

Qu'est-ce qu'un modèle en physique ?

Exemple : formation et évolution des planètes

Raphaël Galicher

Mardi 16 février 2010



Plan

Avant 1995 : notre système solaire

Observations

Modèles planètes telluriques

Modèles géantes gazeuses

Après 1995 : exoplanètes

Observations et remise en cause des modèles

Adaptation des modèles

Plan

Avant 1995 : notre système solaire

Observations

Modèles planètes telluriques

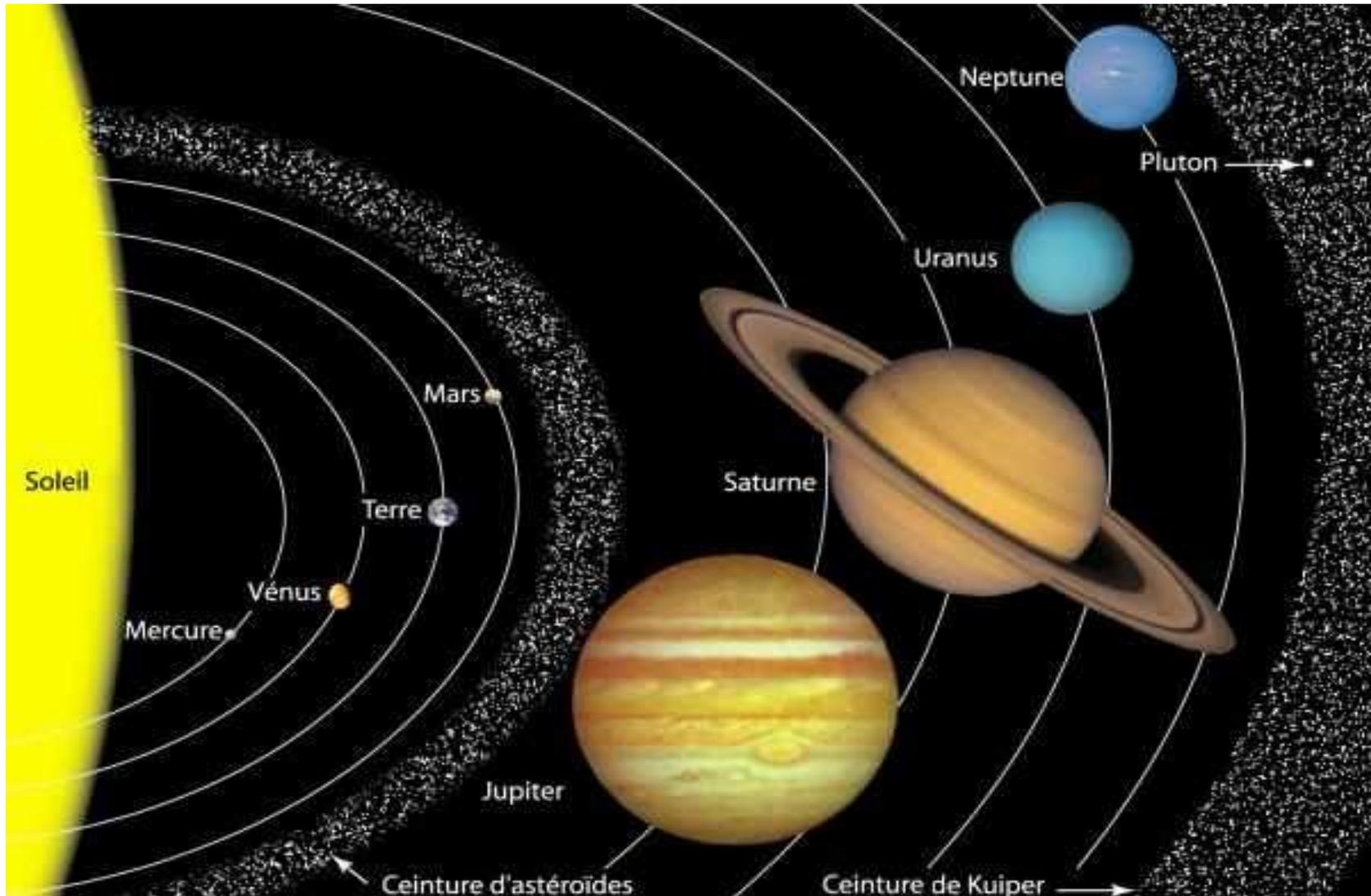
Modèles géantes gazeuses

Après 1995 : exoplanètes

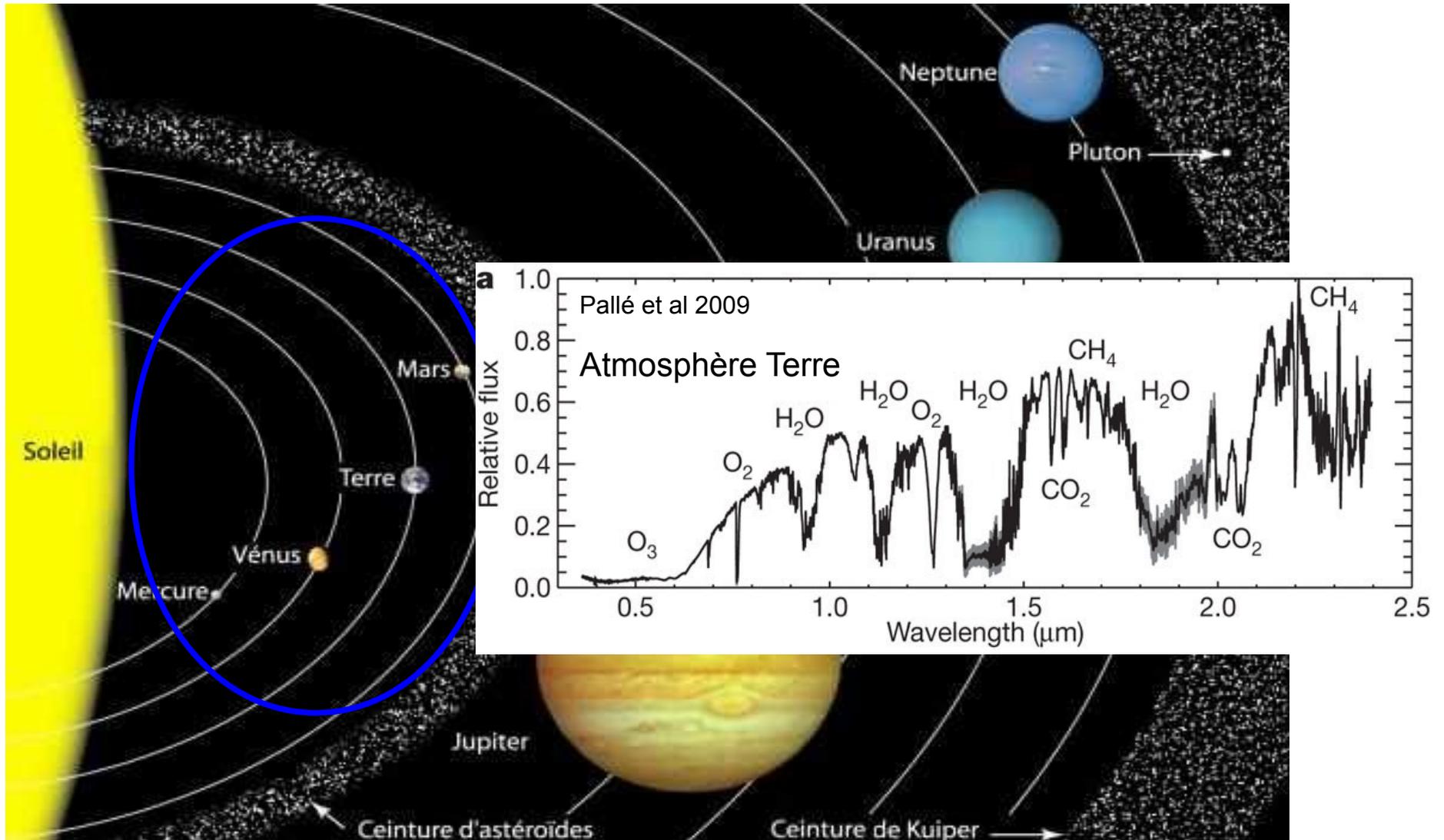
Observations et remise en cause des modèles

Adaptation des modèles

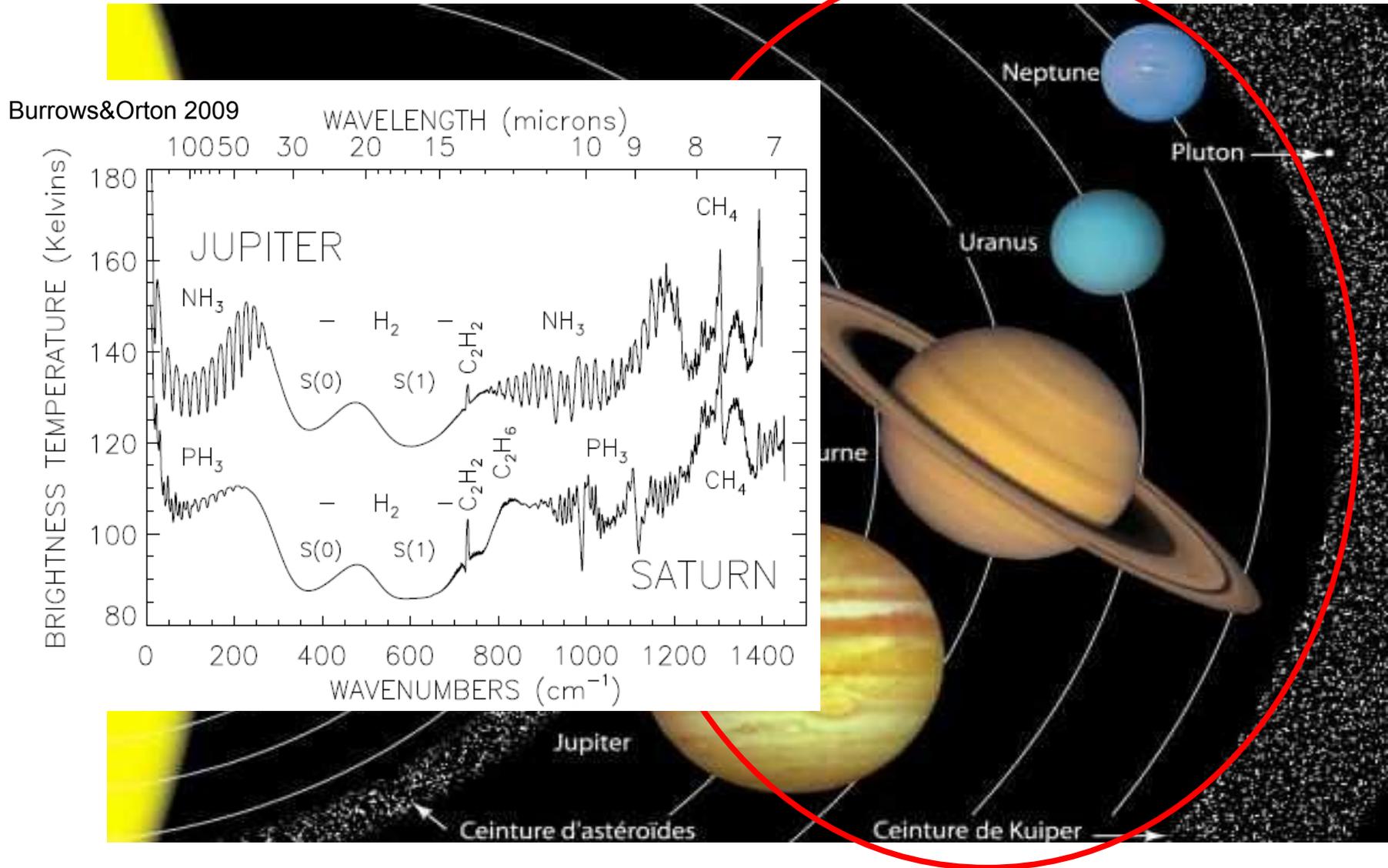
Observations : notre système



Observations : notre système



Observations : notre système



Modèles de formation avant 1995

Objectif : **Expliquer** formation de NOS planètes
avec leurs **propriétés mesurées**.

Modèles :

- **Planètes telluriques**
- **Géantes gazeuses**

Plan

Avant 1995 : notre système solaire

Observations

Modèles planètes telluriques

Modèles géantes gazeuses

Après 1995 : exoplanètes

Observations et remise en cause des modèles

Adaptation des modèles

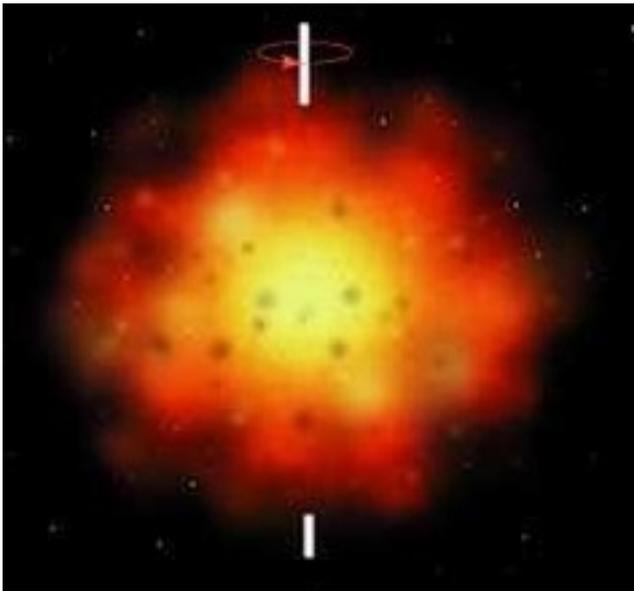
Planètes telluriques



Accrétion de roches

Étape 1 : disque protoplanétaire

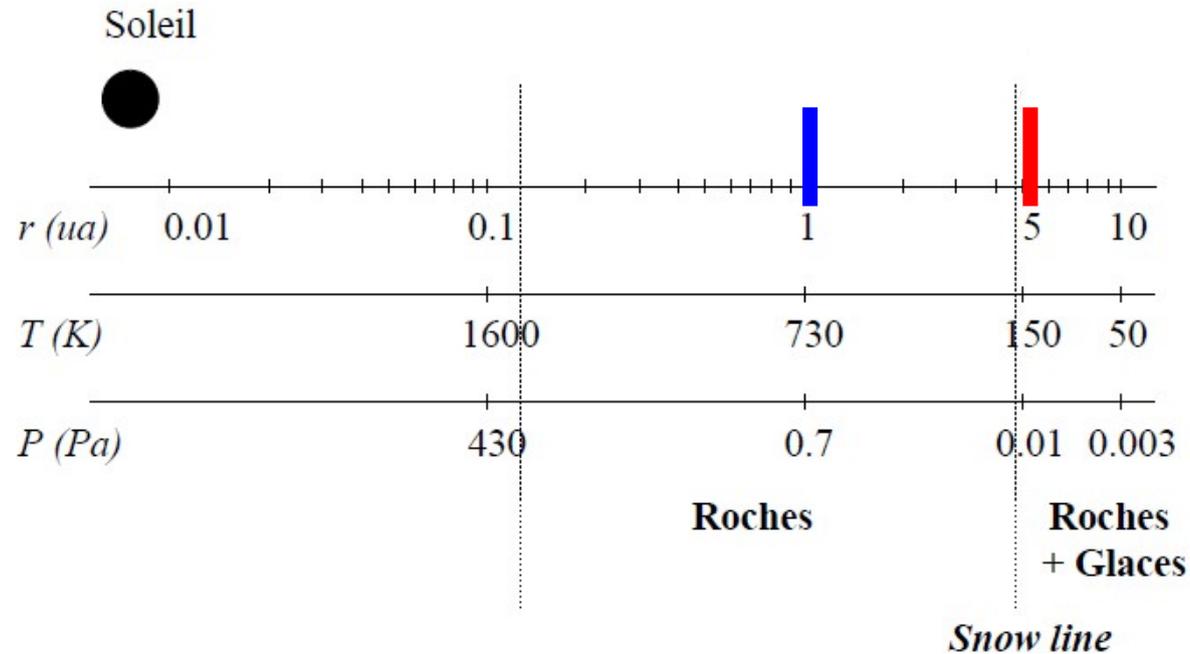
Conservation moment cinétique



Disque : gaz + poussières (μm)

