



DISCUSSIONS
&
SPECULATIONS
&
PERSPECTIVES

Manuel Moreira (Université Paris 7, IPGP)
Sébastien Charnoz (Université Paris 7, CEA)

SCENARIOS Vs. MESURES

Les dynamiciens ne manquent pas de scénarios mais manquent de contraintes

(« rien n'arrête les simulateurs » .. Cf. W. Benz)

Les cosmochimistes ont une grande diversité de mesures isotopiques, mais la difficulté est de l'intégrer au modèle dynamique de formation planétaire

Du point de vue d'un astronome

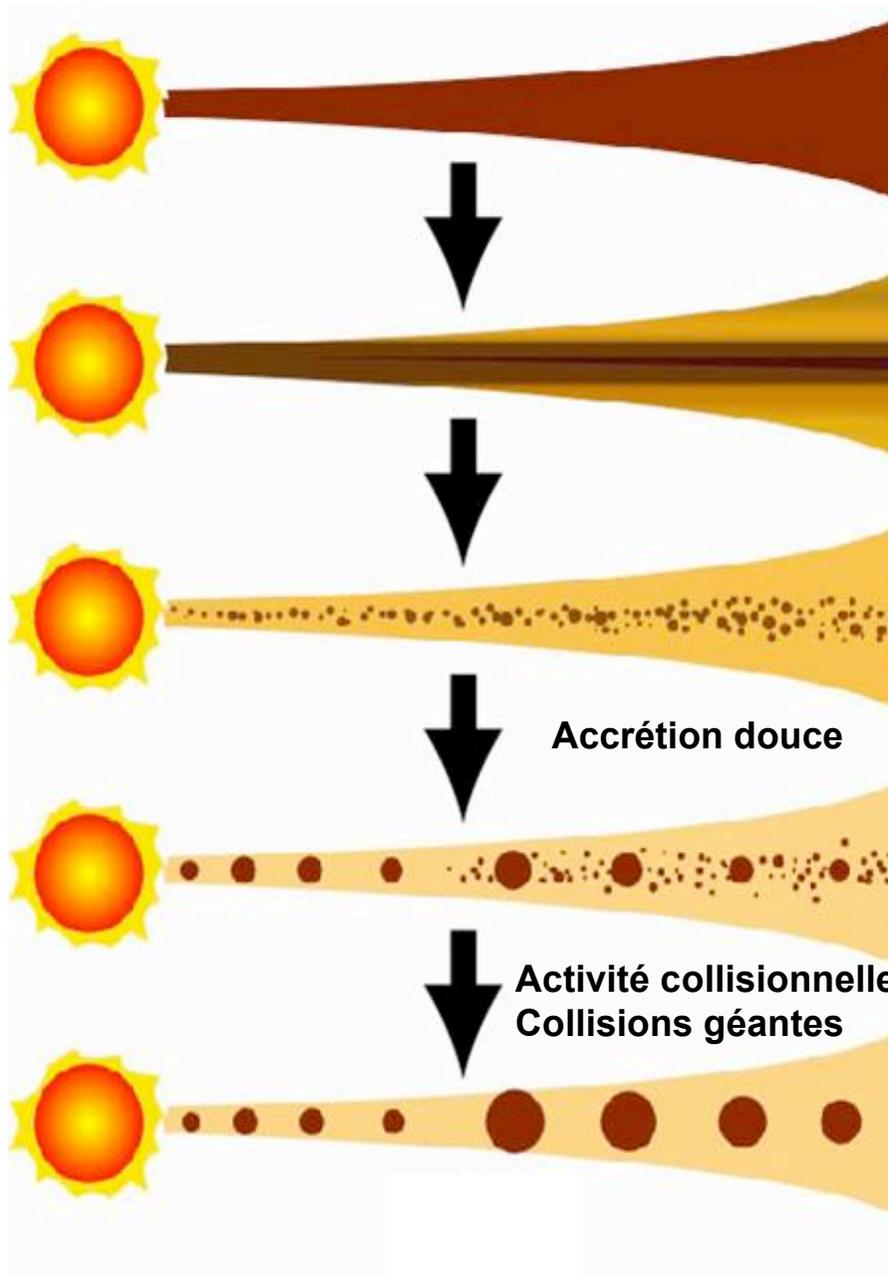
Les données cosmochimiques apportent
un nouveau point de vue sur les phases les plus primitives

du

Scenario de formation planétaire « moderne » mais déjà « classique »:

Safronov, Greenberg, Wetherill, Weidenchilling, et collaborateurs 60 -90

Formation planétaire en 5 étapes distinctes ???



Gaz + poussières

CAI

Sédimentation + migration des poussières
Par frottement avec le gaz
 $\sim 10^5$ - 10^6 y

Formation des planétésimaux (~ 10 km)
dur des orbites circulaires

Formation des embryons par runaway
puis accretion ordonnée (\Rightarrow 1^{ère} différenciation)
 10^5 10^6 Years

Disparition du gaz

Assemblage des planètes
qq 50 à 200 millions années

Les Chondres (présentations de Guy Ribourel, M. Chaussidon, B. Bourdon)

1- Les plus vieux chondres semblent s'être formés entre ~ 1.5 et 4 My après les CAI

2- Les résultats présentés par Guy Ribourel sur la formation des chondres suggèrent qu'elles contiennent déjà de l'olivine et du métal venant du manteau de corps déjà différenciés

3- Les ages modèles Hf/W suggèrent que certaines météorites de fer se sont formées au même moment que les CAI



3- Les travaux de Yannick Ricard et al. montrent que gros corps (> 1000 km), formés tôt se différencient très rapidement (Soit par radioactivité ^{26}Al , soit par collision)

Différentiation quasi instantanée si taille suffisante

Aurait-on eu des gros corps dès le début ???

