

Observation des petits corps du système solaire *... avec de petits télescopes*



Steins



Leonides - 1833



P/Holmes

François COLAS
Institut de Mécanique Céleste – Observatoire de Paris

Observation des petits corps du système solaire ... avec de petits télescopes

Evolution du système solaire, quelques questions :

- Migration des planètes et origine des astéroïdes
- Origine des comètes
- Evolution collisionnelle et dynamique des astéroïdes
 - origine des astéroïdes géocroiseurs
 - origine des astéroïdes doubles

Observation des astéroïdes pour essayer de répondre aux questions

- Familles d'astéroïdes (orbites, taxonomie)
- Recherche d'astéroïdes
- Rugosité des surfaces
- Formes et paramètres de rotation
 - courbes de lumières
 - occultations stellaires

FORMATION DU SYSTEME SOLAIRE

1. Phase de l'accrétion planétaire

- Formation des planètes géantes
- Formation des planètes telluriques
- Première excitation/dépeuplement dynamique de la ceinture des astéroïdes

2. Une phase d'évolution lente de 600 Ma

- Une ceinture d'astroïdes ~20 fois plus massive que celle actuelle
- Un disque trans-Neptunien massif (50 Mt)

3. Grand bombardement tardif

- Déplacement des orbites planétaires
- Mise en forme finale des ceintures des astéroïdes et de Kuiper
- Capture des Troyens et des satellites irréguliers

4. La phase actuelle

QUESTIONS - REPONSES

- Configuration actuelle des planètes
- Bombardement tardif (3.9 Ga)
- Structure des objets trans Neptuniens
- Origine des astéroïdes Troyens (densité de Patroclus)
- La ceinture d'astéroïde pourrait contenir des objets interne du système solaire (<1UA)
(corps parents des météorites de fer?)
- abondance des météorites de fer
 - un seul astéroïde différencié : Vesta
 - peu de collisions pour les gros astéroïdes (>30km)
 - Différentiation des petits astéroïdes (AL²⁶)
- mélange de type taxonomiques

Un paramètre de base : la DENSITE !

- Structure interne (Tas de gravas, monobloc...)
- Masse totale de la ceinture d'astéroïdes
- Masse de la ceinture de Kuiper

- Mesure des masses :
 - Missions spatiales
 - Perturbations mutuelles
 - Astéroïdes doubles

- Mesure des volumes
 - Missions spatiales
 - ???

ORIGINE ET MASSE DES COMETES

COMETE des LEONIDES 55 P/ TEMPEL-TUTTLE

Variations quotidiennes de la queue de poussières



10-2-98



11-2-98



12-2-98



13-2-98



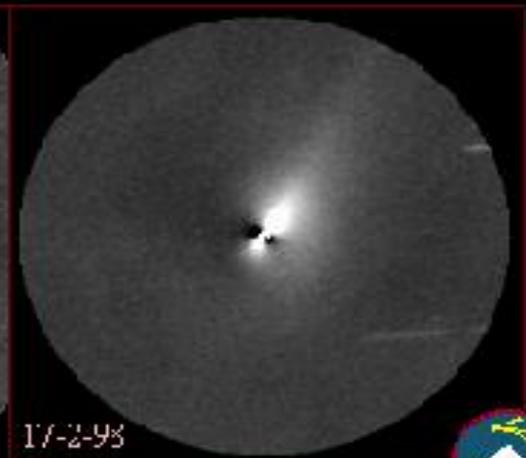
14-2-98



15-2-98



16-2-98



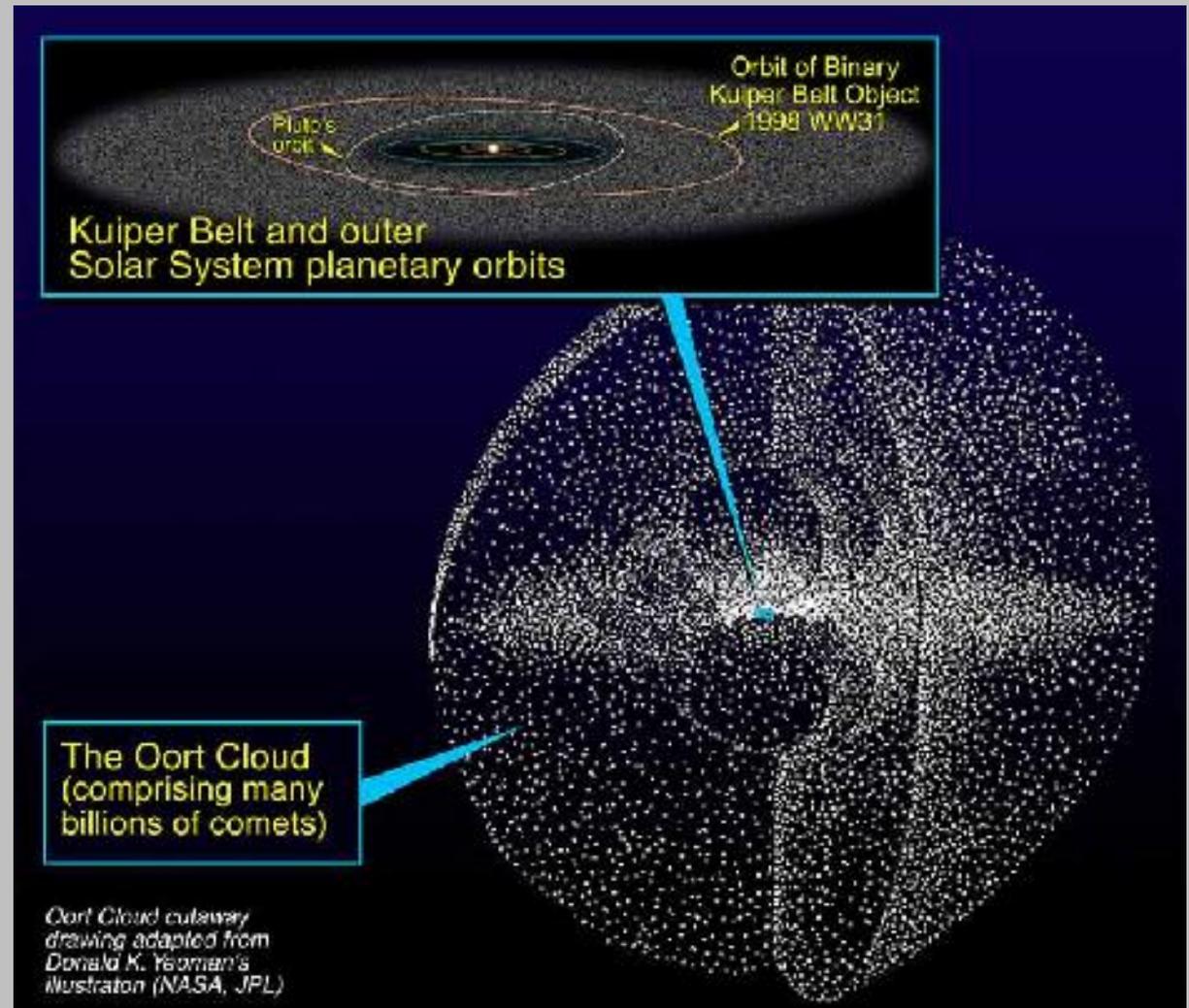
17-2-98

1'



D'ou viennent les comètes ?

- Ceinture de Kuiper
- Nuage de Oort



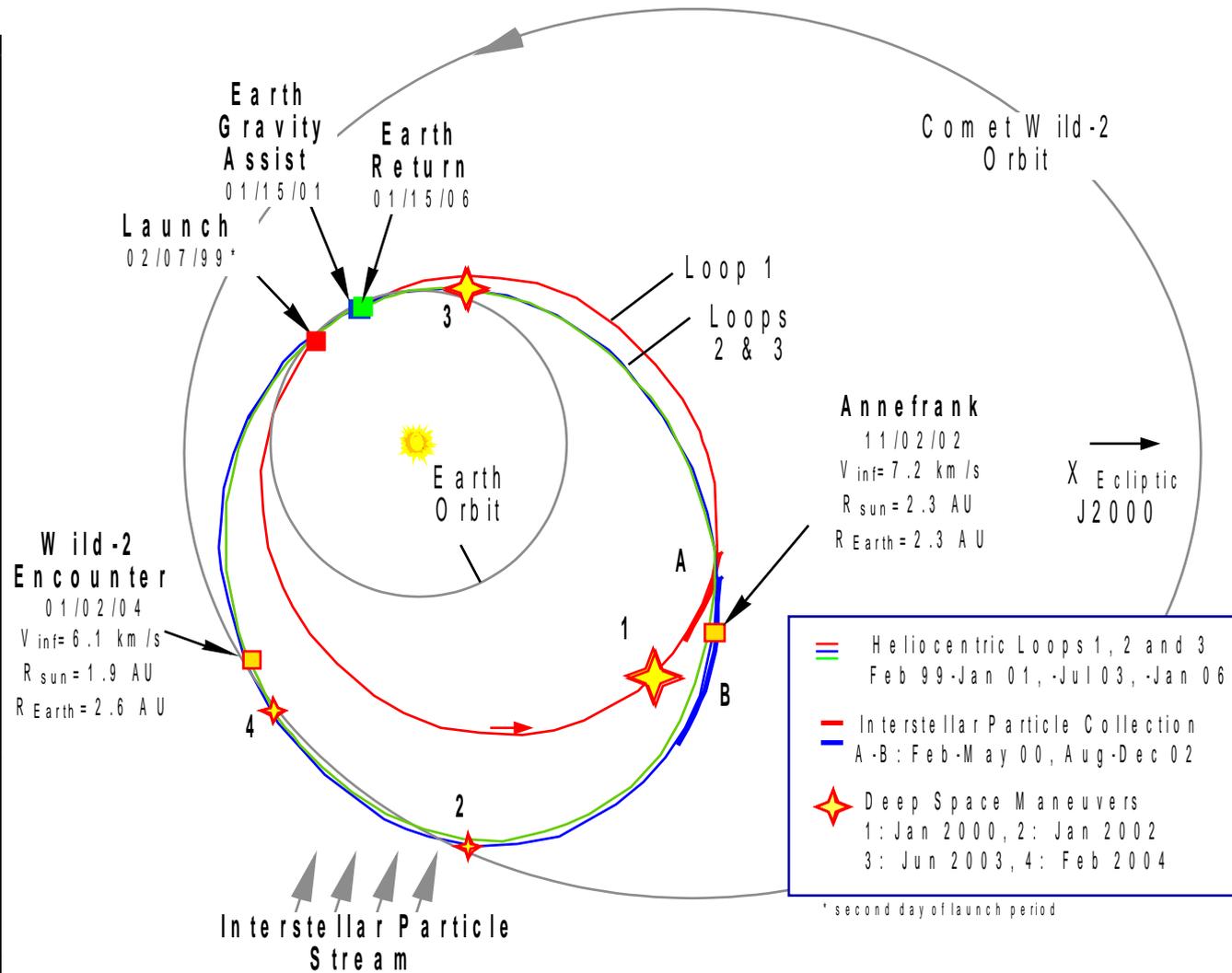
Ceinture de Kuiper

- Imaginée par Gerard Kuiper en 1951
- La ceinture s'étend de 40 à 500 UA du soleil
- Ceinture dans le plan de l'écliptique
- 100 000 objets ?
- Certains sont assez gros ($>1000\text{km}$)

Nuage de Oort

- Hypothèse de Jan Oort en 1950
- Forme sphérique autour du soleil
- Jusqu'à 100 000 UA du soleil
- 10^{10} objets ?
- Date de la formation du système solaire

Star Dust



*On a trouvé des olivines et des matériaux réfractaires
(formation en milieu chaud et dense...
centre du système solaire / autre étoile ?)*