Modèle standard du disque

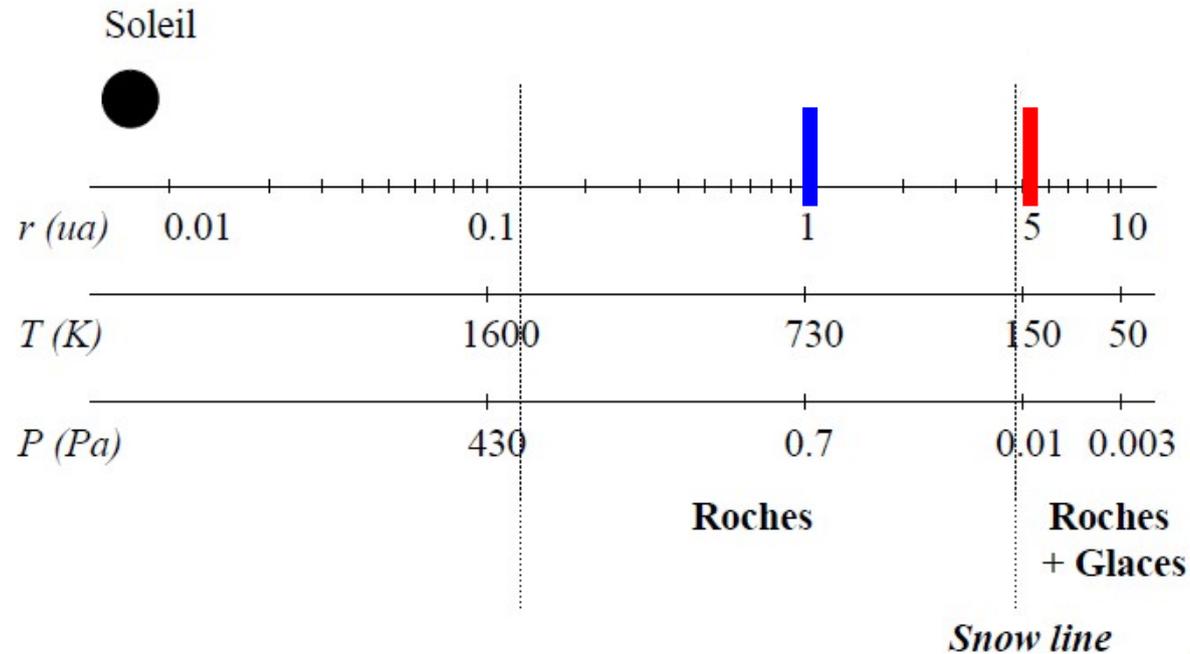
Températures de condensation



Terquem 2005

Modèle standard du disque

Températures de condensation

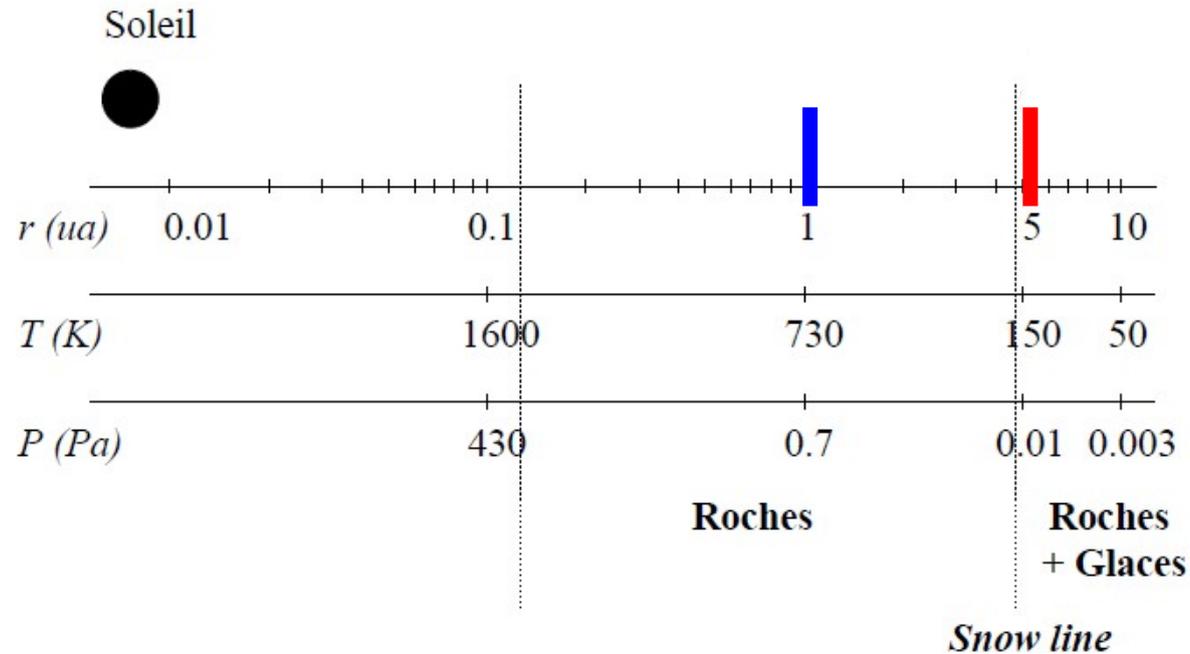


Terquem 2005



Modèle standard du disque

Températures de condensation

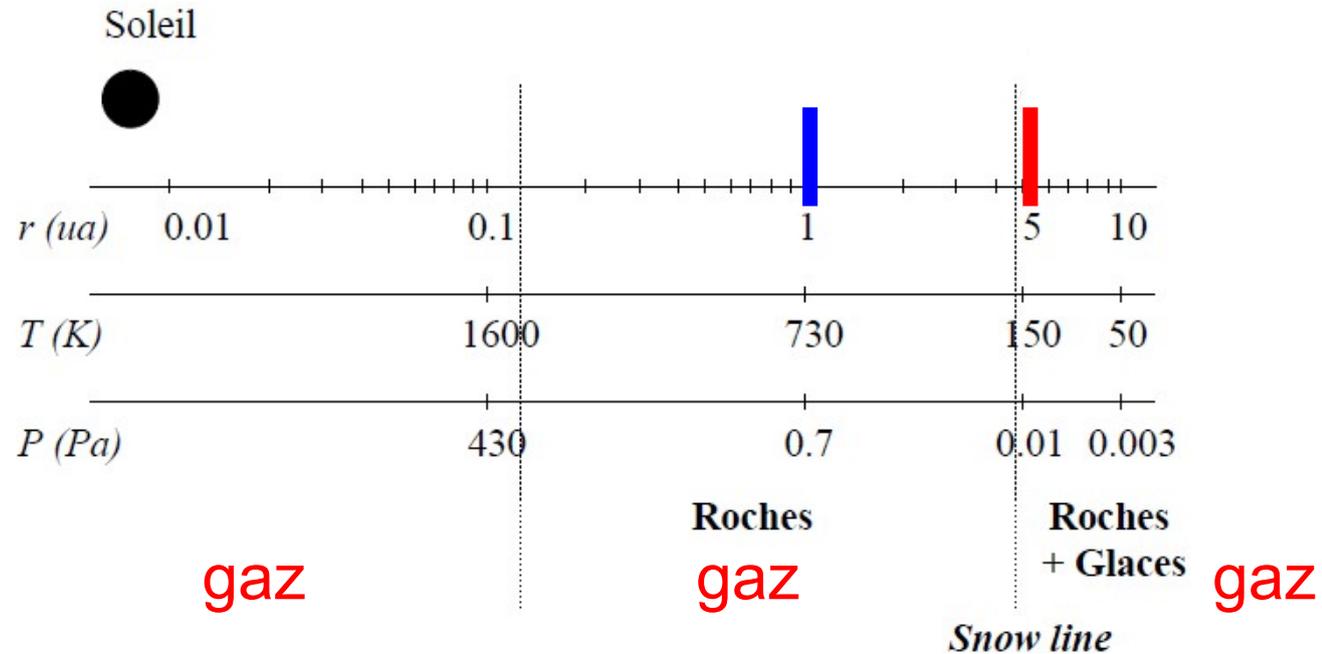


Terquem 2005



Modèle standard du disque

Températures de condensation

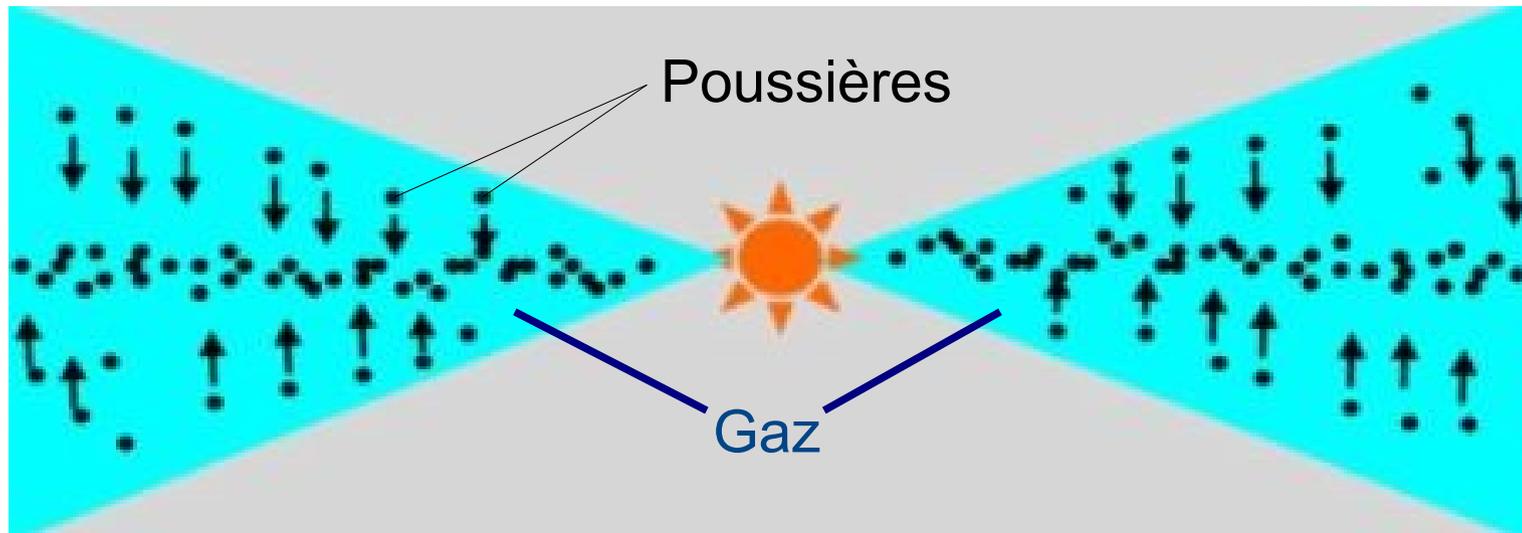


Terquem 2005



Étape 2 : sédimentation

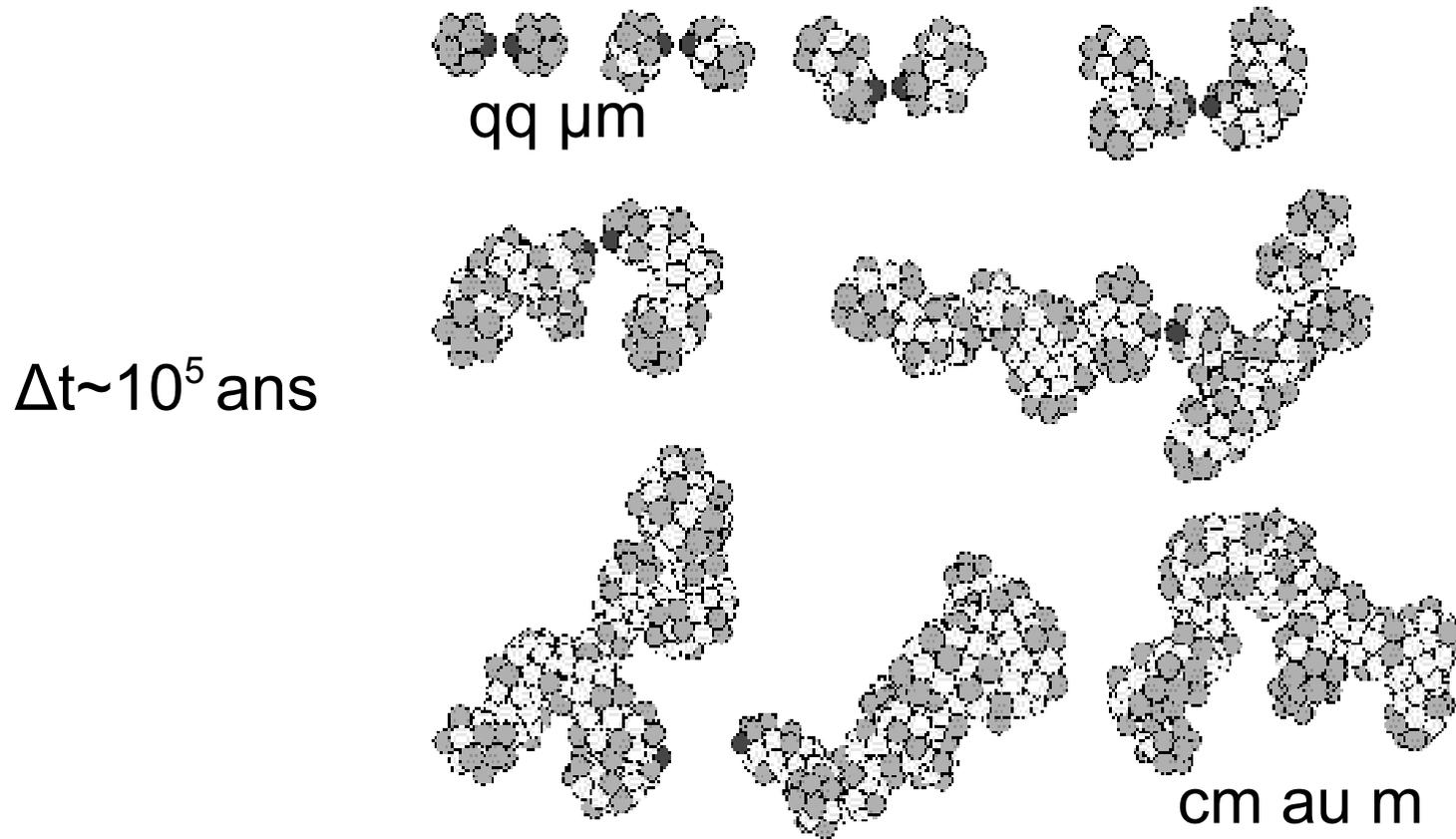
Le gaz entraîne les poussières (μm)



Grains plus petits, plus affectés \rightarrow grandes vitesses relatives

Étape 3 : agglomération

Collisions entre petits grains



Étape 3 : agglomération

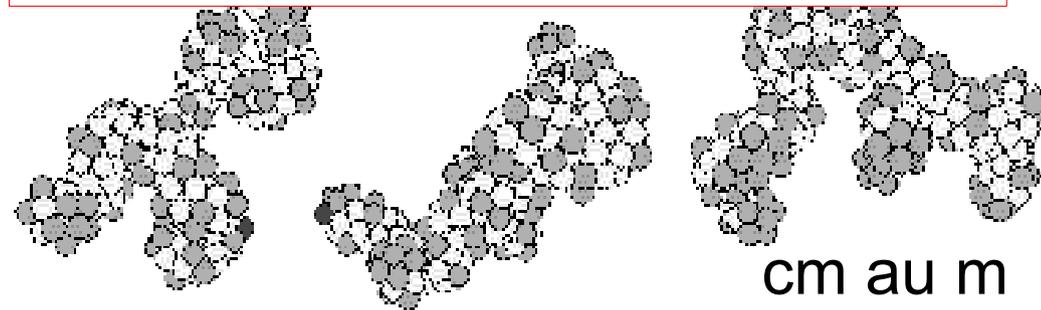
Collisions entre petits grains



Modèle à améliorer

- propriétés grains ?
- turbulence ?
- ...