Que dit le modèle « classique »:
Les premiers planétésimaux font environ 10km

⇒ Différentiation initiale difficile

D'où venait cette taille canonique ? (Qui est toujours beaucoup utilisé)

⇒

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 183: 1051–1061, 1973 August 1
© 1973. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

THE FORMATION OF PLANETESIMALS*

PETER GOLDREICH AND WILLIAM R. WARD

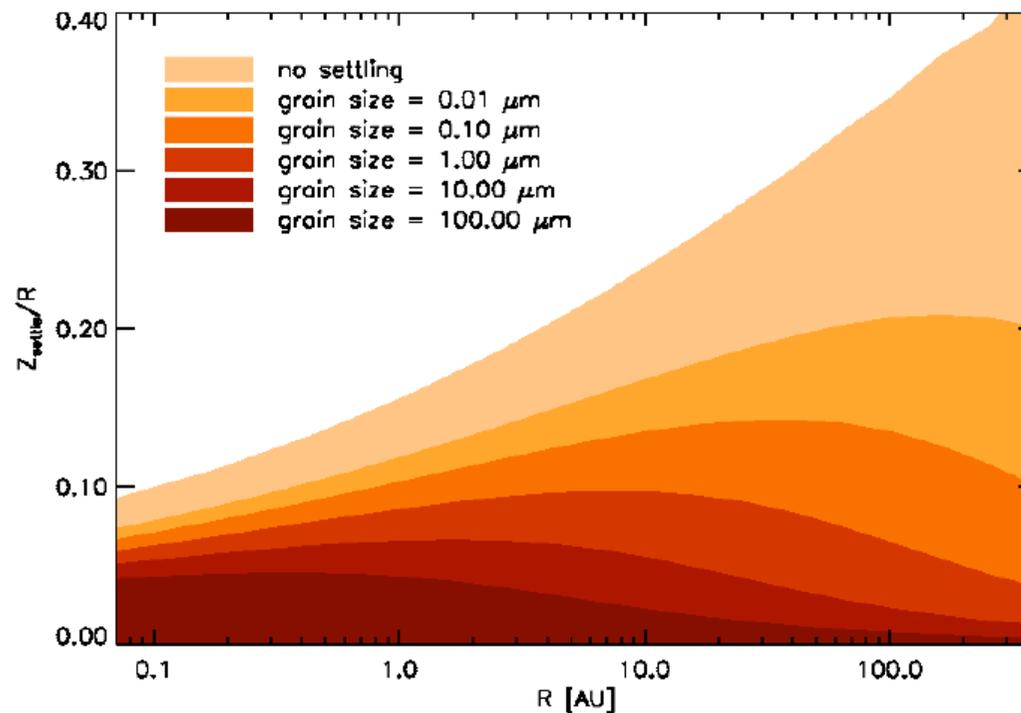
California Institute of Technology, Pasadena

Received 1972 November 20

Au cours de la sédimentation des poussières, la densité du disque
Du disque équatorial augmente

⇒ La densité va ensuite passer un seuil critique d'instabilité

Cette phase dure environ 10^5 - 10^6 ans.

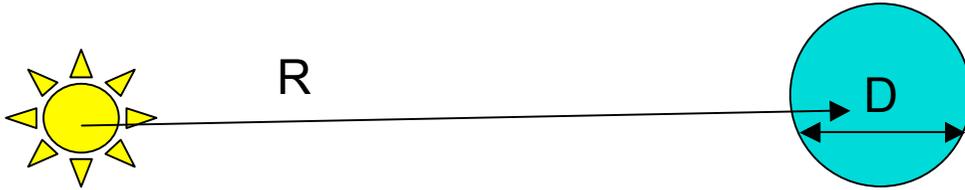


Dullemond et al.,
2003

!!! Jamais simulée de manière self-consistent !!!

Modèle de l'effondrement gravitationnel : une dérivation euristique

Considérons un « grumeau » de matière de taille D à la distance R de l'étoile



Densité de surface : Σ , masse du grumeau : $M = \Sigma \pi D^2$

Le nuage est soumis à *sa propre gravité*. La question est : est-ce que sa gravité est suffisante pour l'empêcher de se disperser (instable)

Trois types d'énergie :

E_{grav} = Energie potentielle gravitationnelle

$E_{\text{cinétique}}$ = E agitation thermique + E cisaillement keplerien
= E_T + E_K

Critère d'instabilité :

$$E_{\text{grav}} \gg E_T \text{ et } E_{\text{grav}} \gg E_K \quad \longrightarrow$$

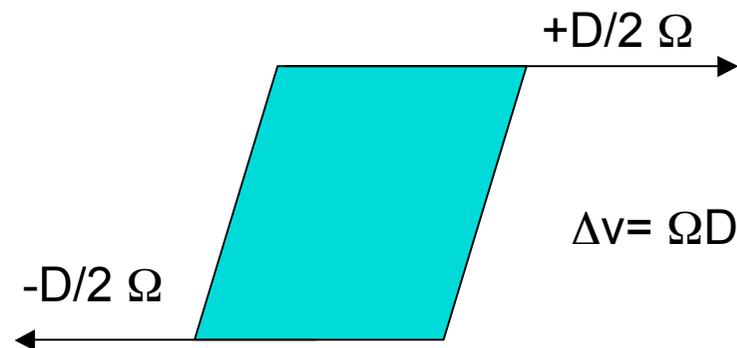
$$\frac{E_T}{E_{\text{grav}}} \cdot \frac{E_K}{E_{\text{grav}}} < 1$$

Ω =vitesse de rotation

$$E_{\text{thermique}} \sim MC_s^2$$

$$E_{\text{cisaillement}} \sim M(\Omega D)^2$$

Képlerien ~



$$E_{\text{gravitation}} \sim \frac{GM^2}{D} \sim G\pi\Sigma D$$

!! Attention M est la masse du grumeau
pas de l'étoile.

La masse de l'étoile intervient indirectement dans le $\Omega=(GM^*/R)^{1/3}$

$$\frac{E_T}{E_{grav}} \cdot \frac{E_K}{E_{grav}} < 1 \Rightarrow \frac{\Omega C_s}{\underbrace{G\pi\Sigma}_Q} < 1$$

Condition
D'instabilité

On peut en déduire
la taille typique d'un
« grumeau »
(GW, 73)

$$D \approx \frac{4\pi a^3 \Sigma}{M_*}$$

En prenant les conditions de la MMSN à 1 AU, on trouve $D \sim 5-10$ km

Le point de départ de tous les articles sur la formation des embryons
Depuis Wetherill et al. / Weidenschilling et al. / Greenberg et al. (fin des années 70)

Joli et pratique !!

MAIS Les planetesimaux se forment dans un milieu gazeux et qui est turbulent (car la nébuleuse disparaît entre 3 et 10 My)

Travaux analytiques de Weidenschilling et al., Cuzzi et al.

S. Weidenschilling, dans les années 80 explique que la turbulence de la nébuleuse devrait s'opposer à l'effondrement gravitationnel

⇒ Calcul bcp plus difficile

⇒ Un modèle publié par J. Cuzzi suggérait que le collage de surface en turbulence Donnerait **également des corps de 10 km**

=> Mais la simulation numérique s'en mêle en 2006....