Forsterite, Mg_2SiO_4



Fayalite, Fe_2SiO_4



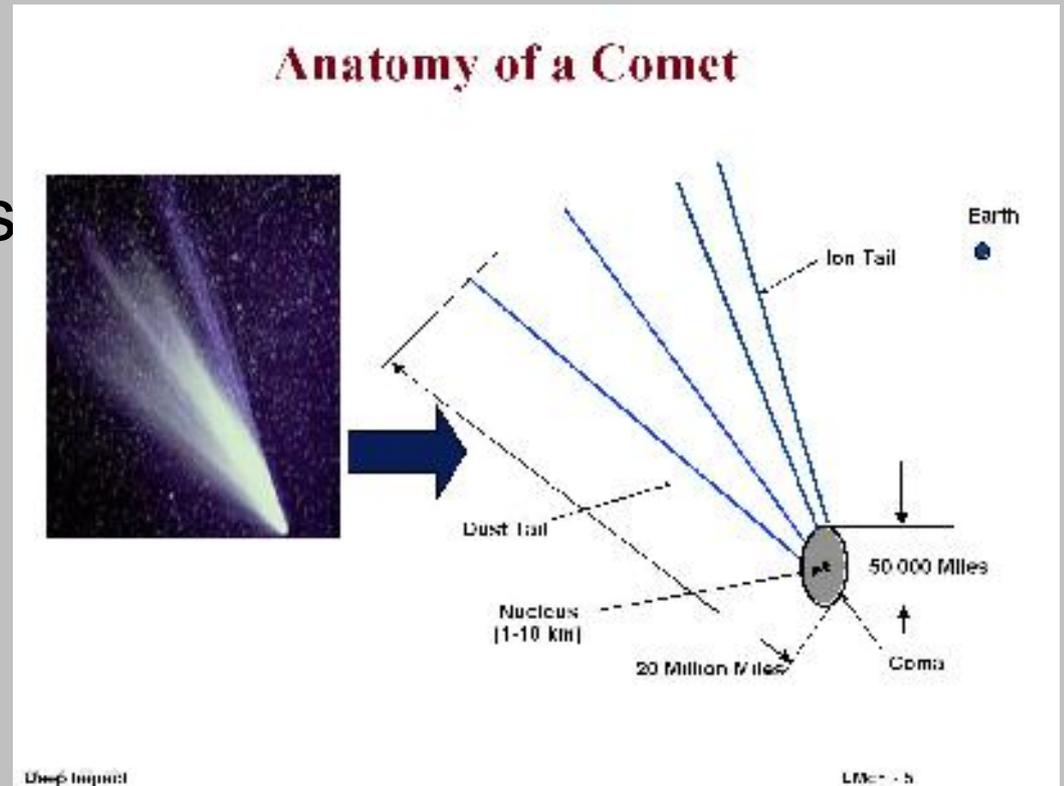
WILD 2 14 octobre 2009



T1M – Pic du Midi

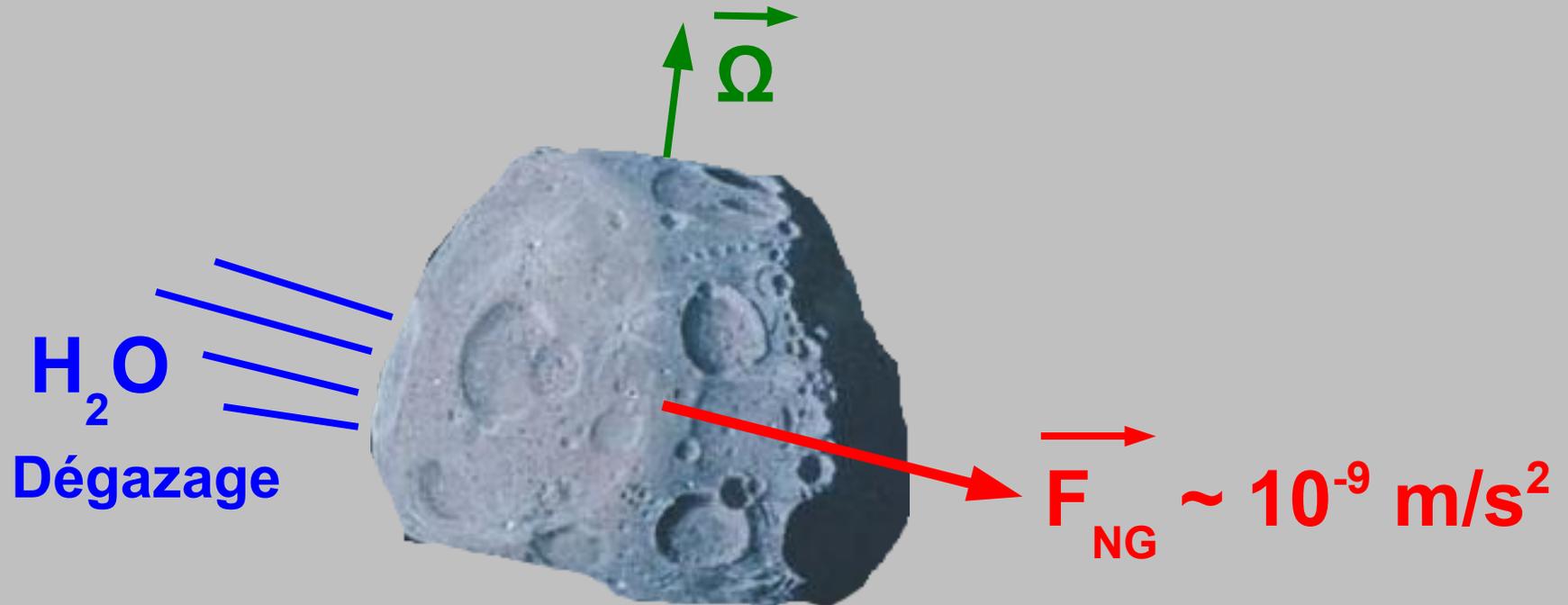
Modèle de la « boule de neige sale »

- La lumière solaire vaporise le noyau pour produire :
 - Une come riche en hydrogène + nombreuses molécules
 - Queue de poussières
 - Queue ionique



Courtesy: Deep Impact - NASA & JPL

Forces non gravitationnelles



- acceleration due au dégazage de l'eau
- perturbation de l'orbite "gravitationnelle"
- les autres effets sont bien plus petits

See Whipple (1950) & Marsden (1968, 1969)

Mesure de la masse

T

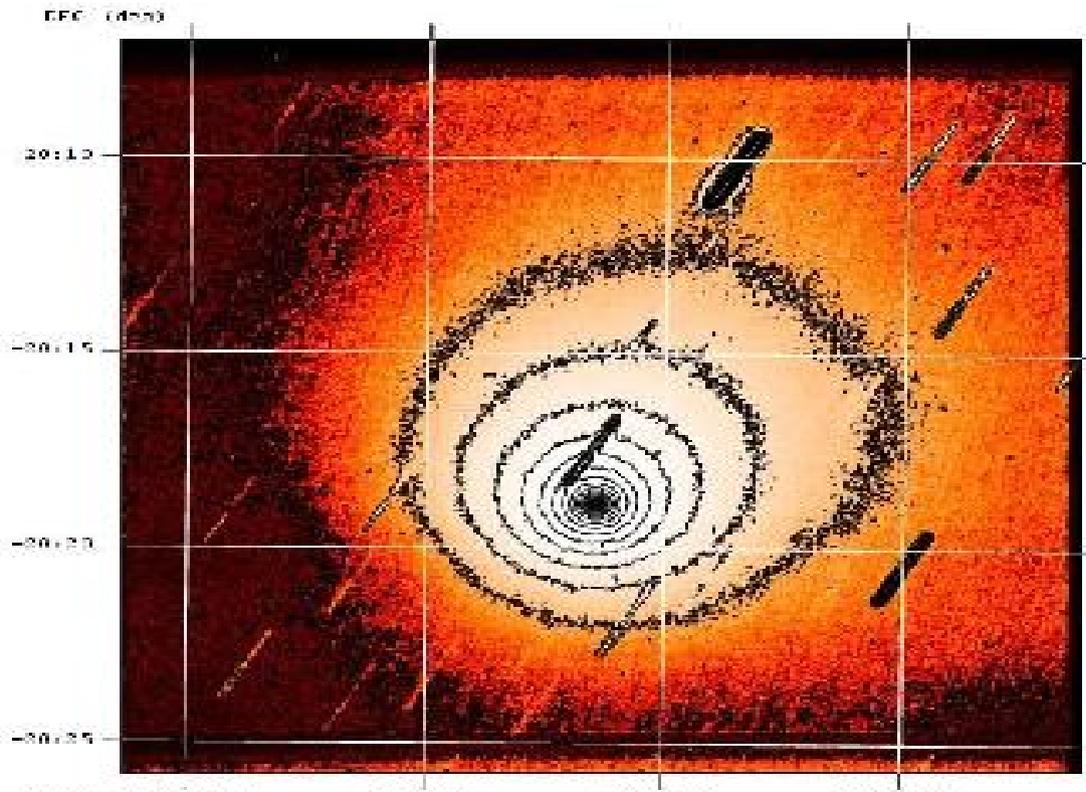
Methode:

1. mesure de l'accélération A_{NG} ← astrometrie
2. modèle the force F_{NG} ← modèle de dégazage (+ forme)
3. extraction de la masse (& densité) du noyau

