L'activité cométaire dans le système solaire

Philippe Rousselot
Obs. de Besançon

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Observatoire de Besançon

UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

Plan de l'exposé :

- Les comètes « classiques »
- La recherche d'une activité cométaire à grande distance héliocentrique
- Le cas de 174P/Echeclus
- Les comètes de la ceinture principale et Cérès

1. Les comètes « classiques »

Caractéristiques orbitales :

→ **Les comètes presque isotropiques :**

- **comètes à longue période** (P>200 ans)
- **comètes de Halley** (20<P<200 ans)

→ **Les comètes écliptiques** (faible i et P (<20 years)) : **comètes de la famille de Jupiter**

Indicateur dynamique : **paramètre de Tisserand** (interaction avec Jupiter)

$$T_J = (a_J/a) + 2\,[(a/a_J)(1-e^2)]^{1/2} \cos i$$

- comètes de la famille de Jupiter : $2<T_J<3$
- comètes à longue période et de type Halley : $T_J<2$

(astéroïdes : $T_J>3$)

→ Récemment (Hsieh et Jewitt, 2006) : nouvelle classe de comètes, les comètes de la ceinture principale (**Main Belt Comets)**

Réservoir de comètes:

→ **Comètes à longue période** : **nuage de Oort**

→ **Comètes écliptiques** : **disque dispersé de la ceinture de Kuiper**

(comètes type Halley : origine encore mal comprise)

Origine des comètes:

→ **comètes presque isotropiques** : **région de Jupiter-Uranus → nuage de Oort → comète à longue période (retour vers le Soleil) → comète type Halley**

→ **comètes écliptiques** : **région intra-Neptunienne → disque dispersé**

Nouveau :

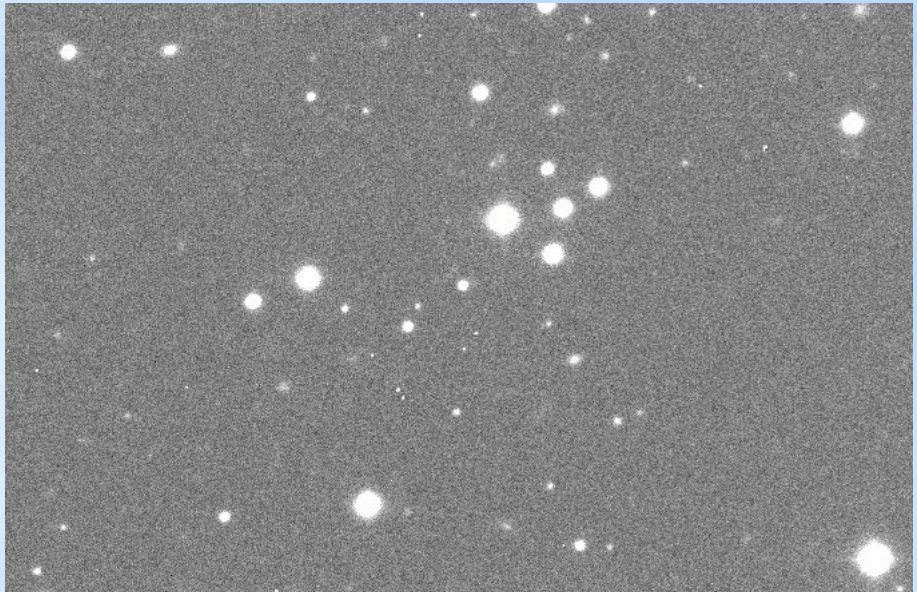
Découverte d'un objet trans-neptunien « extrême » : **2009 MS9** avec le CFH (équipe franco-canadienne, survey à haute latitude écliptique). MPEC 2009-S59 du 20/09/09.

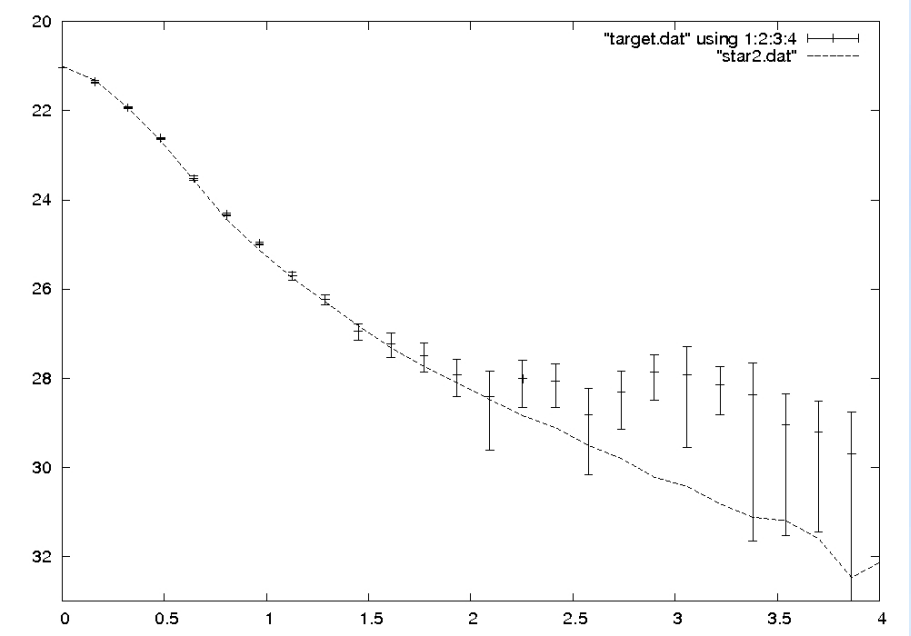
a=403 UA / e=0,972 / i=68° / q=11 UA ($M_R \approx 22$, rayon 20 km)

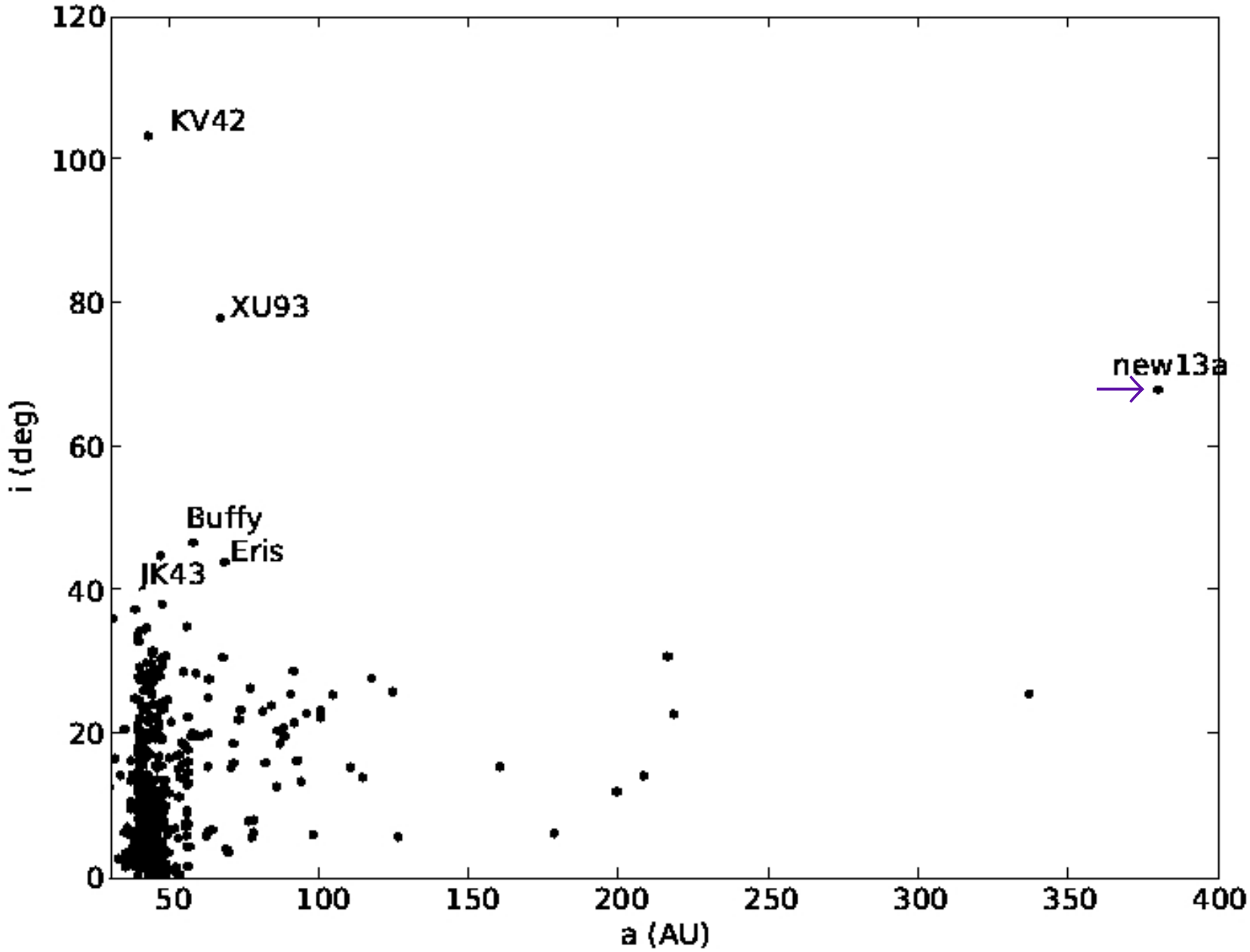
Orbite très inclinée, excentrique et instable (sur 10.10^6 ans).

Objet probablement issu du nuage de Oort et perturbé par une rencontre avec Saturne, Uranus ou Neptune. **Future comète type Halley** ??

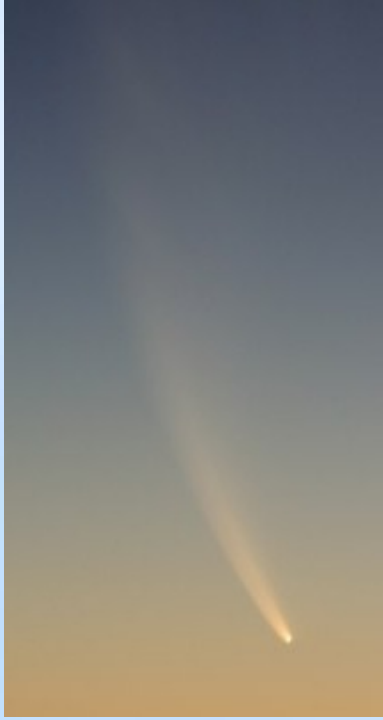
Pas (encore ??) d'activité cométaire à 13 UA :






KV42
XU93
new13a
Buffy
Eris
JK43
i (deg)
a (AU)
0
20
40
60
80
100
120
50
100
150
200
250
300
350
400

Définition d'une comète...



Pas si évidente, parce que les différentes définitions ne sont pas toutes mutuellement consistantes...

Principaux critères pour distinguer les comètes des astéroïdes :

→ Présence d'une **coma**

→ **Composition** : fraction substantielle de glace (objet condensé au-delà de la « snow line »)

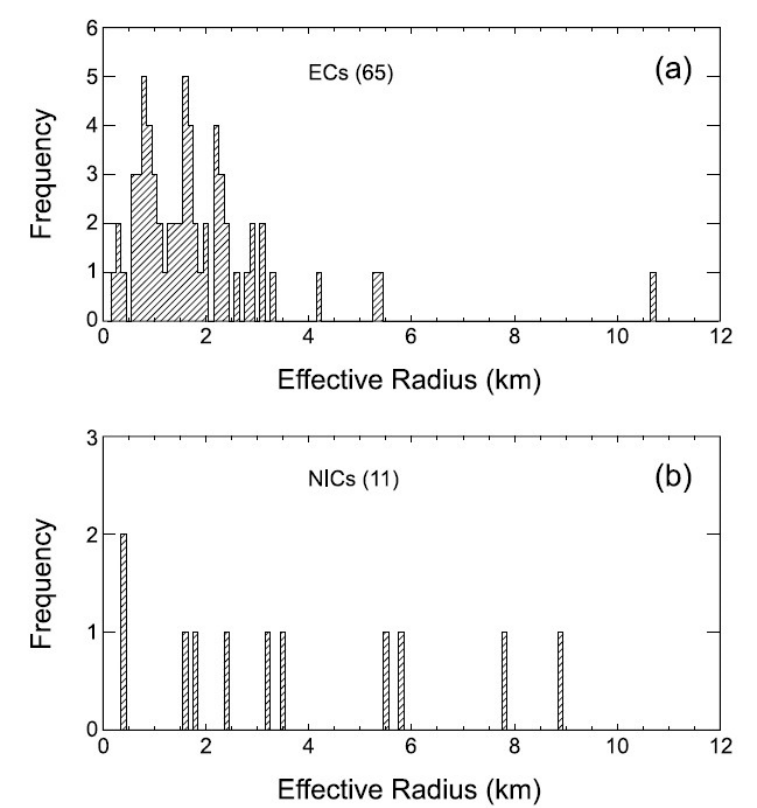
→ **Caracteristiques orbitales** (paramètre de Tisserand)

Tout vient du noyau...