RESULTATS DE SIMULATIONS RECENTES

Johansen et al., 2007 (NATURE) : Simulation couplée Gaz + poussière :

Les planétésimaux
S'accrètent au
Dans les surdensité
De gaz

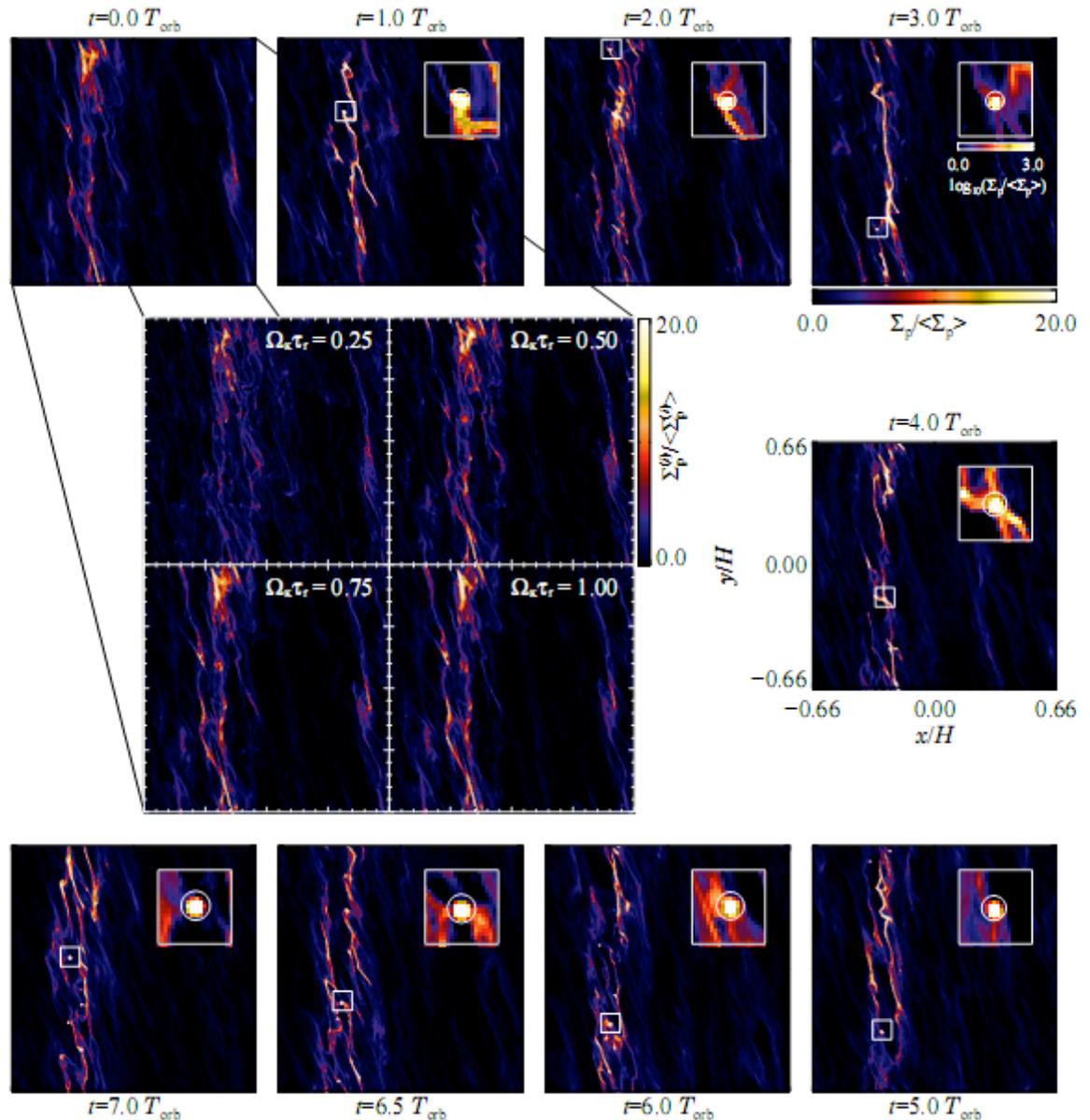
=>

Instabilité grav.

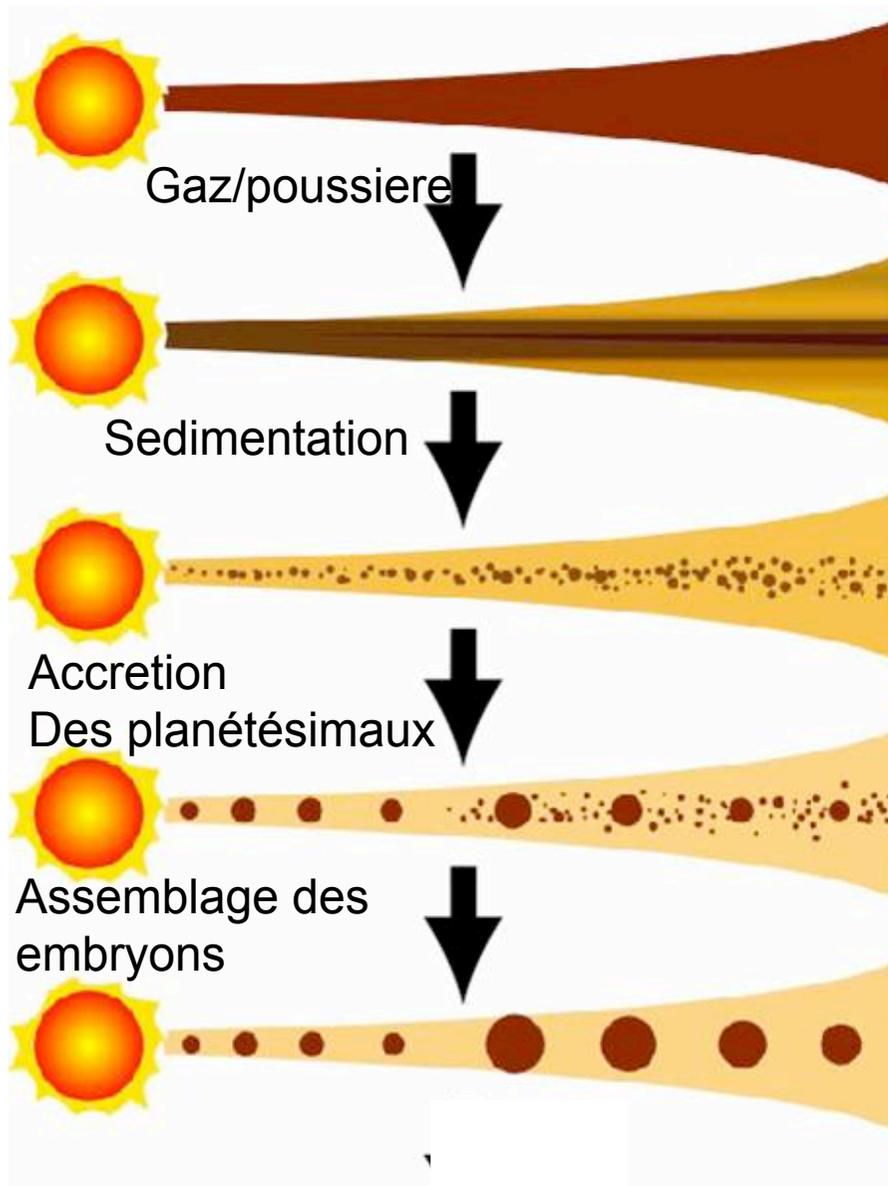
=> Formation rapide
d'objets de taille
d'embryons planétaires

