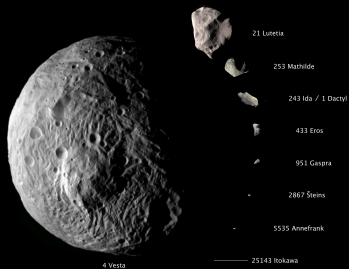


Les astéroïdes, de la lunette à la 3D



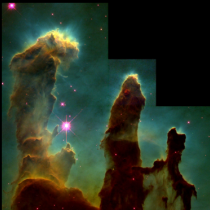
B. Carry

Lagrange, Observatoire de la Côte d'Azur

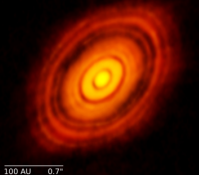
1. Formation planétaire
2. Dynamique
3. Composition
4. Propriétés physiques
5. Histoire du système solaire

1. Formation planétaire
2. Dynamique
3. Composition
4. Propriétés physiques
5. Histoire du système solaire

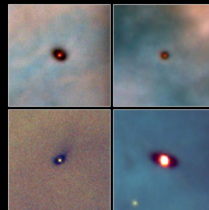
Formation planétaire: Résumé



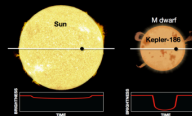
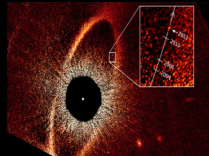
HL Tau
ALMA



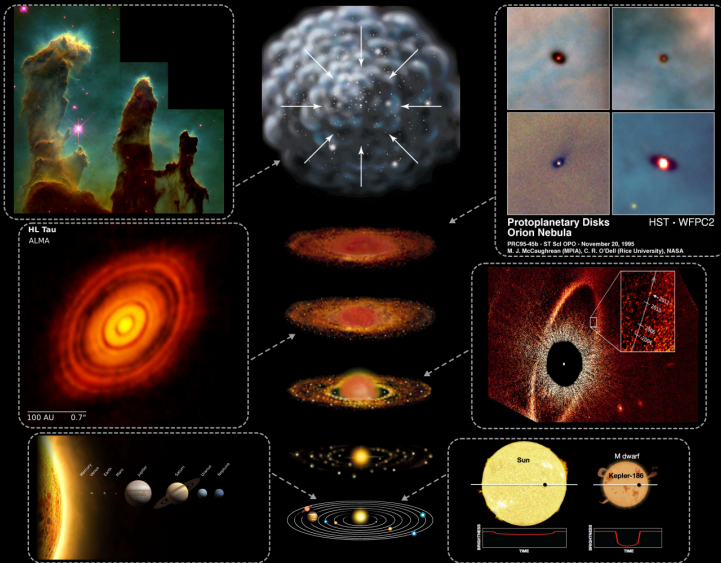
100 AU 0.7"



Protoplanetary Disks
Orion Nebula
HST - WFPC2
PRC95-45b - ST ScI OPD - November 20, 1995
M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA



Formation planétaire: Résumé



Formation planétaire: Petits corps

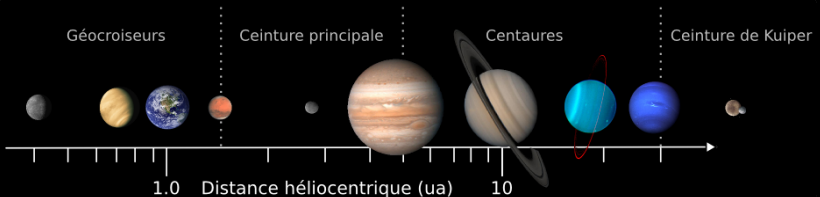
1. Population importante

- 750 000 objets (*plusieurs millions*)
- Large gamme de distances héliocentriques [1 → 100 000 ua]
- Large gamme de compositions [roches → glaces]

2. Population primitive

- **Petits** objets [m → 1000 km]
- Énergie interne \approx nulle
- Pas d'activité endogène

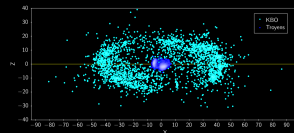
▷ Témoins *directs* du jeune Système Solaire



Formation planétaire: Petits corps

1. Étude de la dynamique

- Distribution orbitale
- Orbites inclinées & excentriques
- ▶ Traces d'évènements dynamiques



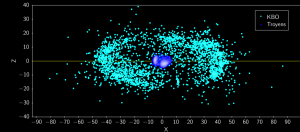
2. Étude de la composition

3. Études des propriétés physiques

Formation planétaire: Petits corps

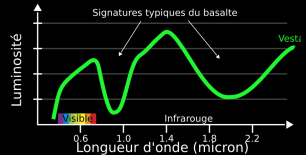
1. Étude de la dynamique

- Distribution orbitale
- Orbites inclinées & excentriques
- ▶ Traces d'évènements dynamiques



2. Étude de la composition

- Composition de surface
- Liens avec météorites
- ▶ Moment et lieu de formation

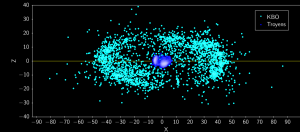


3. Études des propriétés physiques

Formation planétaire: Petits corps

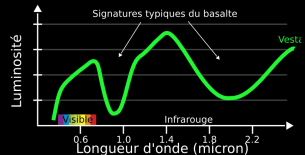
1. Étude de la dynamique

- Distribution orbitale
- Orbites inclinées & excentriques
- ▶ Traces d'évènements dynamiques



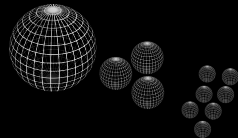
2. Étude de la composition

- Composition de surface
- Liens avec météorites
- ▶ Moment et lieu de formation



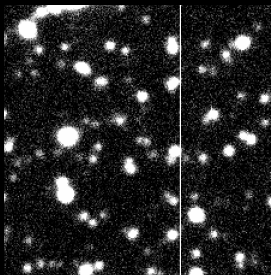
3. Études des propriétés physiques

- Distribution en taille (D), spin
- 1000x plus d'objets à l'origine
- ▶ Mécanismes d'évolution



1. Formation planétaire
2. Dynamique
3. Composition
4. Propriétés physiques
5. Histoire du système solaire

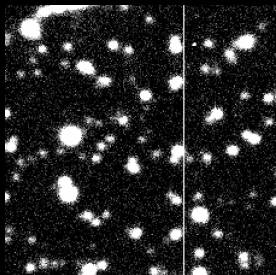
Comment détecter un astéroïde?



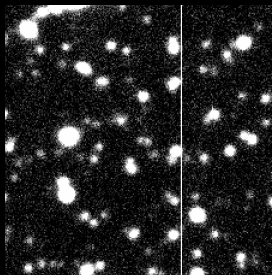
Instant t

Où est l'astéroïde?

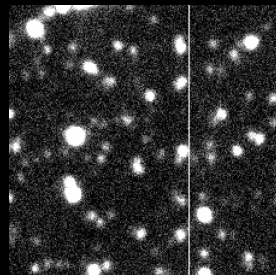
Comment détecter un astéroïde?



Instant $t-1$ min



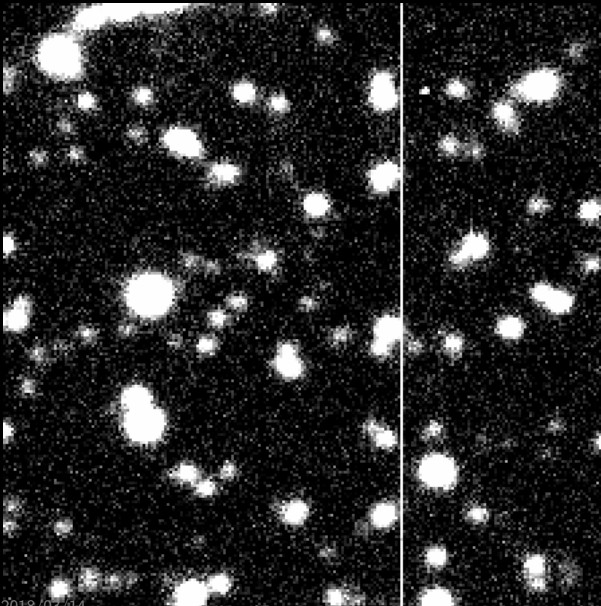
Instant t



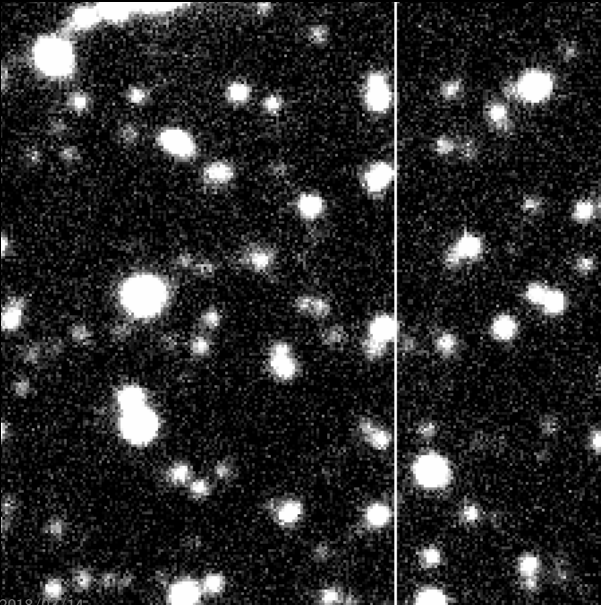
Instant $t+1$ min

Où est l'astéroïde?

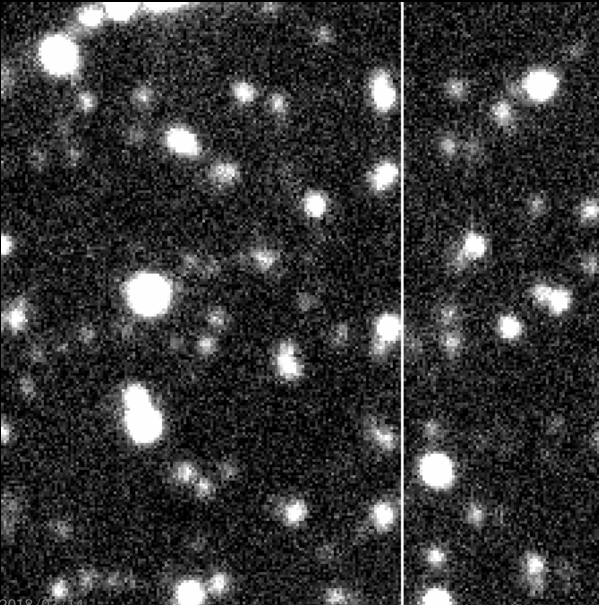
Comment détecter un astéroïde?



Comment détecter un astéroïde?



Comment détecter un astéroïde?



