

thèse de DOCTORAT de l'Université Paris VI

**Origine collisionnelle des familles
d'astéroïdes et des systèmes
binaires : étude spectroscopique
et modélisation numérique.**

par Alain Doressoundiram

Plan

◆ Introduction

- **Intérêt de l'étude des petits corps**

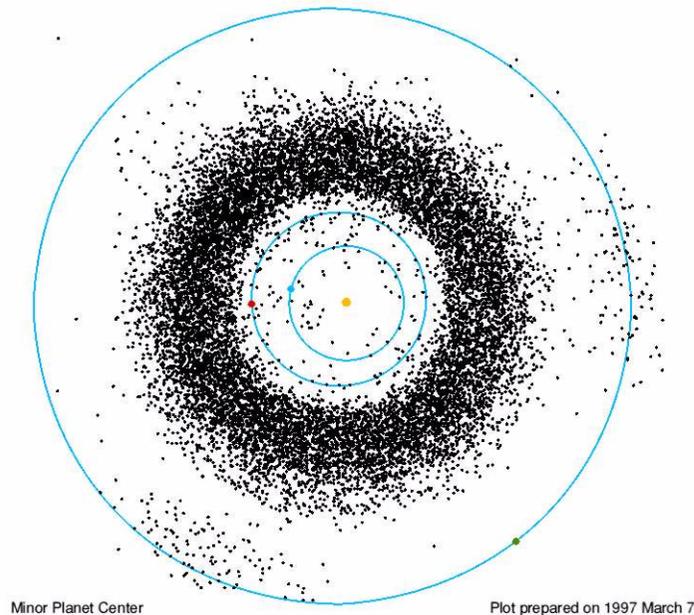
◆ Familles d'astéroïdes

- **Etude spectroscopique**
- **Modèle numérique**

◆ Cibles des missions spatiales

- **NEAR**
- **ROSETTA**
- **ISO**

Les astéroïdes : définition



- ◆ **Petits corps de quelques mètres à 1000 km de diamètre, situés entre Mars et Jupiter.**

Les astéroïdes : intérêts

- ◆ Peu d'évolution géologique ou thermique.



les astéroïdes gardent «en mémoire» les conditions initiales qui ont prévalu à la naissance du système solaire.

- ◆ Jupiter à l'origine de l'avortement de la formation d'une planète dans la ceinture principale.

Donc formation des astéroïdes intimement liée au problème non résolu de la formation des planètes.

Familles d'astéroïdes

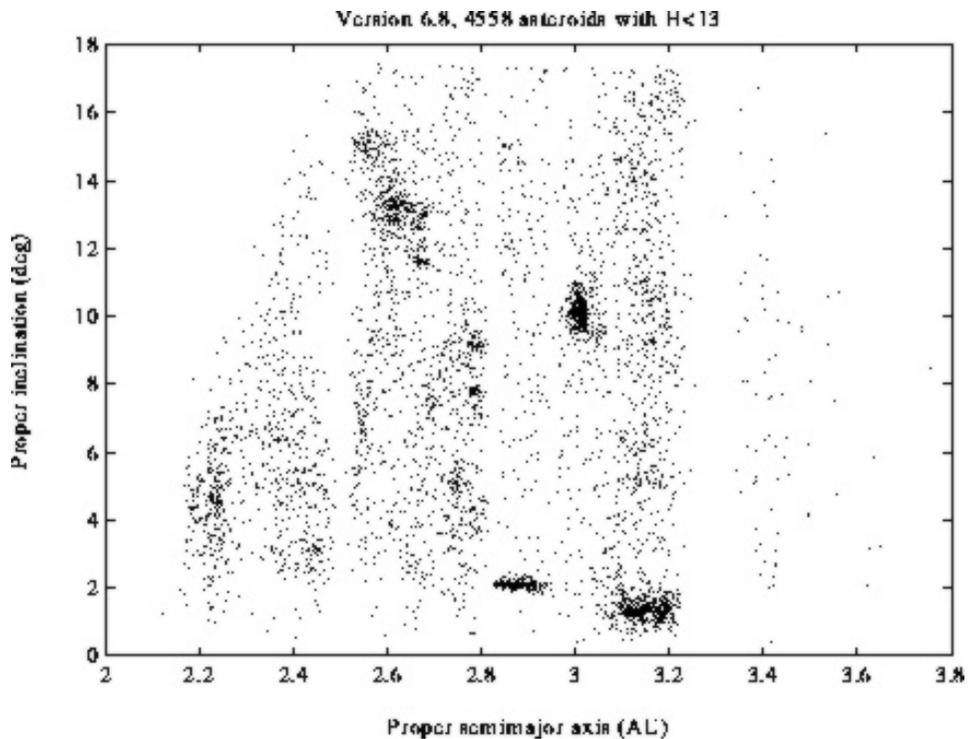
issu d'une collision

Regroupement dynamique dans l'espace des trois éléments orbitaux :

Φ **demi grand axe a**

Φ **excentricité e**

Φ **inclinaison i**



Pourquoi les familles

- ◆ **Comprendre l'évolution des astéroïdes.**
- ◆ **Voir l'intérieur d'une planète.**
- ◆ **Comprendre la physique des collisions.**
- ◆ **Origine des météorites.**
- ◆ **Origine des binaires.**

Spectroscopie des familles

**famille d'astéroïdes véritable
(génétique)**

=

**fragments d'un corps parent qui
ont des orbites similaires
autour du soleil.**

Sci  **une analyse**
spectroscopique **détailée**
permet d'établir un lien
génétique **entre les membres**
et de déterminer les intrus.



**composition originale du corps
parent.**

La famille de EOS

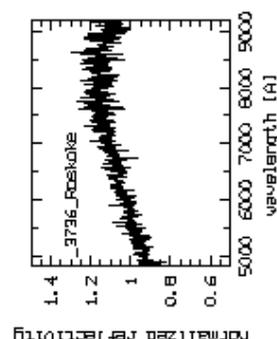
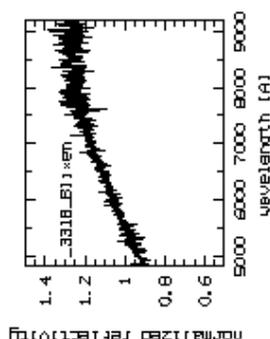
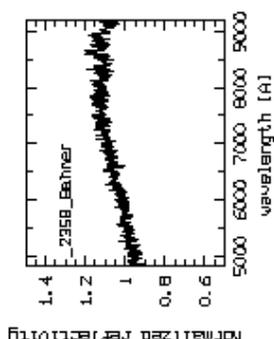
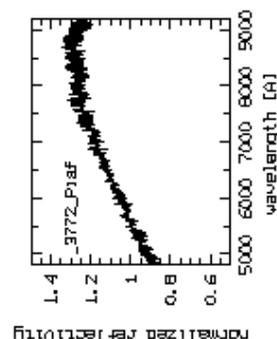
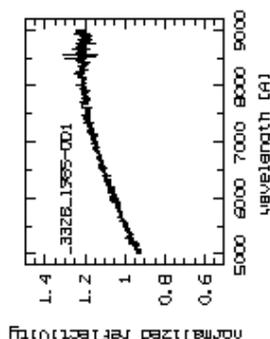
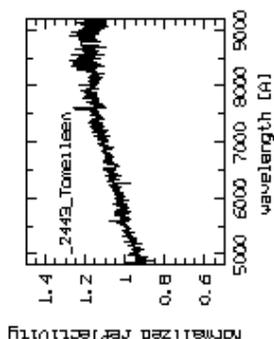
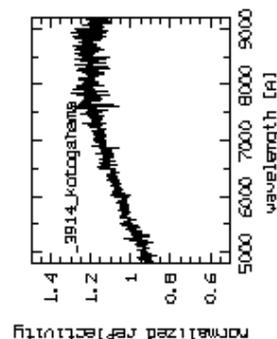
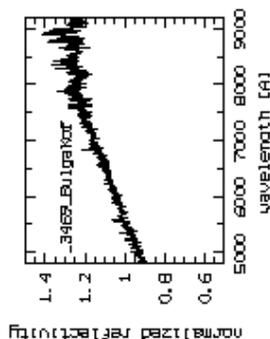
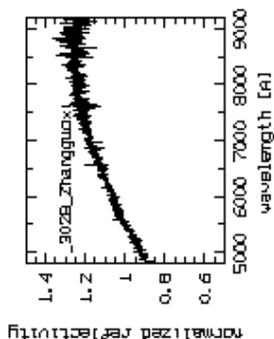
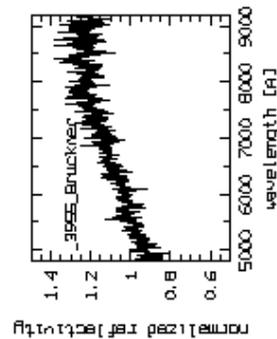
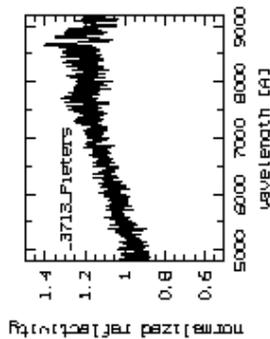
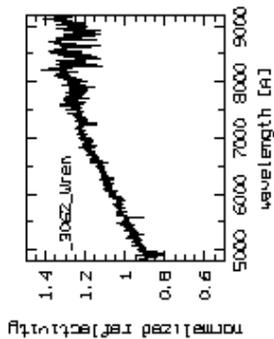
La famille de Eos est un ensemble dynamique :