=> 100 - 1000 km

Ici : 3 fois la masse de Ceres
PB: La coagulation
N'est pas traité réellement
Source de la turbulence ??



Une certaine cohérence ??



: Simulation dynamique
Datation
Scénario de formation
des chondres

On peut-être est passé très
rapidement des grains aux embryons
< 10^6 ans

=>

Y-a-t-il eu une phase
D'accrétion des petits planétésimaux
(type runaway ou safronov)???

?

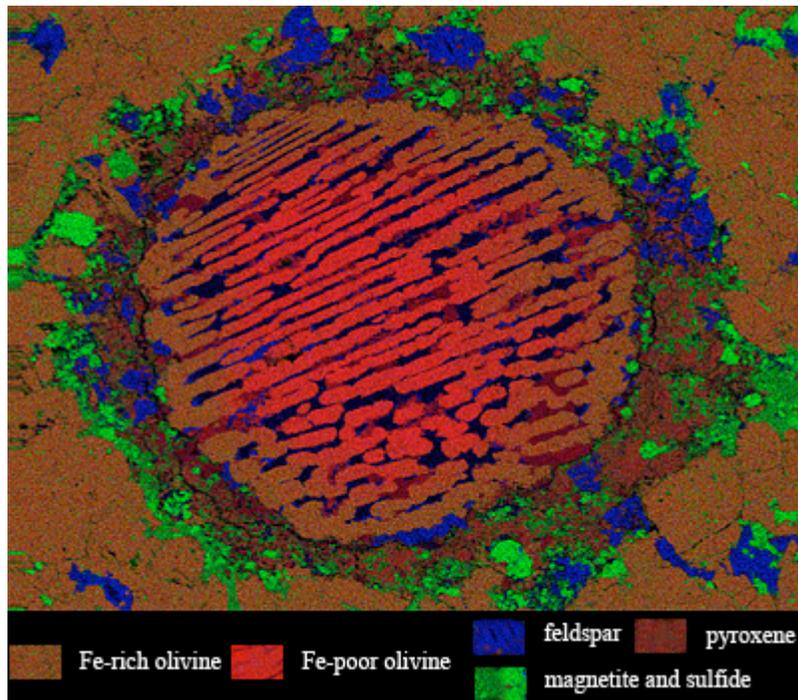
Il existe dans les chondres de type 1, des indications de différenciation
les olivines ont des « couronnes » d'orthopyroxène

Semblent être expliqués par la réaction de l'Olivine avec un gaz (SiO,
Nebuleuse) Ondes de choc dans une collision ? Gaz nébulaire ?

Temps de refroidissement très courts de certains chondres ???????
⇒ Refroidissement rapide après collision ?

Les Olivines (provenant des corps différenciés)

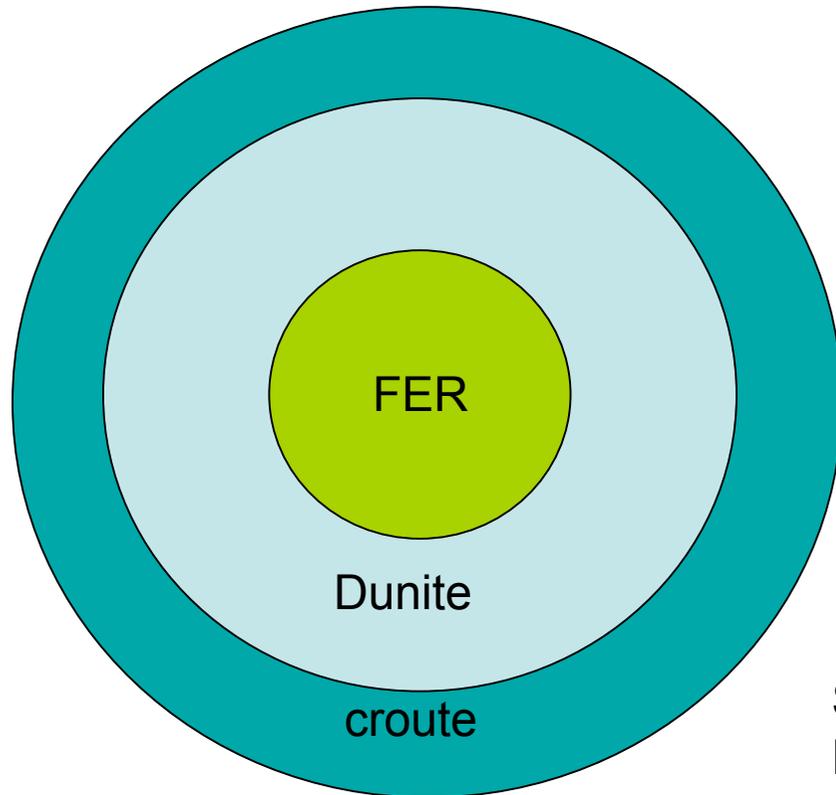
Ont vu une activité collisionnelle du Système Solaire.



⇒ Les collisions séparent les manteaux
Des noyaux (Cf. Présentation Patrick Michel)

Les CAI sont-ils les premiers objets ?