$\Delta t \sim 10^5$ ans

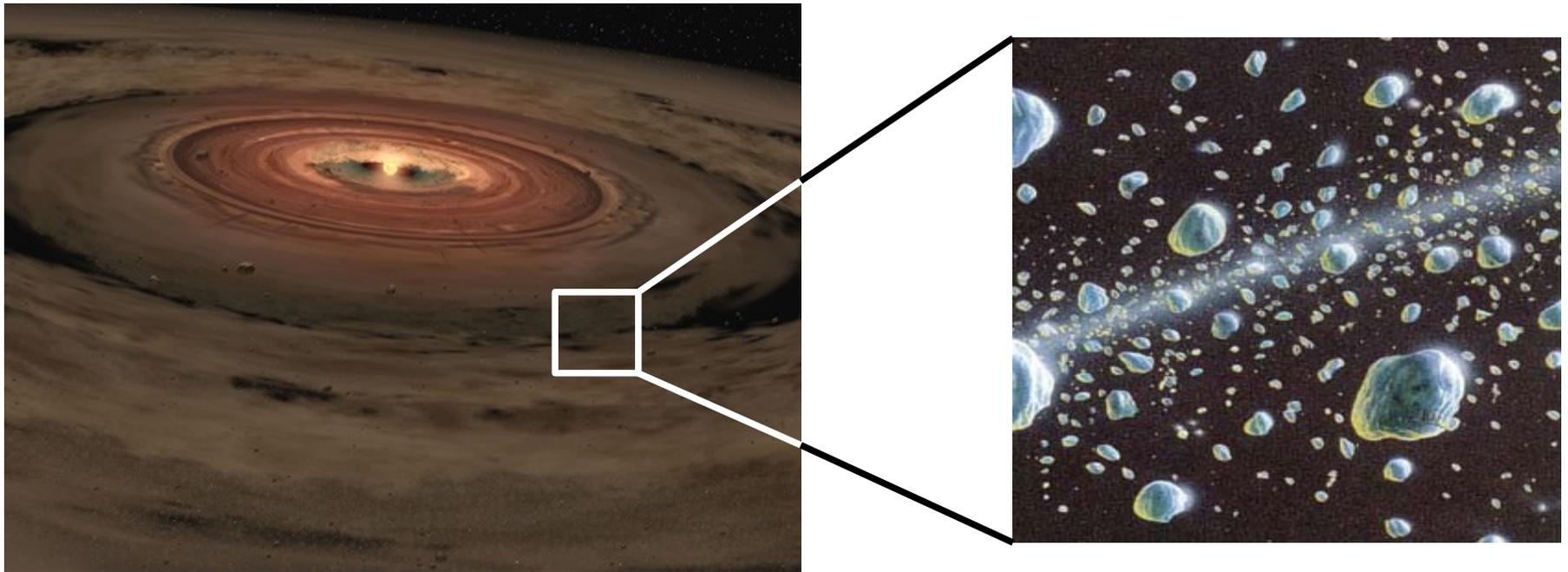


Étape 4 : planétésimaux

Les poussières (cm/m) entraînent le gaz

Agglomération continue → planétésimaux de ~1km

$\Delta t \sim 10^3$ ans

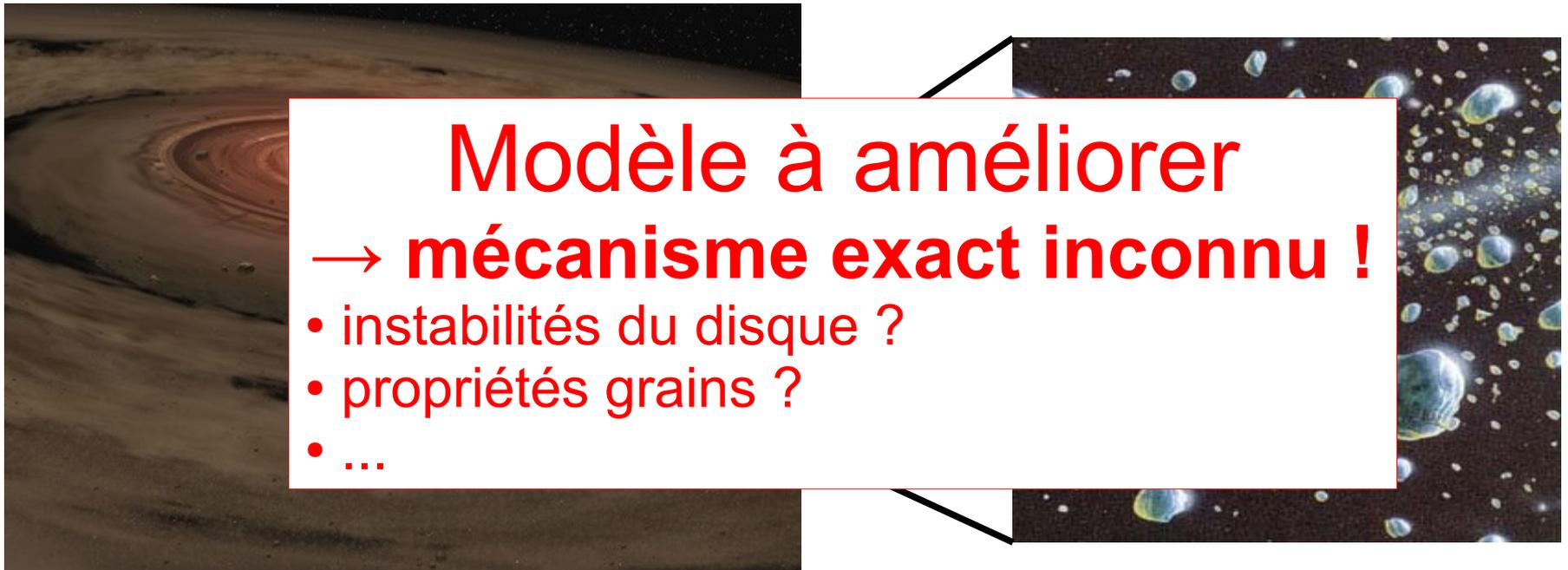


Étape 4 : planétésimaux

Les poussières (cm/m) entraînent le gaz

Agglomération continue → planétésimaux de ~1km

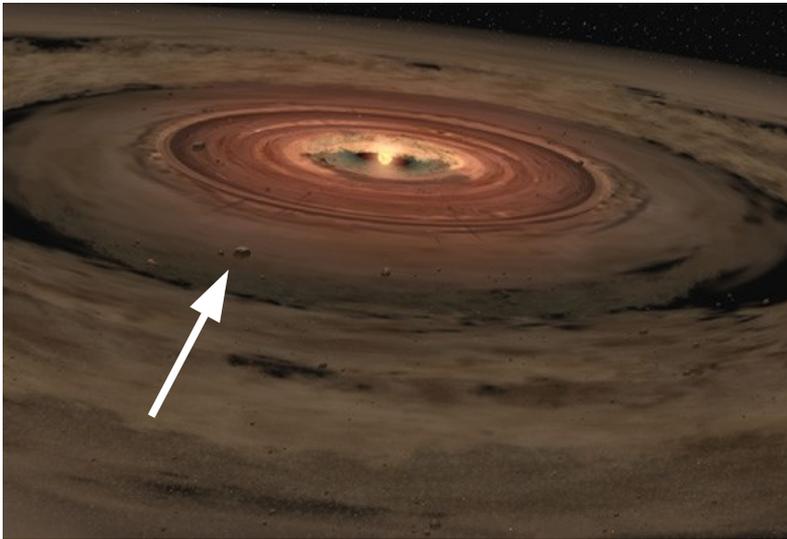
$\Delta t \sim 10^3$ ans



Étape 5 : protoplanètes

Interactions gravitationnelles locales + collisions

$\Delta t \sim 10^5$ ans pour $0,01M_{\oplus}$ à 1UA

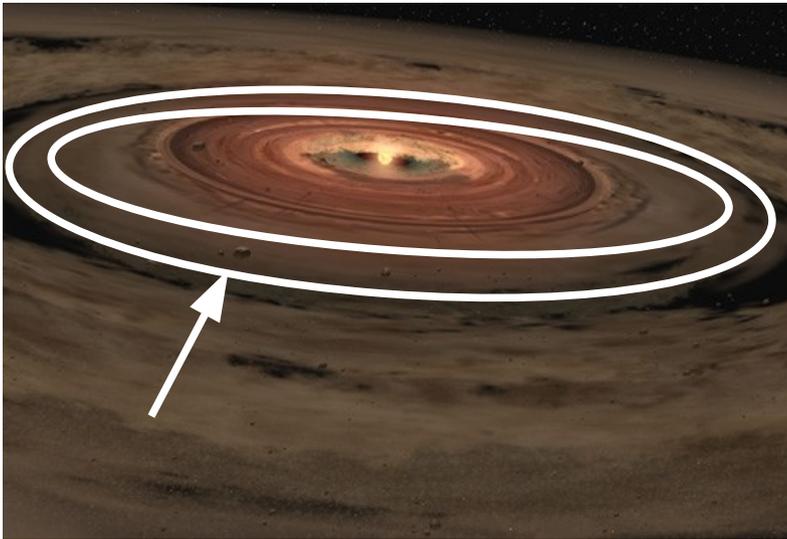


Un gros mange les autres sur son orbite
→ *runaway accretion*

Étape 5 : protoplanètes

Interactions gravitationnelles locales + collisions

$\Delta t \sim 10^5$ ans pour $0,01M_{\oplus}$ à 1UA

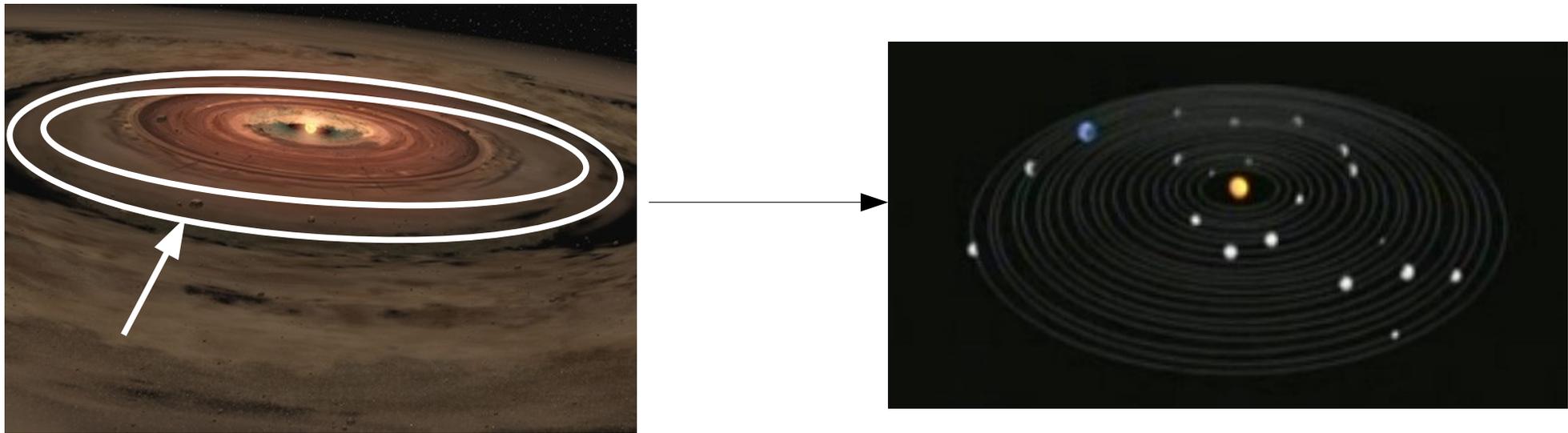


Un gros mange les autres sur son orbite
→ *runaway accretion*

Étape 5 : protoplanètes

Interactions gravitationnelles locales + collisions

$\Delta t \sim 10^5$ ans pour $0,01M_{\oplus}$ à 1UA

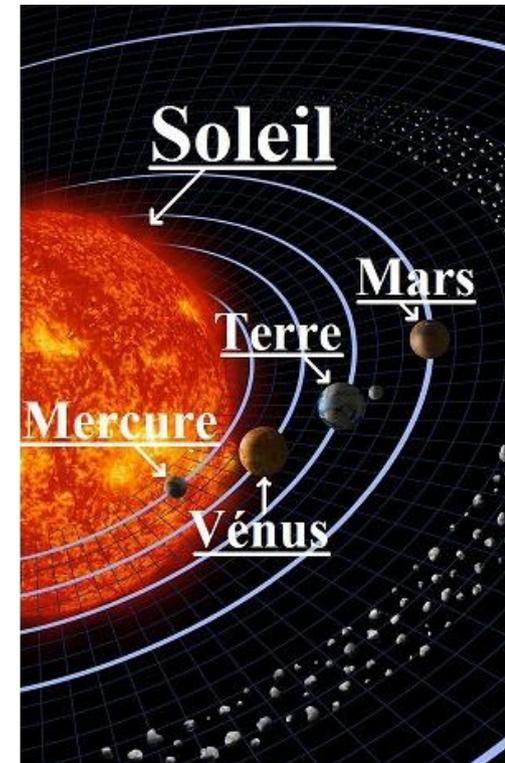
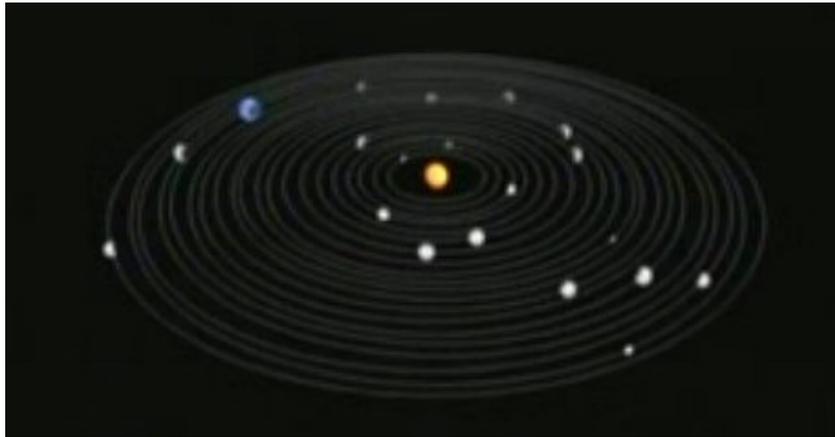


Un gros mange les autres sur son orbite
→ *runaway accretion*

Étape 6 : planètes terrestres

Interactions gravitationnelles lointaines + collisions

$\Delta t \sim 10^8$ ans



- Modèles OK pour planètes telluriques
- Pb pour cœur des géantes gazeuses car plus assez de gaz !