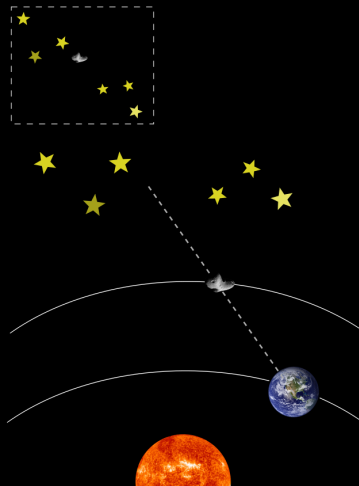
Détermination de l'orbite

1. Mesures de position sur le ciel

2. Détermine l'orbite

- Essai d'orbite
- Orbite vs observations
- Amélioration

► Catalogues d'orbites



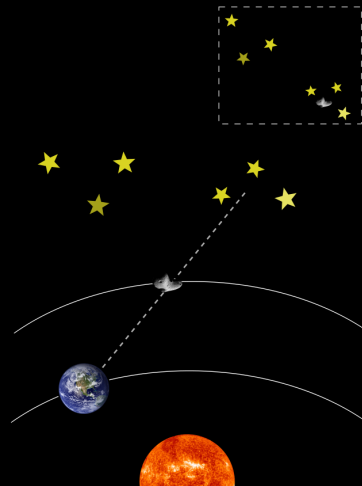
Détermination de l'orbite

1. Mesures de position sur le ciel

2. Détermine l'orbite

- Essai d'orbite
- Orbite vs observations
- Amélioration

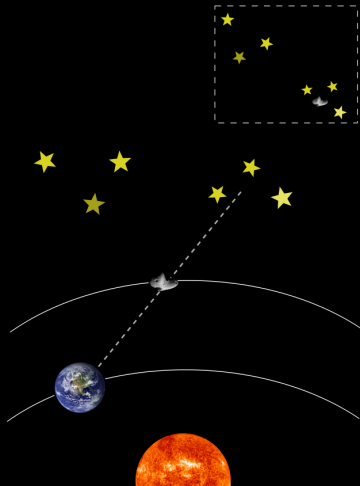
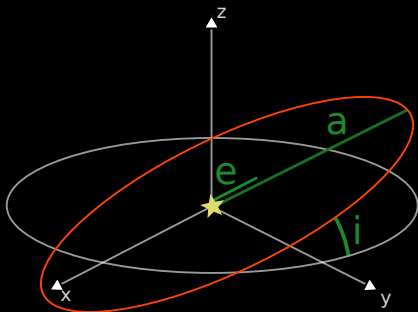
► Catalogues d'orbites



Détermination de l'orbite

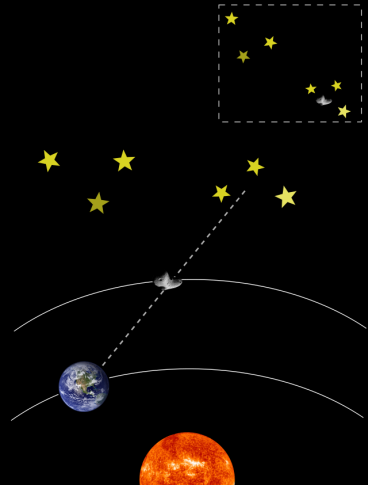
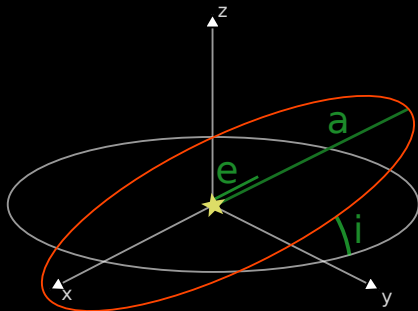
1. Mesures de position sur le ciel
2. Détermine l'orbite
 - Essai d'orbite
 - Orbite vs observations
 - Amélioration

► Catalogues d'orbites

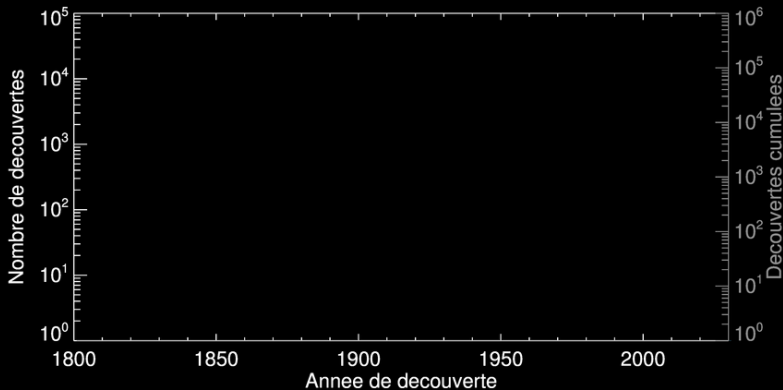


Détermination de l'orbite

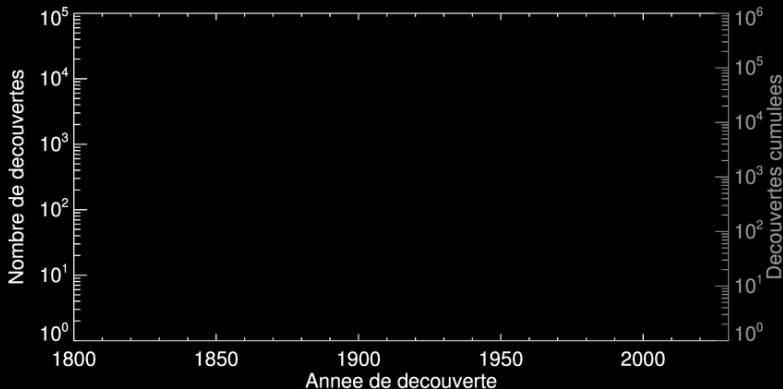
1. Mesures de position sur le ciel
 2. Détermine l'orbite
 - Essai d'orbite
 - Orbite vs observations
 - Amélioration
- Catalogues d'orbites