Quelques considérations :



?

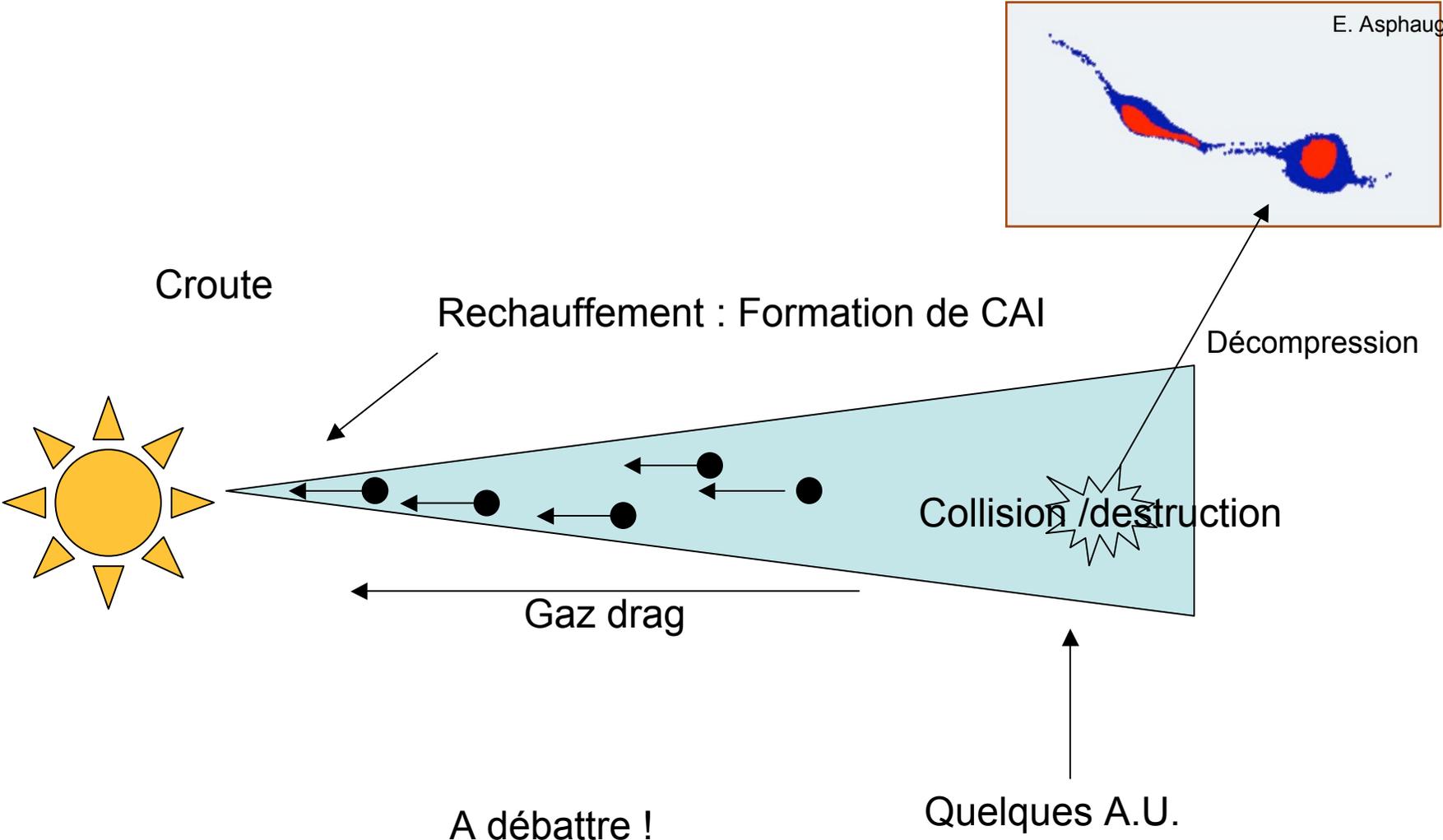
La crouete des premiers gros corps doit-être
Faite en calcium aluminium

La crouete pourrait-elle être à l'origine des CAI ?
Expliquerai la contemporanéité des CAI
et de certaines météorites de fer

Si de tels corps se sont formés
Dans la S.S interne (jusqu'aux astéroïdes)
⇒ Destruction
⇒ fragments centimétriques migrent
Vers le soleil

⇒ Vaporisation des morceaux de crouetes
⇒ formation des CAI

ROLE DU GAZ ??



Fragments < centimètre => couplés au gaz

La formation de la Terre de la Lune

Quelques questions en suspend :

- Taux d'accrétion des planètes telluriques
- L' 'age' de la terre
- L'age de la Lune
- La différenciation de la Terre (noyau + atmosphère)
- La sécheresse de la Lune



Taux d'accrétion des planètes telluriques

Que dit la dynamique ?