Seule méthode à part ROSETTA

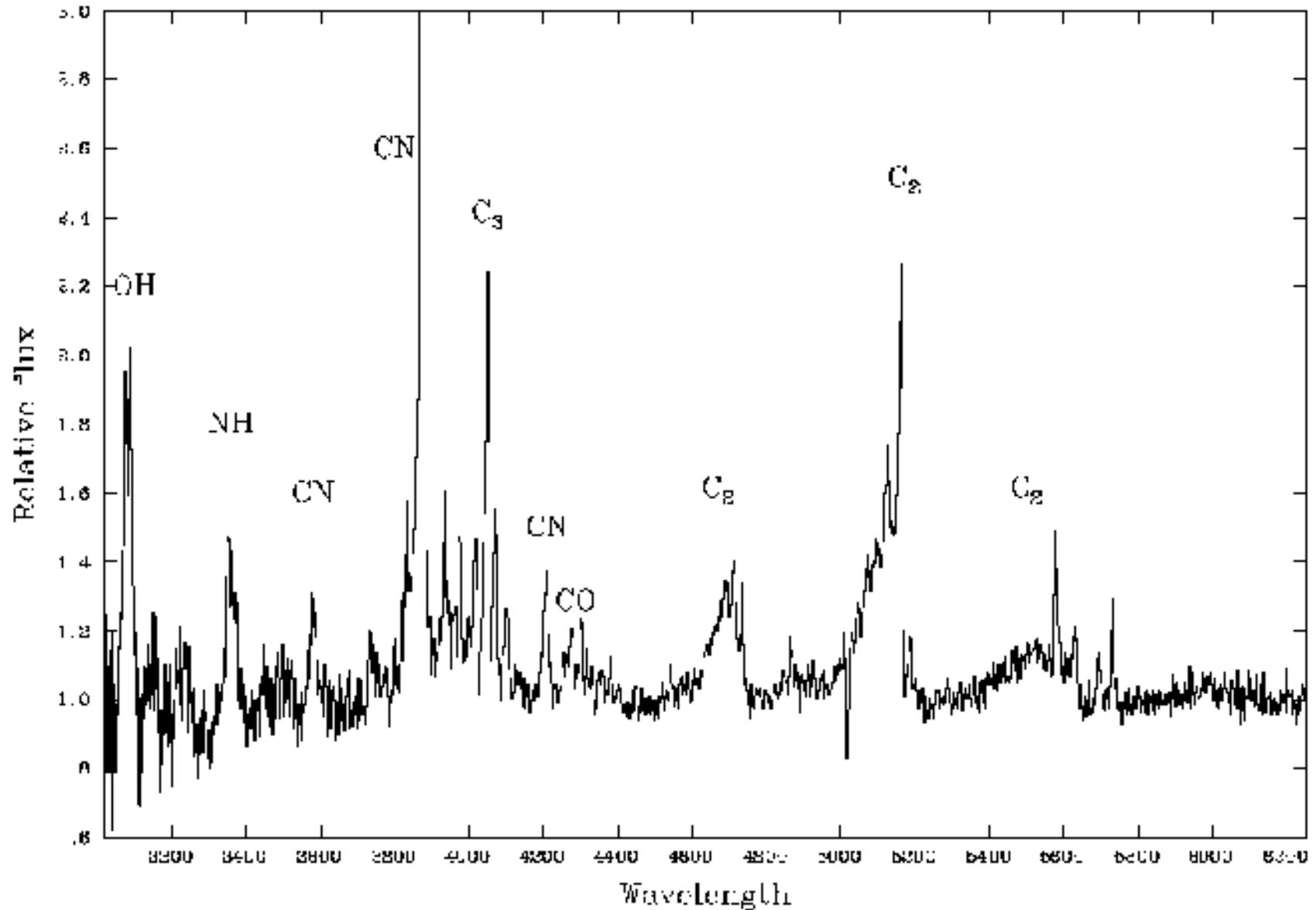
Paramètre Afrho

- $Af[\rho]$ est le produit de l'albedo (A), du facteur de remplissage (f) des grains dans le champ de vision de rayon $[\rho]$ au niveau de la comète
- Quantité introduite par A'HEARN et al (1984) pour mesurer la production de poussière

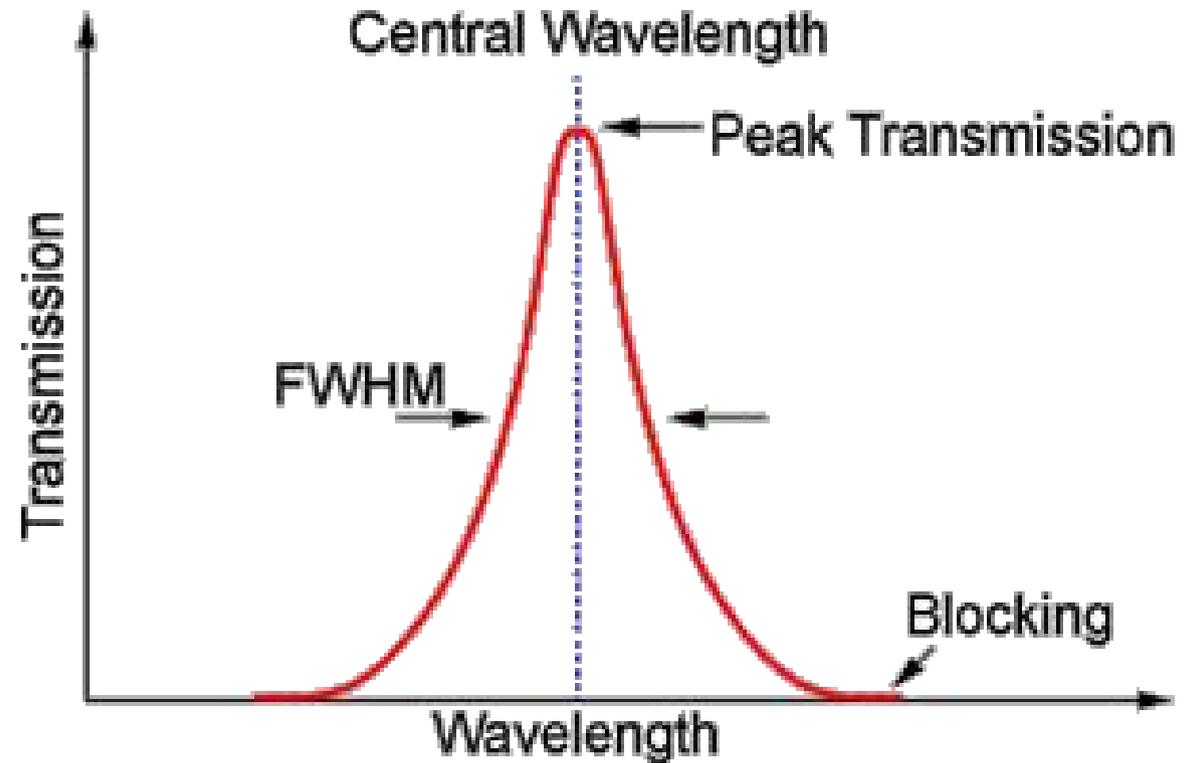
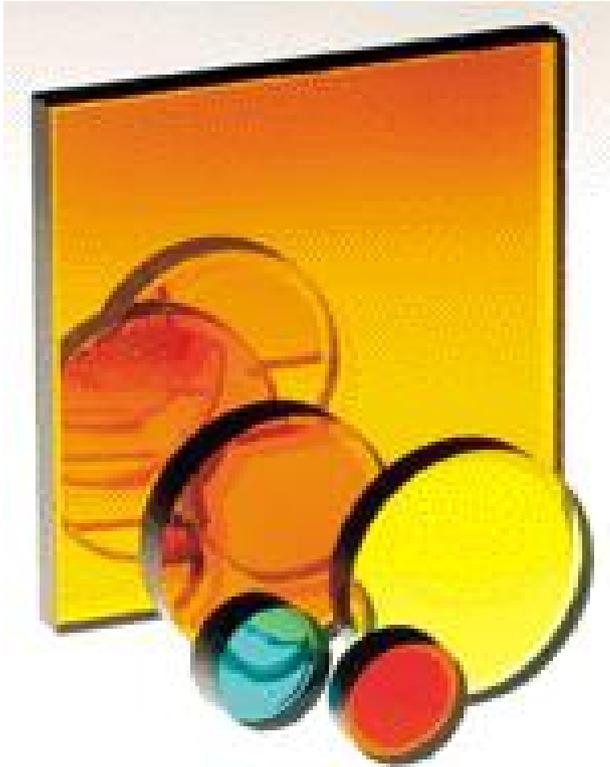


Trouver une bande sans emission ?

Hale-Bopp 3rd September 1996



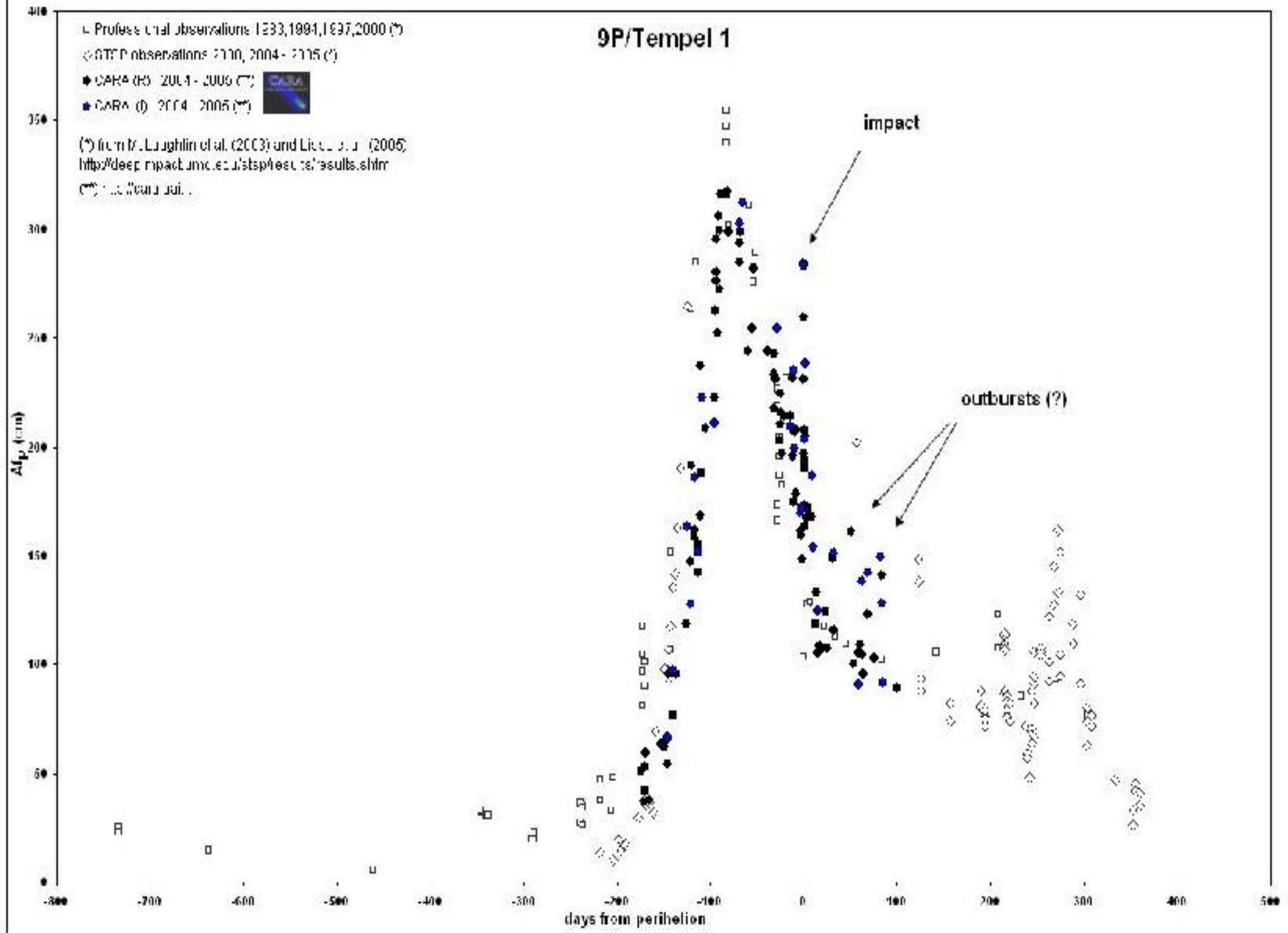
Filtres étroits



Central Wavelength (nm)	Molecule
390	CN
405	C3
430	CO+
450	Blue Dust Continuum
515	C2
620	H2O+
647 or 650	Red Dust Continuum