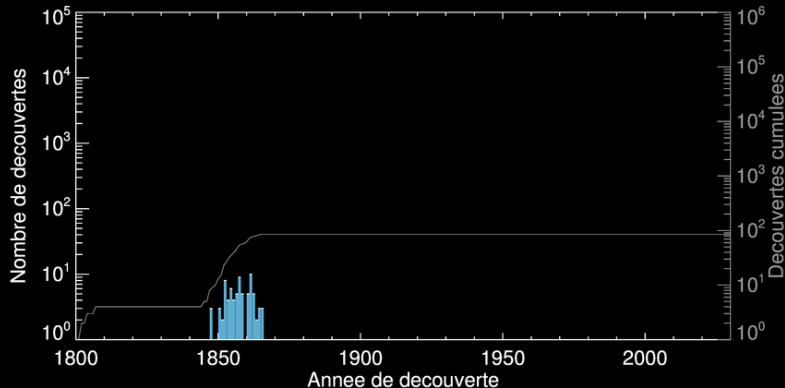
Histoire des découvertes



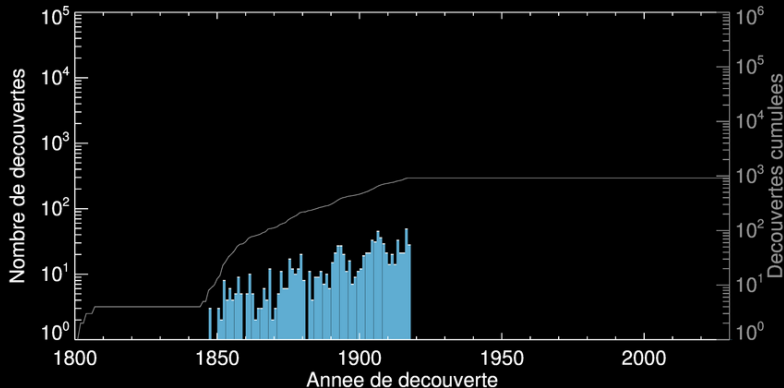
Histoire des découvertes



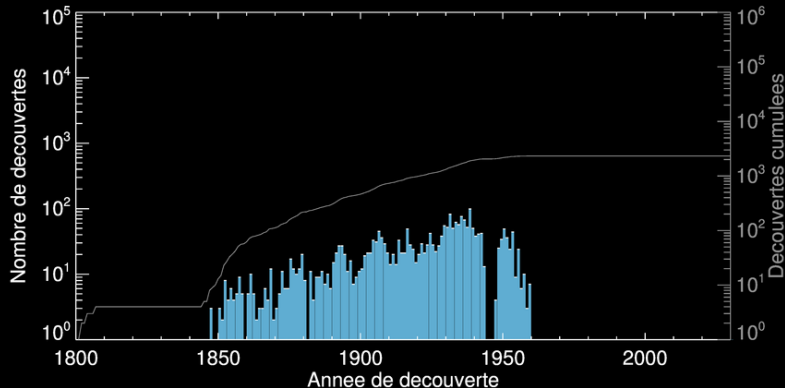
Histoire des découvertes



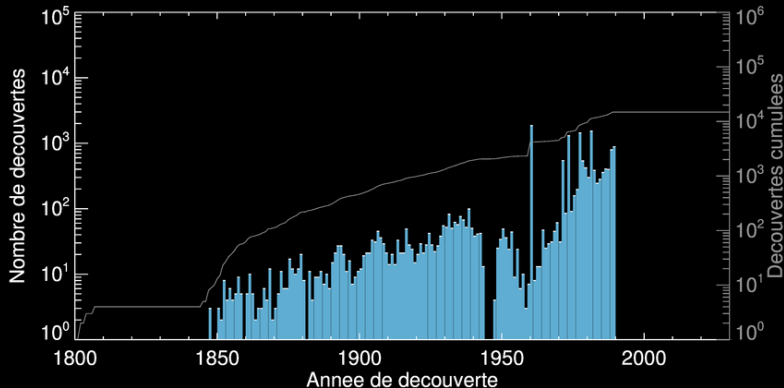
Histoire des découvertes



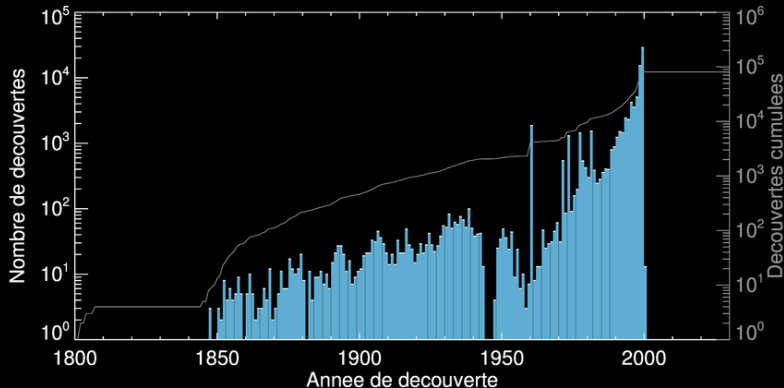
Histoire des découvertes



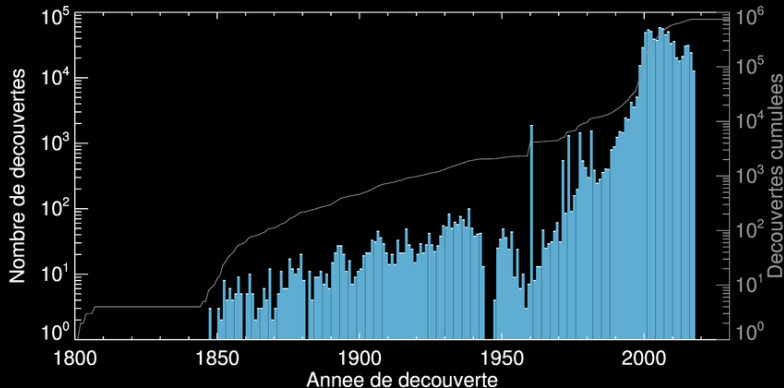
Histoire des découvertes



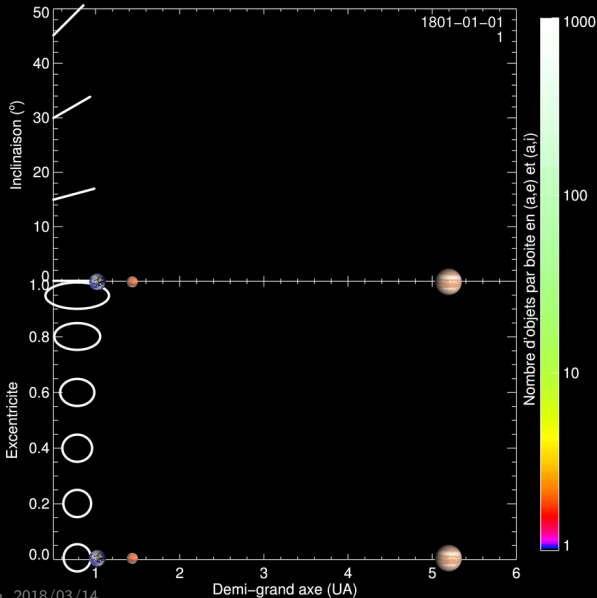
Histoire des découvertes



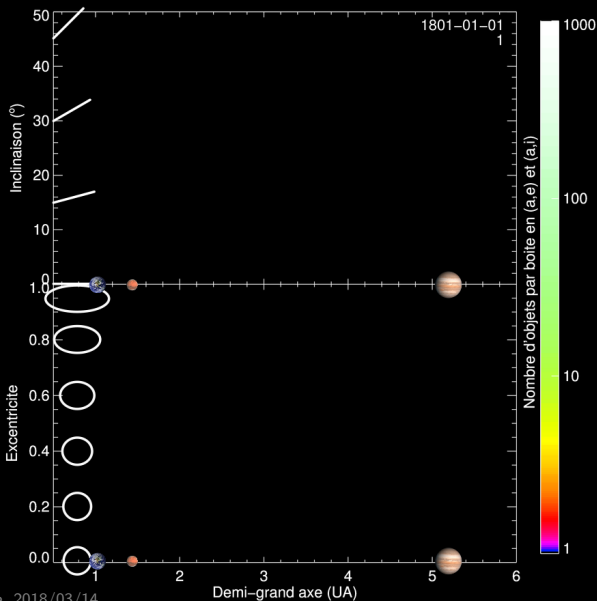
Histoire des découvertes



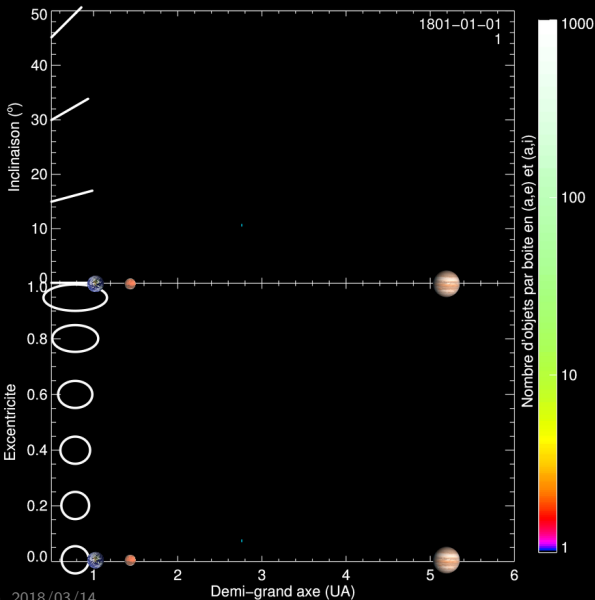
Histoire des découvertes



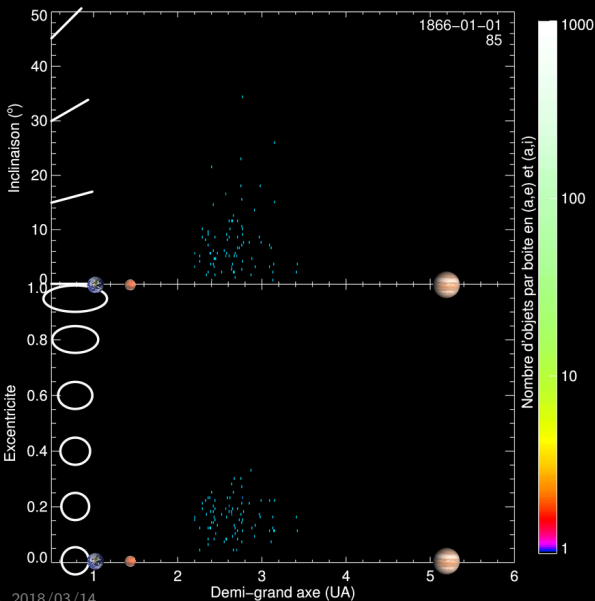
Histoire des découvertes



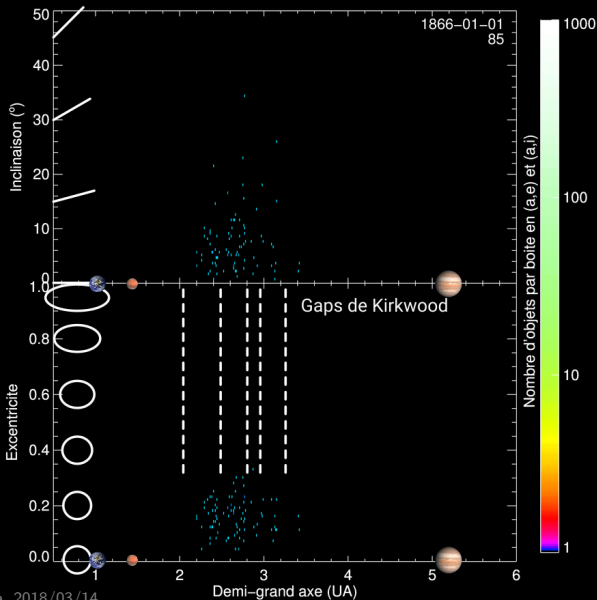
Histoire des découvertes



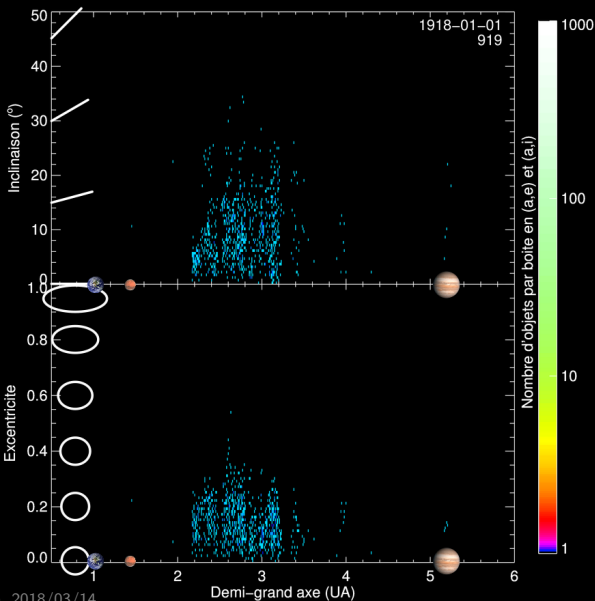
Histoire des découvertes



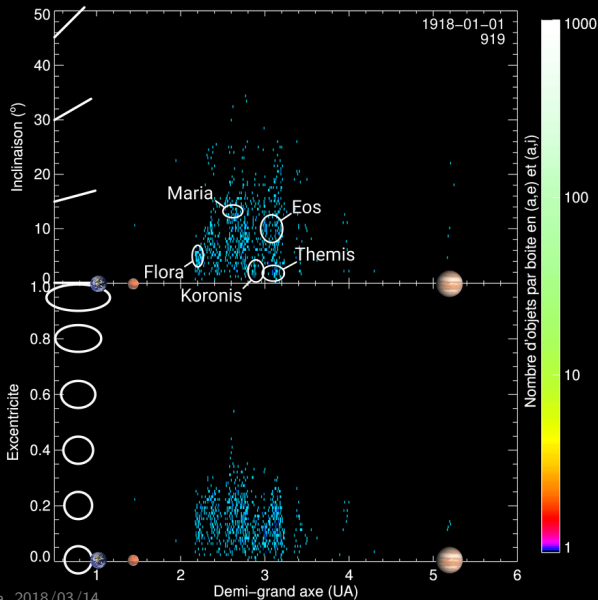
Histoire des découvertes



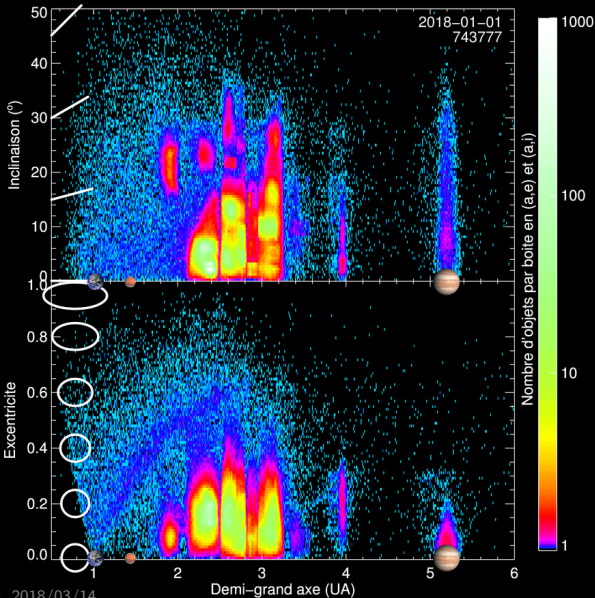
Histoire des découvertes



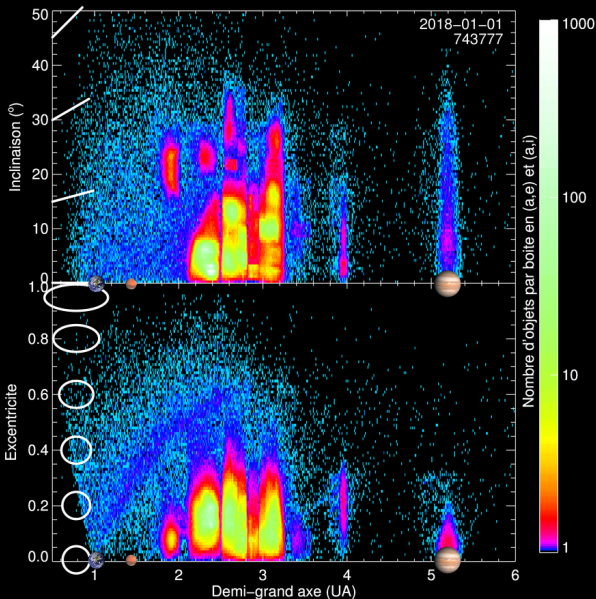
Histoire des découvertes



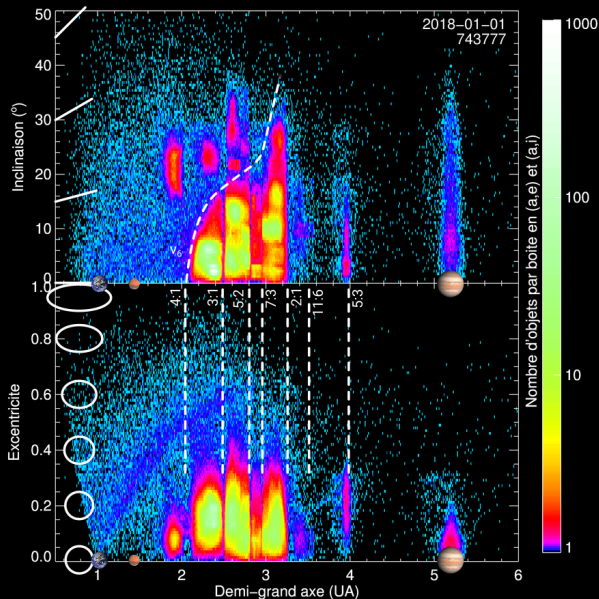
Histoire des découvertes



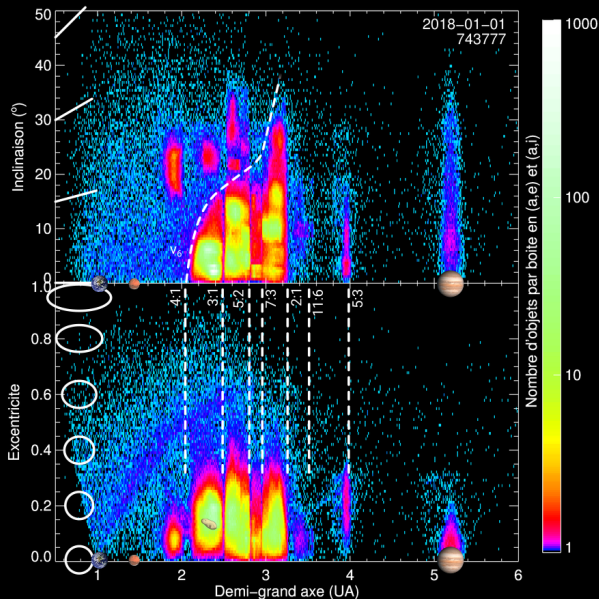
La ceinture d'astéroïdes



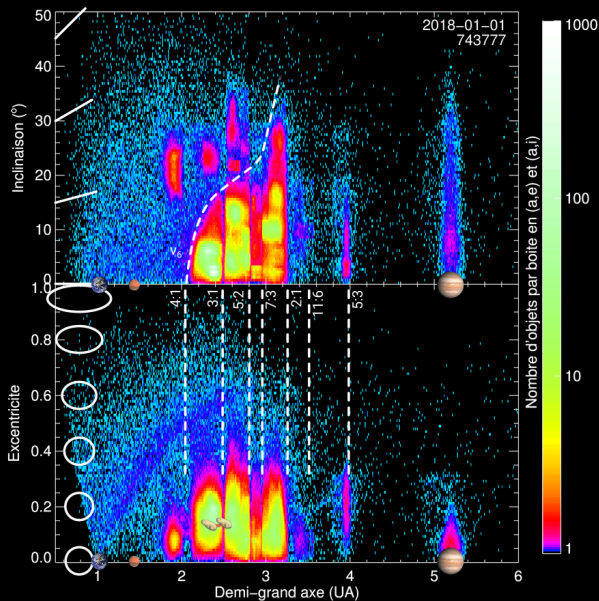
La ceinture d'astéroïdes



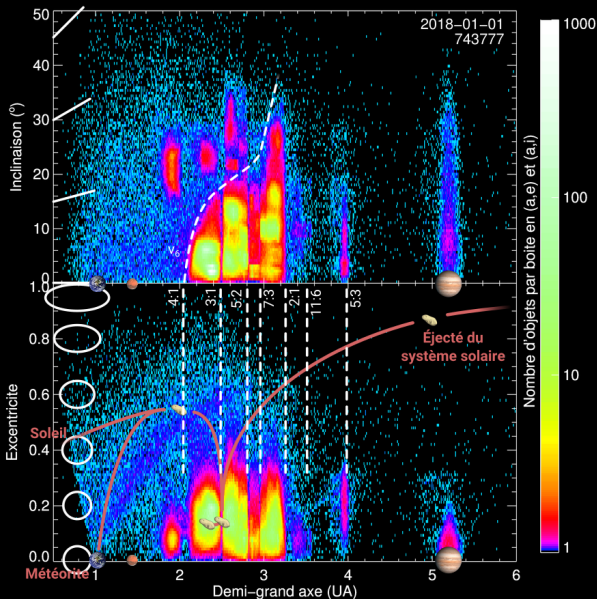
La ceinture d'astéroïdes



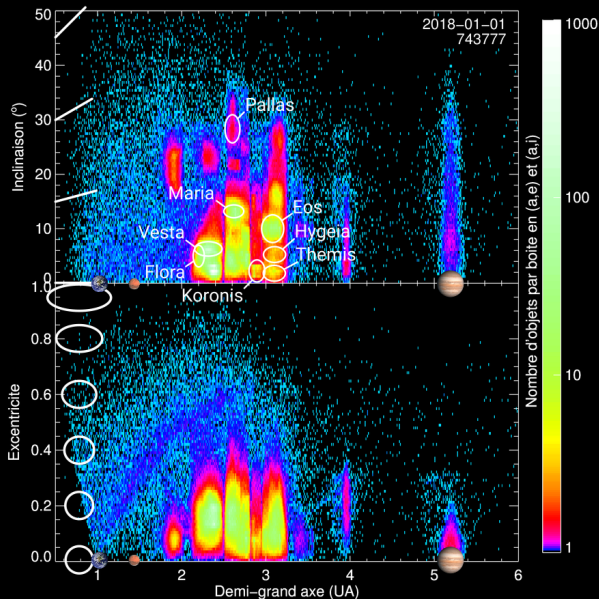
La ceinture d'astéroïdes



La ceinture d'astéroïdes



La ceinture d'astéroïdes

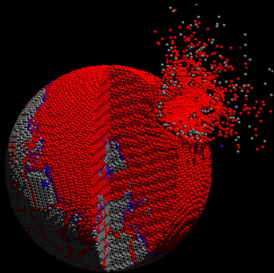


Les familles d'astéroïdes

- Collision et fragmentation
- Érosion de la ceinture
- Distribution particulière
- Effet Yarkovsky



Jason Delay

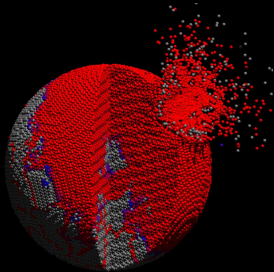


Michel et al. 2001

Les familles d'astéroïdes



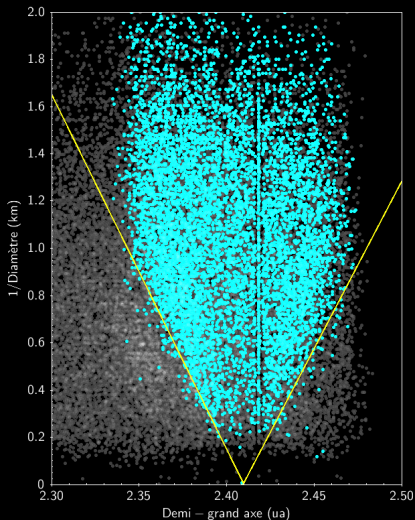
Jason Delay



Michel et al. 2001

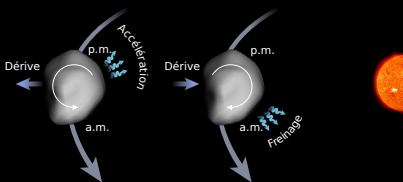
- Collision et fragmentation
- Érosion de la ceinture
 - Destructions des gros
 - Injection de petits
- Distribution particulière
- Effet Yarkovsky

Les familles d'astéroïdes