- ◆ **Hirayama (1918)**
- ◆ **nombre > 450**
- ◆ **$a \approx 3,02 \text{ UA}$ $e \approx 0,07$ $i \approx 10^\circ$**
- ◆ **âge incertain**

45 spectres : 480-920 nm

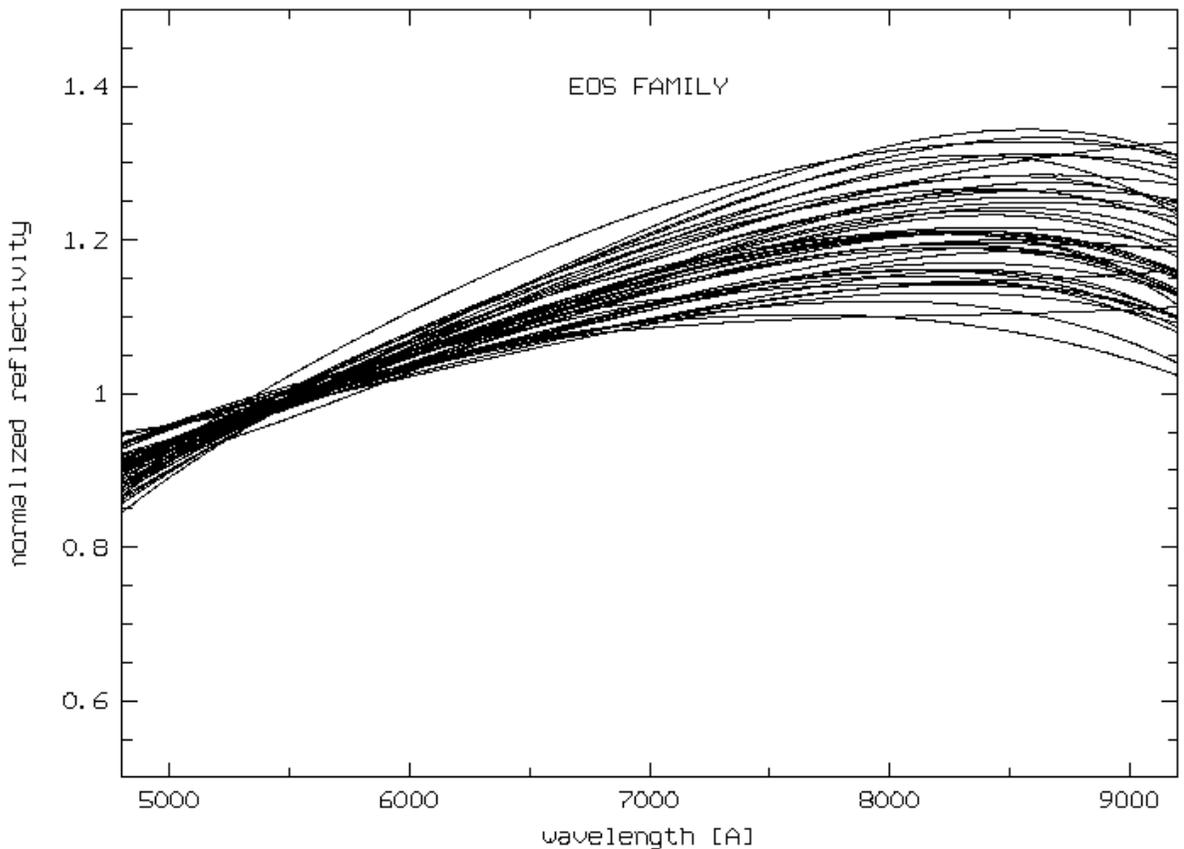
Télescope 1,52m ESO, La Silla.

Premier grand relevé spectroscopique de la famille.



Résultats

- ① Mise en évidence d'un comportement spectral commun à toute la famille de Eos.
normalisation des spectres à 550 nm puis lissage polynomial.



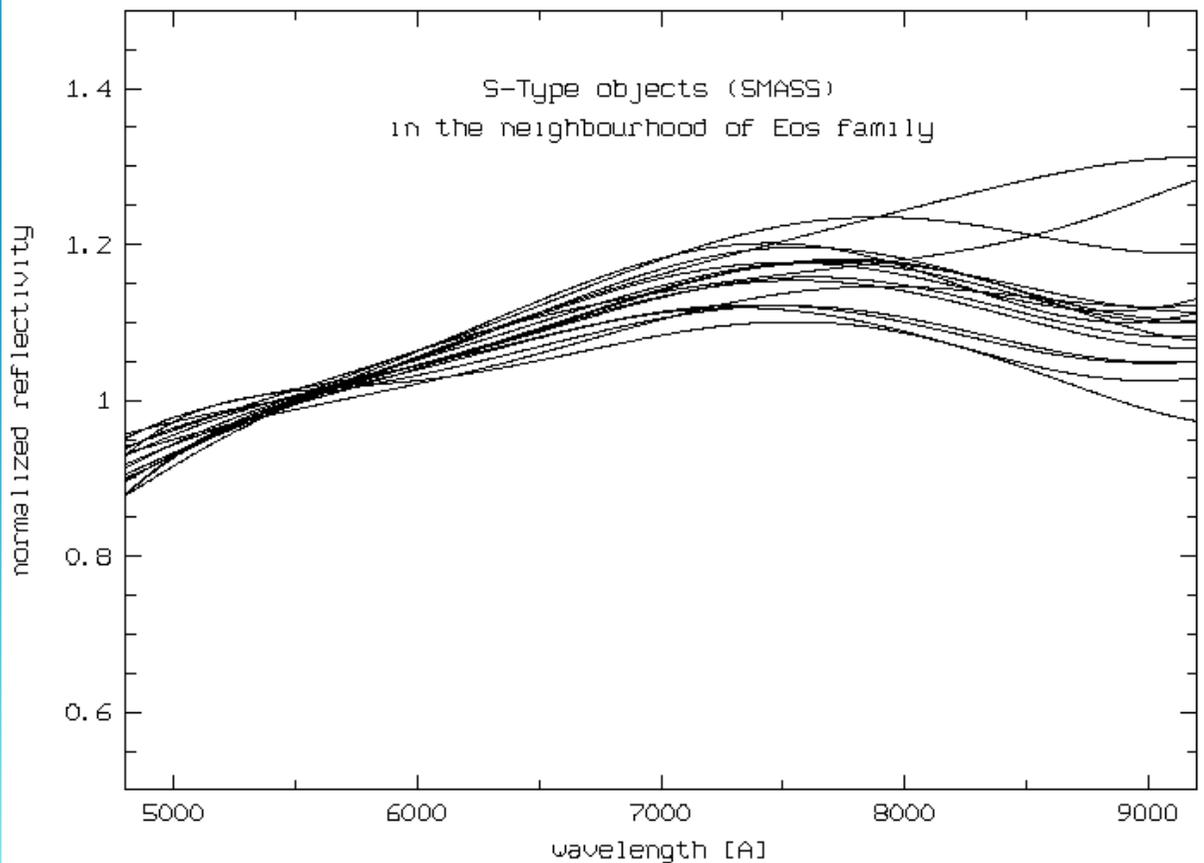
Gradient de réflectivité :