Plan

Avant 1995 : notre système solaire

Observations

Modèles planètes telluriques

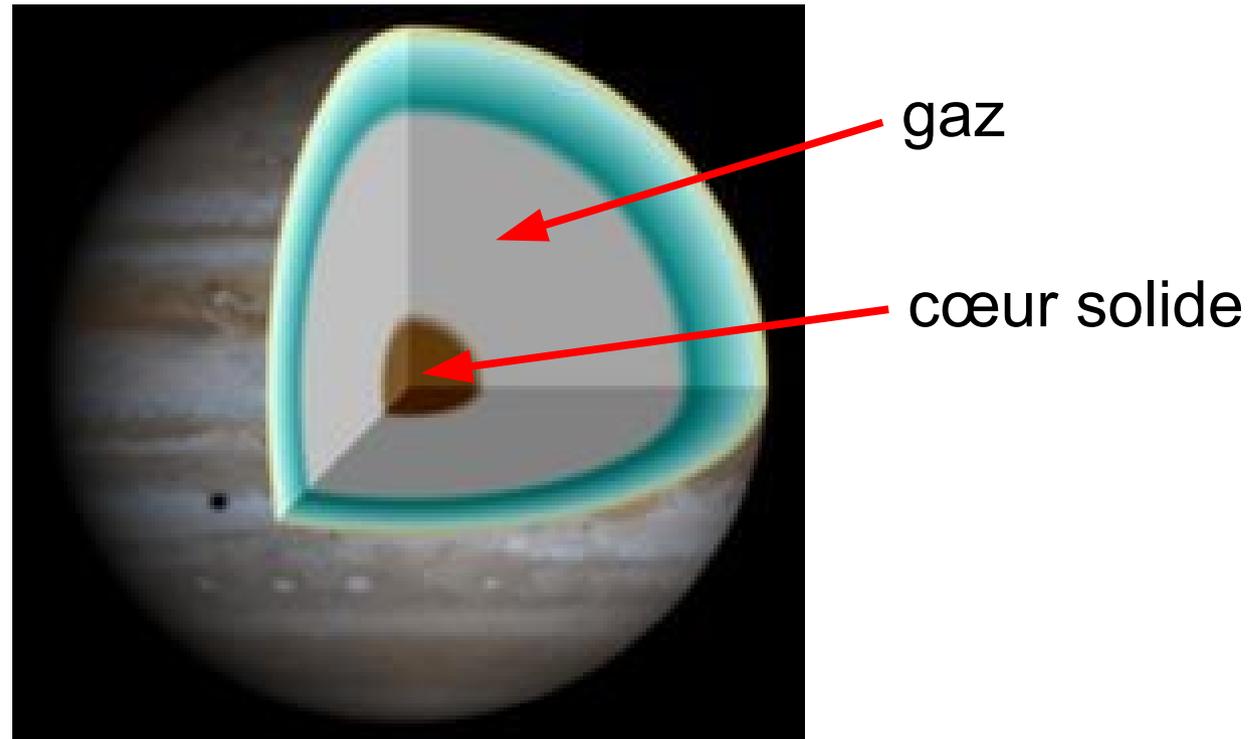
Modèles géantes gazeuses

Après 1995 : exoplanètes

Observations et remise en cause des modèles

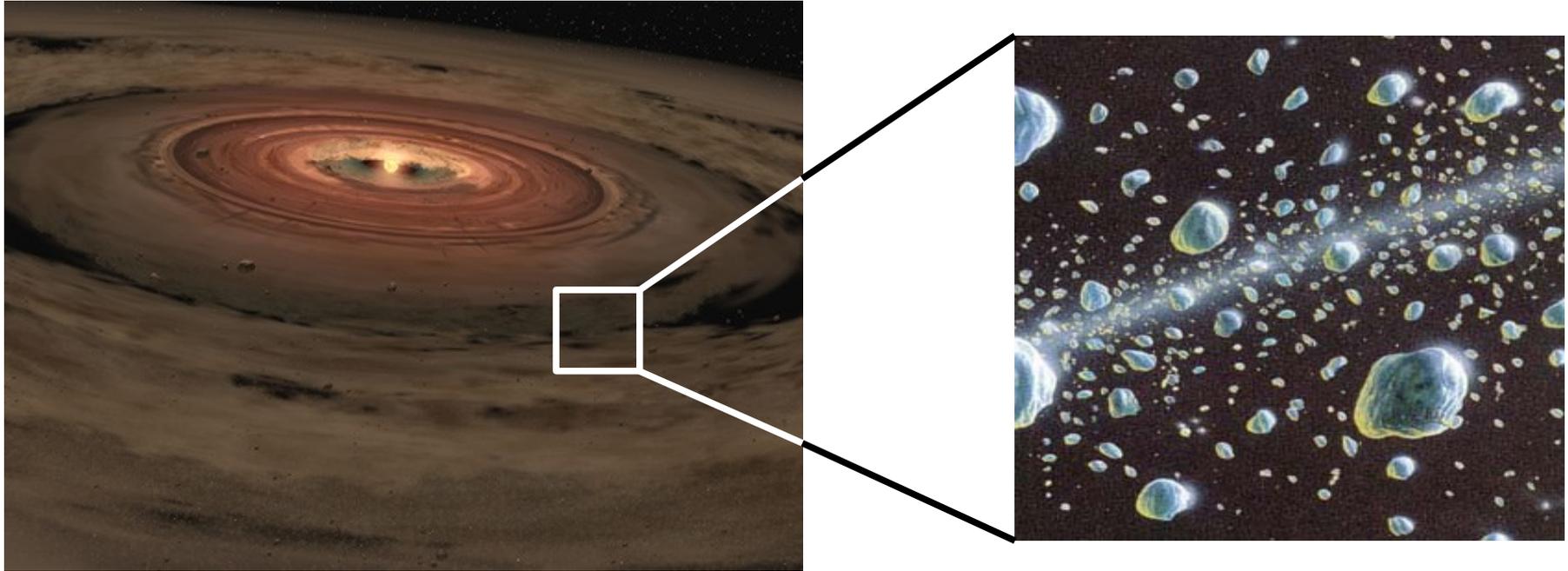
Adaptation des modèles

Géantes gazeuses



Capture de l'atmosphère gazeuse

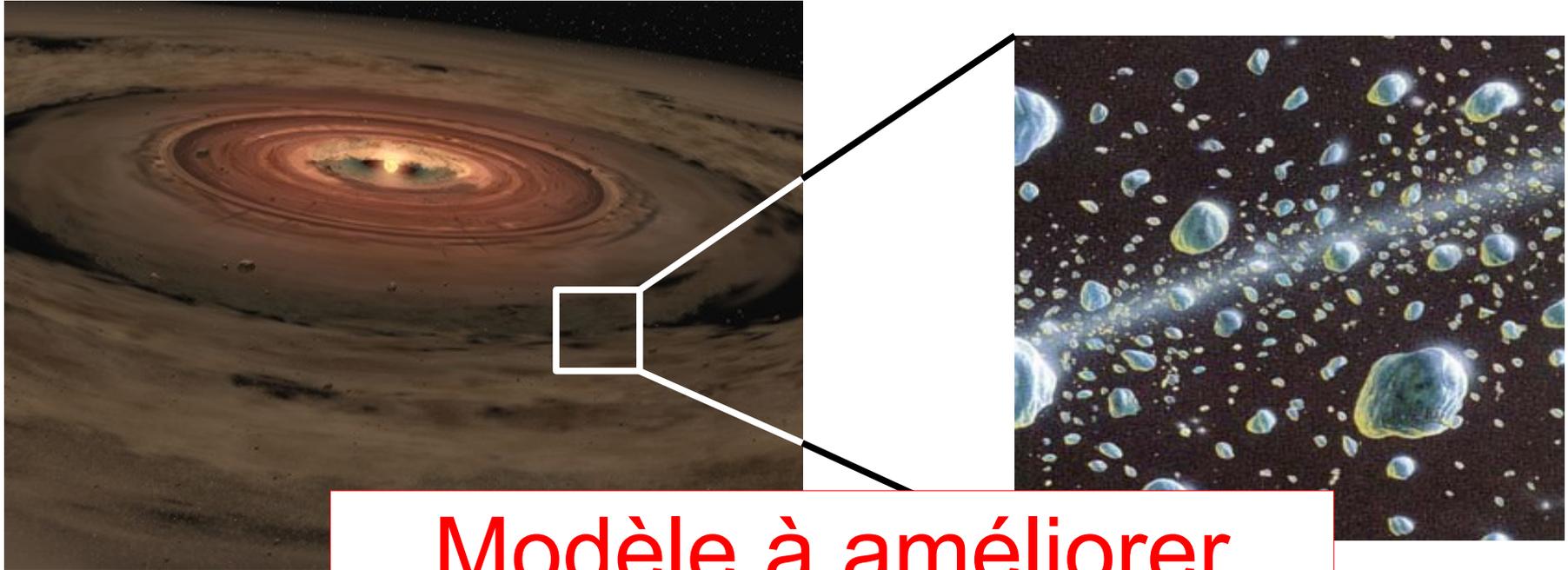
Adaptation du modèle



Énergie gravitationnelle planétésimaux
vs
équilibre atmosphère

5. Gaz et cœur solide ensemble → masse critique } $\Delta t \sim 10^6$ ans
6. Accrétion atmosphère emballée

Adaptation du modèle

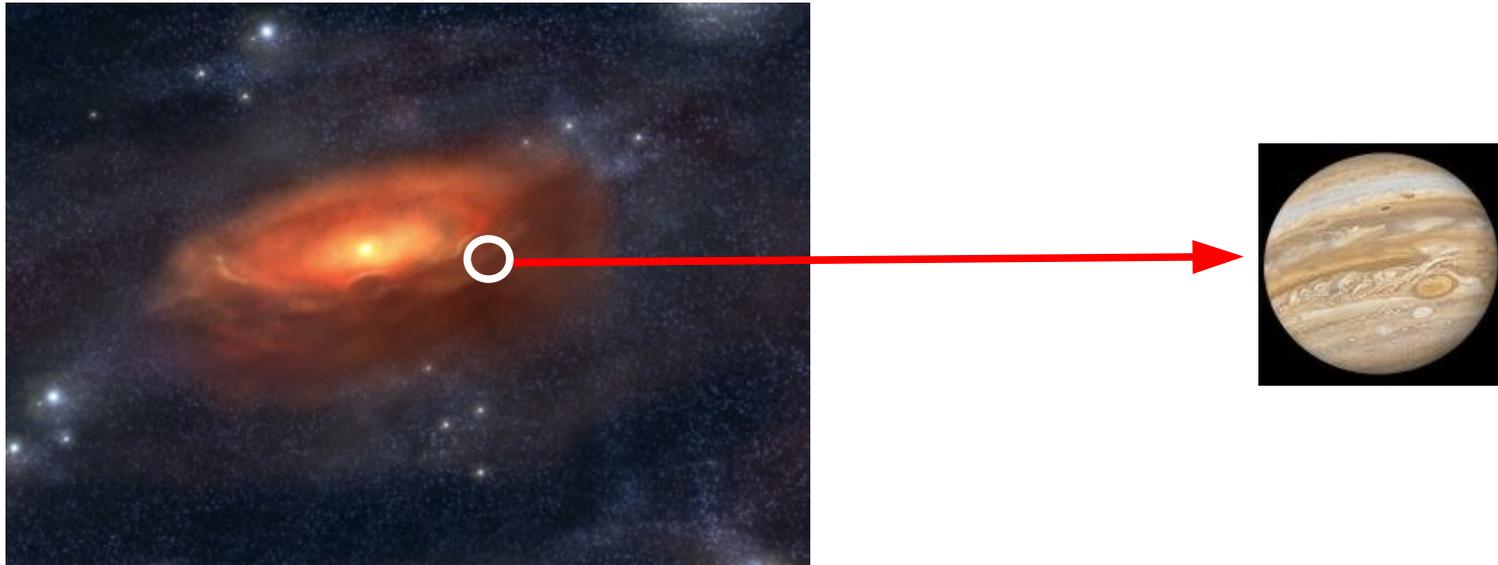


Modèle à améliorer

- écart avec masse du cœur de Jupiter
- ...

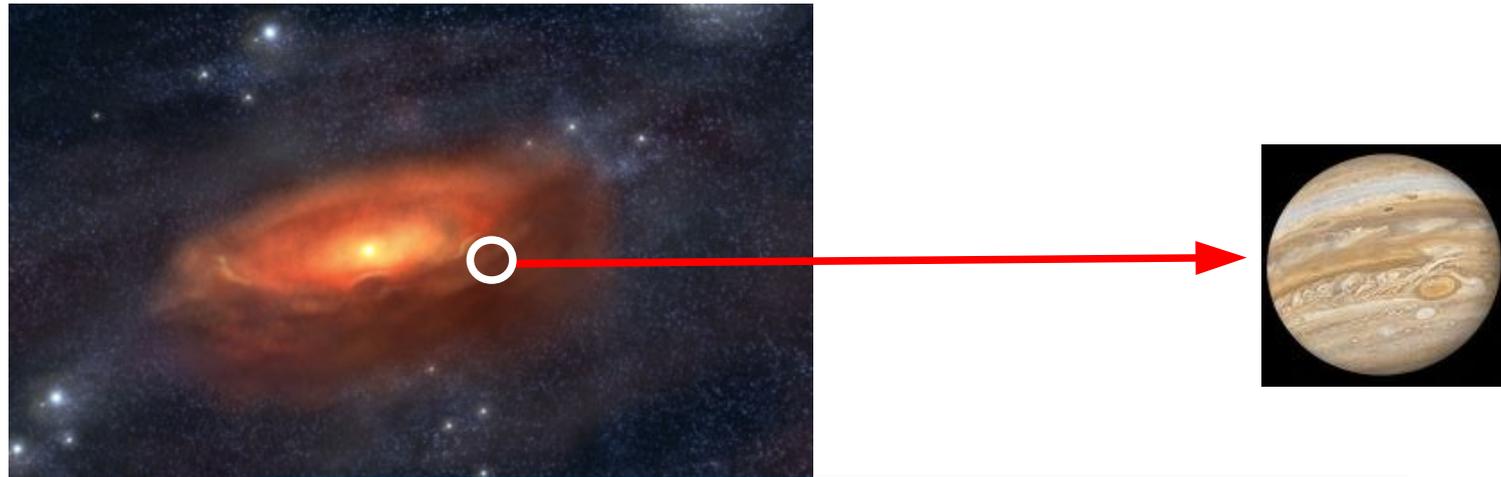
5. Gaz et cœur solide ensemble → masse critique
 6. Accrétion atmosphère emballée
- } $\Delta t \sim 10^6$ ans

Un nouveau modèle



Effondrement gravitationnel + fragmentation du disque

Un nouveau modèle



Modèle à améliorer

- besoin disque trop massif
- pb métallicité des planètes
- ...