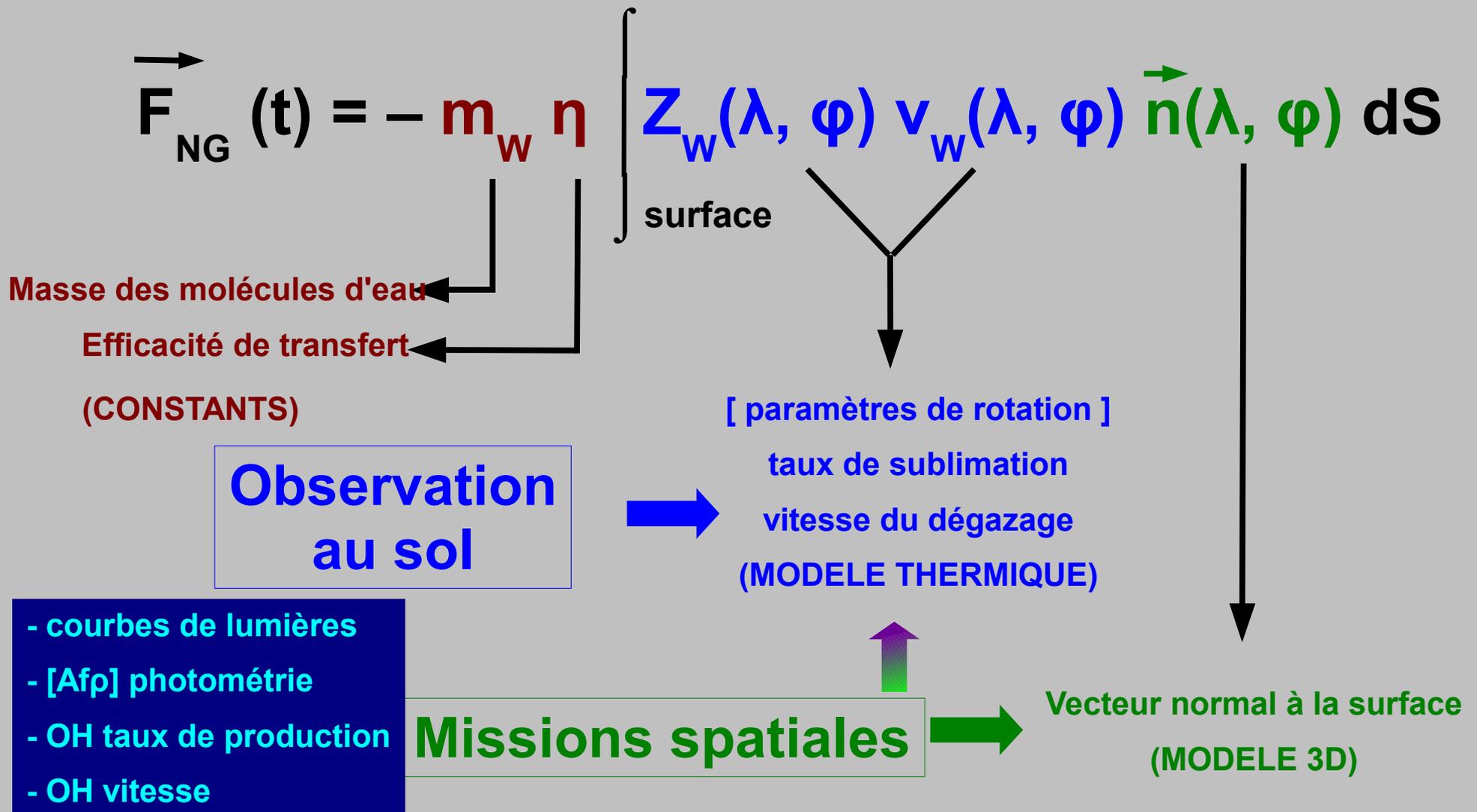
9P/Tempel 1

- Professional observations (1933, 1994, 1997, 2000) (*)
 - ◇ GTFP observations (2000, 2004 - 2005) (*)
 - CARA (B) (2004 - 2005) (**)
 - ◆ CARA (D) (2004 - 2005) (**)
- (*) from M. Loughlin et al. (2003) and Lisse et al. (2005)
<http://deep.impact.jmc.edu/sts/press/results.shtml>
(**) from Lisse et al.



FORCES NON GRAVITATIONNELLES

Modèle physique pour calculer les forces non gravitationnelles :



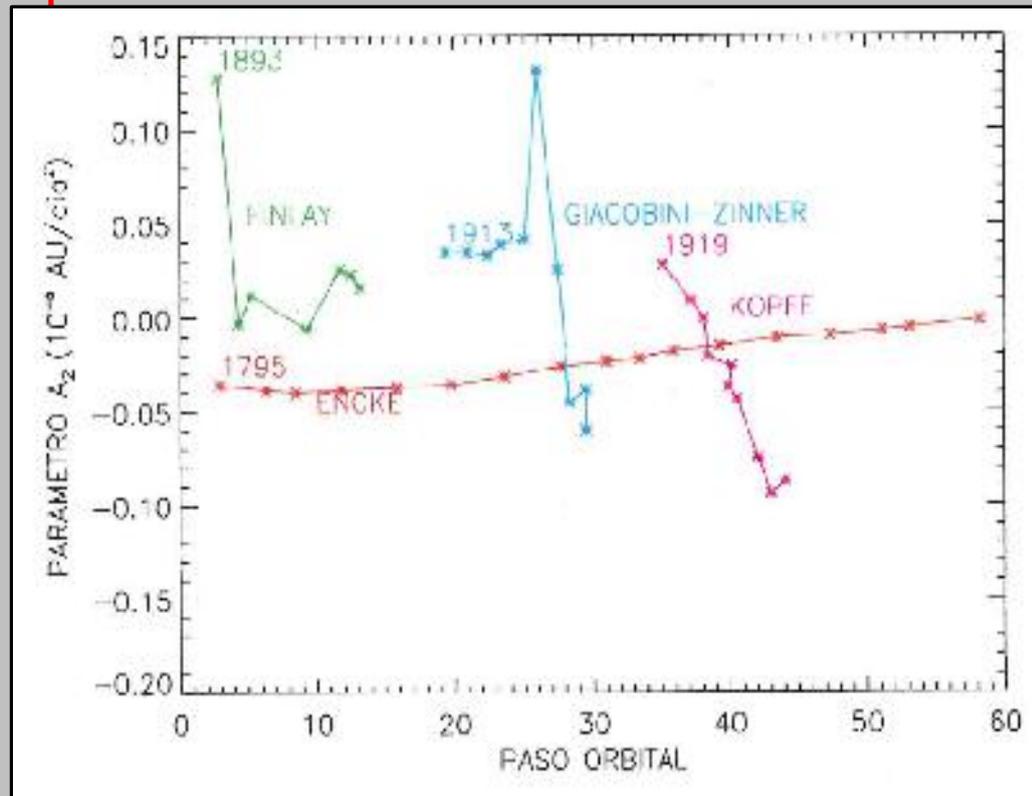
APPROCHE "STANDARD"

Modèle introduit par Marsden (1973):

$$\vec{A}_{NG} = F_1 \vec{n}_r + F_2 \vec{n}_t + F_3 \vec{n}_n$$

$$F_i = A_i g(r_h) \rightarrow g = \text{modèle simpliste}$$

A_i = ajustement sur les observations



← A_2

(Gutiérrez 2002)

AMELIORATIONS

Froeschlé & Rickman (1986), Rickman & Froeschlé (1986) ...

Méthode:

- meilleur modèle thermique
- trois composantes $h_i(r_h)$ au lieu de une $g(r_h)$
- noyau sphérique

Resultats:

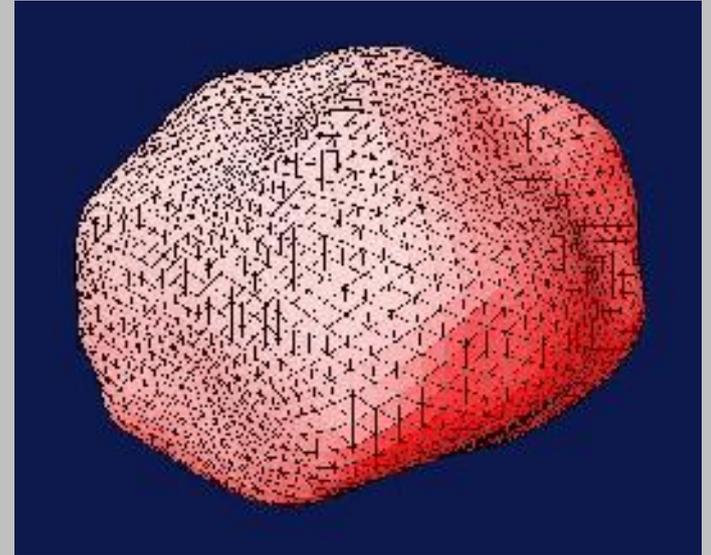
- meilleurs O-C sur certaines comètes
- corrélation: $\Delta P \approx A_2$ et asymétrie de la production de H_2O
- densité de 1P/Halley: 300-700 kg/m³ (Rickman 1989)

AMELIORATIONS

Davidsson et al. (2007)

Methode:

- “LEAM” nouveau modèle thermique
- ajustement du taux de production d'eau
- surfaces actives = laissé libre
- peut utiliser des modèle 3D du noyau



Results:

- densité de 9P/Tempel 1: 200-700 kg/m³

AMELIORATIONS

mesures:

- mesures astrométriques (GAIA)
- courbes de production d'eau
- vitesse d'échappement de l'eau

Erreur pour la mesure de la masse de (9P/Tempel 1):

- astrométrie (ΔP) ~ 10 – 20 %
- activité ~ 50 %

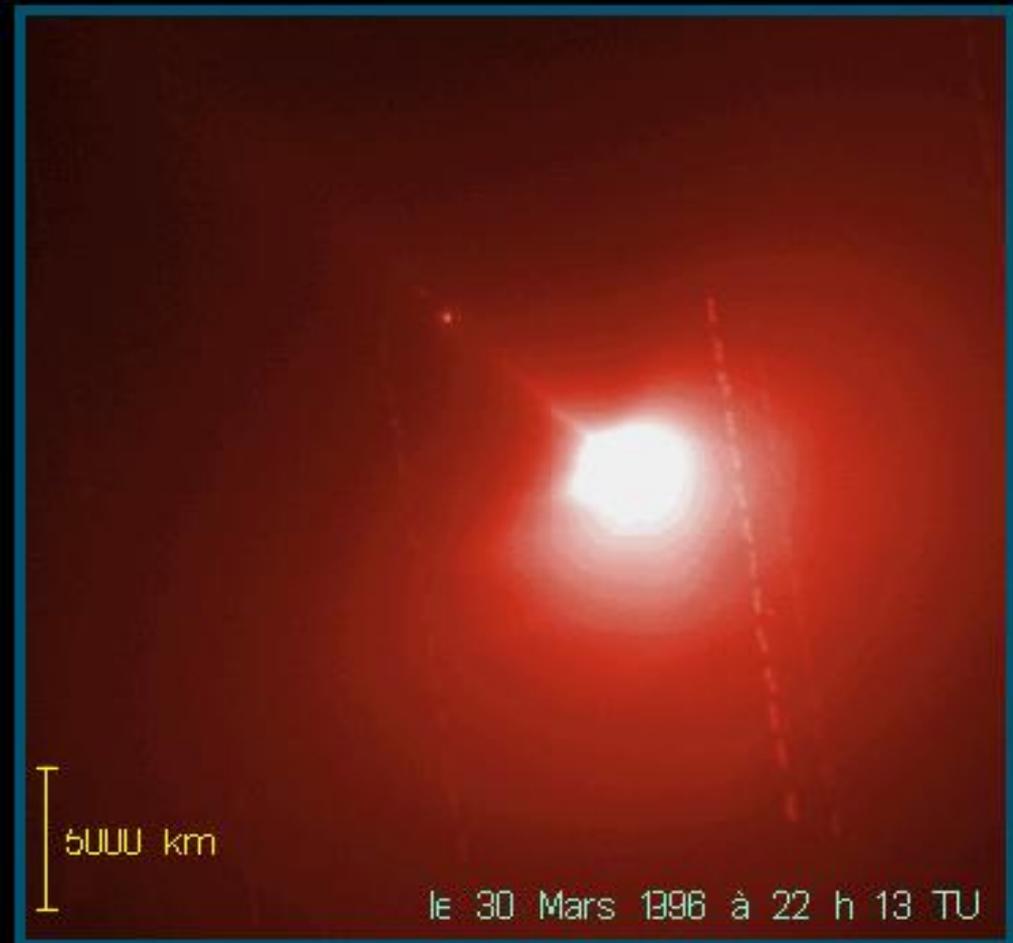
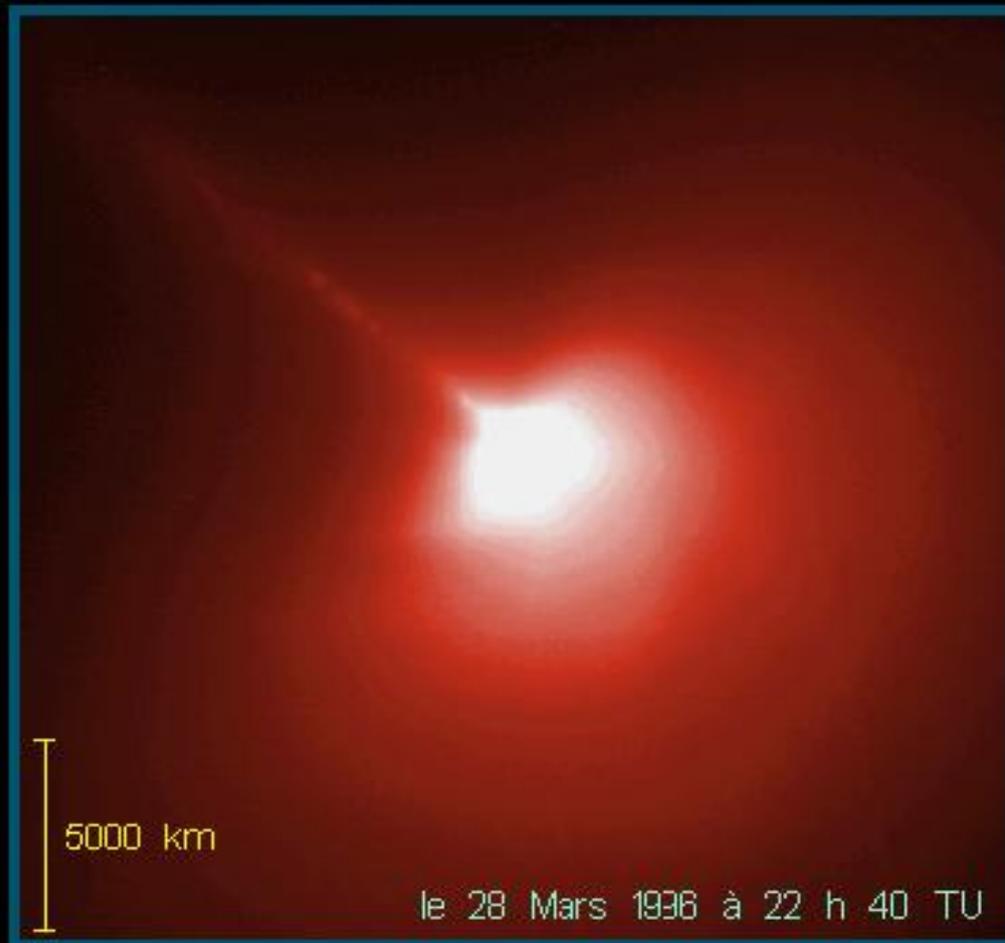
OBSERVATIONS