$$S'(\lambda_1, \lambda_2) = (dS/d\lambda) / S_{550}$$

6-15 %/10² nm

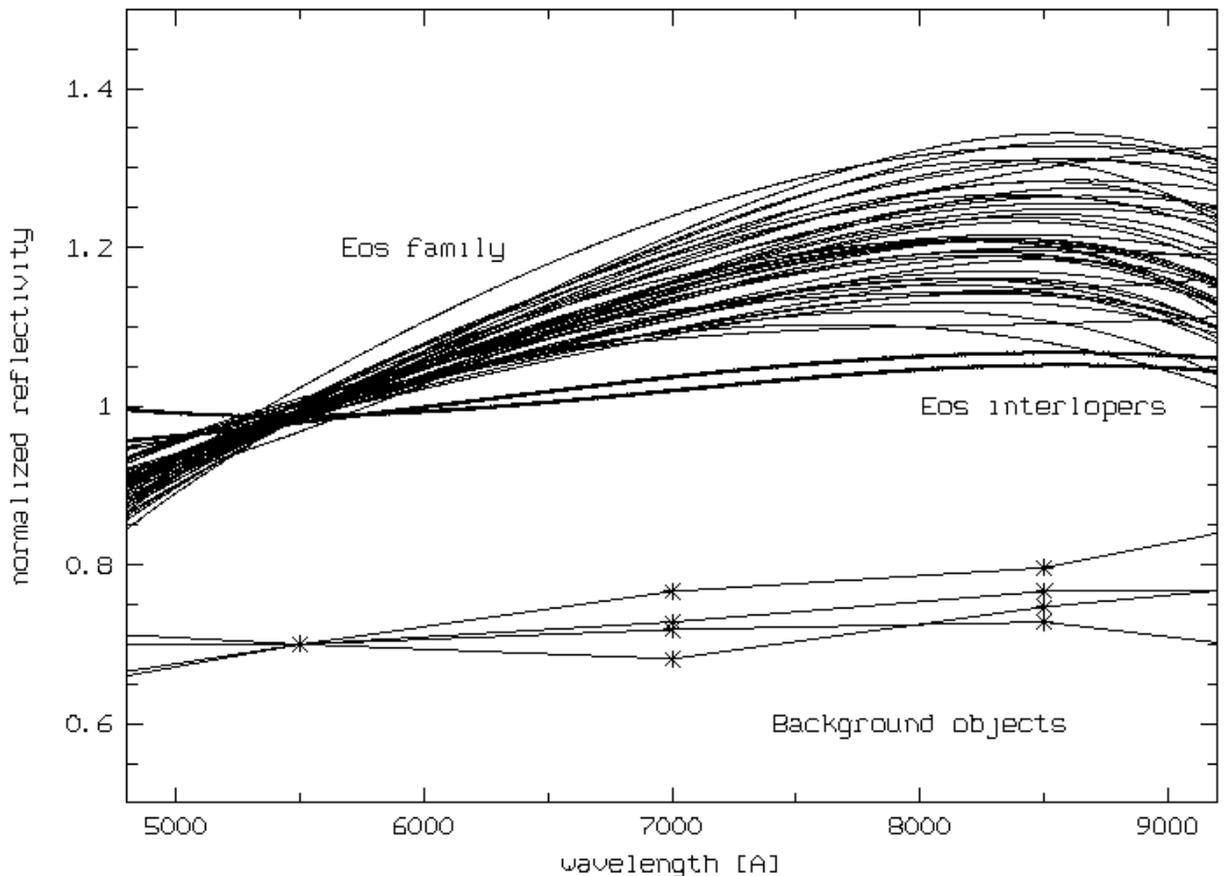
Résultats

- ② **Maximum des spectres compris entre 800-850nm** →
empreinte digitale de la famille de Eos.



Résultats

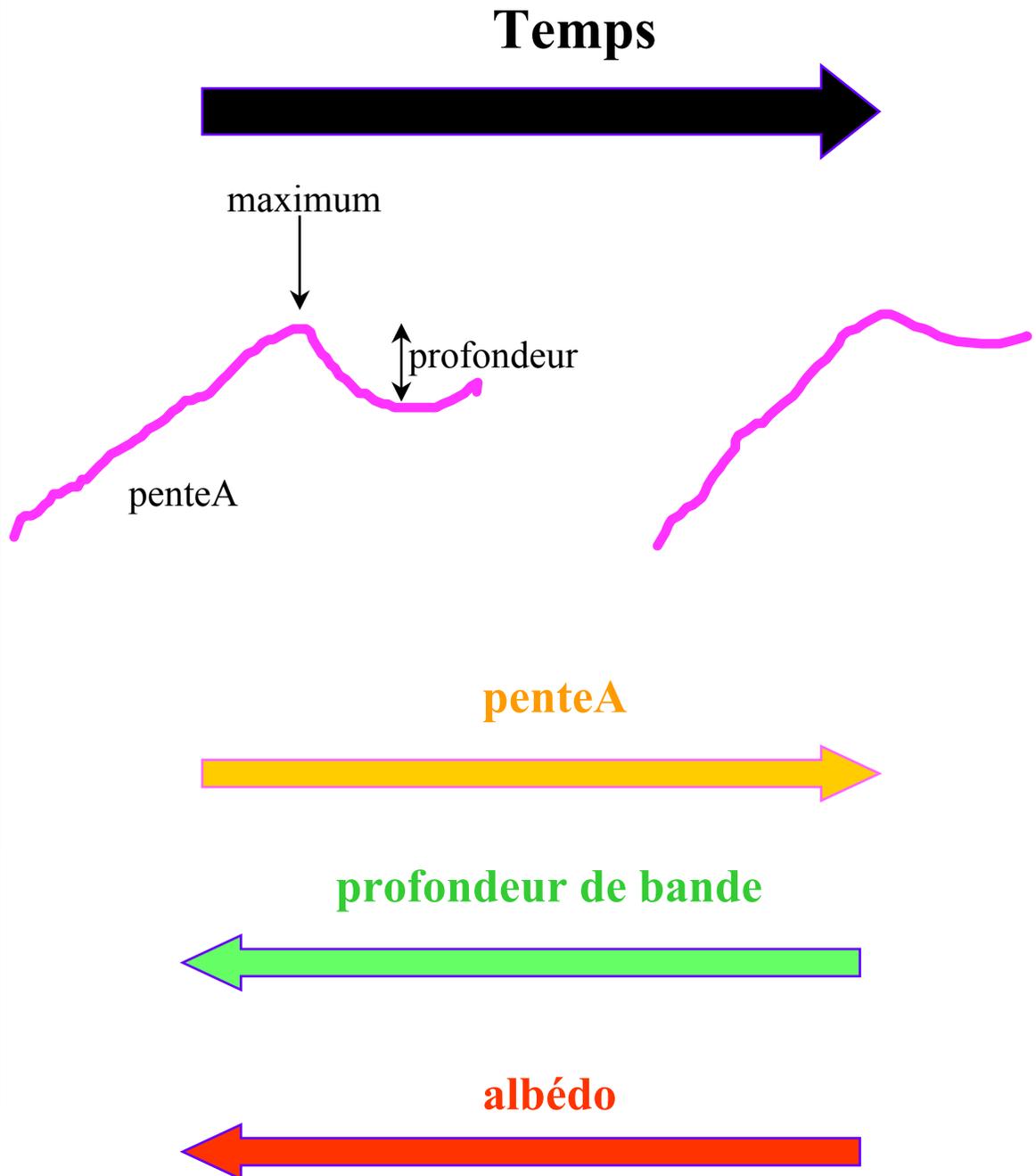
- ③ **Deux astéroïdes *anormaux* : 1910 Mikkailov et 4455 Ruriko. Intrus à la famille de Eos (de type C similaire aux objets de l'arrière-plan)**



Origine de l'étalement spectral

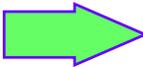
- ① **corps parent d'Eos partiellement différencié.**
- ② **corps parent d'Eos homogène mais effets du *space weathering* ont vieilli les surfaces.**
- ③ **corps parent d'Eos homogène. les effets du *space weathering* ont vieilli les surfaces alors que des collisions secondaires *rajeunissaient* une partie de la famille.**

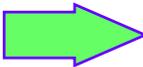
Altération de l'espace (Space Weathering)



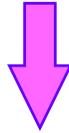
Analyse des paramètres spectraux.

Pas de corrélation entre les paramètres spectraux.

