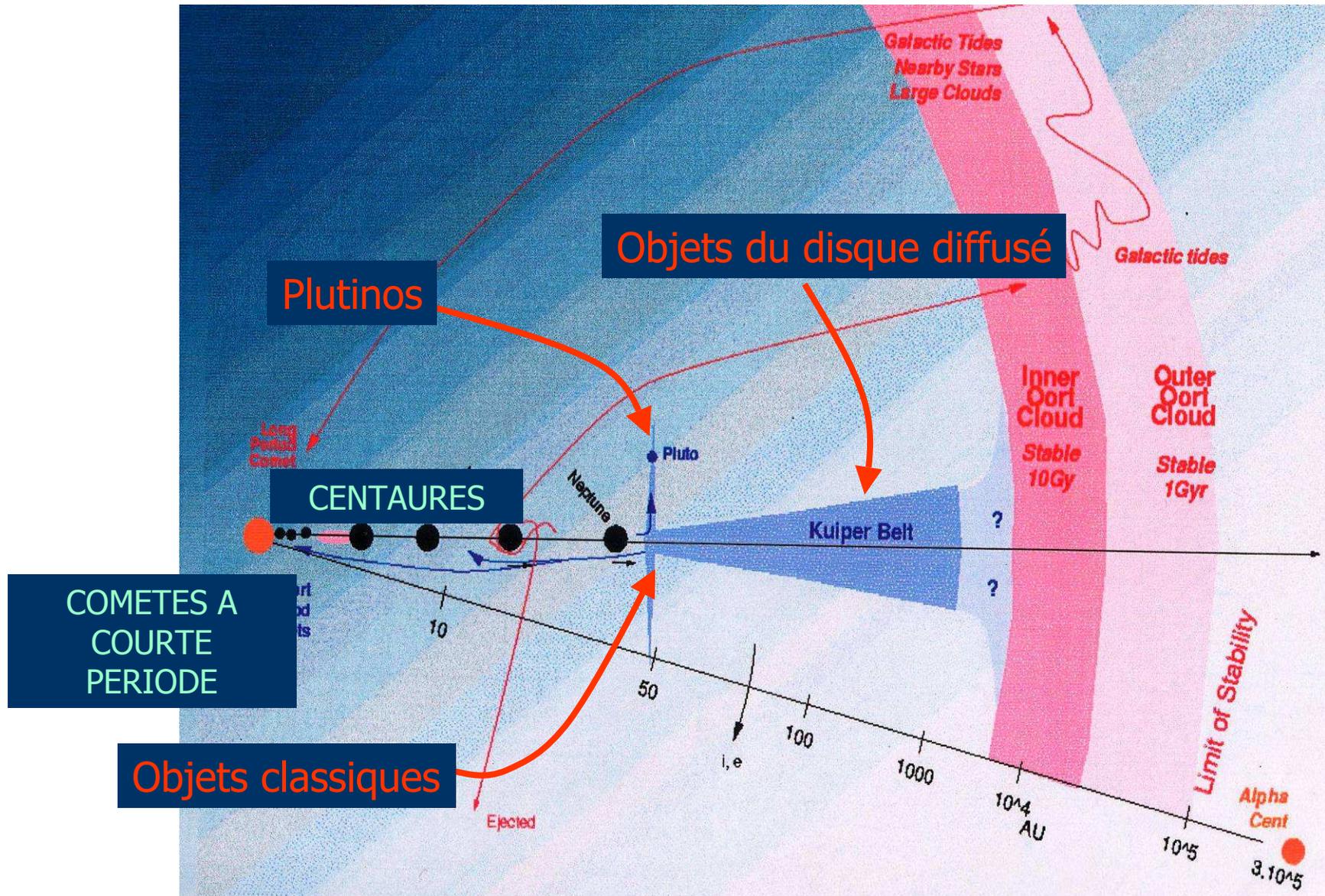


Crédit: NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC-Caltech)

Sedna, un objet unique



Coupe du Système Solaire



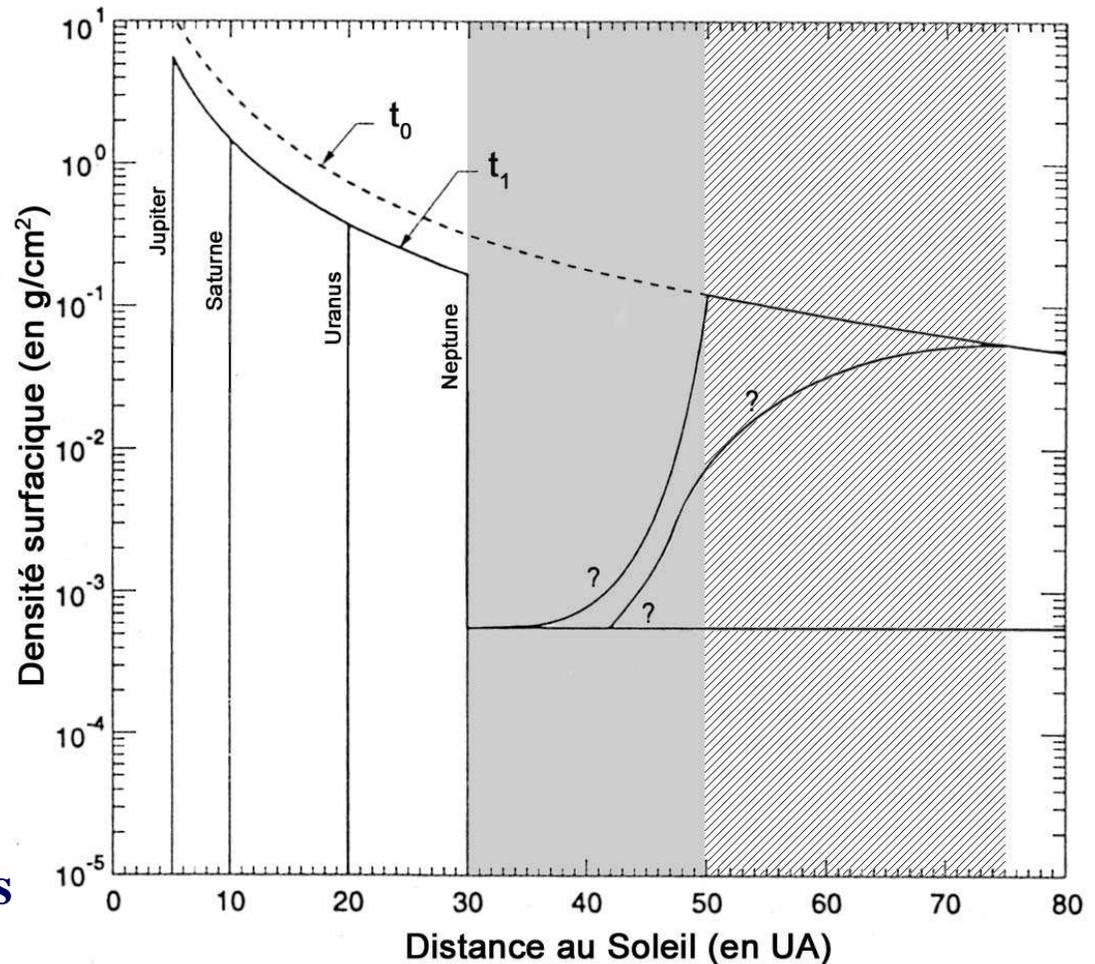
Masse manquante

Masse probablement ~100 fois plus importante dans le passé :