COMETES

Comète HYAKUTAKE 1996 B2

EVOLUTION RAPIDE DE PETITS FRAGMENTS SÉPARÉS DU NOYAU



COMETES

15 Avril 20 h 29 TU

$\Delta = 0,717$ UA $r = 0,547$ UA



18 Avril 19 h 22 TU

$\Delta = 0,814$ UA $r = 0,473$ UA



COMETE HYAKUTAKE : ERUPTION LE 15 AVRIL 1996
16 jours avant le périhélie

COMETES AVEC GAIA

Vue du sol



Profile 1/R
pseudo nucleus (fwhm=2arcsec)

Vue de l'espace

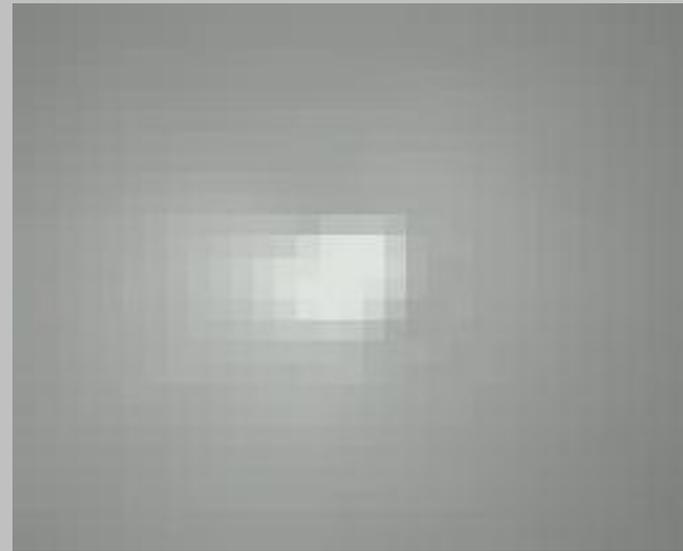


Profile 1/R
Pseudo nucleus (fwhm=2arcsec)
PSF du noyau

Noyau de 1 km à 1 UA => 1 mas !

Mag (Noyau) = Mag (Comète) +5

COMETES AVEC GAIA



On a besoin de positions précises pour calculer les éléments orbitaux
On sera alors capable de calculer les **accelerations**

Pour 9P/tempel 1 avec des observations au sol

Les accélérations non gravitationnelles sont ajustées sur les changements de période et l'argument du périhélie

$$\Delta P = 2 \text{ min } \pm 0.5$$

$$\Delta \omega = 0.2'' \pm 0.1$$

$$(2006, \text{Davidsson et al}) \Rightarrow \rho_{\text{bulk}} = 450 \text{ kg m}^{-3} \pm 250 \dots$$

FORCES NON GRAVITATIONNELLES

Modèle physique :

$$\vec{F}_{NG}(t) \approx -m_w Q_w \vec{u}_w$$

Masse des molécules d'eau

Vitesse d'échappement
(MODELE THERMIQUE)

Taux de production d'eau
(ACTIVITE)

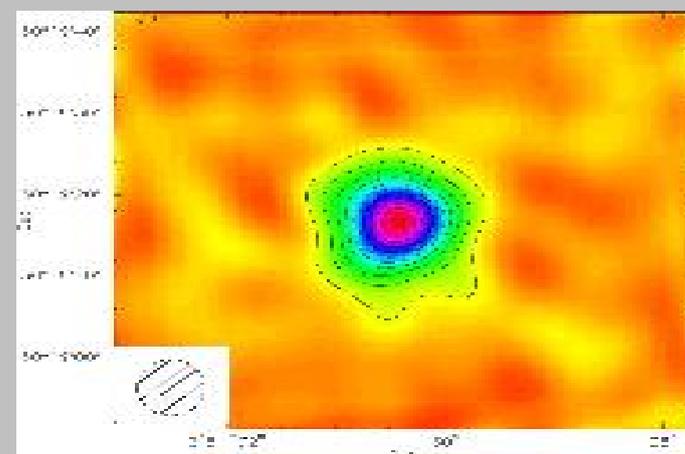
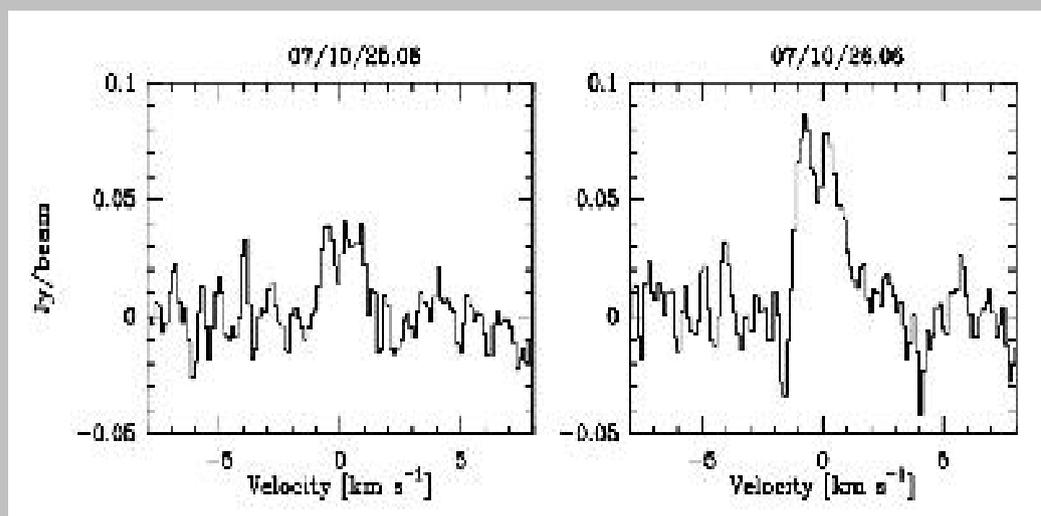
Observations
au sol

- courbes de lumière
- [Afp] photométrie
- OH/CN taux de production
- OH vitesse
- Paramètres de rotation
- Zones actives
- Albedo
-

Nous avons besoin de beaucoup d'observations au sol!



$$F_{NG}(t) \approx -m_w Q_w u_w$$



Comète 17P - Holmes



24 oct 18h

25 oct 6h

25 oct 18h

26 oct 5h

Astéroïdes Doubles

Pourquoi les étudier ?

- On peut trouver des paramètres fondamentaux pour la compréhension des astéroïdes :
 - Masse + Densité + Porosité => structure interne
- Leur existence même nous donne des informations sur l'évolution du système solaire
 - Evolution collisionnelle
 - Propriété thermique de la roche

Ida et Dactyl (survol par Galileo)



On connaît environ 162 astéroïdes multiples (6 triples, 1 quadruple) *(sept 2009)*

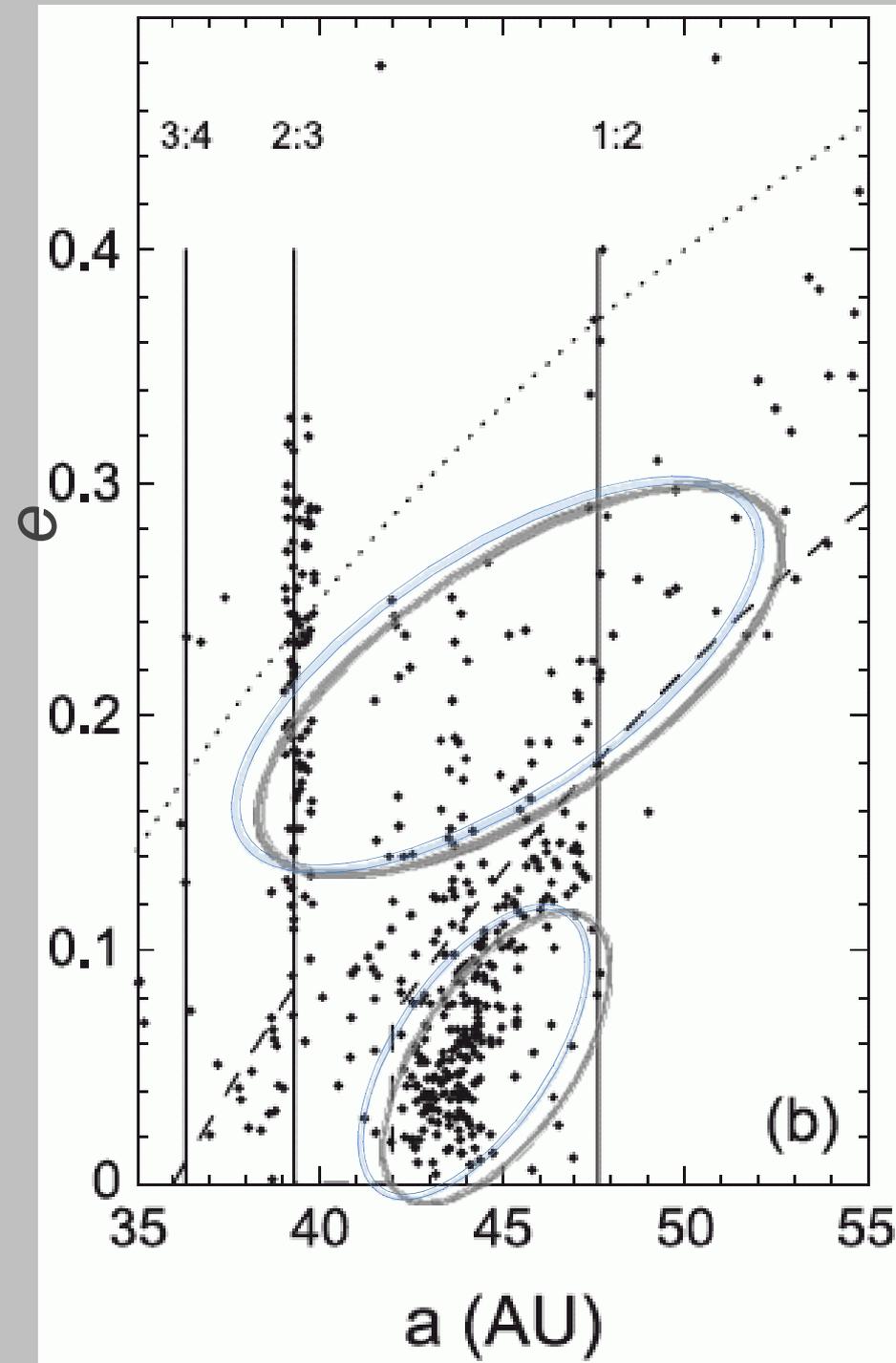
**35 Géo-Croiseurs, 7 Mars-Croiseurs,
62 Ceinture principale, 2 Troyens, 56 TNOs**