Les noyaux cométaires peuvent avoir des caractéristiques physiques très différentes (taille, densité, composition, couleur...). Principales caractéristiques :

→ **Taille** : de quelques centaines de mètres jusqu'à ≈ 70 km (Hale-Bopp)

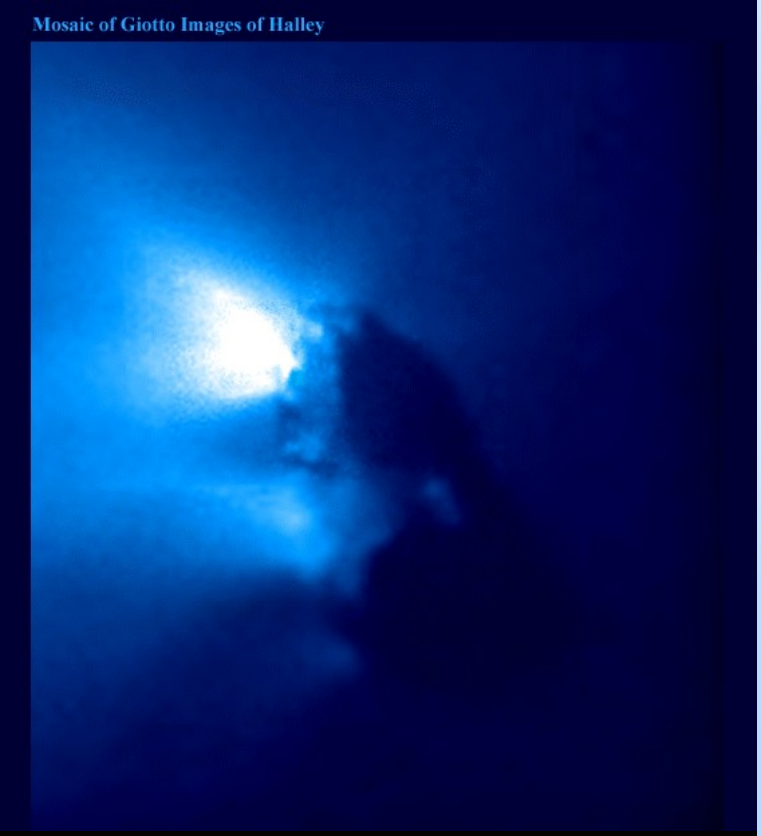
→ **Albédos** : les noyaux cométaires sont sombres. Leur albédo géométrique varie d'environ 2 à 6% (sauf 29P/Schwassmann-Wachmann 1, qui atteint peut-être p_v=13%)



(from Lamy et al., 2006)

→ **Couleurs** : les noyaux cométaires sont plus rouges que le Soleil <V-R>=0,41 (0,35 pour le Soleil). Les couleurs des comètes sont très variées.

Structure des noyaux cométaires :

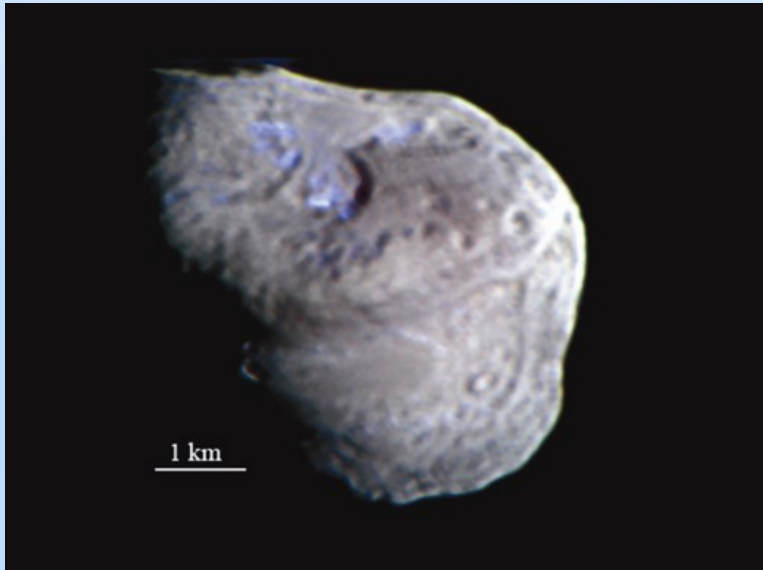


← comète de Halley (Giotto, 1986)

Borrelly (Deep Space 1, 2001) →

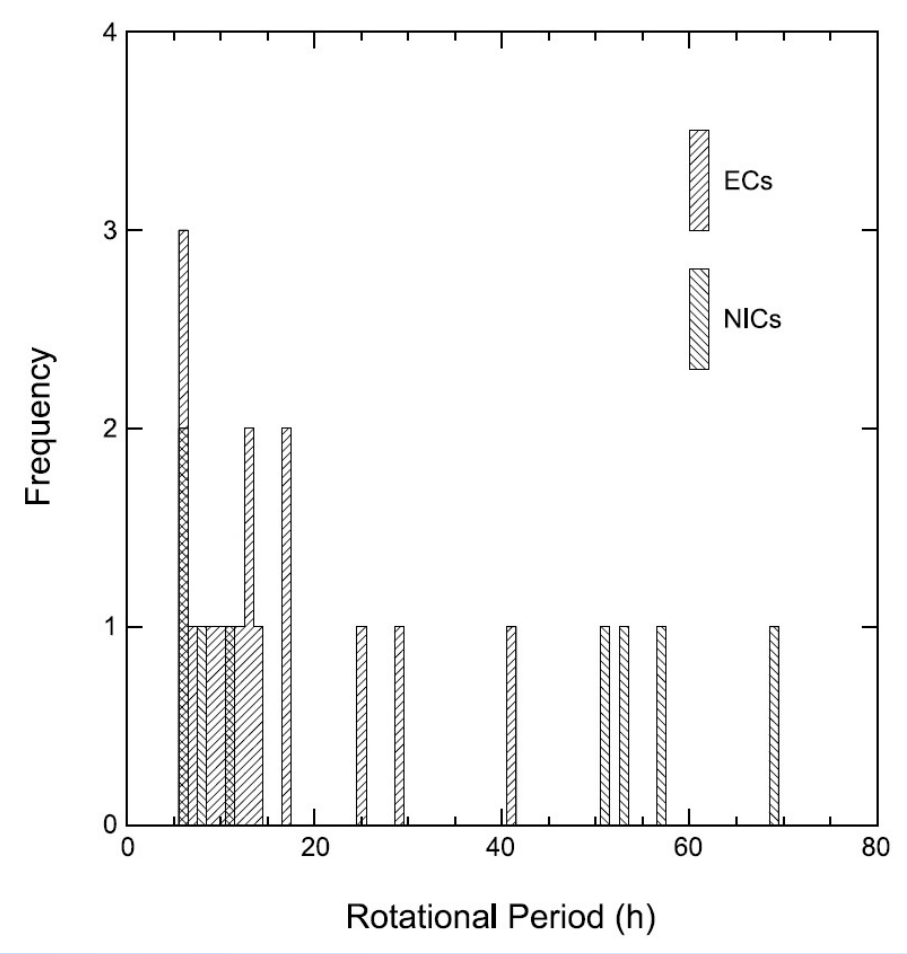
← Wild 2 (Stardust, 2004)

Tempel 1 (Deep Impact, 2006) →

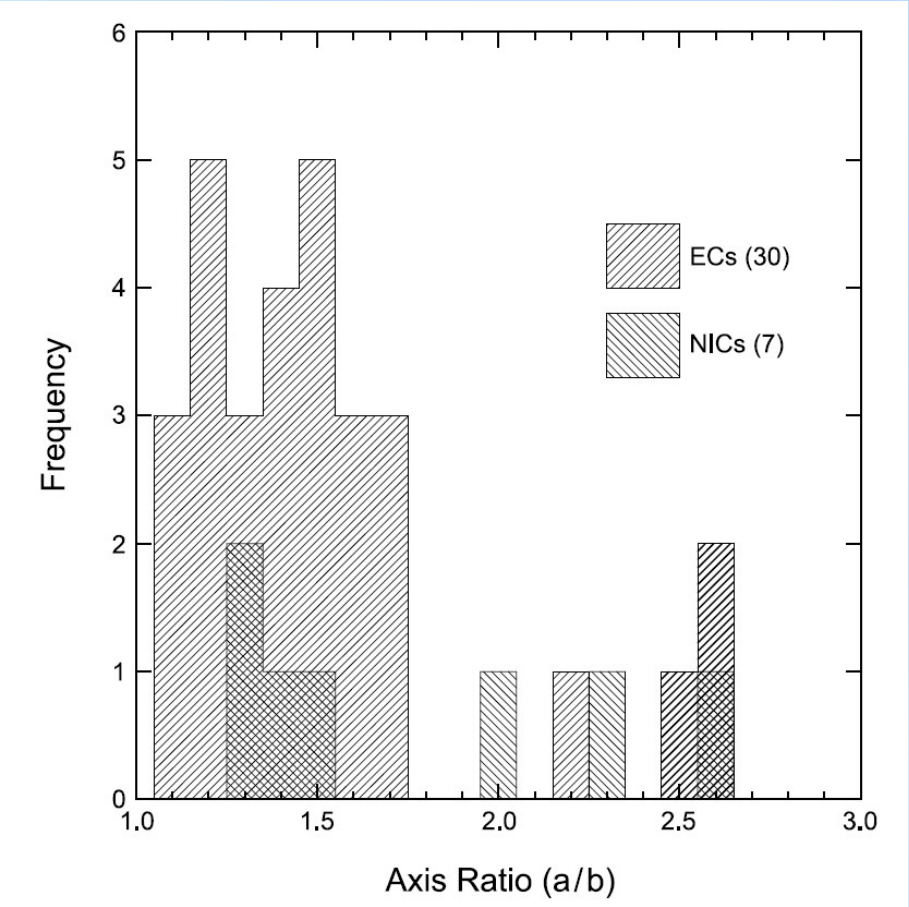


→ **Périodes de rotation**: entre 5 et 70 heures.

→ **Rapport d'axes (a/b)**: valeur médiane ~1,5 pour les comètes écliptiques.



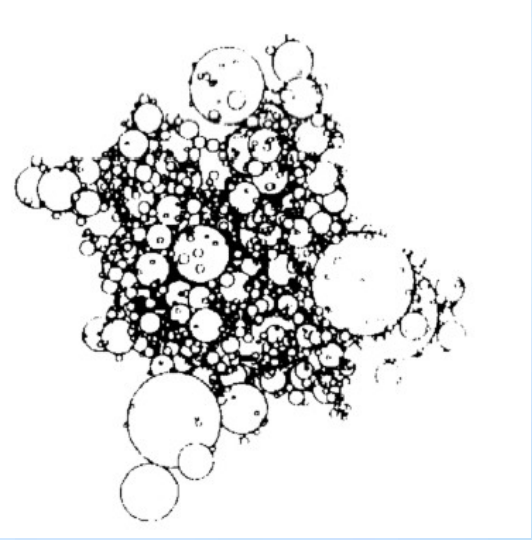
(from Lamy et al., 2006)



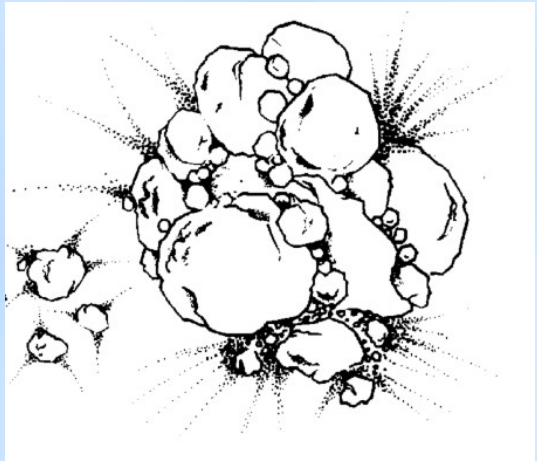
(from Lamy et al., 2006)

Deux modèles principaux :

- « **Fluffy aggregate** » Donn et al. 1985; Donn and Hugues, 1986)



- **Primordial rubble pile** (Weissman, 1986)



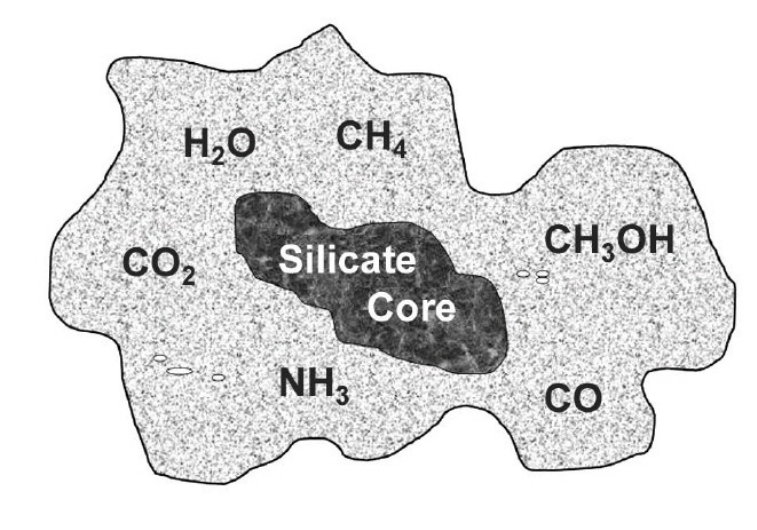
Ces deux modèles considèrent les noyaux cométaires comme des agrégats de planétésimaux glacés plus petits assemblés ensemble à faible vitesse de façon aléatoire.