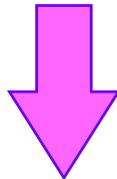
Max  **bande à 1 μm**

 **mixture ol-py**

Max compris entre 800 et 850 nm



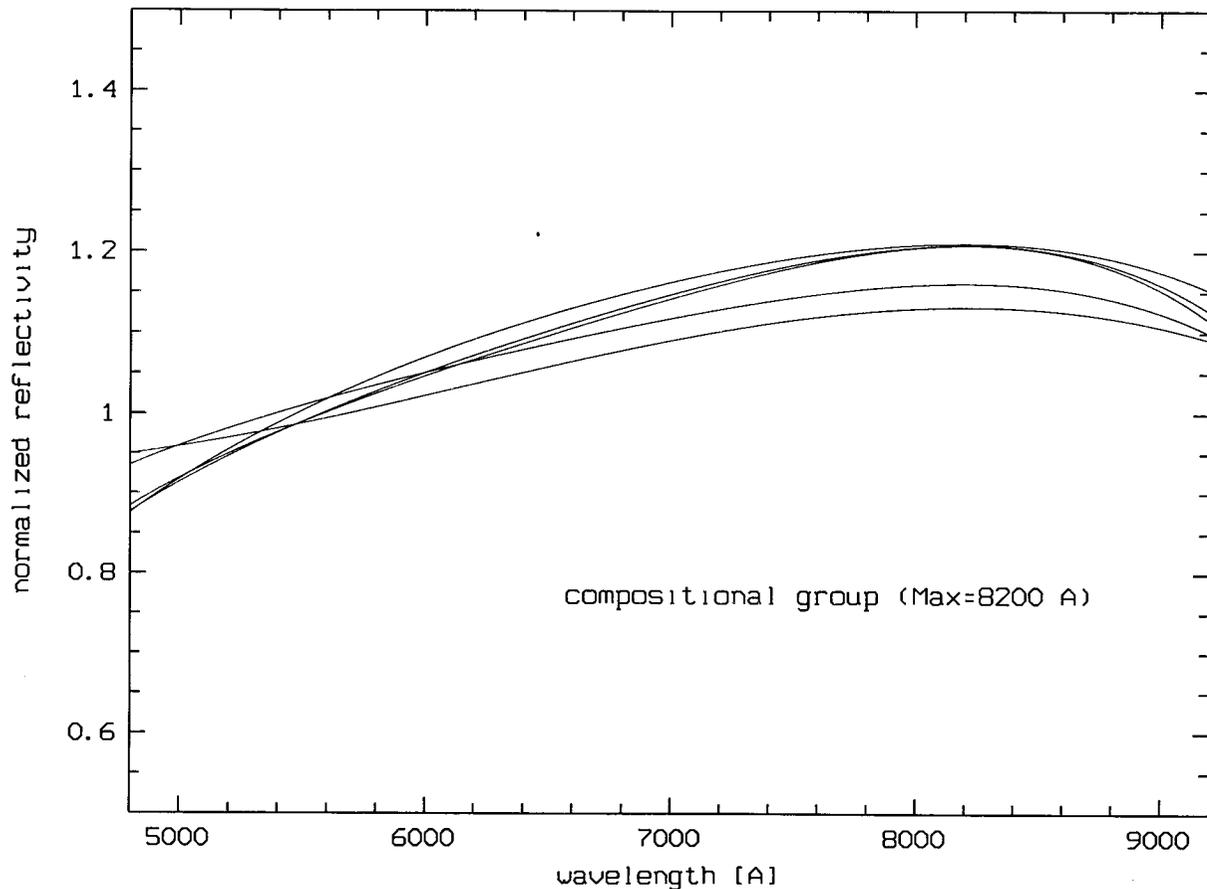
vraie différence de composition.



**Corps parent d'Eos
partiellement différencié**

Rôle du *space weathering*

- ◆ **Space weathering** présent dans un groupe de même composition.

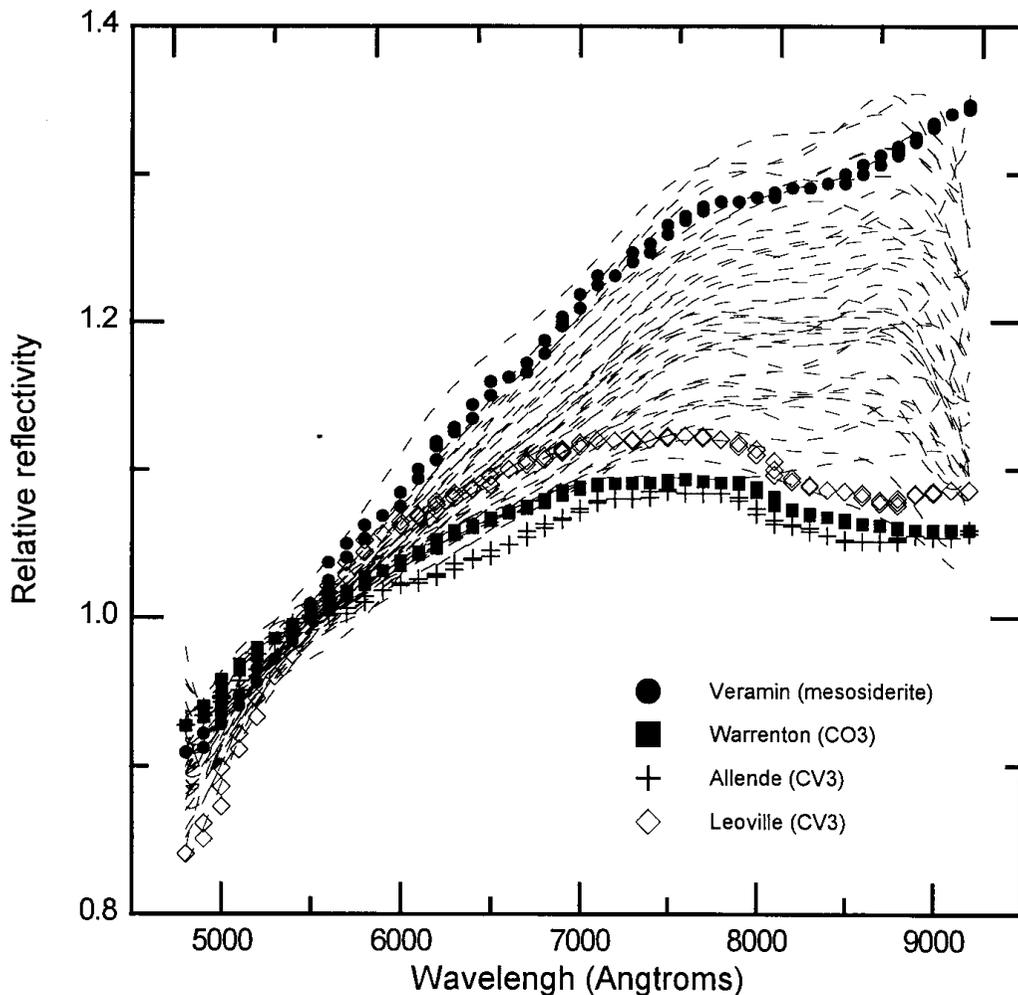


Conclusion :

- **Corps parent d'Eos partiellement différencié**
- **rôle mineur du *Space Weathering***

Comparaison avec les météorites (Gaffey 1976)

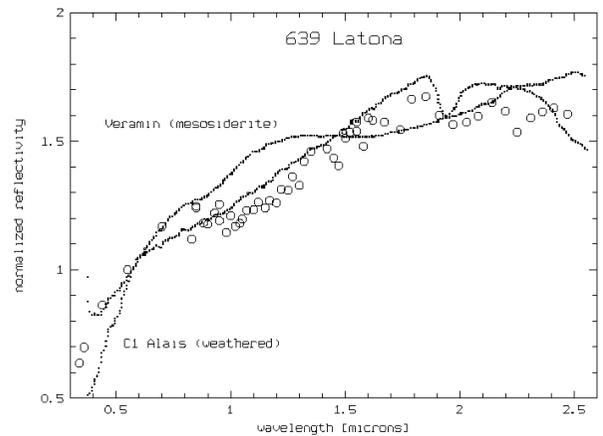
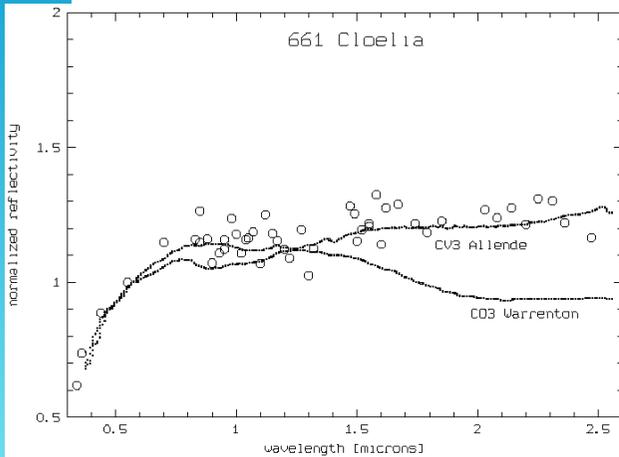
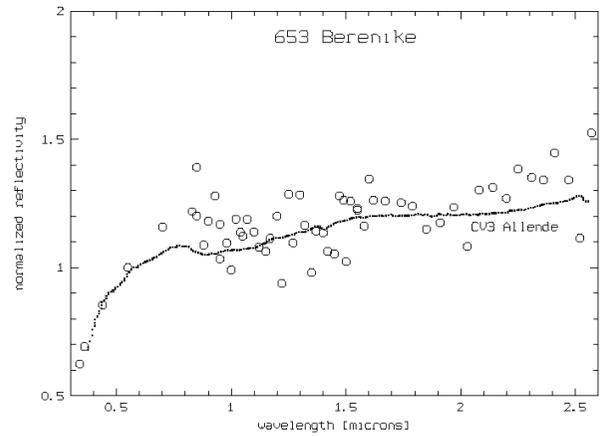
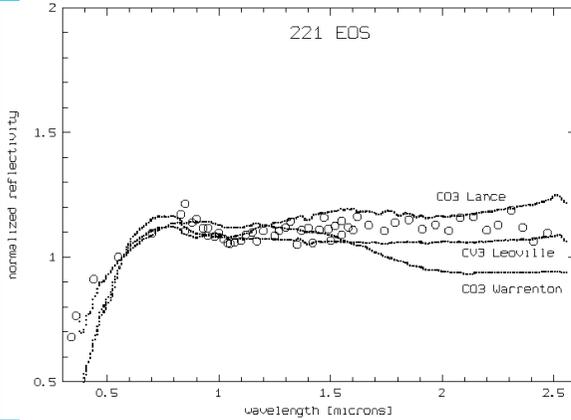
- ◆ **bas de la distribution :**
chondrites carbonées CO/CV
- ◆ **haut de la distribution:**
mésosidérite