- ***Découvertes,***

- **HST (47) --**
- **Télescopes au sol (29) – Grands télescopes (8-10m) avec optique adaptative.**
- **Telescopes au sol, courbes de lumière (62) – Petits télescope (1m-30cm), souvent avec des réseaux d'astronomes amateurs (AUDE...)**
- **Radar (21) – Principalement Arecibon astéroïdes géocroiseurs.**
- **Missions spatiales (1)**

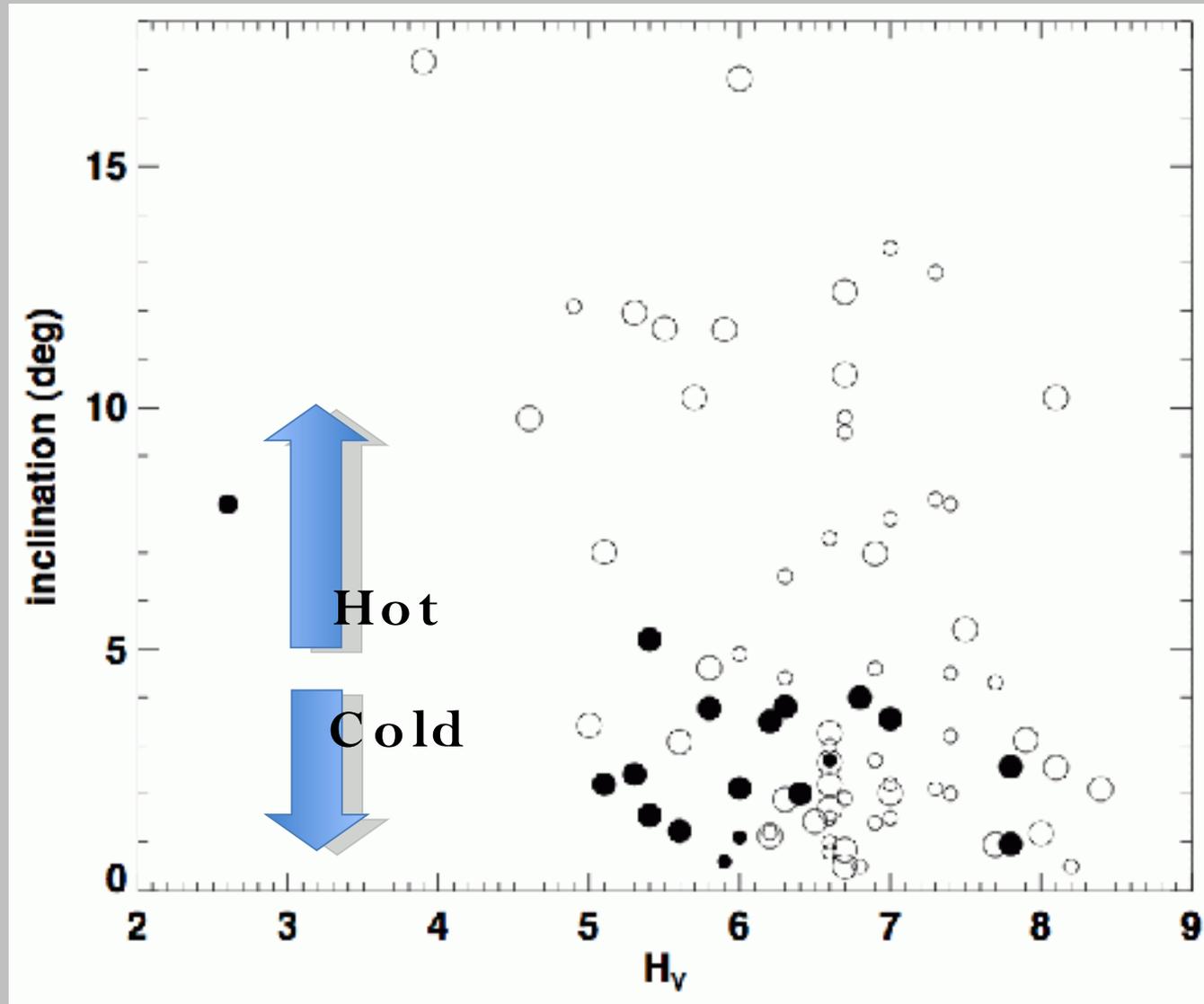
TNOs binaires

- **Les astéroïdes binaires sont retrouvés dans toutes les familles**
- **Pluton a trois satellites,**
 - **Charon est grand et synchrone**
 - **Nyx and Hydra sont petits et distants**

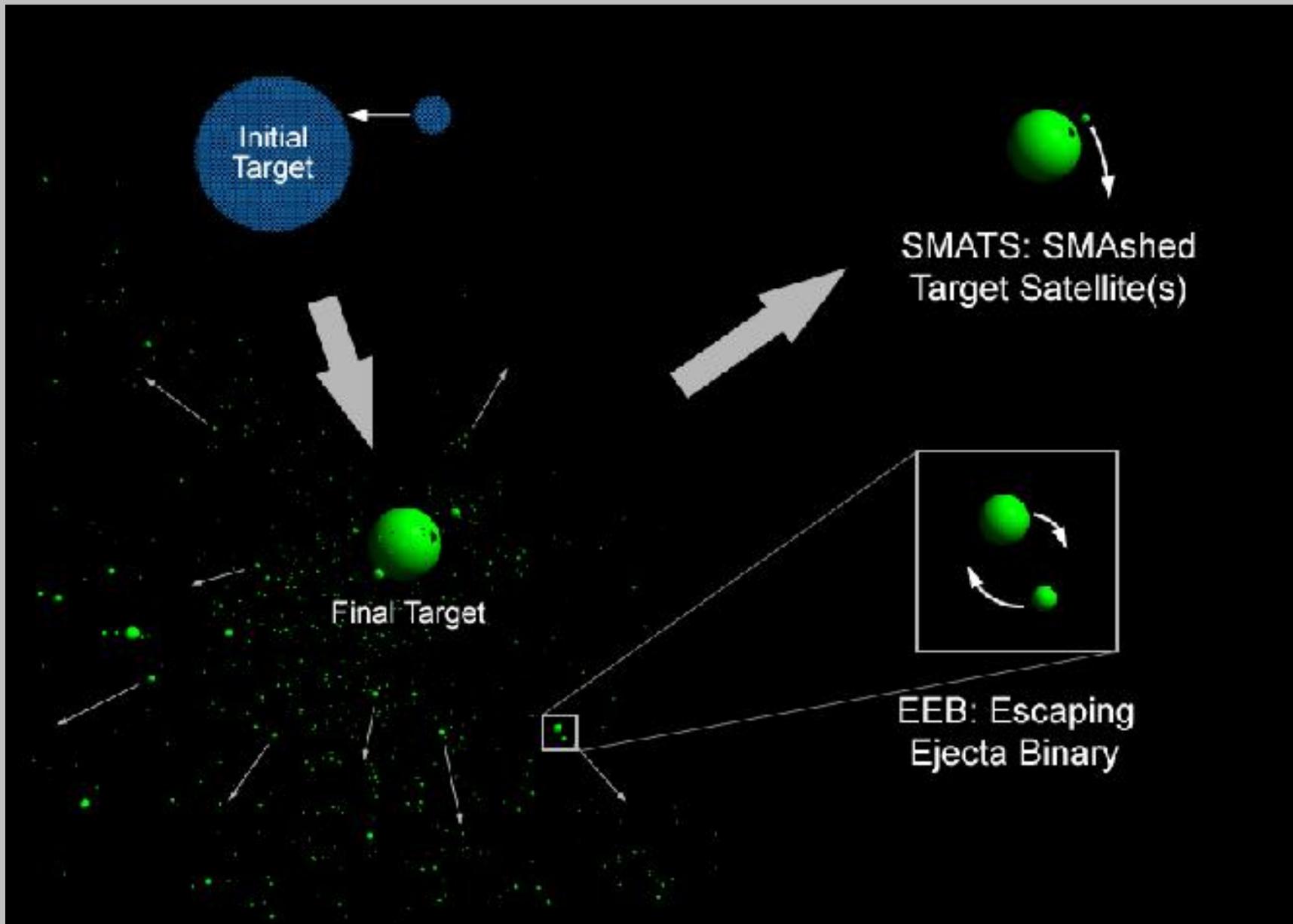


TNO Binaires

- Disque diffusé (~10%)
 - Disque chaud (~10%)
 - Disque froid (29%)



Deux type de satellites, les petits et les gros...