Effondrer

sque

Résumé avant 1995

Telluriques
accrétion

Géantes
accrétion modifiée
ou
instabilité gravitationnelle

Plan

Avant 1995 : notre système solaire

Observations

Modèles planètes telluriques

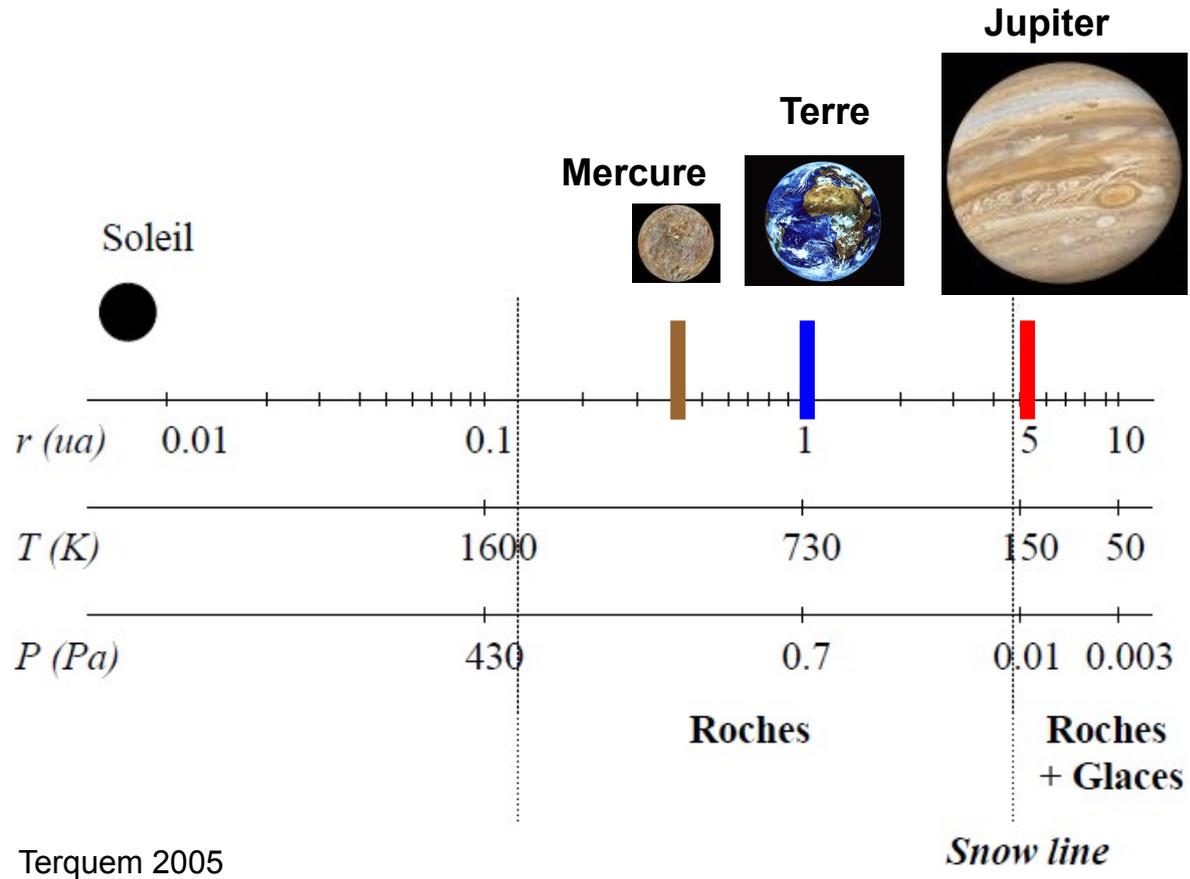
Modèles géantes gazeuses

Après 1995 : exoplanètes

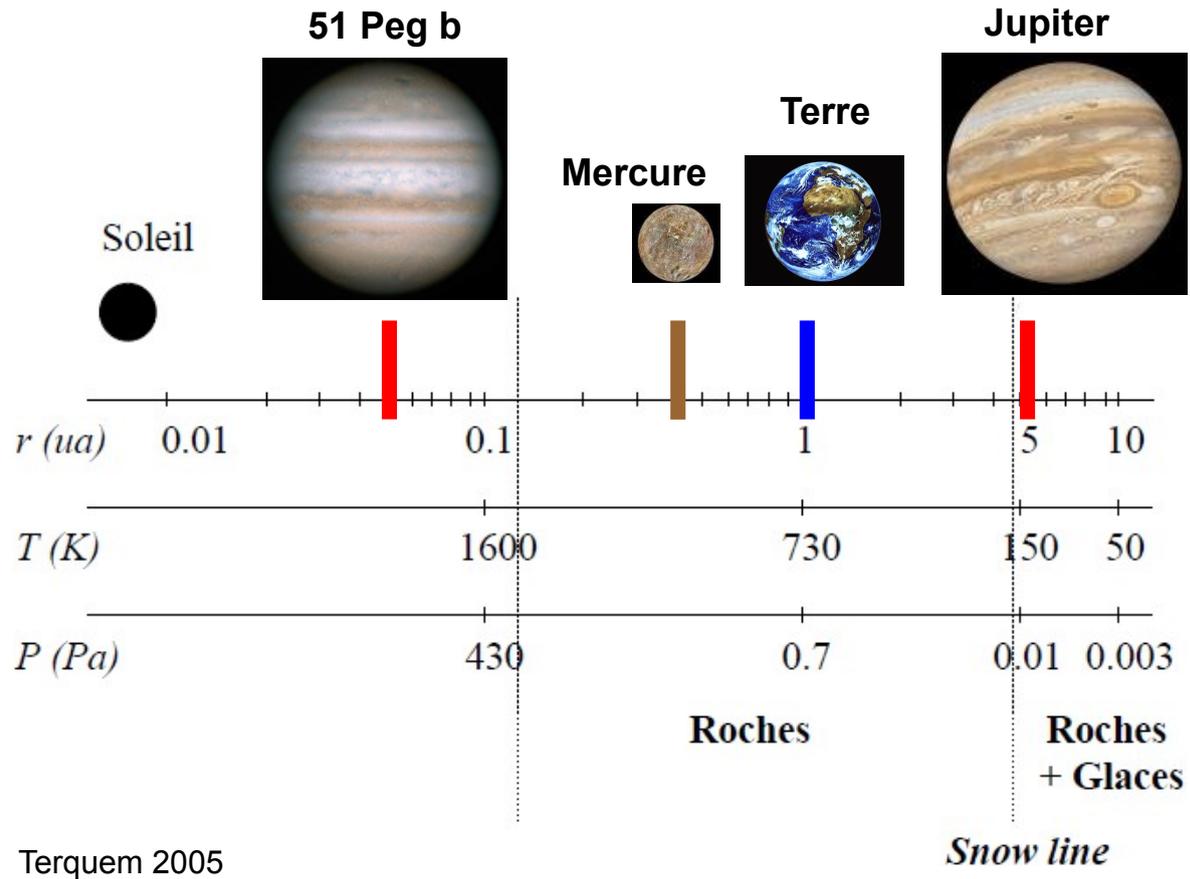
Observations et remise en cause des modèles