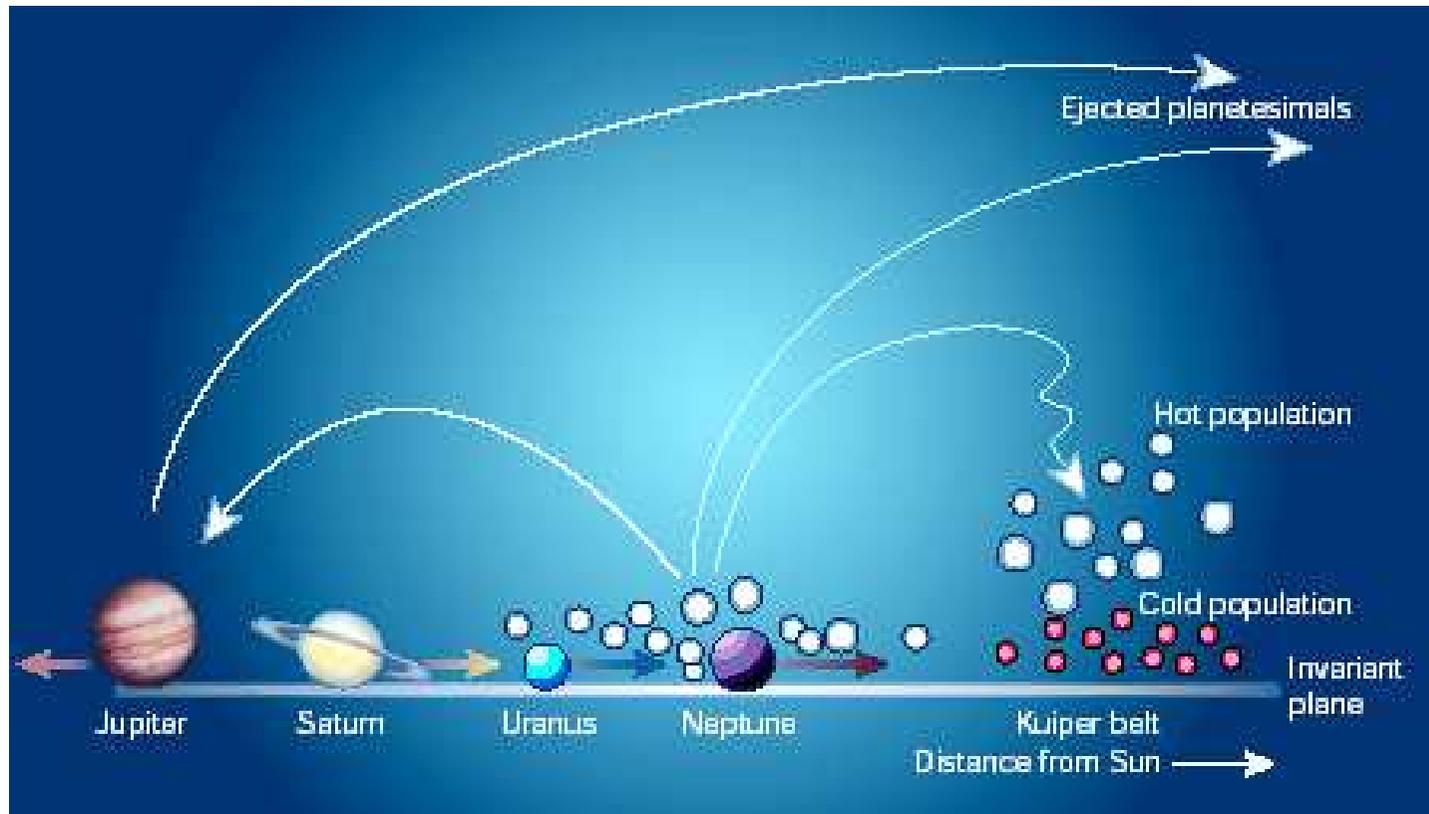
- On s'attend à une décroissance régulière de la densité avec la distance au soleil
- Existence d'objets de $D > 100\text{km}$

→ Forte **érosion** de la ceinture de Kuiper par:

1. Perturbations gravitationnelles de Neptune
2. Collisions



Origine de la structure dynamique (un scénario possible)



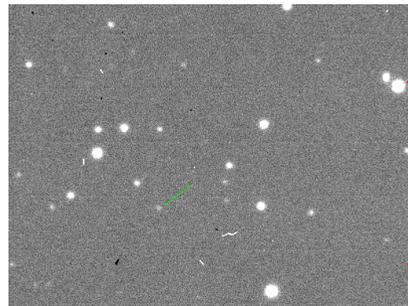
- Les TNO se sont formés au voisinage de Neptune
- Les planètes ont migré, perturbant les TNOs
- Les objets formés « à l'intérieur » ont été plus perturbés, éjectés vers l'extérieur, formant les objets fortement inclinés
- Certains de ceux formés à l'extérieur ont été « capturés en résonance » par Neptune
- Une étoile passant à ~ 800 UA a tronqué le disque et produit des objets comme Sedna

La physique des objets transneptuniens

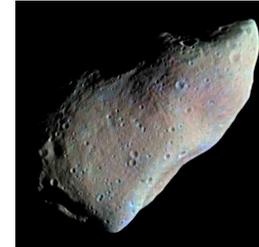
- **La taille**
- **L'aspect visuel et la forme**
- **La « couleur »**
- **La composition de la surface**
- **La binarité**
- **La température**
- **L'atmosphère ?**

La taille : un vrai problème

- Pluton: estimé à 12000-4000 km dans les années 1930-1960
- Diamètre réel ~ 2400 km

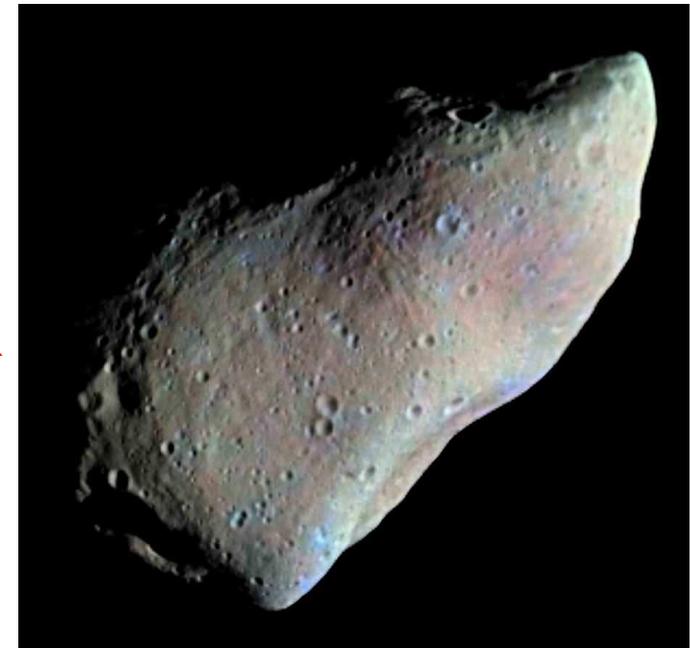


Albédo = 0.25



D=100 km

Albédo = 0.04

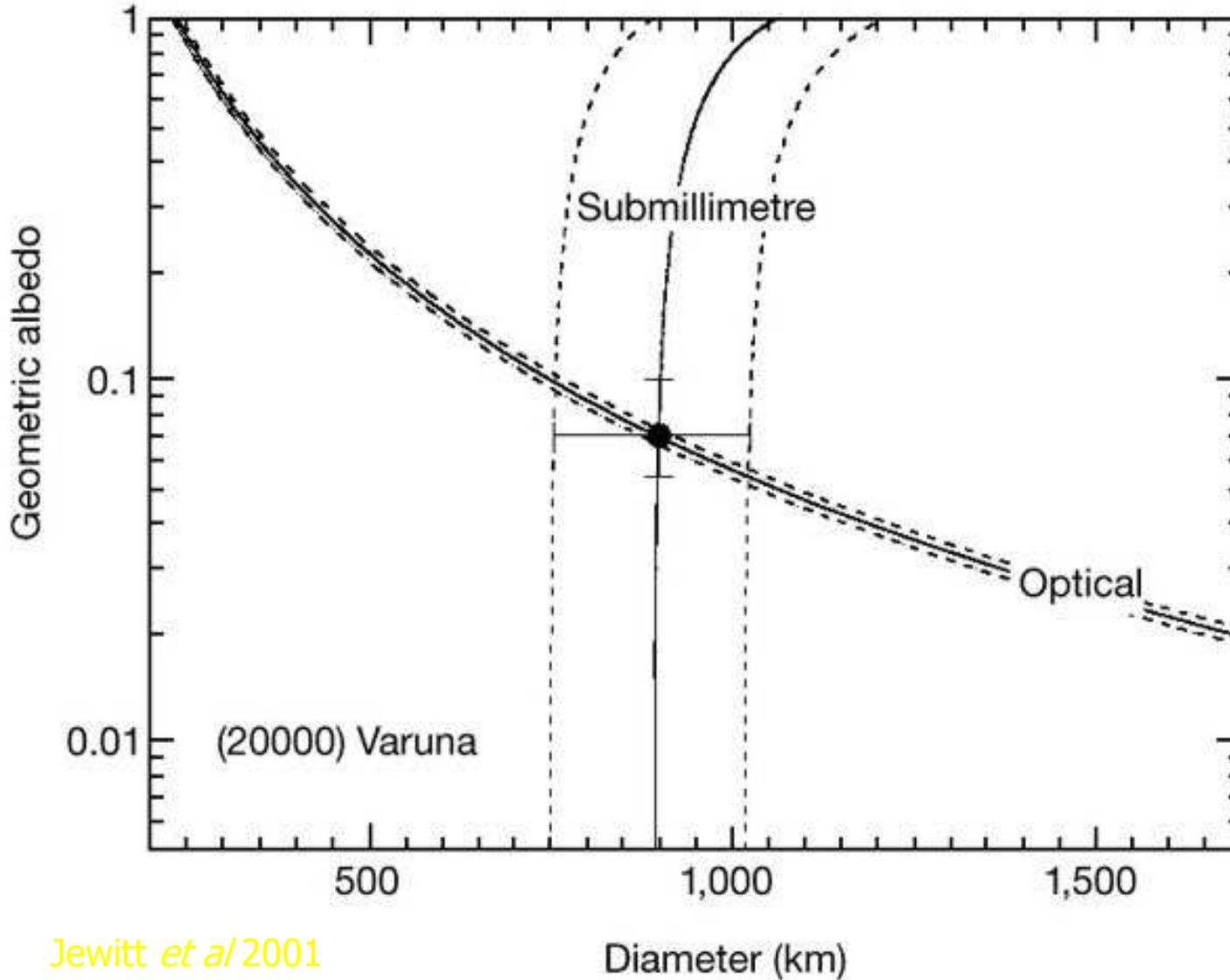


Nécessité de résoudre l'objet
(rare!) ou de mesurer son flux
thermique

D=240 km

Comment mesurer la taille d'un objet ponctuel ?