Durda et al. (2004, Icarus 170, 243)

- **Les astéroïdes “doubles” ont une origine collisionnelle**

- **SMATS (SMAShed Target Satellites)**

- **Satellites autour du plus gros**

- **Rapport de masse grand $R_s/R_p = 0.1 - 0.04$**

- **Séparation faible $\sim 10 R_p$**

- **EEBs (Escaping Ejecta Binaries)**

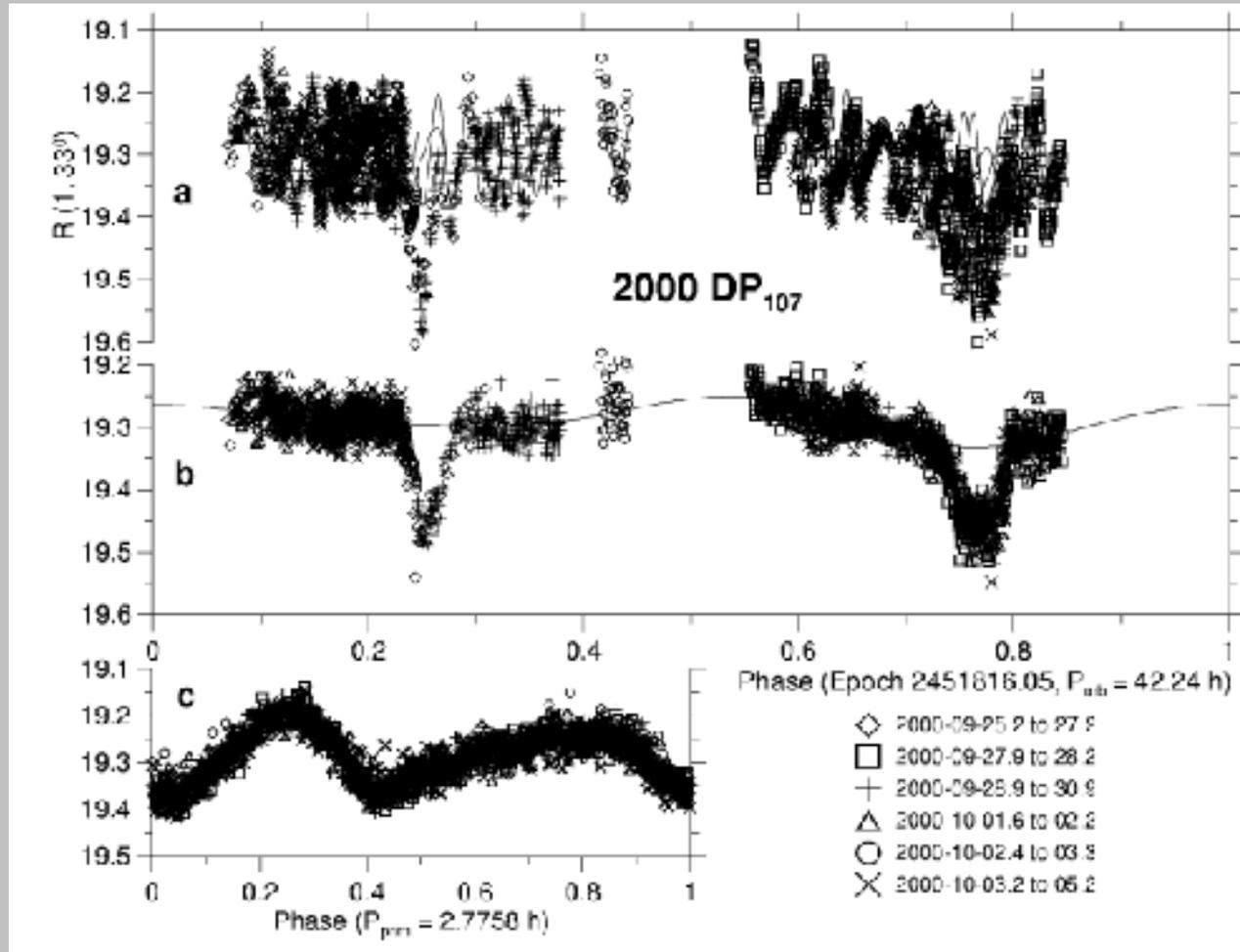
- **Les ejectas sont de masse semblables.**

- **Grande orbites $\sim 20-100 R_p$.**

- **Les petits systèmes sont découverts par courbes de lumières (15%).**

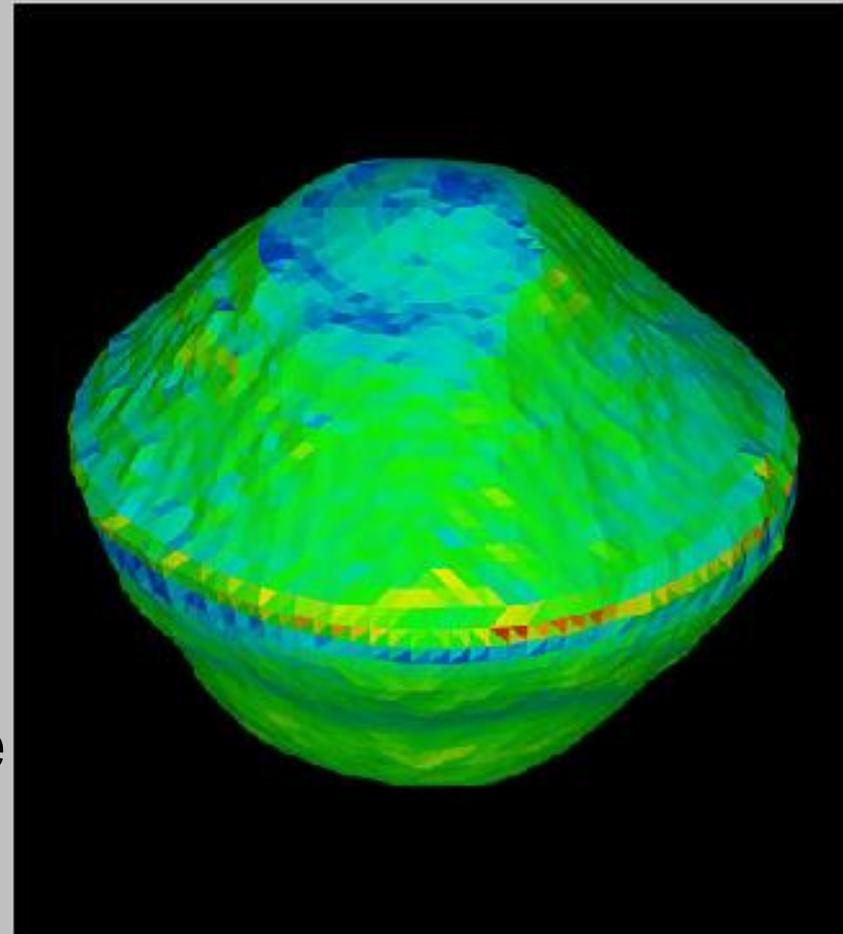
Géocroiseur

- Les géocroiseurs binaires sont communs (15%) - rupture centrifuge ?
 - Primaire à rotation rapide (2-4hr)
 - Taille petite (20-50% D_{pri})
 - Secondaire proche ($a = 2-5 R_p$)
 - Primaire peu allongé (amplitude de la courbe de lumière < 0.3 m)



1999 KW4 -- Géocroiseur

- NEO le mieux étudié
 - Forme du primaire et du secondaire par imagerie radar
 - Période primaire = 2.8 h,
 - Secondaire en rotation synchrone.
 - Primaire aplati avec une dorsale équatoriale. (*flying tagine...*)



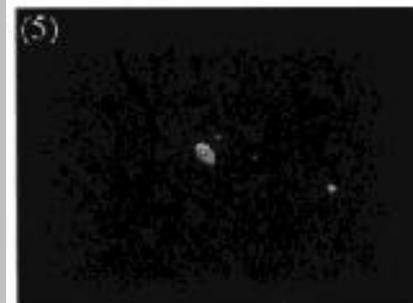
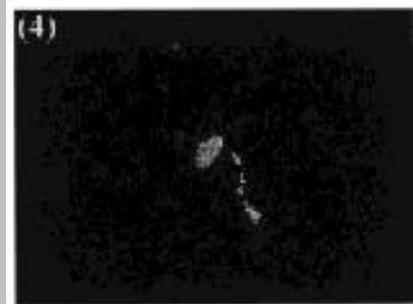
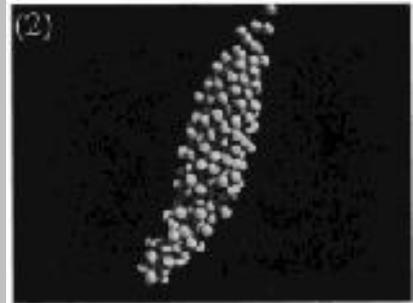
Rupture centrifuge

– Rupture par effet de marée

- Peut créer des binaire ($d < 2R_p$)
- Primaire allongé, secondaire avec forte excentricité et grande séparation
- D'autres approches peuvent rompre le lien

– Accélération

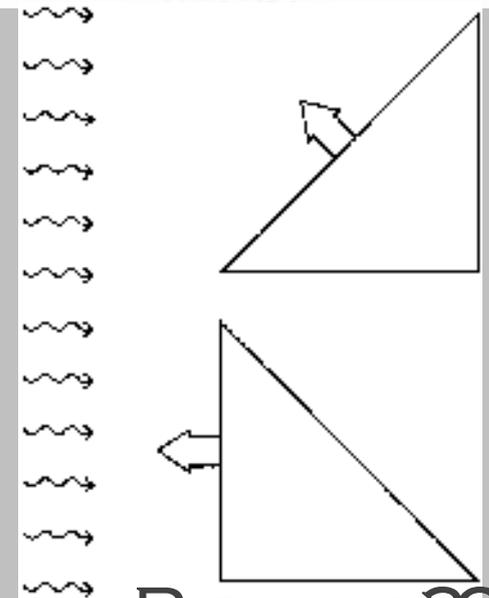
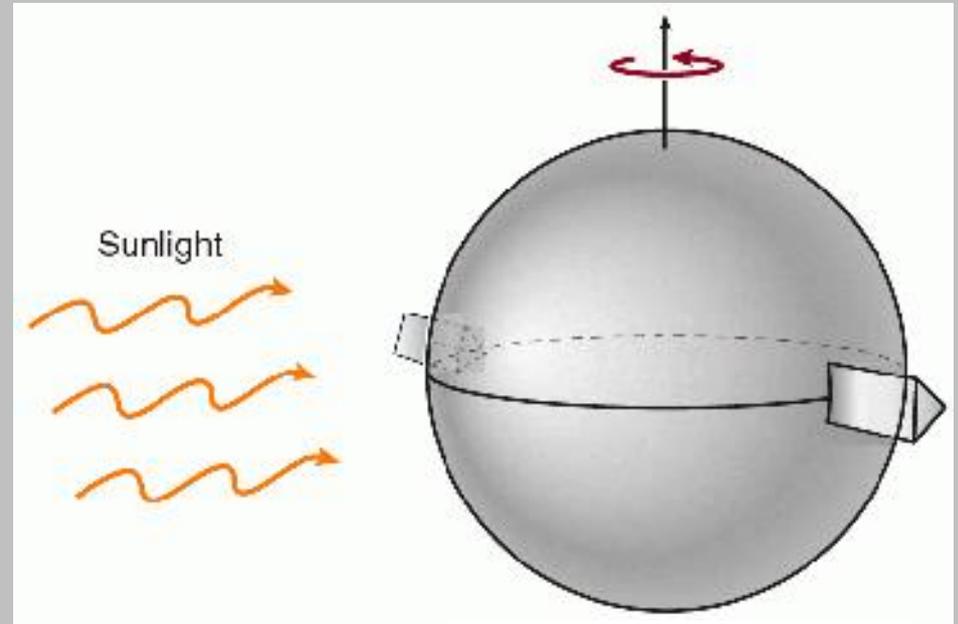
- Augmente la vitesse de rotation de l'astéroïde jusqu'à ce que de la matière s'échappe puis se réaccumule en orbite
 - Rencontre avec une planète peut efficace .
 - Forces radiatives? Effet YORP ?
- Structure de l'astéroïde ?



Effet YORP ?

