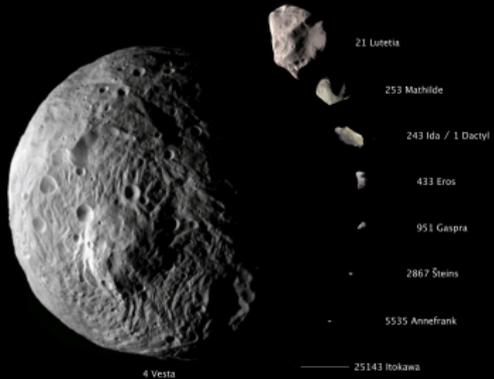


L'histoire du système solaire vue par les petits corps



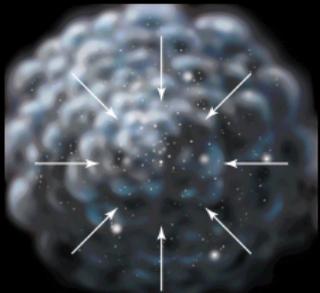
B. Carry

Lagrange, Observatoire de la Côte d'Azur

1. Formation planétaire
2. Système Solaire
3. Interrogations
4. Origine de l'eau
5. Masse et densité
6. Astéroïdes et Météorites

1. Formation planétaire
2. Système Solaire
3. Interrogations
4. Origine de l'eau
5. Masse et densité
6. Astéroïdes et Météorites

Formation planétaire: Résumé



(a)



(b)



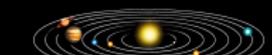
(c)



(d)



(e)



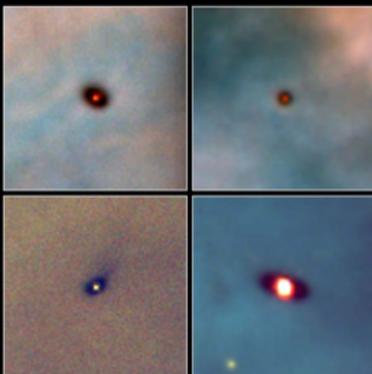
(f)

Un processus par étapes successives:

- a. Contraction du nuage de gaz & poussière
- b. Formation d'un disque
- c. Rotation, accumulation de matériaux
- d. Naissance de l'étoile
- e. Accrétion dans le disque et planétésimaux
- f. Système planétaire



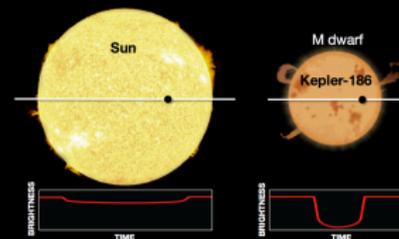
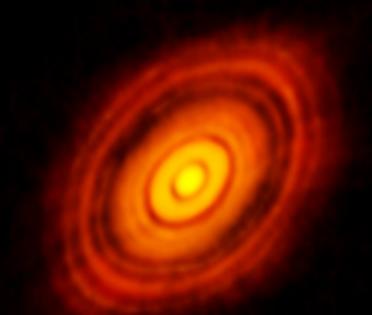
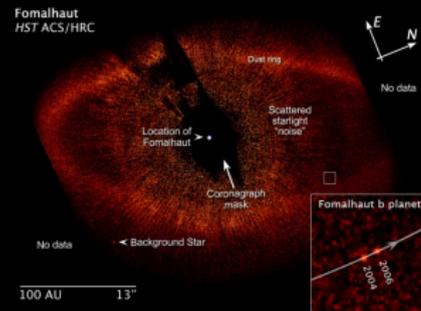
Formation planétaire: Exemples



Protoplanetary Disks
Orion Nebula

HST - WFPC2

PRC95-15b - ST ScI OPO - November 20, 1995
M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA



Formation planétaire: Petits corps

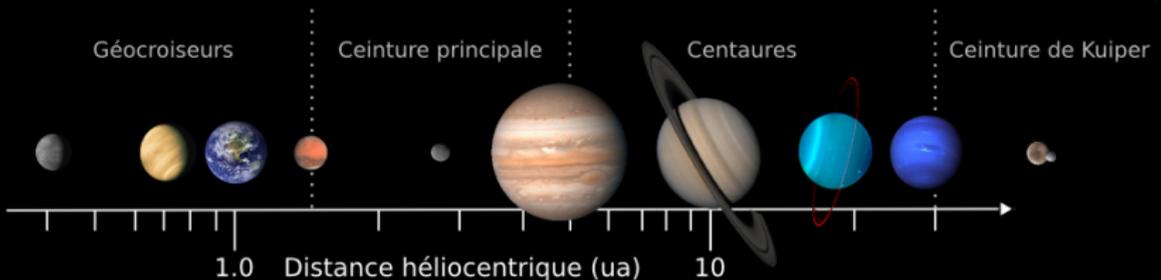
1. Population importante

- 754 938 objets (*plusieurs millions*)
- Large gamme de distances héliocentriques [$1 \rightarrow 10^{2-5}$ ua]
- Large gamme de compositions [roches \rightarrow glaces]

2. Population primitive

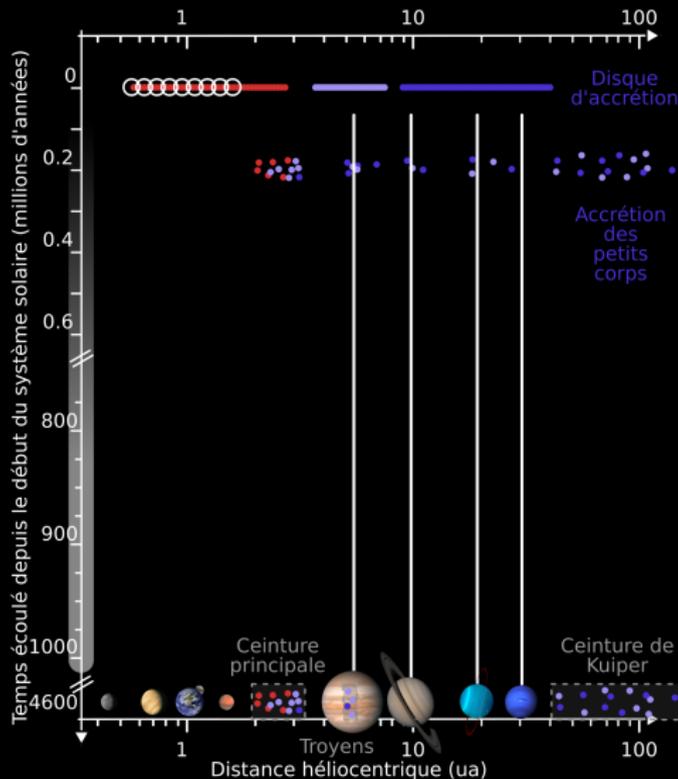
- **Petits** objets [m \rightarrow 1000 km]
- Énergie interne \approx nulle
- Pas d'activité endogène

▷ Témoins *directs* du jeune Système Solaire

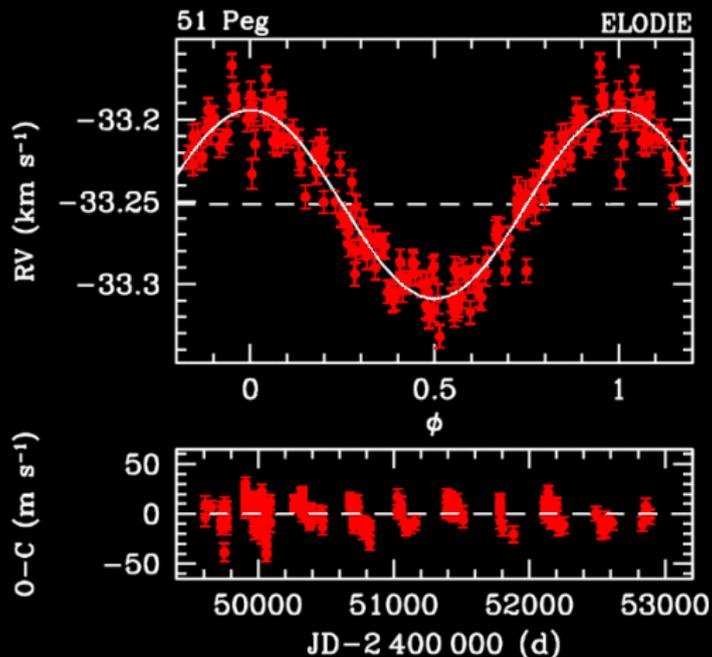


1. Formation planétaire
2. Système Solaire
3. Interrogations
4. Origine de l'eau
5. Masse et densité
6. Astéroïdes et Météorites

