

Petite histoire du système solaire: De la nébuleuse aux planètes rocheuses.

Michael Toplis
DTP, Observatoire Midi-Pyrénées



Les corps rocheux du système solaire



Mercure
 $r = 2400\text{km}$



Venus
 $r = 6050\text{km}$



Terre
 $r = 6400\text{km}$



Mars
 $r = 3400\text{km}$

Les corps rocheux du système solaire



Mercure

$r = 2400\text{km}$



Venus

$r = 6050\text{km}$



Terre

$r = 6400\text{km}$



Mars

$r = 3400\text{km}$



La lune

$r = 1740\text{km}$



Io (satellite de Jupiter)

$r = 1800\text{km}$



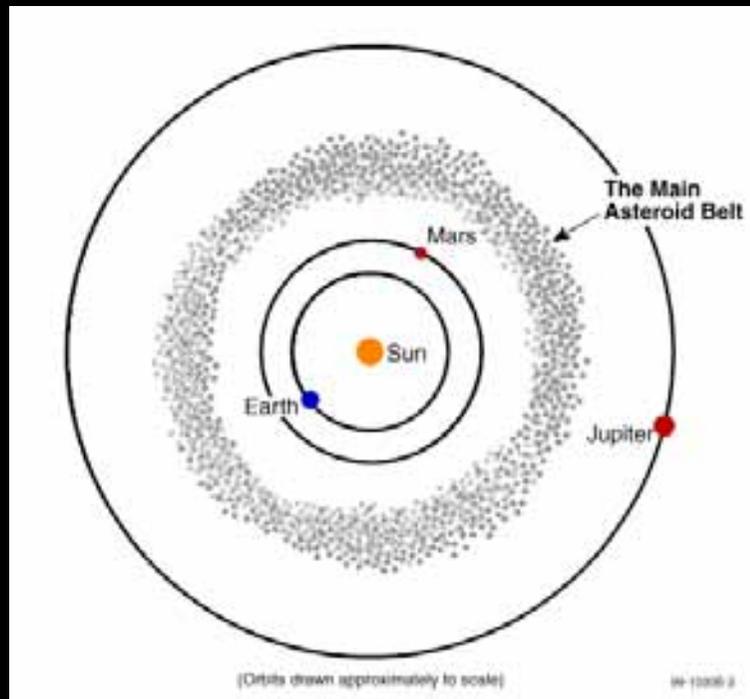
Phobos

(satellite de Mars)

$r = 20\text{km}$

Les corps rocheux du système solaire

Astéroïdes: >300.000 objets entre Mars et Jupiter

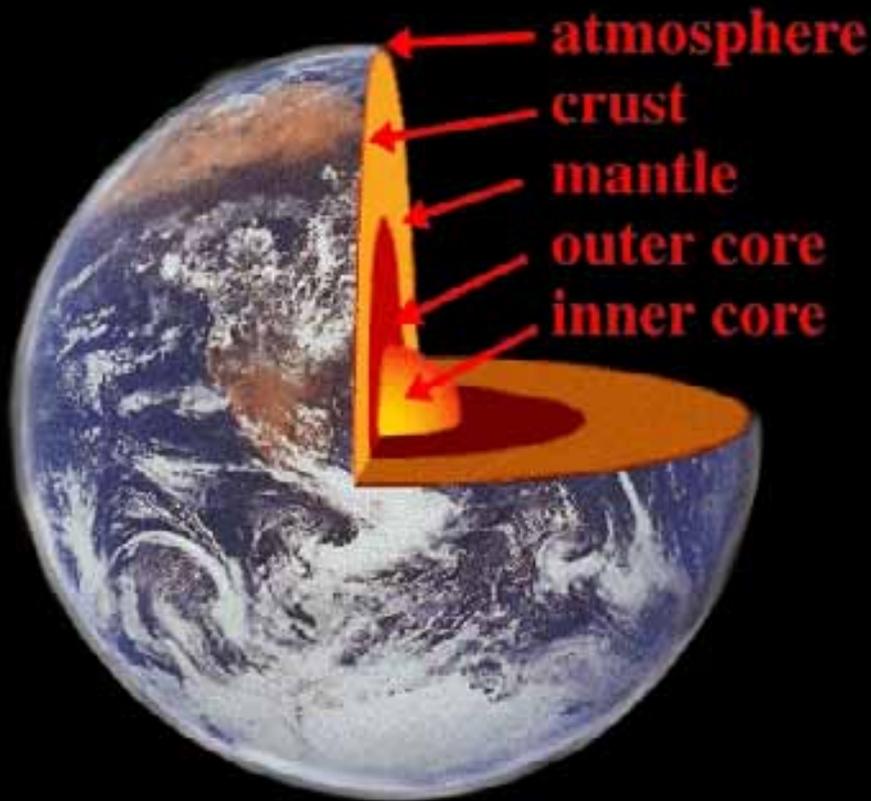


16 objets > 250km de diamètre

... les vestiges d'une planète qui s'est jamais formée?

A quoi ressemblent ces objets d'un
point de vue de leur
composition et de leur minéralogie?

La Terre

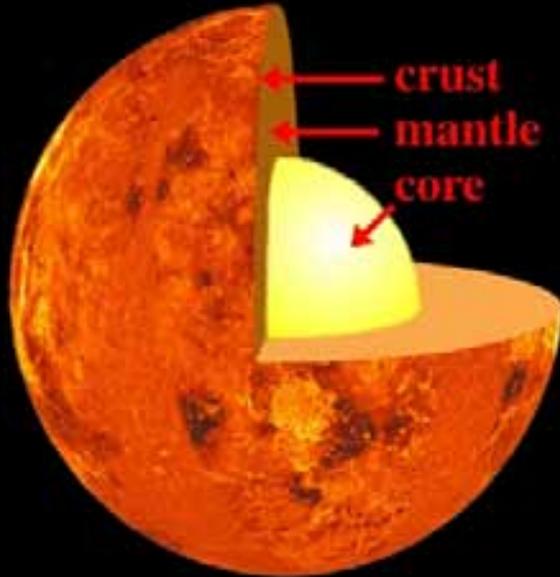


Roches de surface: Extrême diversité, silicates dominant.

Manteau: Silicates pauvres en SiO_2 (olivine et pyroxènes)

Noyau: Métallique.

Les autres planètes telluriques



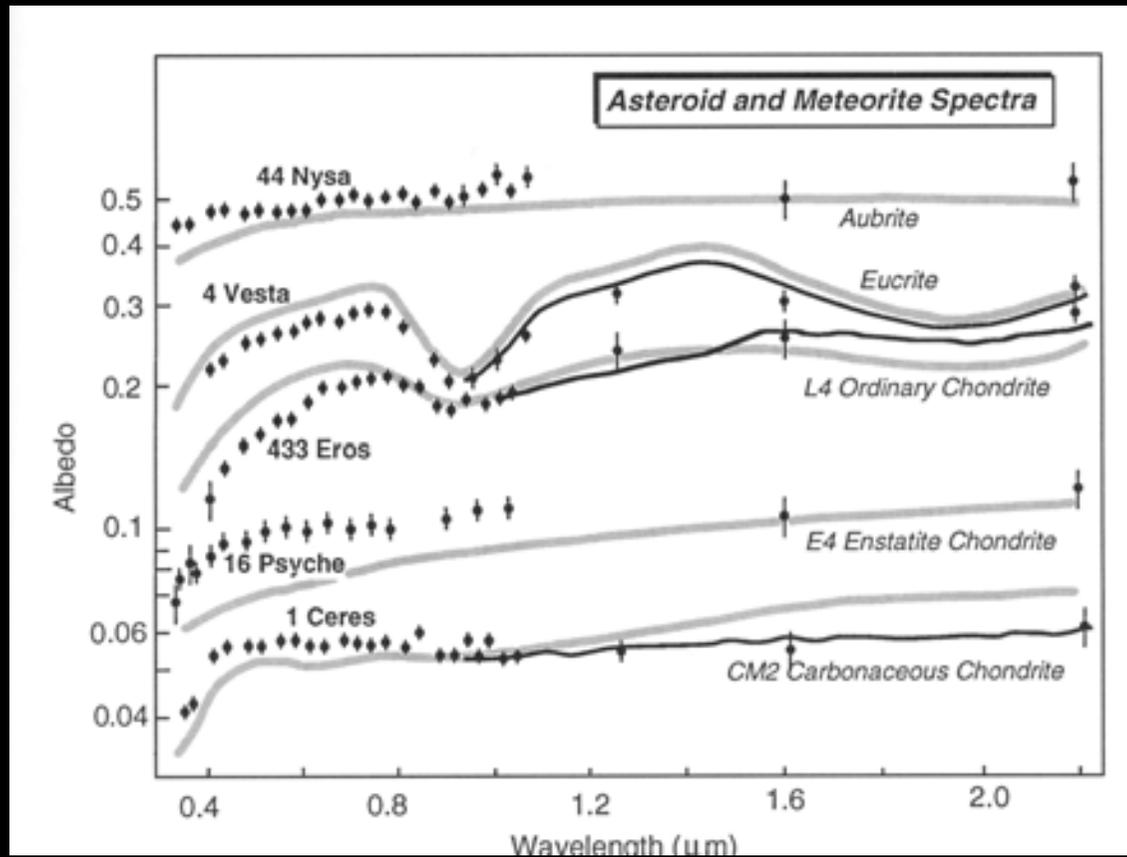
Roches de surface: Basaltes dominant, mais aussi sulfates, carbonates....

Manteau: Pas connu avec certitude, mais certainement olivine et pyroxènes.

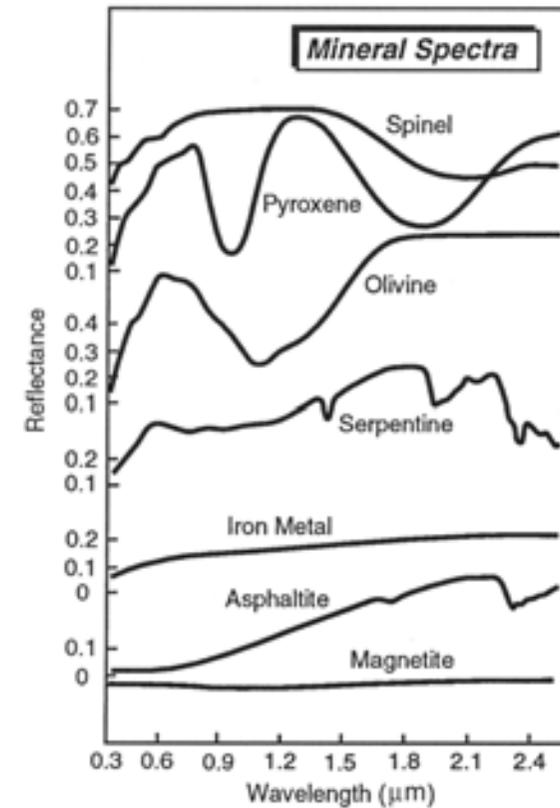
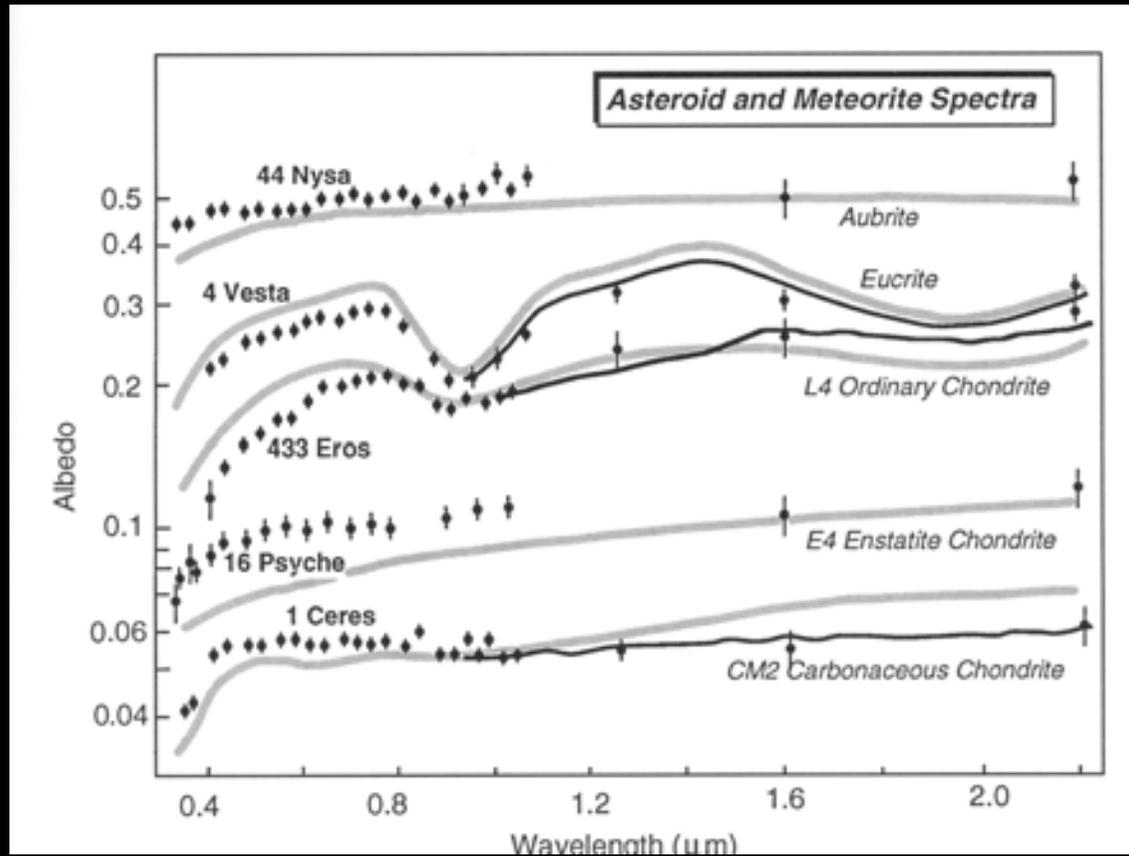
Noyau: Métallique, plus ou moins grand.

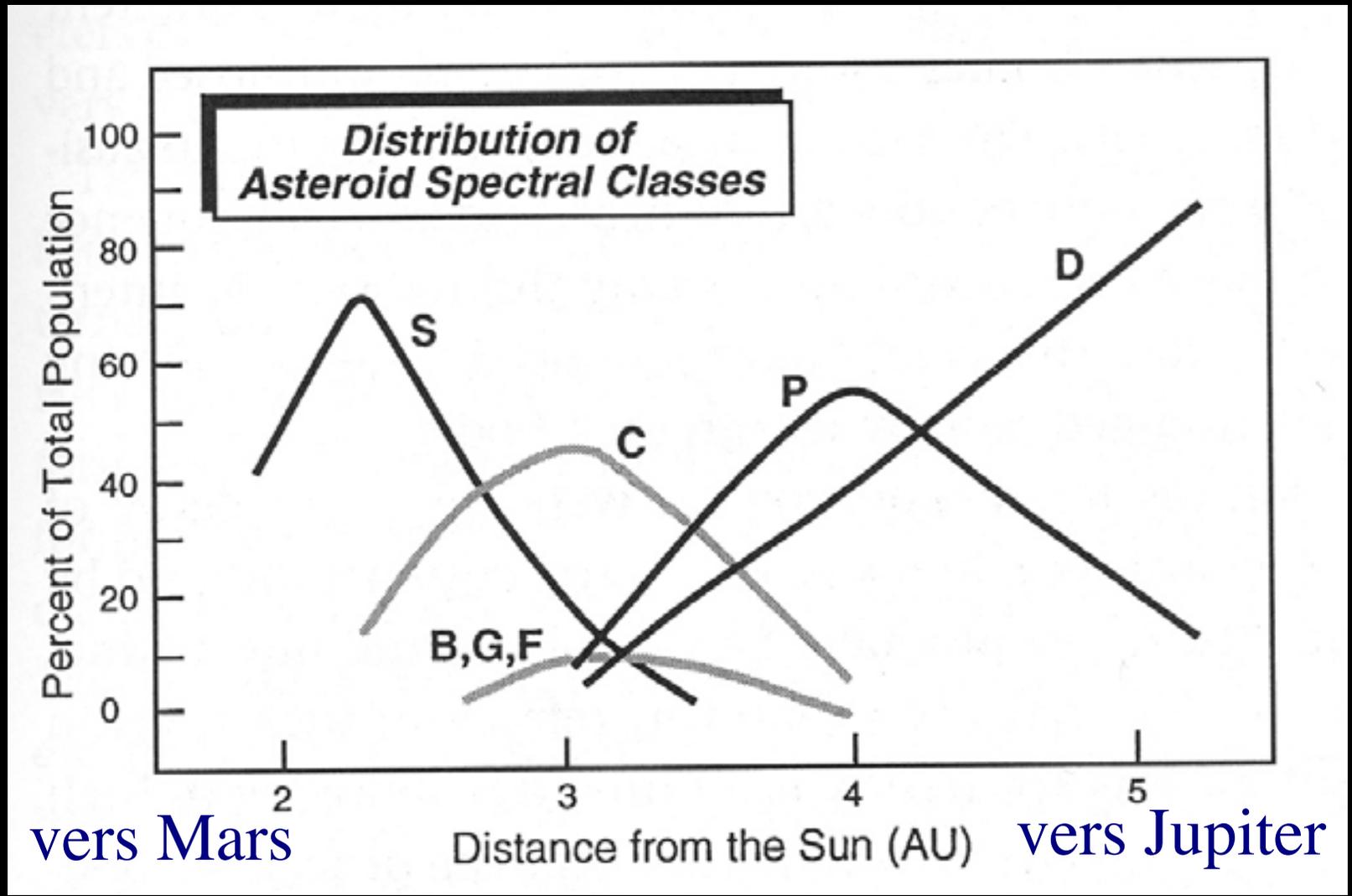


Les astéroïdes



Les astéroïdes





Minéraux de haute température

Métaux

Minéraux de basse température

Comment tout ça s'est formé?

Quels objets?

Quand?

Est-il possible de remonter à cet époque?

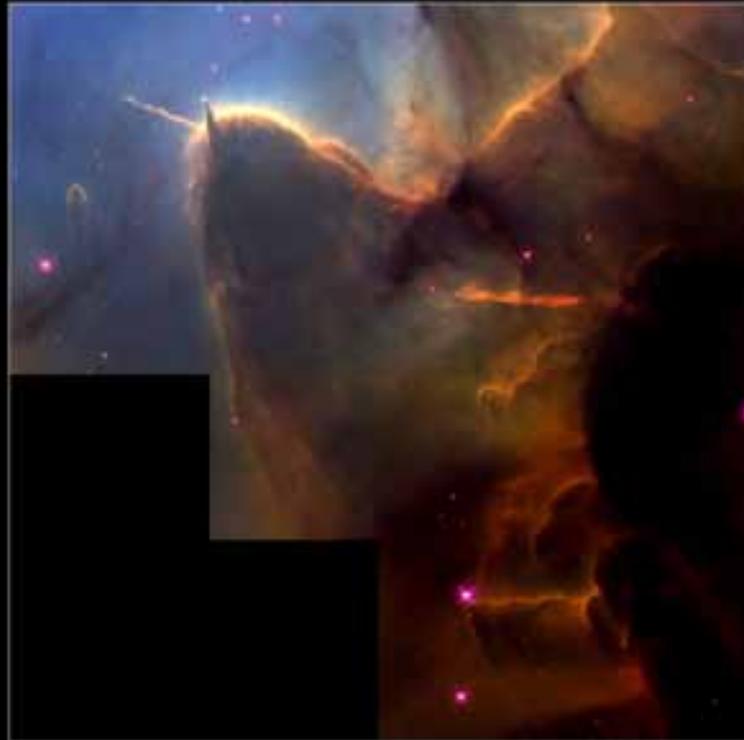
Reconstruire l'histoire du système solaire....

Comparaison avec d'autres
étoiles/systèmes planétaires....



temps





Trifid Nebula • M20
Hubble Space Telescope • WFPC2

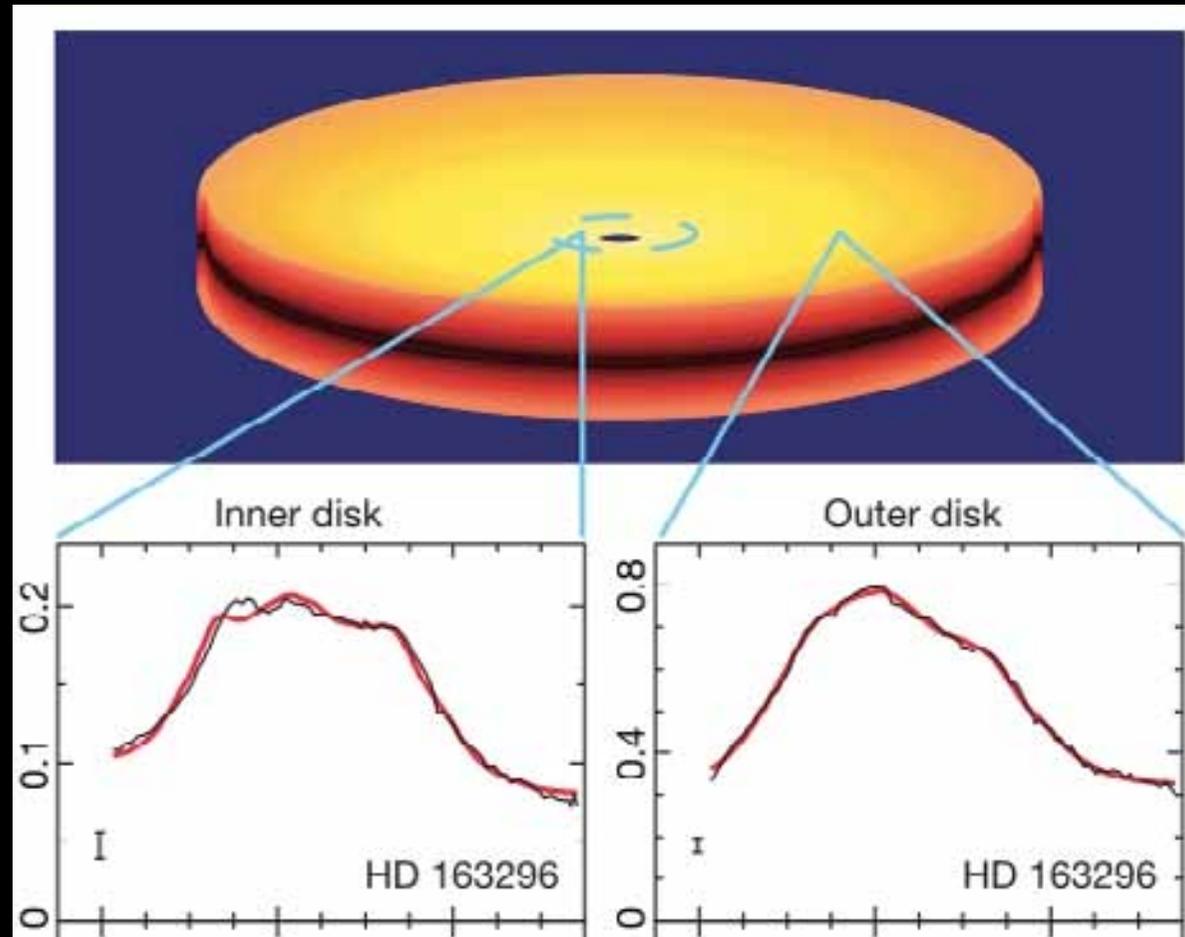
NASA and J. Hester (Arizona State University) • STScI-PRC99-42

Les nébuleuses,
pouponnières d'étoiles



Concentrations locales de
poussières et de gaz.
Formation de disques d'accrétion

La minéralogie des nébuleuses



+ Olivine
(Mg_2SiO_4)

+Pyroxène
(MgSiO_3)

Reconstruire l'histoire du système solaire....

Comparaison avec d'autres
étoiles/systèmes planétaires....



Très loin de la
précision nécessaire

temps



Reconstruire l'histoire du système solaire....

Comparaison avec d'autres
étoiles/systèmes planétaires....



Remonter le temps à partir
des objets planétaires



temps



Reconstruire l'histoire du système solaire....