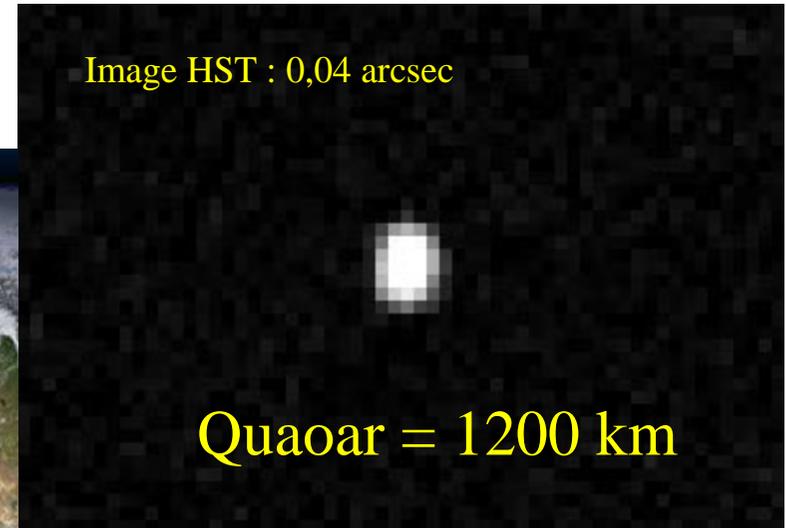
- La
- do
- As
- do
- 2
- ca
- fr
- éc
- D'



ble ne
ayon
que »)
reliées
st plus
même

Quaoar, Sedna, Orcus...

les OTNs « géants »

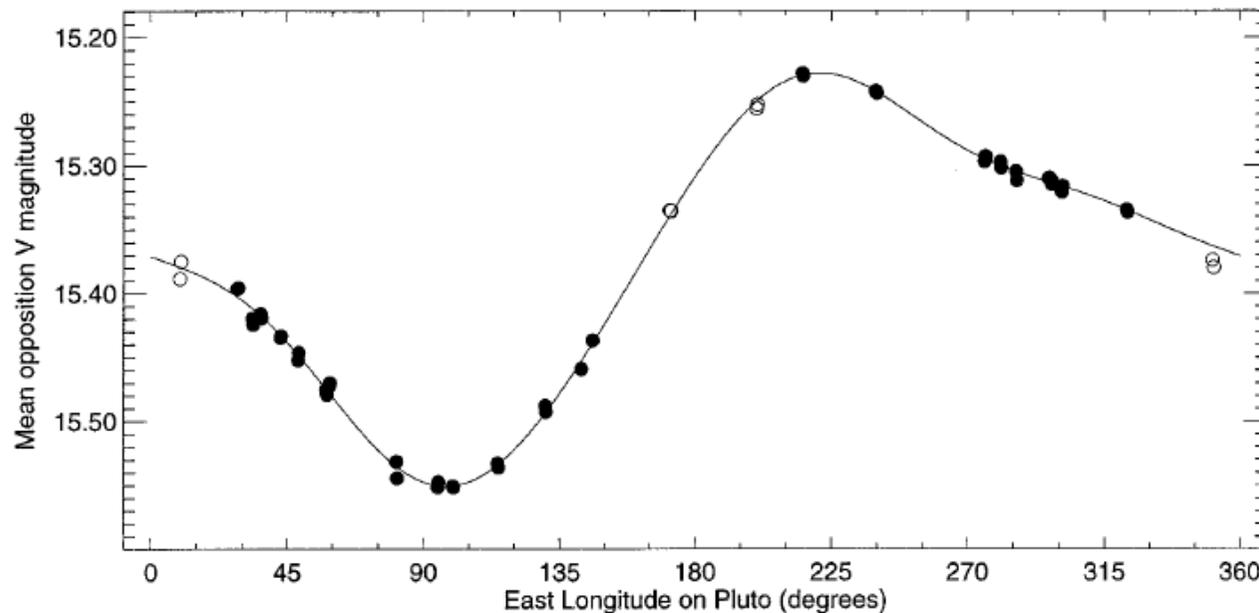


- Peu de tailles mesurées...
- Diamètres 600-1200 km, encore bien des incertitudes

L'aspect visuel:

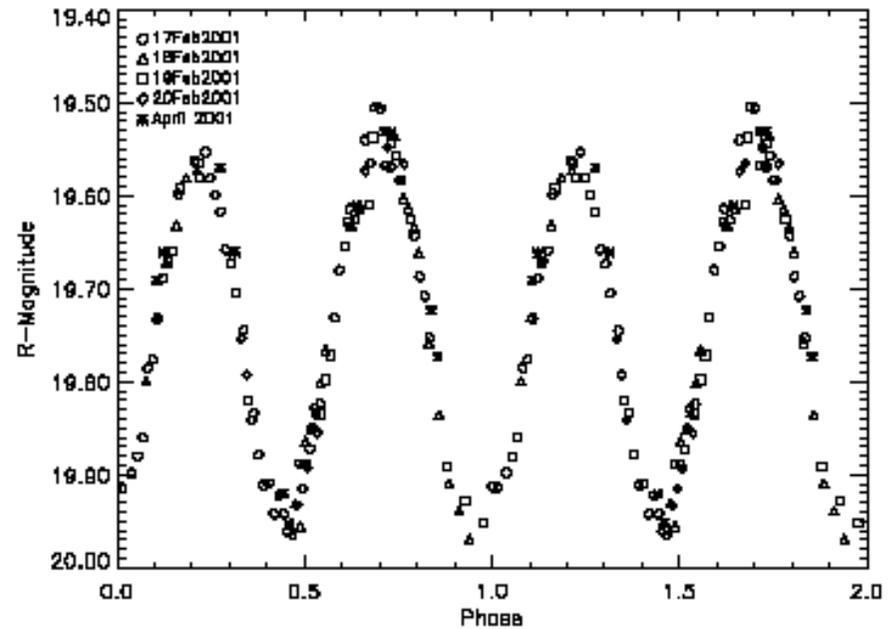
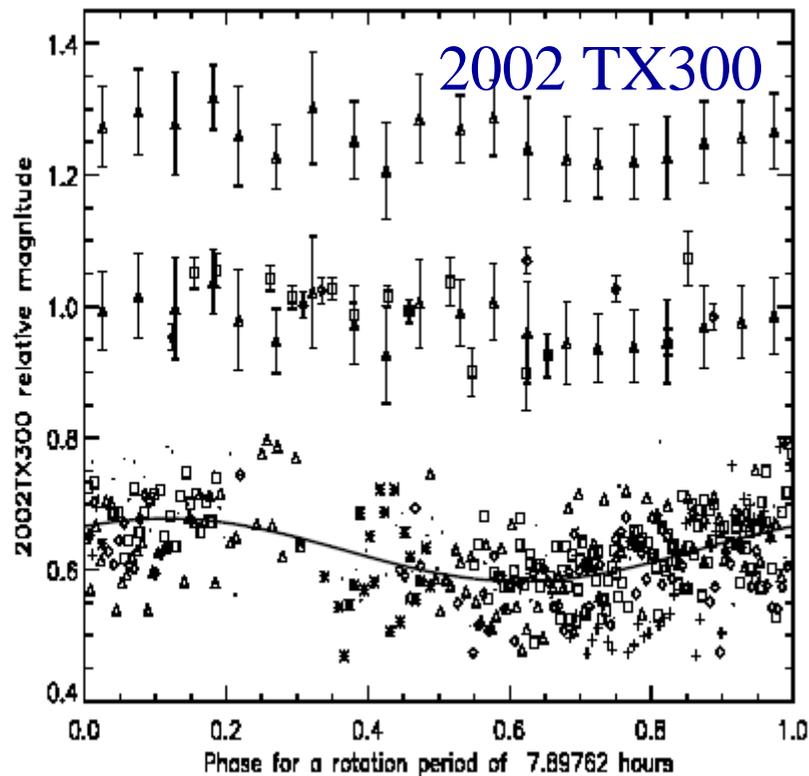
quand Pluton devient plus qu'un petit point (peu) brillant...