Adaptation des modèles

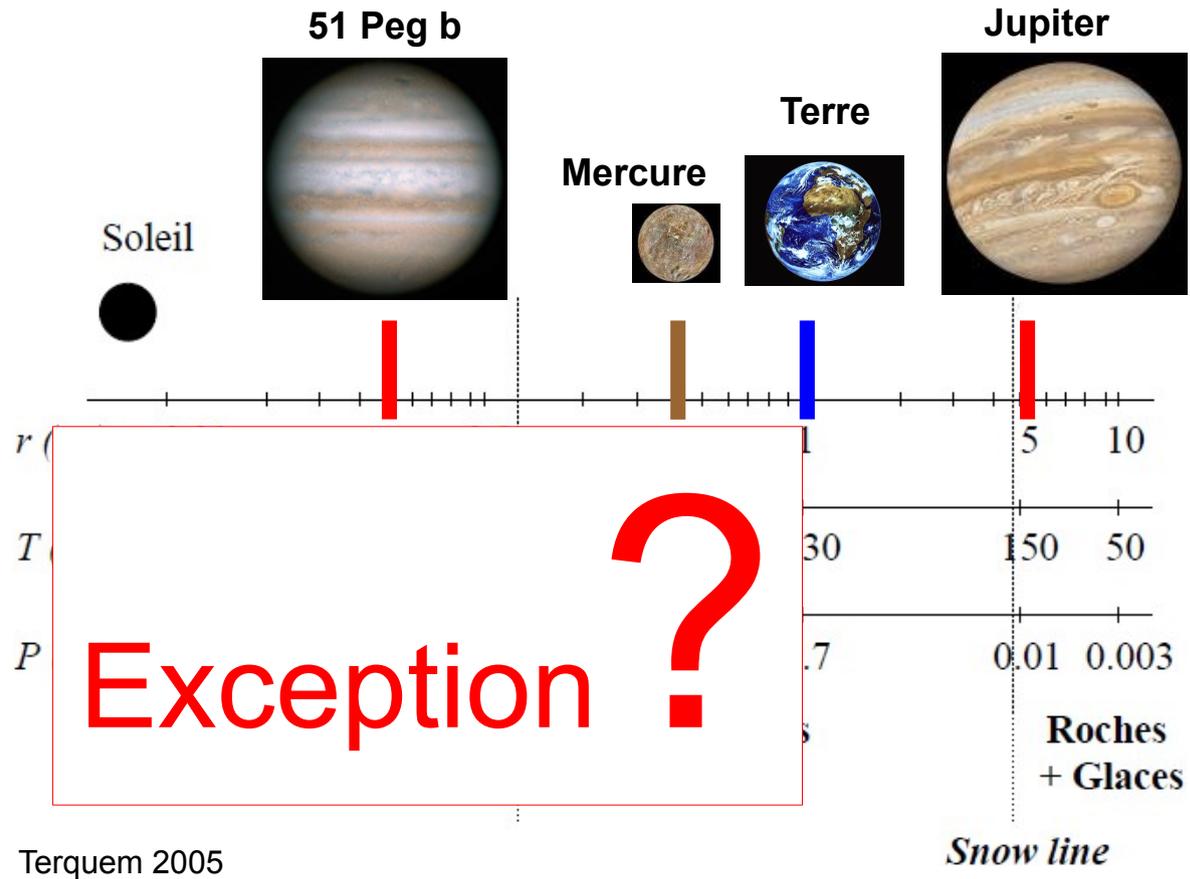
Avant 1995



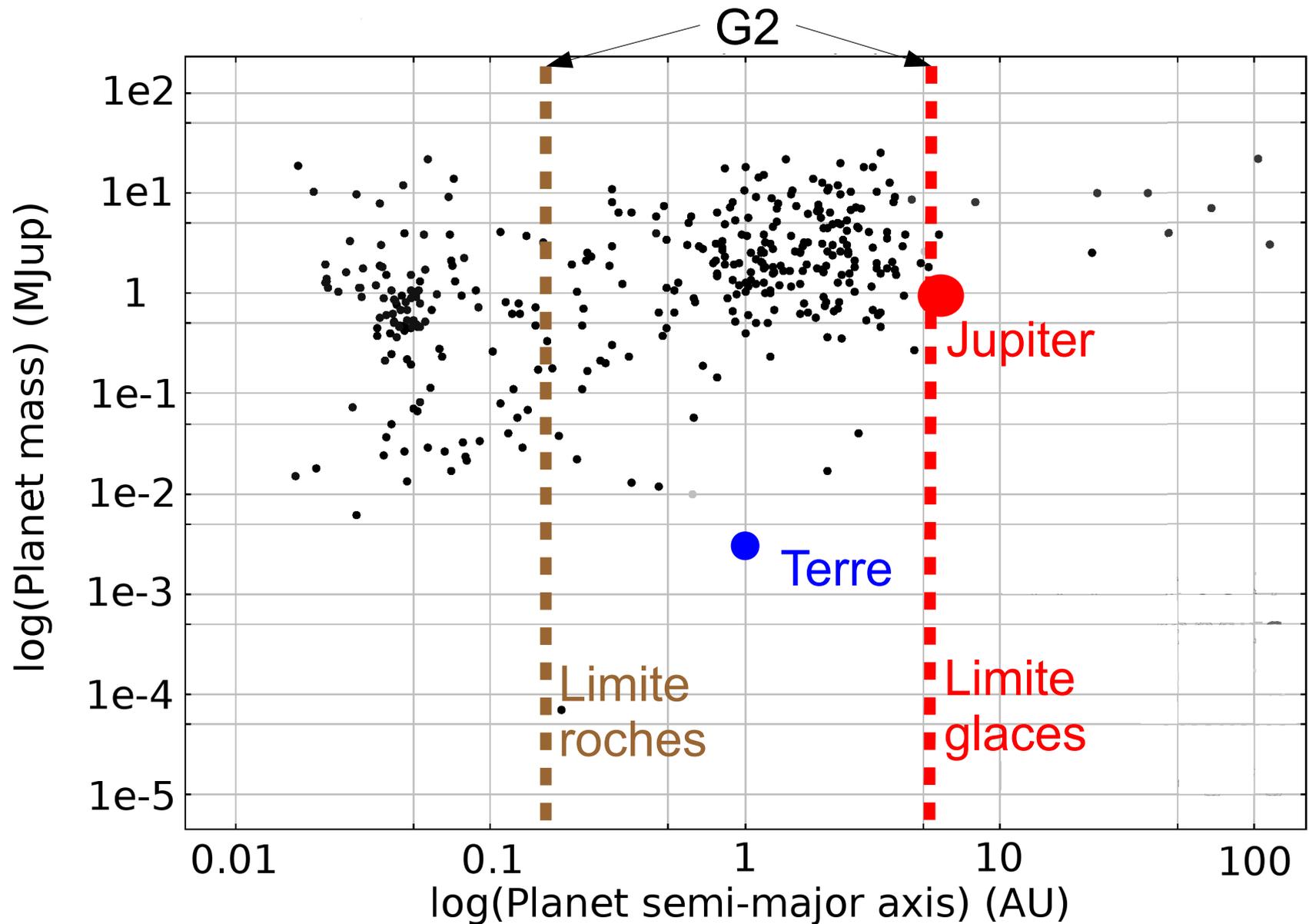
En 1995 : Jupiter chaud



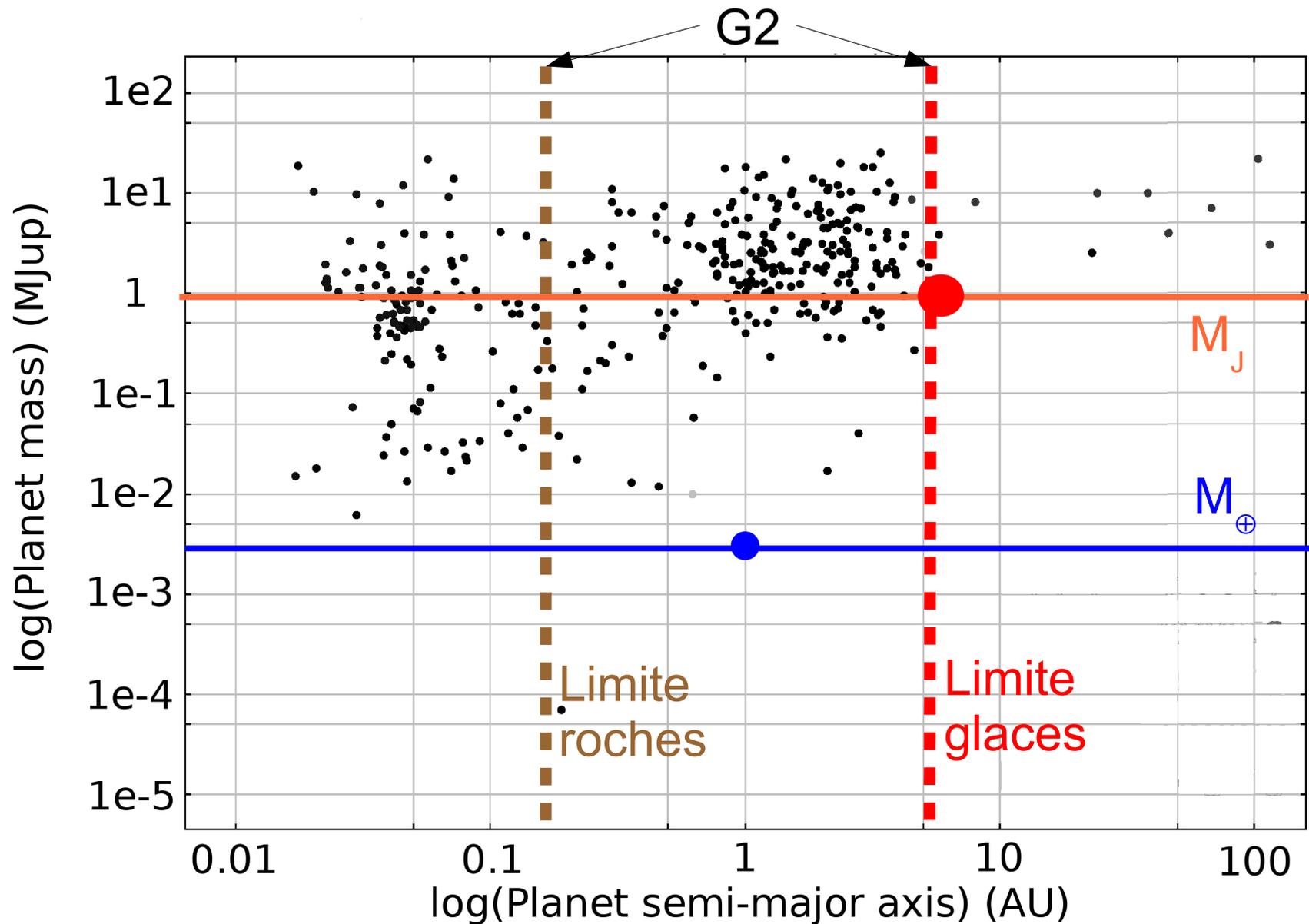
En 1995 : Jupiter chaud



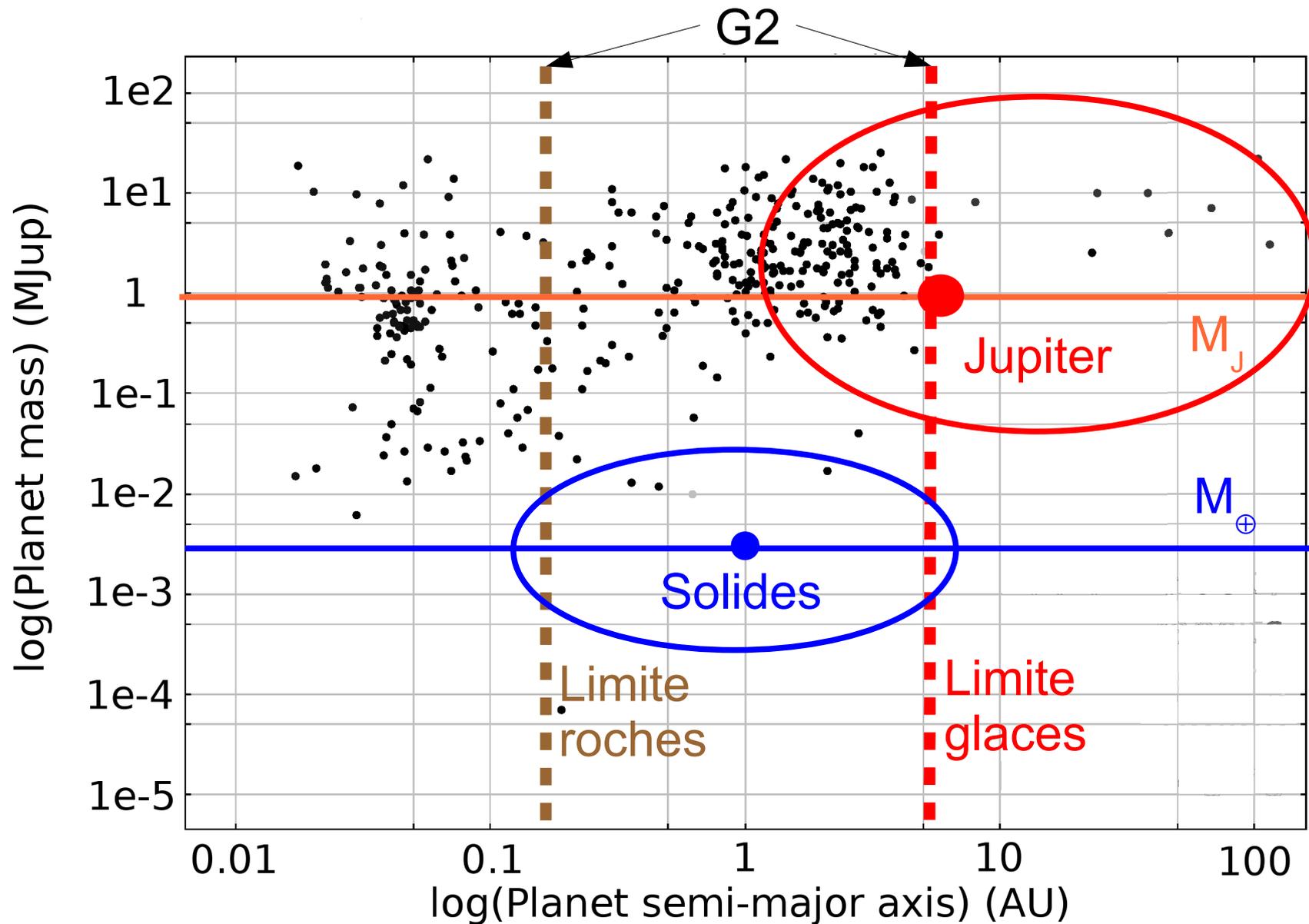
Depuis 1995 : >400 exoplanètes



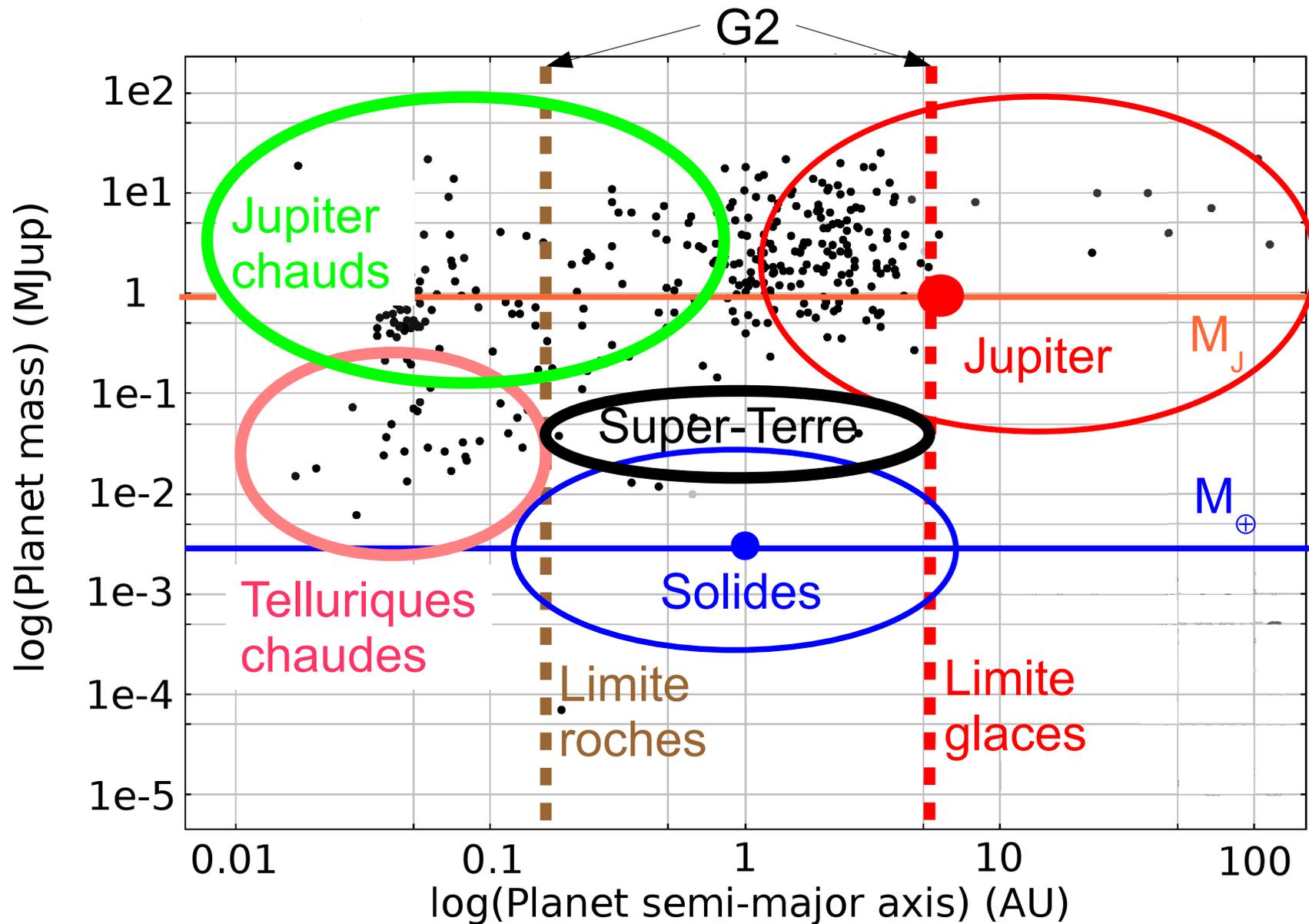
Depuis 1995 : >400 exoplanètes



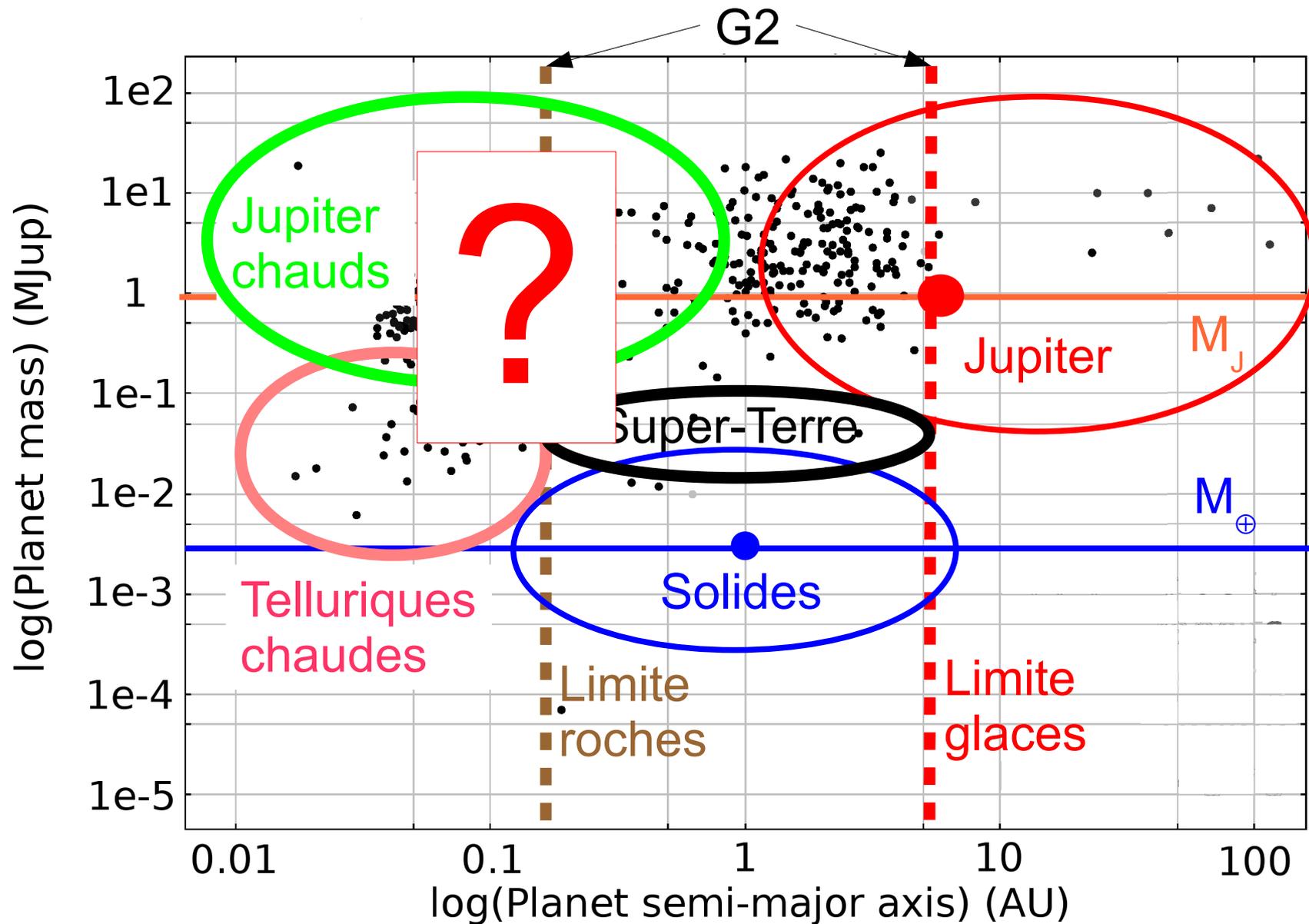
Depuis 1995 : >400 exoplanètes



Depuis 1995 : >400 exoplanètes



Depuis 1995 : >400 exoplanètes



Plan

Avant 1995 : notre système solaire

Observations

Modèles planètes telluriques

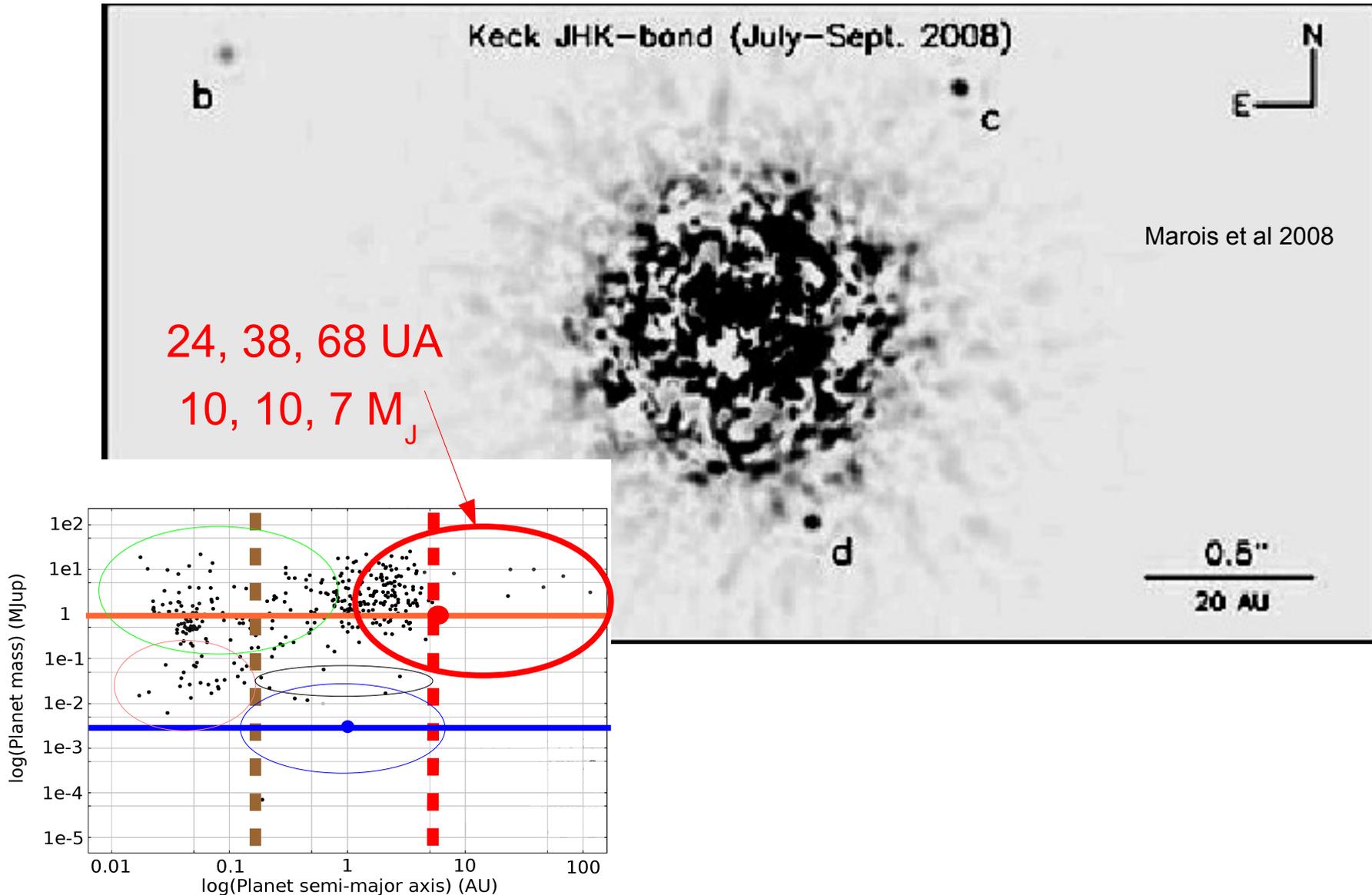
Modèles géantes gazeuses

Après 1995 : exoplanètes

Observations et remise en cause des modèles

Adaptation des modèles

Disque protoplanétaire confirmé



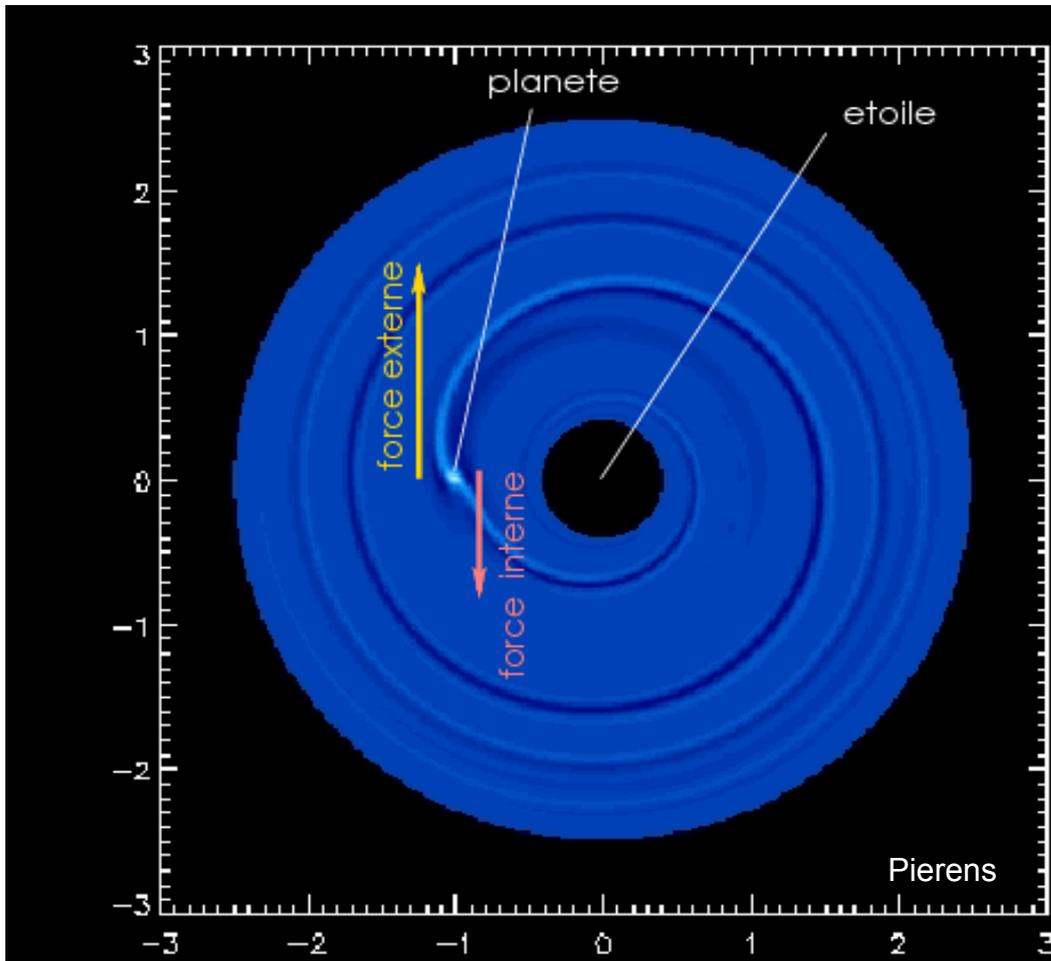
Adapter les modèles

1. Formation par accrétion → pas complètement erroné
2. Changer orbite... plusieurs modèles dont :