- i) Histoire effacée
- ii) Echantillons difficiles à récupérer

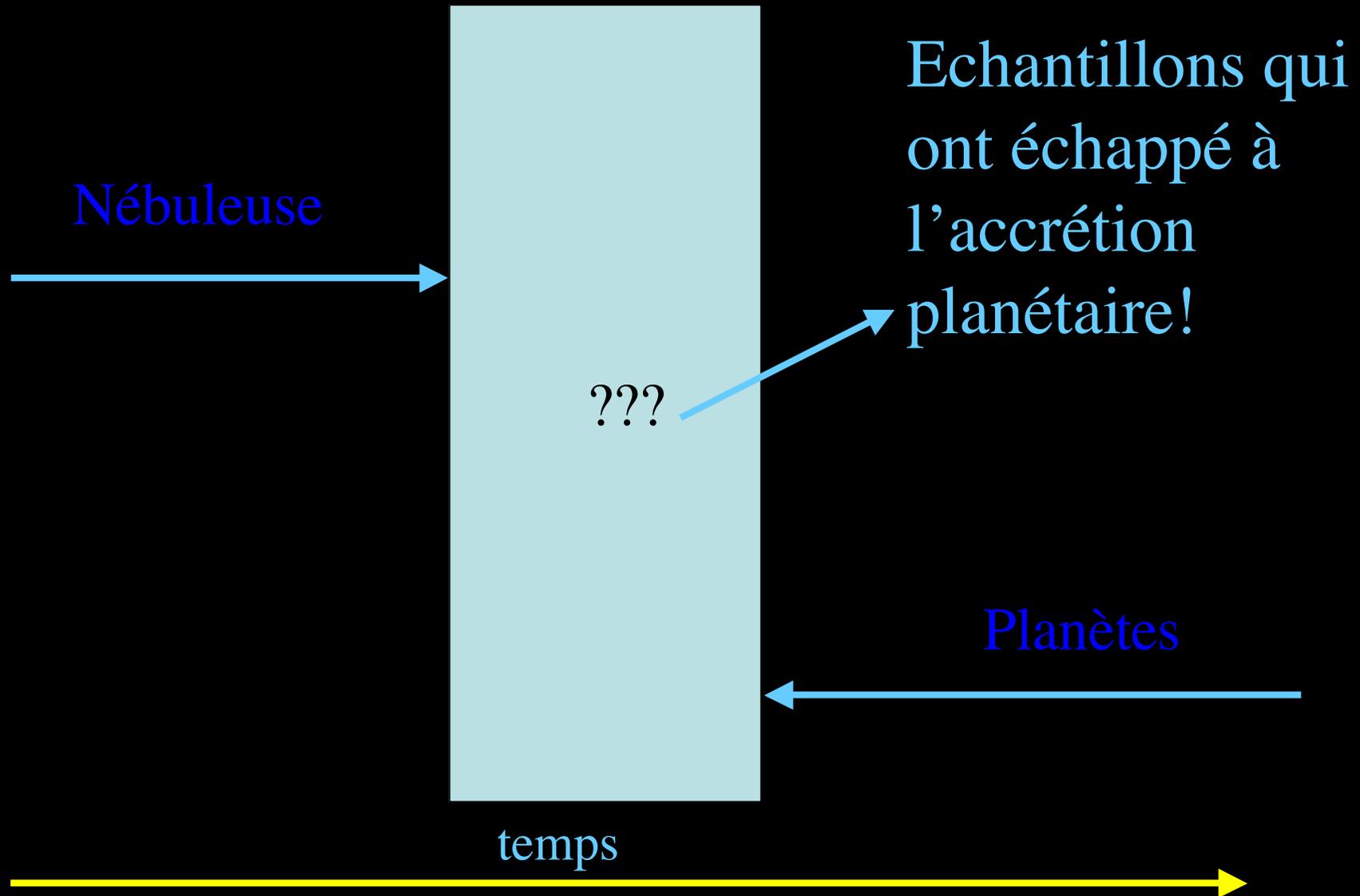
Remonter le temps à partir
des objets planétaires



temps



Reconstruire l'histoire du système solaire....

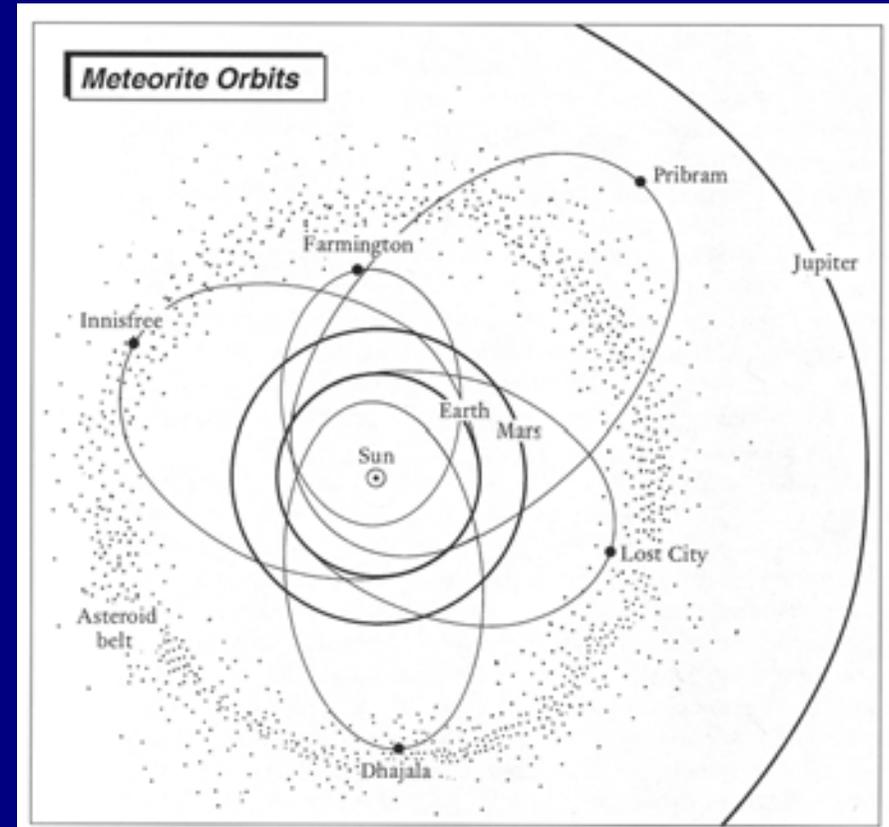


Les météorites

Messagers du système solaire précoce
(et pas chers!)



Pour la plupart: origine dans la ceinture d'astéroïdes....



Que nous racontent les météorites?

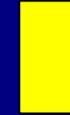
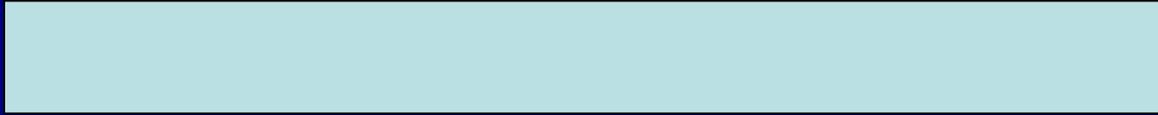
Une très grande diversité...



pierres

mixtes

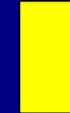
métaux



pierres

mixtes

métaux



chondrites

achondrites



(pas fondu)



(fondu)

pierres

mixtes

métaux



chondrites

achondrites



(fondu)

primitive

« métamorphique »



(« froid »)

(chauffé)

pierres

mixtes

métaux



chondrites

achondrites



primitive

« métamorphique »



FROID

CHAUD



pierres

mixtes

métaux



chondrites

achondrites



primitive

« métamorphique »



FROID

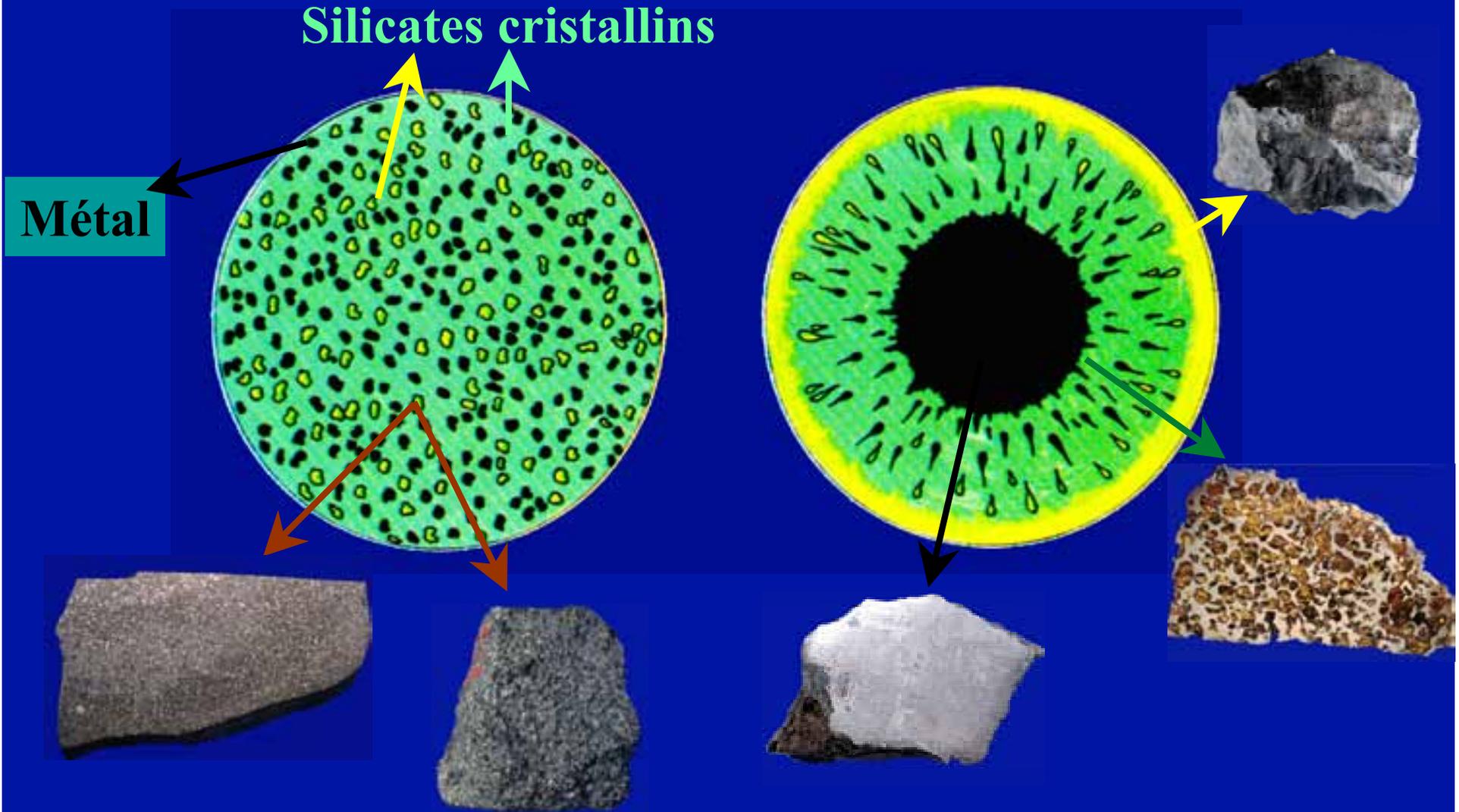
CHAUD



temps

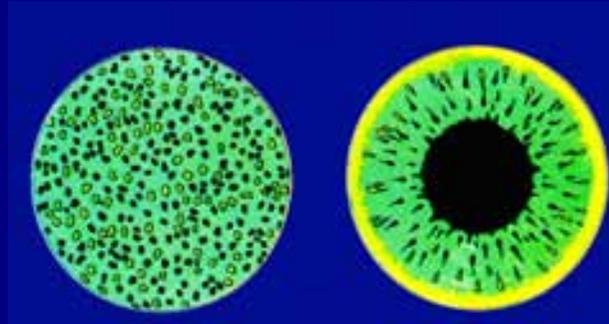


Chondrites Météorites différenciées





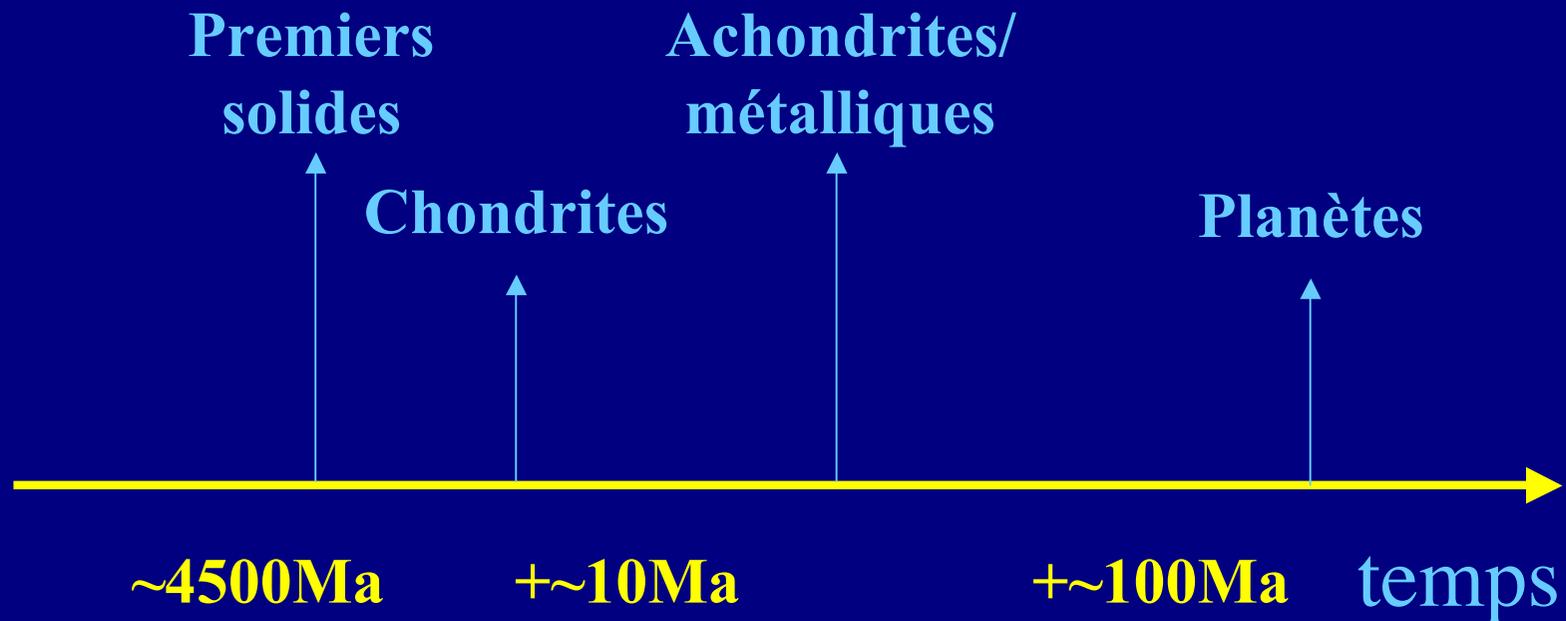
nébuleuse



**corps parents des
météorites**



planètes



Qu'a-t-on appris depuis 20ans?

Les premiers solides: leur composition et leur âge

Chondrites - Achondrites: un problème d'âge relatif

L'importance de la source d'énergie de la différenciation.

Quelle taille des premiers corps.

Sujets pour les 20 prochaines années!

Premiers solides

Quel lien entre les météorites et le refroidissement de la nébuleuse?

Pour répondre à cette question il faut une idée de la composition du gaz de départ....

La composition du système solaire?

photosphère solaire

La composition du système solaire?

photosphère solaire



La météorite d'Orgueil, une chondrite carbonée, a une composition chimique très proche de celle détectée dans la photosphère solaire.

Météorite Orgueil (CI)

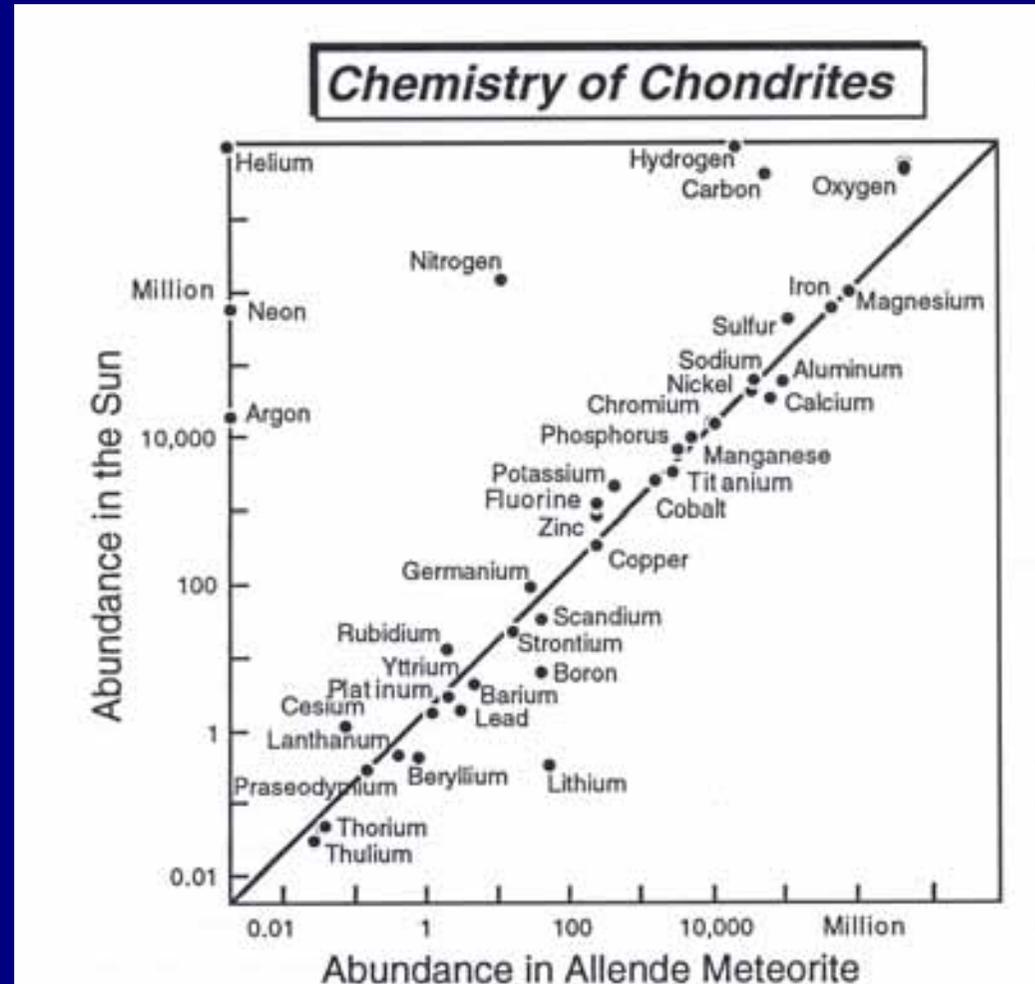
La composition du système solaire?

photosphère solaire

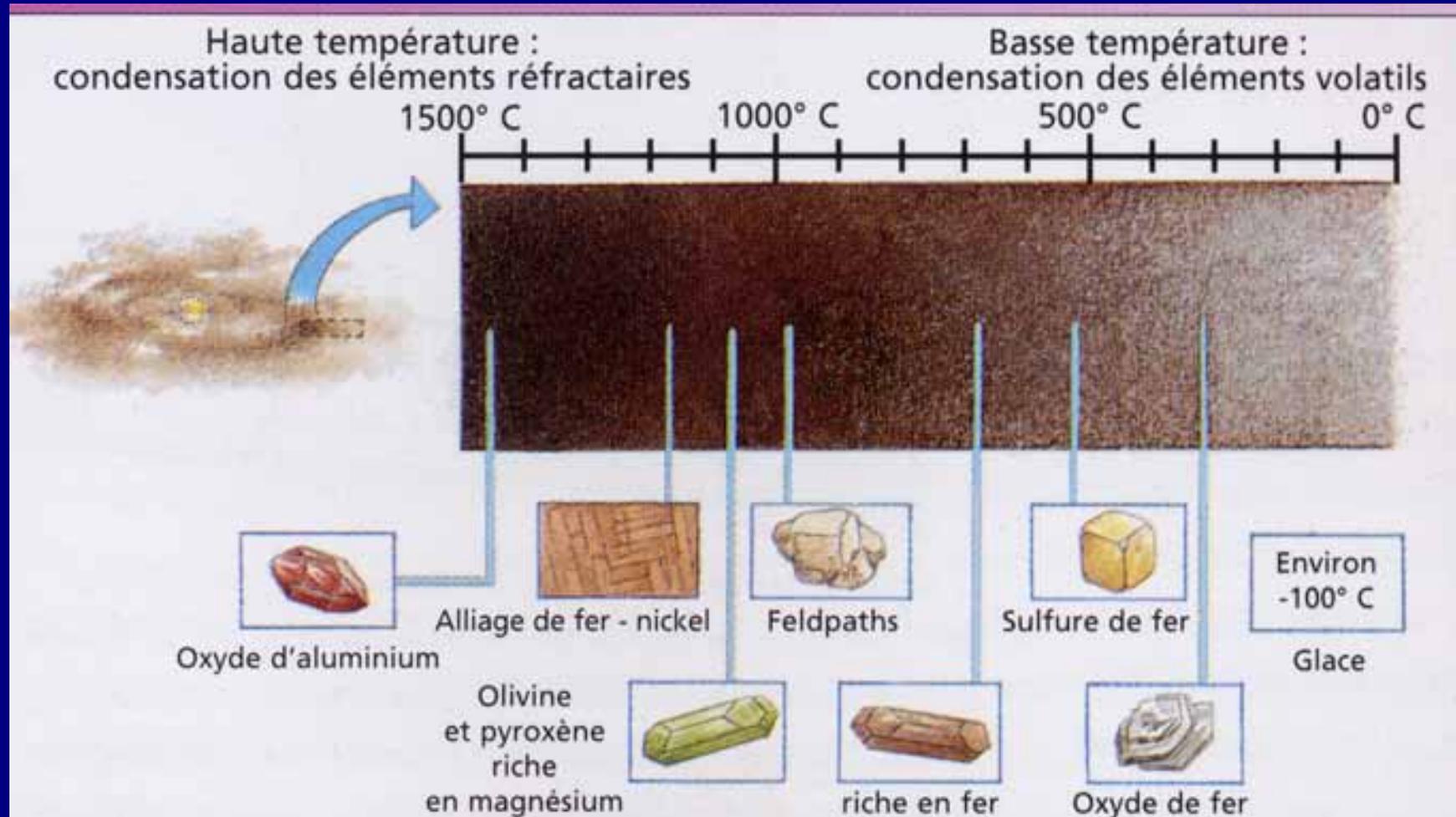


La météorite d'Orgueil, une chondrite carbonée, a une composition chimique très proche de celle détectée dans la photosphère solaire.

Météorite Orgueil (CI)



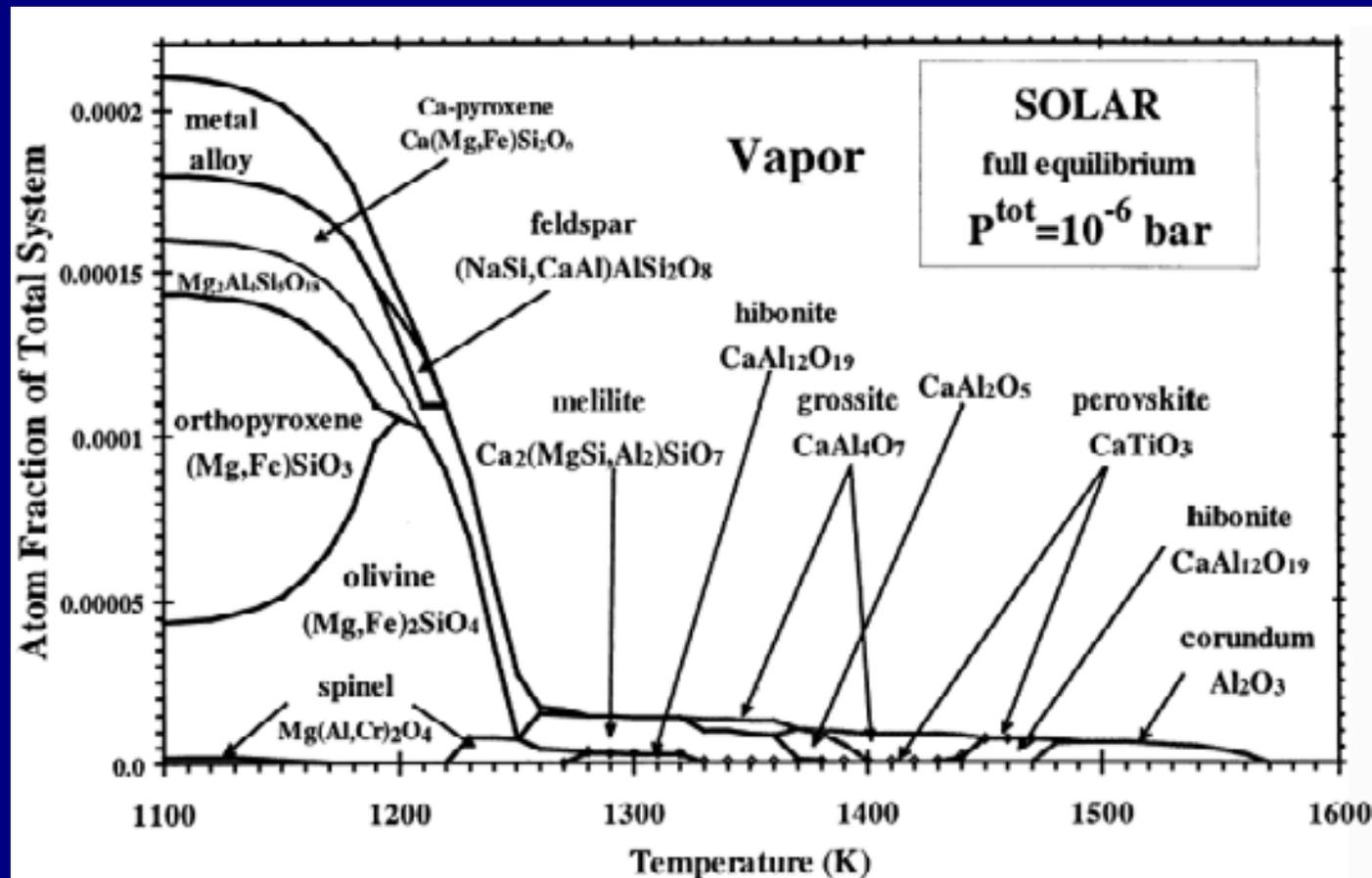
Que se passe-t-il lors du refroidissement d'un gaz de composition solaire?