Ces deux modèles prédisent une porosité élevée, et donc une faible densité (masse estimée à partir des forces non gravitationnelles) $\approx$ 0.6 g.cm^{-3} (grande incertitude).

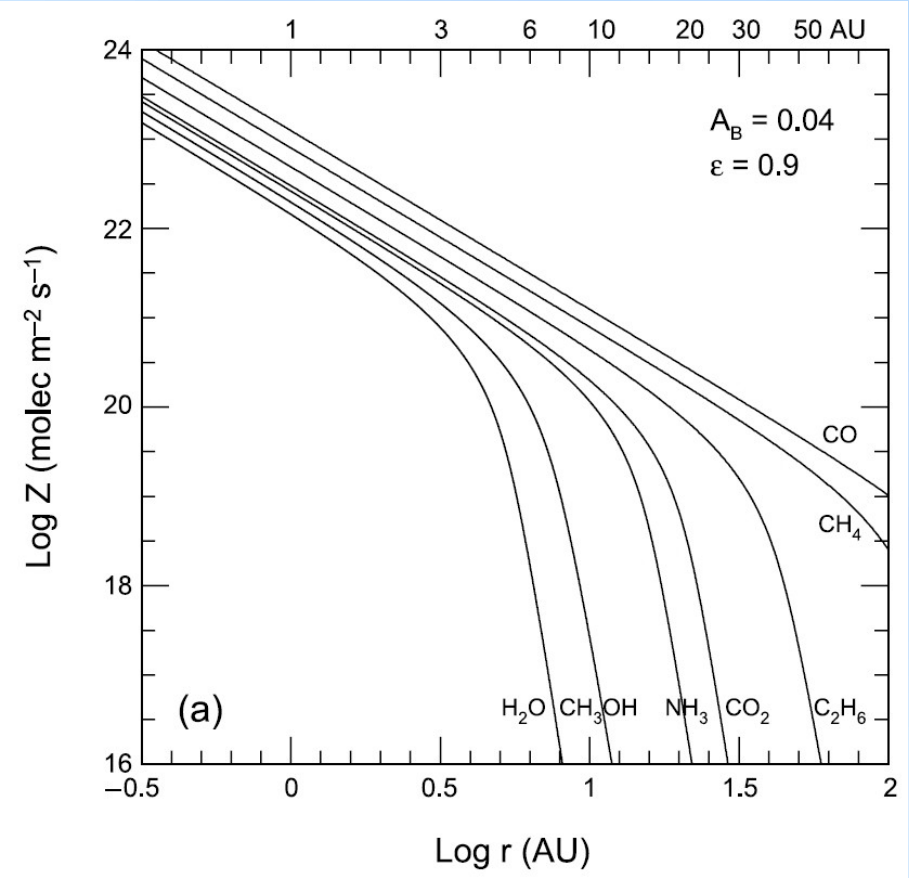
Composition des comètes :

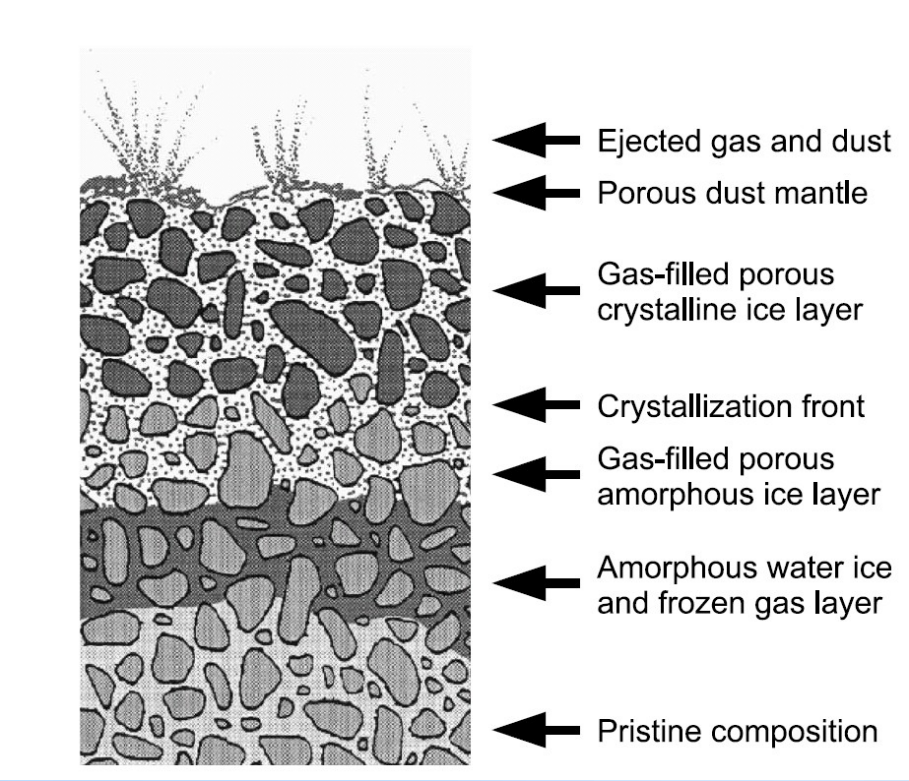
Silicates : ≈ 25%
Matériaux organiques réfractaires : ≈ 25%
Glace d'eau : ≈ 50%
+ **petites molécules carbonées** (quelques pourcents)

Les noyaux cométaires formés par les grains interstellaires ont évolués durant la formation des comètes dans le système solaire (molécules cométaires telles que CS_2 et C_2H_6 non détectées dans les nuages moléculaires).



Activité cométaire :





Structure schématique en couches d'un noyau cométaire (échelle arbitraire). (d'après Prialnik, 1999)

Comment mesurer l'activité cométaire :

A'Hearn (1984) a introduit le paramètre Afρ pour mesurer le taux de production de poussières cométaires.

A : albédo de Bond ($=4p_v$)

f : facteur de remplissage

ρ : rayon linéaire du champ de vue

Avantage : Af est moins sensible que le taux de production de poussières (exprimé en $kg.s^{-1}$) aux paramètres mal connus (albédo, rayon et densité des grains etc...).

$$Af\rho = (qR^2\Delta F_{com}) / \alpha$$

α : diamètre apparent du champ de vue (secondes d'arc)

q : constante numérique

F_{com}: flux reçu de la coma

Pour une comète « typique » (distribution d'intensité proportionnelle à r^{-1}) Afρ ne dépend pas du champ de vue. $Af\rho \approx 10^2$ à 10^5 cm

2. Recherche d'une activité cométaire à grande distance héliocentrique

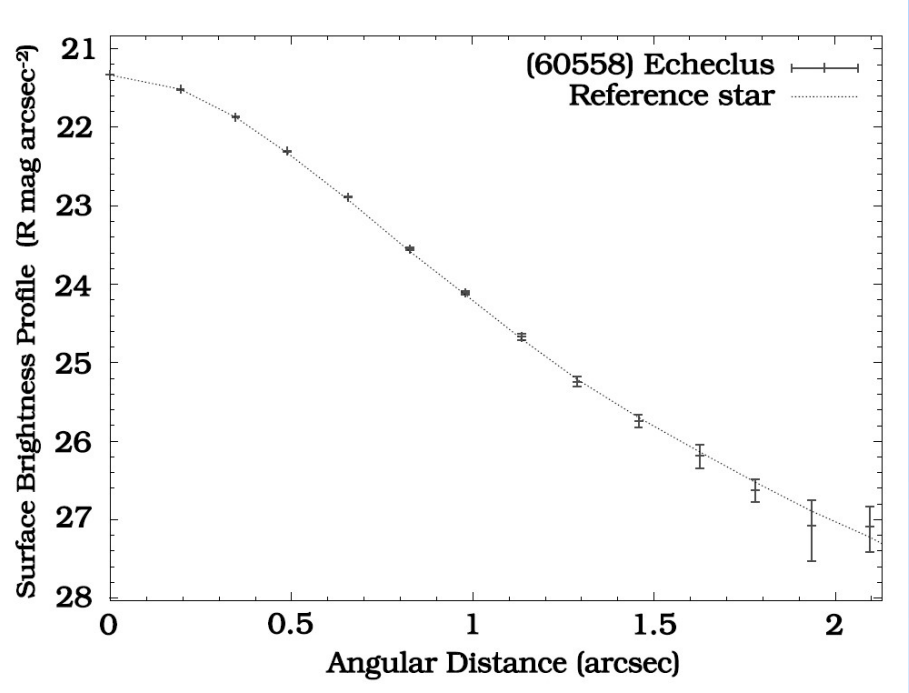
Rechercher une activité cométaire autour des petits objets du système solaire à grande distance héliocentrique est important pour :

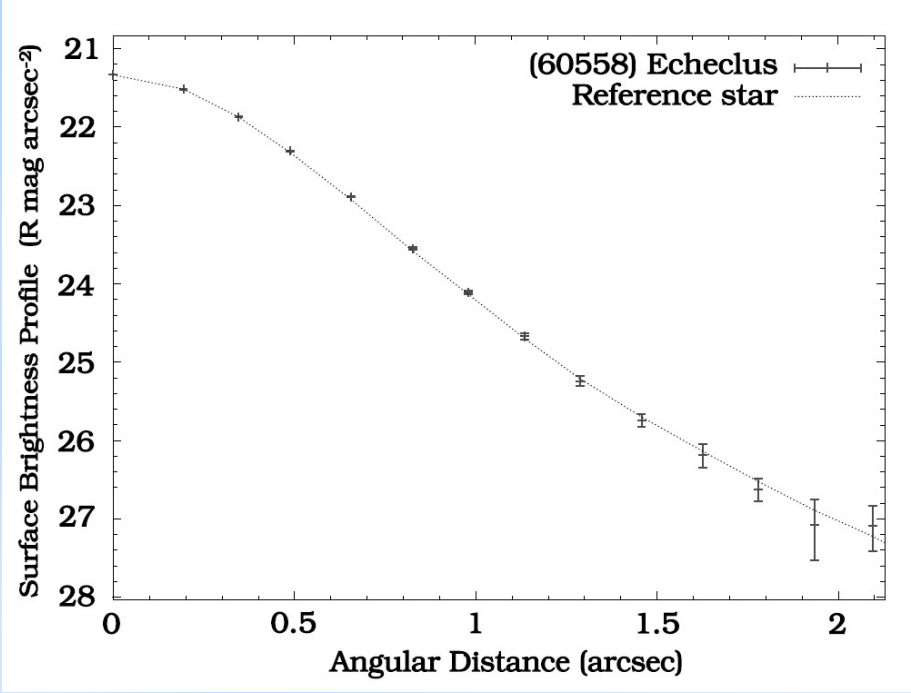
- Une meilleure compréhension des **relations physiques entre les comètes et les Centaures / Objets Trans-Neptuniens**

- Une meilleure compréhension des **noyaux cométaires**

La recherche d'une activité cométaire est basée sur la comparaison du profil radial avec celui d'une étoile. Notre analyse de quelques objets (Lorin & Rousselot, 2007) :

Object	UT date	Telescope	Instr.	R	Δ	α	Sky motion rate (arcsec h^{-1})	Predicted V mag.	Total integration time (min)
(29981) 1999 TD_{10}	2002 Sep. 4	VLT	FORS 1	13.173	12.508	3°.4	3.4	20.2	6
(60558) Echeclus	2001 Apr. 27	NTT	SuSI 2	15.159	14.464	2°.8	5.1	21.5	71.4
	2001 Apr. 28	NTT	SuSI 2	15.158	14.476	2°.9	5.0	21.5	101.9
2000 FZ_{53}	2001 Apr. 27	NTT	SuSI 2	16.782	15.787	0°.5	7.4	23.6	21.8
2000 GM_{137}	2003 June 28	VLT	FORS 2	7.021	6.199	5°.2	10.5	22.9	123
(28978) Ixion	2005 May 30	NTT	EMMI	42.477	41.463	0°.0	3.0	19.4	146
	2005 May 31	NTT	EMMI	42.476	41.462	0°.0	3.0	19.4	72





Plusieurs Centaures ont également présenté une activité cométaire loin du Soleil (≈5-13 AU) :

- **Chiron**
- **39P/Oterma** (découverte en 1943)
- **29P/Schwassmann-Wachmann 1** (découverte en 1927)
- **C/2000 B4 (165P/LINEAR)**
- **C/2001 M10 (NEAT)**
- **C/2001 T4 (166P/NEAT)**
- **C/2004 PY42 (167P/CINEOS)**
- **P/2004 A1 (LONEOS)**
- **P/2005 S2 (Skiff)**
- **P/2005 T3 (Read)**
- **2003 QD 112**

Total : **12 objets pour ≈ 92 Centaures connus (≈13%) (SDO+ Centaures: 248)**

Activité cométaire possible pour le TNO **(19308) 1996 TO_{66}** à 45 UA (Hainaut et al., 2000) et le SDO **(29981) 1999 TD_{10}** à 12,4 UA (Choi et al. 2003)