Contraintes

S.S. Interne->

S.S. externe

Jupiter/Saturne
excentrique

Temps court ~ 30 Ma ,
matériaux hydratés de la
C.Aéjectés

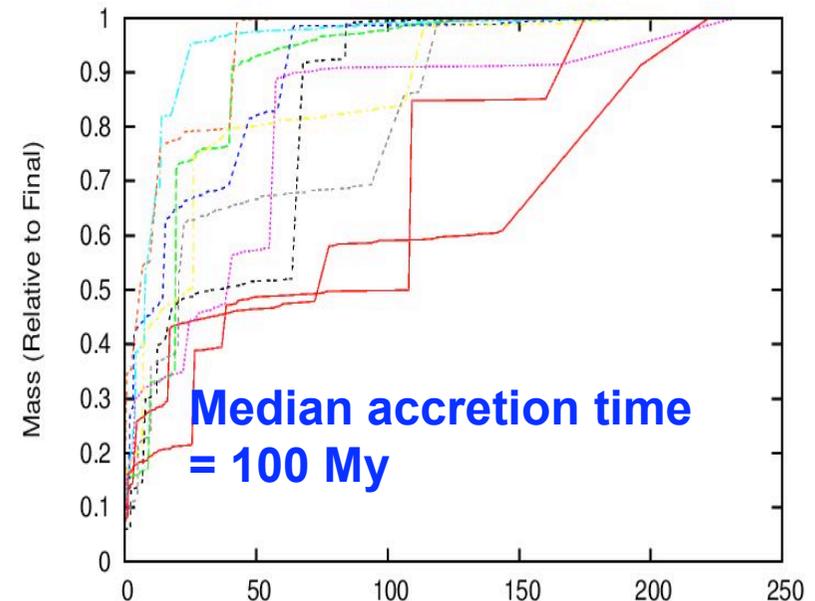
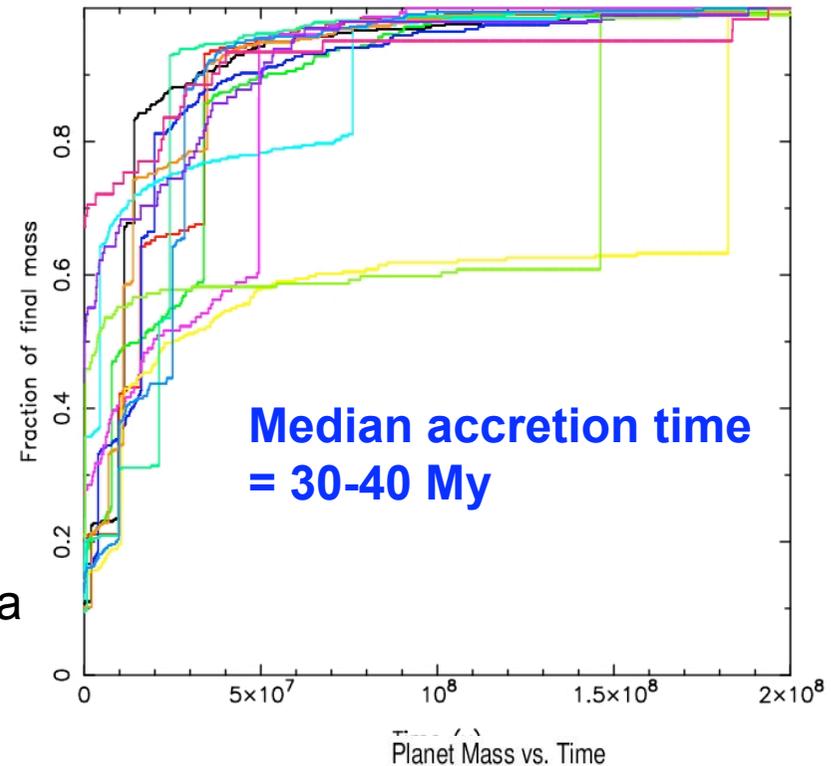
Jupiter/Saturne

Circulaire

Temps + long ~ 100 Ma ,
matériaux hydratés dans le S.S interne.

(embryons présents dans la ceinture d'astéroïdes => non éliminés => dispersés dans le S.S. interne => formation longue)

O'Brien et al., 2006



Lien avec les planètes géantes

(Présentation de A. Morbidelli)

⇒ La formation du S.S interne donne des contraintes sur le S.S externe

⇒ Le temps de formation des planètes terrestre est lié à l'orbite de Jupiter

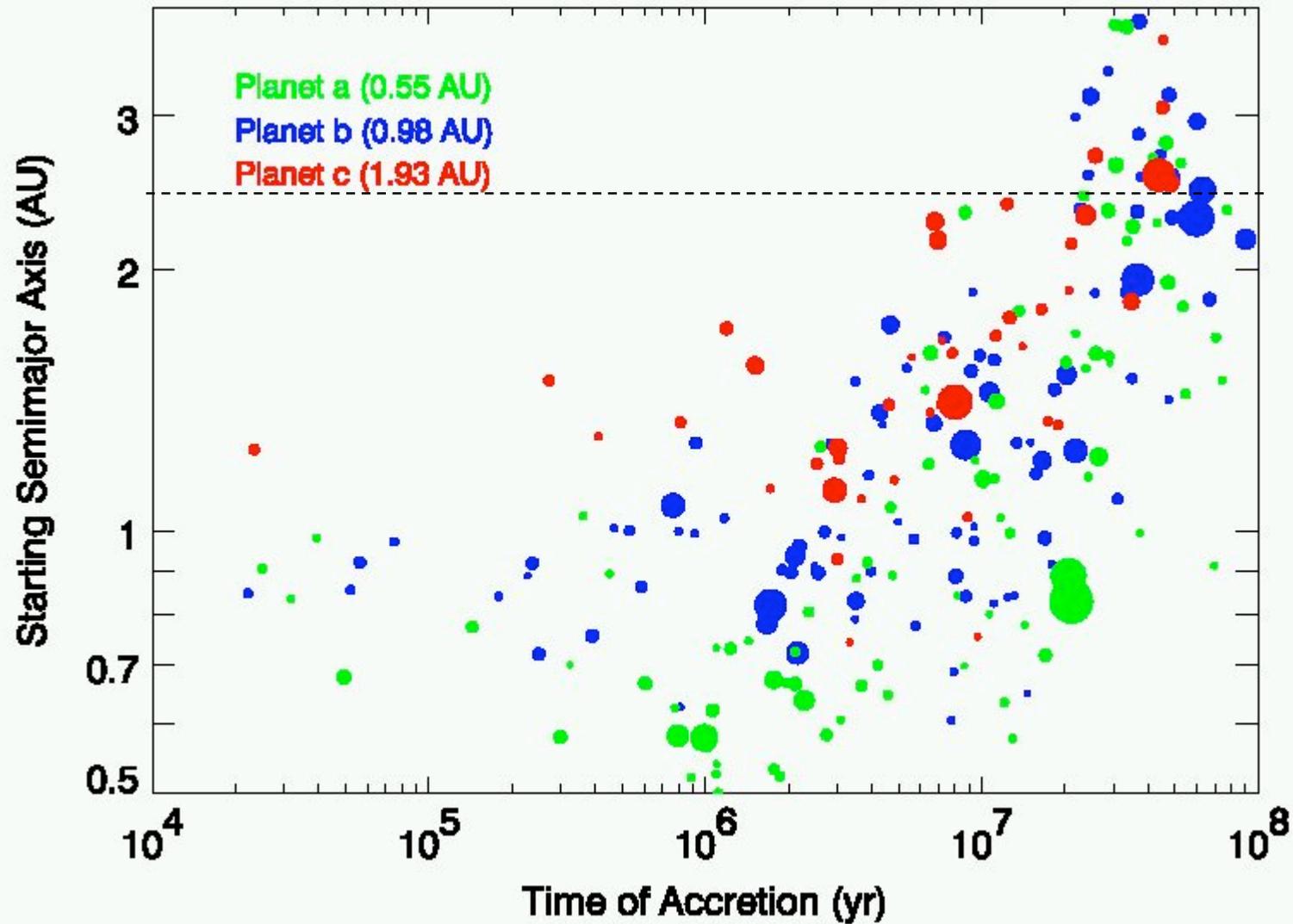
Jupiter/Saturne circulaires : Temps + long ~ 100 Ma , matériaux hydratés envoyé dans le S.S interne.