- Collision et fragmentation
- Érosion de la ceinture
 - Destructions des gros
 - Injection de petits
- Distribution particulière
 - Espace ($a, 1/D$)
 - Forme en V
- Effet Yarkovsky

Les familles d'astéroïdes



- Collision et fragmentation

- Érosion de la ceinture

- Destructions des gros
- Injection de petits

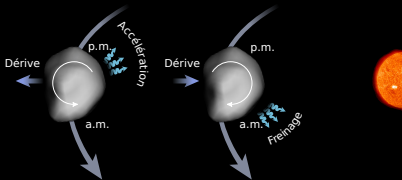
- Distribution particulière

- Espace ($a, 1/D$)
- Forme en V

- Effet **Yarkovsky**

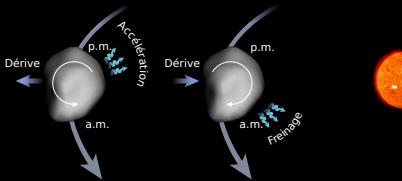
- Diamètre et masse
- Période, spin
- Albédo, inertie thermique

Les familles d'astéroïdes



- Collision et fragmentation
- Érosion de la ceinture
 - Destructions des gros
 - Injection de petits
- Distribution particulière
 - Espace ($a, 1/D$)
 - Forme en V
- Effet **Yarkovsky**
 - Diamètre et masse
 - Période, spin
 - Albédo, inertie thermique

Les familles d'astéroïdes



- Collision et fragmentation

- Érosion de la ceinture

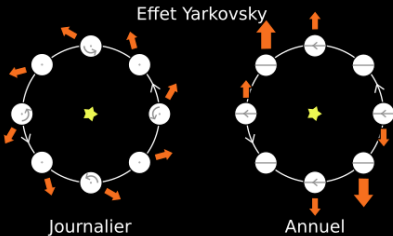
- Destructions des gros
- Injection de petits

- Distribution particulière

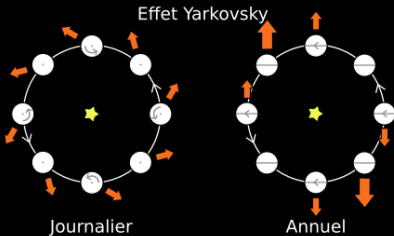
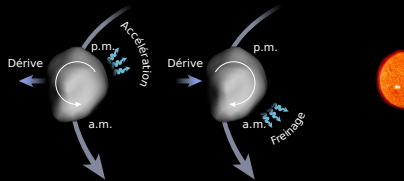
- Espace ($a, 1/D$)
- Forme en V

- Effet **Yarkovsky**

- Diamètre et masse
- Période, spin
- Albédo, inertie thermique
- ...



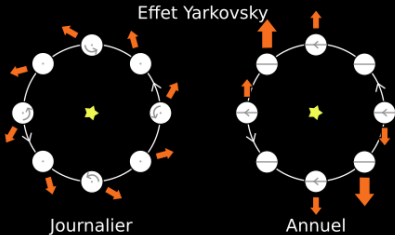
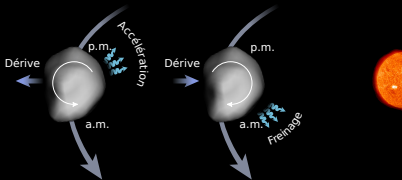
Les familles d'astéroïdes



- Collision et fragmentation
- Érosion de la ceinture
 - Destructures des gros
 - Injection de petits
- Distribution particulière
 - Espace ($a, 1/D$)
 - Forme en V
- Effet **Yarkovsky**
 - Diamètre et masse
 - Période, spin
 - Albédo, inertie thermique

◀ ... ▶

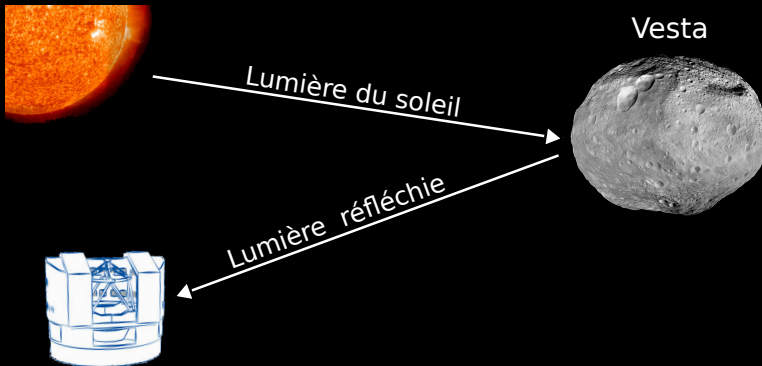
Les familles d'astéroïdes



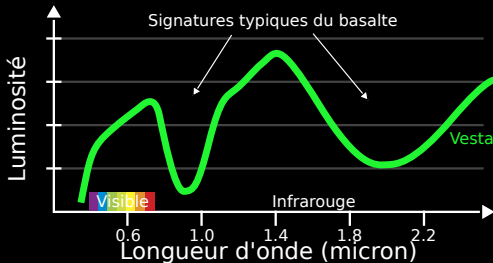
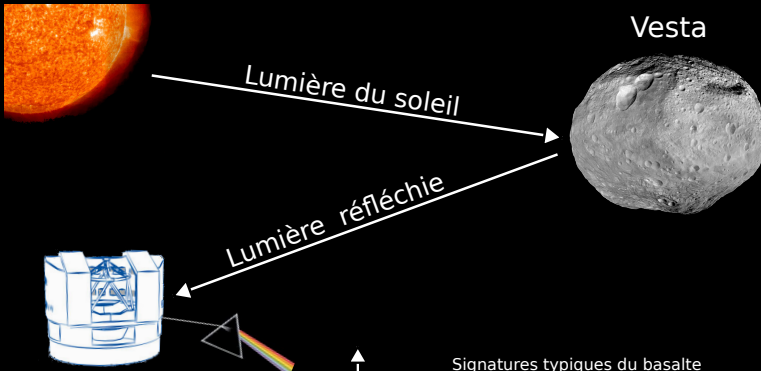
- Collision et fragmentation
- Érosion de la ceinture
 - Destructions des gros
 - Injection de petits
- Distribution particulière
 - Espace ($a, 1/D$)
 - Forme en V
- Effet **Yarkovsky**
 - Diamètre et masse
 - Période, spin
 - Albédo, inertie thermique
 - ...