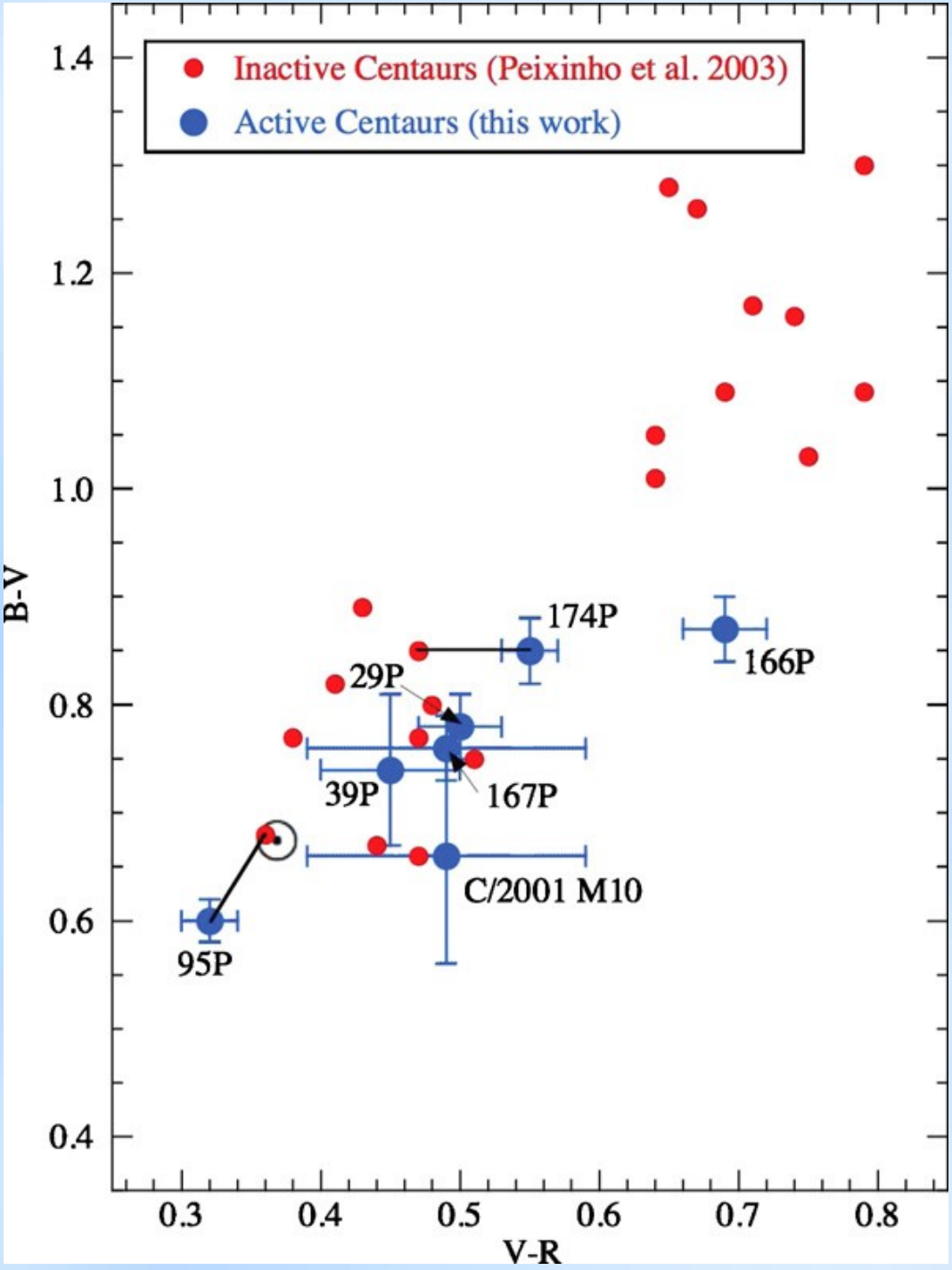
Cas de Chiron :

- Premier Centaure connu à présenter une activité cométaire.
- Découvert en 1977 et initialement répertorié comme un asteroïde.
- 1989 : Meech & Belton (1989) ont été les premiers à présenter une détection directe de la coma de Chiron.
- a=13,67 AU et q = 8,45 AU (objet de transition entre les TNOs et les comètes de la famille de Jupiter)
- Probable **détection de CO** par spectroscopie (Womack & Stern 1995) et de **CN** (Bus et al. 1991).
- Présence de **glace d'eau avec une bande d'absorption près de 2 µm** rapporté par Foster et al. (1999) et Luu, Jewitt & Trujillo (2000) mais non confirmé par Romon-Martin et al. (2003).
- Meech et al. (1997) ont calculé une **densité relativement faible** pour Chiron, environ $\rho_{Nuc} < 10^3$ kg.m^{-3}.
- **$Q_{dust} \approx 3–4$ kg.s^{-1}** (Meech & Belton, 1990)

Couleurs :

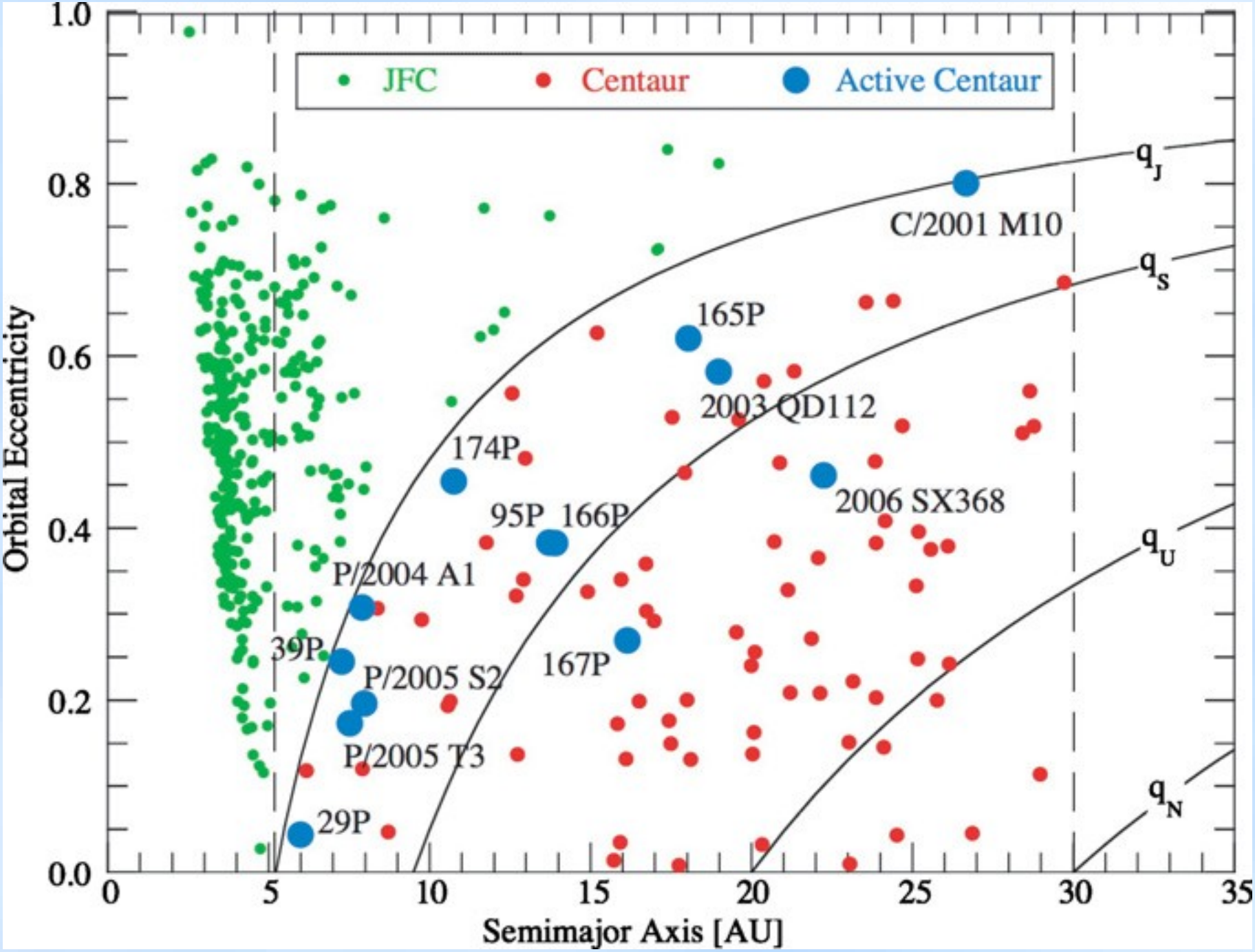
Pas de Centaures actifs ultrarouges ? (mais peu d'objets et contamination des mesures d'indice par la coma)

(Jewitt 2009)



Elements orbitaux : **Distances périhéliques plus petites**

médiane : 5,9 UA vs 12,4 UA pour tous les Centaures (Jewitt 2009)



Mécanisme de création de l'activité cométaire ?

- **Eau** : trop réfractaire, ne peut pas créer d'activité cométaire au-delà de 5 UA du Soleil

- **CO** : supervolatil qui peut créer une telle activité mais qui serait aussi efficace au-delà de 30 UA (TNOs)

- **Transition de phase de l'eau amorphe → crystalline** : semble être cohérent avec les observations (Jewitt, 2006; 2009)

Implication: **les TNOs doivent être constitutés de glace d'eau amorphe**.

Mais : des observations récentes révèlent que les KBOs observés avec une rapport S/B suffisant montrent de la glace d'eau crystalline (mais pas les Centaures...); Activité cométaire passée ?

3. Le cas de 174P/Echeclus

Plusieurs objets ont présenté une activité cométaire à grande distance héliocentrique mais le cas de 174P/Echeclus est unique par son importance.

Avant le sursaut :

- Centaure appelé (60558) 2000 EC_{98}.

- Eléments orbitaux :

a (AU)	e	q(AU)	Q (AU)	i
10.772	0.456	5.85	15.69	4.3°

- Pas d'activité cométaire détectée jusqu'à la magnitude 27/arcsec^2 (Rousselot et al. 2005; Lorin & Rousselot 2007).

- Période de rotation = 26.802±0.042 h (en supposant une courbe de lumière en double pic) et une amplitude de courbe de lumière de 0.24±0.06 (bande R) (Rousselot et al. 2005)

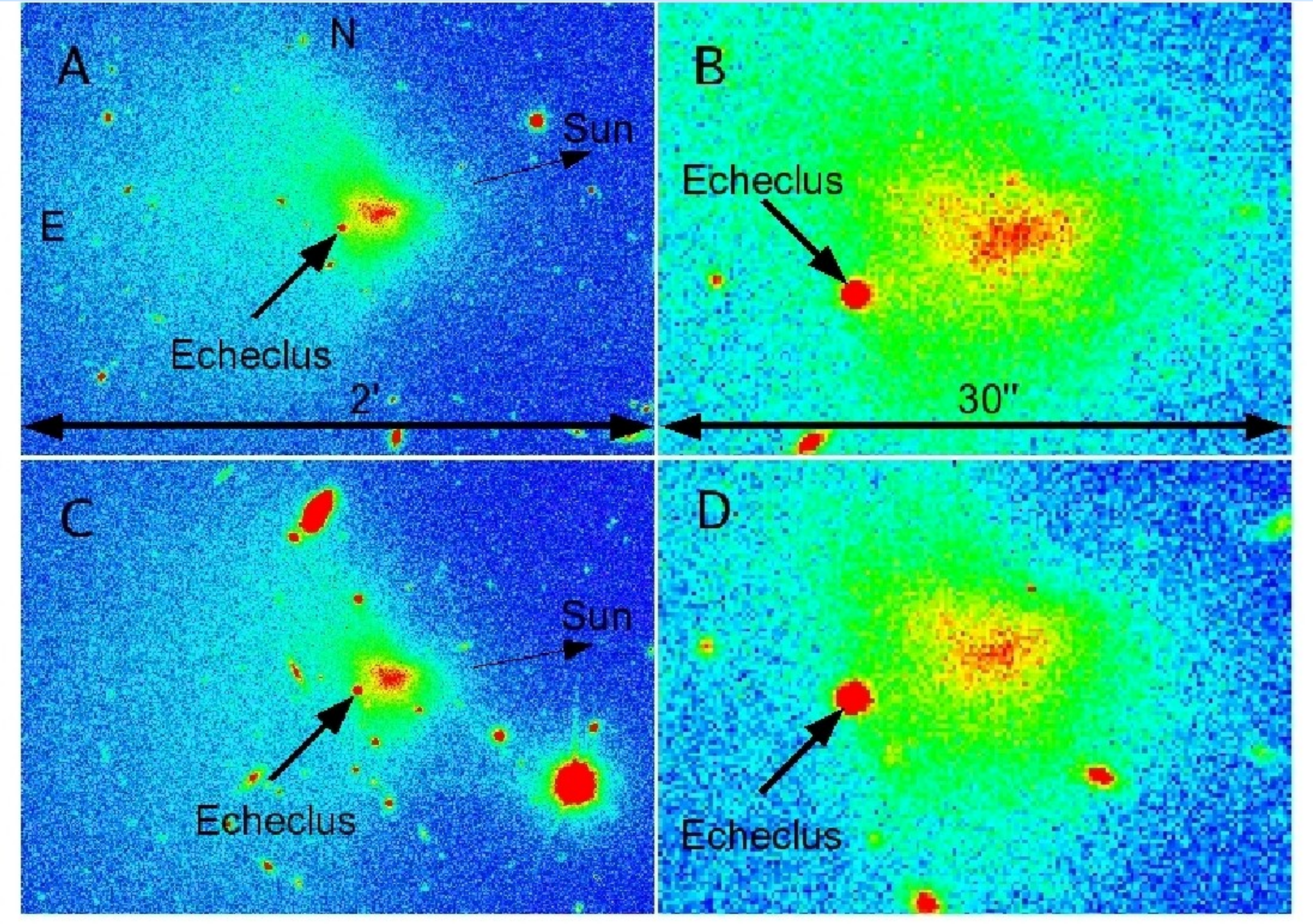
Sursaut détecté le 30 Décembre 2005 (Choi et al., 2006) durant des observations avec le télescope de 5 m du Mont Palomar :

R=13.07 AU
V=21 → 14

Renommé **174P/Echeclus**.