Histoire: La vue classique

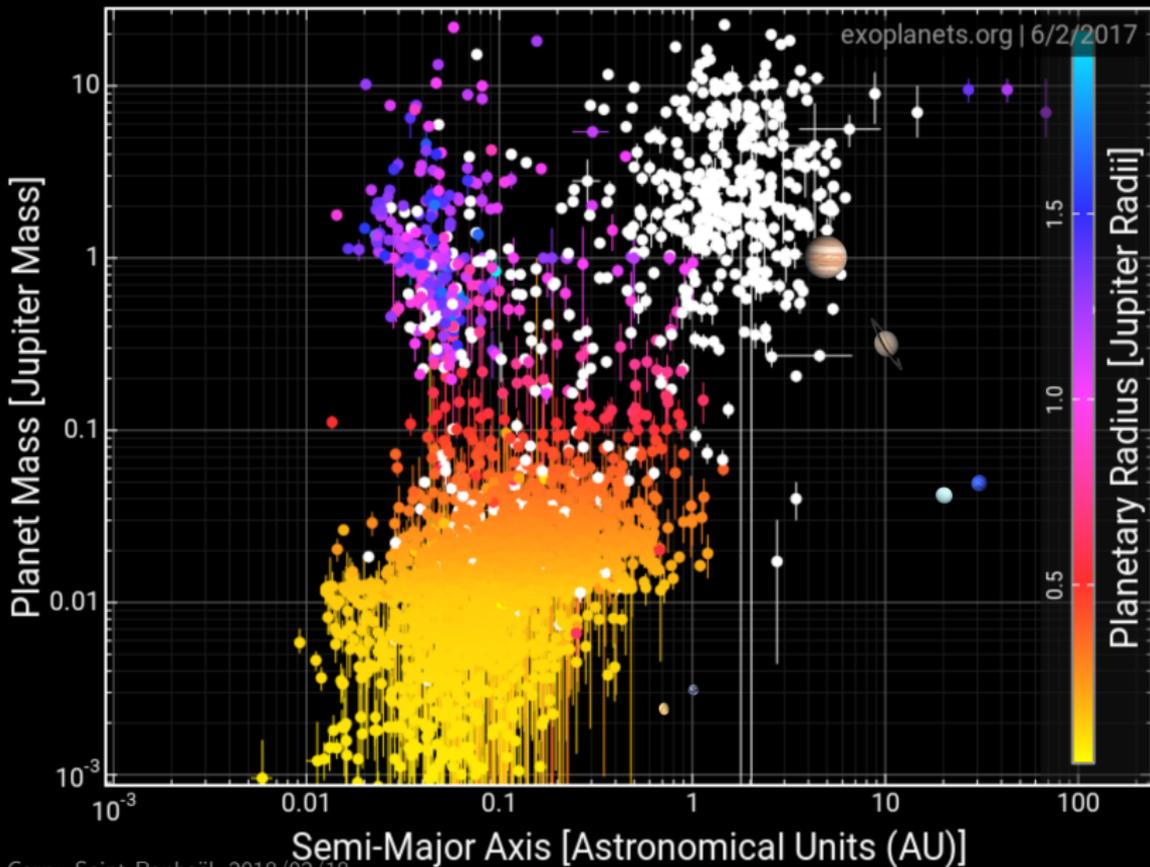


Histoire: Le feu aux poudres



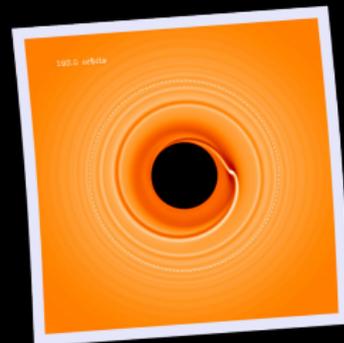
Mayor & Queloz, 1995

Histoire: Le feu aux poudres



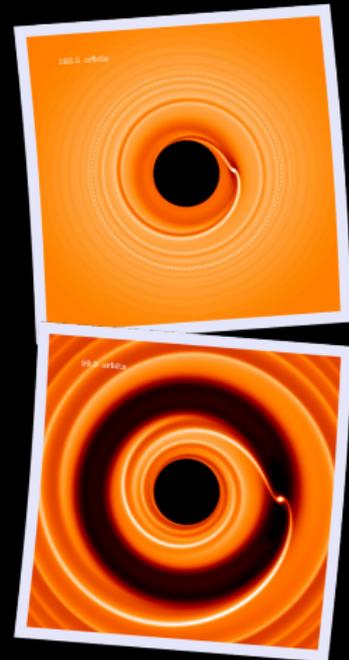
Histoire: Ingrédients

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



Histoire: Ingrédients

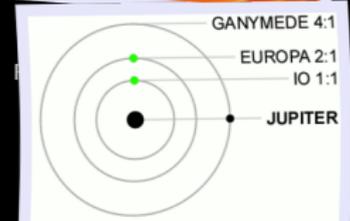
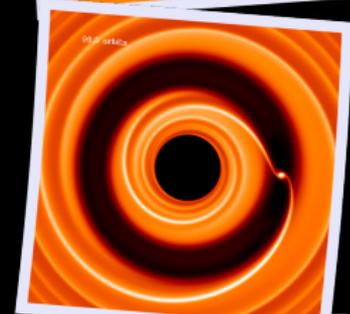
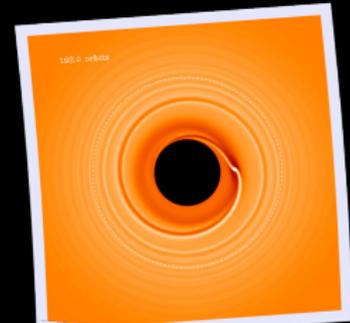
- Migration de type I
 - Déplacement dans le disque
 - Vers l'intérieur
 - Très rapide
- Migration de type II
 - Ouverture d'un gap
 - Vers l'intérieur ou extérieur
 - Beaucoup plus lent