- **1955: découverte de la courbe de lumière de Pluton**
interprétation: non-uniformité de la surface (taches d'albédo); période de rotation propre = 6.4 jours



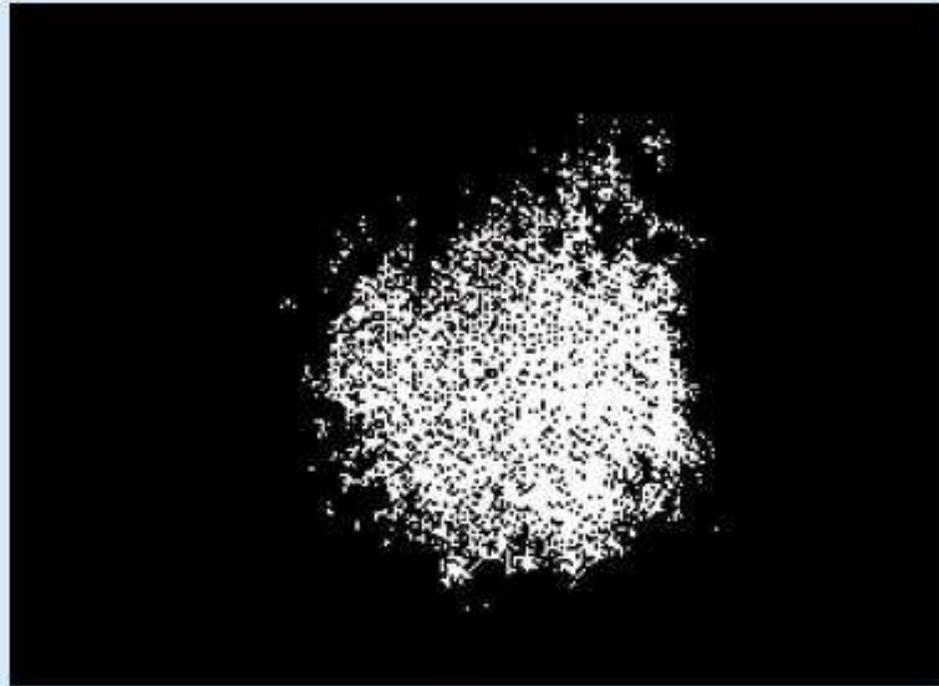
Les courbes de lumière des TNO

- **Donnent la période de rotation (en général quelques heures seulement)**
- **Indiquent des variations d'albédo ou de forme**



VARUNA: non sphérique?

Binarité: découverte de Charon (1978)



Pluto's Satellite Charon

Orbital Parameters:

- Distance from Pluto = 17,600 km
- Orbit Period = 6.3867 days
- Circular orbit

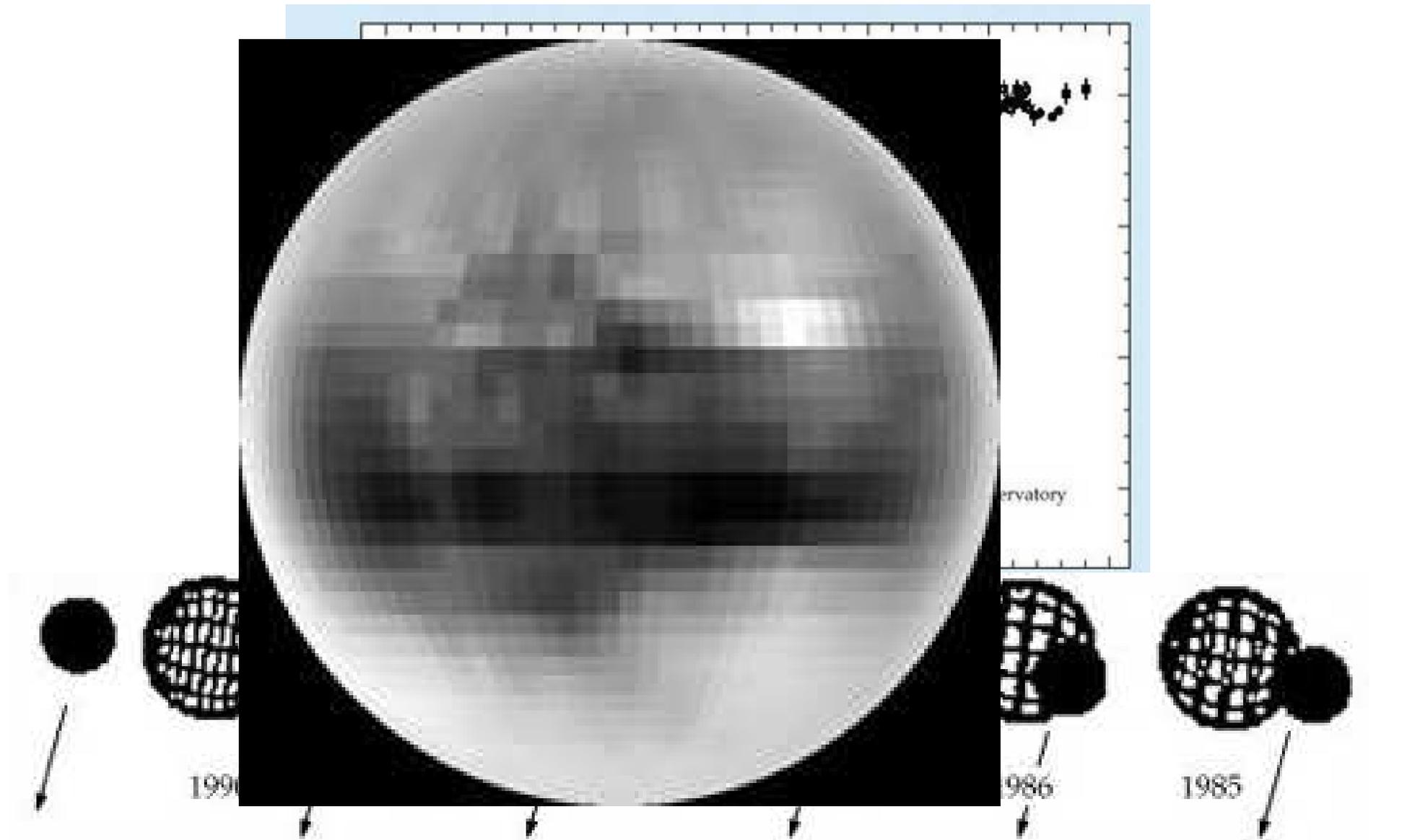
Un couple infernal...

2 films

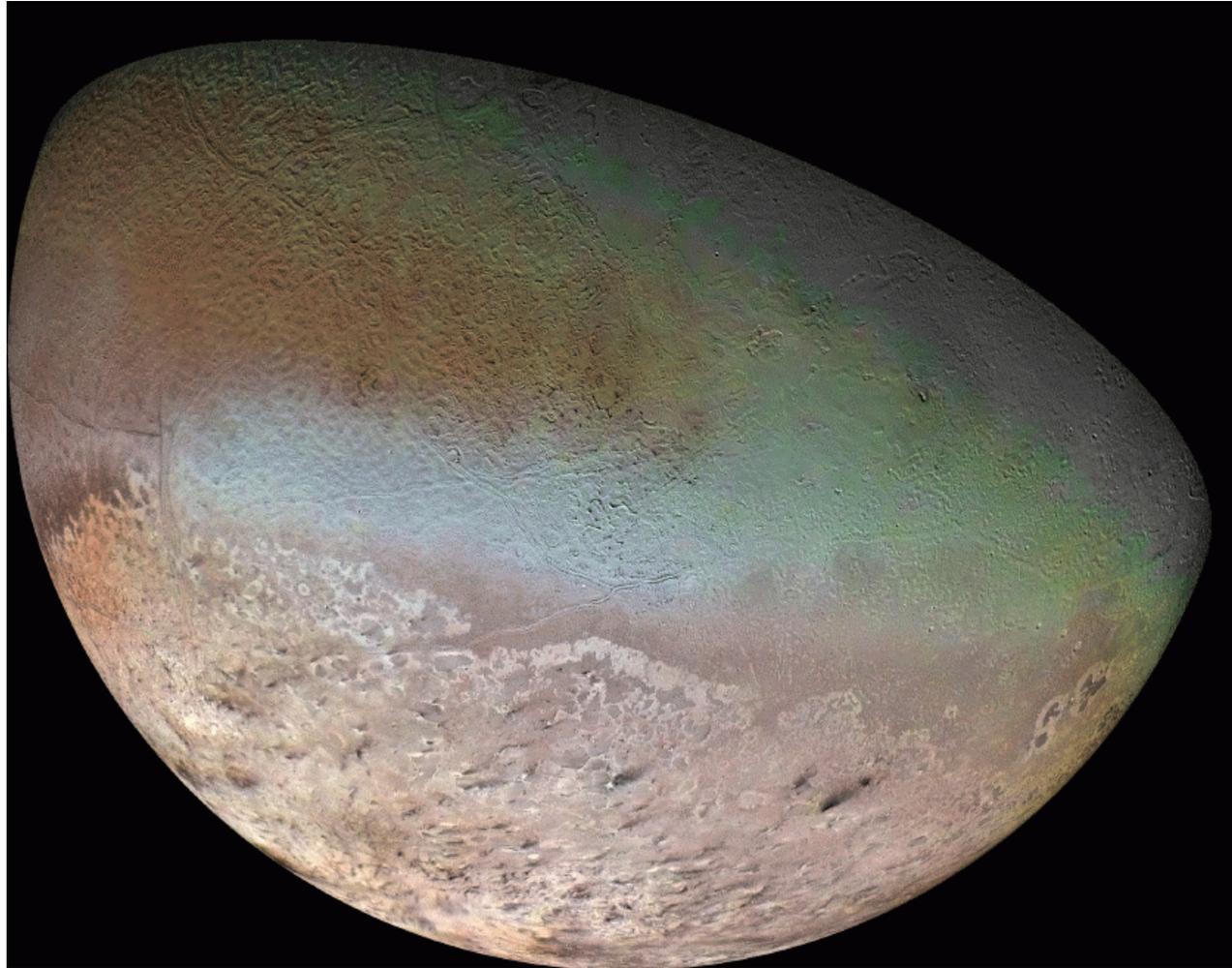


10_PlutoMovie12.mov

Mais bien utile...