BOTKE ET AL 2006

- L'effet Yorp change les paramètres de rotation (période et axe de rotation)
- Cet effet a été observé,
 - Alignement des axes de rotation dans des familles collisionnelles,
 - Augmentation de la période de rotation observé pour 3 astéroïdes
- Ne dépend pas de l'inertie thermique comme pour Yarkovsky, ça fonctionne sans régolith
- Echelle de temps pour un astéroïde de 1 km : 10^5 — 10^6 An



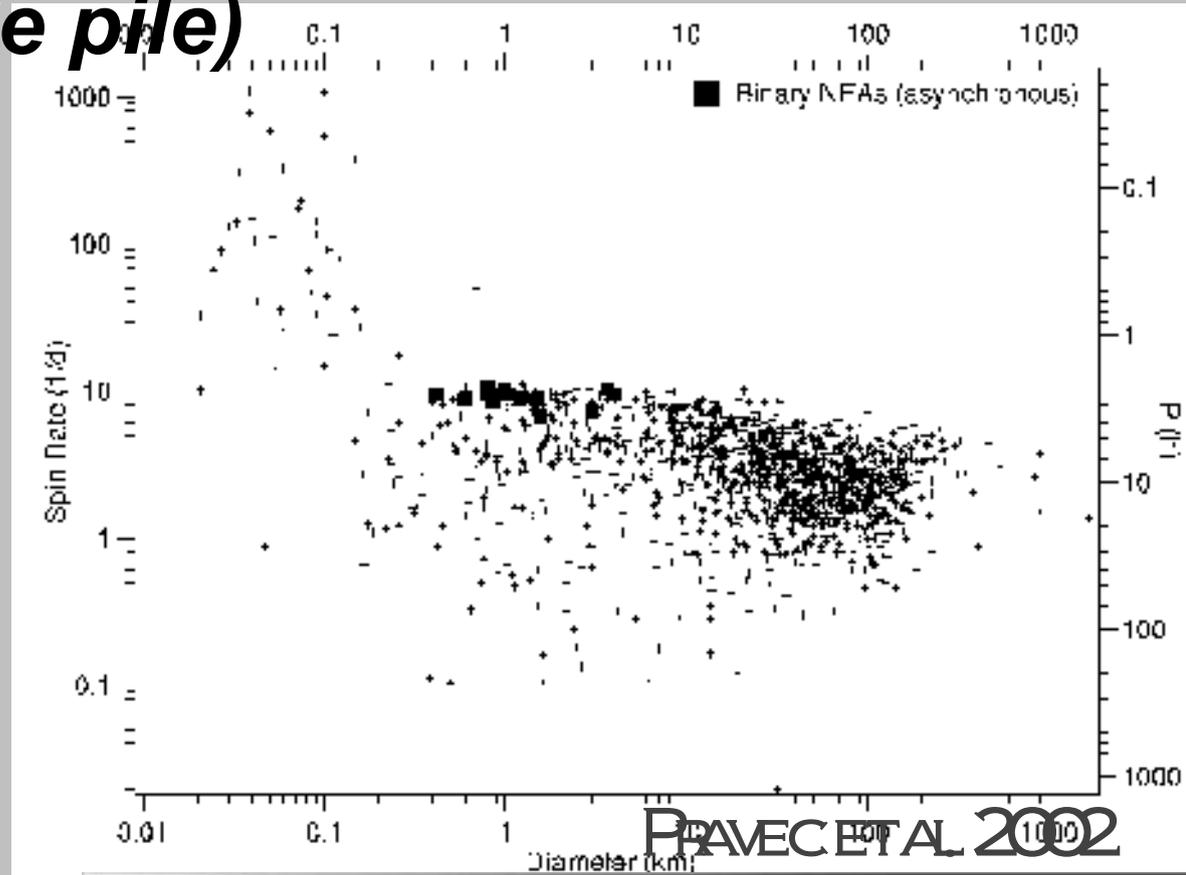
RUBINCAM 2000

Tas de gravas (*Rubble pile*)

- “Rubble Pile” est un terme pour un agrégat gravitationnel

Ca ne tient que par auto gravité.

- Il y a de nombreuses évidences pour que de nombreux petits astéroïdes ($200 \text{ m} < D < 10 \text{ km}$) soient des tas de gravas;
 - Période de rotation minimum pour tous les astéroïdes ($D > 200\text{m}$) $P \sim 2.2\text{h}$,
 - Densités faibles et grande porosité,
 - Simulations de de collisions catastrophiques,
 - ITOKAWA semble en être un! →



SIMULATIONS *(K. Walsh et al, 2008)*

- **Simulation du ‘tas de sable’,**
 - **Cas nominal, angle de friction 40d**
 - **Angle de friction 20d**
 - **Angle de friction 0d**
 - **Tas de sable avec un noyau**

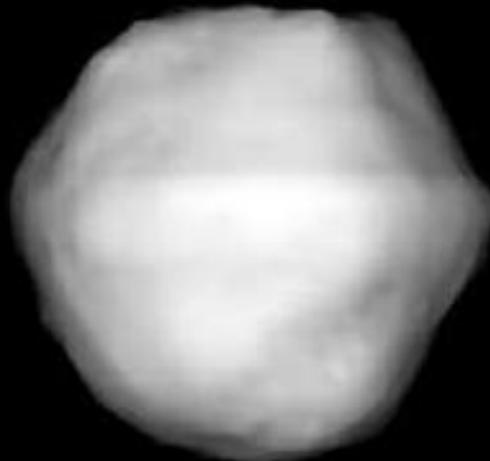
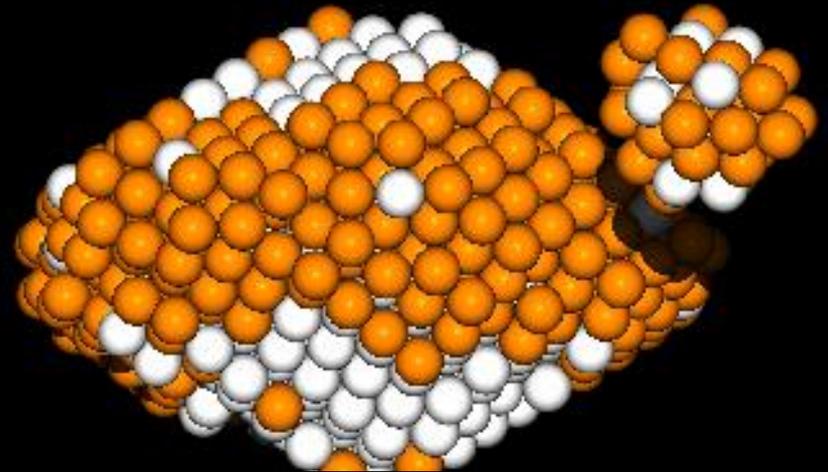
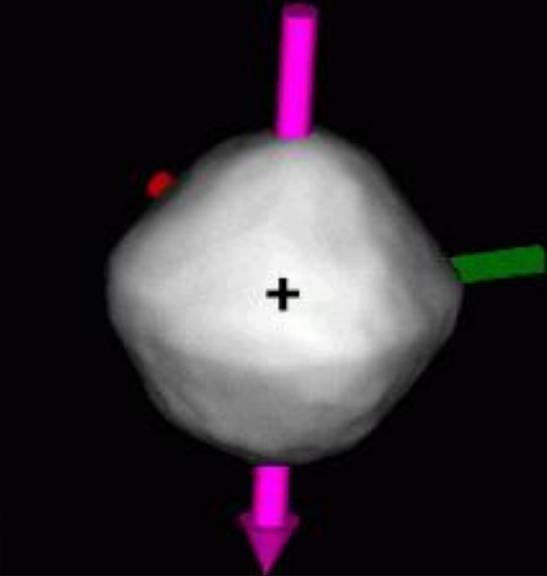
Formation des astéroïdes binaires

- La formation de binaires est efficace pour le cas nominal (40°) avec des collisions dissipatives
 - Correspondances avec les observations,
 - Rotation et forme du primaire,
 - Taille est excentricité du secondaire.
- Le cas intermédiaire (20°) est moins efficace
- Des corps avec de gros noyaux ($\sim 35\%$ de la masse totale) peuvent aussi créer des binaires.
- Le cas ($\sim 0^\circ$) ne fonctionne pas

Ces formes sont communes...

1999 KW4 Radar model

YORP SPINUP SMS WASH ETAL 2008



Single Asteroid RQ36
Howell et al.

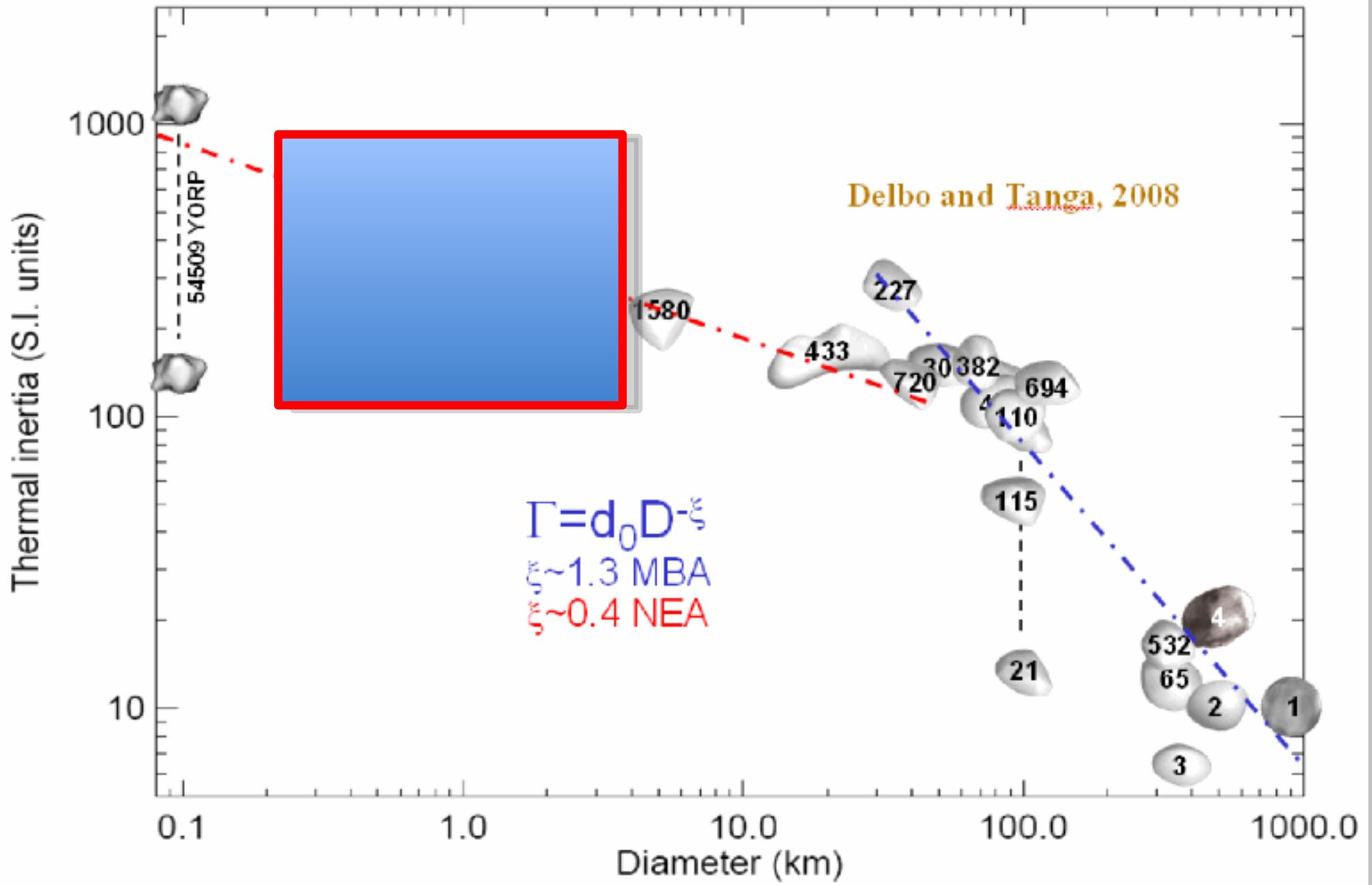
Binary 2004 DC
Taylor et al. 2008, ACM

Steins from Rosetta

Matériau de surface

- Les simulations sont faites pour des blocs d'environ 200m, que devient la regolith ?
- La Regolith peut s'échapper de l'astéroïde
 - Les astéroïdes binaires doivent être différents des autres rotateurs rapides
 - Il faut des observations thermiques car l'inertie thermique sera différente

Inertie Thermique



SKELETON MEN OF JUPITER, by E. R. Burroughs

JANUARY

50¢

Fact and Science Fiction
AMAZING
stories

SPEED-UP!
by Christopher Anvil