 - a. Si + de 2 géantes : interaction/éjection
 - b. Interaction planète et planétésimaux internes
 - c. Interaction planète-disque → migration

Adapter les modèles

1. Formation par accrétion → pas complètement erroné
2. Changer orbite... plusieurs modèles dont :
 - a. Si + de 2 géantes : interaction/éjection
 - b. Interaction planète et planétésimaux internes
 - c. Interaction planète-disque → migration

Migration type I : $M < 10 M_{\oplus}$



Perturbations linéaires

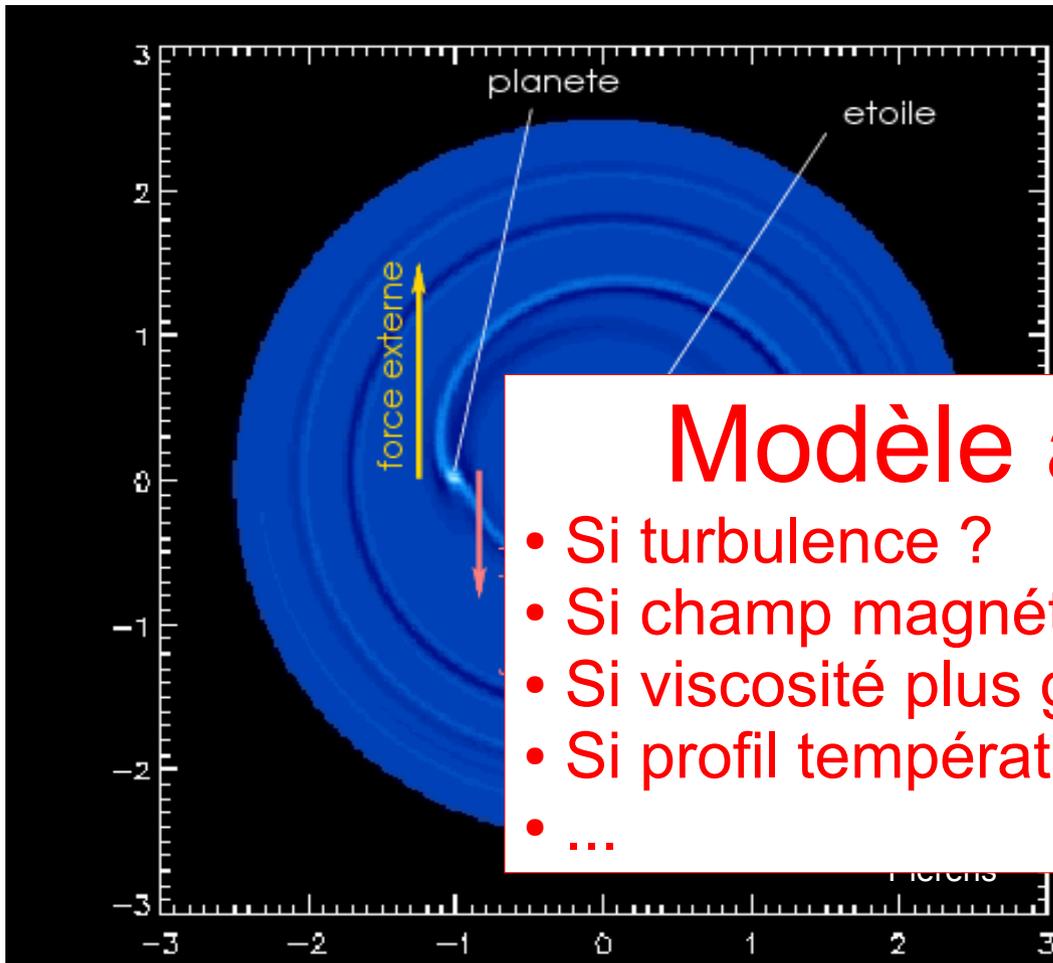
Ondes de densité

Disque non modifié

Échange moment cinétique

Arrêt migration qd plus linéaire

Migration type I : $M < 10 M_{\oplus}$



Perturbations linéaires

Ondes de densité

Modèle à améliorer

- Si turbulence ?
- Si champ magnétique ?
- Si viscosité plus grande ?
- Si profil température différent ?
- ...

tique

linéaire

Migration type II : $M > M_J$



Perturbations non linéaires

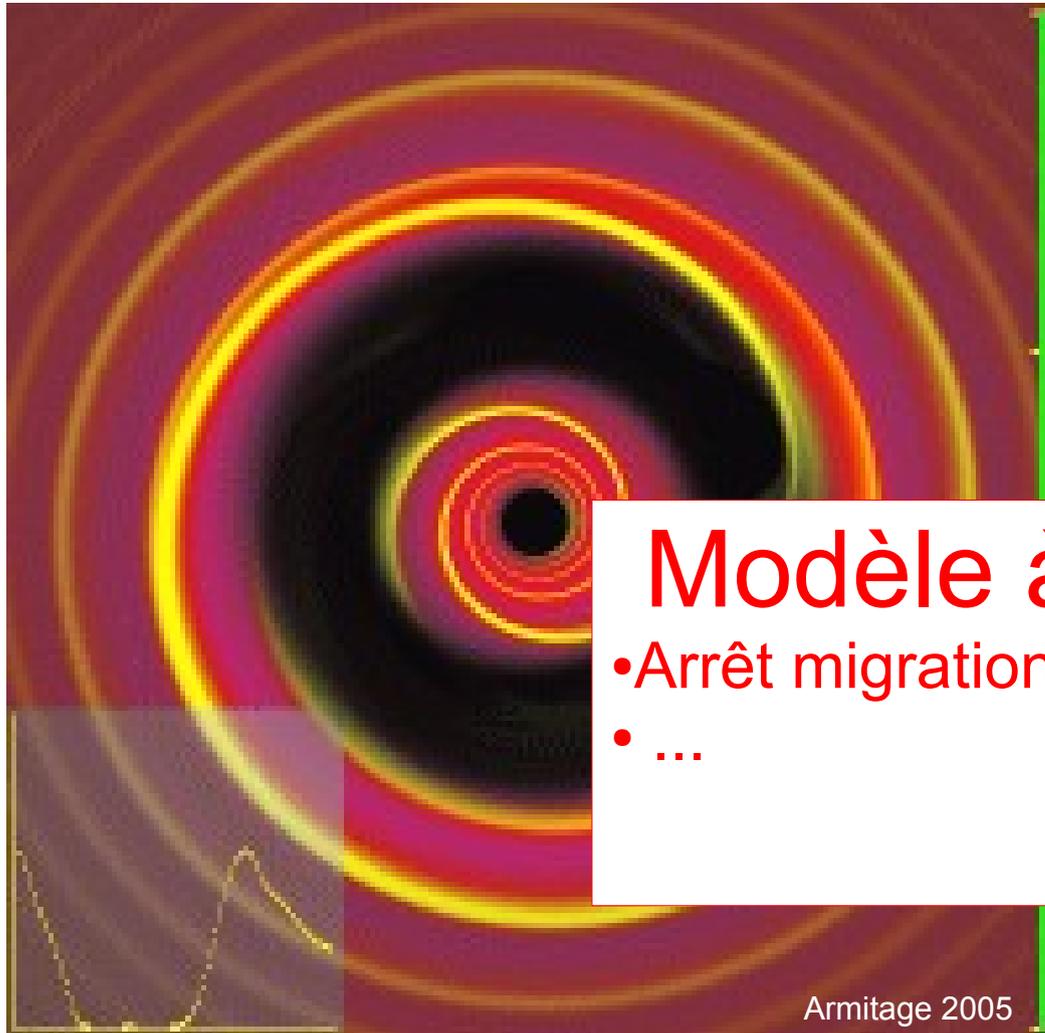
Sillon si :