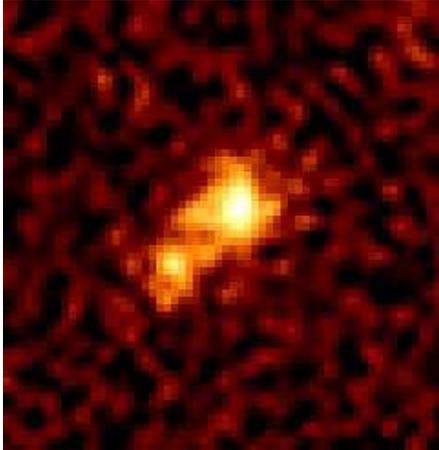
Triton: un objet transneptunien capturé?



1998 WW31

découverte du premier OTN double

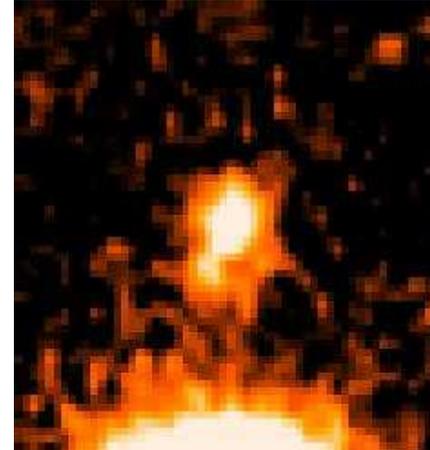
observations du 23 décembre 2000



séparation angulaire
1.1''

orientation
45°

observations du 6 décembre 2000



séparation angulaire
0.8''

orientation
30°

séparation	1.1''
distance	40 000 km
magnitude R	24,2 et 24,6
Diamètres (A=0.04)	120 km et 100 km
différence de magnitude	0.4

cette découverte a permis d'estimer pour la première fois la **masse** donc la **densité** d'un objet trans-neptunien

Période : 574.6 jours

Rapport de masse = 1.7
Pluton/Charon ~8

Densité ~ 2 (Pluton = 2.0)

La « couleur » des surfaces

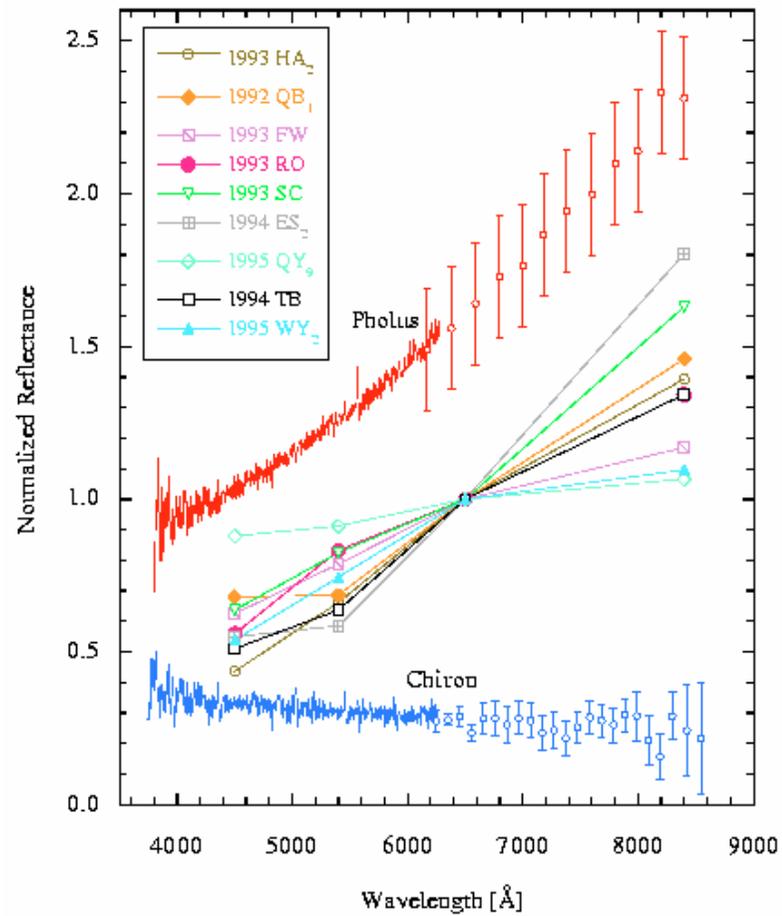
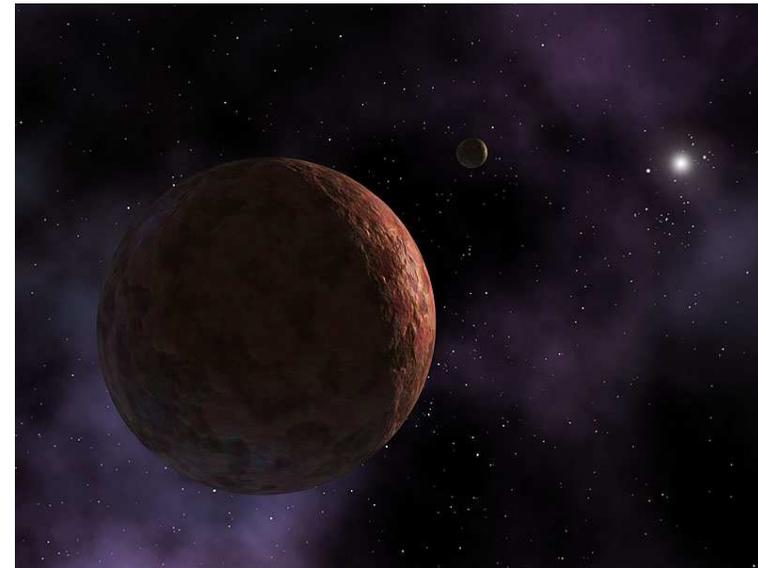
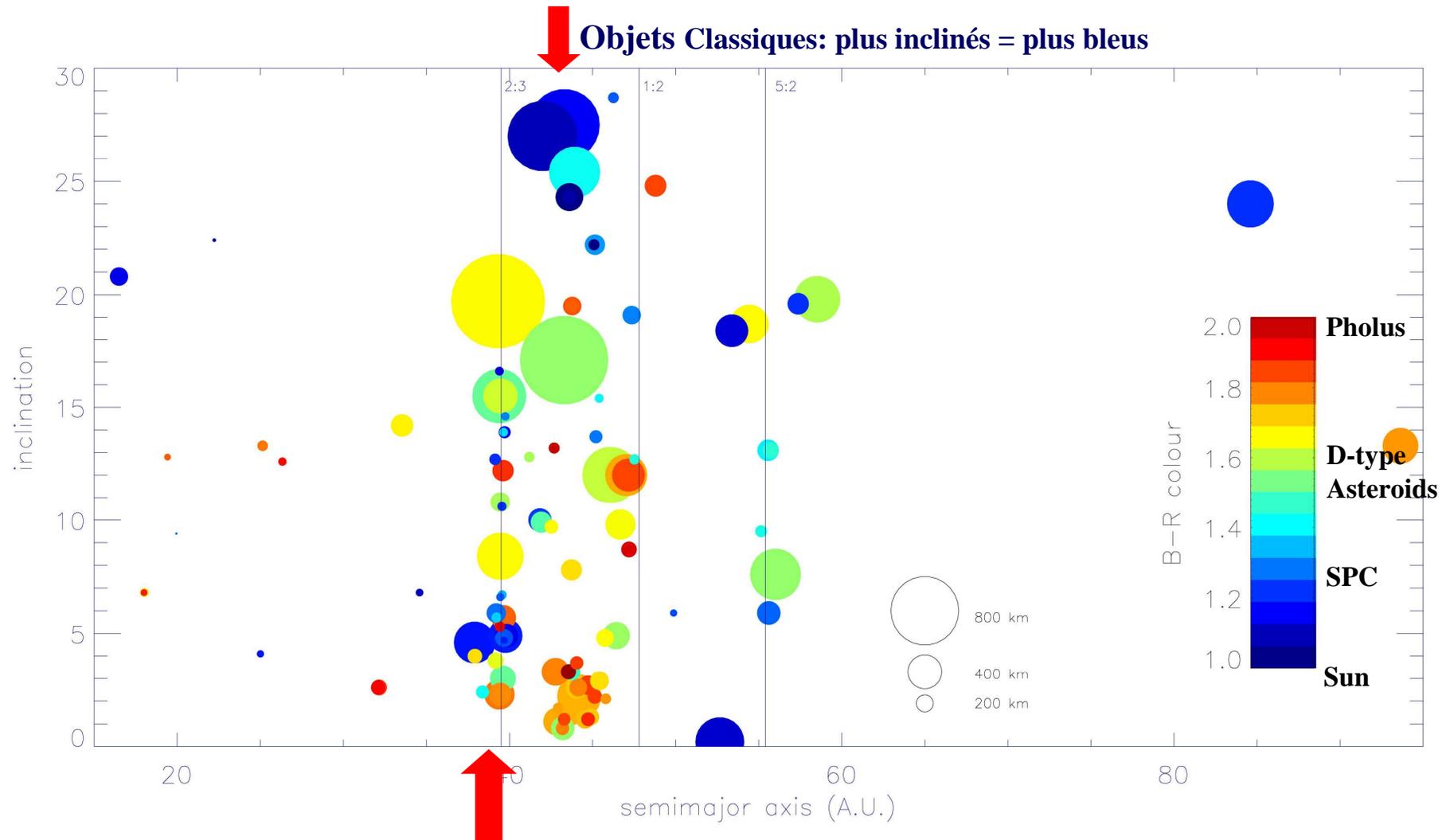