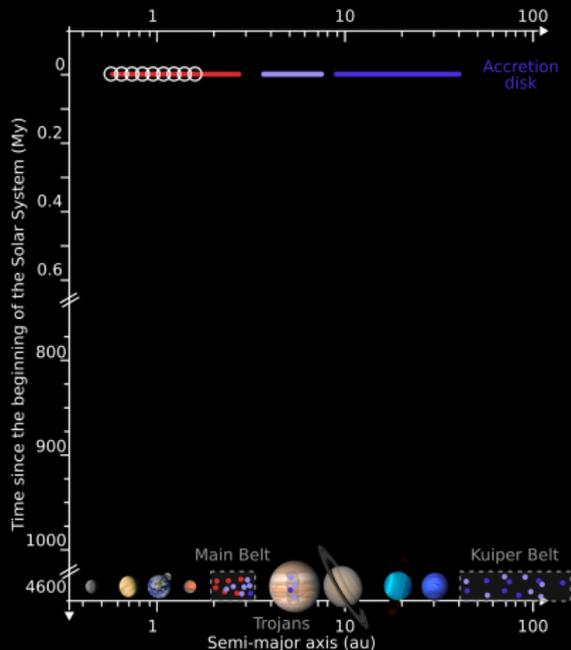
F. Masset

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

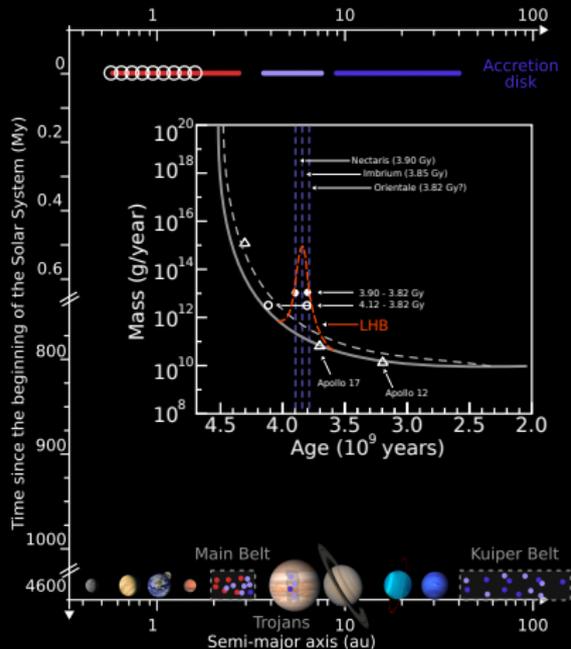
- Masses relatives
- Excentricités

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

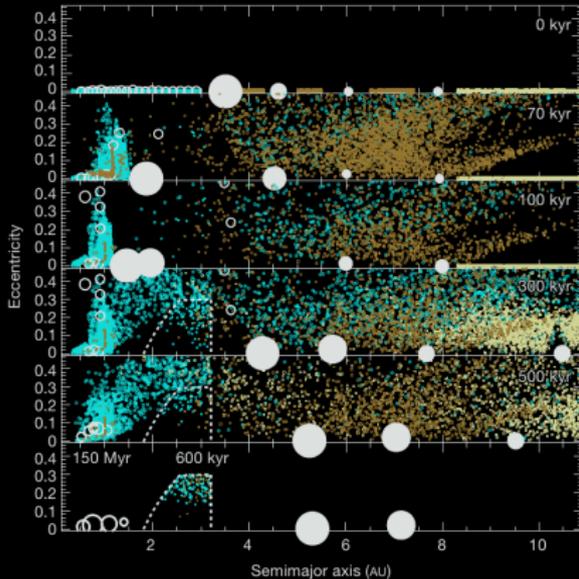
- Masses relatives
- Excentricités

C. Petits corps

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

D. Bombardement tardif

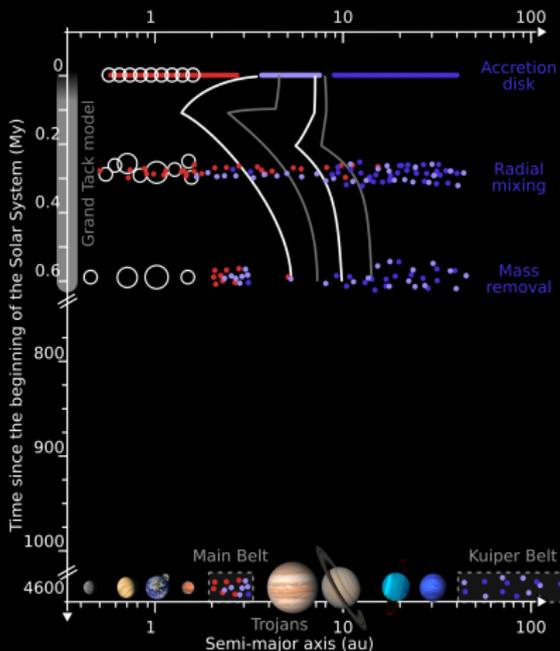
Histoire: le "Grand Tack"



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

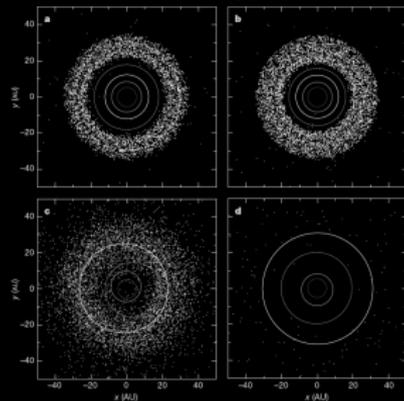
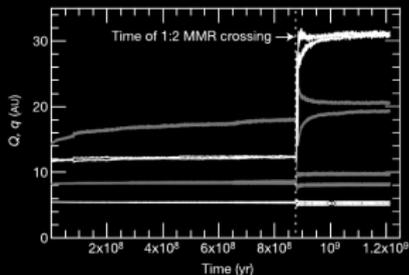
B. Saturne entraine Jupiter

- 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

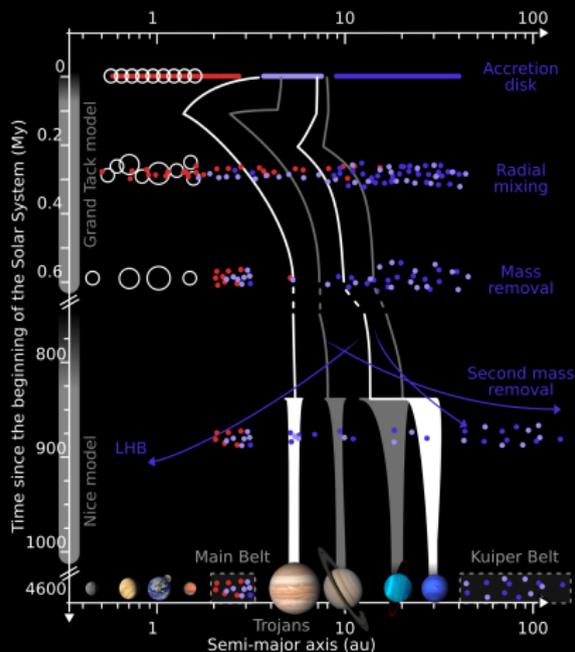
B. Instabilité tardive

- 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

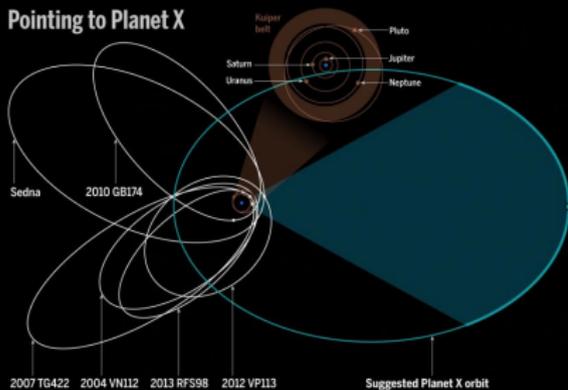
- Neptune repoussée
- Destabilisation forte

C. Bilan

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

Histoire: Modèle de Nice

Pointing to Planet X



Batygin & Brown 2016

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!?

1. Formation planétaire
2. Système Solaire
3. **Interrogations**
4. Origine de l'eau
5. Masse et densité
6. Astéroïdes et Météorites

Grandes questions ouvertes

- Formation des planétésimaux dans le disque?
- Détails de la migration planétaire?
- Origine de l'eau et de la vie sur Terre?
- Lieu et moment de formation des astéroïdes et comètes?
- Masse et structure des petits corps?
- Composition des astéroïdes, comètes, et météores?
- Altération des surfaces?
- Sources des géocroiseurs et des météorites?
- ...

Comment y répondre?

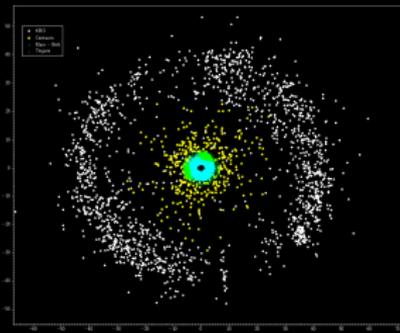
1. Découvertes & Recensement

- Observation → population
- Nouvelles catégories
- ▶ Grands relevés

2. Dynamique

3. Composition

4. Propriétés physiques



Comment y répondre?

1. Découvertes & Recensement

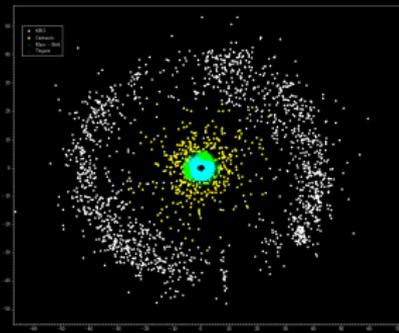
- Observation → population
- Nouvelles catégories
- ▶ Grands relevés

2. Dynamique

- Origine & évolution
- ▶ Modèles numériques

3. Composition

4. Propriétés physiques



Comment y répondre?

1. Découvertes & Recensement

- Observation → population
- Nouvelles catégories
- ▶ Grands relevés

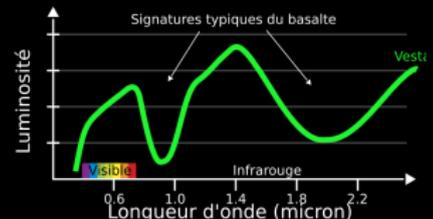
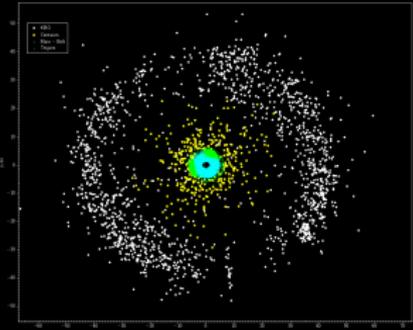
2. Dynamique

- Origine & évolution
- ▶ Modèles numériques

3. Composition

- Astéroïdes → Minéraux
- Comètes → Volatiles
- ▶ Spectroscopie

4. Propriétés physiques



Comment y répondre?