Condensation dans les nébuleuses protostellaires

Séquence de condensation dans la nébuleuse protosolaire

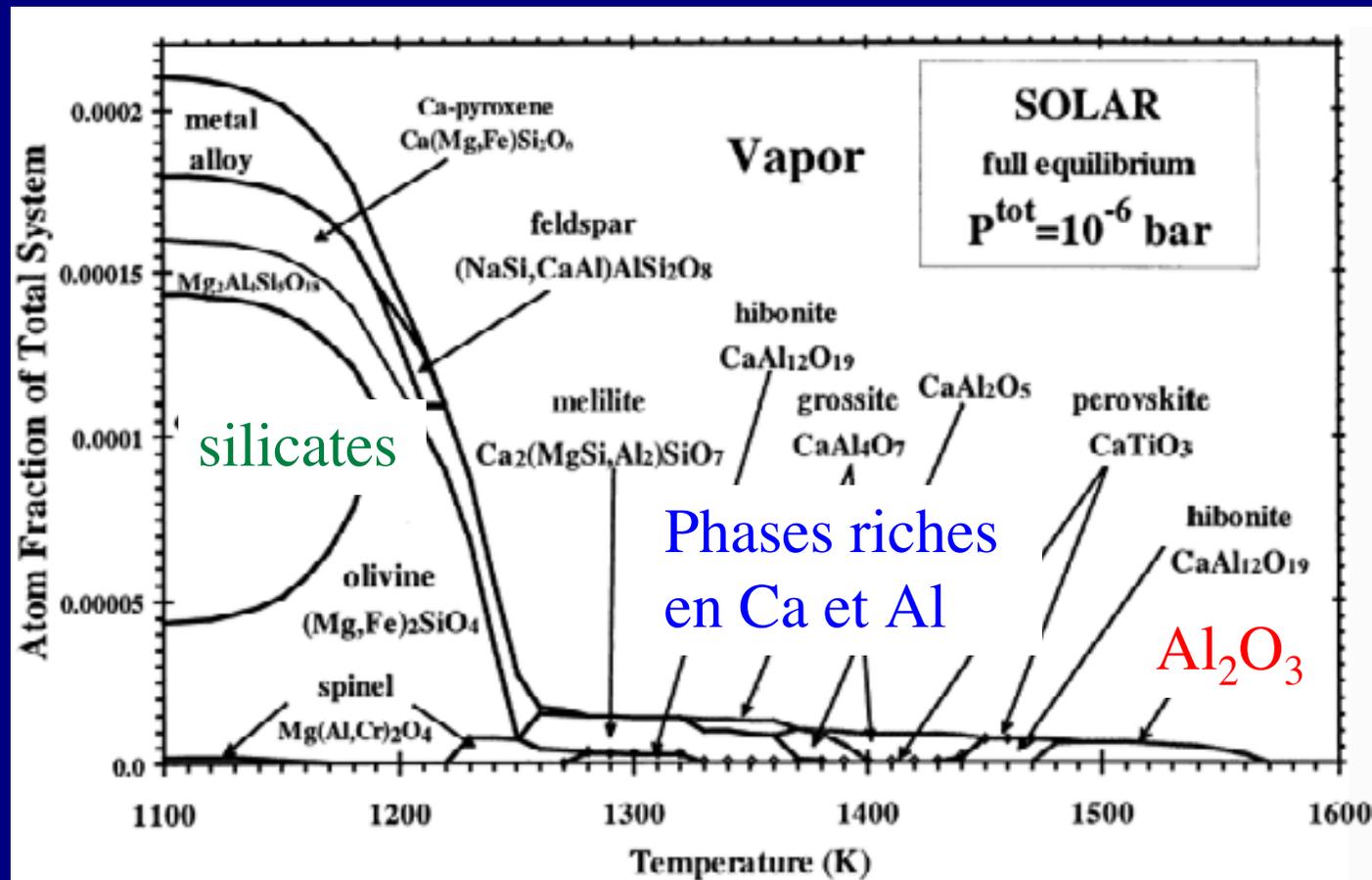


Ebel et Grossman 2001



Condensation dans les nébuleuses protostellaires

Séquence de condensation dans la nébuleuse protosolaire



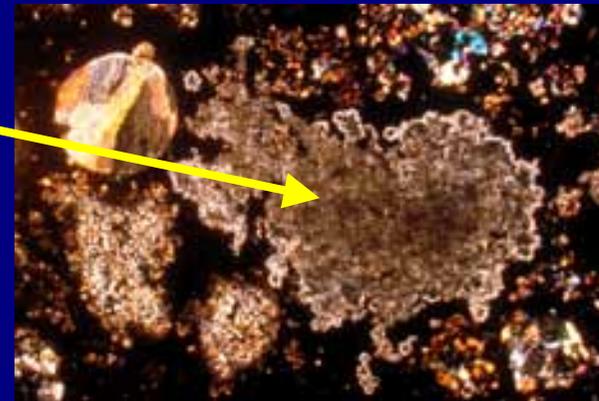
Ebel et Grossman 2001

Les composants des chondrites primitives

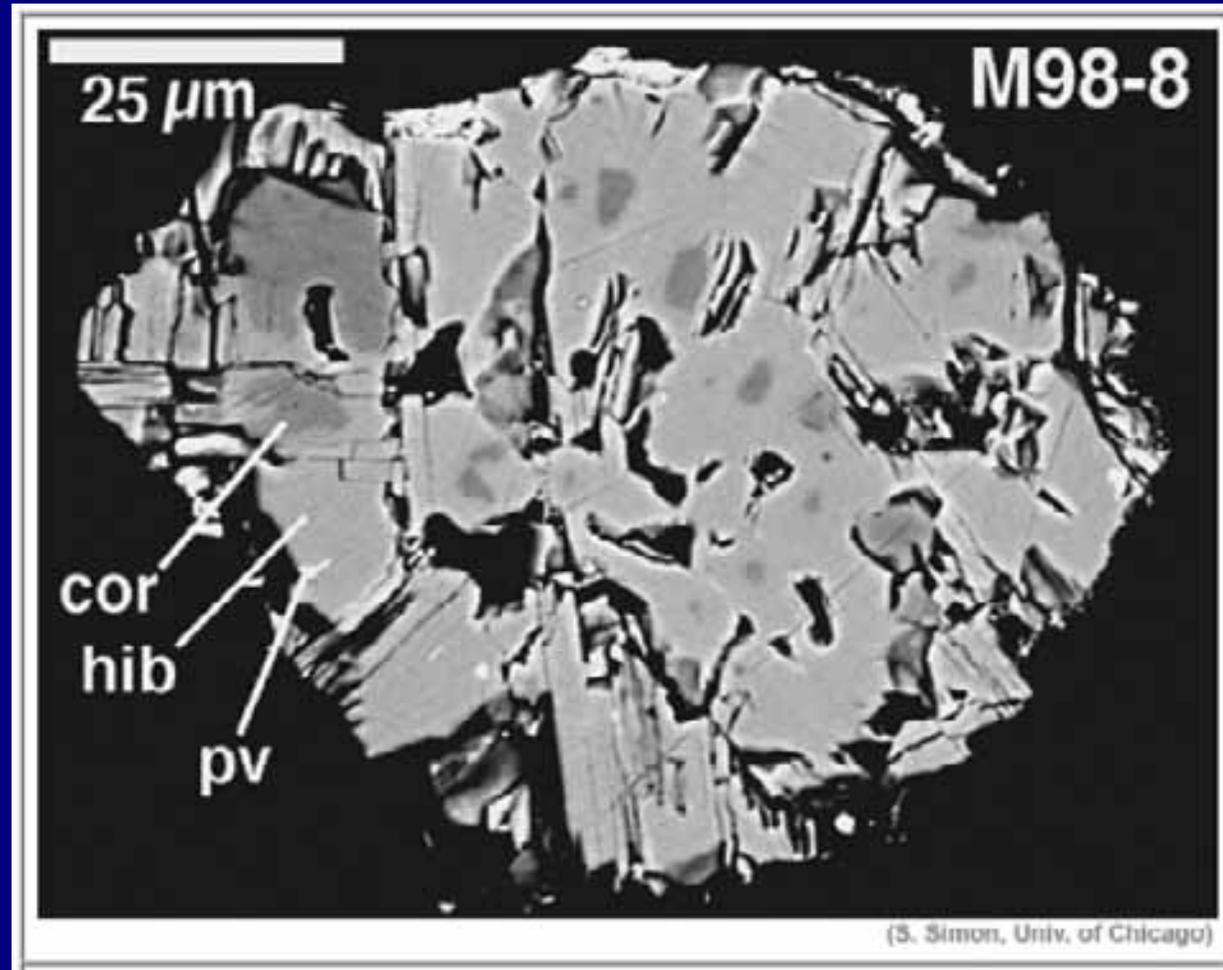
Chondrite Allende CV3



Inclusion réfractaire
(minéraux riches en Ca, Al)



Inclusion dans Murchison (CM3)



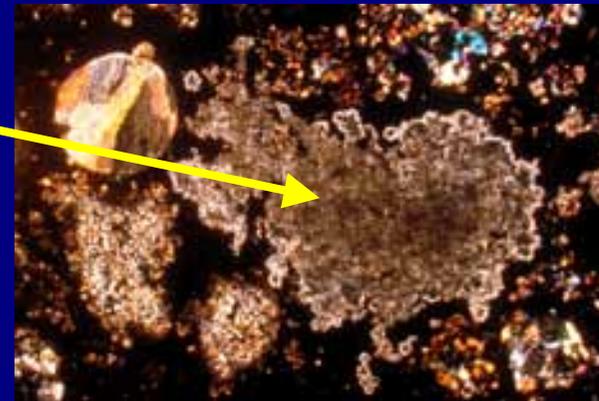
Une des premières « roches » du système solaire

Les composants des chondrites primitives

Chondrite Allende CV3

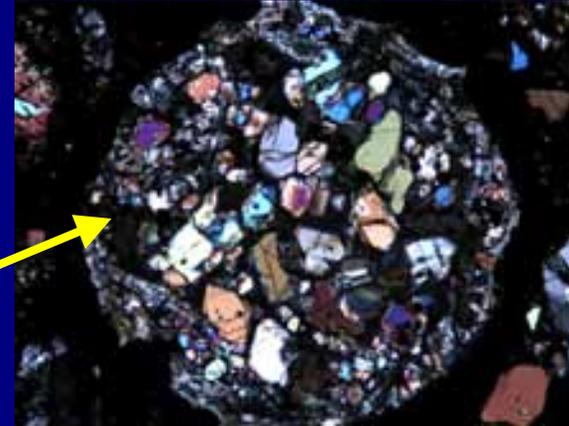


Inclusion réfractaire
(minéraux riches en Ca, Al)



Les composants des chondrites primitives

Chondrite Allende CV3



Chondre

Petites billes dominées
par des silicates

Les composants des chondrites primitives

Chondrite Allende CV3

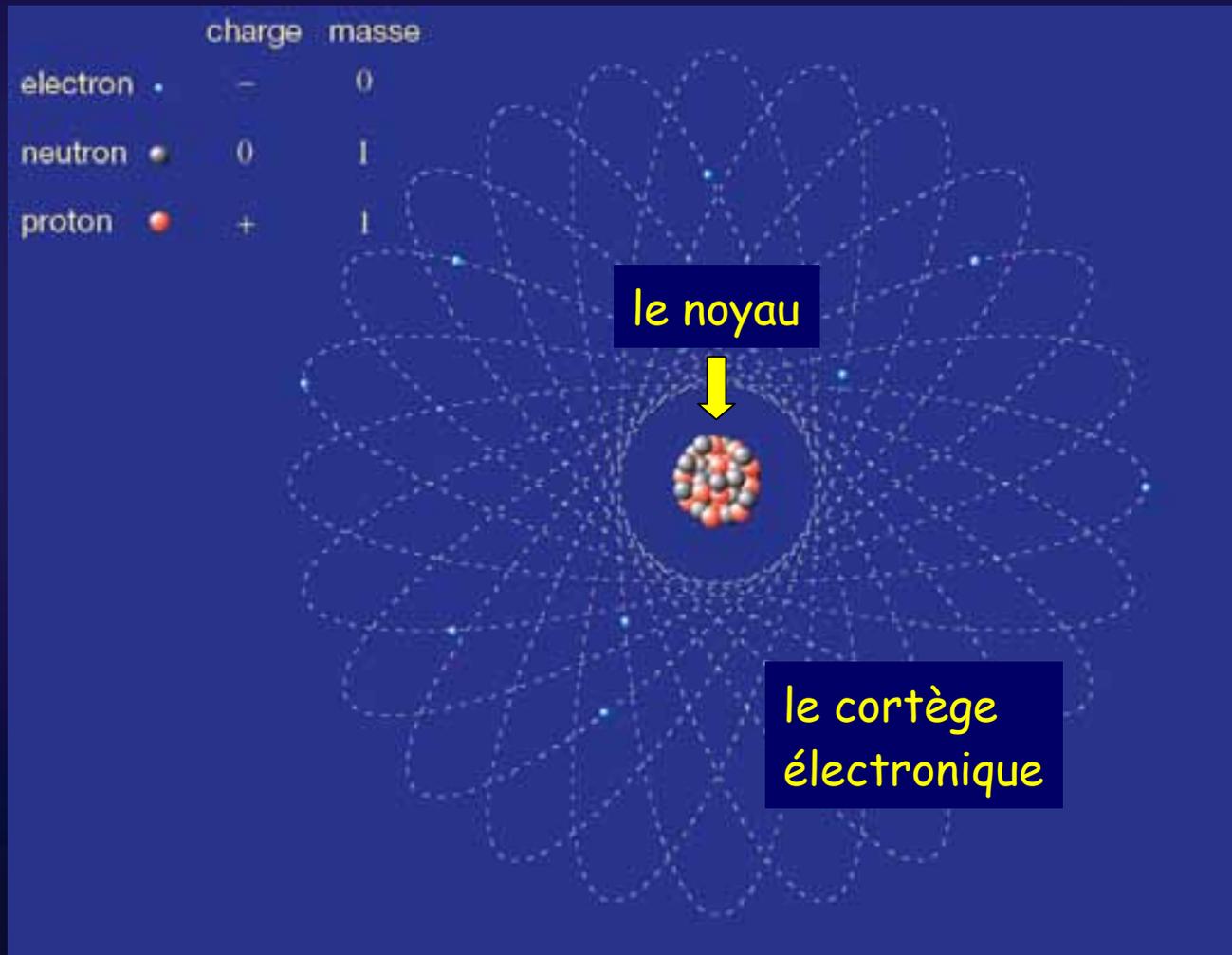


Matrice
(composés de
basse température)

Quand et à quelles échelles de temps?

Datation utilisant la radioactivité

Rappel à propos de la structure de l'atome



Les Isotopes

hydrogène (H)



${}^1\text{H}$

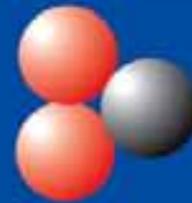


${}^2\text{H} = \text{D}$

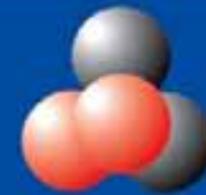


${}^3\text{H} = \text{T}$

hélium (He)

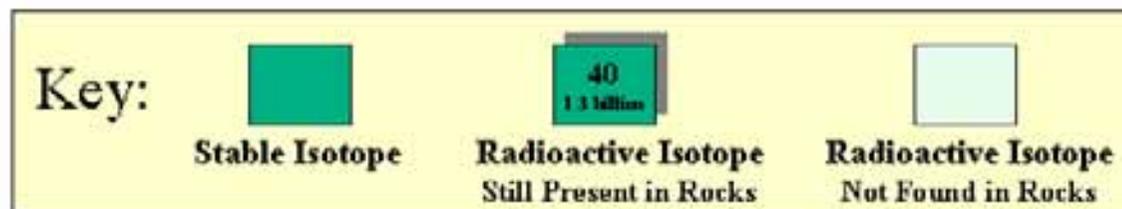
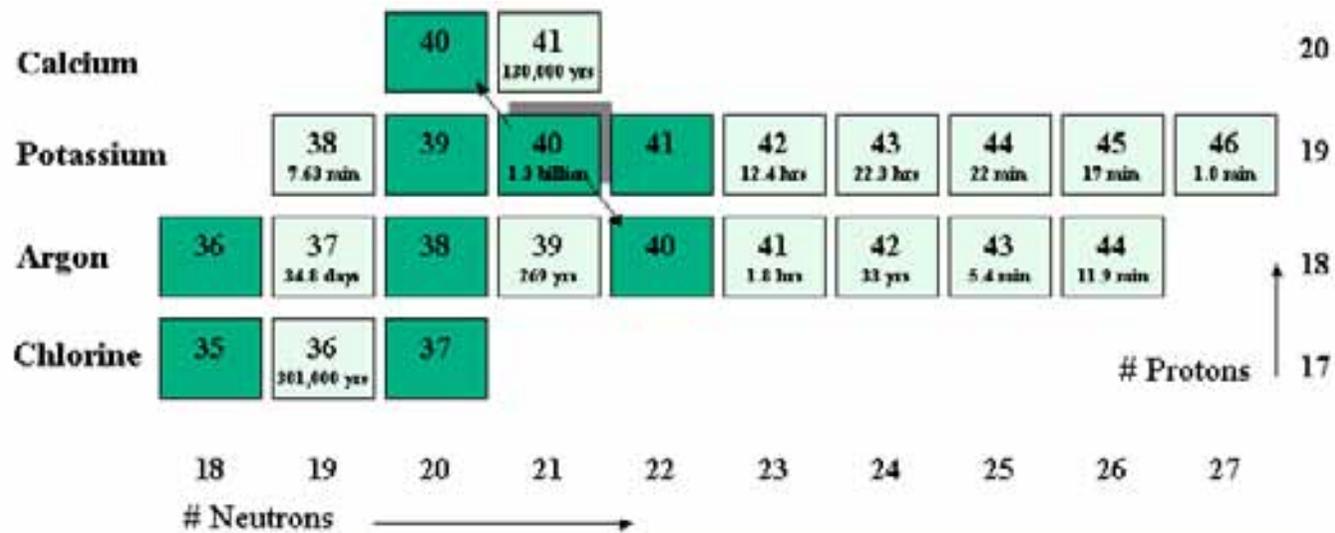


${}^3\text{He}$

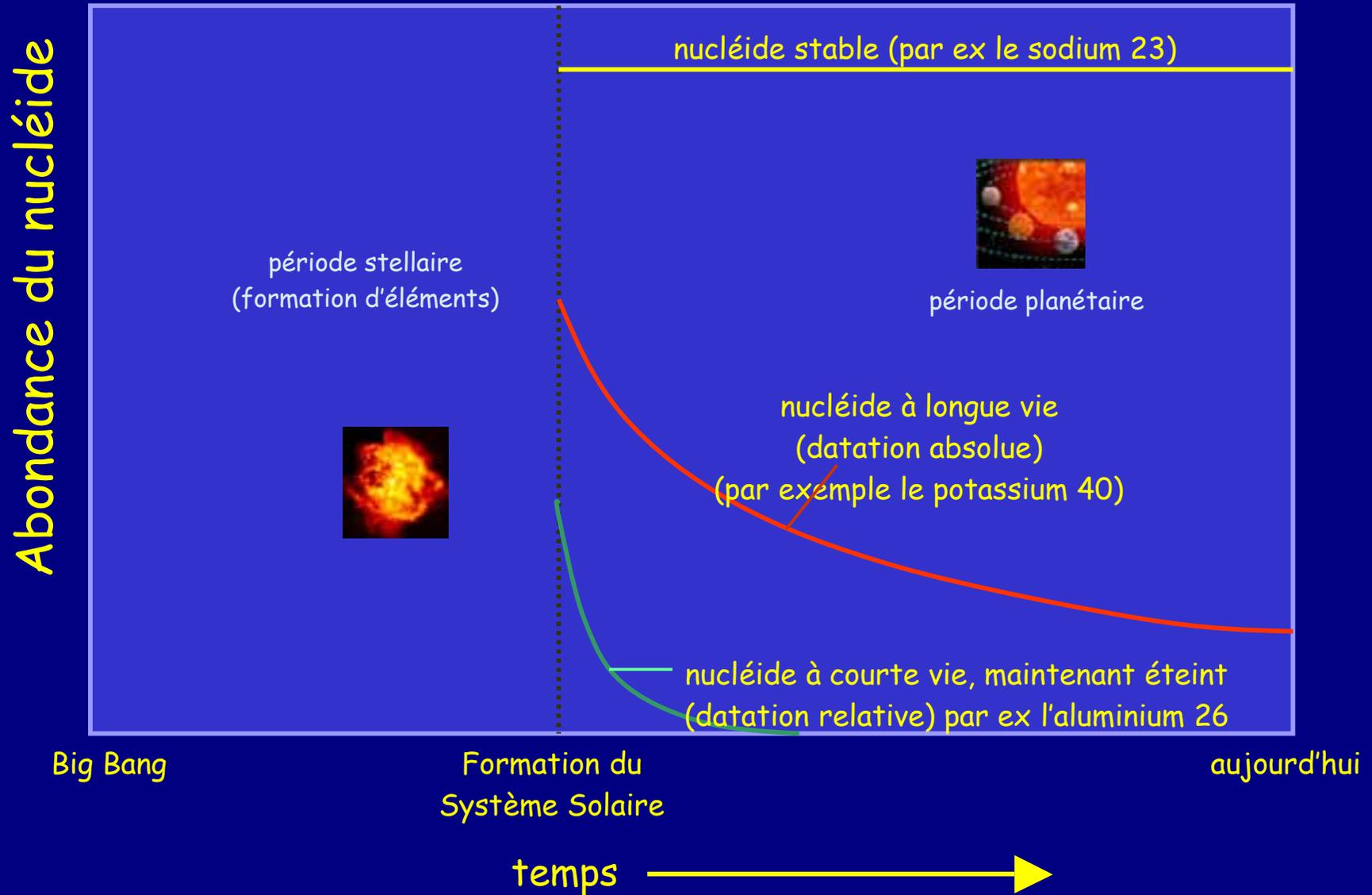


${}^4\text{He}$





L'échelle des temps des processus planétaires



COSMO-ISOTOPIC CLOCKS



PARENT/DAUGHTER

HALF-LIFE (10⁶ YR.)

• ALUMINUM-26 / MAGNESIUM-26	• 0.73
• POTASSIUM-40 / ARGON-40 & CALCIUM-40	• 1270
• CALCIUM-41 / POTASSIUM-41	• 1
• MANGANESE-53 / CHROMIUM-53	• 3.7
• IRON-60 / NICKEL-60	• 1.5
• RUBIDIUM-87 / STRONTIUM-87	• 48,800
• LEAD-107 / SILVER-107	• 5.5
• IODINE-129 / XENON-129	• 15.7
• SUMARIUM-146 / NIODENIUM-142	• 103
• SUMARIUM-147 / NIODENIUM-143	• 106,000
• LUTICIUM-176 / HAFNIUM-176	• 35,700
• HAFNIUM-182 / TUNGSTEN-182	• 9
• REHNEIUM-187 / OSMIUM-187	• 41,600
• PLATINUM-190 / OSMIUM-186	• 450,000
• THORIUM-232 / LEAD-208	• 14,010
• URANIUM-235 / LEAD-207	• 704
• URANIUM-238 / LEAD-206	• 4469
• PLUTONIUM-244 / FISSION XE	• 80

↑ LEAD-LEAD AGE



COSMO-ISOTOPIC CLOCKS



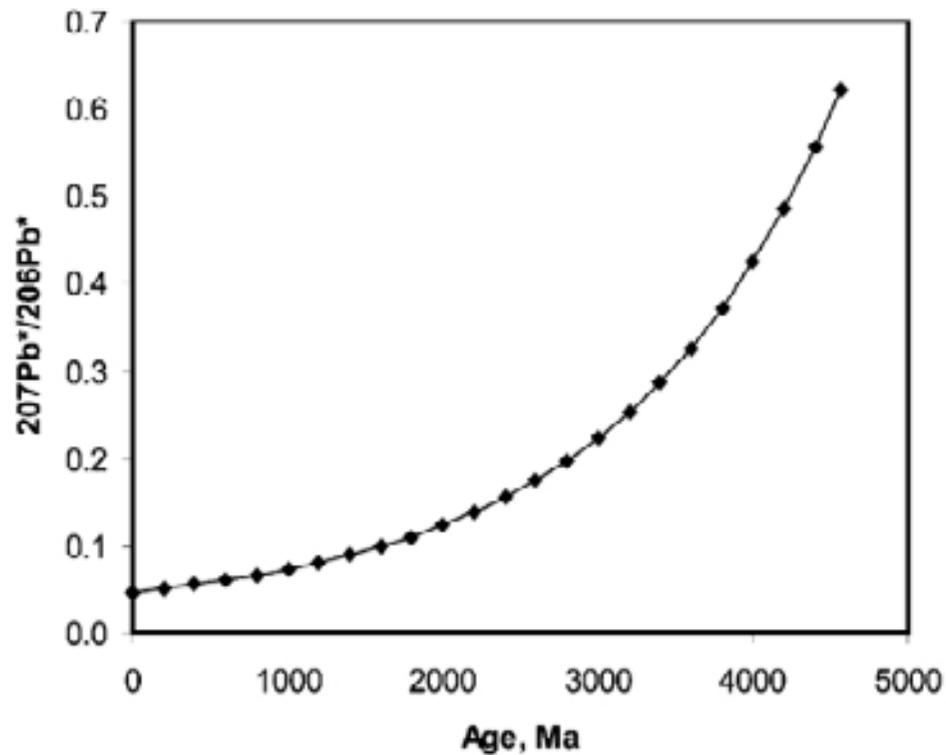
PARENT/DAUGHTER

HALF-LIFE (10⁶ YR.)