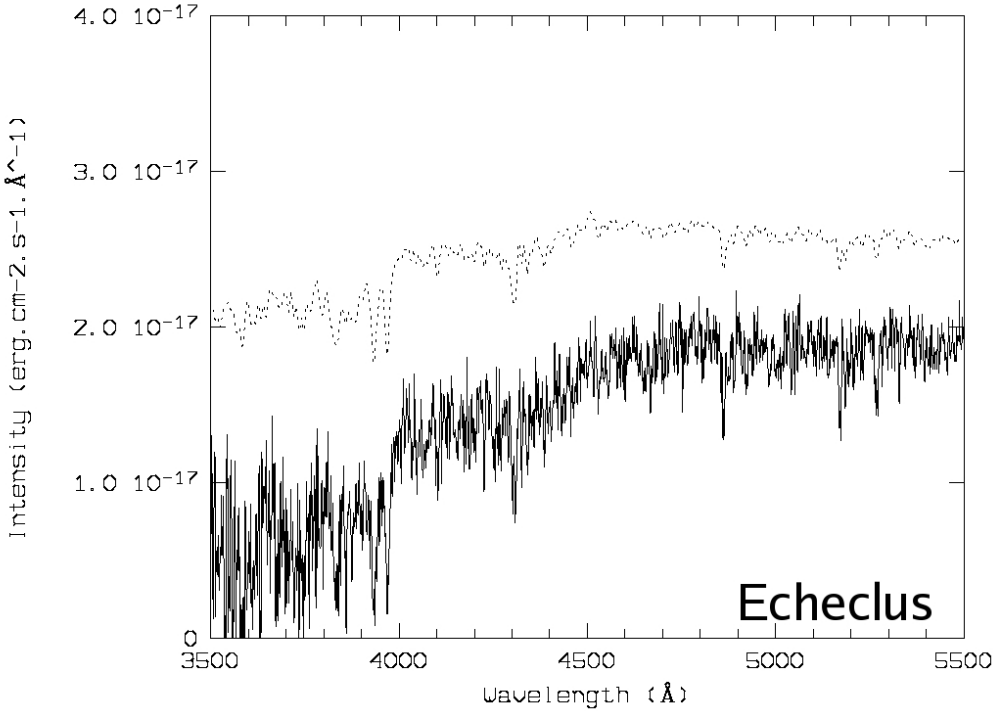
DDT avec FORS1 au VLT pour avoir plus d'informations sur ce sursaut : images visible et spectres les 23 et 30 mars 2006.

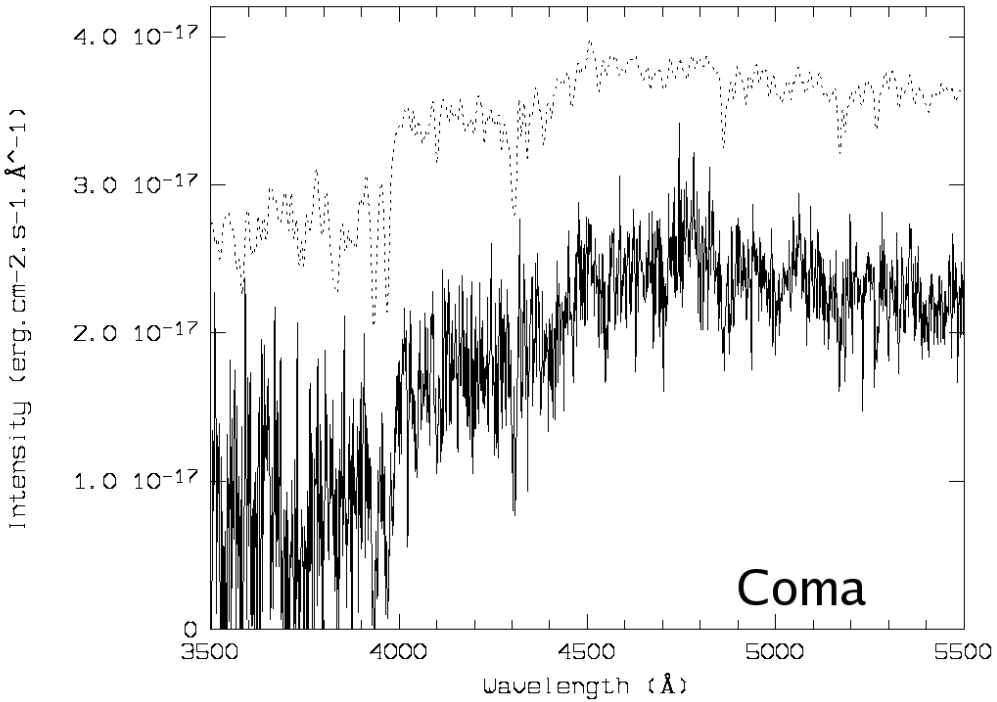
Images (bande R) obtenues avec FORS 1 :

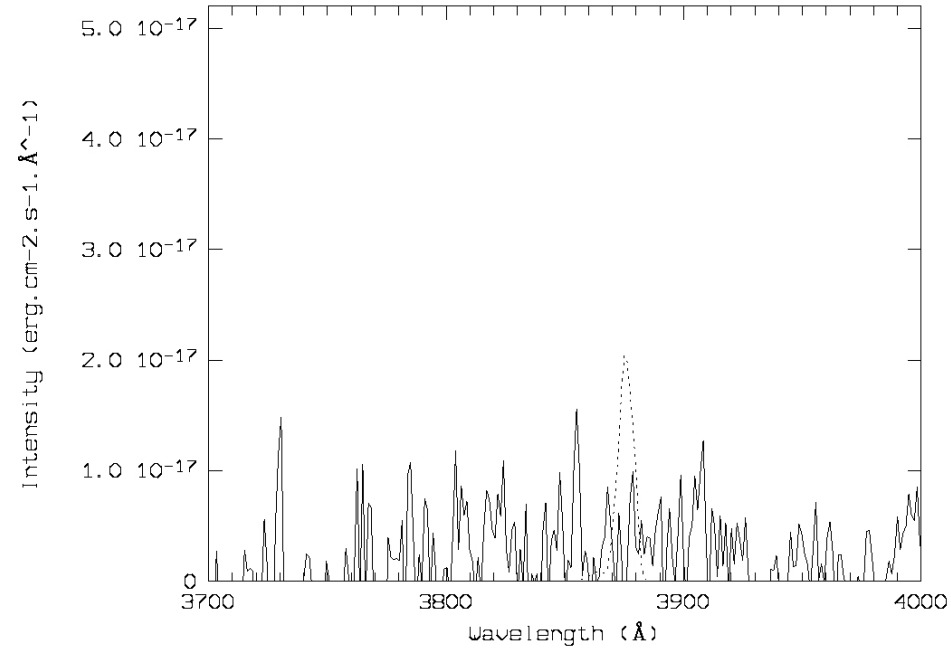


A/B: 23 mars 2006. C/D: 30 mars 2006

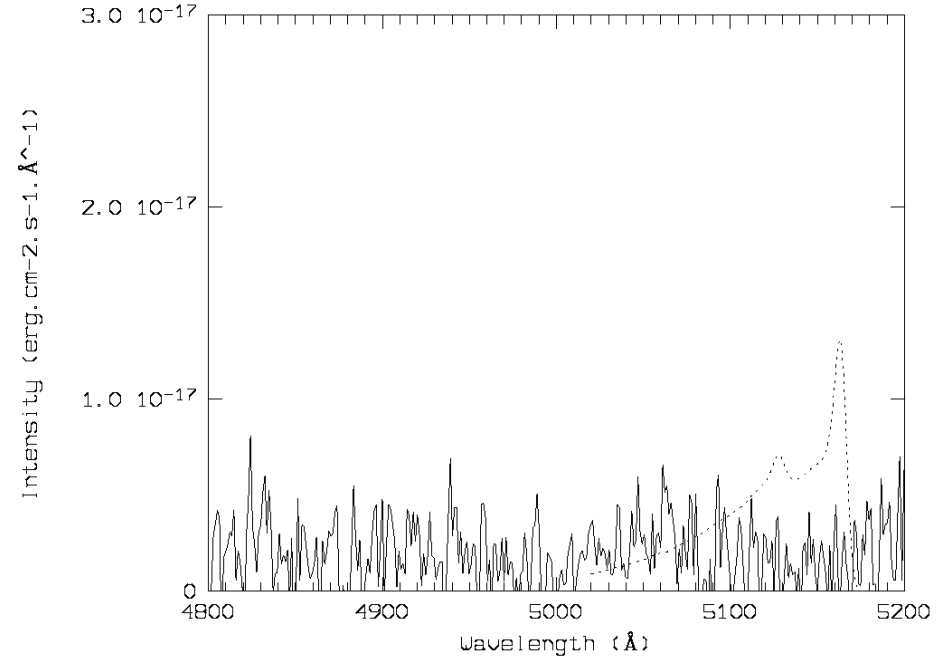
Spectres obtenus avec FORS 1:





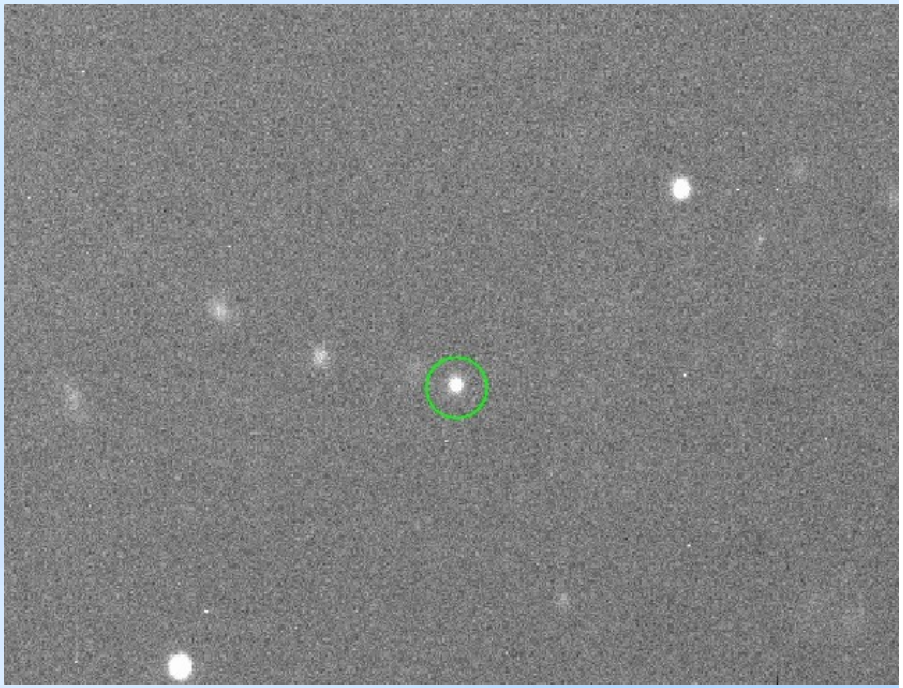


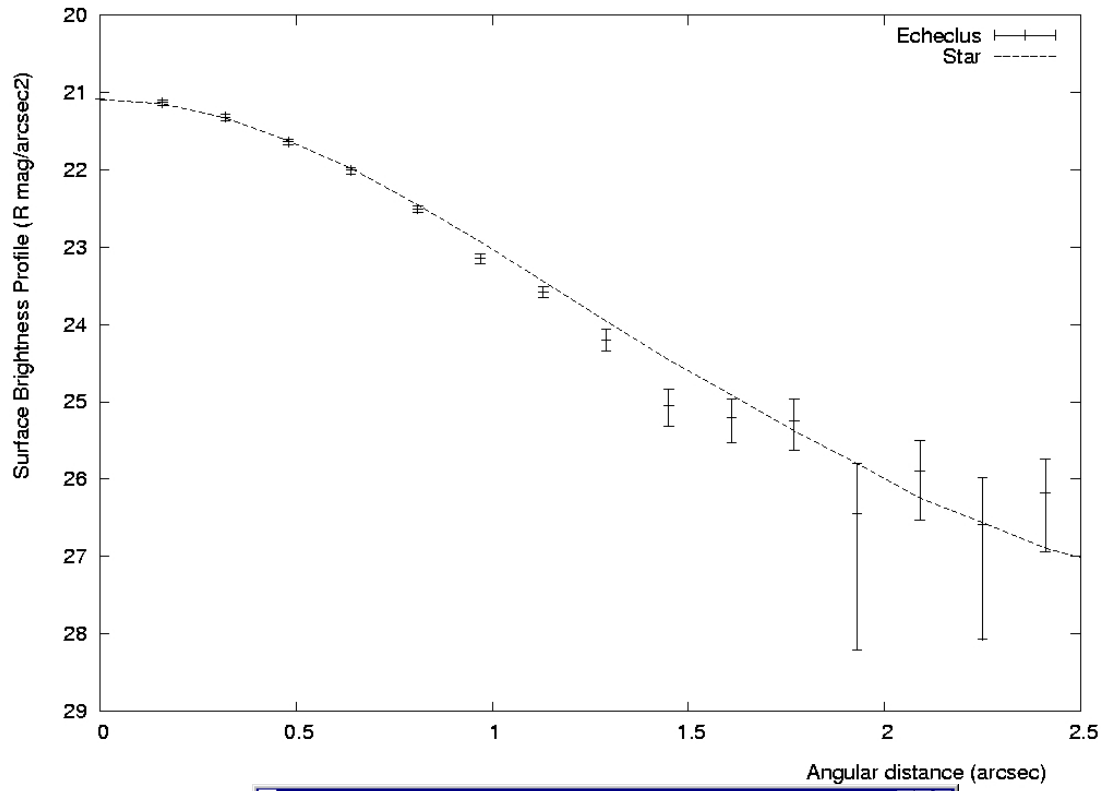
Recherche du CN



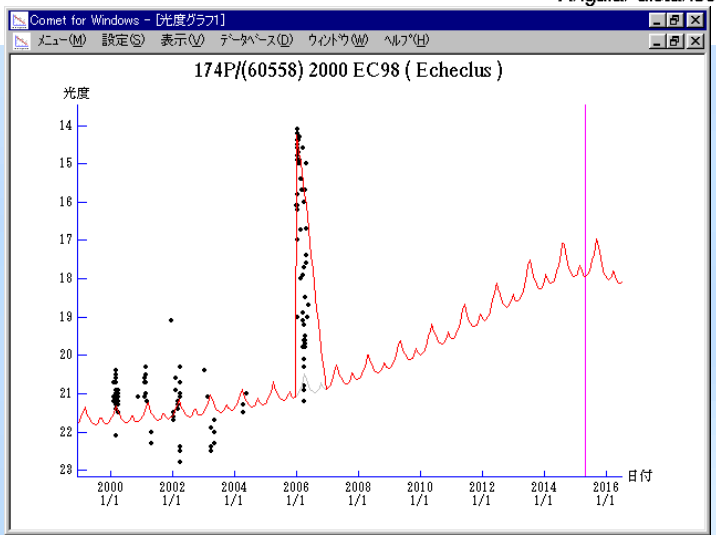
Recherche du C_2

Un an après... le sursaut est fini (avec une distance héliocentrique plus faible, 12,23 contre 12,92 AU)





Observations faites avec SUSI 2 au NTT (24 mars 2007)



Résultats des observations au VLT (Rousselot, 2008) :

- **Afρ≈10 000 cm** (Q_{dust}≈86 kg.s^{-1}, R=14,4±0,2) [Afρ<75cm le 27 mars 2007]

- **Pas de raies de CN ou C_2 détectées** : limite supérieure pour CN≈3.8.10^{25} molecules.s^{-1}, limite supérieure pour C_2≈10^{26} molecules.s^{-1}. Rapport gaz-sur-poussière significativement plus petit que pour les autres comètes.

- **Source de l'activité cométaire distincte d'Echeclus lui-même** (distance projetée ≈ 60,000-70,000 km) et distribution d'intensité compatible avec une source diffuse.

Deux questions principales :

- **Qu'est ce qui a déclenché un sursaut aussi important à une telle distance héliocentrique ?**
- **Quel phénomène peut créer une coma distincte d'Echeclus ?**

4. Les Comètes de la Ceinture Principale (MBC) et Cérès

Hsieh and Jewitt (2006) ont mis en évidence une nouvelle classe possible de comètes : les Comètes de la Ceinture Principale (Main Belt Comets, MBCs).

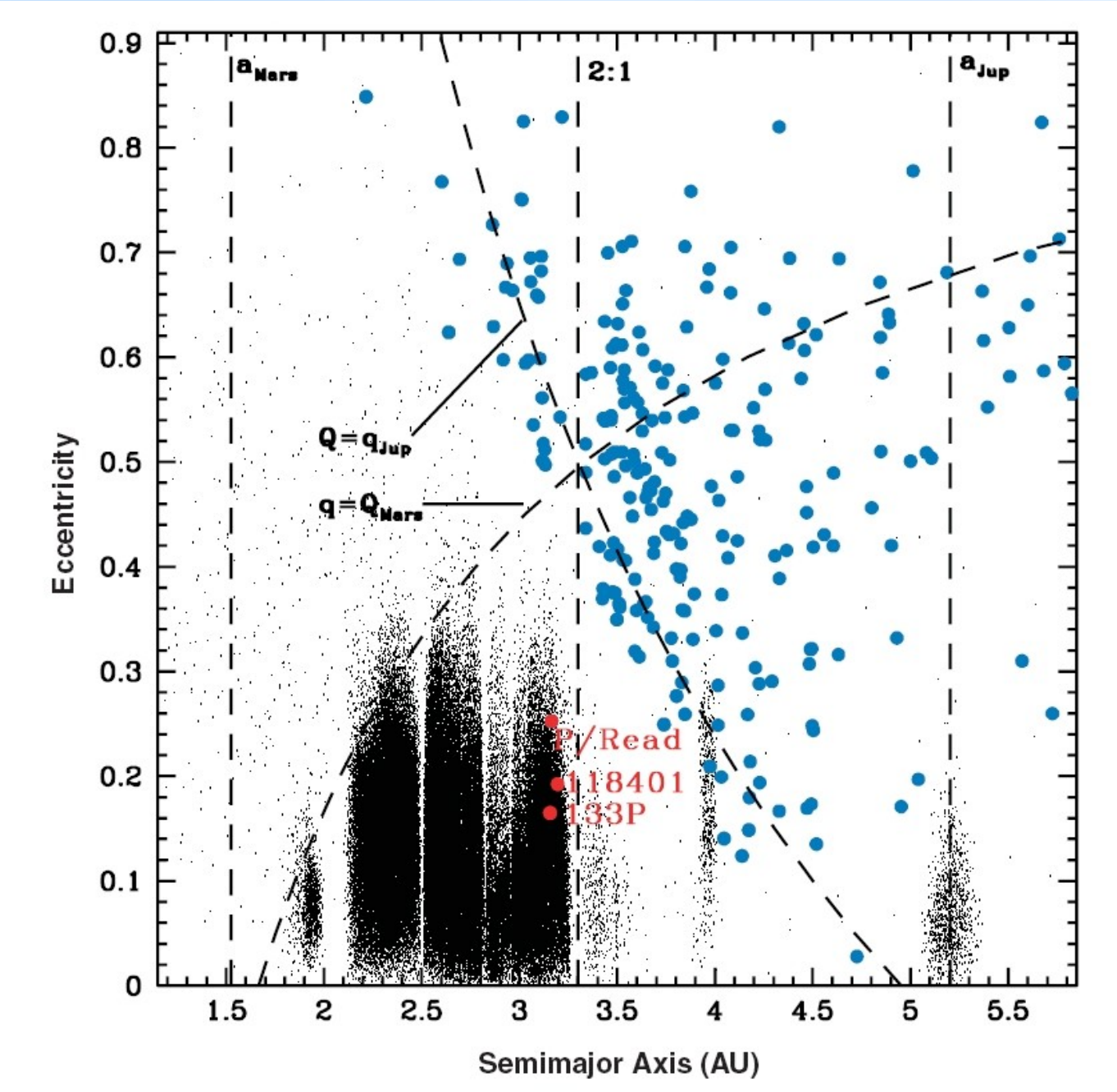
Ces comètes :

- résident dans la ceinture principale d'astéroïdes avec des **orbites astéroïdales stables** (T_j<3)

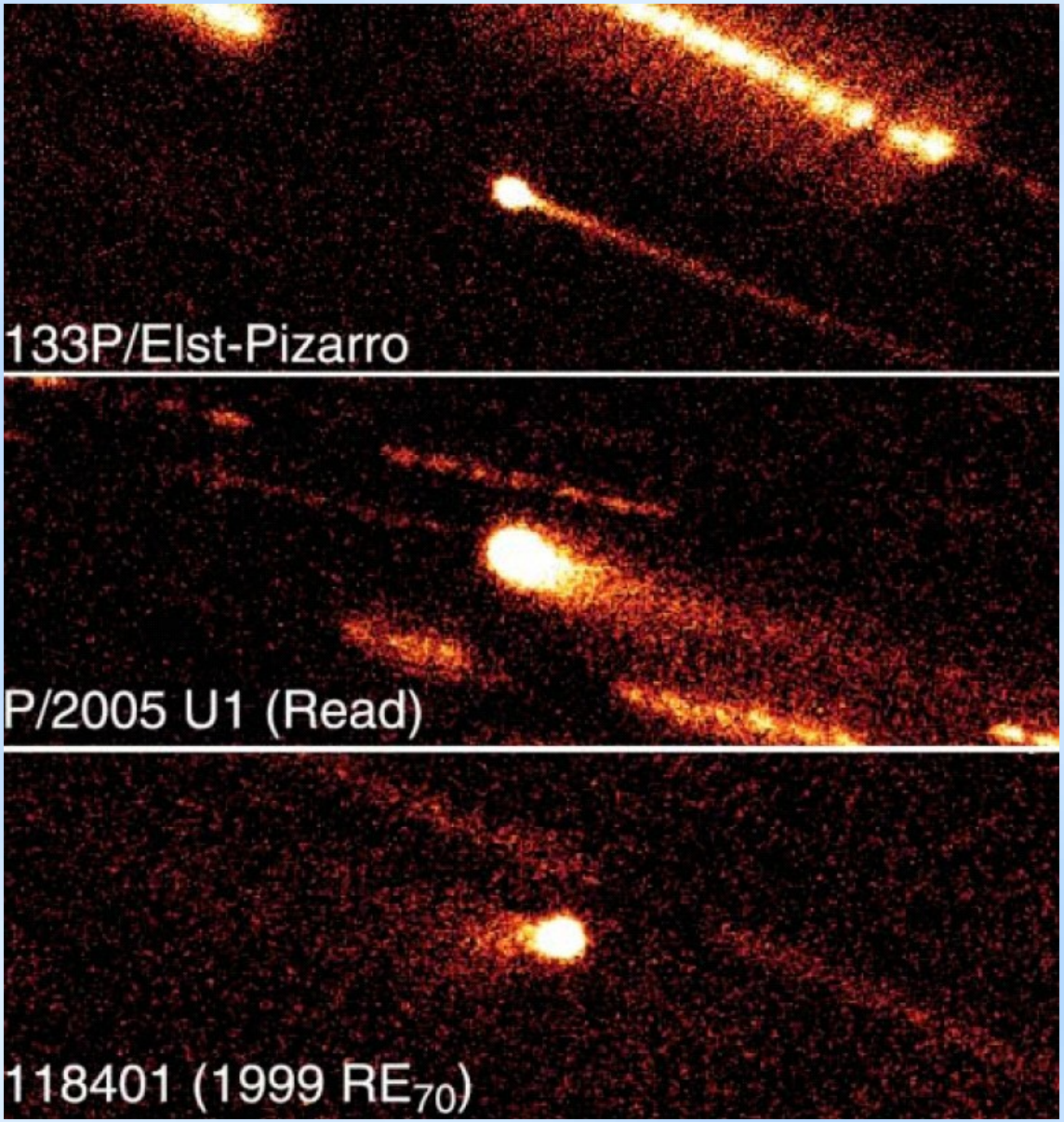
- présentent **une activité cométaire impliquant une durée de vie de seulement quelques 10^3 ans** << âge du système solaire

- leur existence jette une lumière nouvelle sur le problème de l'origine de l'eau sur Terre

Eléments orbitaux (a,e) des 3 MBCs connues :