1. Formation planétaire
2. Dynamique
3. **Composition**
4. Propriétés physiques
5. Histoire du système solaire

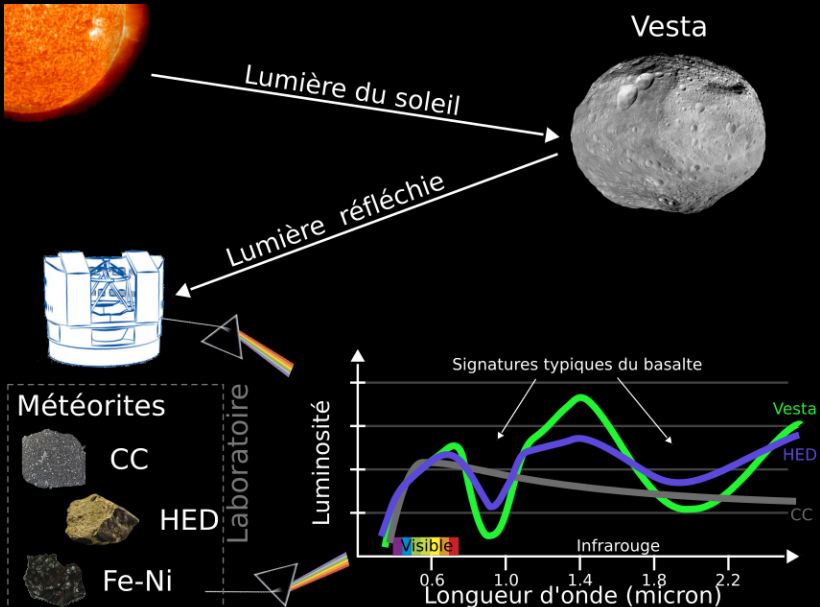
Comment étudier la composition?



Comment étudier la composition?



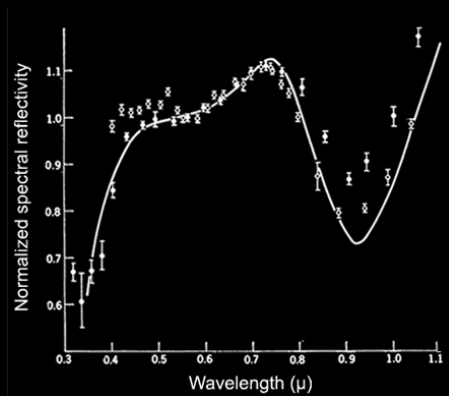
Comment étudier la composition?



Exemples

- ▶ (4) Vesta et les HEDs
 - ▶ Lien avec météorite
 - ▶ Différentiation!

- ▶ Une histoire dynamique

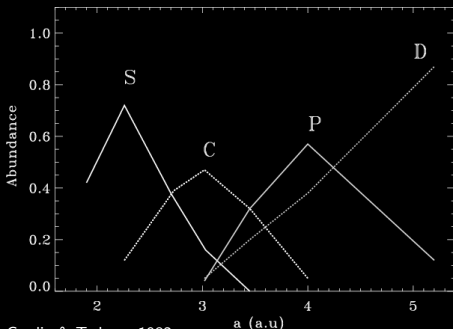


McCord et al. 1970

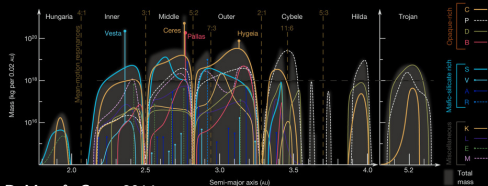
Exemples

- ▶ (4) Vesta et les HEDs
 - ▶ Lien avec météorite
 - ▶ Différentiation!

- ▶ Une histoire dynamique
 - ▶ 1982: Simple
 - ▶ 2014: Complexe!
 - ▶ Ceinture = pot-pourri



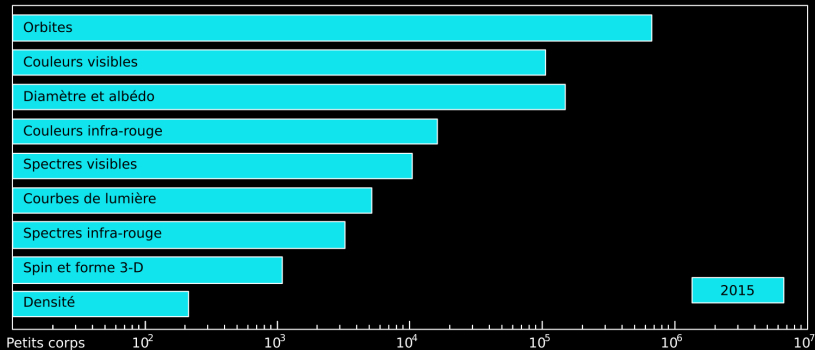
Gradie & Tedesco 1982



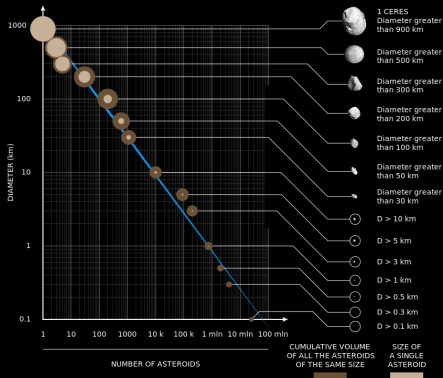
DeMeo & Carry 2014

1. Formation planétaire
2. Dynamique
3. Composition
4. Propriétés physiques
5. Histoire du système solaire

Tour d'horizon



Pourquoi si peu?



► Petits corps (physiquement)

- Ceres = 950 km
- 100 objets > 100 km

► Petits corps (angulairement)

► Imagerie directe difficile

► Autres méthodes nécessaires

Marco Colombo

Pourquoi si peu?

▶ Petits corps (physiquement)

- Ceres = 950 km
- 100 objets >100 km

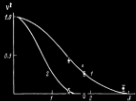
▶ Petits corps (angulairement)

- @ 200-750 000 000 km!
- Ceres = 0.6''!

▶ Imagerie directe difficile

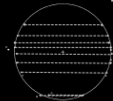
▶ Autres méthodes nécessaires

1980



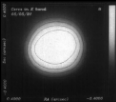
Interférométrie

1987



Occultation

1993



ESO 3.6m

1998



USAF 1.5m

2002



Hubble Space Telescope

2005



Keck

2002



NASA Dawn

2013

Pourquoi si peu?

▶ Petits corps (physiquement)

- Ceres = 950 km
- 100 objets >100 km

▶ Petits corps (angulairement)

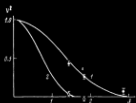
- @ 200-750 000 000 km!
- Ceres = 0.6''!

▶ Imagerie directe difficile

- 10m avec optique adaptative
- Hubble dans l'espace

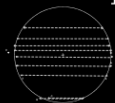
▶ Autres méthodes nécessaires

1980



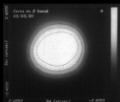
Interférométrie

1987



Occultation

1993



ESO 3.6m

1998



USAF 1.5m

2002



Hubble Space Telescope

2005



Keck

2002



2013



NASA Dawn

Pourquoi si peu?

▶ Petits corps (physiquement)

- Ceres = 950 km
- 100 objets >100 km

▶ Petits corps (angulairement)

- @ 200-750 000 000 km!
- Ceres = 0.6''!

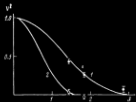
▶ Imagerie directe difficile

- 10m avec optique adaptative
- Hubble dans l'espace

▶ Autres méthodes nécessaires

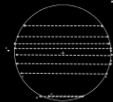
- Courbes de lumière
- Occultations stellaires
- Interférométrie
- ...

1980



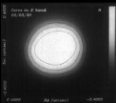
Interférométrie

1987



Occultation

1993



ESO 3.6m

1998



USAF 1.5m

2002



Hubble Space Telescope

2005



Keck

2013



NASA Dawn

Période de rotation

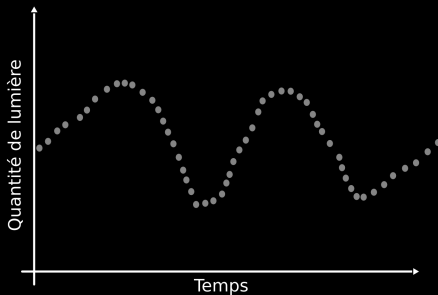
1. Courbes de lumière

- ▶ Lumière vs temps
- ▶ Surface projetée
- ▶ Signal périodique

2. Période vs Diamètre

3. Fission par rotation

4. Effet YORP



Période de rotation

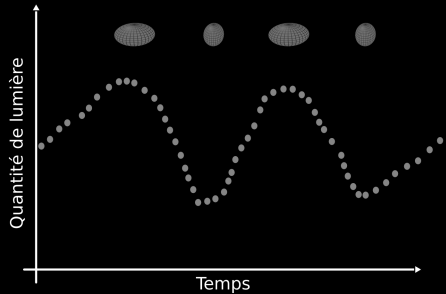
1. Courbes de lumière

- ▶ Lumière vs temps
- ▶ Surface projetée
- ▶ Signal périodique

2. Période vs Diamètre

3. Fission par rotation

4. Effet YORP



Période de rotation

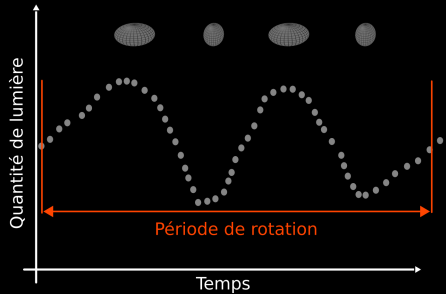
1. Courbes de lumière

- ▶ Lumière vs temps
- ▶ Surface projetée
- ▶ Signal périodique

2. Période vs Diamètre

3. Fission par rotation

4. Effet YORP



Période de rotation

1. Courbes de lumière

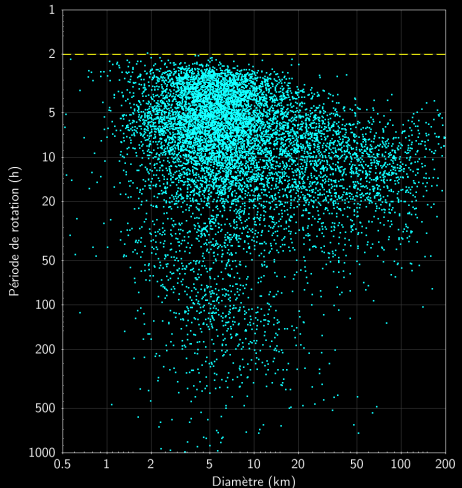
- ▶ Lumière vs temps
- ▶ Surface projetée
- ▶ Signal périodique

2. Période vs Diamètre

- ▶ Barrière à 2 h!
- ▶ Pourquoi?

3. Fission par rotation

4. Effet YORP



Période de rotation

1. Courbes de lumière

- ▶ Lumière vs temps
- ▶ Surface projetée
- ▶ Signal périodique

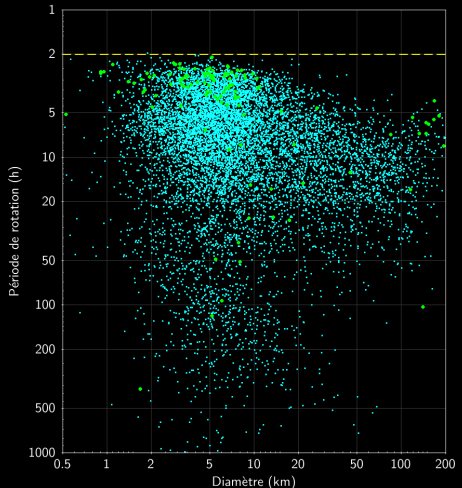
2. Période vs Diamètre

- ▶ Barrière à 2 h!
- ▶ Pourquoi?

3. Fission par rotation

- ▶ Binaires tournent vite
- ▶ Centrifuge > gravité

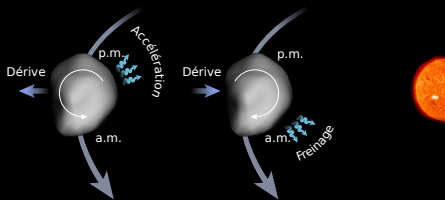
4. Effet YORP



Période de rotation

1. Courbes de lumière

- ▶ Lumière vs temps
- ▶ Surface projetée
- ▶ Signal périodique



2. Période vs Diamètre

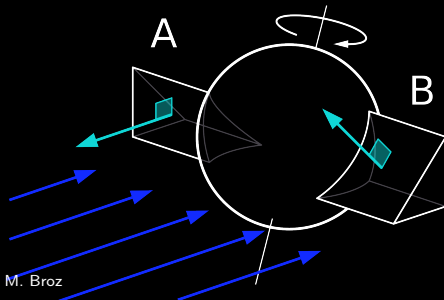
- ▶ Barrière à 2 h!
- ▶ Pourquoi?