1. Découvertes & Recensement

- Observation → population
- Nouvelles catégories
- ▶ Grands relevés

2. Dynamique

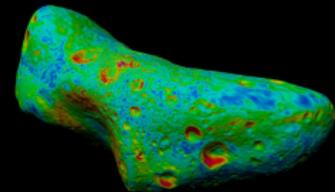
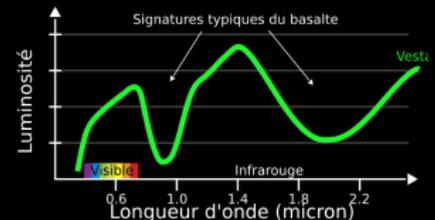
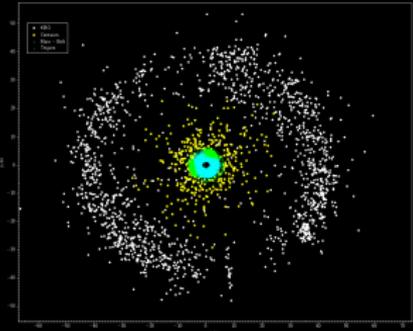
- Origine & évolution
- ▶ Modèles numériques

3. Composition

- Astéroïdes → Minéraux
- Comètes → Volatiles
- ▶ Spectroscopie

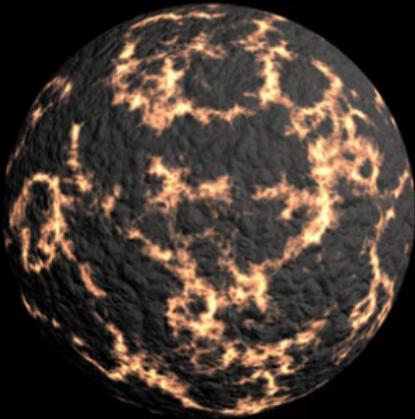
4. Propriétés physiques

- Points → Mondes
- Structure intérieure & surface



1. Formation planétaire
2. Système Solaire
3. Interrogations
4. Origine de l'eau
5. Masse et densité
6. Astéroïdes et Météorites

Origine de l'eau des océans



Jeune Terre

1. Jeune Terre

- Par accrétion
- Dégazage de l'eau?

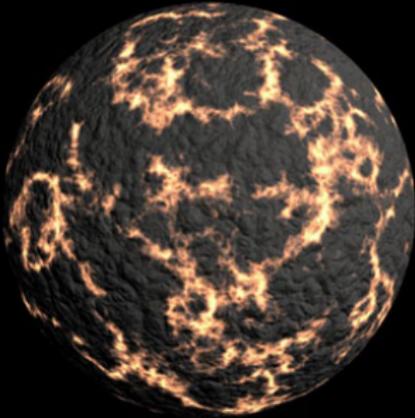
2. Implantation tardive

3. Composition de l'eau

4. Des astéroïdes?

5. Origine de l'eau?

Origine de l'eau des océans



Jeune Terre

1. Jeune Terre

- Par accrétion
- Dégazage de l'eau?

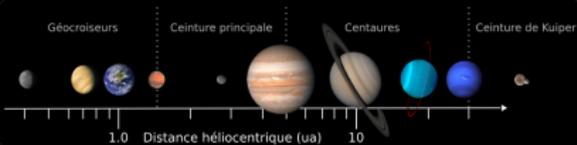
2. Implantation tardive

- Ségrégation héliocentrique
- Comètes!

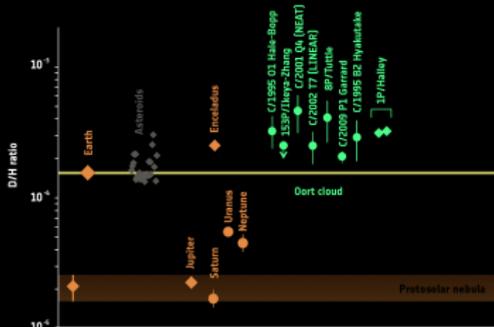
3. Composition de l'eau

4. Des astéroïdes?

5. Origine de l'eau?



Origine de l'eau des océans



Hartogh et al. 2011

Bockelee-Morvan et al. 2014

1. Jeune Terre

- Par accréation
- Dégazage de l'eau?

2. Implantation tardive

- Ségrégation héliocentrique
- Comètes!

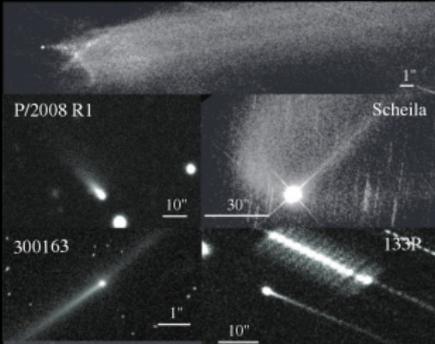
3. Composition de l'eau

- Isotopes O, D/H
- Comètes?

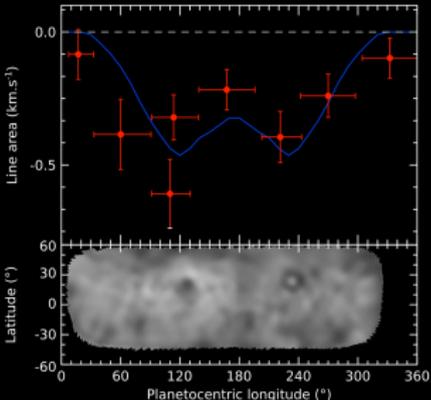
4. Des astéroïdes?

5. Origine de l'eau?

Origine de l'eau des océans



Hsieh & Jewitt, 2006; Jewitt 2012



Küppers et al. 2014

1. Jeune Terre

- Par accrétion
- Dégazage de l'eau?

2. Implantation tardive

- Ségrégation héliocentrique
- Comètes!

3. Composition de l'eau

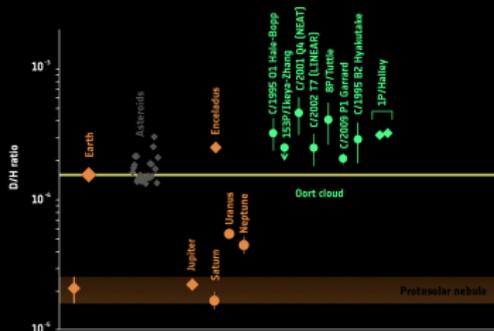
- Isotopes O, D/H
- Comètes?

4. Des astéroïdes?

- Astéroïdes actifs!
- Cérès!

5. Origine de l'eau?

Origine de l'eau des océans



Hartogh et al. 2011

Bockelee-Morvan et al. 2014

1. Jeune Terre

- Par accrétion
- Dégazage de l'eau?

2. Implantation tardive

- Ségrégation héliocentrique
- Comètes!

3. Composition de l'eau

- Isotopes O, D/H
- Comètes?

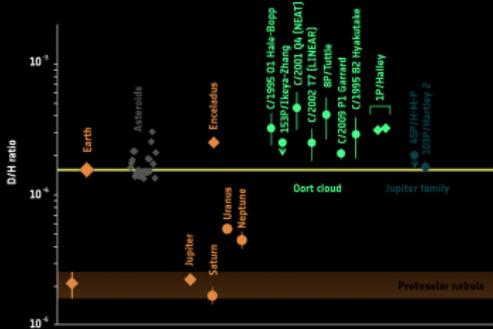
4. Des astéroïdes?

- Astéroïdes actifs!
- Cérès!

5. Origine de l'eau?

- Continuum de petits corps
- Nouveaux D/H

Origine de l'eau des océans



Hartogh et al. 2011

Bockelee-Morvan et al. 2014

1. Jeune Terre

- Par accrétion
- Dégazage de l'eau?

2. Implantation tardive

- Ségrégation héliocentrique
- Comètes!

3. Composition de l'eau

- Isotopes O, D/H
- Comètes?

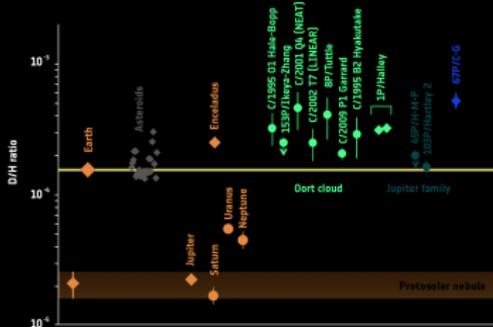
4. Des astéroïdes?

- Astéroïdes actifs!
- Cérès!

5. Origine de l'eau?

- Continuum de petits corps
- Nouveaux D/H

Origine de l'eau des océans



Hartogh et al. 2011
 Bockelee-Morvan et al. 2014
 Altwegg et al. 2015

1. Jeune Terre

- Par accrétion
- Dégazage de l'eau?

2. Implantation tardive

- Ségrégation héliocentrique
- Comètes!

3. Composition de l'eau

- Isotopes O, D/H
- Comètes?