Chondrite carbonée



Comparaison dans l'infrarouge



Conclusions sur l'étude de la famille de EOS

- ◆ **lien génétique** : signature spectrale commune et unique.
- ◆ **Deux intrus**
- ◆ **Etalement spectral expliqué par différenciation partielle du corps parent d'Eos. Rôle mineur du *space weathering*.**
- ◆ **Analogie météoritique : chondrites carbonées CO/CV. Matériau très sombre et primitif.**

Ida et Dactyl



Collision catastrophique

Coopération internationale sur les collisions dans le système solaire.

- ◆ $M_{\text{gros fragment}}/M_{\text{corps parent}} < 0,5$
- ◆ **Physique des collisions encore mal comprise.**
- ◆ **expériences de laboratoire**



lois d'échelle

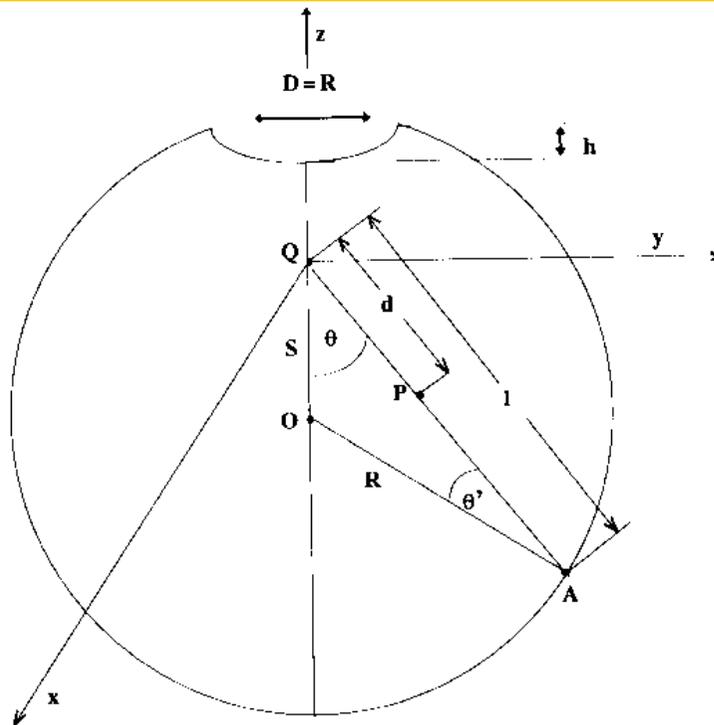


cas astéroïdal

Le modèle semi empirique (MSE) Paolicchi et al. 1989, 1996

- ◆ **Repose sur l'exploitation d'un champ de vitesse défini dans la cible.**

$$\vec{V}(P) = \vec{V}_R + \vec{V}_F = \omega_0 \times \vec{OP} + \alpha l^{-\gamma} (d/l)^\delta \langle \hat{QP} \rangle$$



**reproduit bien les résultats
expérimentaux et les observations**

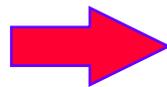
Paramètres du modèle

$$\vec{V}(P) = \vec{V}_R + \vec{V}_F = \omega_0 \times \vec{OP} + \alpha l^{-\gamma} (d/l)^\delta \langle \hat{QP} \rangle$$

- ◆ **R (km) rayon de la cible**
- ◆ **ε (Merg/g) densité d'énergie**
- ◆ **ρ (g/cm³) masse volumique**
- ◆ **α (m/s) \Leftrightarrow énergie de l'impact**
- ◆ **δ exposant dans champ de vit**
- ◆ **γ idem**
- ◆ **Φ_{deep} point d'irradiation**
- ◆ **ω_0 (rad/s) rotation initiale**
- ◆ **A paramètre de Davis**

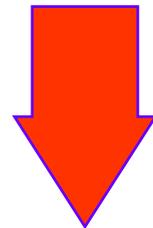
Rôle des paramètres

◆ α **grand**



**évasion des
fragments**

◆ ε **et A** **petits**

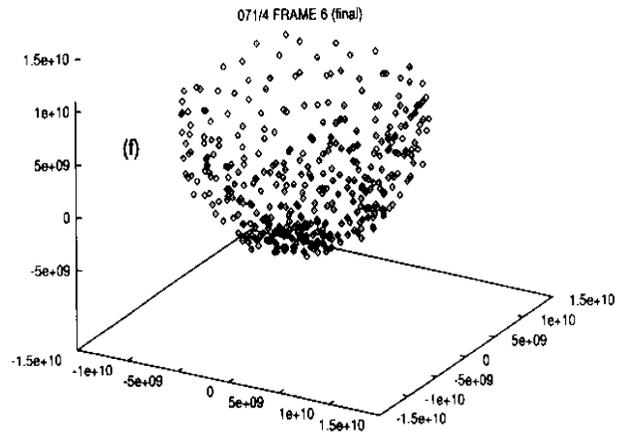
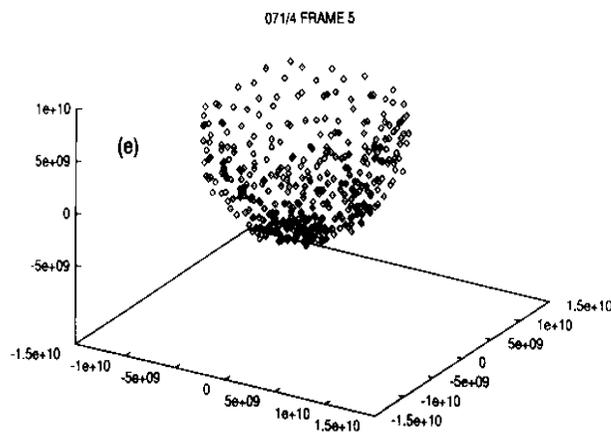
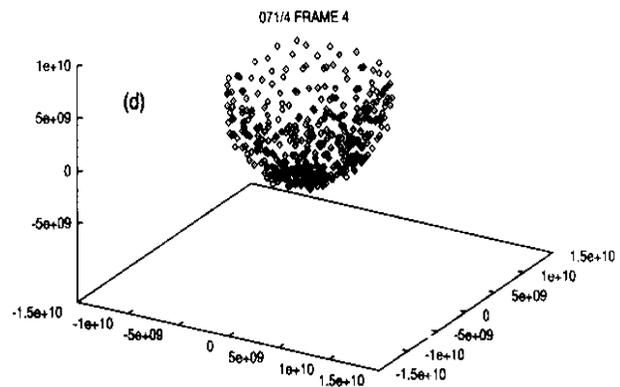
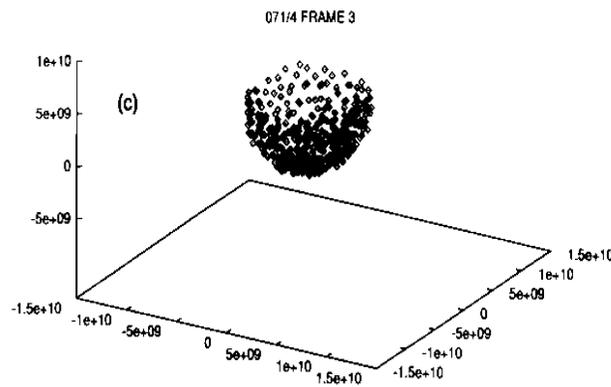
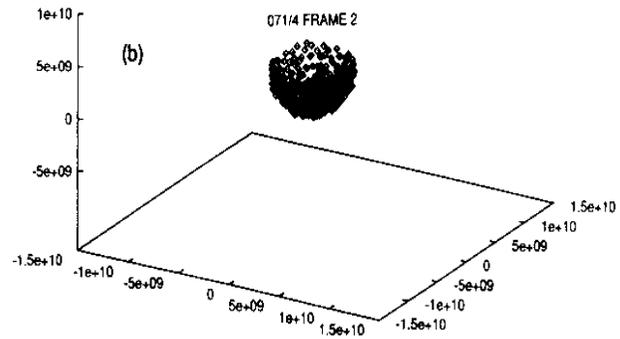
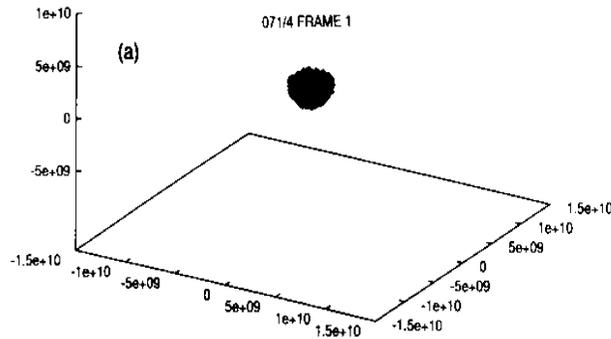