3. Fission par rotation

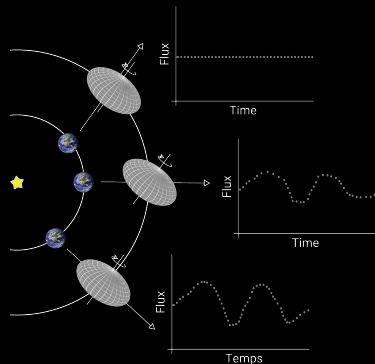
- ▶ Binaires tournent vite
- ▶ Centrifuge > gravité

4. Effet YORP

- ▶ Re-orientation
- ▶ Accélération



Orientation



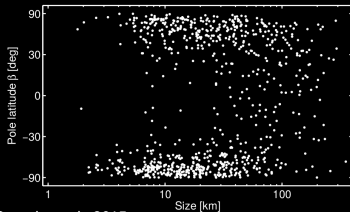
► Orientation de la rotation

- Beaucoup de courbes
- Différentes géométries
- Amplitude vs λ_{EC}

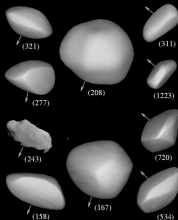
► Distribution de l'orientation

► Effet YORP

Orientation



Durech et al. 2015



Slivan 2002

► Orientation de la rotation

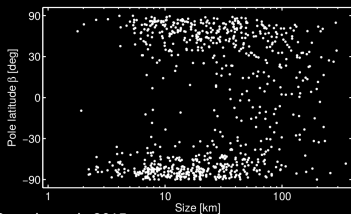
- Beaucoup de courbes
- Différentes géométries
- Amplitude vs λ_{EC}

► Distribution de l'orientation

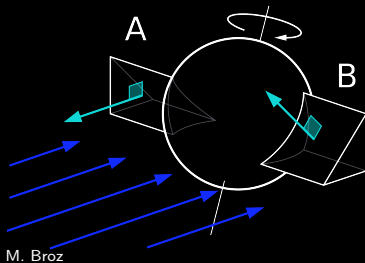
- Non-isotropique!
- Alignée dans les familles
- Obliquité 0 ou 180°

► Effet YORP

Orientation



Durech et al. 2015



M. Broz

► Orientation de la rotation

- Beaucoup de courbes
- Différentes géométries
- Amplitude vs λ_{EC}

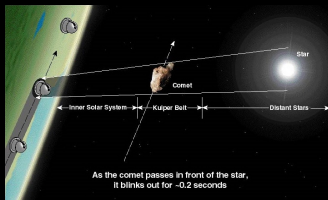
► Distribution de l'orientation

- Non-isotropique!
- Alignée dans les familles
- Obliquité 0 ou 180°

► Effet YORP

- Aligne les spins
- Crée des binaires
- Feedback sur Yarkovsky

Diamètre



1. Occultation stellaire

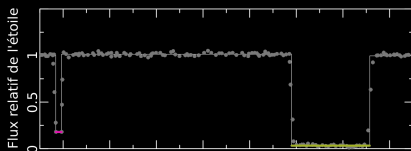
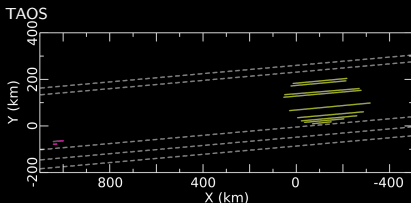
- ▶ Temps de disparition
- ▶ Vitesse via éphémérides
- ▶ Cordes → diamètre 2-D
- ▶ **Très précis!**
- Dur à prédire (Gaia!)
- Peu courant

2. Imagerie directe

3. Flux thermique

4. Échos radar

5. Interférométrie



Diamètre



The Planetary Society/ESA/NASA/JAXA

1. Occultation stellaire

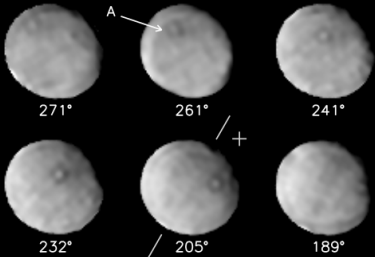
2. Imagerie directe

- ▶ Image \approx plein de cordes
- ▶ À volonté
- **Petits** corps
- Grands télescopes

3. Flux thermique

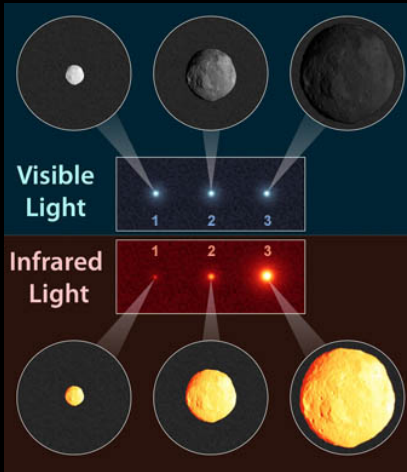
4. Échos radar

5. Interférométrie



Carry et al. 2008

Diamètre



NASA, WISE consortium

1. Occultation stellaire

2. Imagerie directe

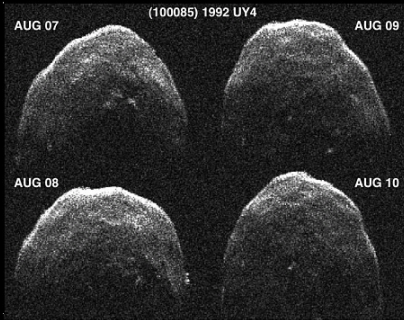
3. Flux thermique

- ▶ Flux $\propto D$
- ▶ Flux = f(Température)
- ▶ IRAS, AKARI, WISE...
- ▶ 150,000 diamètres
- Modèle-dépendant
- **Gros biais**

4. Échos radar

5. Interférométrie

Diamètre



NAP/JPL/NASA

1. Occultation stellaire

2. Imagerie directe

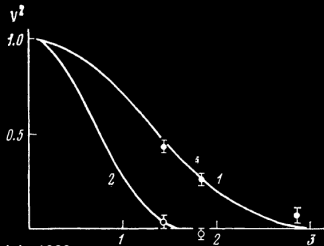
3. Flux thermique

4. Échos radar

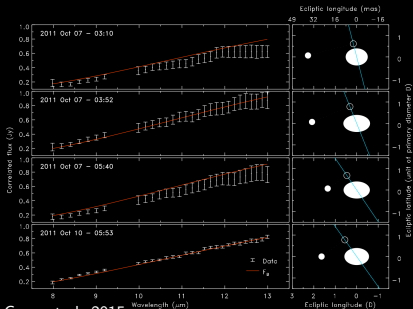
- ▶ Disperse en Doppler/délai
- ▶ Délai → diamètre
- ▶ Doppler → période
- Puissance en distance⁻⁴
- NEAs uniquement

5. Interférométrie

Diamètre



Tokovinin 1980



Carry et al. 2015

1. Occultation stellaire

2. Imagerie directe

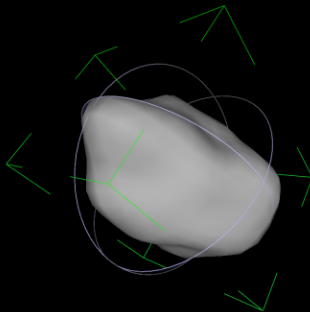
3. Flux thermique

4. Échos radar

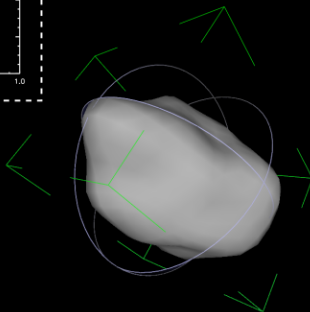
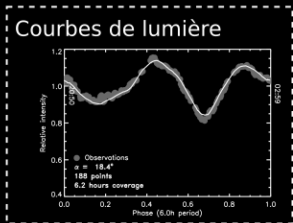
5. Interférométrie

- ▶ À la Michelson
- ▶ **Petits** corps → faibles
- ▶ VLT/MIDI
- ALMA?

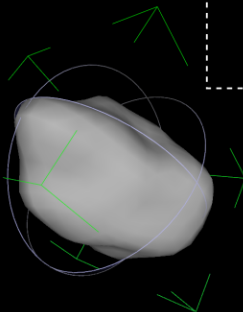
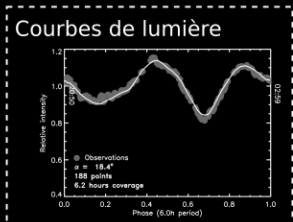
Forme 3D



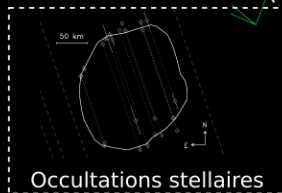
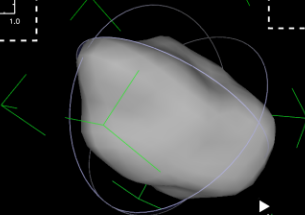
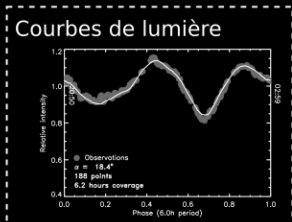
Forme 3D



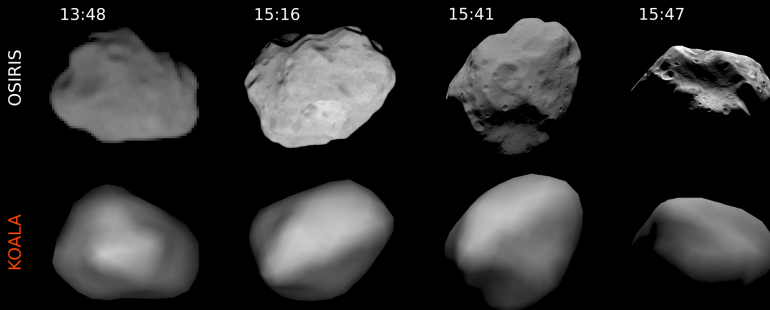
Forme 3D



Forme 3D



Forme 3D



Modèle pre-flyby
KOALA

300 000 000 km

vs. Rosetta
Forme: **2 km**

3 000 km

Précision
Diamètre: 2–5%

Carry et al. 2010,2012

Formation planétaire
○○○

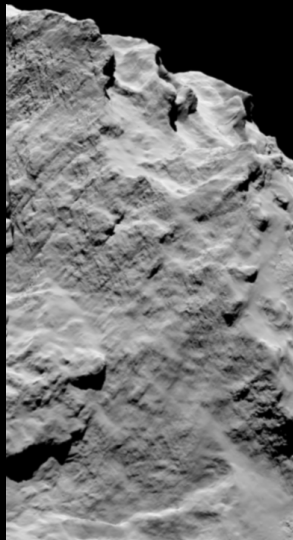
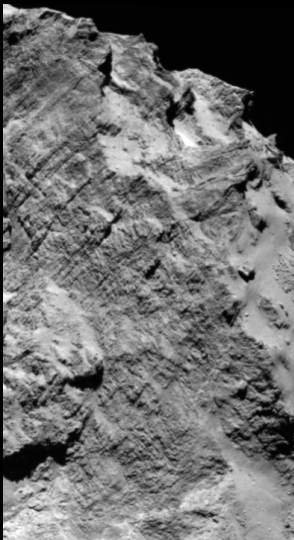
Dynamique
○○○○○