4. Des astéroïdes?

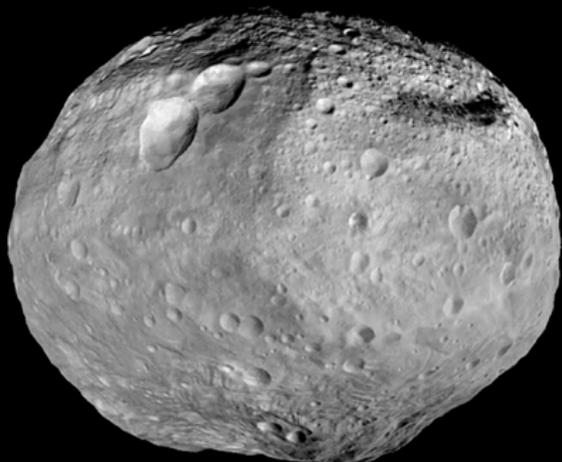
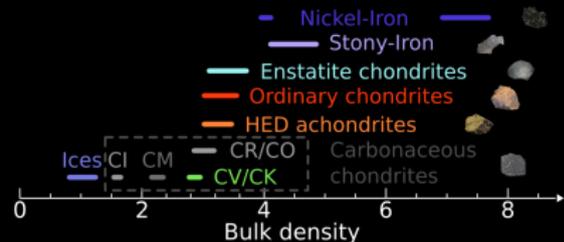
- Astéroïdes actifs!
- Cérès!

5. Origine de l'eau?

- Continuum de petits corps
- Nouveaux D/H

1. **Formation planétaire**
2. Système Solaire
3. Interrogations
4. Origine de l'eau
5. **Masse et densité**
6. Astéroïdes et Météorites

Propriétés physique: Densité

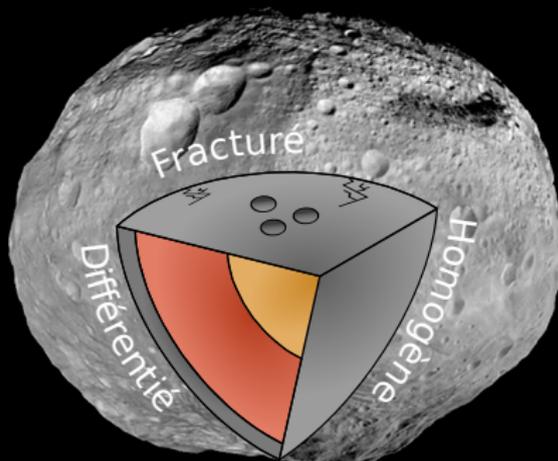
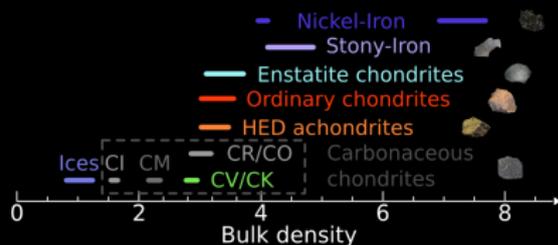


• Densité \Leftrightarrow composition

- Glaces: $\rho \approx 1 \text{ g.cm}^{-3}$
- Roches: $\rho \approx 2-3 \text{ g.cm}^{-3}$
- Métaux: $\rho \approx 5 \text{ g.cm}^{-3}$
- Terre: $\rho = 5.5 \text{ g.cm}^{-3}$

• Densité = Masse / Volume

Propriétés physique: Densité

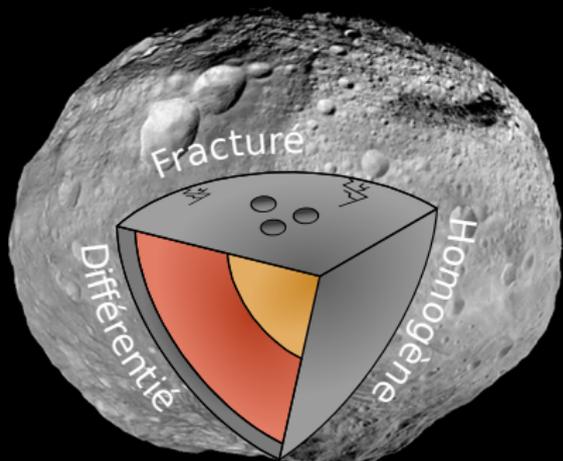
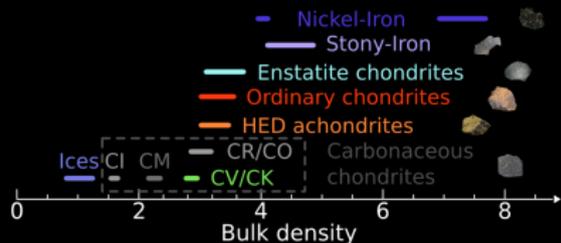


• Densité \Leftrightarrow composition

- Glaces: $\rho \approx 1 \text{ g.cm}^{-3}$
- Roches: $\rho \approx 2-3 \text{ g.cm}^{-3}$
- Métaux: $\rho \approx 5 \text{ g.cm}^{-3}$
- Terre: $\rho = 5.5 \text{ g.cm}^{-3}$

• Densité = Masse / Volume

Propriétés physique: Densité



• Densité \Leftrightarrow composition

- Glaces: $\rho \approx 1 \text{ g.cm}^{-3}$
- Roches: $\rho \approx 2-3 \text{ g.cm}^{-3}$
- Métaux: $\rho \approx 5 \text{ g.cm}^{-3}$
- Terre: $\rho = 5.5 \text{ g.cm}^{-3}$

• Densité = Masse / Volume

1. Mesure de masse

1. Survol d'une sonde

- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare

2. Satellites

3. Déflexion



Concept de mission AIDA, ESA

1. Mesure de masse

1. Survol d'une sonde

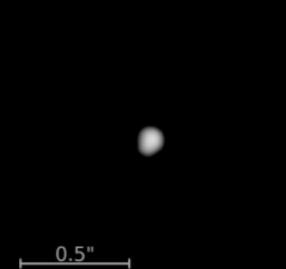
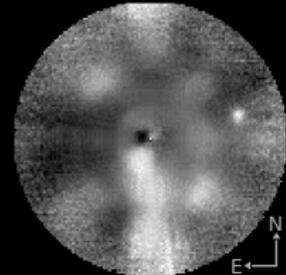
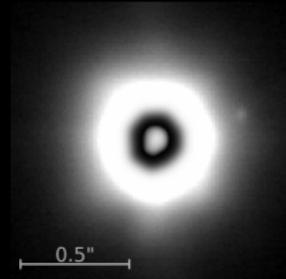
- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare

2. Satellites

- Astéroïde - Satellite
- Précis et assez commun

3. Déflexion

- Astéroïde - Astéroïde
- Peu précis mais commun



1. Mesure de masse

1. Survol d'une sonde

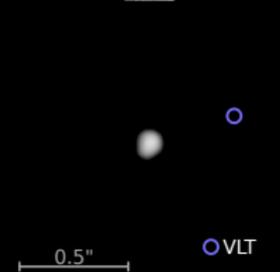
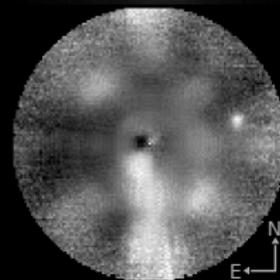
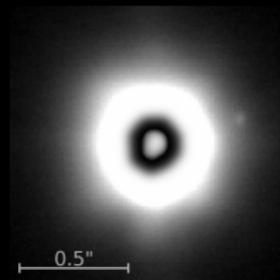
- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare

2. Satellites

- Astéroïde - Satellite
- Précis et assez commun

3. Déflexion

- Astéroïde - Astéroïde
- Peu précis mais commun



1. Mesure de masse

1. Survol d'une sonde

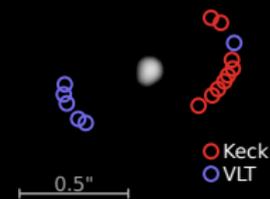
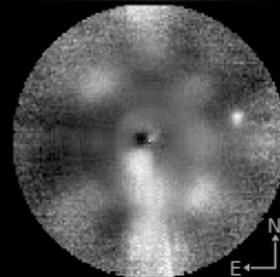
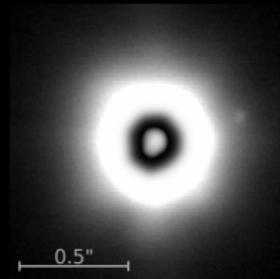
- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare

2. Satellites

- Astéroïde - Satellite
- Précis et assez commun

3. Déflexion

- Astéroïde - Astéroïde
- Peu précis mais commun



1. Mesure de masse

1. Survol d'une sonde

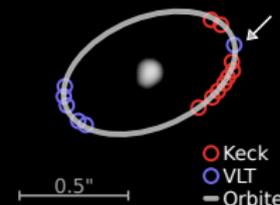
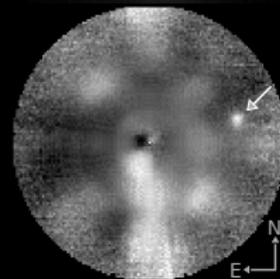
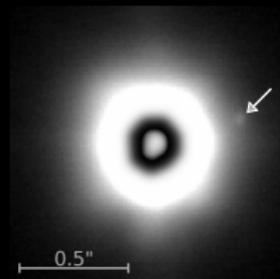
- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare

2. Satellites

- Astéroïde - Satellite
- Précis et assez commun

3. Déflexion

- Astéroïde - Astéroïde
- Peu précis mais commun



1. Mesure de masse

1. Survol d'une sonde

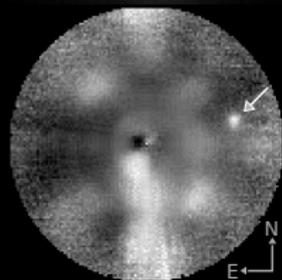
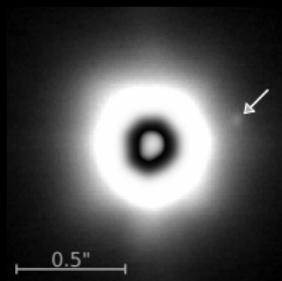
- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare

2. Satellites

- Astéroïde - Satellite
- Précis et assez commun

3. Déflexion

- Astéroïde - Astéroïde
- Peu précis mais commun



1. Mesure de masse

1. Survol d'une sonde

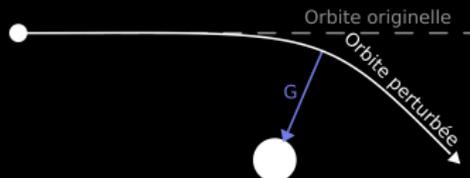
- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare

2. Satellites

- Astéroïde - Satellite
- Précis et assez commun

3. Déflexion

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



1. Mesure de masse

1. Survol d'une sonde

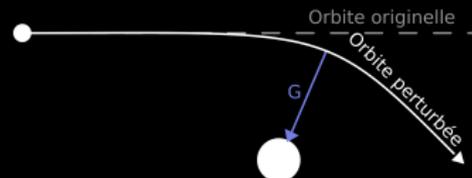
- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare

2. Satellites

- Astéroïde - Satellite
- Précis et assez commun

3. Déflexion

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



ESA

2. Mesure de volume

1. Mesures directes

- **WYSIWYG** \neq model-dépendant
- ▶ Images du disque apparent
- ▶ Occultations stellaires

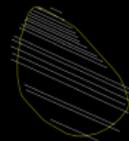
2. Forme 3-D réaliste

3. Complétude des géometries

(21) Lutetia



(135) Hertha



(1) Ceres



1 Euro



@ 2km

2. Mesure de volume

1. Mesures directes

- **WYSIWYG** \neq model-dépendant
- ▶ Images du disque apparent
- ▶ Occultations stellaires

2. Forme 3-D réaliste

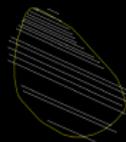
- Hypothèses \Rightarrow **biais**
- Concavité \Leftrightarrow Volume

3. Complétude des géométries

(21) Lutetia



(135) Hertha



(1) Ceres



1 Euro



@ 2km

2. Mesure de volume

1. Mesures directes

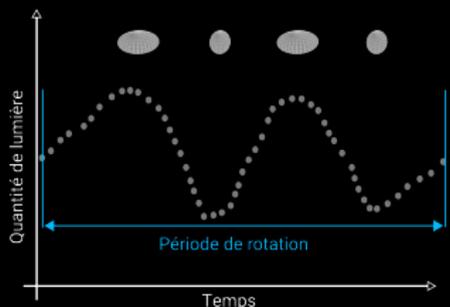
- **WYSIWYG** \neq model-dépendant
 - ▶ Images du disque apparent
 - ▶ Occultations stellaires

2. Forme 3-D réaliste

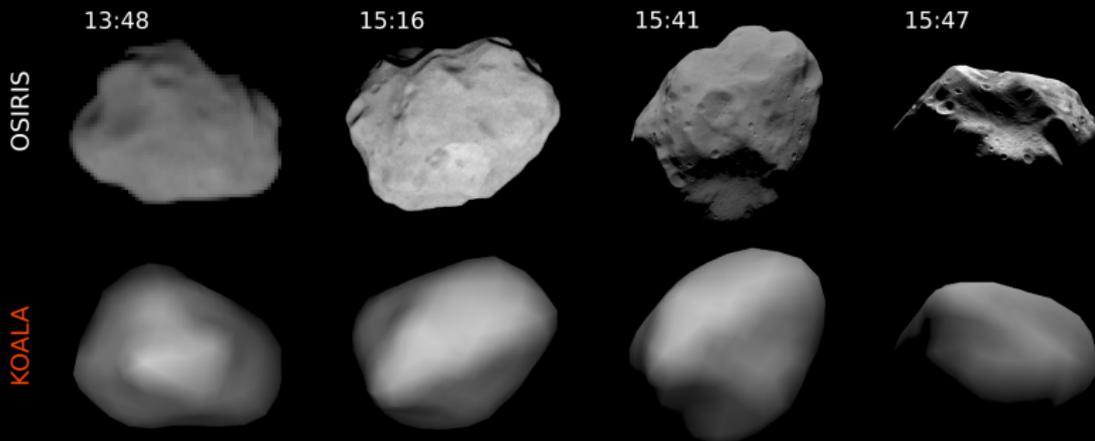
- Hypothèses \Rightarrow **biais**
- Concavité \Leftrightarrow Volume

3. Complétude des géometries

- Approche **extensive**
 - ▶ Courbes de lumières
 - ▶ Radiométrie thermique
 - ▶ Interférométrie
 - ▶ Echos radar



Reconstruction de forme 3-D



Modèle pre-Flyby
KOALA

300 000 000 km

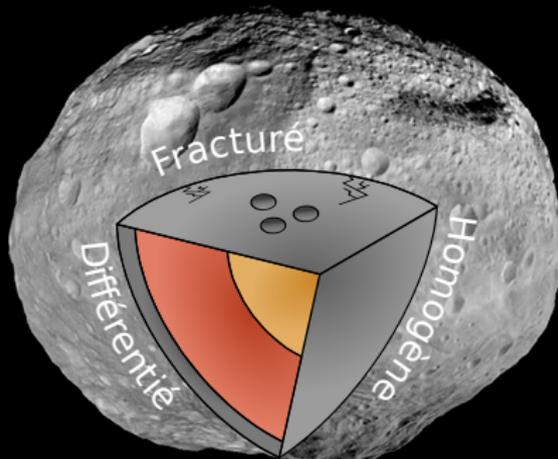
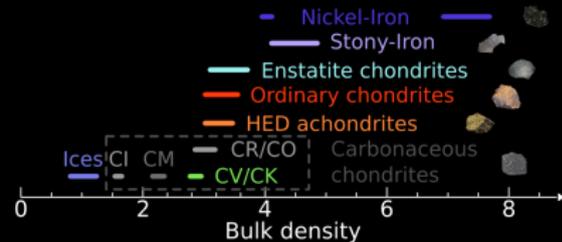
vs. Rosetta
Forme: 2 km

3 000 km

Précision
Diamètre: 2–5%

Carry et al. 2010,2012

Propriétés physique: Densité



• Densité \Leftrightarrow composition

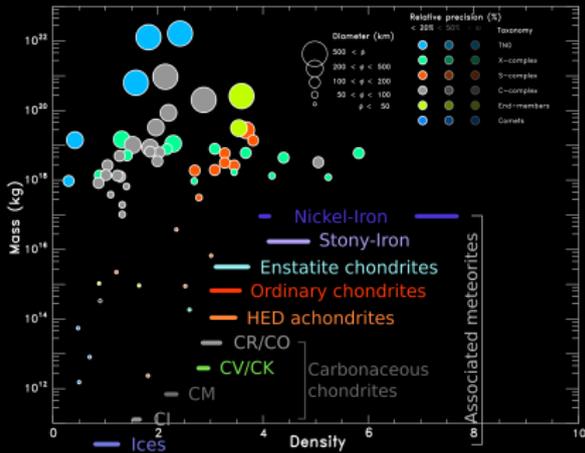
- Glace: $\rho \approx 1 \text{ g.cm}^{-3}$
- Roche: $\rho \approx 2-3 \text{ g.cm}^{-3}$
- Metal: $\rho \approx 5 \text{ g.cm}^{-3}$
- Terre: $\rho = 5.5 \text{ g.cm}^{-3}$

• Densité = Masse / Volume

• Densité et compositions

Accès à la structure interne!