1. dissipation $>$ propagation
2. disque pas trop turbulent

Disque modifié

Échange moment cinétique

Migration type II : $M > M_J$



Perturbations non linéaires

Sillon si :

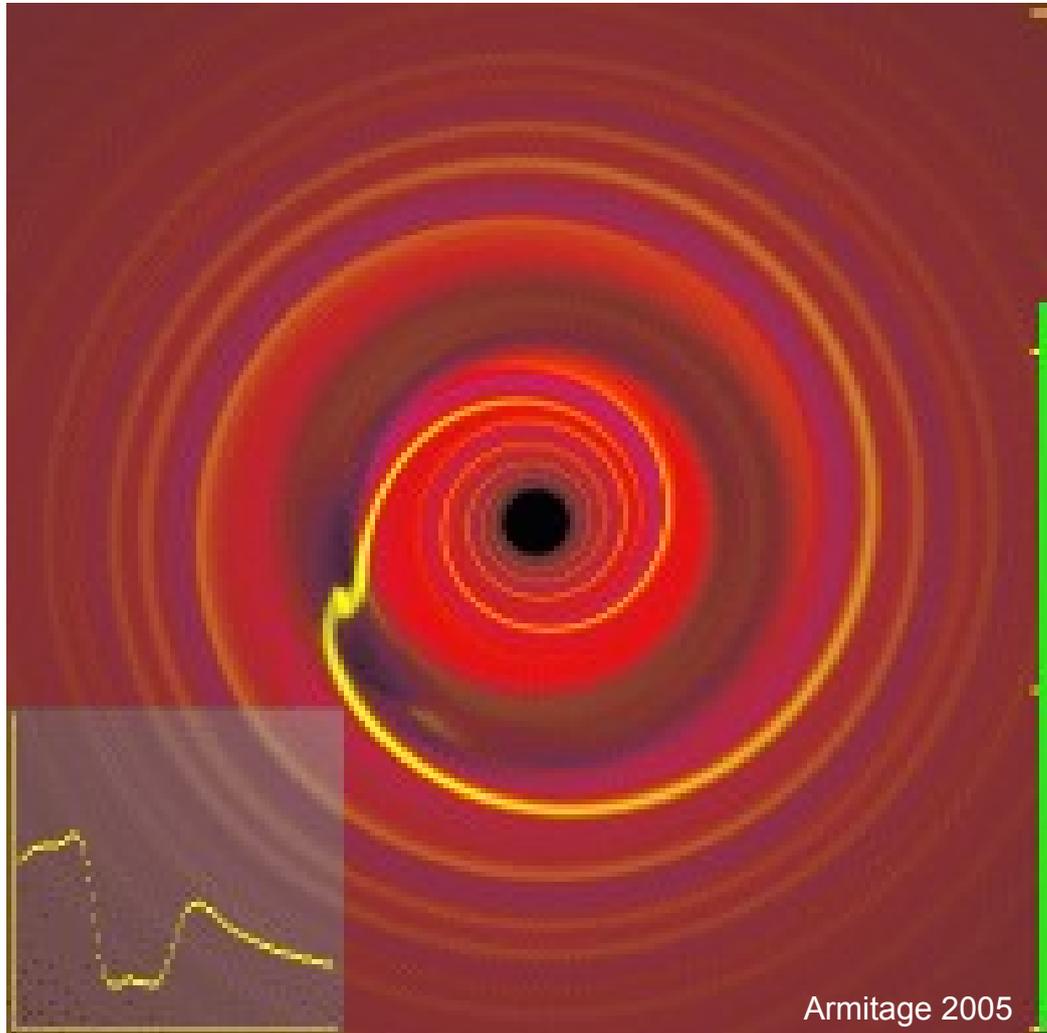
1. dissipation $>$ propagation
2. disque pas trop turbulent

Modèle à améliorer

- Arrêt migration ?
- ...

cinétique

Migration type III : $10 M_{\oplus} < M < M_J$



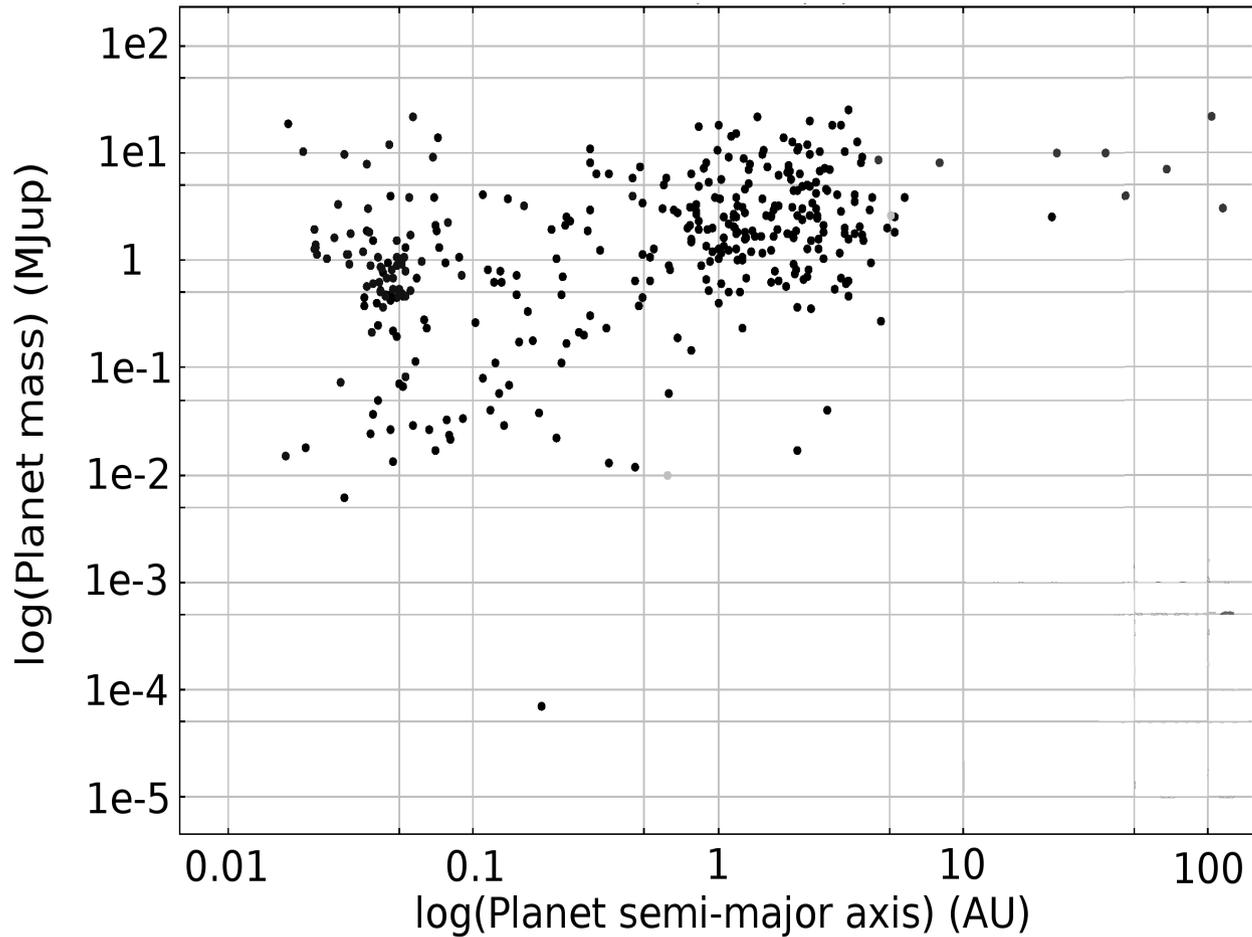
Entre type I et type II

Perturbations non linéaires

Pas de sillon

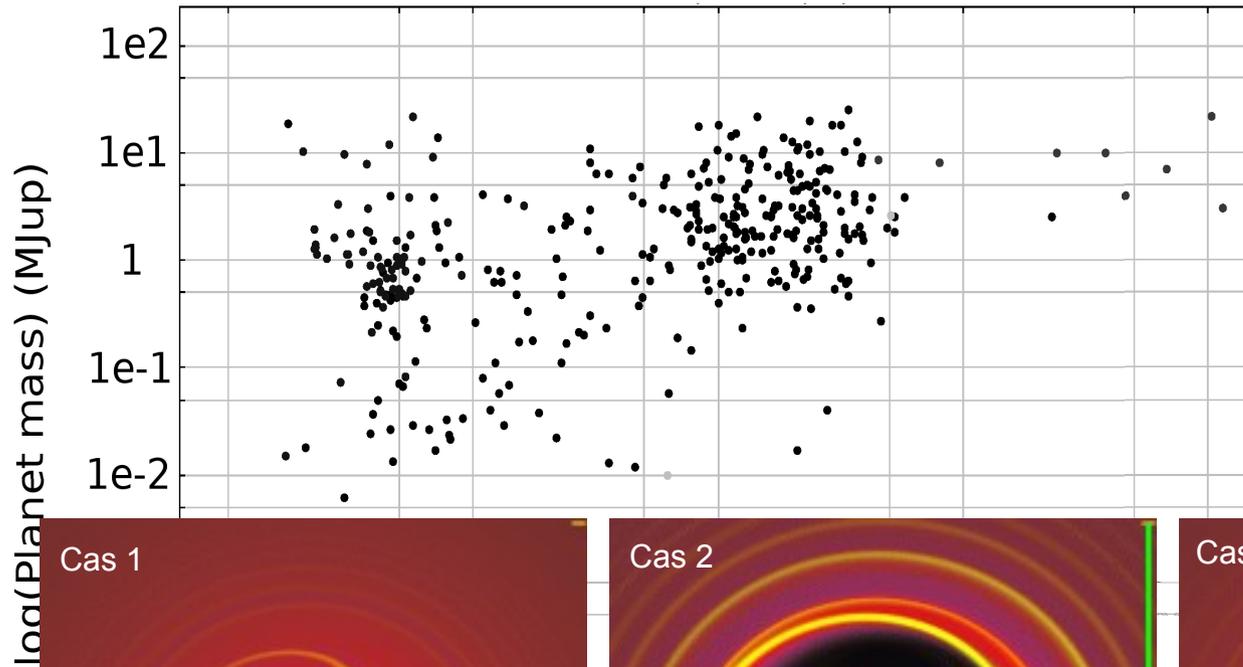
Échange moment cinétique

Comment contraindre les modèles ?

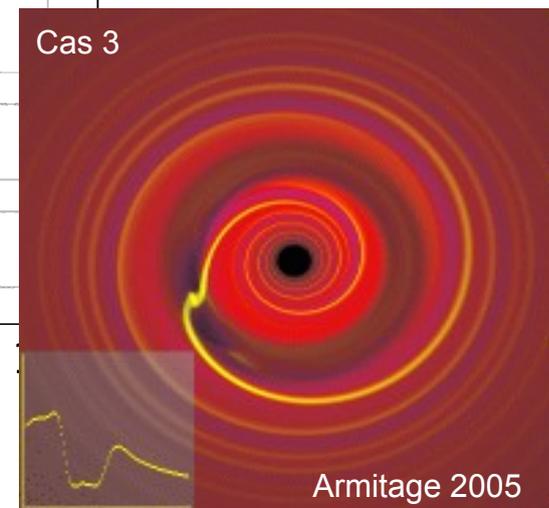
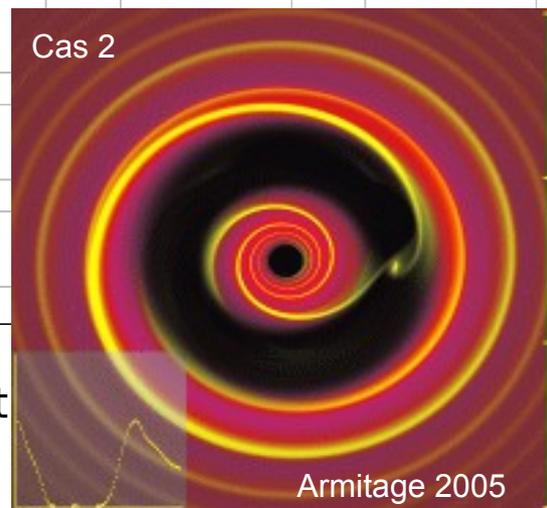
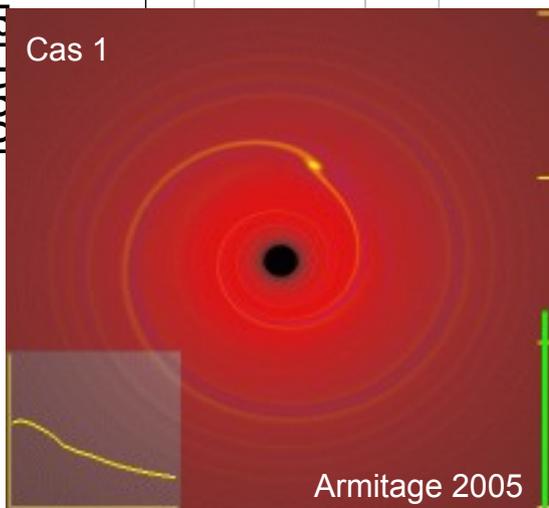


Nouvelles observations
et
nouvelles techniques

Comment contraindre les modèles ?



Nouvelles observations
et
nouvelles techniques



Conclusions

1. Observations

Notre système solaire



2. Modèles

Formation telluriques et géantes



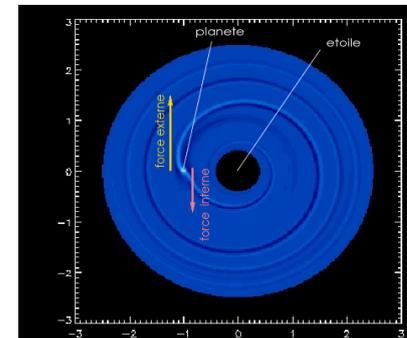
3. Observations : remise en question

Exoplanètes (Jupiter et telluriques chauds, super-Terre, etc.)

4. Adaptation/nouveaux modèles

Migration

5. = 3., etc.





Qu'est-ce ?

Modèle 1 :
une montagne

modélisation

Qu'est-ce ?

Modèle 1 : prévisions
une montagne → Hauteur, position

modélisation

Qu'est-ce ?

Modèle 1 :
une montagne

prévisions

Hauteur, position

mise à
l'épreuve

Nouvelle
observation

modélisation

Qu'est-ce ?

Modèle 1 :
une montagne

prévisions

Hauteur, position

mise à
l'épreuve

Nouvelle
observation

modélisation

Qu'e

Il n'y a rien !



Modèle 1 :
une montagne

prévisions

Hauteur, position

mise à
l'épreuve

Nouvelle
observation

adaptation

Modèle 2 :
l'ombre de la montagne
sur laquelle se trouve le
photographe

modélisation

Qu'est-ce ?

Modèle 1 :
une montagne

prévisions

Hauteur, position

mise à
l'épreuve

Nouvelle
observation

adaptation

Modèle 2 :
l'ombre de la montagne
sur laquelle se trouve le
photographe

prévisions

...

modélisation

Qu'est-ce ?

Merci