• ALUMINUM-26 / MAGNESIUM-26	• 0.73
• POTASSIUM-40 / ARGON-40 & CALCIUM-40	• 1270
• CALCIUM-41 / POTASSIUM-41	• 1
• MANGANESE-53 / CHROMIUM-53	• 3.7
• IRON-60 / NICKEL-60	• 1.5
• RUBIDIUM-87 / STRONTIUM-87	• 48.800
• LEAD-107 / SILVER-107	• 5.5
• IODINE-129 / XENON-129	• 15.7
• SUMARIUM-146 / NIODENIUM-142	• 103
• SUMARIUM-147 / NIODENIUM-143	• 106,000
• LUTICIUM-176 / HAFNIUM-176	• 35,700
• HAFNIUM-182 / TUNGSTEN-182	• 9
• REHNEIUM-187 / OSMIUM-187	• 41,600
• PLATINIUM-190 / OSMIUM-186	• 450,000
• THORIUM-232 / LEAD-208	• 14,010
• URANIUM-235 / LEAD-207	• 704
• URANIUM-238 / LEAD-206	• 4469
• PLUTONIUM-244 / FISSION XE	• 80



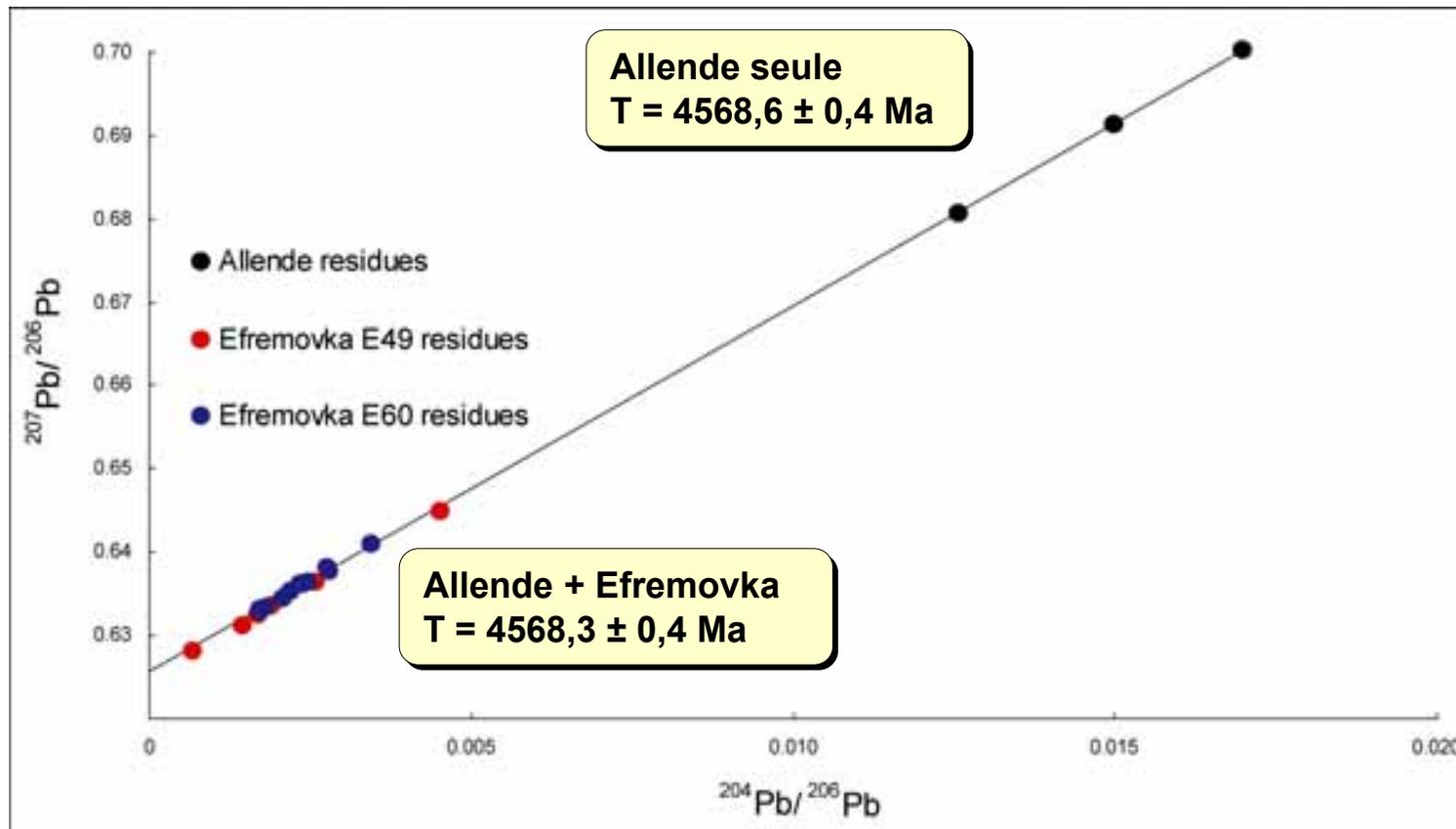
Le cas du plomb...



Les CAI's sont les objets idéaux pour cette méthode: très riches en U, très pauvres en Pb^{204}

Fig. 1. Variation of the $^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ ratio with the age.

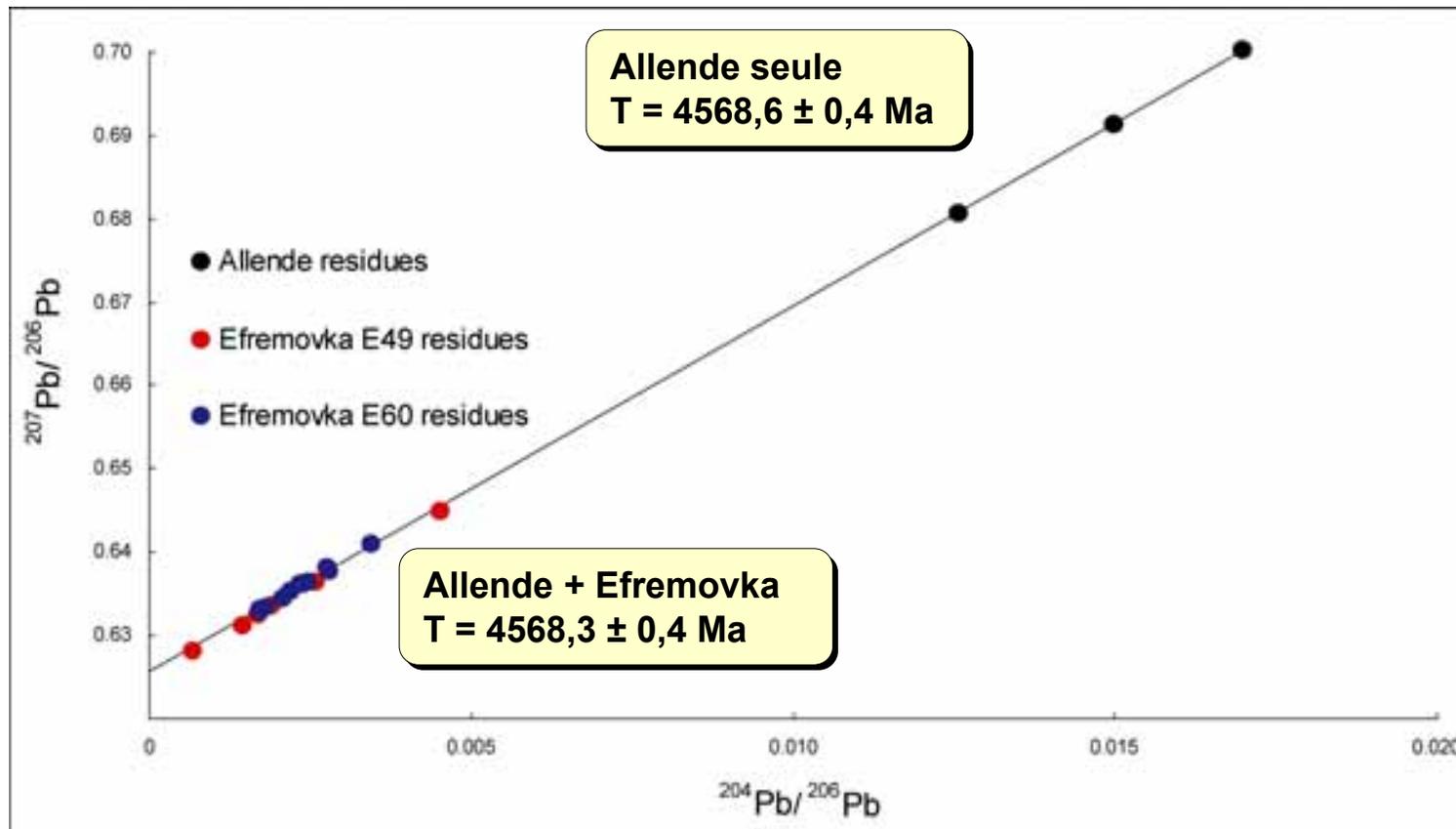
Grâce aux avancées analytiques de ces dernières années, l'âge des inclusions réfractaires est très bien déterminé



(Amelin et al., 2002) ± 1 Ma

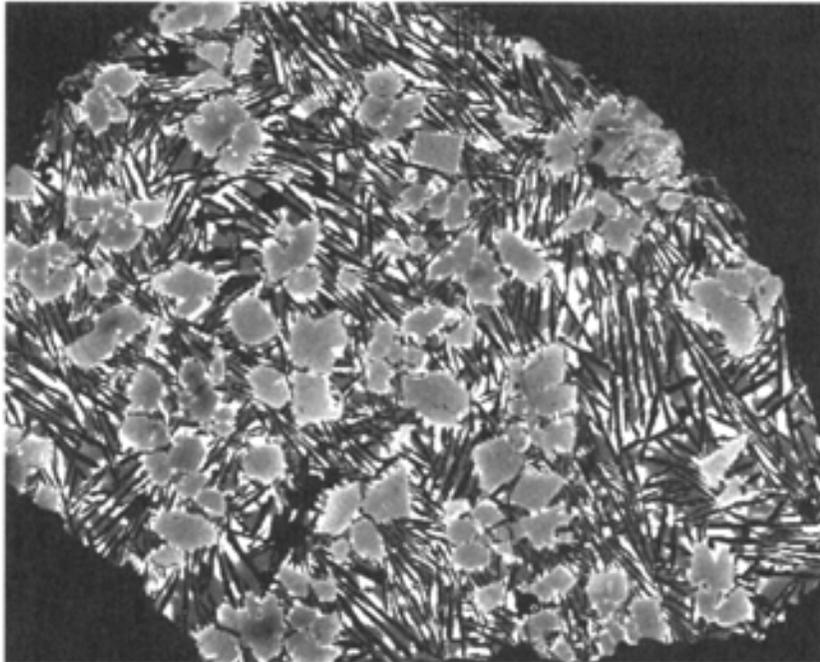
4568,5 ± 0,5 Ma

Avec la même méthode, les chondres sont plus jeunes... (de 2 à 5 Ma)

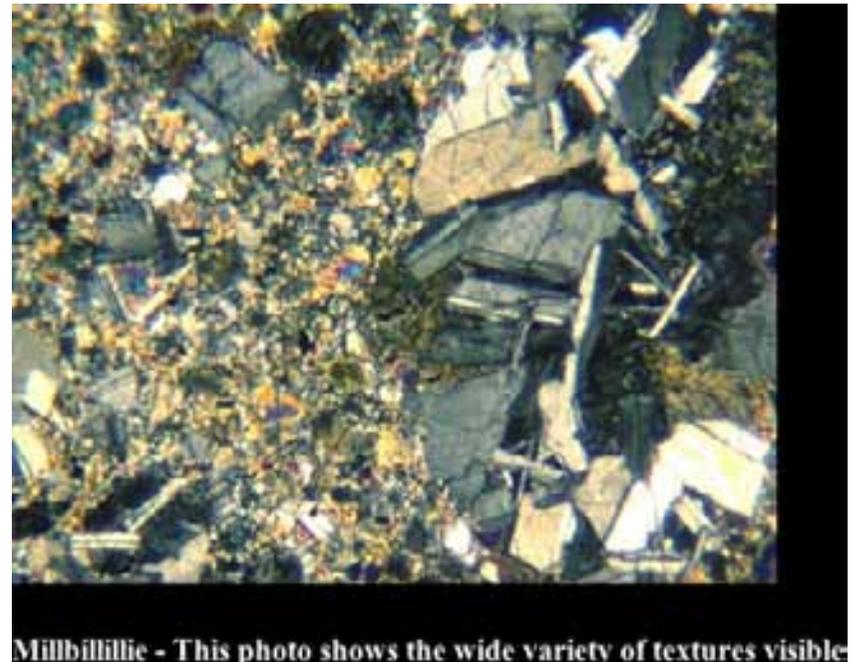


CAI = 4568,5±0,5 Ma; chondres = 4566-4563

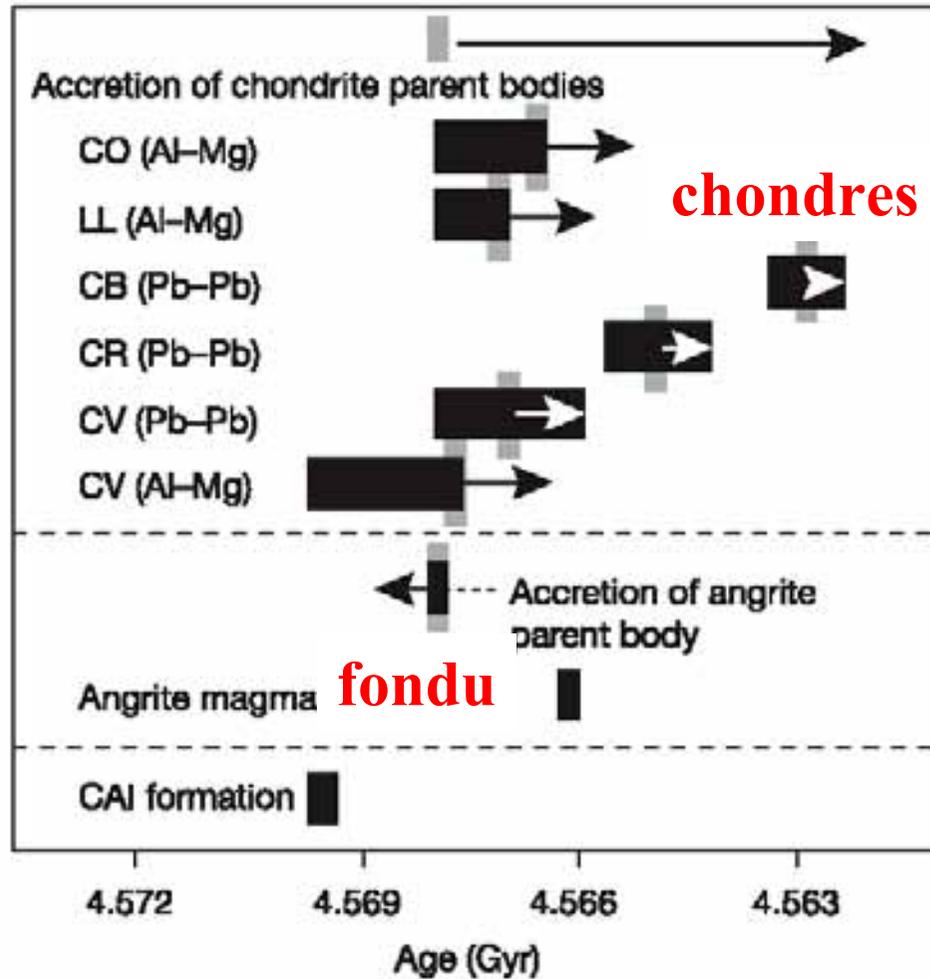
... et les météorites fondus?



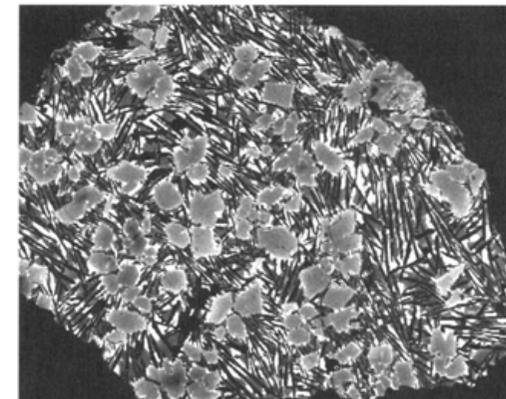
Angrites



Eucrites



Angrites



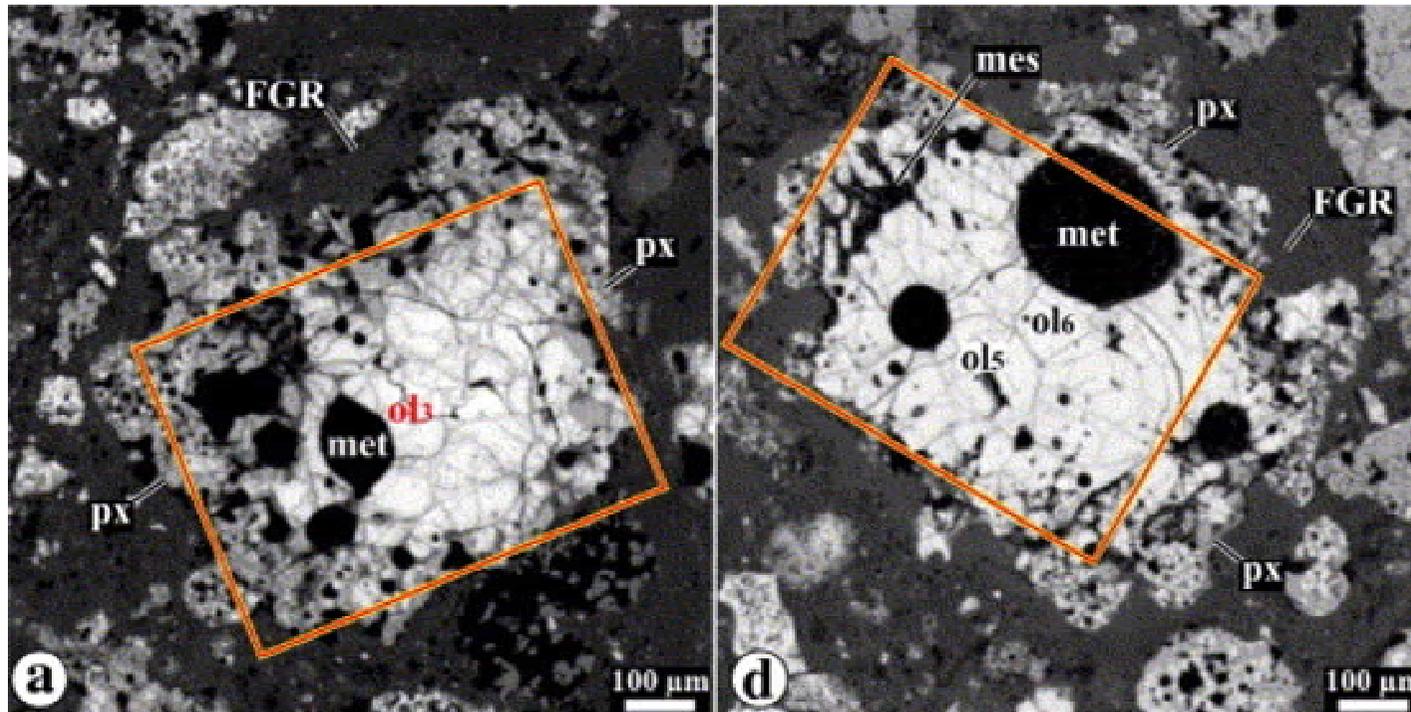
Ces objets fondus ont accrétés avant la formation de certains **objets primitifs**! Un premier paradoxe

**Est-ce que les planétisimaux sont
l'agglomération de chondres**

ou

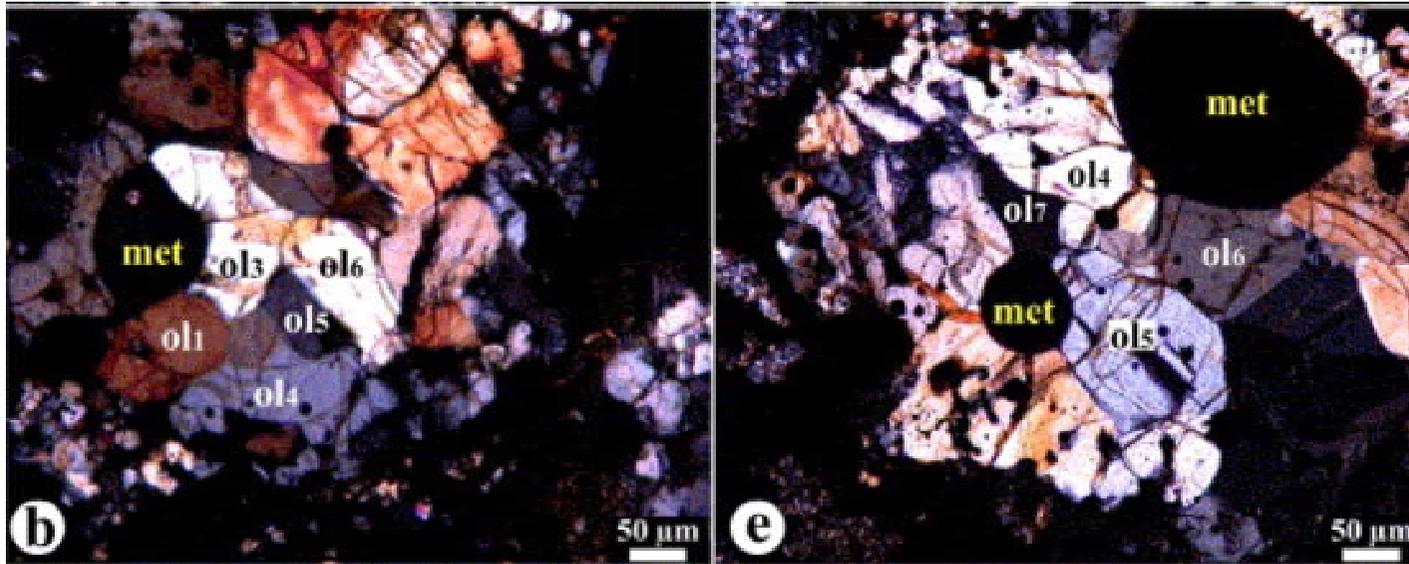
**Est-ce que les chondres sont formés à
partir des planétisimaux?**

L'importance des textures d'olivine...