**peu de
réaccumulation**

Le modèle

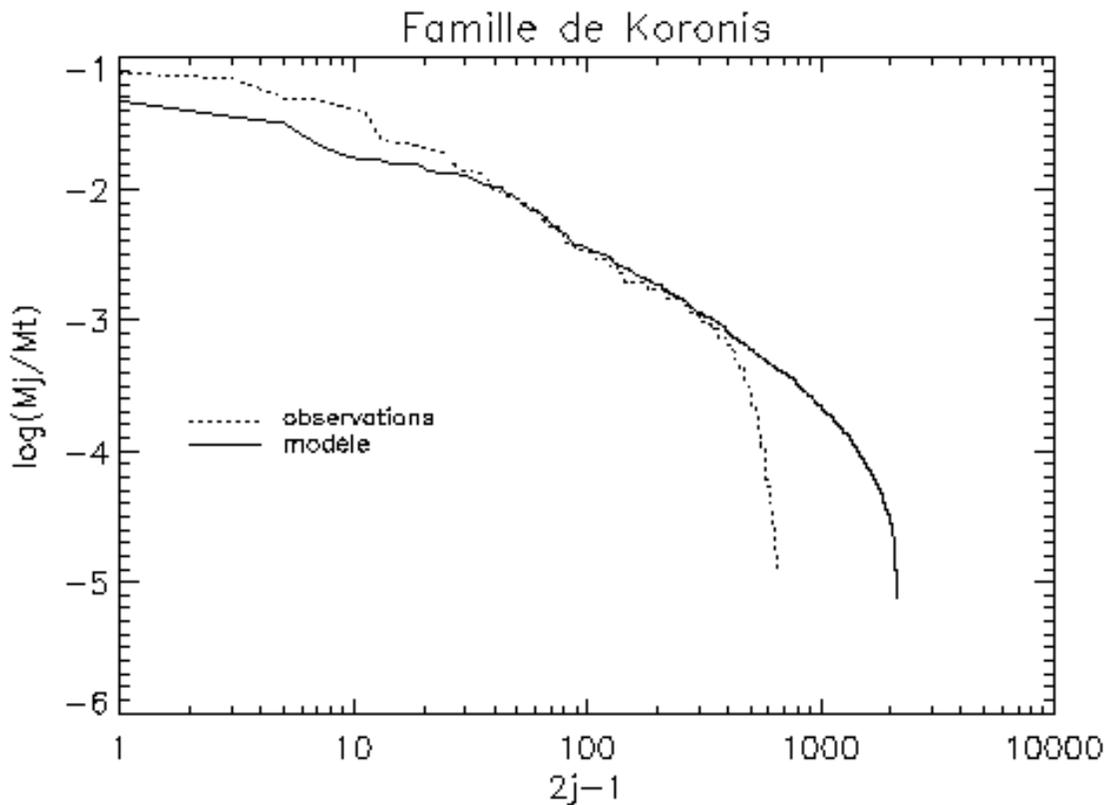
- ◆ **Evolution dynamique des fragments sous l'effet de leurs interactions gravitationnelles.**
- ◆ **Intégrateurs (=> RK4)**
- ◆ **quadripôle gravitationnel**
- ◆ **rotation des fragments => intersection d'ellipsoïdes**
- ◆ **intégration sur 20 jours**
- ◆ **temps de calcul**
 - **500 à 2000 fragments**
 - **quelques heures à ~10 jours de temps CPU sur une *station alpha 500/500***

Evolution du nuage de fragments



Famille de Koronis synthétique

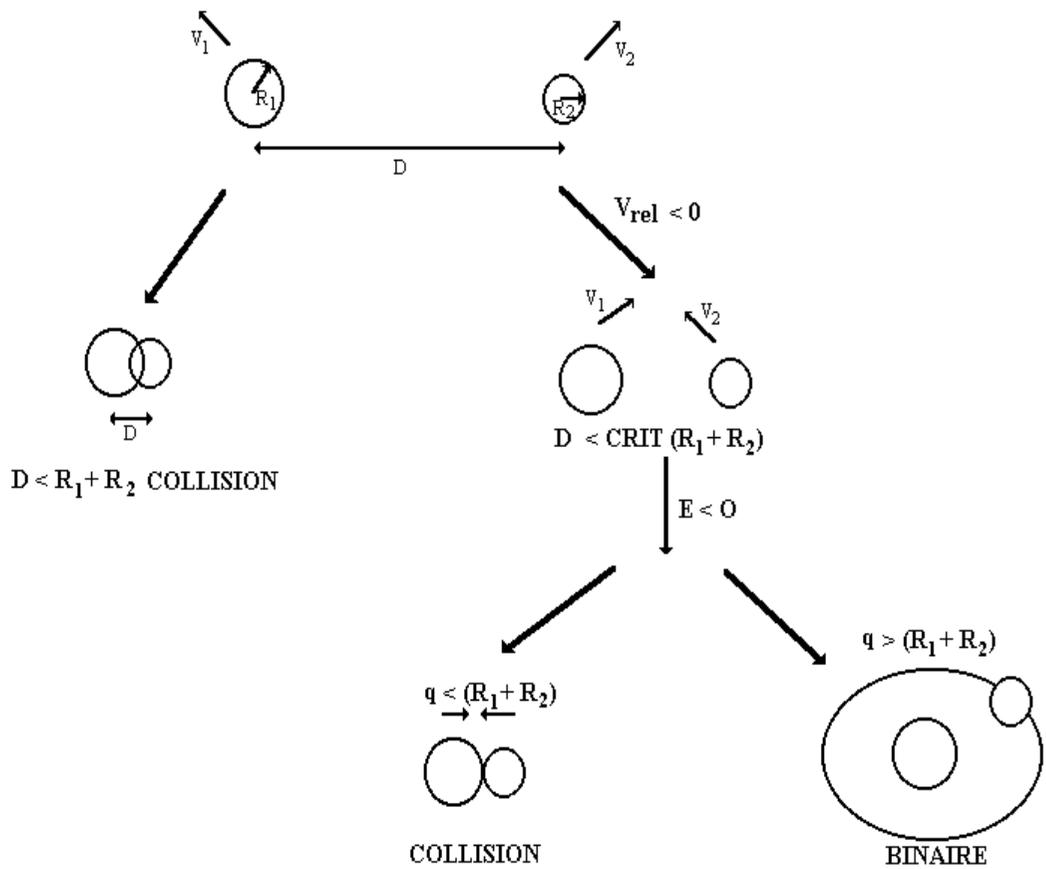
- ◆ **R=60 km, $\varepsilon = 1,0$ Merg/g, $\alpha = 208$ m/s. => 1054 fragments**