Propriétés physique: 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: $\rho = 5.5 \text{ g.cm}^{-3}$

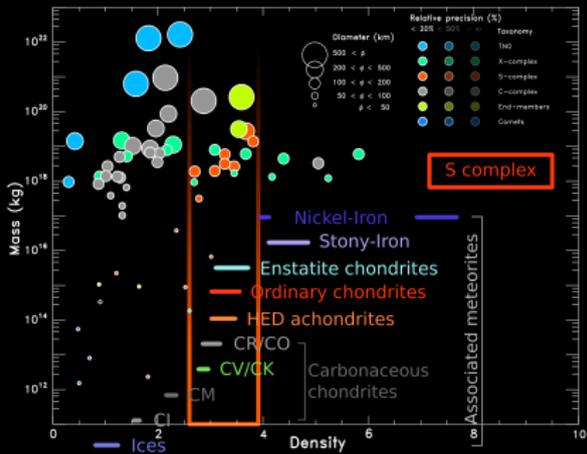
• Densité = Masse / Volume

• Densité et compositions

- Gamme par type
- Dépendance en taille

Accès à la structure interne!

Propriétés physique: 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: $\rho = 5.5 \text{ g.cm}^{-3}$

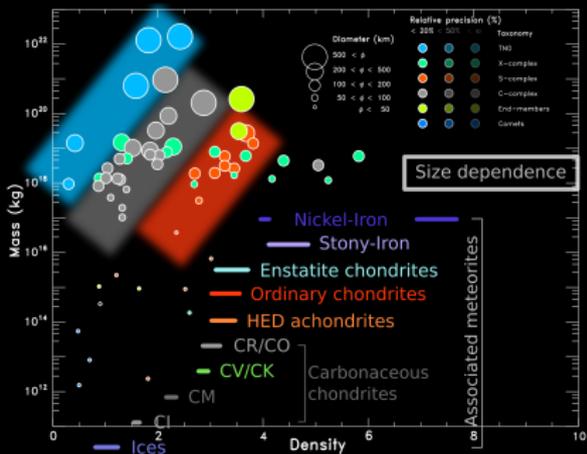
- Densité = Masse / Volume

- Densité et compositions

- Gamme par type
- Dépendance en taille

▷ Accès à la structure interne!

Propriétés physique: 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: $\rho = 5.5 \text{ g.cm}^{-3}$

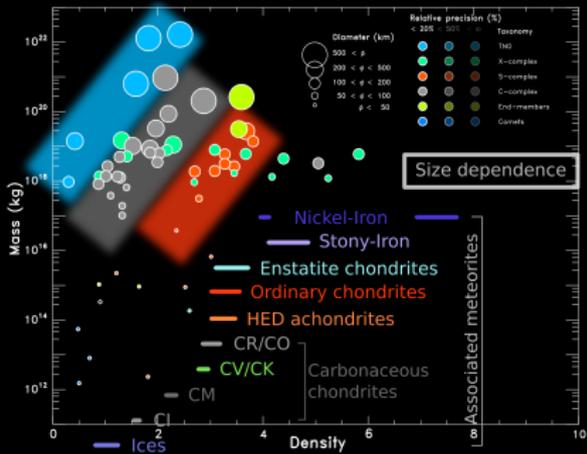
- Densité = Masse / Volume

- Densité et compositions

- Gamme par type
- Dépendance en taille

▷ Accès à la structure interne!

Propriétés physique: 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!

1. Formation planétaire
2. Système Solaire
3. Interrogations
4. Origine de l'eau
5. Masse et densité
6. Astéroïdes et Météorites

Les impacts d'astéroïdes

1. Collisions anciennes

2. Rapport récent de bolides

3. Bolides sont fréquents!

4. Source de météorite = NEAs

5. Source des NEAs?



Les impacts d'astéroïdes

1. Collisions anciennes
2. Rapport récent de bolides
3. Bolides sont fréquents!
4. Source de météorite = NEAs
5. Source des NEAs?

● Tunguska en 1908



● Carancas en 2008



● Chelyabinsk en 2013



Les impacts d'astéroïdes

1. Collisions anciennes
2. Rapport récent de bolides
3. Bolides **sont** fréquents!
4. Source de météorite = NEAs
5. Source des NEAs?



Les impacts d'astéroïdes

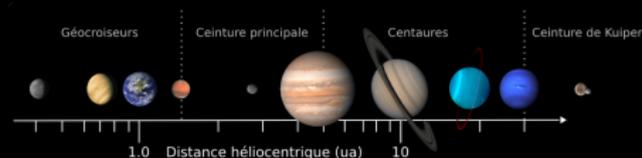
1. Collisions anciennes
2. Rapport récent de bolides
3. Bolides **sont** fréquents!
4. Source de météorite = NEAs
5. Source des NEAs?



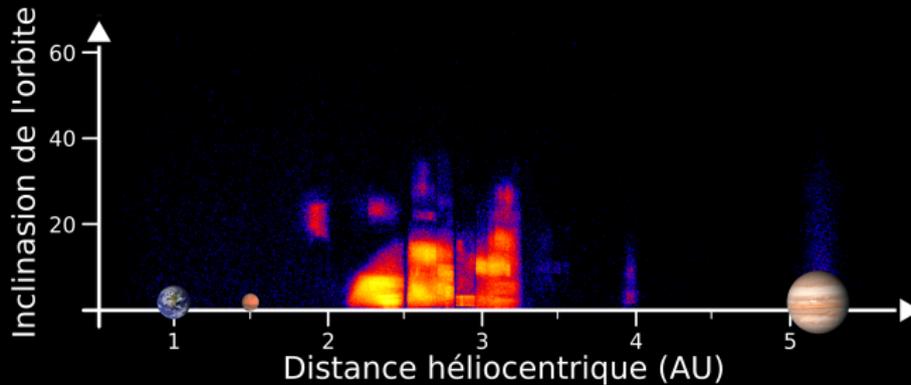
American Meteor Society

Les impacts d'astéroïdes

1. Collisions anciennes
2. Rapport récent de bolides
3. Bolides **sont** fréquents!
4. Source de météorite = NEAs
5. Source des NEAs?

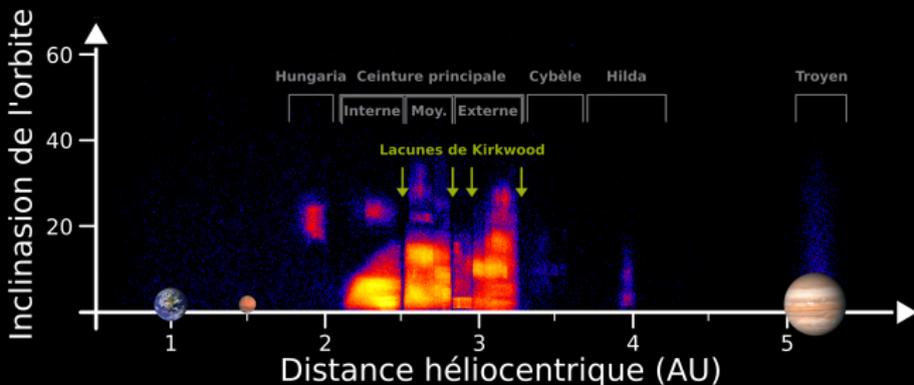


Géocroiseurs de la ceinture



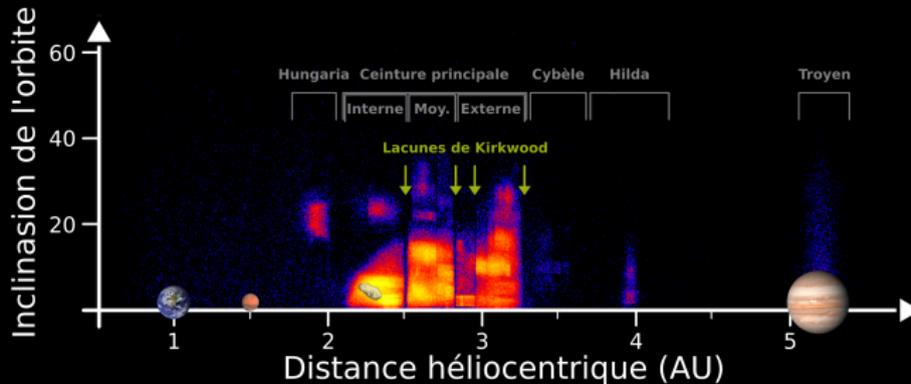
1. Ceinture & résonances
2. Astéroïde sur résonance par
 - ▶ Collision
 - ▶ Yarkovsky
3. Rencontres planétaires