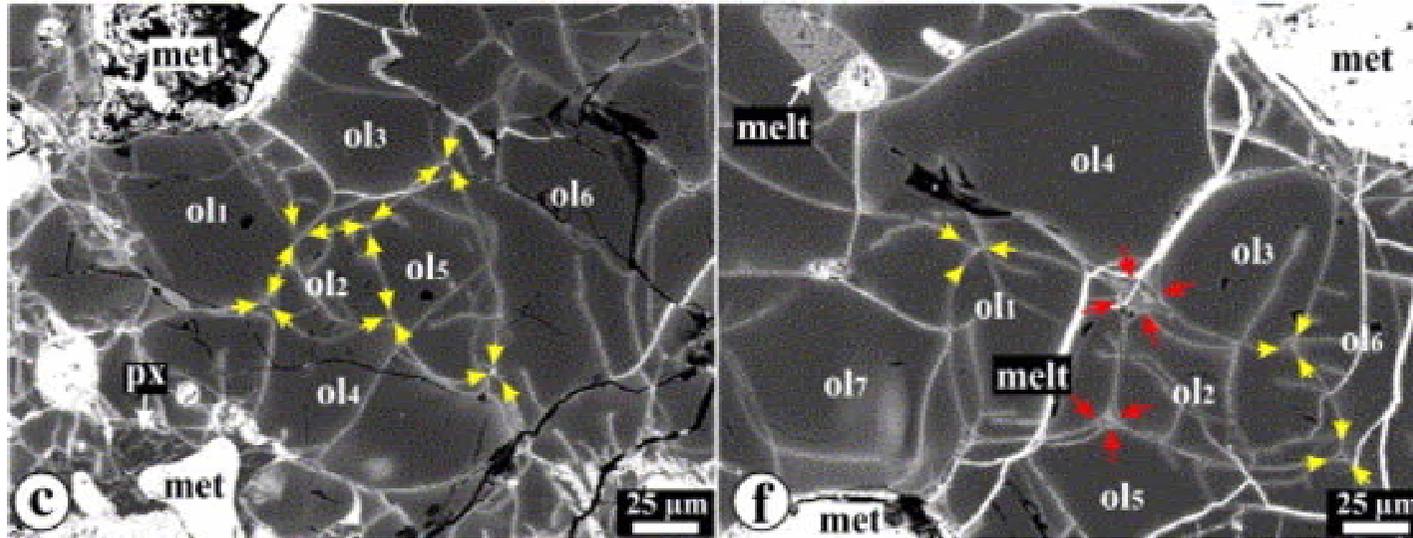
Libourel et al., 2007

L'importance des textures d'olivine...



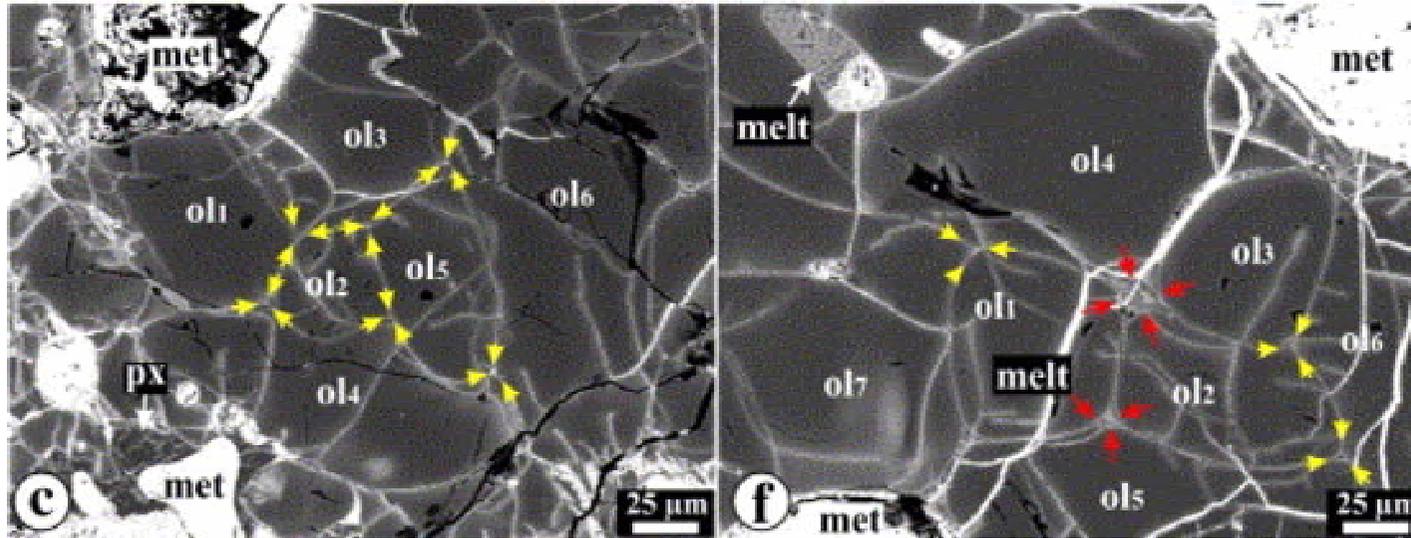
Libourel et al., 2007

L'importance des textures d'olivine...



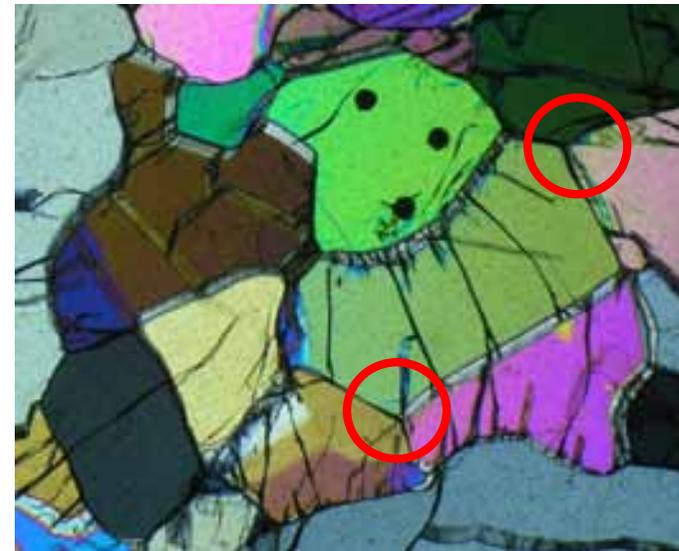
Libourel et al., 2007

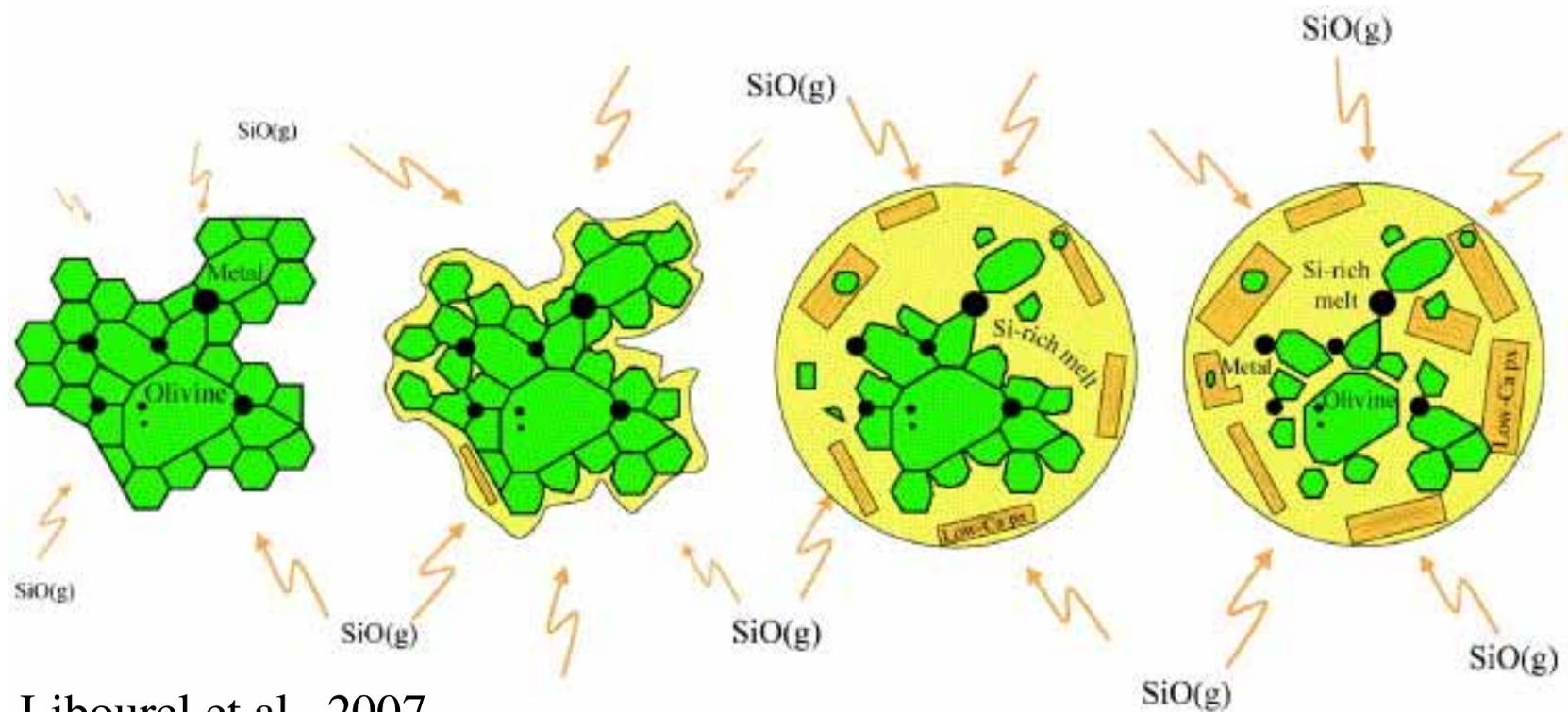
L'importance des textures d'olivine...



Libourel et al., 2007

Même textures que dans
le manteau terrestre!





Libourel et al., 2007

Peut-être ces olivines sont le « manteau » de corps parents plus anciens....

**Le 2^o problème
chondrites-achondrites:**

Le cas des météorites de fer

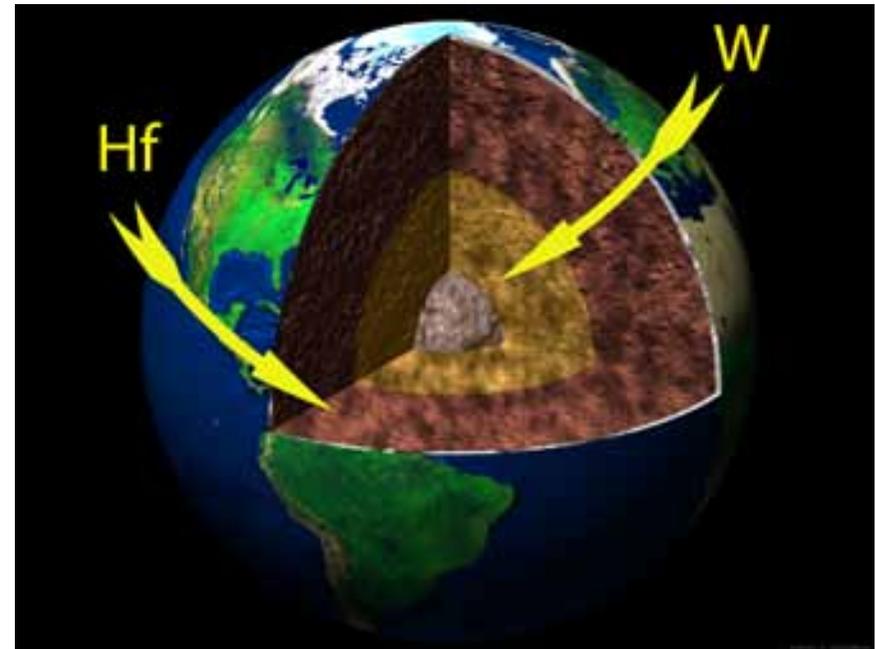
Datation de la ségrégation métal-silicate grâce au système W-Hf

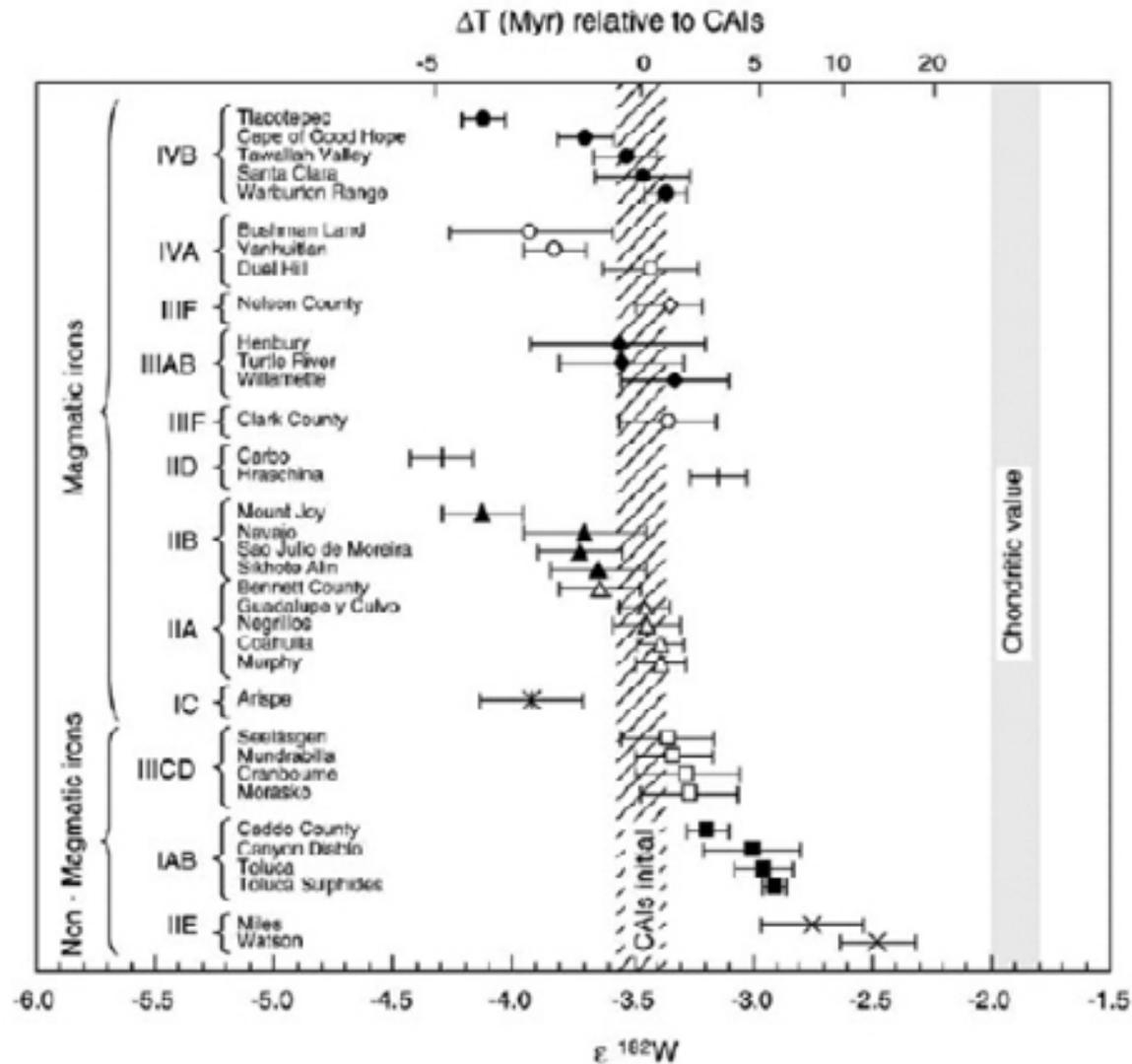
$^{182}\text{Hf} \rightarrow ^{182}\text{W}$ (demi-vie de 8 900 000 ans)

Le Hf va dans les silicates

Le W va dans le métal

Le ^{182}W devient un
marqueur de la ségrégation





Les météorites de fer sont aussi vieux que les CAI's!

Comment comprendre l'âge très ancien des objets différenciés?

Il faut identifier la source de chaleur

La radionucléides

U, Th, K ne sont pas assez puissants...

**Nucléides de « courte » vie issus de la
nucléosynthèse stellaire;**

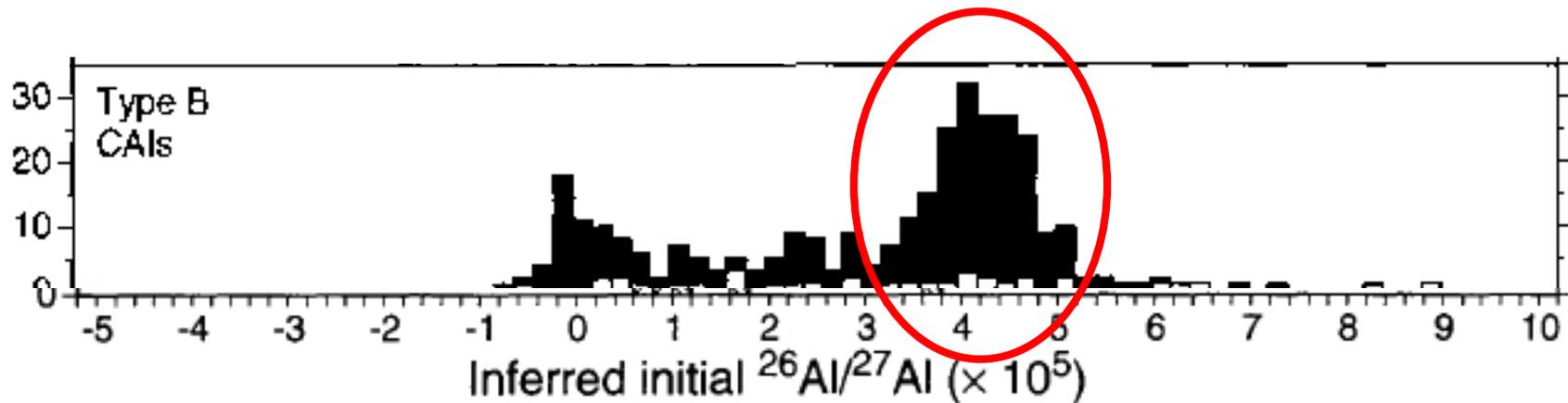
Al^{26} ; demie-vie = 720.000 ans

Il faut chercher des traces « fossiles »

L'abondance des nucléides 'fils' issus des radioactivités éteintes donne un âge relatif des événements



**L'étude des inclusions réfractaires
montre la présence d' Al^{26} (en quantité
plus ou moins constante...)**



Peut-on fondre un corps planétaire?

Une modélisation thermique

L'équation de diffusion de la chaleur

$$T = T_0 + \frac{\kappa A_0}{K\lambda} e^{-\lambda t} \left(\frac{R \sin r (\lambda/\kappa)^{1/2}}{(r \sin R (\lambda/\kappa)^{1/2})} - 1 \right) + \frac{2R^3 A_0}{r\pi^3 K} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n(n^2 - \lambda R^2 / \kappa \pi^2)} \sin \frac{n\pi r}{R} e^{-\kappa n^2 \pi^2 t / R^2}$$

Si on connaît:

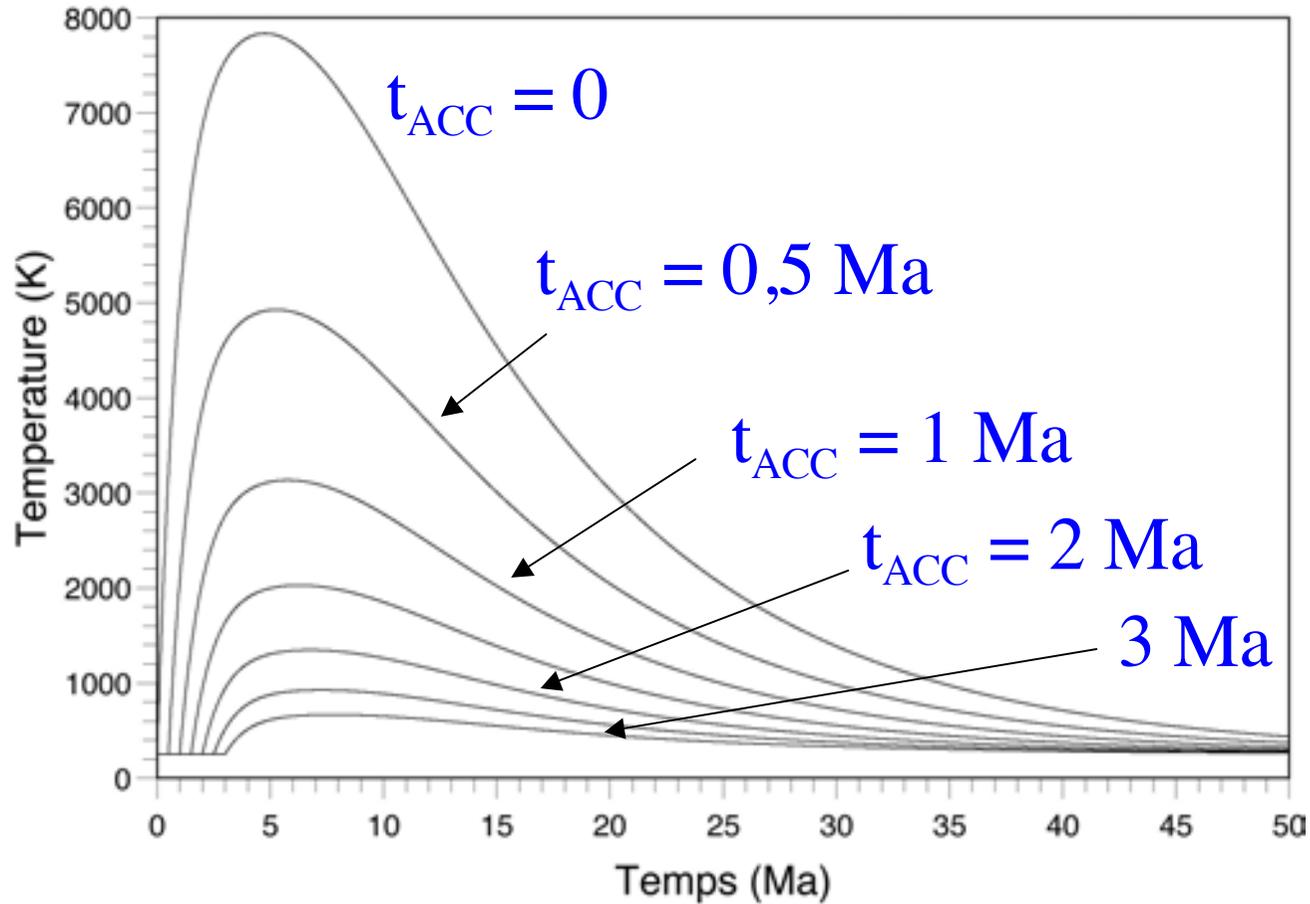
Le rayon du corps

La concentration en radioéléments

Les propriétés thermiques

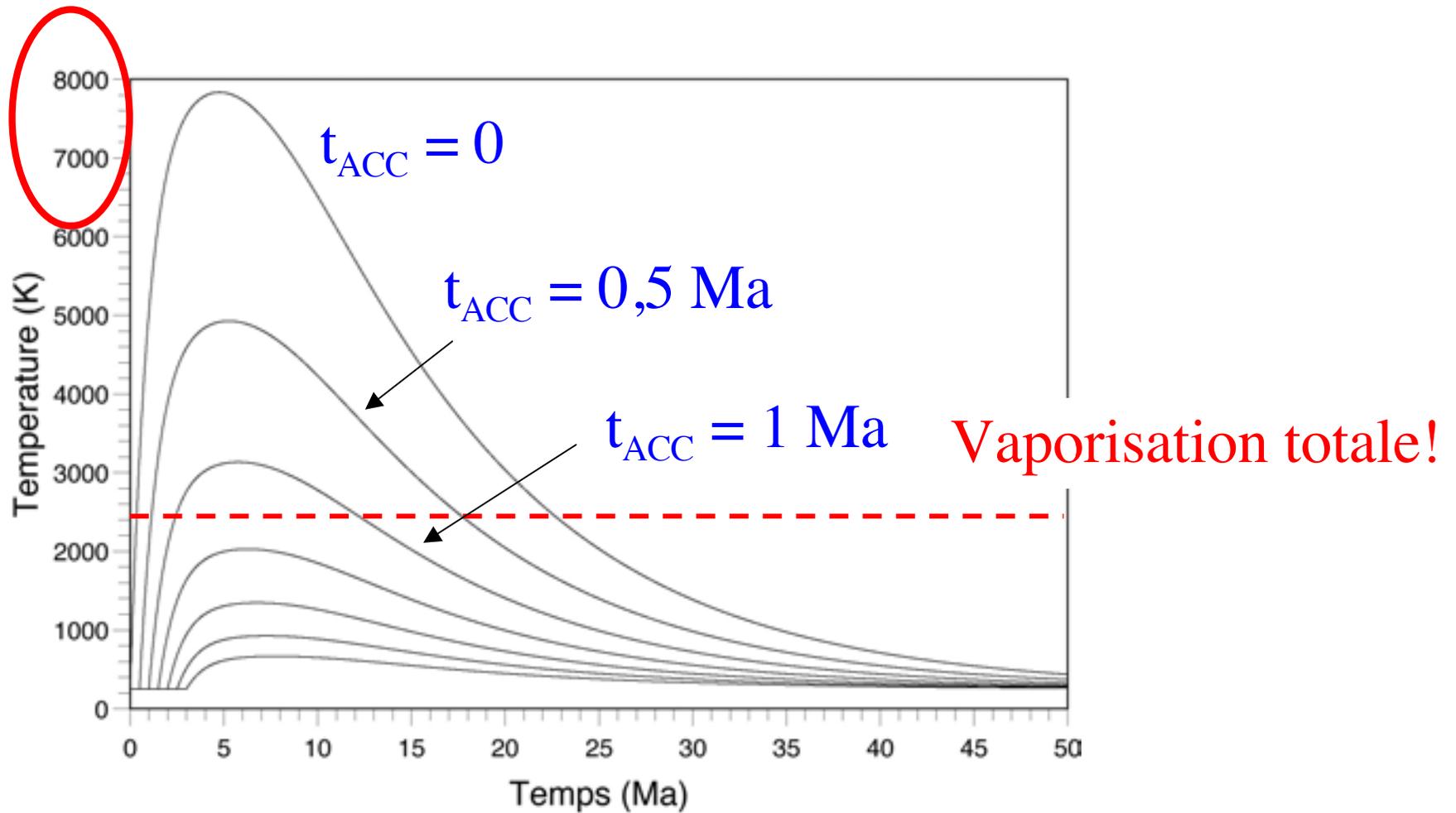
$$T = f(r, t)$$

Par exemple, au centre d'un corps de 50 km de rayon

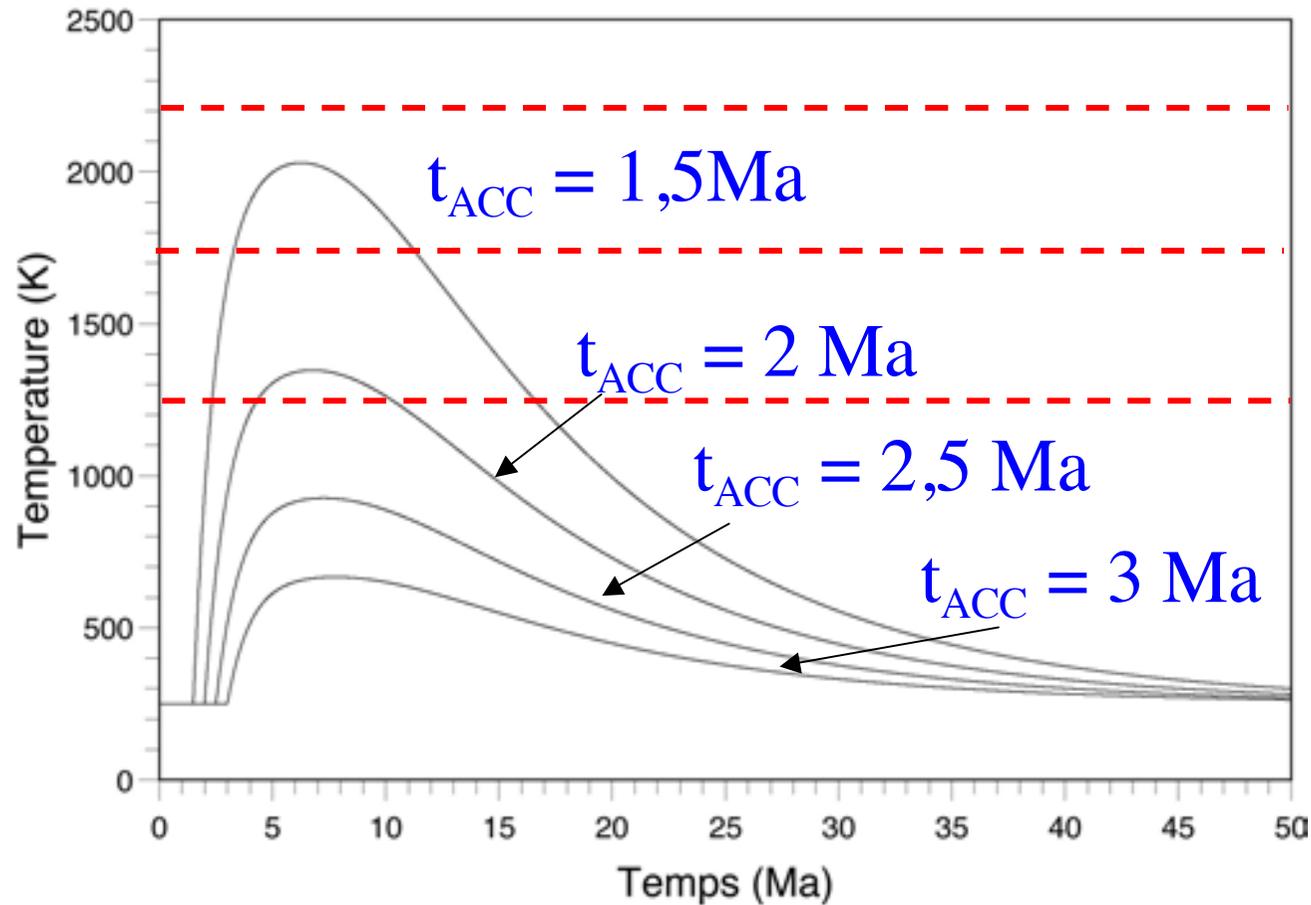


Si l'accrétion est retardée, moins d' Al^{26} , et ça chauffe moins

Par exemple, au centre d'un corps de 50 km de rayon



Si l'accrétion est retardée, moins d' Al^{26} , et ça chauffe moins



Fusion totale

50% fusion

Début de
la fusion

Avec l' Al^{26} une grande diversité d'histoires thermiques sont possibles

L'origine de la chaleur de fusion pour les petits corps

Les radioactivités éteintes à courte période:

l'aluminium 26, qui disparaît en 2-3 millions d'années.

Si l'accrétion est trop lente (grains, petits objets), cette énergie est irradiée dans l'espace et ne sert pas à chauffer les planètes.

Quelle taille pour ces objets?

Il faut regarder les détails du refroidissement

L'exemple des météorites de fer

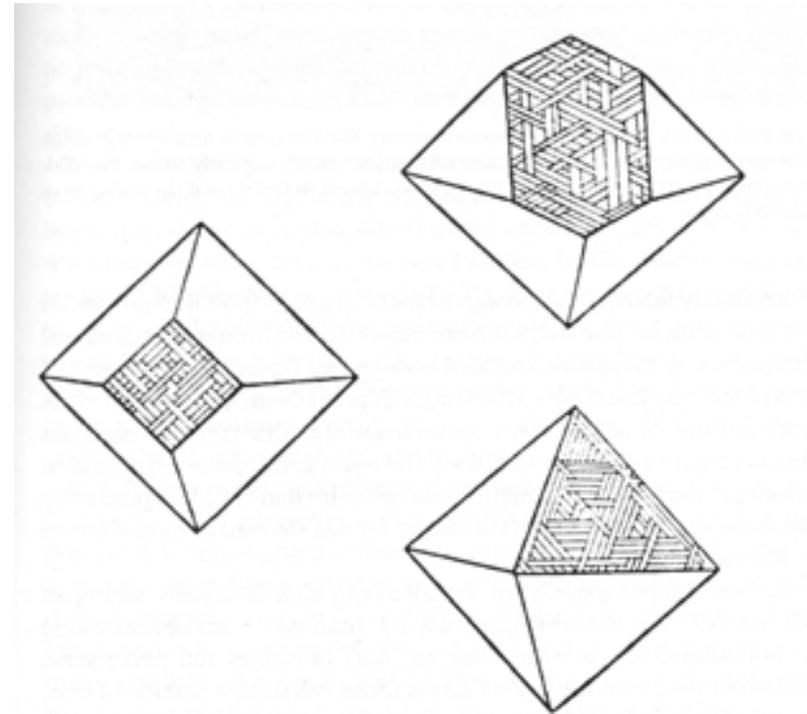
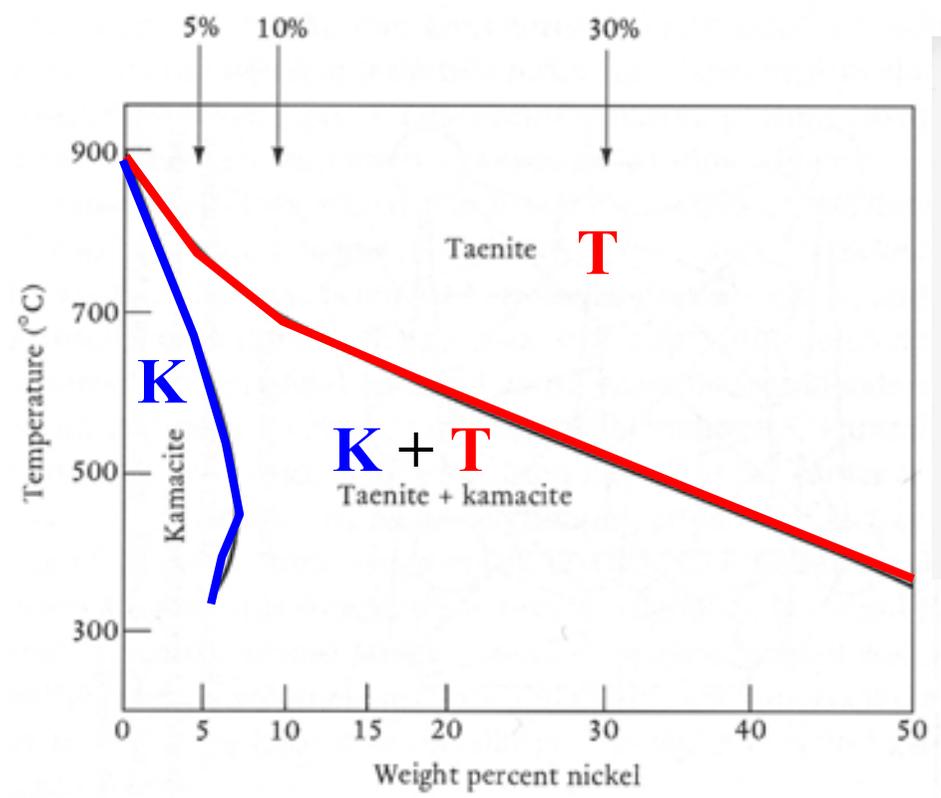


Figure 6.7: The Widmanstätten pattern is a regular geometric intergrowth of kamacite and taenite that forms during slow cooling of iron meteorites with appropriate composition. These sketches of the Widmanstätten pattern as it would appear in various cuts through the original taenite crystal were made by mineralogist Gustav Tschermak in 1894.

Intercroissances de Widmanstätten

Phase Diagram for Metals



Crystal Structures of Metals

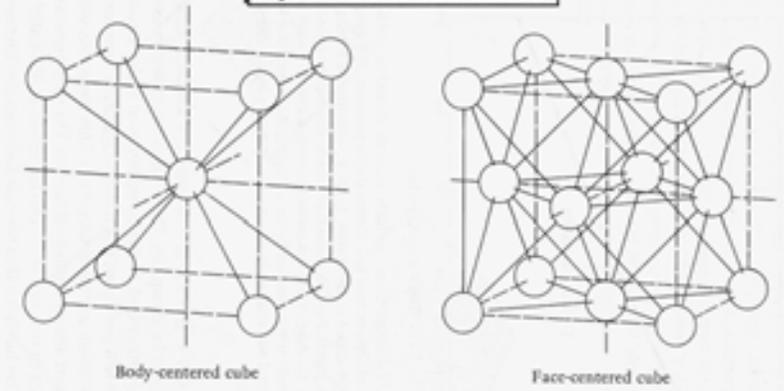
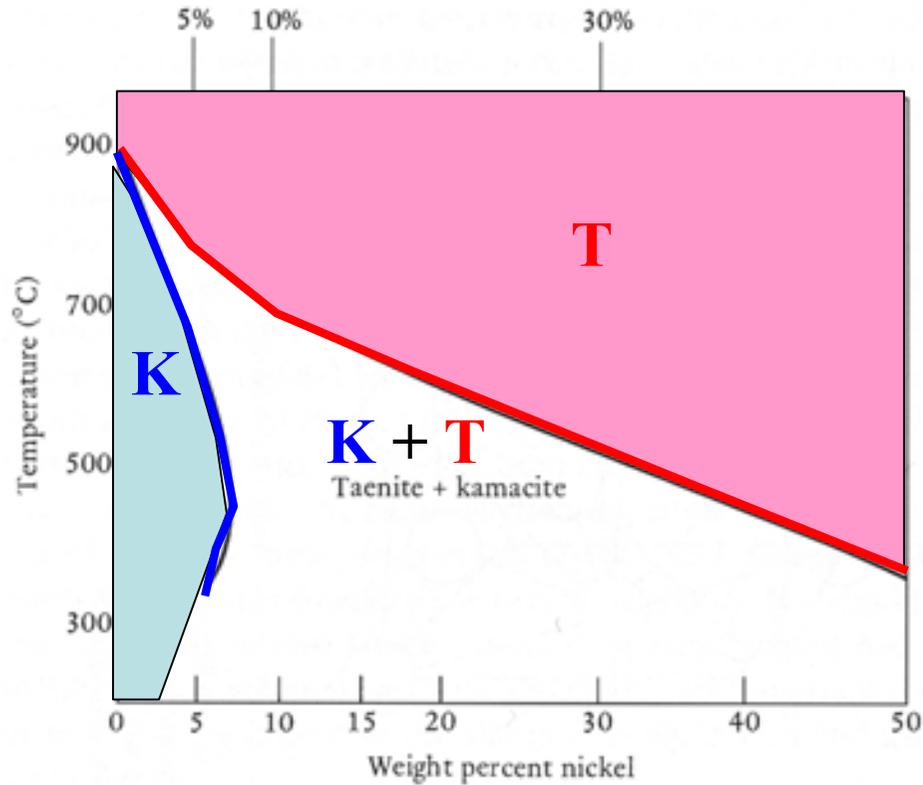


Figure 6.5: Iron-nickel alloys, from which iron meteorites are formed, exhibit two basic crystal structures. Kamacite forms a body-centered lattice, with each atom located at the center of a cube so that it is surrounded by eight other atoms. Taenite occurs as face-centered cubes, with an atom centered on each face. In this structure, each atom is surrounded by twelve neighboring atoms.

Kamacite
(α - bcc)

Taenite
(γ - fcc)

Phase Diagram for Metals



Crystal Structures of Metals

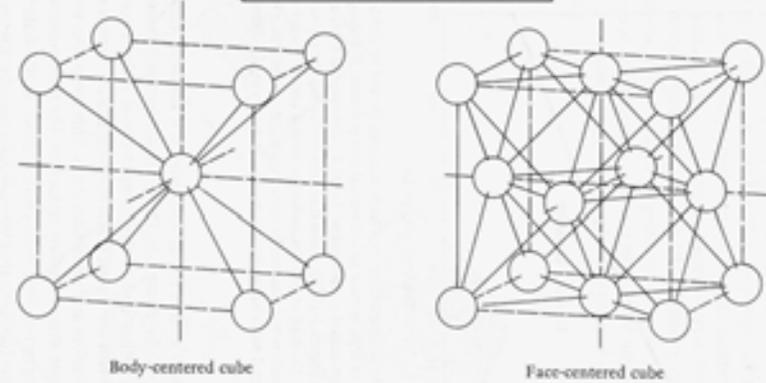
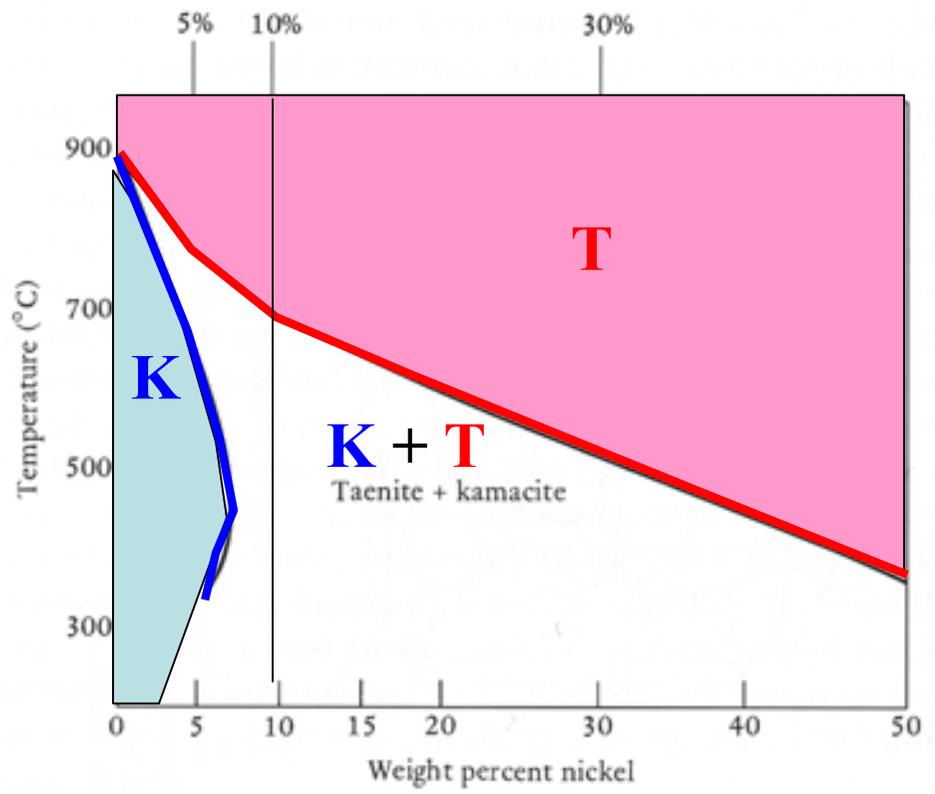


Figure 6.5: Iron-nickel alloys, from which iron meteorites are formed, exhibit two basic crystal structures. Kamacite forms a body-centered lattice, with each atom located at the center of a cube so that it is surrounded by eight other atoms. Taenite occurs as face-centered cubes, with an atom centered on each face. In this structure, each atom is surrounded by twelve neighboring atoms.

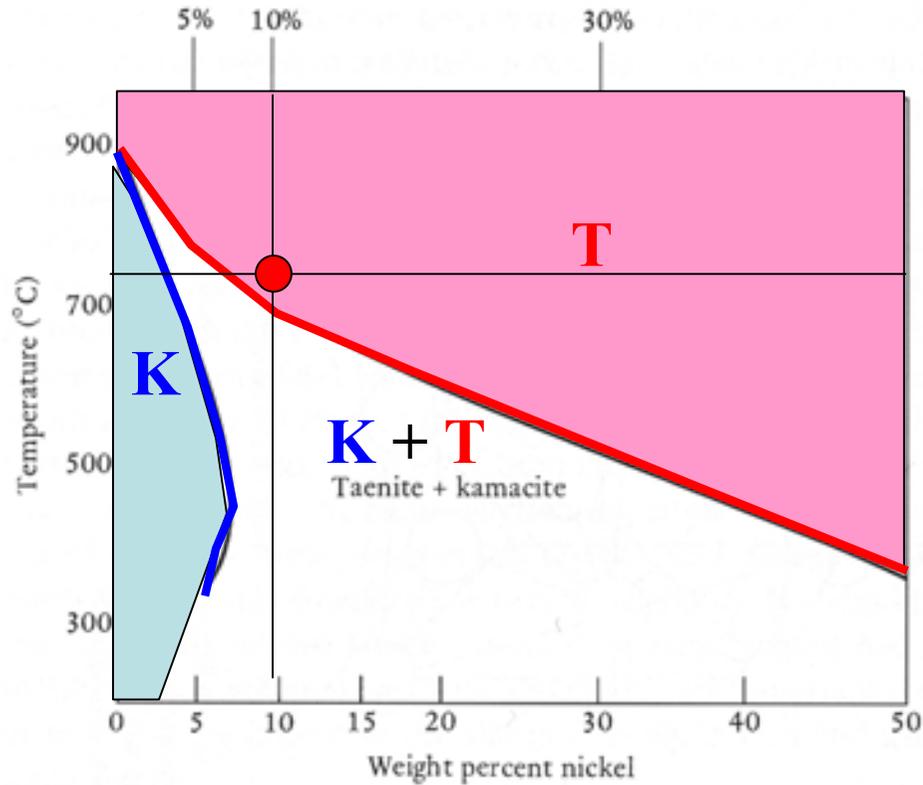
Kamacite
(α - bcc)

Taenite
(γ - fcc)