Scénarios de formation de systèmes binaires

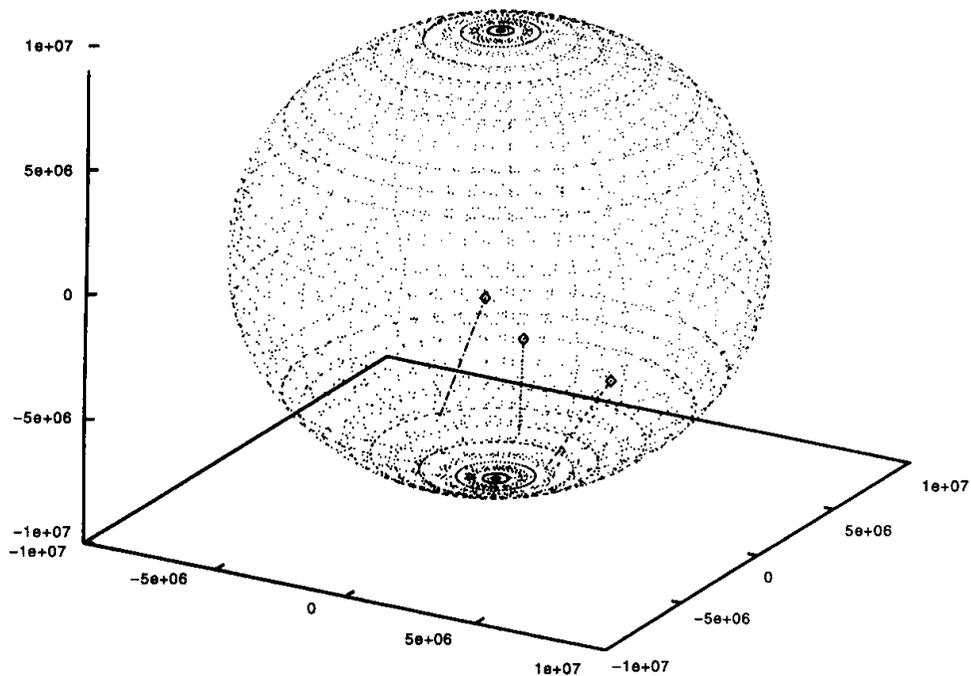
- ◆ **fission par rotation d'un *rubble pile***
- ◆ **impact cratérisant. Les éjectas peuvent former des orbites stables.**
- ◆ **capture**
- ◆ **fission par effet de marée**
- ◆ **collision catastrophique**

Test collision-binaire



Résultats et conclusions

- ① formation de systèmes binaires **POSSIBLE** (environ 1% des fragments).
- ② Ce % dépend fortement du degré de réaccumulation.



Résultats et conclusions

- ③ **Composantes de binaires pas nécessairement en contact.**
- ④ **Plusieurs binaires temporaires formés. Possibilités de systèmes multiples.**
- ⑤ **Grandes excentricités. Devenir des binaires difficile à estimer.**

Missions spatiales

NEAR



- ◆ **NEAR (NASA) lancée le 17/02/1997**
- ◆ **Survole de 253 Mathilde et étude d'un an de 433 Eros**
- ◆ **Objectifs : propriétés physiques, minéralogie, distribution de masse, champ magnétique.**

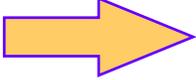
253 Mathilde

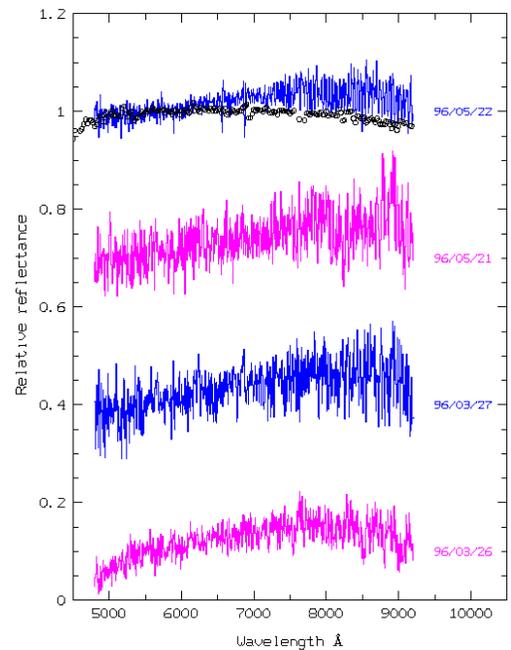
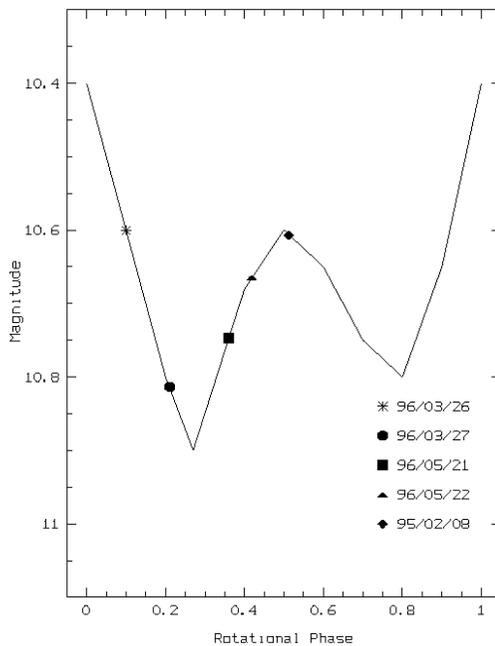
- ◆ **survolé par NEAR le 27/06/1997**
- ◆ **diam. : 52 km pér. : 17,4 jours**
- ◆ **Préparation de la mission : spectres visibles.**



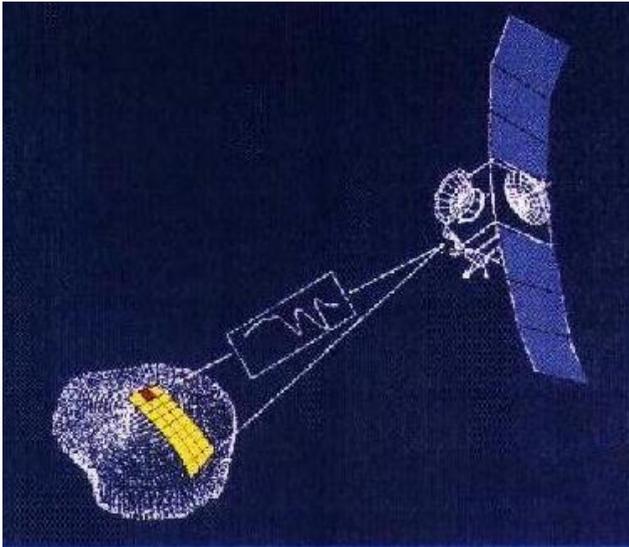
Résultats

obtenus avant le survol

- ◆ 4 spectres similaires  surface très homogène suivant les longitudes.
- ◆ Résultats par la suite confirmés par la sonde



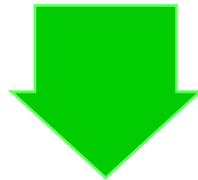
ROSETTA



- ◆ **Objectif : investigation de la matière primordiale du système solaire.**
- ◆ **rendez-vous avec P/Wirtanen**
- ◆ **survol de 3840 Mimistrobell et 2703 Rodari.**

Observations

- ◆ **Astéroïdes sélectionnés de type S. Les astéroïdes survolés par Galileo de type S aussi.**



nécessité de rechercher d'autres candidats.

- ◆ **13 astéroïdes candidats possibles à la mission.**

Résultats

ast.	diam.(km)	classe
140 Siwa	110	C
732 Tjilaki	38	C
1071 Brita	50	C
1515 Perrotin	9	S
1992 Galvarino	5-9	EM
2446 Lunacharsky	16	C
3057 Malaren	6	S
3103 Eger	2	E
3328 1985 QD1	14	S
3837 Carr	8	S
4258 Ryazanov	14	S
5224 Abbe	8	C
6173 1983 AD	8	S