Fig 3: Luu & Jewitt, AJ Nov 1996



Une grande diversité de couleurs...



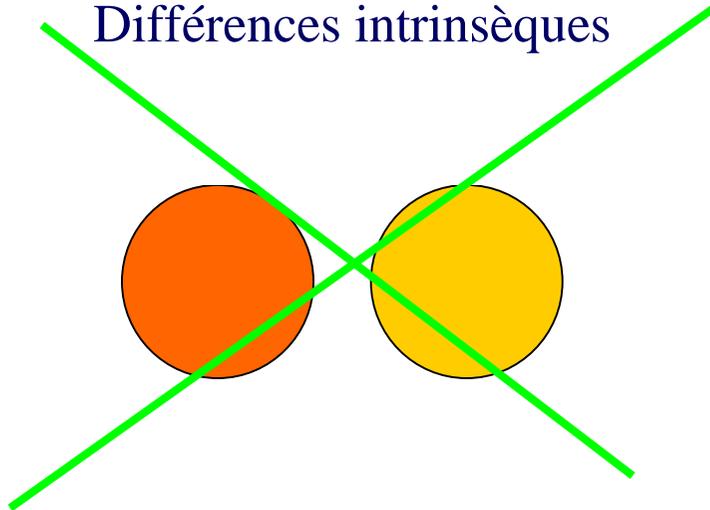
Origine de la diversité des couleurs

grande diversité des couleurs



Différences : intrinsèques ou évolution ?

Différences intrinsèques



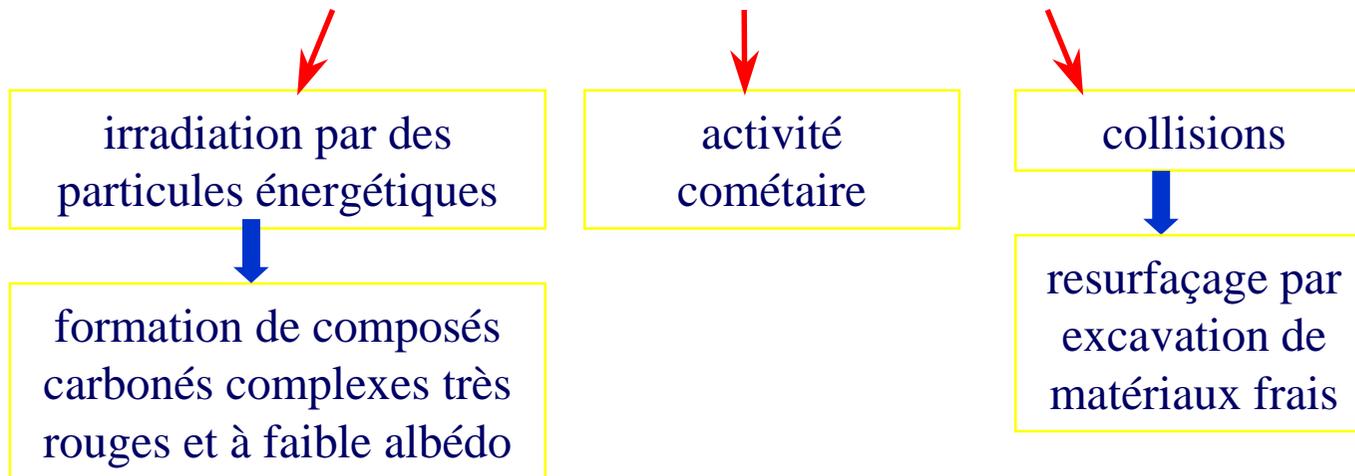
Processus d'évolution des surfaces :

- Irradiation
- Collisions
- Activité « cométaire » (?)

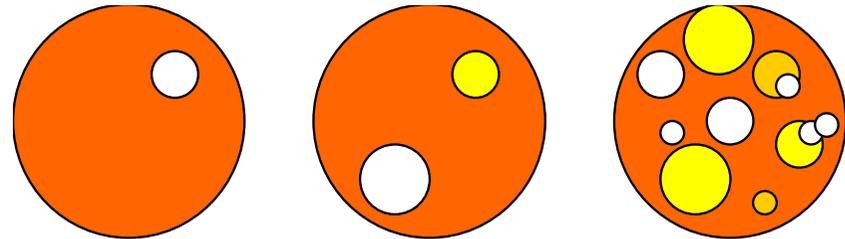
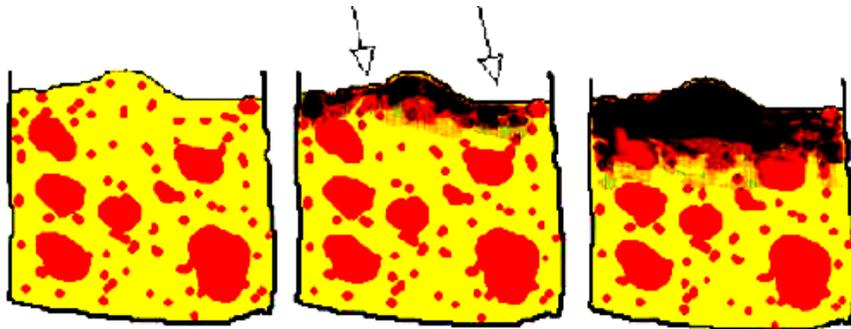
La différence de température entre 30 to 50 AU est seulement de ~10 K donc sans doute trop faible pour affecter les propriétés chimiques des objets