Composition
○○

Propriétés physiques
○○○○○○●○○

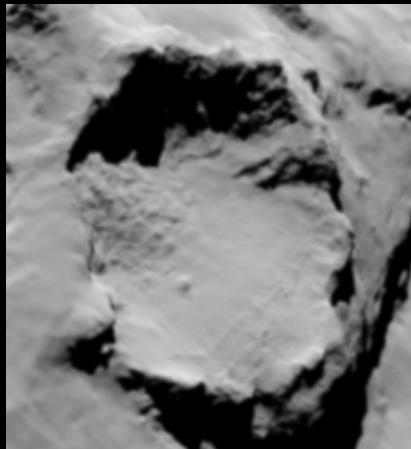
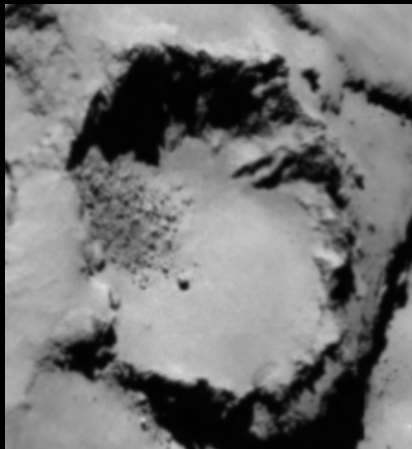
Histoire du système solaire
○○○○○○○

Détails de forme

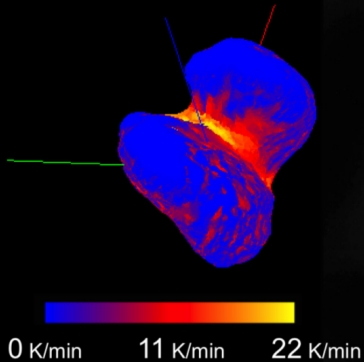


L. Jorda

Détails de forme



Détails de forme



Ali-Lagoa et al. 2015

Masse

1. Survol d'une sonde

- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare

2. Satellites

3. Déflexion



Concept de mission AIDA, ESA

Masse

1. Survol d'une sonde

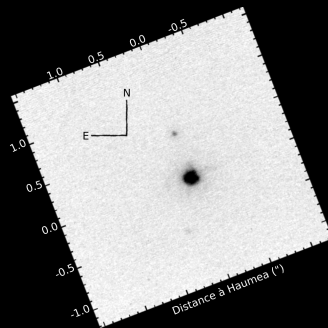
- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare

2. Satellites

- Astéroïde - Satellite
- Précis et assez commun

3. Déflexion

- Astéroïde - Astéroïde
- Peu précis mais commun



Masse

1. Survol d'une sonde

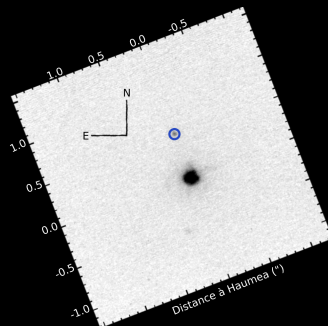
- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare

2. Satellites

- Astéroïde - Satellite
- Précis et assez commun

3. Déflexion

- Astéroïde - Astéroïde
- Peu précis mais commun



Masse

1. Survol d'une sonde

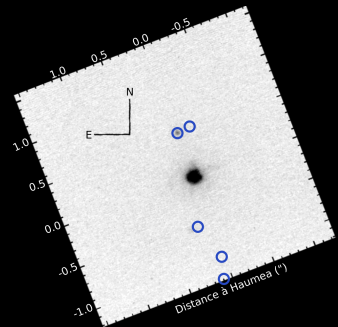
- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare

2. Satellites

- Astéroïde - Satellite
- Précis et assez commun

3. Déflexion

- Astéroïde - Astéroïde
- Peu précis mais commun



Masse

1. Survol d'une sonde

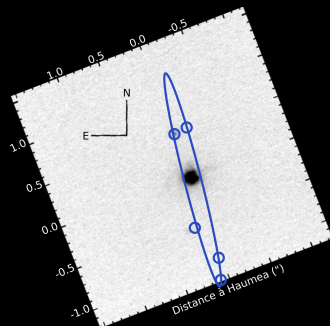
- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare

2. Satellites

- Astéroïde - Satellite
- Précis et assez commun

3. Déflexion

- Astéroïde - Astéroïde
- Peu précis mais commun



Masse

1. Survol d'une sonde

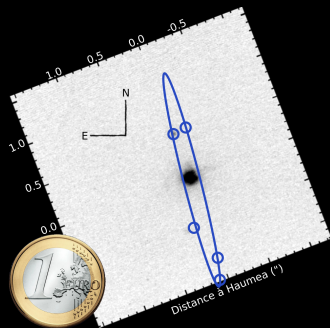
- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare

2. Satellites

- Astéroïde - Satellite
- Précis et assez commun

3. Déflexion

- Astéroïde - Astéroïde
- Peu précis mais commun



Masse

1. Survol d'une sonde

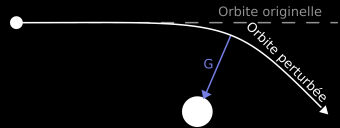
- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare

2. Satellites

- Astéroïde - Satellite
- Précis et assez commun

3. Déflexion

- Astéroïde - Astéroïde
- Peu précis mais commun
- Meilleur dans le futur



Masse

1. Survol d'une sonde

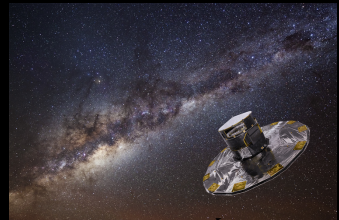
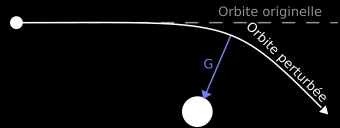
- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare

2. Satellites

- Astéroïde - Satellite
- Précis et assez commun

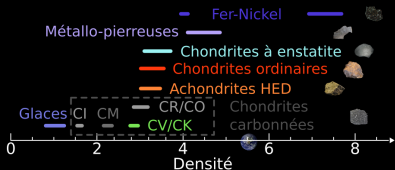
3. Déflexion

- Astéroïde - Astéroïde
- Peu précis mais commun
- Meilleur dans le futur



ESA

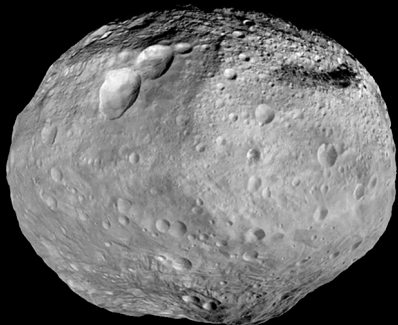
Densité



• Densité \Leftrightarrow composition

- Glace: $\rho \approx 1 \text{ g.cm}^{-3}$
- Roche: $\rho \approx 2-3 \text{ g.cm}^{-3}$
- Metal: $\rho \approx 5 \text{ g.cm}^{-3}$
- Terre: $\rho = 5.5 \text{ g.cm}^{-3}$

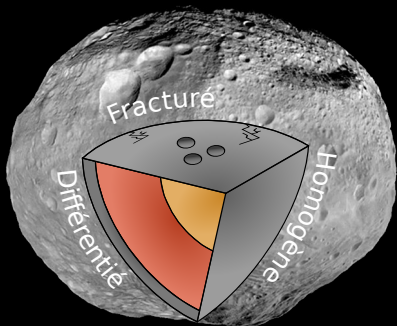
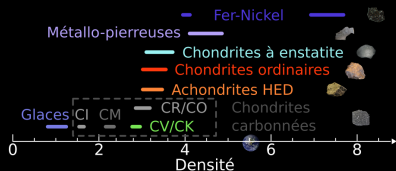
- Densité = Masse / Volume
- Densité et compositions



• Accès à la structure interne!

- Fraction de glaces
- Lieu de formation

Densité



● Densité \Leftrightarrow composition

- Glace: $\rho \approx 1 \text{ g.cm}^{-3}$
- Roche: $\rho \approx 2\text{--}3 \text{ g.cm}^{-3}$
- Metal: $\rho \approx 5 \text{ g.cm}^{-3}$
- Terre: $\rho = 5.5 \text{ g.cm}^{-3}$

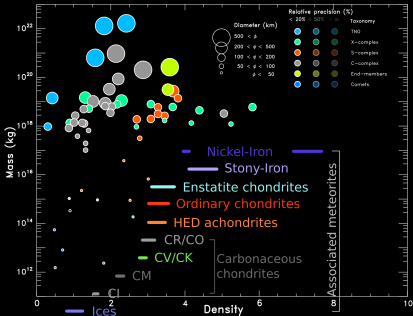
● Densité = Masse / Volume

● Densité et compositions

Accès à la structure interne!

- Fraction de glaces
- Lieu de formation

Densité

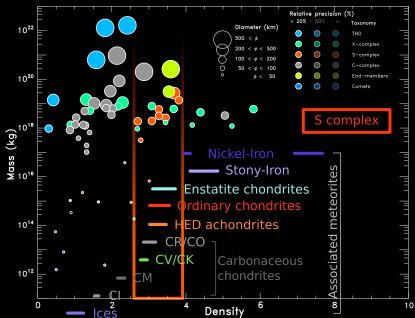


- Densité \Leftrightarrow composition
 - Glace: $\rho \approx 1 \text{ g.cm}^{-3}$
 - Roche: $\rho \approx 2\text{--}3 \text{ g.cm}^{-3}$
 - Metal: $\rho \approx 5 \text{ g.cm}^{-3}$
 - Terre: $\rho = 5.5 \text{ g.cm}^{-3}$
- Densité = Masse / Volume
- Densité et compositions
 - Gamme par type
 - Dépendance en taille

Accès à la structure interne!

- Fraction de glaces
- Lieu de formation

Densité



- Densité \Leftrightarrow composition

- Glace: $\rho \approx 1 \text{ g.cm}^{-3}$
- Roche: $\rho \approx 2\text{--}3 \text{ g.cm}^{-3}$
- Metal: $\rho \approx 5 \text{ g.cm}^{-3}$
- Terre: $\rho = 5.5 \text{ g.cm}^{-3}$

- Densité = Masse / Volume

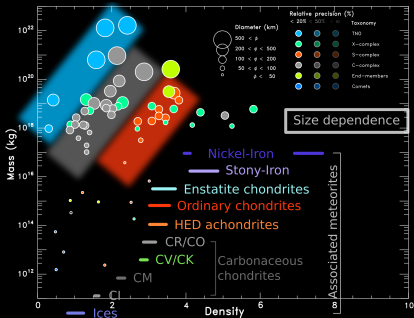
- Densité et compositions

- Gamme par type
- Dépendance en taille

- ▷ Accès à la structure interne!