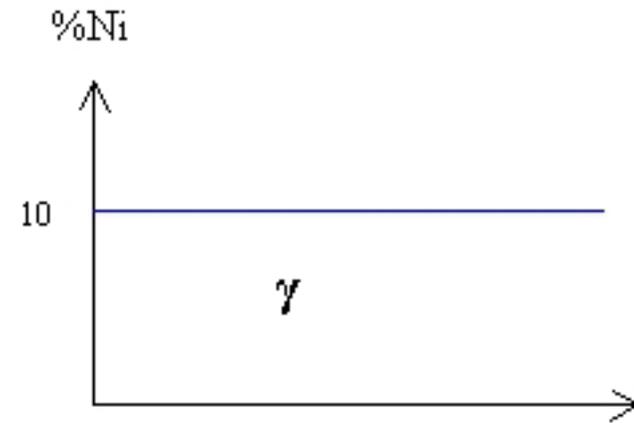
Phase Diagram for Metals



Phase Diagram for Metals

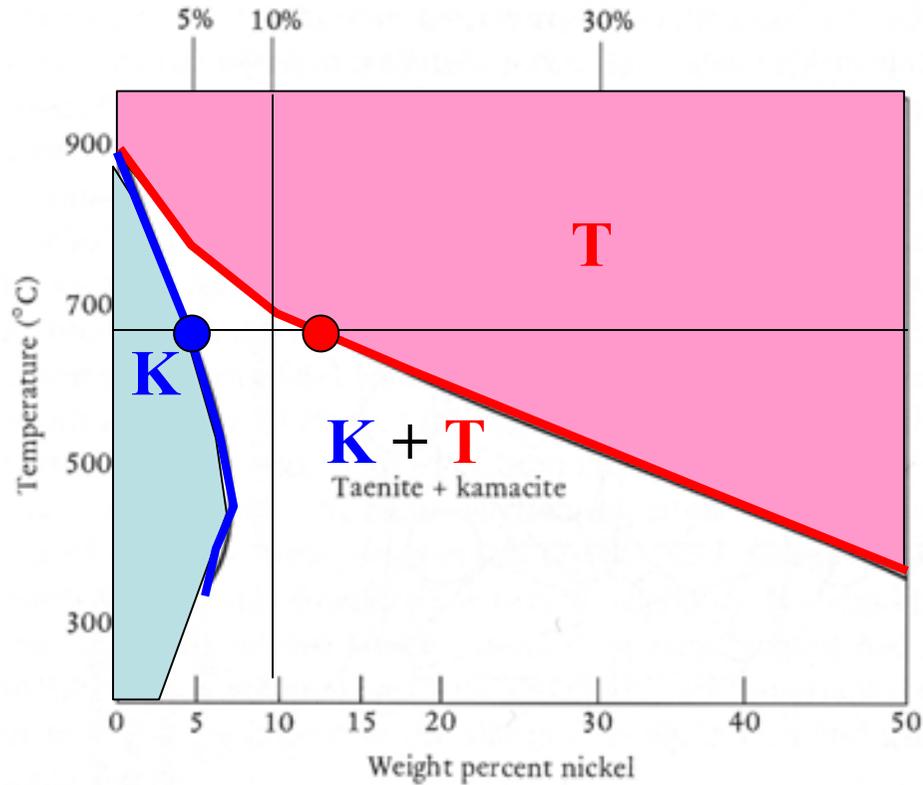


>700°C

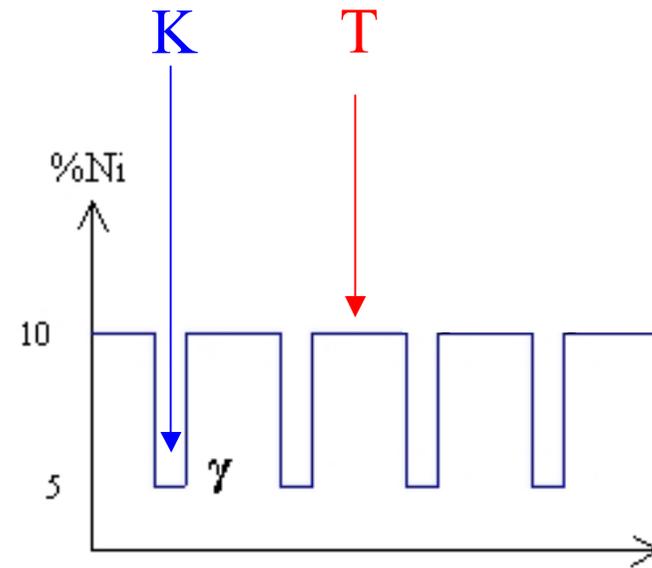


Phase unique
homogène

Phase Diagram for Metals

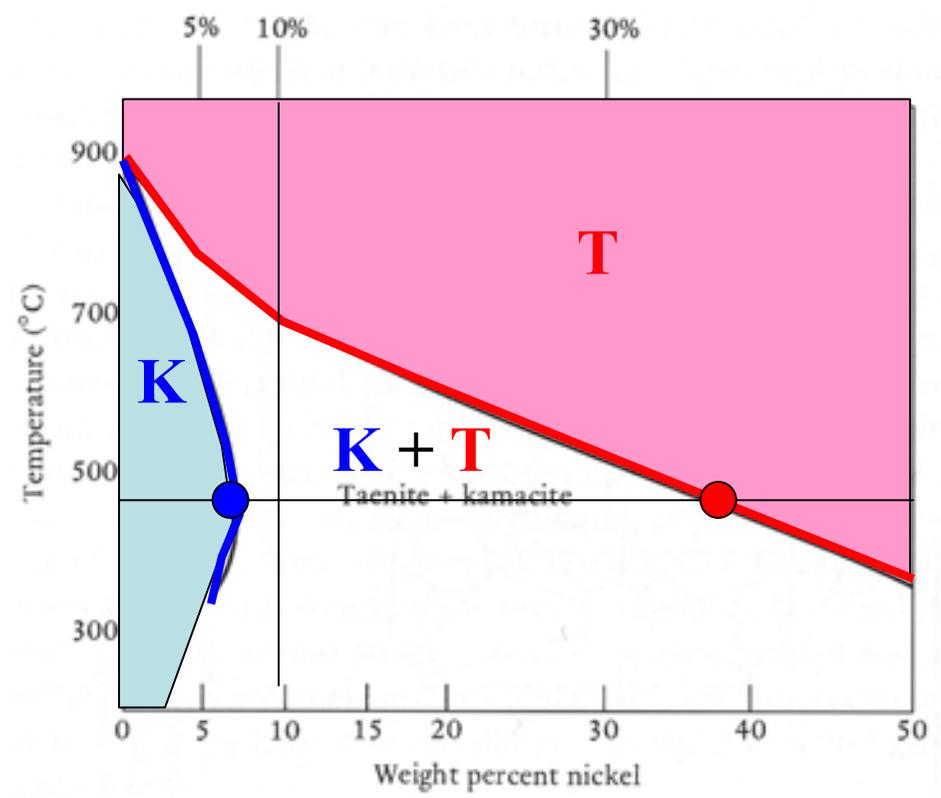


~650°C

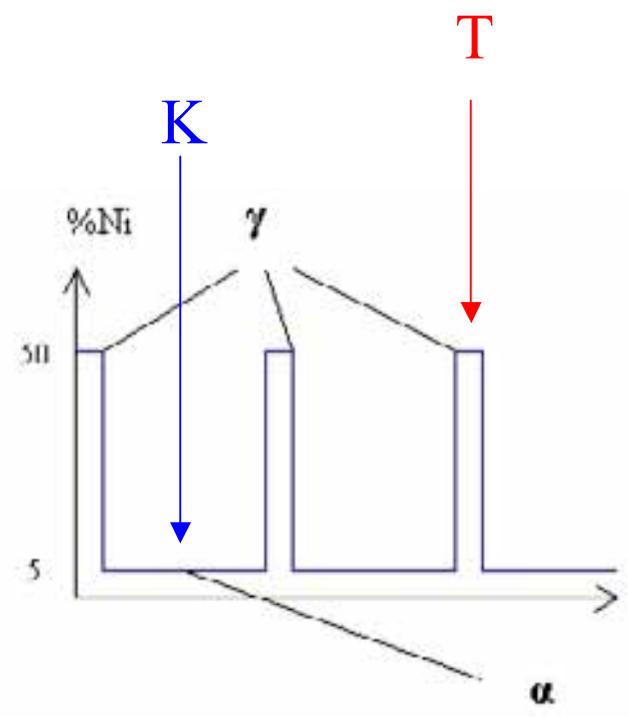


Précipités de **K** dans
une matrice de **T**

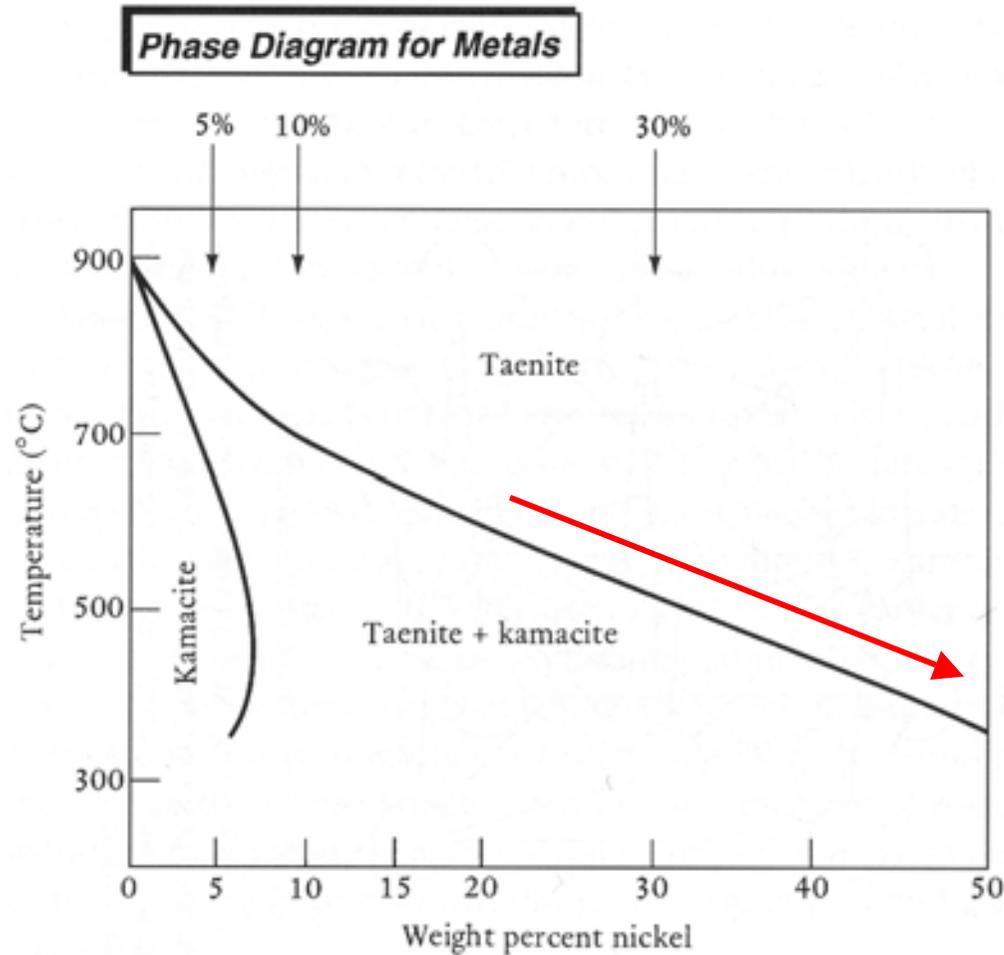
Phase Diagram for Metals



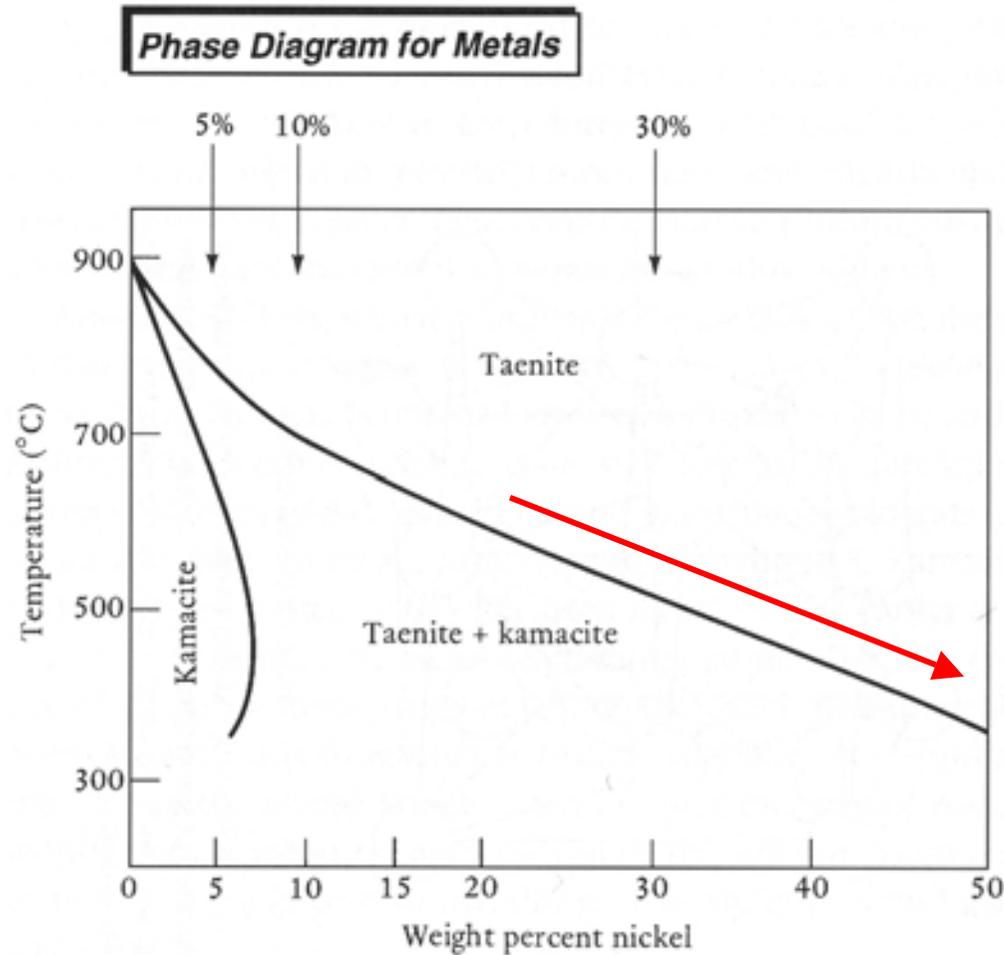
~400°C



Lamelles de T dans une matrice de K



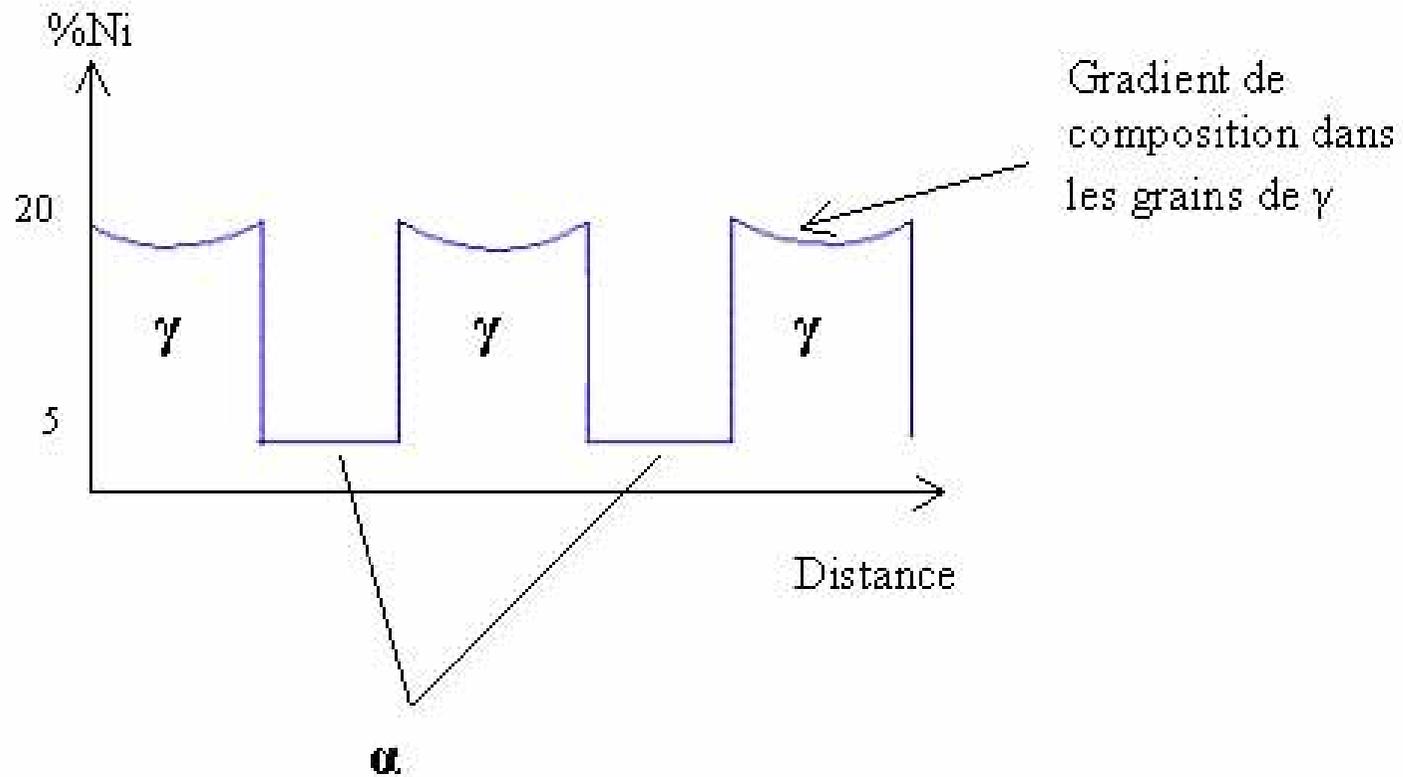
Au cours du refroidissement, enrichissement de Taenite en Ni et diminution de la taille de ces lamelles

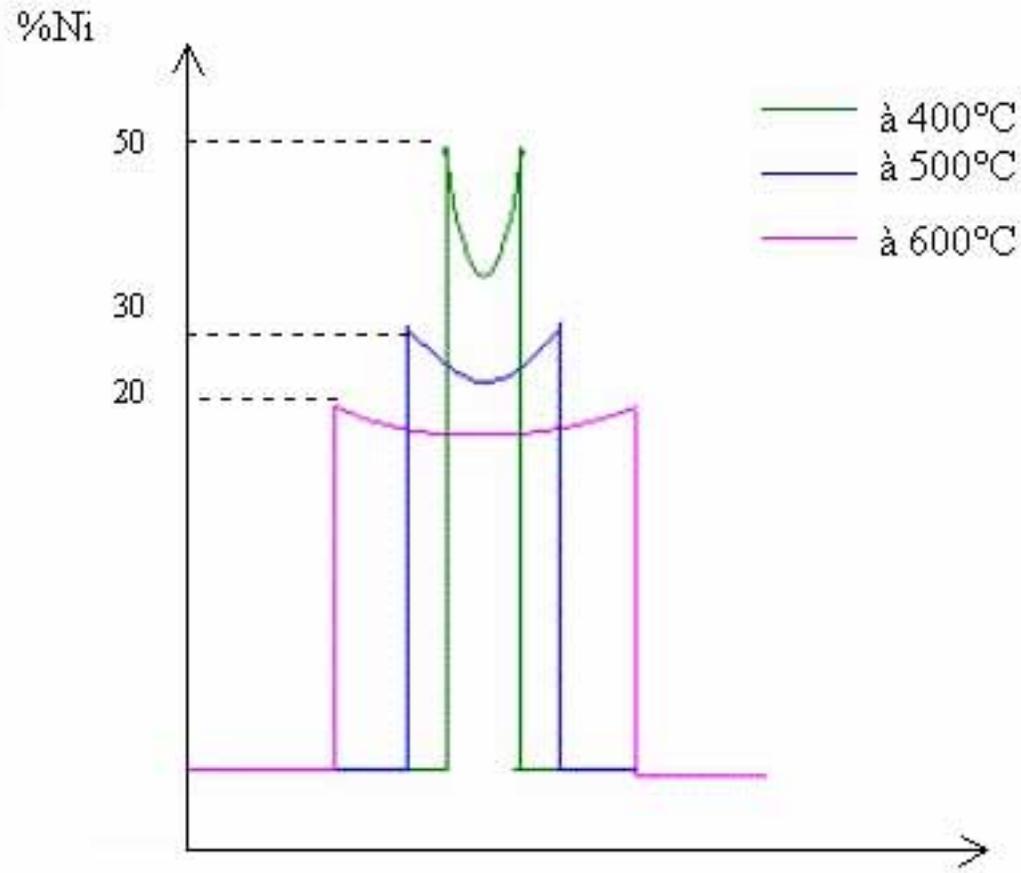


Mais, ces changements nécessitent la diffusion....

Et la diffusion devient de plus en plus lente à basse T°!

Le cœur des lamelles a du mal à suivre....

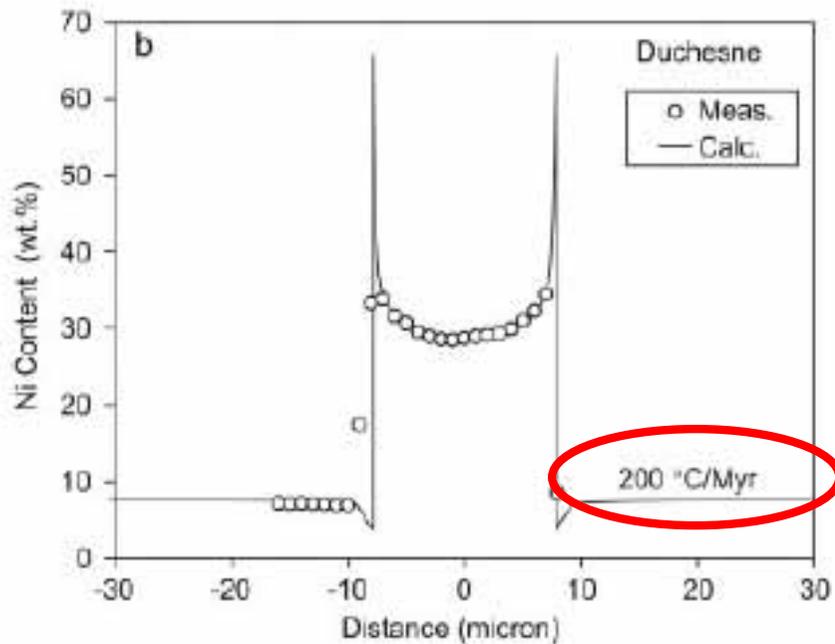
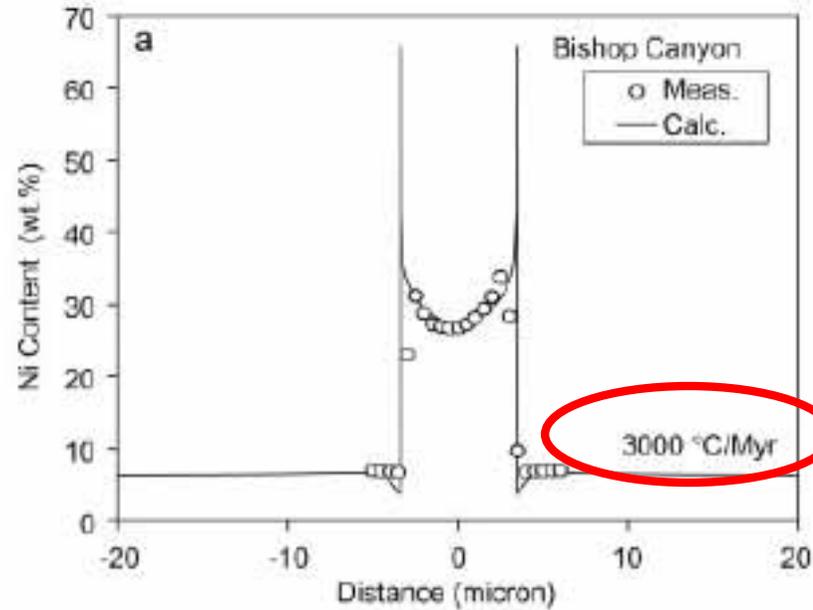




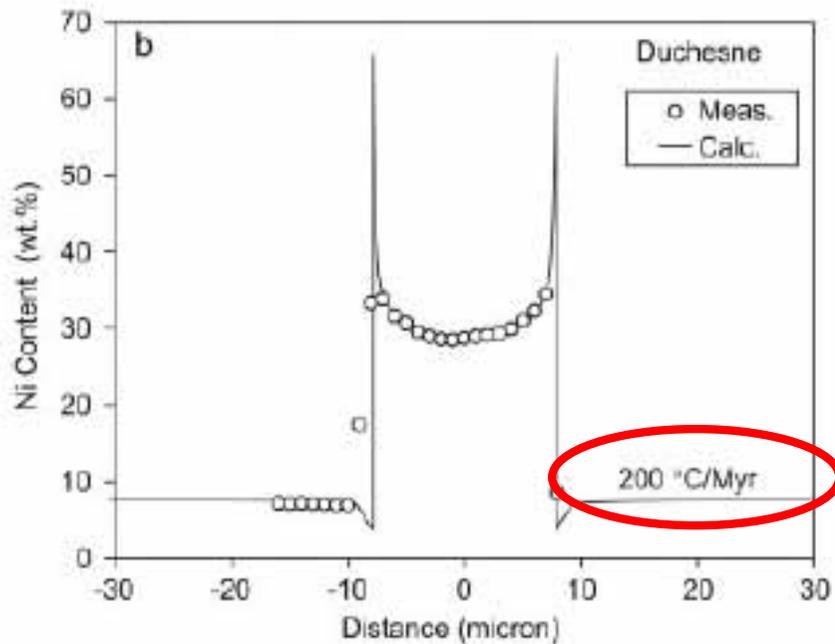
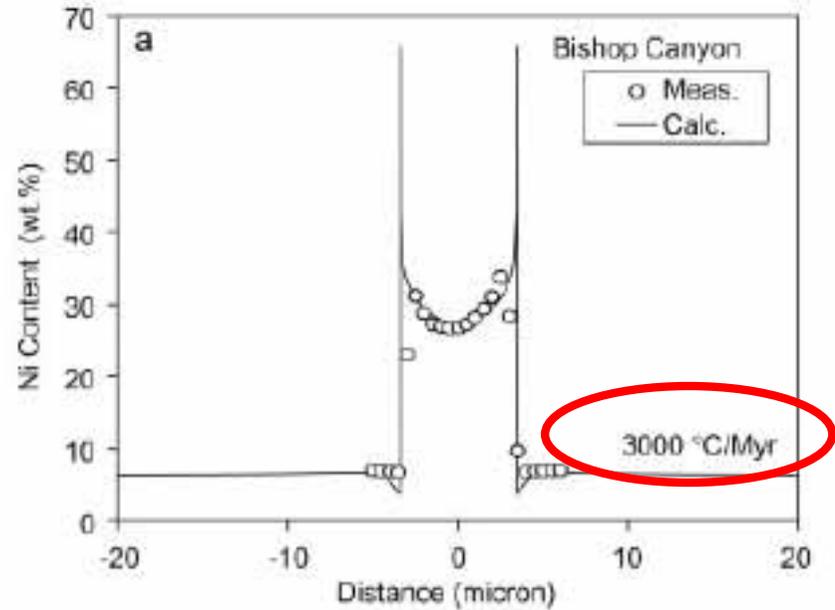
...et qu'on peut modéliser si on connaît la dépendance de la diffusivité sur la T° et la composition

Un effet qui s'amplifie au cours du refroidissement

**Des vraies données
permettent de préciser
la vitesse de
refroidissement**



**Des vraies données
permettent de préciser
la vitesse de
refroidissement**



**Avec la vitesse de
refroidissement on peut
estimer la taille du
corps**

Table 4. Metallographic cooling rates of selected iron and stony iron meteorite groups.

meteorite group	cooling rate (°C/Ma)	ref.	parent body radius (km)
IAB	25	(a)	33
	310	(b)	10
IC	highly variable	(c)	
IIAB	0.8-3	(e)	165-90
	6-12	(d)	65-47
IID	5	(a)	70
IIIAB	3-75	(d)	90-20
	7.5-15	(a)	58-42
III CD	10	(a)	51
	200	(b)	13
IVA	11-500	(d)	49-8
	40-325	(a)	27-10
IVB	30-260	(d)	30-11
	4300	(b)	3
pallasites	2.5-4	(a)	97-78
mesosiderites	0.5	(a)	206

References: (a) Yang et al (1997a), based on Goldstein (1969) as modified by Saikumar and Goldstein (1988), (b) Rasmussen (1989), (c) Scott (1977a), (d) Haack et al. (1990), (e) Randich and Goldstein (1978).

See text for method of calculation for parent body radius.

**Des vraies données
permettent de préciser
la vitesse de
refroidissement**

**Avec la vitesse de
refroidissement on peut
estimer la taille du
corps**

$$r = 149 \times CR^{-0.465}$$

Table 4. Metallographic cooling rates of selected iron and stony iron meteorite groups.

meteorite group	cooling rate (°C/Ma)	ref.	parent body radius (km)
IAB	25	(a)	33
	310	(b)	10
IC	highly variable	(c)	
IIAB	0.8-3	(e)	165-90
	6-12	(d)	65-47
IID	5	(a)	70
IIIAB	3-75	(d)	90-20
	7.5-15	(a)	58-42
IIICD	10	(a)	51
	200	(b)	13
IVA	11-500	(d)	49-8
	40-325	(a)	27-10
IVB	30-260	(d)	30-11
	4300	(b)	3
pallasites	2.5-4	(a)	97-78
mesosiderites	0.5	(a)	206

References: (a) Yang et al (1997a), based on Goldstein (1969) as modified by Saikumar and Goldstein (1988), (b) Rasmussen (1989), (c) Scott (1977a), (d) Haack et al. (1990), (e) Randich and Goldstein (1978).