Géocroiseurs de la ceinture



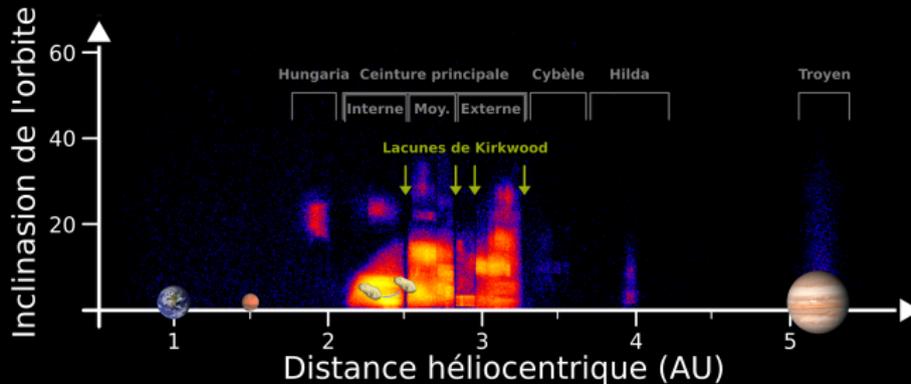
1. Ceinture & résonances
2. Astéroïde sur résonance par
 - ▶ Collision
 - ▶ Yarkovsky
3. Rencontres planétaires

Géocroiseurs de la ceinture

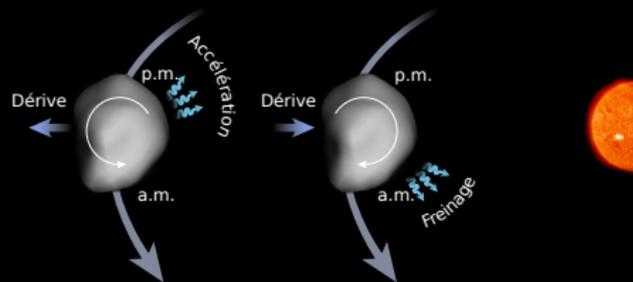


1. Ceinture & résonances
2. Astéroïde sur résonance par
 - ▶ Collision
 - ▶ Yarkovsky
3. Rencontres planétaires

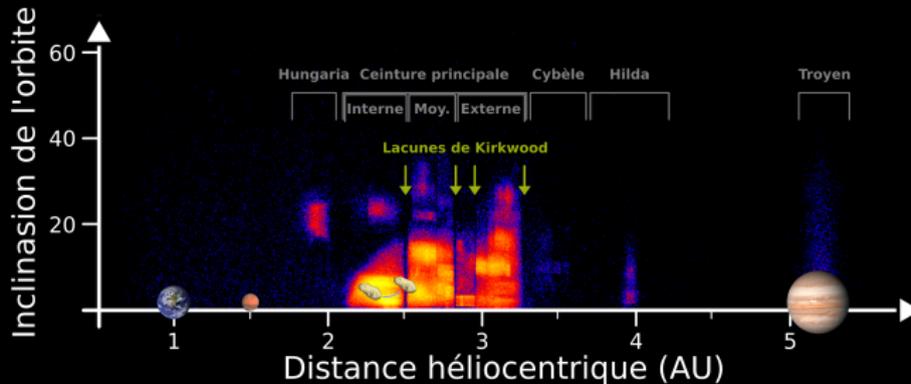
Géocroiseurs de la ceinture



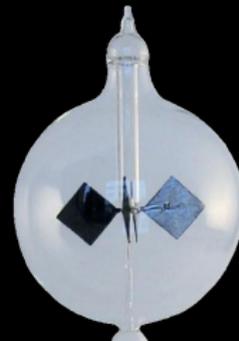
1. Ceinture & résonances
2. Astéroïde sur résonance par
 - ▶ Collision
 - ▶ Yarkovsky
3. Rencontres planétaires



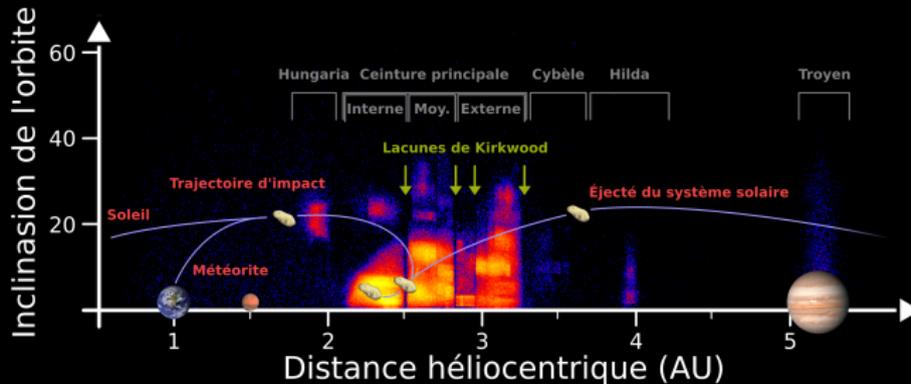
Géocroiseurs de la ceinture



1. Ceinture & résonances
2. Astéroïde sur résonance par
 - ▶ Collision
 - ▶ Yarkovsky
3. Rencontres planétaires



Géocroiseurs de la ceinture



1. Ceinture & résonances
2. Astéroïde sur résonance par
 - ▶ Collision
 - ▶ Yarkovsky
3. Rencontres planétaires

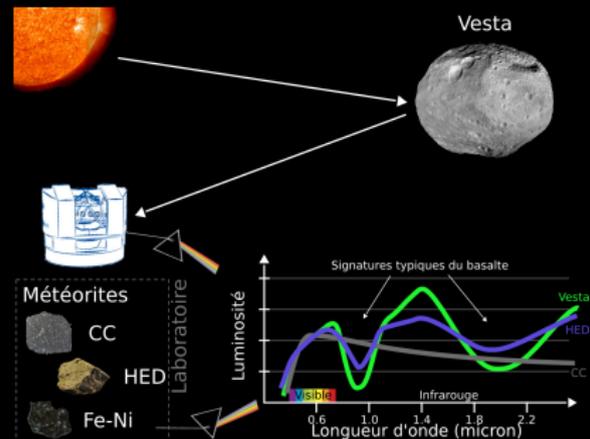
Météorites & Composition

► Composition des astéroïdes:

- Spectroscopie V+IR
- Comparaison avec météorites

► Représentativité?

► Solutions?



Météorites & Composition

► Composition des astéroïdes:

- Spectroscopie V+IR
- Comparaison avec météorites

► Représentativité?

- Astéroïdes: 26 classes
- Météorites: 46 classes
- ▷ ???

► Solutions?

Bus-DeMeo Taxonomy Key

S-complex



C-complex



X-complex



End Members



<http://smass.mit.edu/busdemeoclass.html>

F. E. DeMeo, R. P. Binzel, S. M. Slivan, and S. J. Bus. Icarus 202 (2009) 180-180

DeMeo et al. 2009

Météorites & Composition

► Composition des astéroïdes:

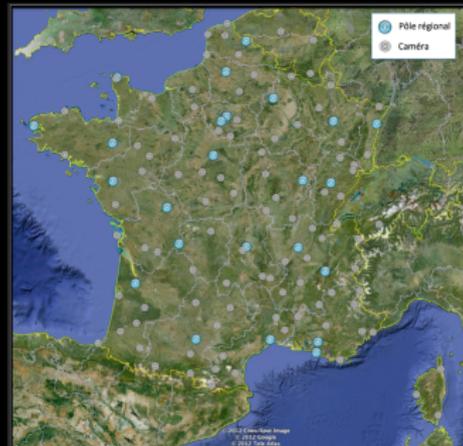
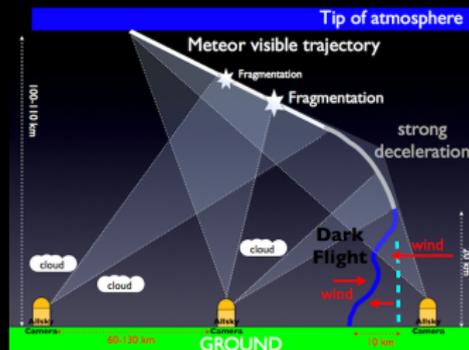
- Spectroscopie V+IR
- Comparaison avec météorites

► Représentativité?

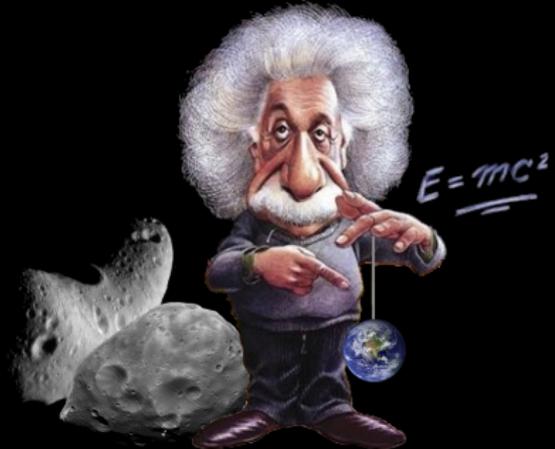
- Astéroïdes: 26 classes
- Météorites: 46 classes
- ▷ ???

► Solutions?

- Réseau de vigie ciel
- Spectres d'astéroïdes



Astéroïdes, Comètes, Météores



Briques de constructions du système solaire