Meilleur choix : 140 Siwa

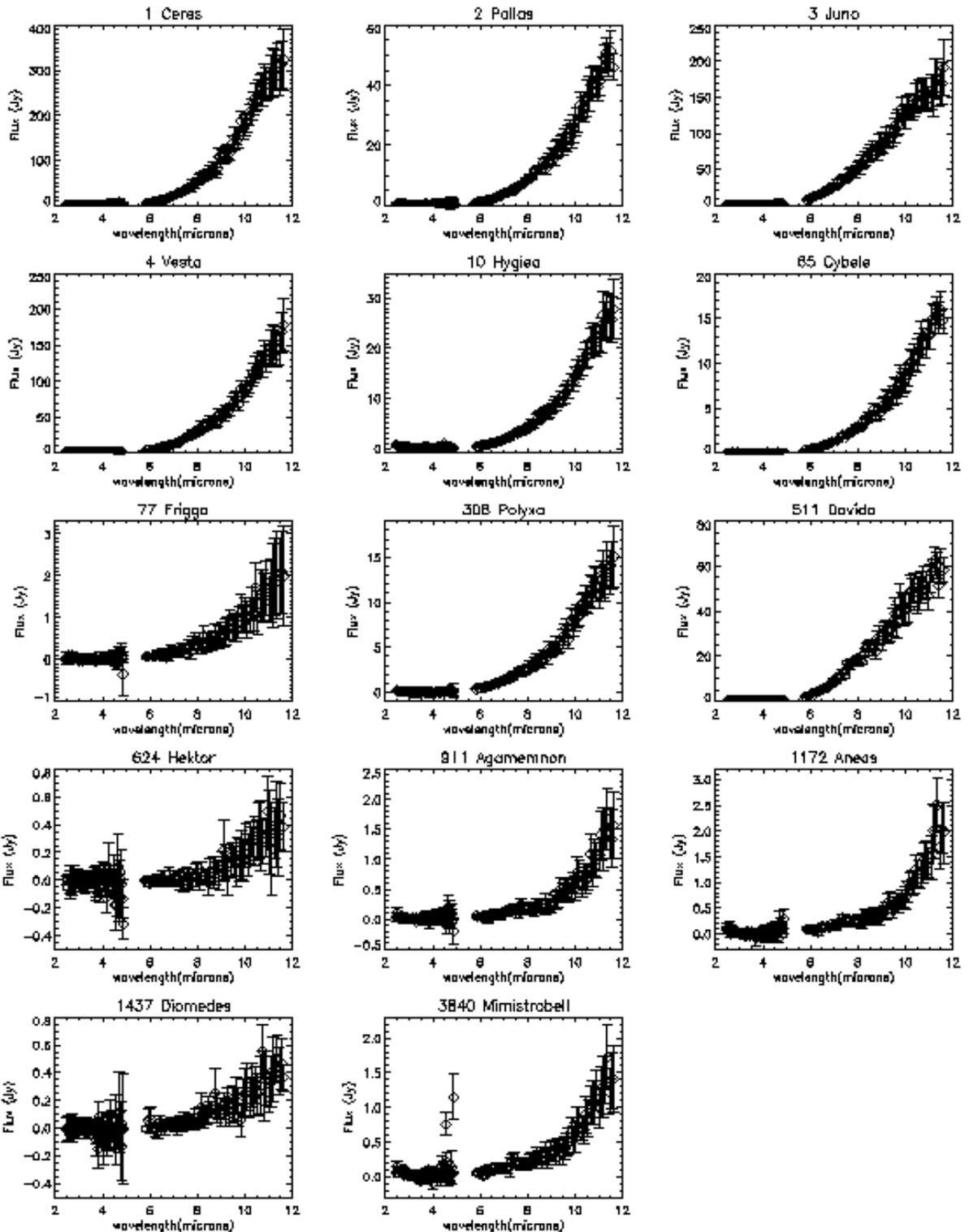
⇒ **type C**

⇒ **grande taille**

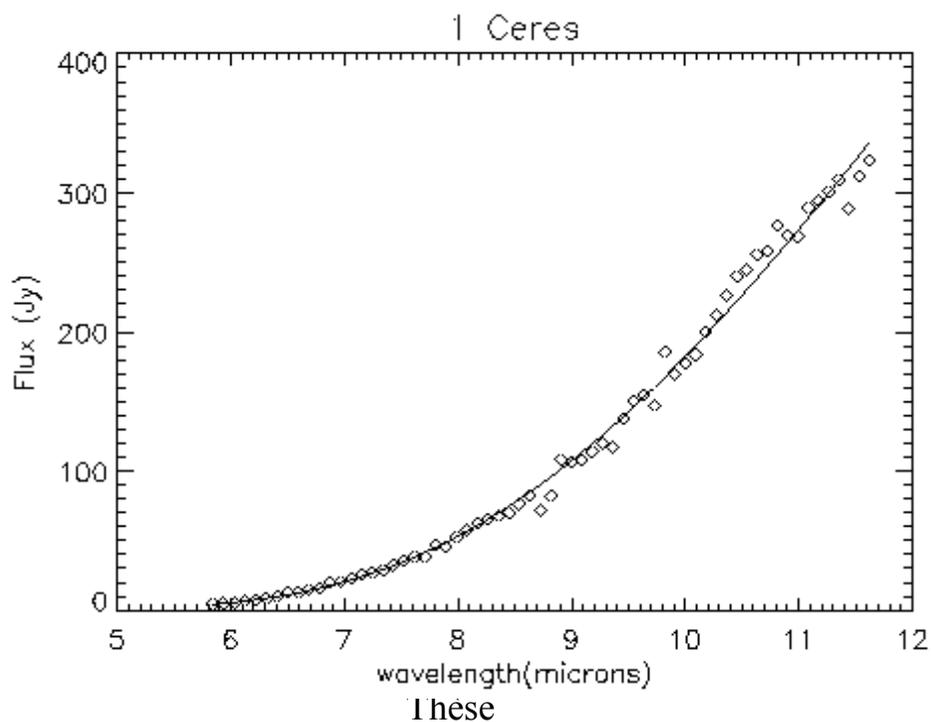
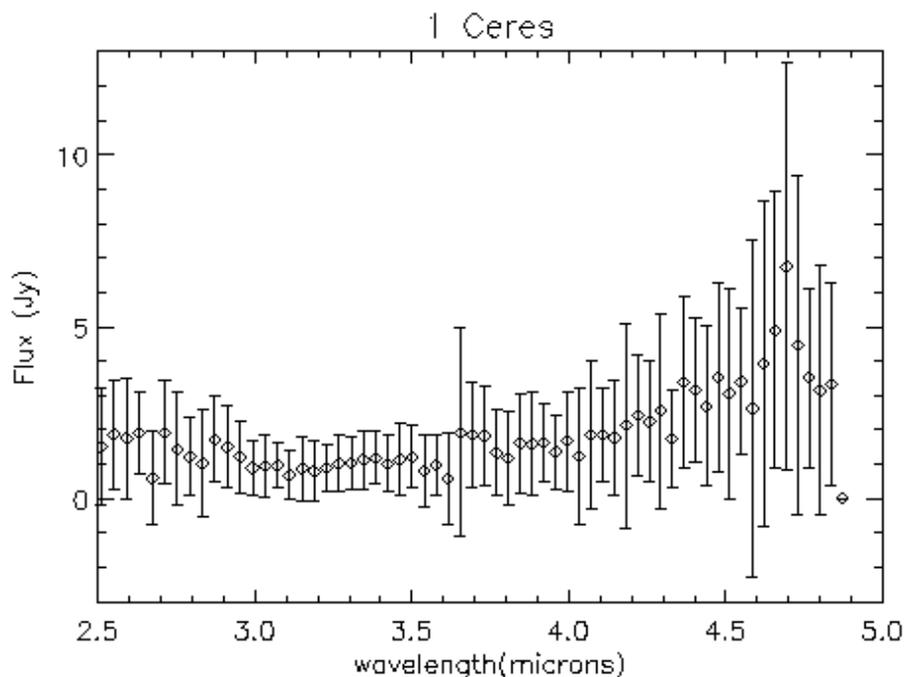
Observations ISO (satellite infrarouge)

- ◆ **Données uniques : 2,5-45 μm .**
Programmes **ASTEROID, ASTEROI2**
AROSSETTA et GALSAT
- ◆ **domaine IR riche en signatures spectrales des minéraux et des glaces.**
- ◆ **Données en cours d'analyse.**
- ◆ **Problèmes de calibration.**
- ◆ **Objectifs :**
 - **Minéralogie des surfaces**
 - **Modèle thermique pour déterminer a , D , T .**

Spectres PHT-S



Spectre PHT-S de 1 Cérés



Conclusions (1)

◆ Famille de EOS

- Signature unique
- petite différentiation du corps parent d'Eos
- *Space weathering* => présent mais mineur
- EOS \Leftrightarrow chondrites carbonées CO/CV

◆ Processus de collision

- formation de binaires possible.

Conclusions (2)

◆ Missions spatiales

- **NEAR.** La surface de 253 Mathilde est très homogène.
- **ROSETTA.** 140 Siwa est le meilleur candidat de par sa taille et son type spectral
- **ISO.** Données IR uniques : 2,5-45 μm . Permettront composition détaillée et modèle thermique (albédo, diamètre)

Perspectives

- ◆ **Contraindre le modèle des collisions par l'observation des familles (distribution de taille, spin,...).**
- ◆ **Etude minéralogique des familles <=> lien génétique stratigraphie du corps parent**
- ◆ **Etude du «space weathering» (en laboratoire, effet sur la surface).**
- ◆ **Analyse des données ISO (modèle thermique, minéralogie de surface).**