(embryons présents dans la ceinture d'astéroïdes =>non éliminés => dispersés dans le S.S. interne =>rallongent le temps de formation)

=> Apport des éléments hydratés en fin de processus

Apport de matériaux hydratés

Raymond et al., 2006



Jupiter et Saturne en orbite circulaire

L'âge de la Terre , L'âge de La Lune

⇒ Processus continue sans impact géant:
11 MA pour 66% de la masse de la Terre (Hf/W) (B. Bourdon)

Processus par étape:
⇒ La fin de l'accrétion est datée par le dernier grand impact
qui réorganise la planète

⇒ Ré-équilibrage entre le noyau et le manteau lors
des impacts ?
(cf. B.Bourdon)

⇒ A quel point les processus de rééquilibrage est
efficace : grande sensibilité
au facteur de rééquilibrage

⇒ important pour l'âge du noyau

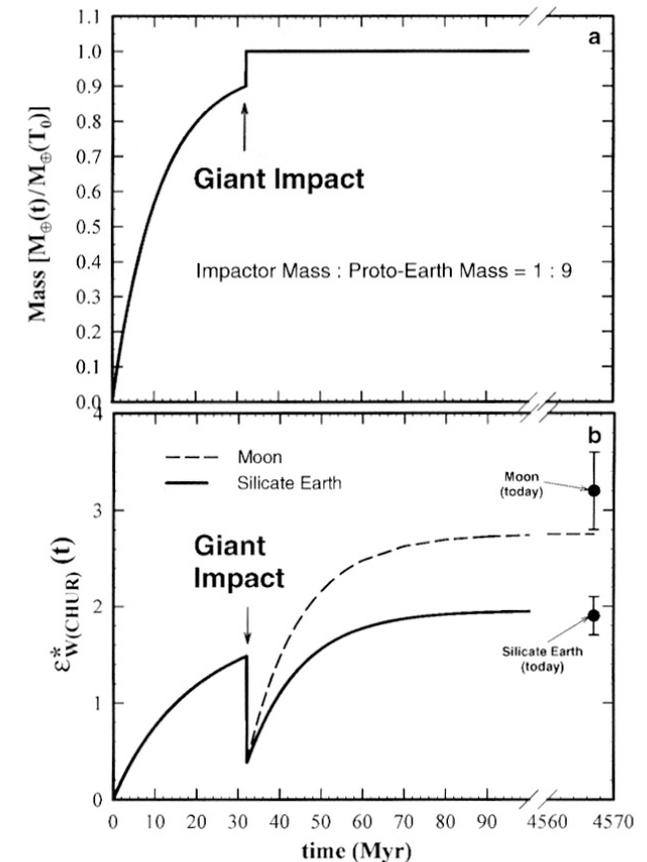


Figure 11 (a) Accretion followed by the addition of an impactor (proto-Earth to impactor mass ratio of 9:1) at the end of accretion, corresponding to the preferred giant impact theory of Canup & Asphaug (2001). The ϵ_W -evolution of the silicate Earth is constrained to give the observed present ϵ_W of the BSE. This yields a total timescale of 32 Myr with a giant impact at that time. For this case, the calculated ϵ_W evolution for the Moon yields a value of $\sim+2.8$, fairly close to the observed value of $\sim+3.2$.

Questions

Les codes dynamiques convergent-ils (accrétion embryon)?

Un code à 10^6 corps donne-t-il le

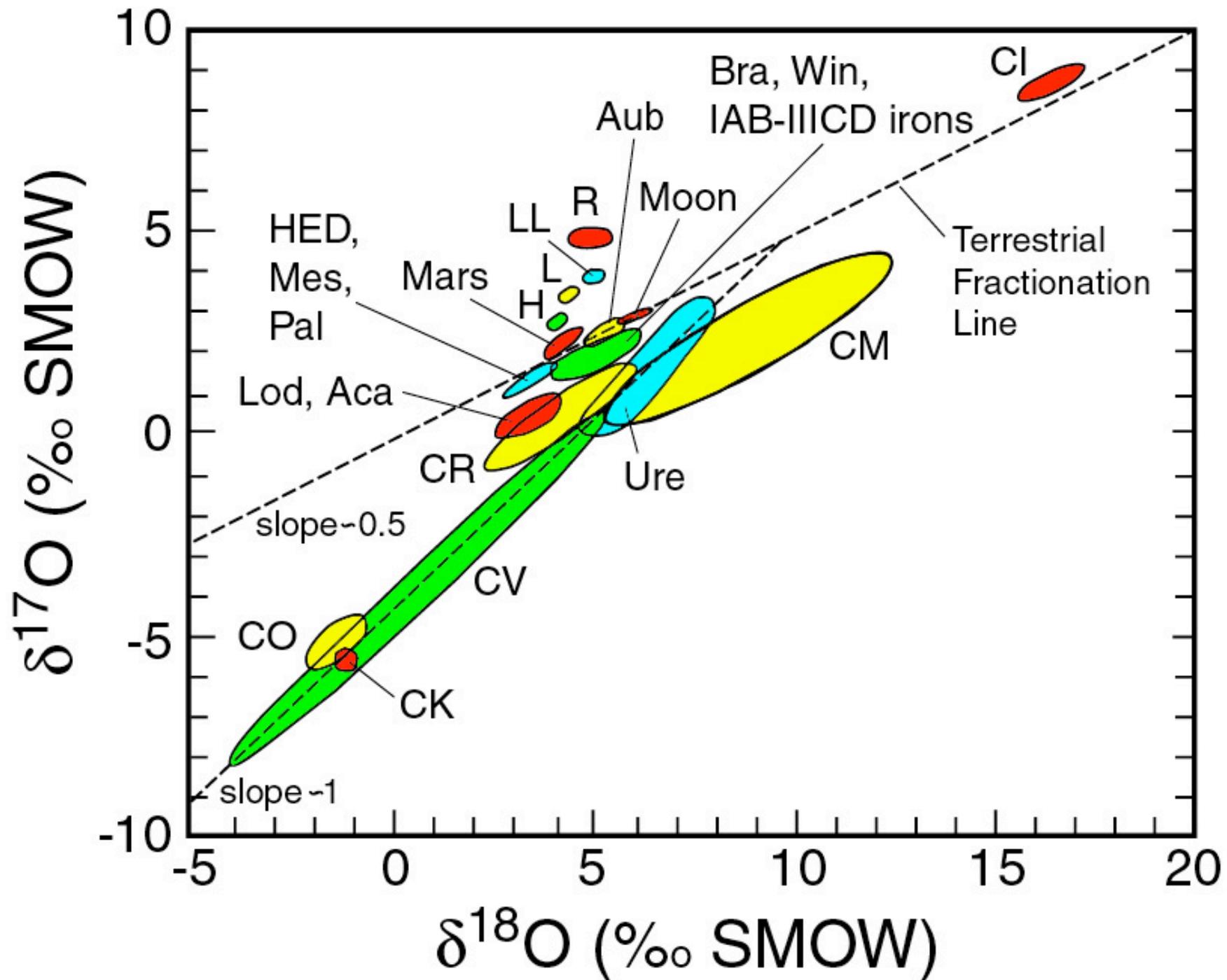
Même résultat en terme d'accrétion qu'un code à 10^3