- Fraction de glaces
- Lieu de formation

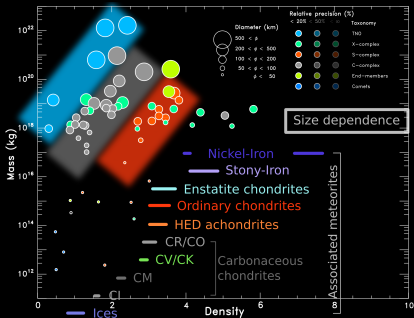
Densité



- Densité \Leftrightarrow composition
 - Glace: $\rho \approx 1 \text{ g.cm}^{-3}$
 - Roche: $\rho \approx 2\text{--}3 \text{ g.cm}^{-3}$
 - Metal: $\rho \approx 5 \text{ g.cm}^{-3}$
 - Terre: $\rho = 5.5 \text{ g.cm}^{-3}$
- Densité = Masse / Volume
- Densité et compositions
 - Gamme par type
 - Dépendance en taille

- ▷ Accès à la structure interne!
 - Fraction de glaces
 - Lieu de formation

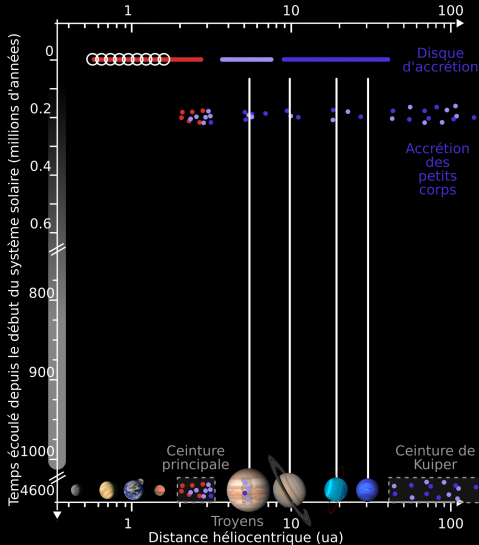
Densité



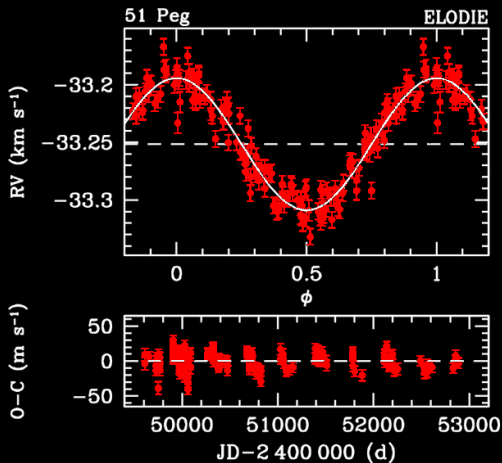
- Densité \Leftrightarrow composition
 - Glace: $\rho \approx 1 \text{ g.cm}^{-3}$
 - Roche: $\rho \approx 2\text{--}3 \text{ g.cm}^{-3}$
 - Metal: $\rho \approx 5 \text{ g.cm}^{-3}$
 - Terre: $\rho = 5.5 \text{ g.cm}^{-3}$
- Densité = Masse / Volume
- Densité et compositions
 - Gamme par type
 - Dépendance en taille
- ▷ Accès à la structure interne!
 - Fraction de glaces
 - Lieu de formation

1. Formation planétaire
2. Dynamique
3. Composition
4. Propriétés physiques
5. Histoire du système solaire

Histoire: La vue classique



Histoire: Le feu aux poudres



Mayor & Queloz, 1995

Formation planétaire
○○○

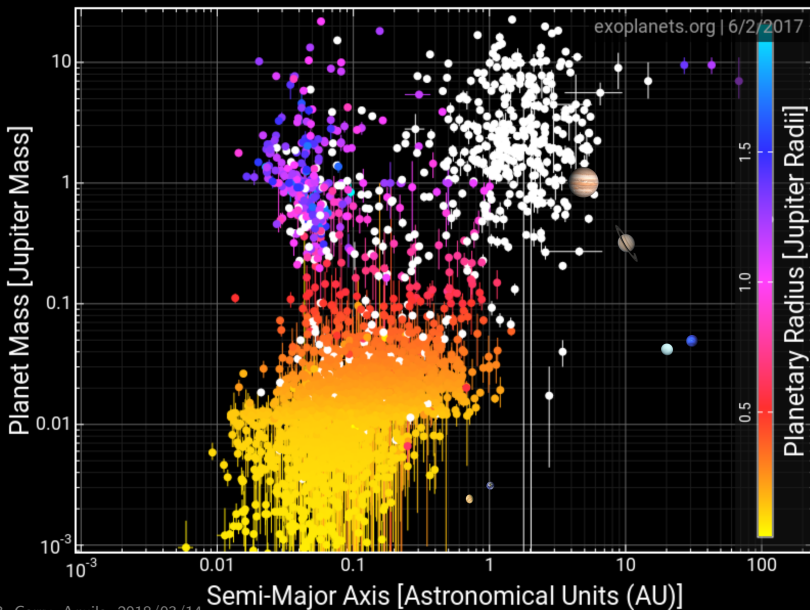
Dynamique
○○○○○

Composition
○○

Propriétés physiques
○○○○○○○○○

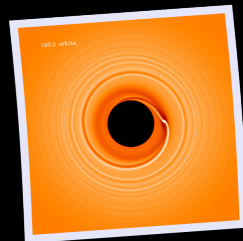
Histoire du système solaire
○●○○○○○

Histoire: Le feu aux poudres



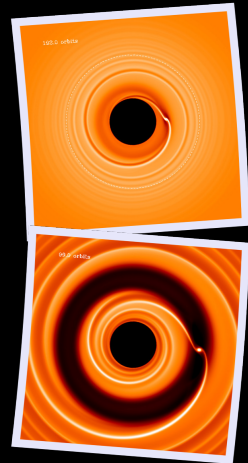
Histoire: Ingrédients

- Migration de type I
 - Déplacement dans le disque
 - Vers l'intérieur
 - Très rapide



Histoire: Ingrédients

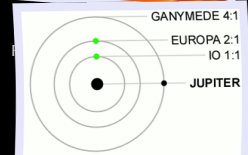
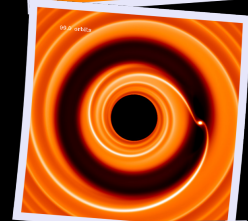
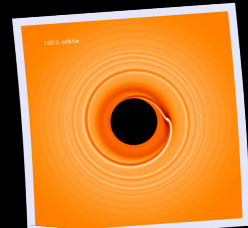
- Migration de type I
 - Déplacement dans le disque
 - Vers l'intérieur
 - Très rapide
- Migration de type II
 - Ouverture d'un gap
 - Vers l'intérieur ou extérieur
 - Beaucoup plus lent



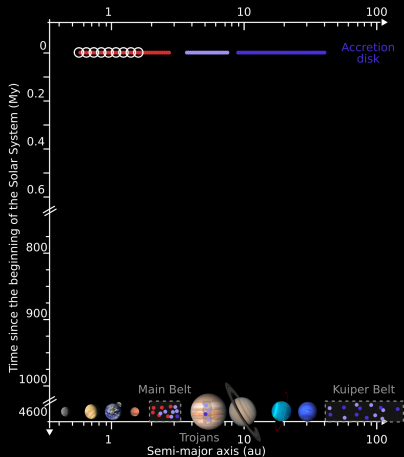
F. Masset

Histoire: Ingrédients

- Migration de type I
 - Déplacement dans le disque
 - Vers l'intérieur
 - Très rapide
- Migration de type II
 - Ouverture d'un gap
 - Vers l'intérieur ou extérieur
 - Beaucoup plus lent
- Résonance orbitale
 - Rapport entier de périodes
 - Configurations répétées
 - Perturbe ou bloque le système



Histoire: Observables



DeMeo & Carry 2014

A. Disque d'accrétion

- Gaz & Poussière
- Gradient de composition

B. Planètes

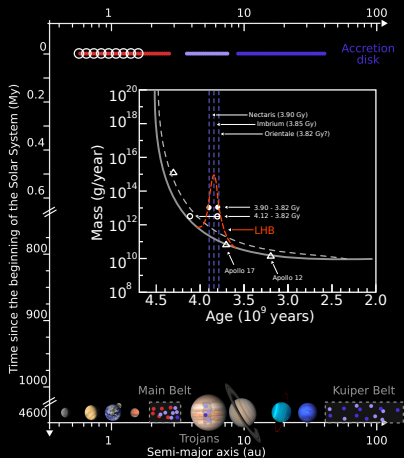
- Masses relatives
- Excentricités

C. Petits corps

- Masse des ceintures
- Inclinaison des TNOs
- Mixité des astéroïdes
- Homogénéité des troyens

D. Bombardement tardif

Histoire: Observables



DeMeo & Carry 2014

A. Disque d'accrétion

- Gaz & Poussière
- Gradient de composition

B. Planètes

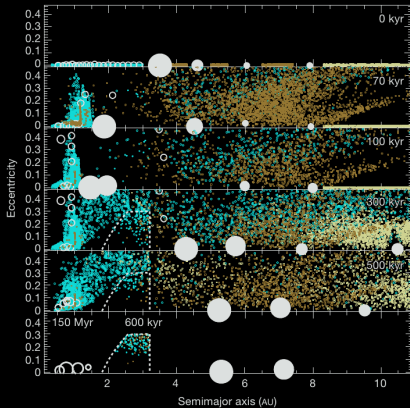
- Masses relatives
- Excentricités

C. Petits corps

- Masse des ceintures
- Inclinaison des TNOs
- Mixité des astéroïdes
- Homogénéité des troyens

D. Bombardement tardif

Histoire: le "Grand Tack"



Walsh et al. 2011

A. Jupiter migre vers l'intérieur

- Strike de bowling
- Perte de masse

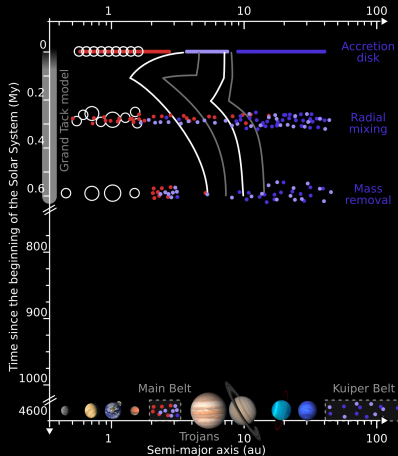
B. Saturne entraine Jupiter

- Excite les orbites
- Mélange les parties internes

C. Bilan

- Mélange complet
- Perte de 99% de la masse

Histoire: le "Grand Tack"



DeMeo & Carry 2014

A. Jupiter migre vers l'intérieur

- Strike de bowling
- Perte de masse

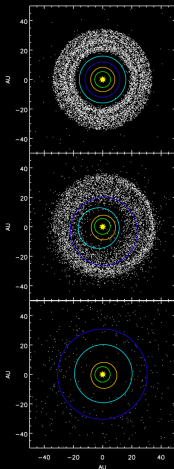
B. Saturne entraine Jupiter

- Excite les orbites
- Mélange les parties internes

C. Bilan

- Mélange complet
- Perte de 99% de la masse

Histoire: Modèle de Nice



Gomes/Tsiganis/Morbidelli 2005

Morbidelli et al. 2007/2010+

Nesvorny/Batygin 2011/2012

A. Système ordonné

- Planètes en résonances
- Meta-stable

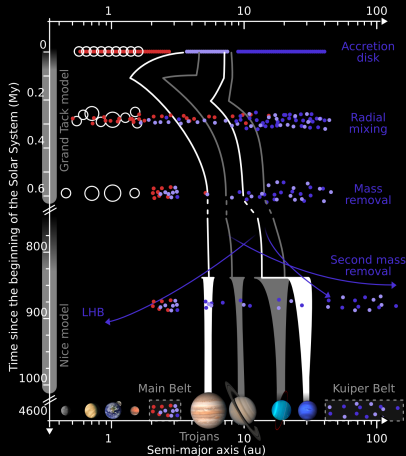
B. Instabilité tardive

- Neptune repoussée
- Destabilisation forte

C. Bilan

- Mélange complet
- Troyens remplacés
- TNOs déstabilisés
- ▶ 5 planètes géantes!?

Histoire: Modèle de Nice



DeMeo & Carry 2014

A. Système ordonné

- Planètes en résonances
- Meta-stable

B. Instabilité tardive

- Neptune repoussée
- Destabilisation forte

C. Bilan

- Mélange complet
- Troyens remplacés
- TNOs déstabilisés
- ▶ 5 planètes géantes!?

Histoire: Modèle de Nice

A. Système ordonné

- Planètes en résonances
- Meta-stable

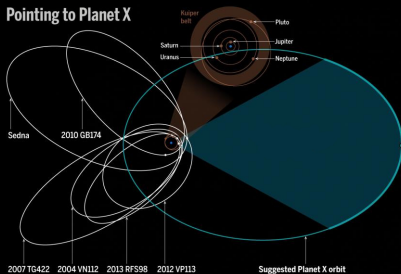
B. Instabilité tardive

- Neptune repoussée
- Destabilisation forte

C. Bilan

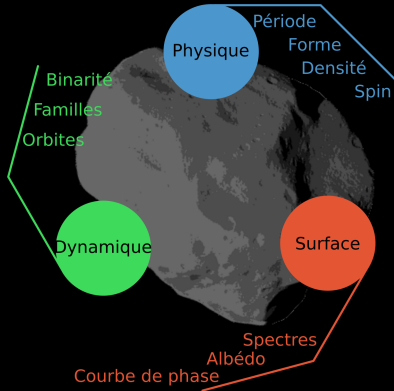
- Mélange complet
- Troyens remplacés
- TNOs déstabilisés
- ▶ 5 planètes géantes!?

Pointing to Planet X



Batygin & Brown 2016

Les astéroïdes



Briques de formation du système solaire