Origine de la diversité des couleurs

Processus d'évolution des surfaces

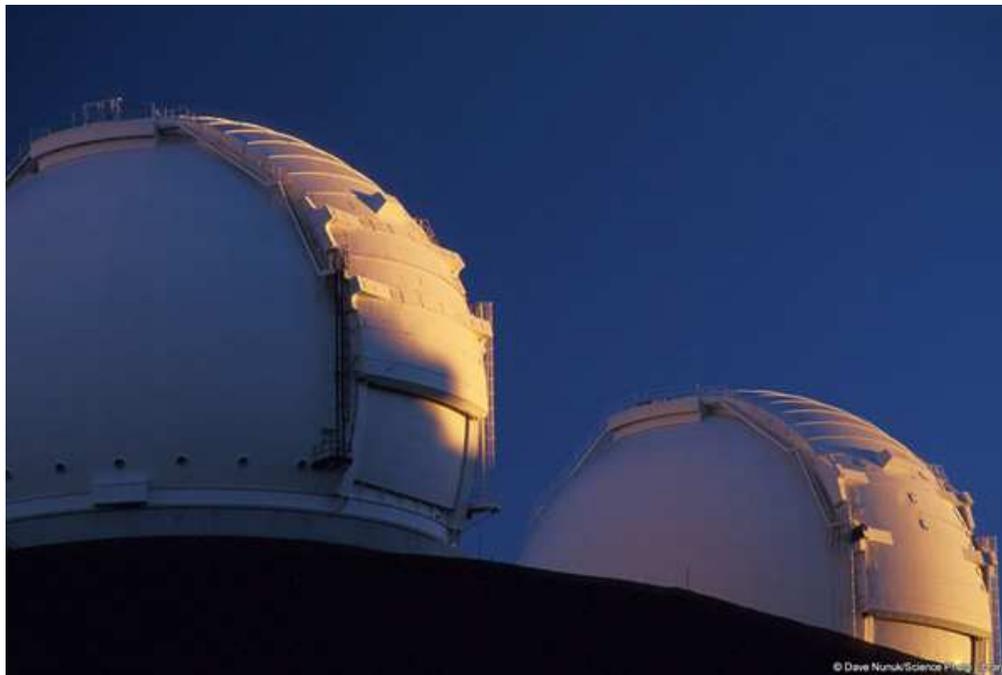


particules énergétiques



La composition des surfaces des objets transneptuniens

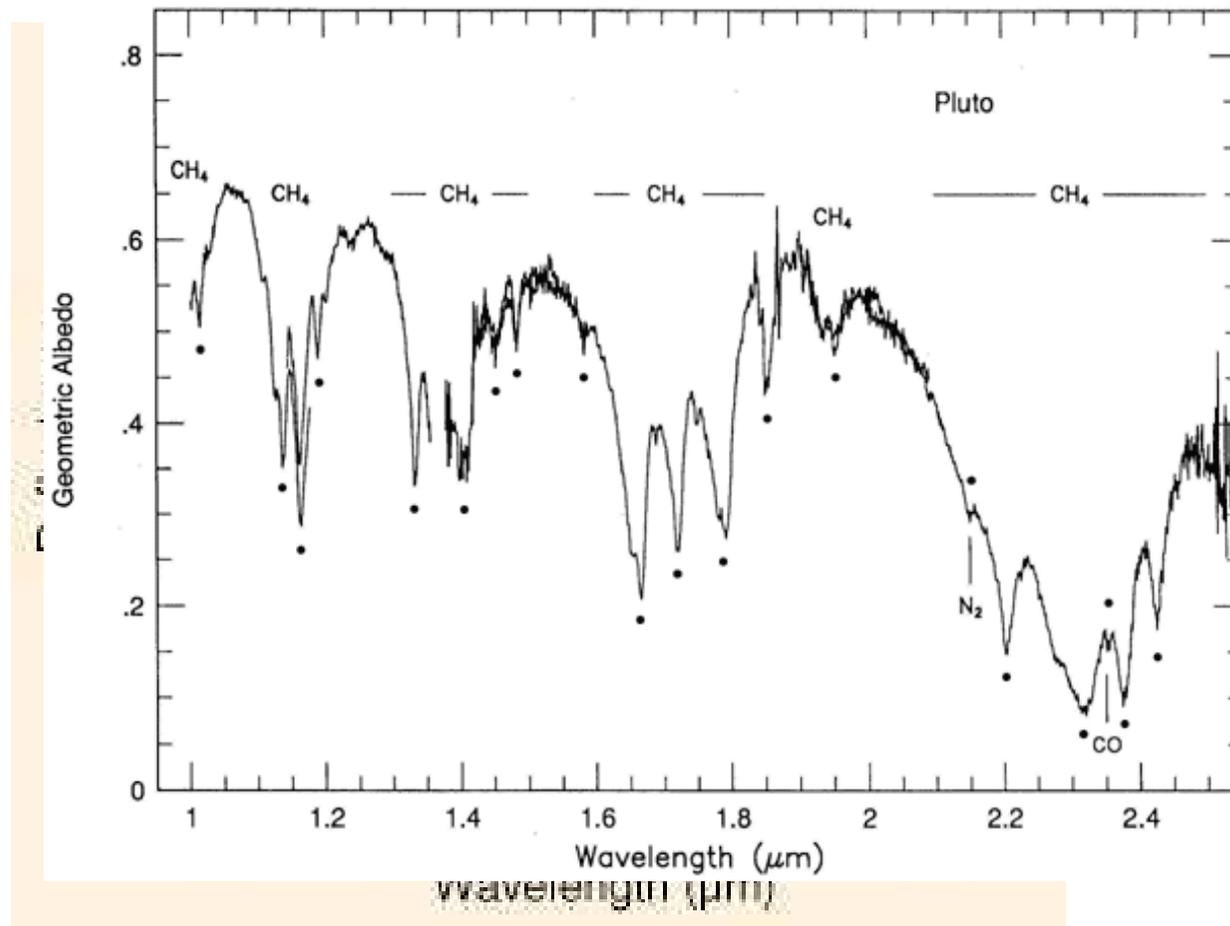
- **Méthode = spectroscopie IR (domaine riche en signatures spectrales des glaces)**
- **Grands télescopes (8-10m) requis. Reste très difficile...**



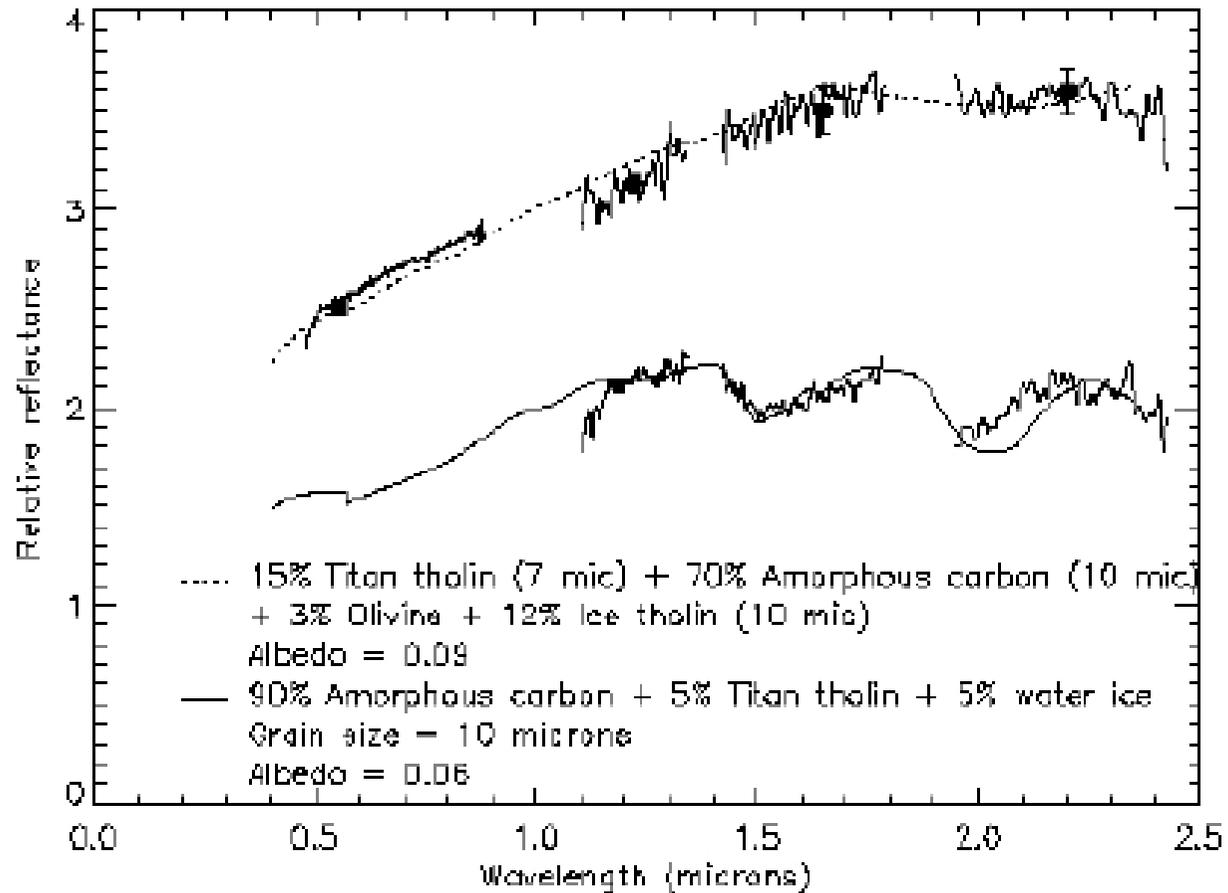
VLT at Paranal

La composition des surfaces de Pluton et Charon

- Pluton est recouverte de glaces (méthane, azote, CO, H₂O)
- Charon est recouverte de glace d'eau