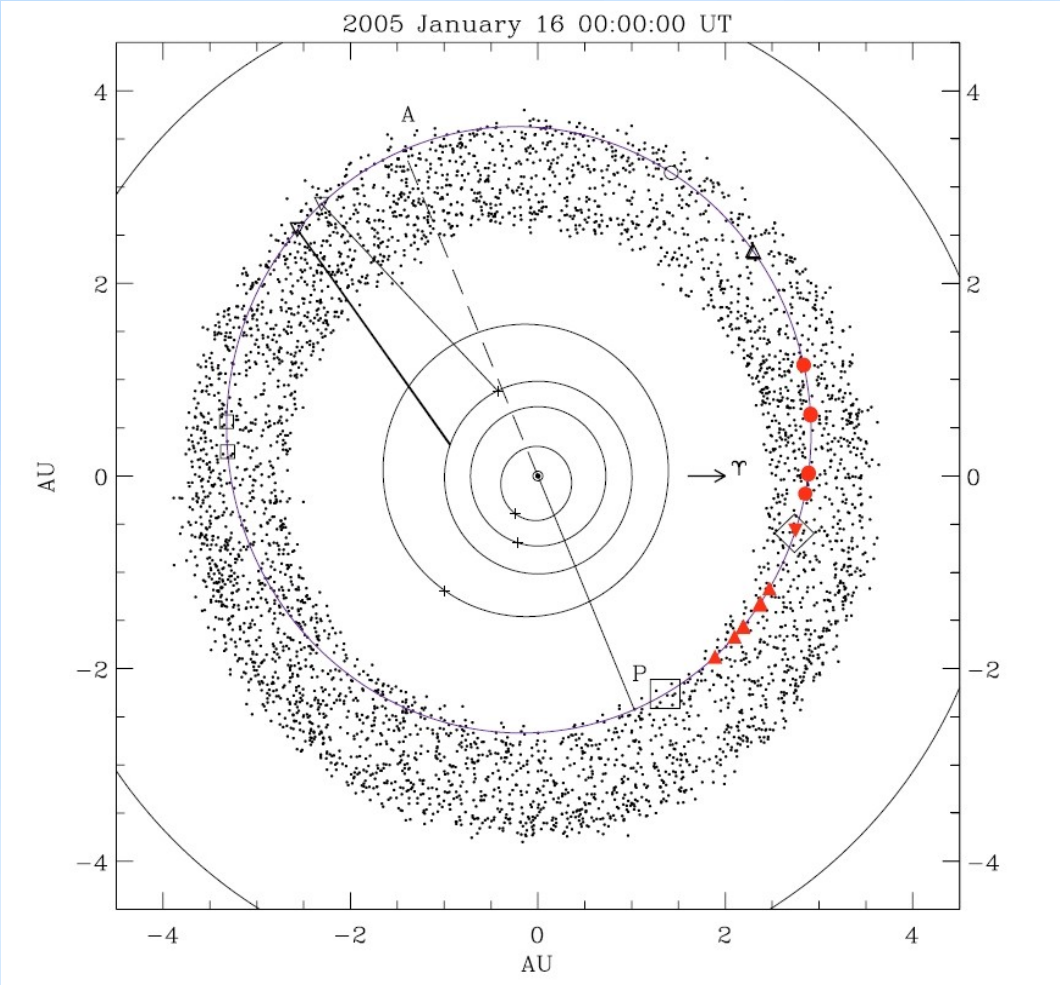
Jusqu'à présent seules 3 MBCs sont connues :



Cas de 133P/Elst-Pizarro (première MBC connue et la mieux étudiée):

- 1979 : découverte comme un astéroïde (1979 OW7)
- 1996 : découverte de son activité cométaire (Elst et al. 1996)
- activité cométaire détectée durant les passages périhéliques de 2002 et 2007
- éléments orbitaux : q=2.636 AU Q=3.677 AU P=5.60 yrs i=1.39°

Activité cométaire détectée en 1996 (triangles rouges) et 2002 (points rouges) (Toth, 2006):



Les MBCs sont probablement des corps glacés intrinsèques formés et stockés à leur emplacement actuelle.

Problème : **Qu'est-ce qui a récemment déclenché l'activité cométaire ?**

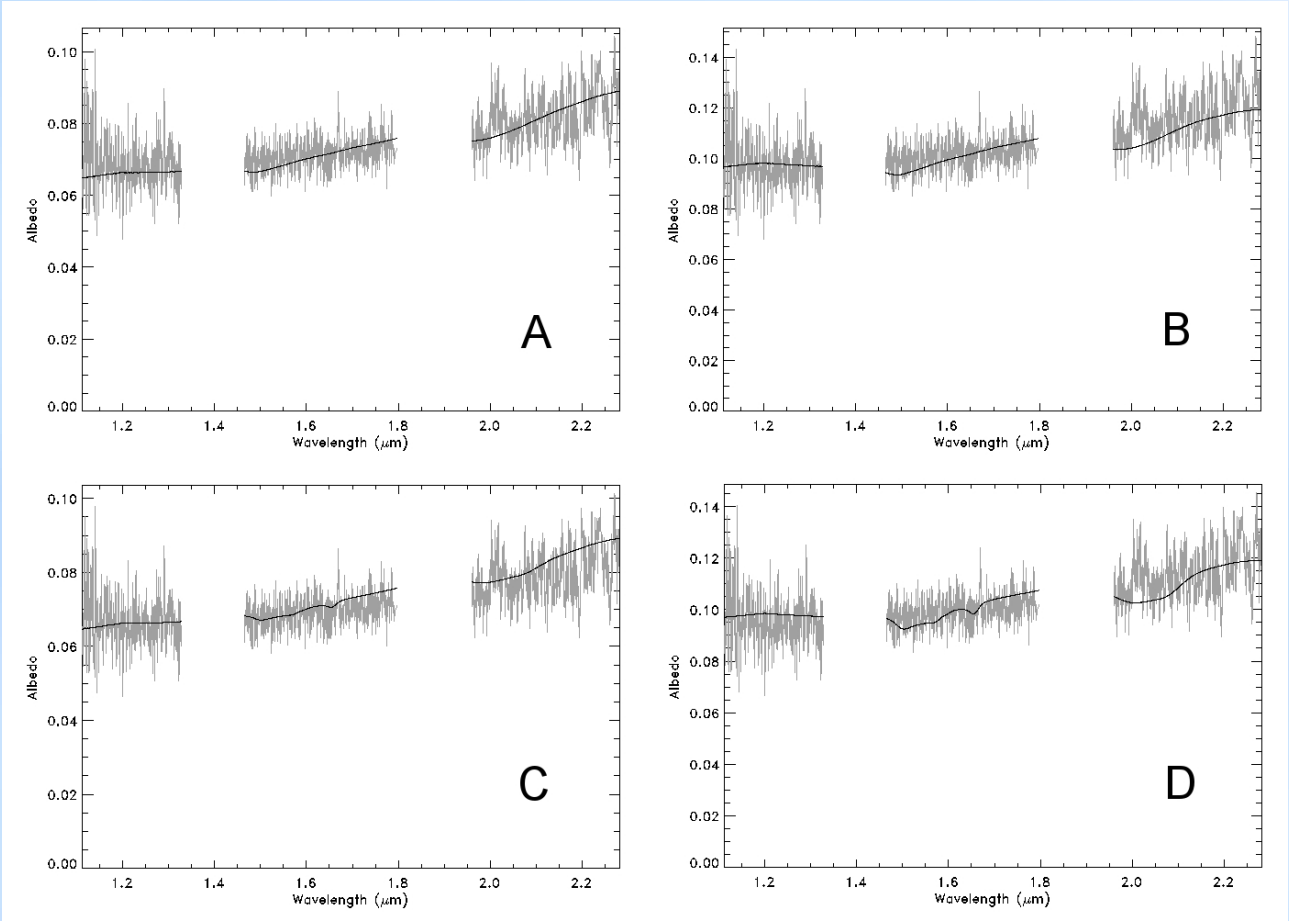
A ≈ 2.4-2.9 UA la glace d'eau sale d'une MBC se sublime et récesse à ≈ 1 mètre/an. Avec un diamètre égal à 2-5 km → durée de vie ≈ 10^3 ans

Activité cométaire observée à de trop nombreuse reprises et trop étroitement corrélée avec les passages au périhélie pour être le résultat d'un simple impact qui génère seulement une queue de poussières provisoire.

Activité générée par la glace d'eau ?

→ **Recherche d'une signature infrarouge de la glace d'eau** sur 133P/Elst-Pizarro avec **SINFONI** le 14 août, 2007...

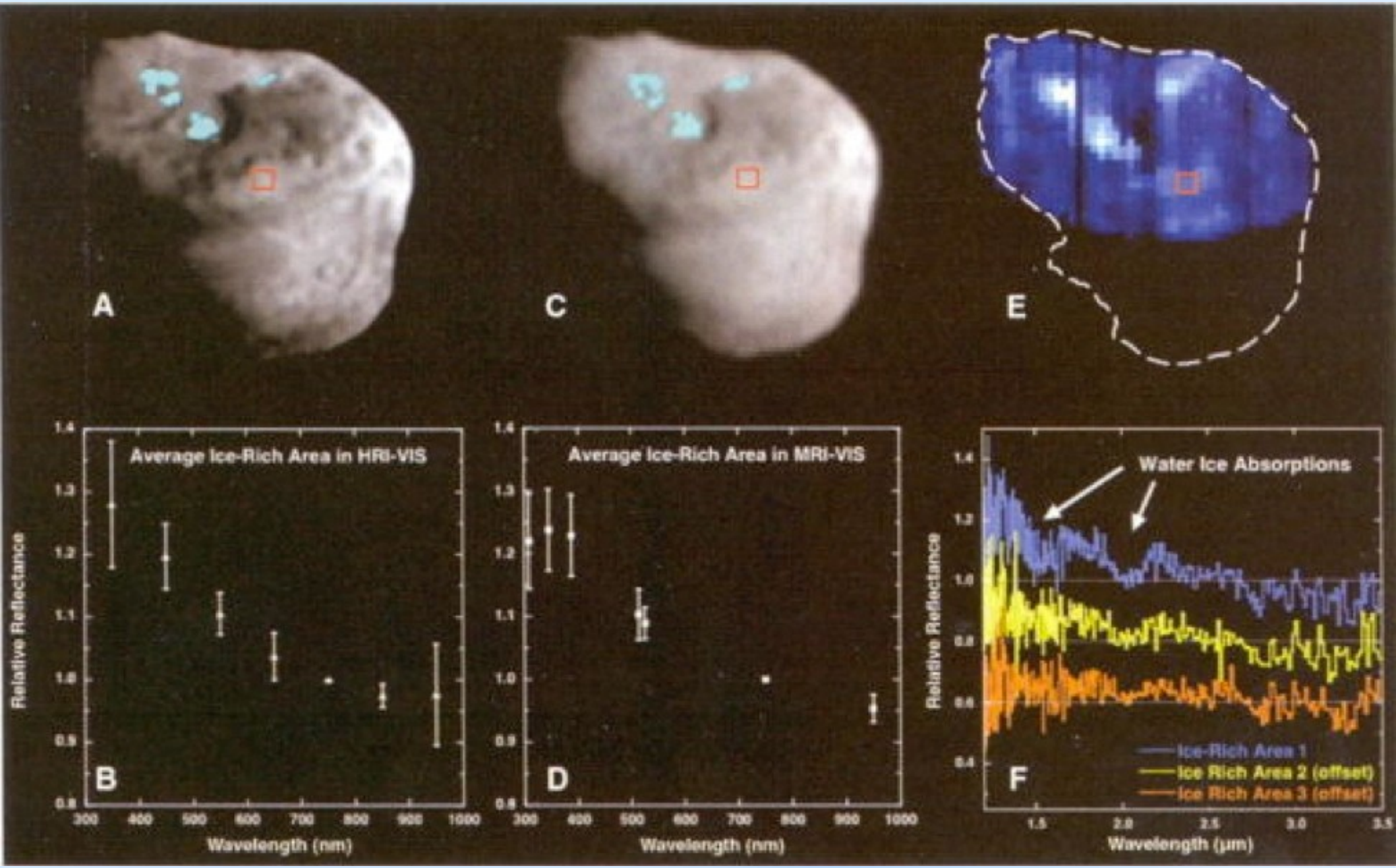
Spectres obtenus avec SINFONI :



Modélisation compatible avec un albédo de 7 à 10% et un mélange intime de glace d'eau, carbone noir et tholin. **Cependant pas de bande d'absorption évidente de glace d'eau à 1,5 et 2 μm**.
(Rousselot et al., DPS 2009)

A : albédo=0,07, glace amorphe
B : albédo=0,1, glace amorphe
C : albédo=0,07, glace cristalline
D : albédo=0,1, glace cristalline

Seule détection directe de la glace d'eau sur une comète : P/Tempel 1 avec Deep Impact en juillet 2005 (Sunshine et al., 2006)



Plusieurs études supportent l'idée que les **astéroïdes pourraient avoir de la glace d'eau** :