(Cf. problème d'équipartition de l'énergie, friction dynamique, cf. P.Michel)

Quel est le rôle du gaz dans l'accrétion ? => redistribue le matériau

Origine des éléments volatils ? (B. Marty , F. Albarède)

Le problème d'une Terre enstatite – serait en contradiction avec Morbidelli ?



CONCLUSION

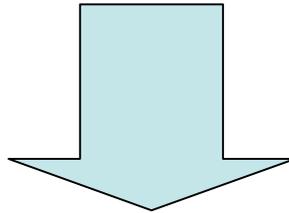
Nécessité d'une meilleure connaissance des autres corps du Système Solaire

⇒ Mars ?

⇒ Venus ?

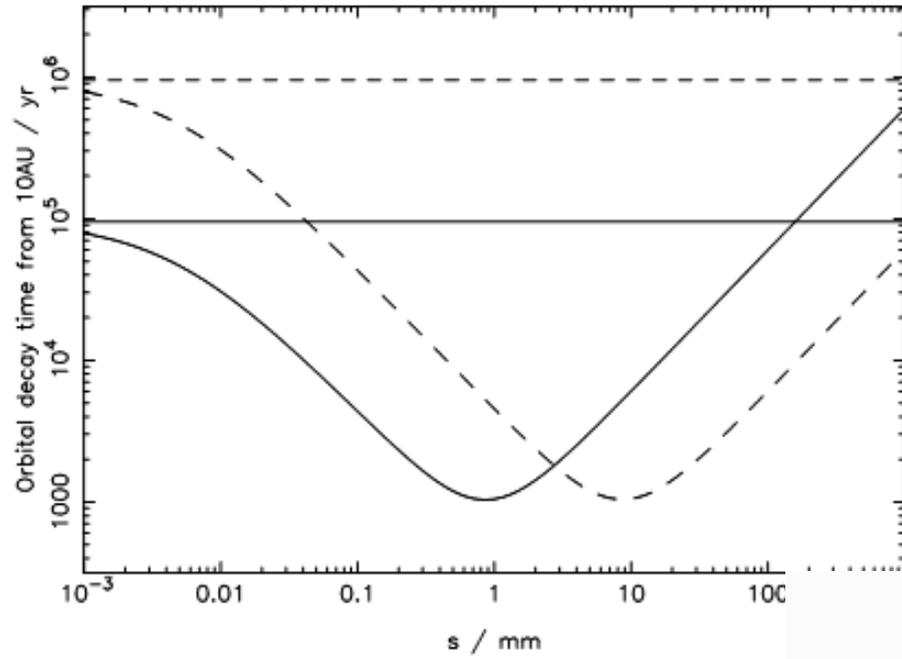
Les satellites des planètes géantes

(Par exemple : La forme de Japet donne des contraintes sur le temps de formation de Saturne, sur son âge de formation)

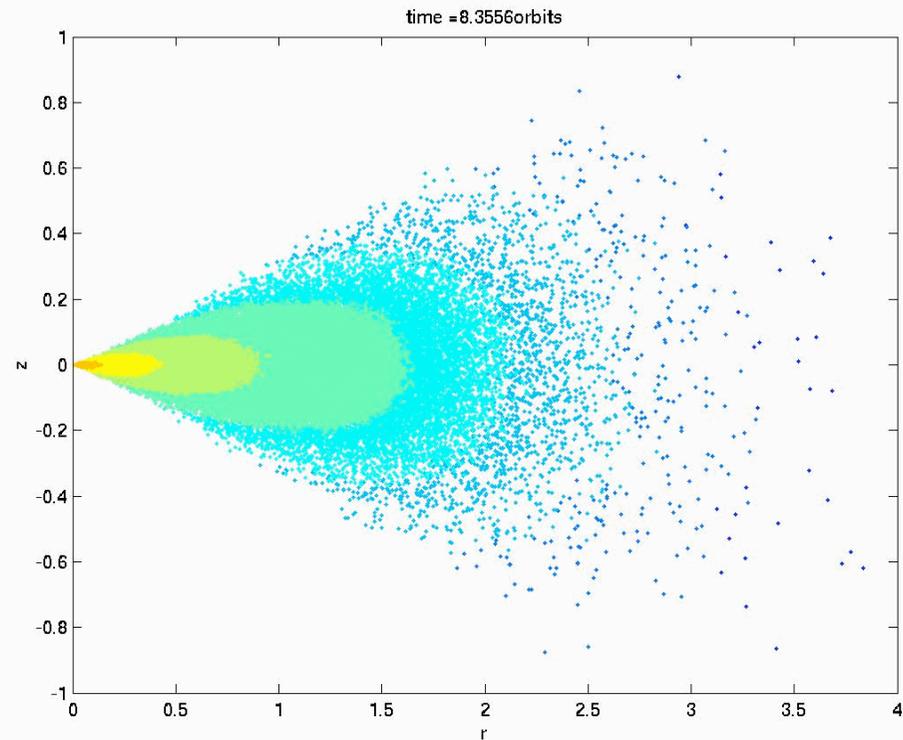


Nécessité du retour d'échantillon

FIN



Alexander & Armitage 2008



Barrière-Fouchet et al., 2006
SPH simulation