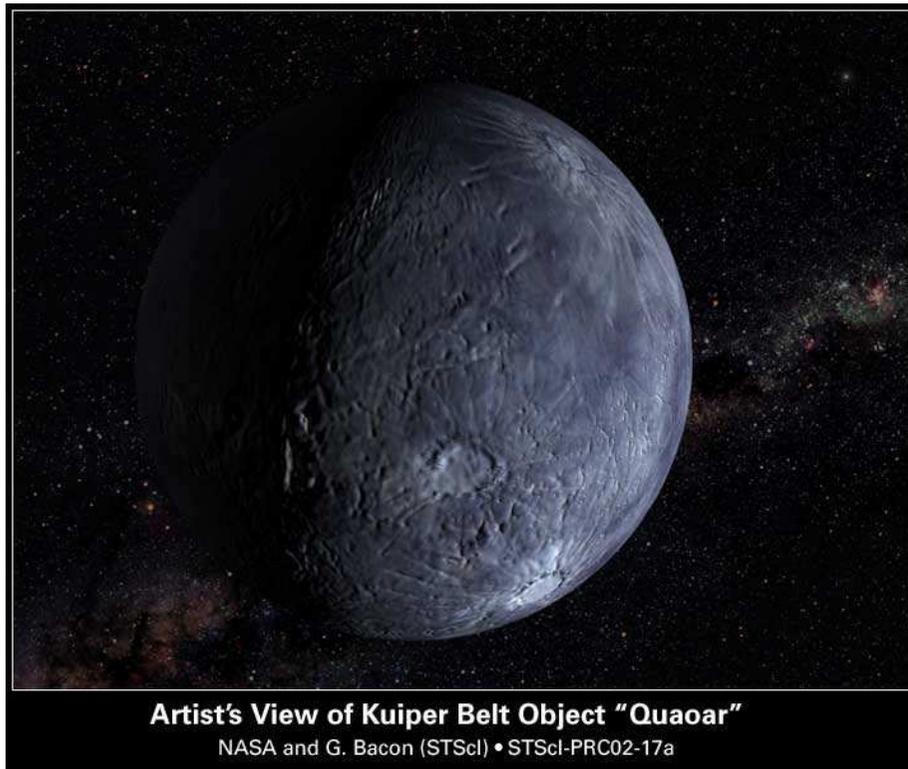


2001 PT13 (Centaure)



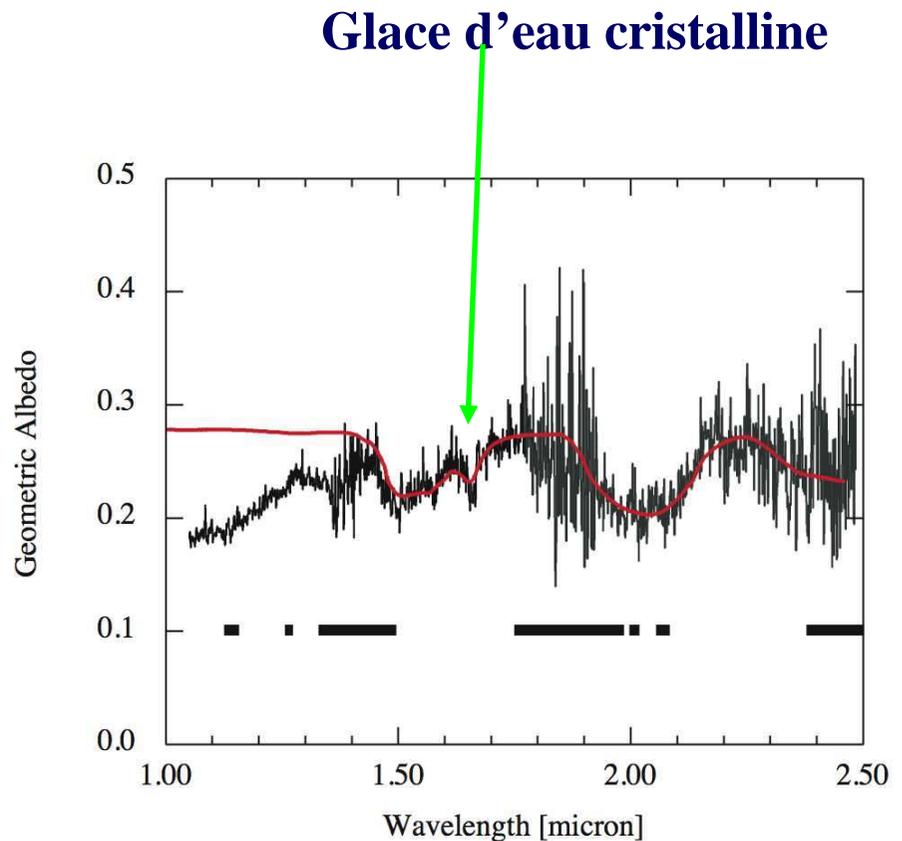
Barucci et al. 2002

Quaoar



- Implique une température de formation $> -160^{\circ}\text{C}$
- Chauffage: interne par radioactivité (incluant cryovolcanisme) ou externe par micro-impacts

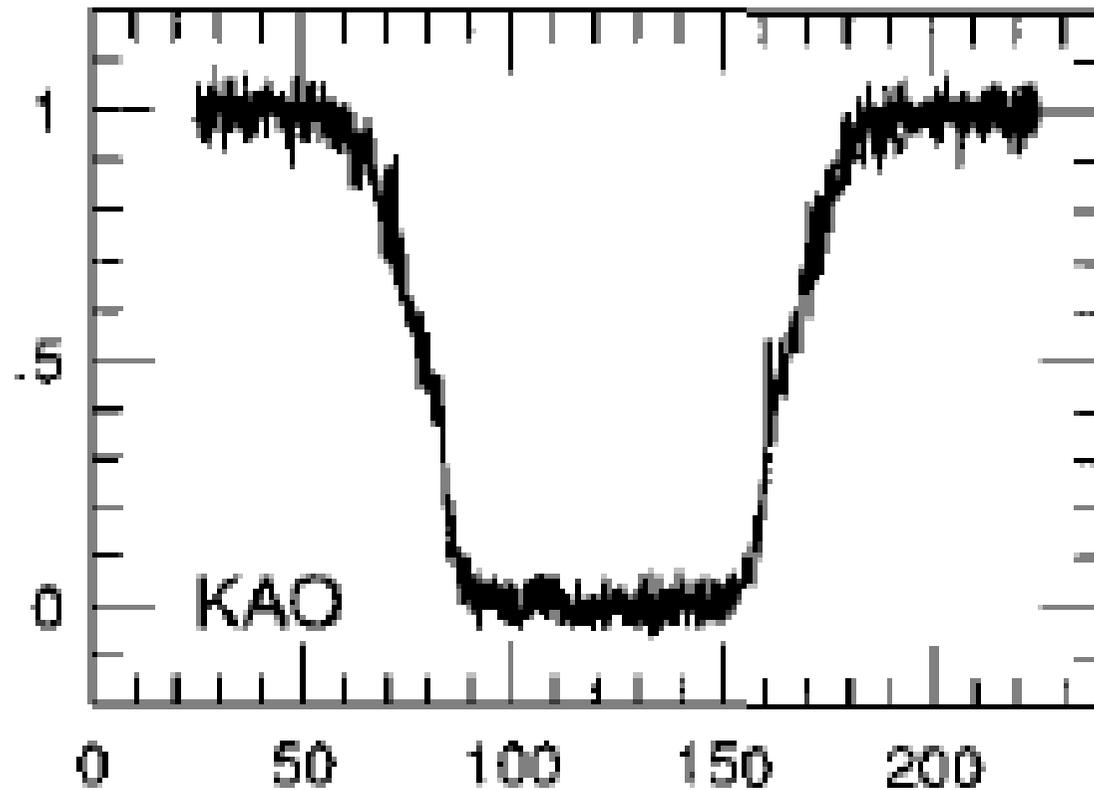
- Quaoar : $T \sim -220^{\circ}\text{C}$



Jewitt and Luu., 2004

Les atmosphères

Occultation stellaire par Pluton (9 juin 1988)



L'atmosphère de Pluton

- Découverte en 1985 par occultation stellaire
- Principalement de l'azote (N_2), traces de méthane
- Produite par l'évaporation des glaces de surface
- Pression: environ 5 microbar, *a augmenté entre 1988 et 2003 !*
- Triton a une atmosphère analogue (pression = 15 microbar)
- Charon?
 - Occultation du 11 juillet 2005
- Les autres TNOs ??

Pluton et les TNOs: Planètes ou pas?

- **1) Un objet qui tourne autour du Soleil (hors comètes)**
 - OK, mais il y a > 200.000 astéroïdes
- **2) Un objet qui tourne autour du Soleil et qui a une atmosphère**
 - OK mais problème pour Mercure
- **3) Un objet qui « domine » les autres dans sa région**
 - Pluton n'est plus une planète (masse $<$ masse totale des Plutinos)
 - Sedna devient une planète!
 - Le critère « domine dans sa région » est vague (Cérès = $1/3$ de la masse de la ceinture principale à 2.2-4.5 UA) et peut évoluer (les planètes ont pu migrer)
- **4) Un objet de rayon $> X$ km (proposition $X= 1000$ km)**
 - On garde Pluton, et pour l'instant on ne rajoute personne
 - Propre et évite le remue-ménage, mais arbitraire...

Pluton et les TNOs: Planètes ou pas?

- **5) Un objet qui tourne autour du Soleil et dont la gravité est suffisante pour qu'il soit « régulier et rond »**
 - Critère physique
 - Limite dans les 500 km
 - On garde Pluton, on rajoute Quaoar, Varuna, Cérès et quelques autres...
- **6) A quoi bon cette question...**

New Horizons : exploration des confins du SS

Dernière planète encore inexplorée

Lancement : 2006

Survol de Pluton-Charon : 2016

Survols de TNOs : 2018-2022