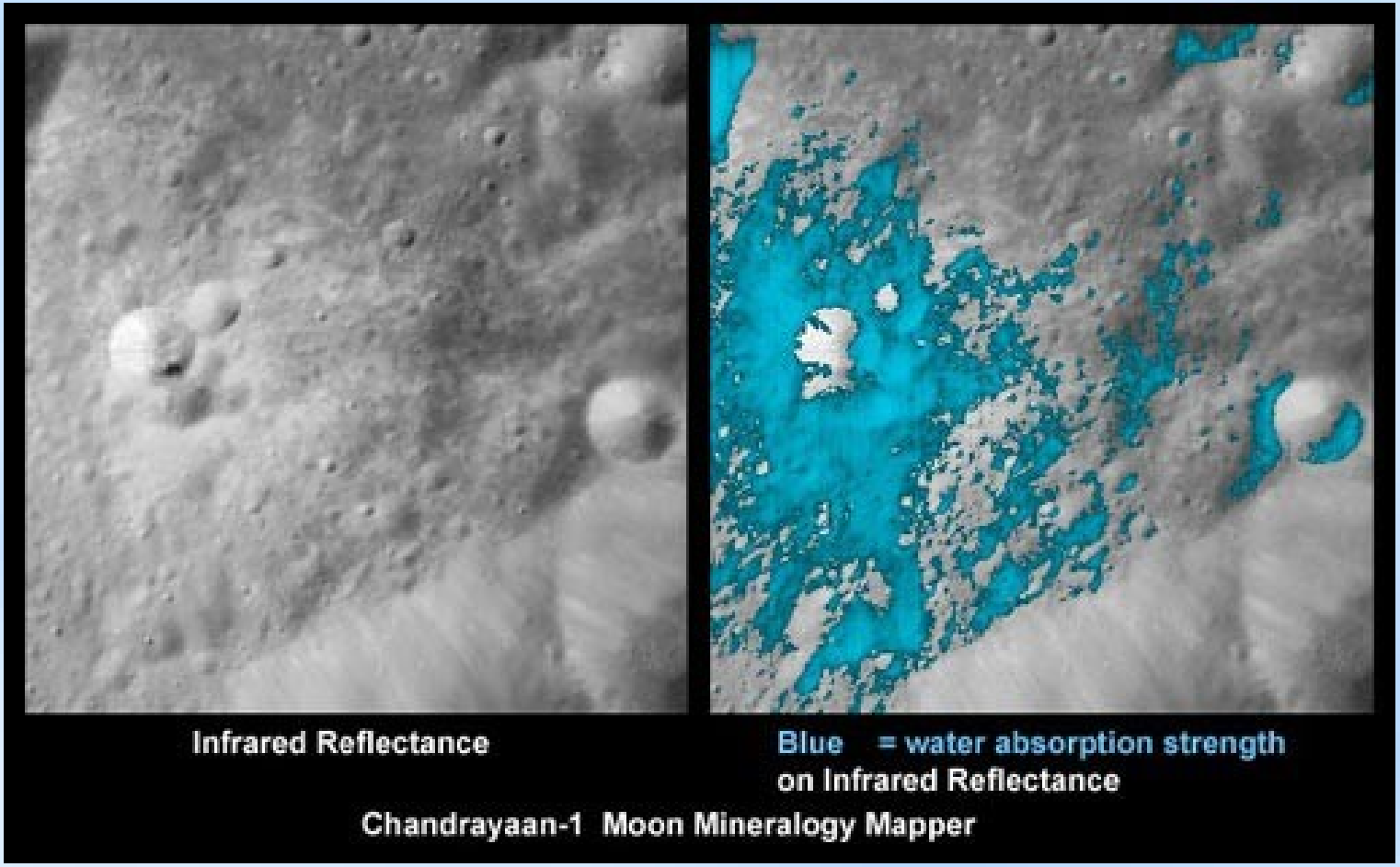
- Certains modèles prédisent la possibilité d'une **migration des planétésimaux glacés** situés au-delà de 5 UA jusqu'à la ceinture principale d'astéroïdes, conduisant à un mélange de roches et de glaces pour les astéroïdes actuels (Mousis et al., 2008)

- **La densité** de certains asteroïdes est en accord avec un **mélange de roches et de glaces** (Mousis et al. 2008)

- **Détection possible de OH** (produit de photodissociation de l'eau) près de **Cérès** (A'Hearn and Feldman, 1992) et glace d'eau cristalline à sa surface (Vernazza et al., 2005, Carry et al., 2008).

Nouveau : **découverte de l'eau sur la Lune**

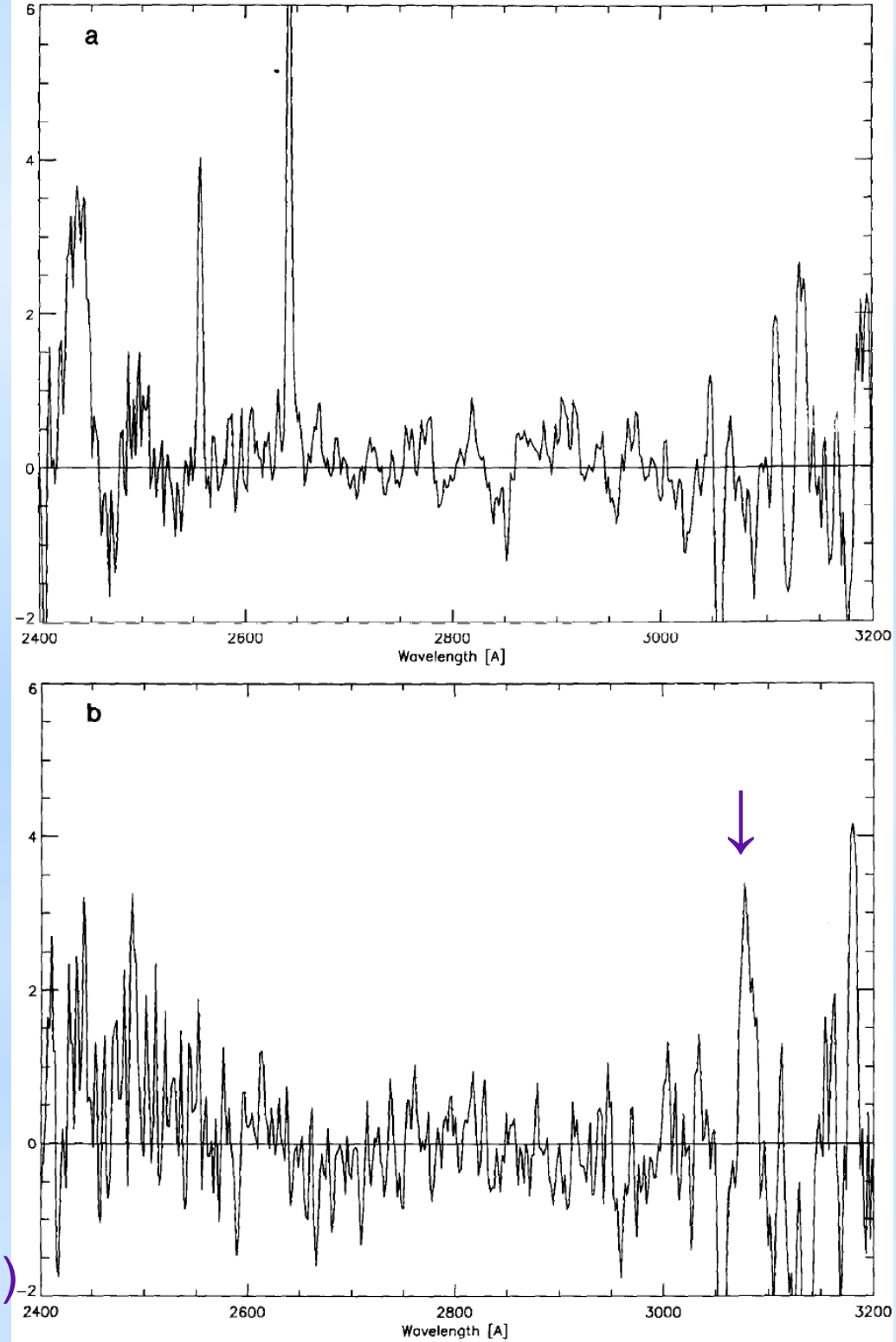
Plusieurs observations spatiales concordantes (sonde indienne Chandrayaan-1, confirmé par Cassini et Epoxy (ex-Deep Impact)). Annonce faite le 24/09/09.



Cas de Cérès : contrairement à Vesta (sec) Cérès montre des signes clairs d'altération par l'eau de sa surface (Jones et al., 1990). Plus de similitudes avec les satellites glacés externes de Jupiter qu'avec les astéroïdes secs qui peuplent la région interne de la ceinture principale : mélange de planétésimaux rocheux et de planétésimaux glacés qui ont migrés vers le Soleil depuis les régions externes ? (Mousis & Alibert, 2005).

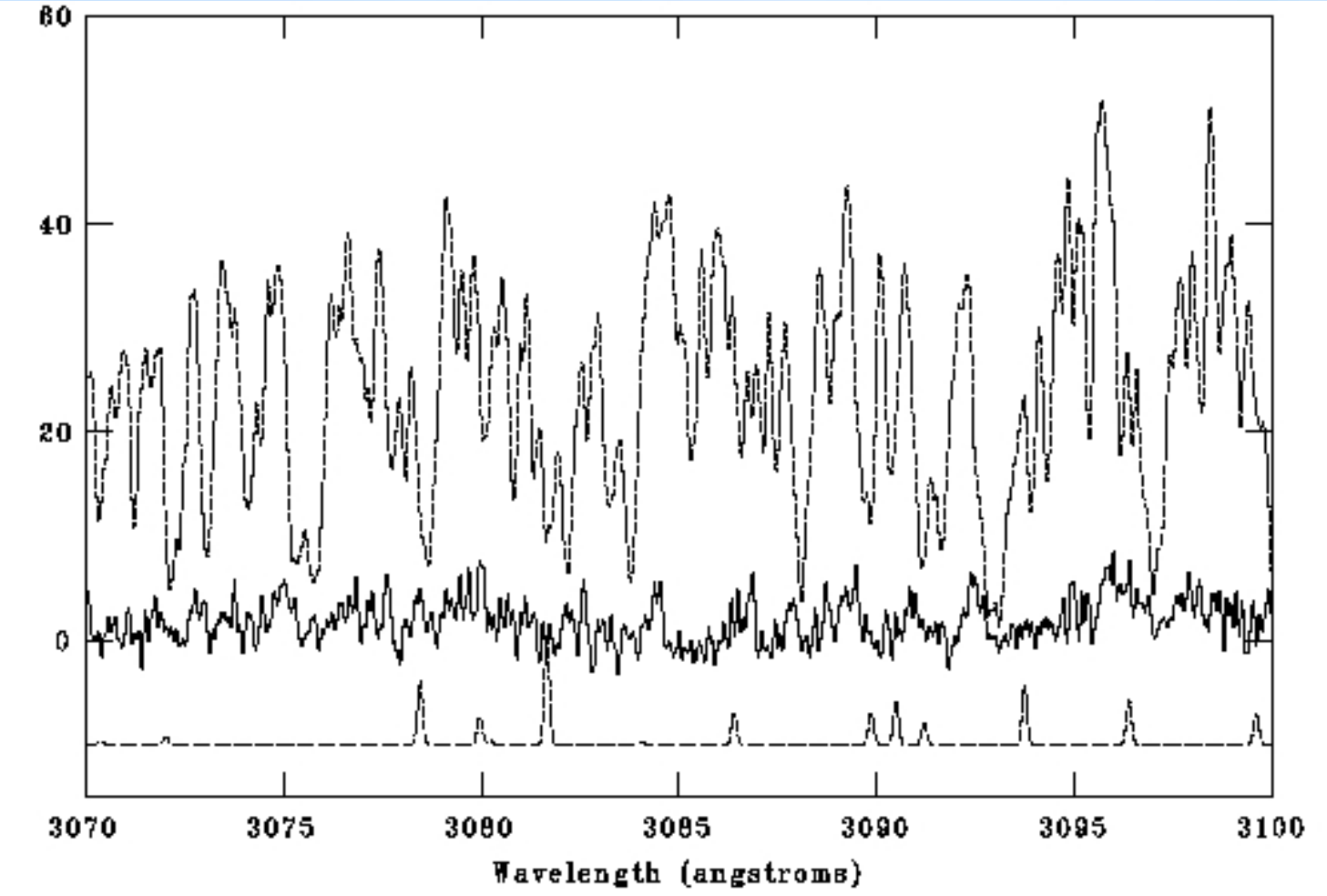
- **détection possible d'eau issue De Cérès** : A'Hearn & Feldman (1992) disent avoir détectés des raies d'émission de OH à 309 nm avec IUE (limbe nord avec 450 mn de temps d'exposition le 29 may 1991)

a: limbe sud (pas de détection de OH)
b: limbe nord (détection de OH à 309 nm)



Problème : **nos observations récentes avec VLT+UVES (Oct. Déc. 2007) n'ont pas permis de détecter de raies d'émission de OH...**

3x47,5-mn de temps d'exposition sur le limbe nord
1x47,5-mn de temps d'exposition sur le limbe sud



Conclusion

- L'activité cométaire est un phénomène relativement courant pour les petits corps du système solaire et pas seulement pour les comètes.

- L'activité cométaire à grande distance héliocentrique est maintenant observée pour plusieurs objets : créée par le CO ou par la transition de phase de la glace d'eau amorphe $\rightarrow$ crystalline.

- L'activité cométaire observée à grande distance héliocentrique est souvent observée sous forme de sursauts imprévisibles. Ces sursauts ne surviennent pas nécessairement au périhélie et peuvent être très intenses (174P/Echeclus).

- Certains astéroïdes peuvent présenter une activité cométaire récemment déclenchée par un mécanisme inconnu (Main Belt Comets)