See text for method of calculation for parent body radius.

Rayon minimum entre quelques dizaines et quelques centaines de km

Exemple II:

Les chondrites ordinaires de type H

H-chondrites

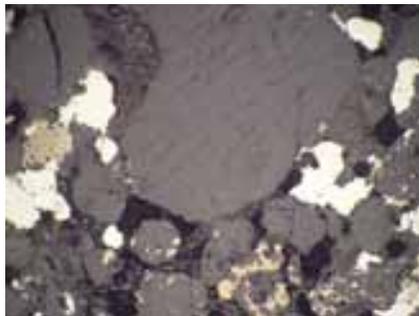
Riches en métal:

Des milliers d'échantillons d'un seul corps parent.

Différences importantes de texture

Classification pétrographique

Homogenization
of olivine



H4

Appearance
of plagioclase

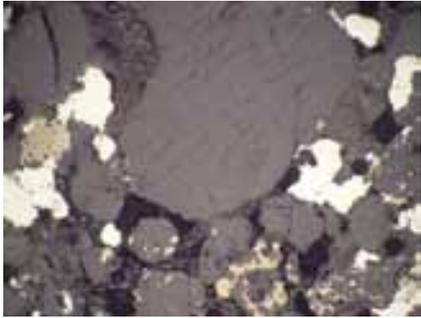


H5

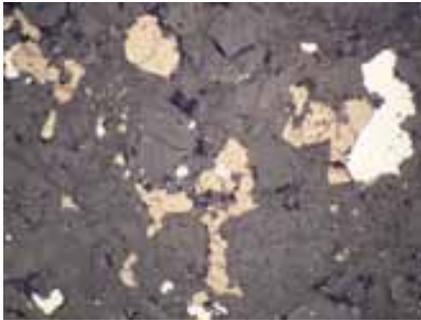
Disappearance
of chondrules



H6



H4
~973K



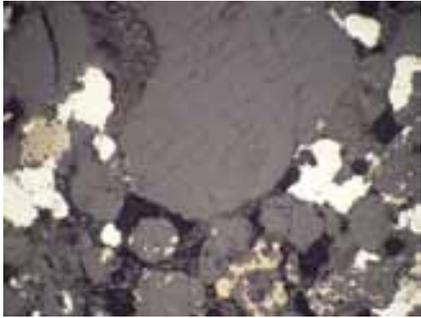
H5
~1023K



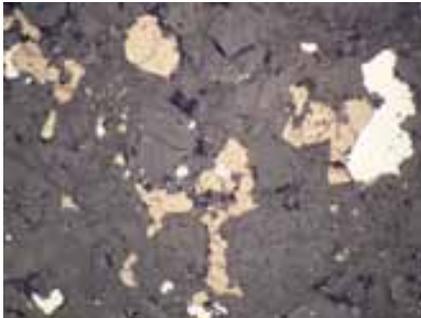
H6
~1223K

Temperature





H4
~973K

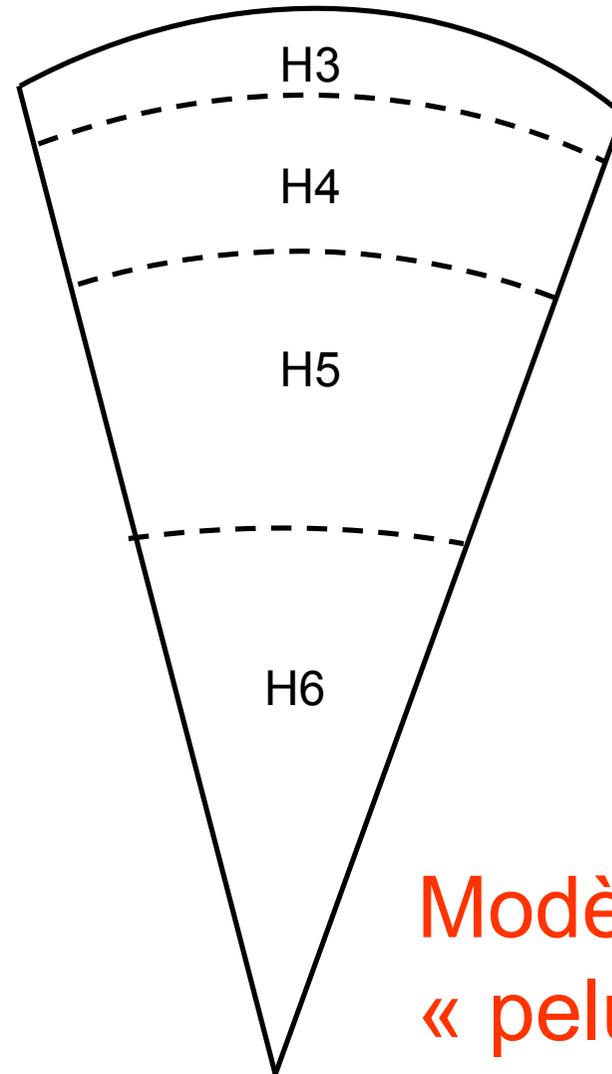


H5
~1023K

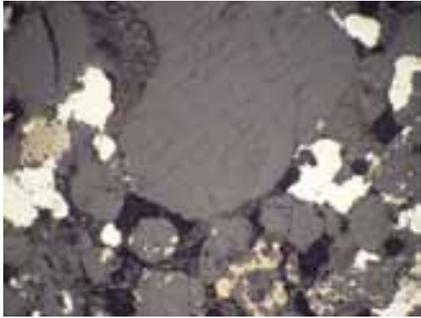


H6
~1223K

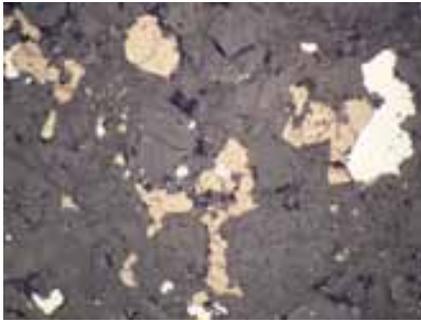
Température



Modèle en
« pelure
d'oignon »



H4
~973K

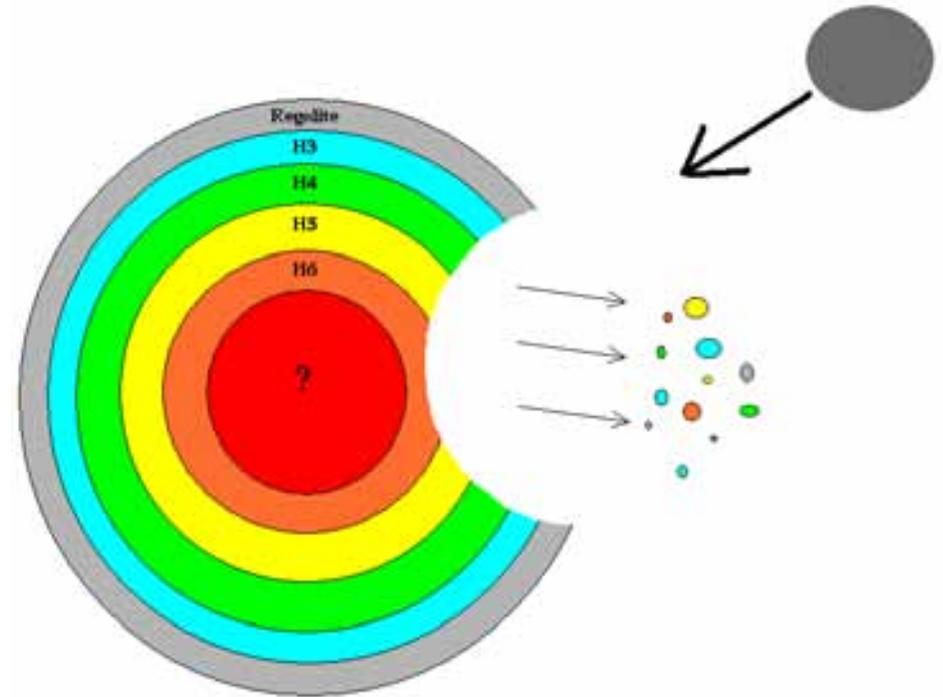


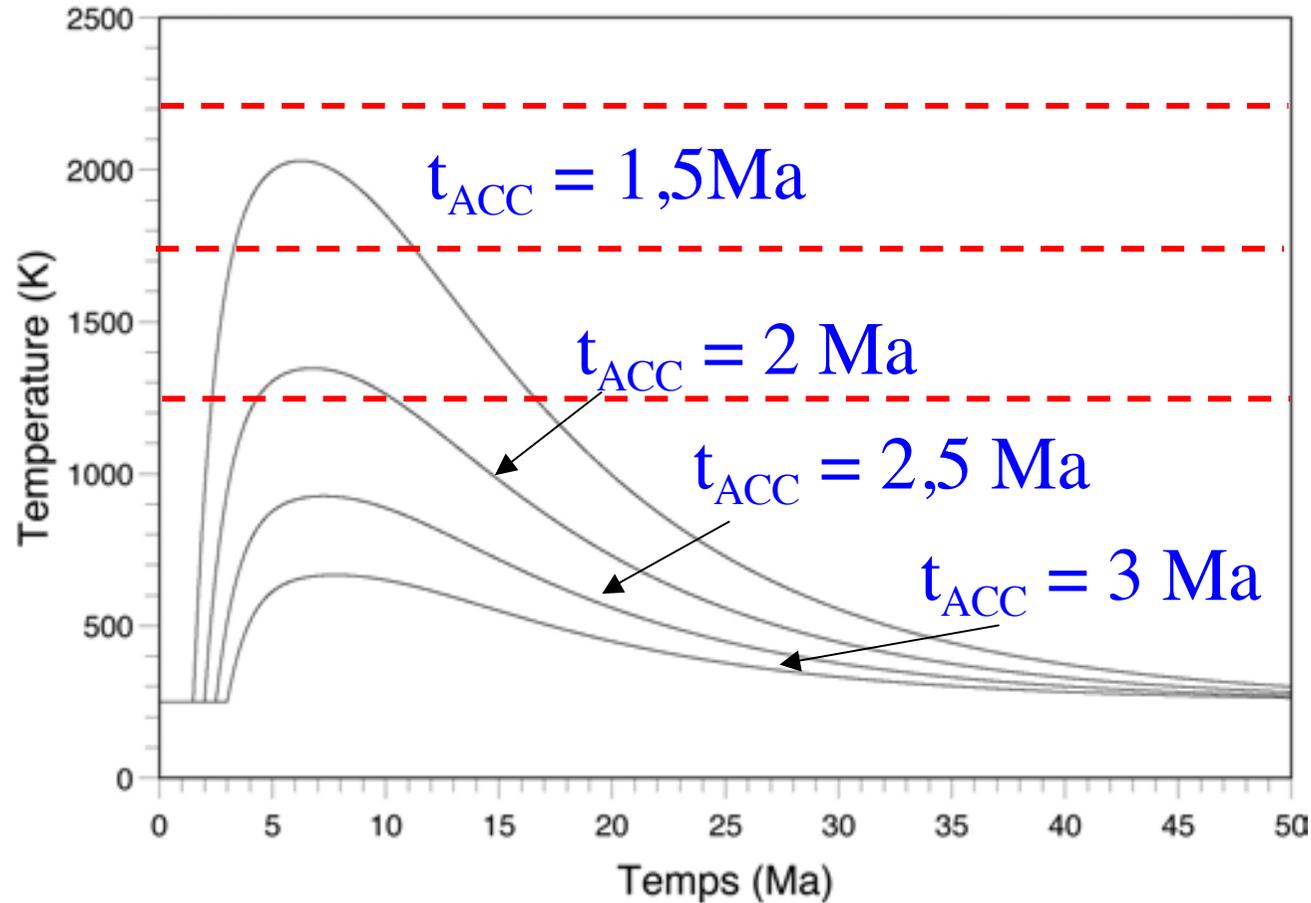
H5
~1023K



H6
~1223K

Temperature



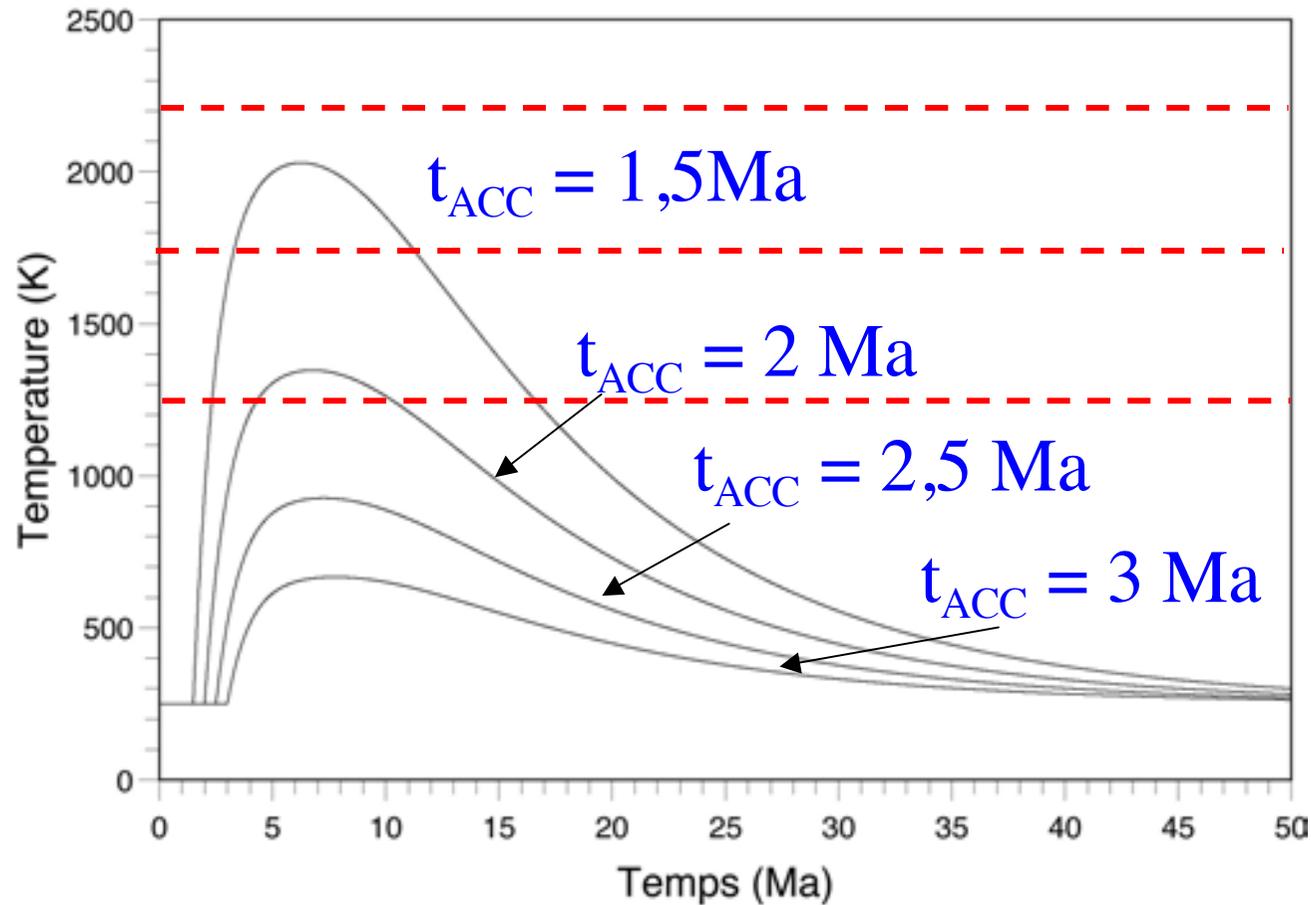


Fusion totale

50% fusion

Début de
la fusion

Avec l' Al^{26} ce genre de réchauffement est possible!



Fusion totale

50% fusion

Début de
la fusion

Pour être quantitative, il faut préciser les détails de l'histoire thermique....

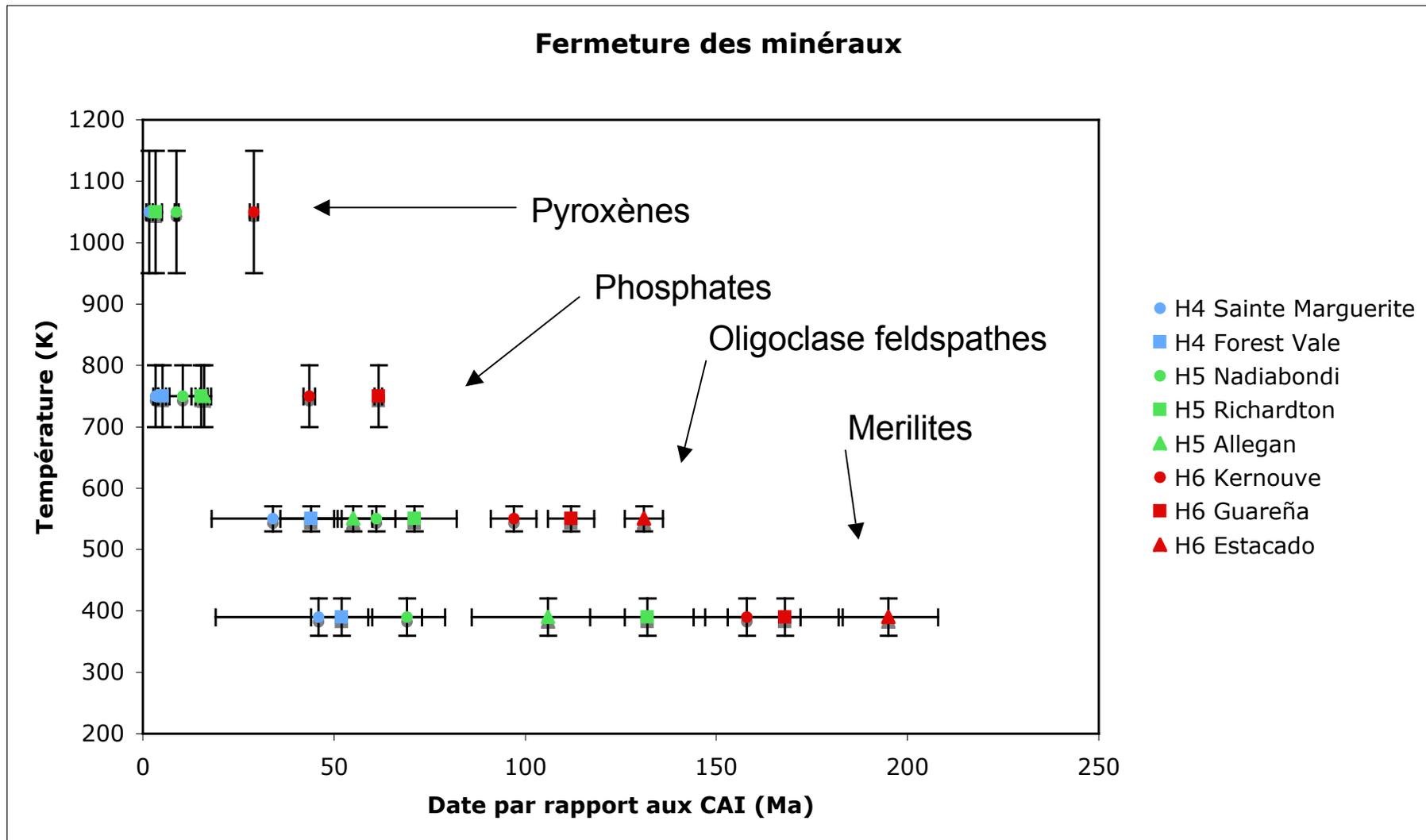
Datations et température de clôture

La datation utilise des chronomètres isotopiques.
(U-Pb, K-Ar....)

Chaque couple isotopique dans chaque minérale est figé à une température différente (en fonction de la diffusivité des éléments en question)

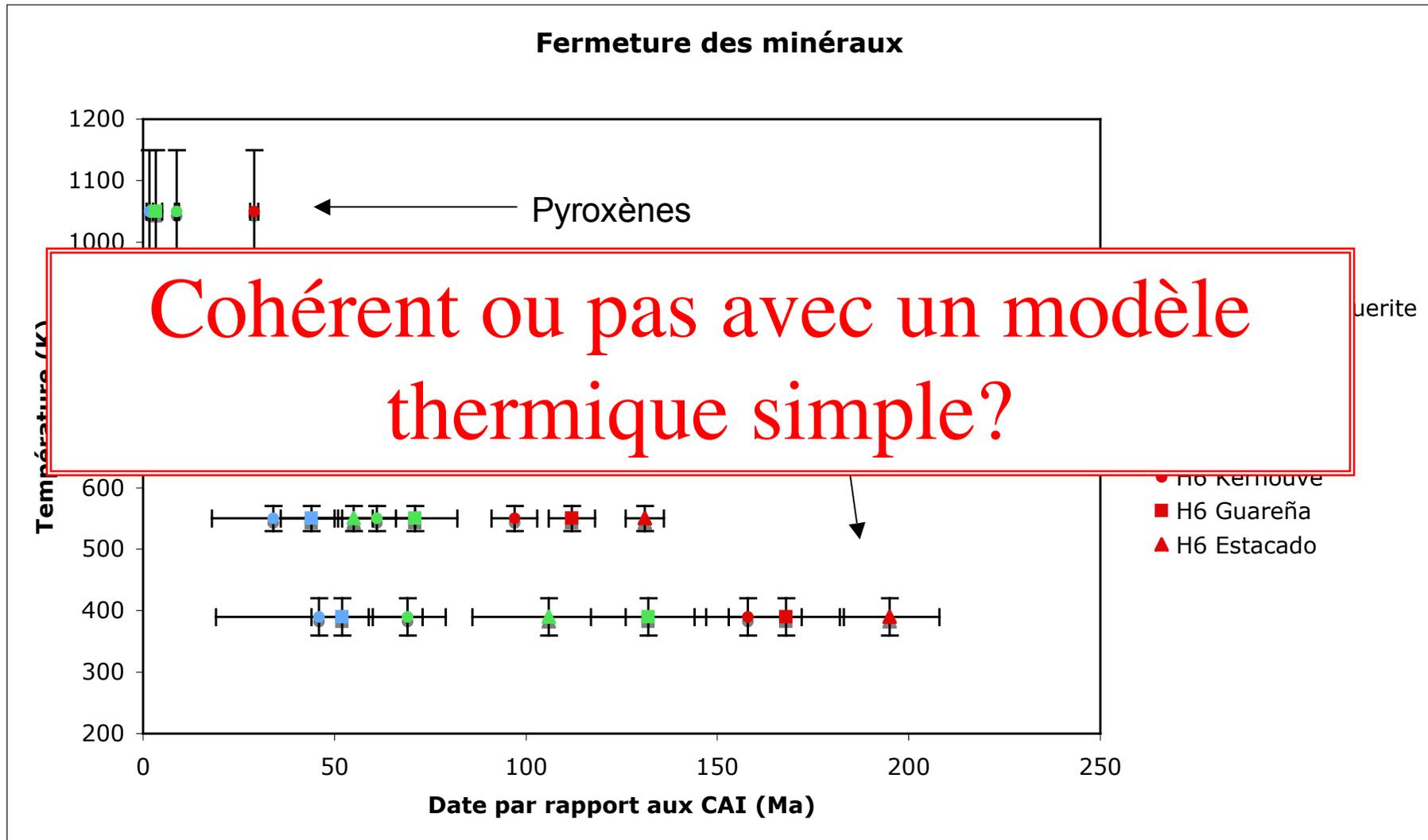
En associant différents chronomètres dans différents minéraux on peut suivre le refroidissement.
(C'est des années de travail!)

Construction d'une grille température-temps....



28 ages pour 8 échantillons

Construction d'une grille température-temps....



28 ages pour 8 échantillons

Solution analytique (Carslaw et Jäger, 1959)

$$T = T_0 + \frac{A_0}{\rho C_p} \left[\left(\frac{\sin(\pi r' \sqrt{\lambda \tau})}{r' \sin(\pi \sqrt{\lambda \tau})} - 1 \right) \frac{e^{-\lambda t}}{\lambda} + \frac{2\tau}{\pi r'} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \sin(n\pi r')}{n(n^2 - \lambda \tau)} e^{-n^2 t / \tau} \right]$$

$$\tau = \frac{\rho C_p R^2}{\pi^2 K} \quad r' = r/R$$

Contraintes

Age du système solaire: 4568,5 Ma

$Al^{26}/Al^{27} = 5 \times 10^{-5}$ à age zéro

Pas de fusion partielle des H6 ($T < 1273K$)

Accrétion instantanée

Contraintes

Age du système solaire: 4568,5 Ma

$Al^{26}/Al^{27} = 5 \times 10^{-5}$ à age zéro

Pas de fusion partielle des H6 ($T < 1273K$)

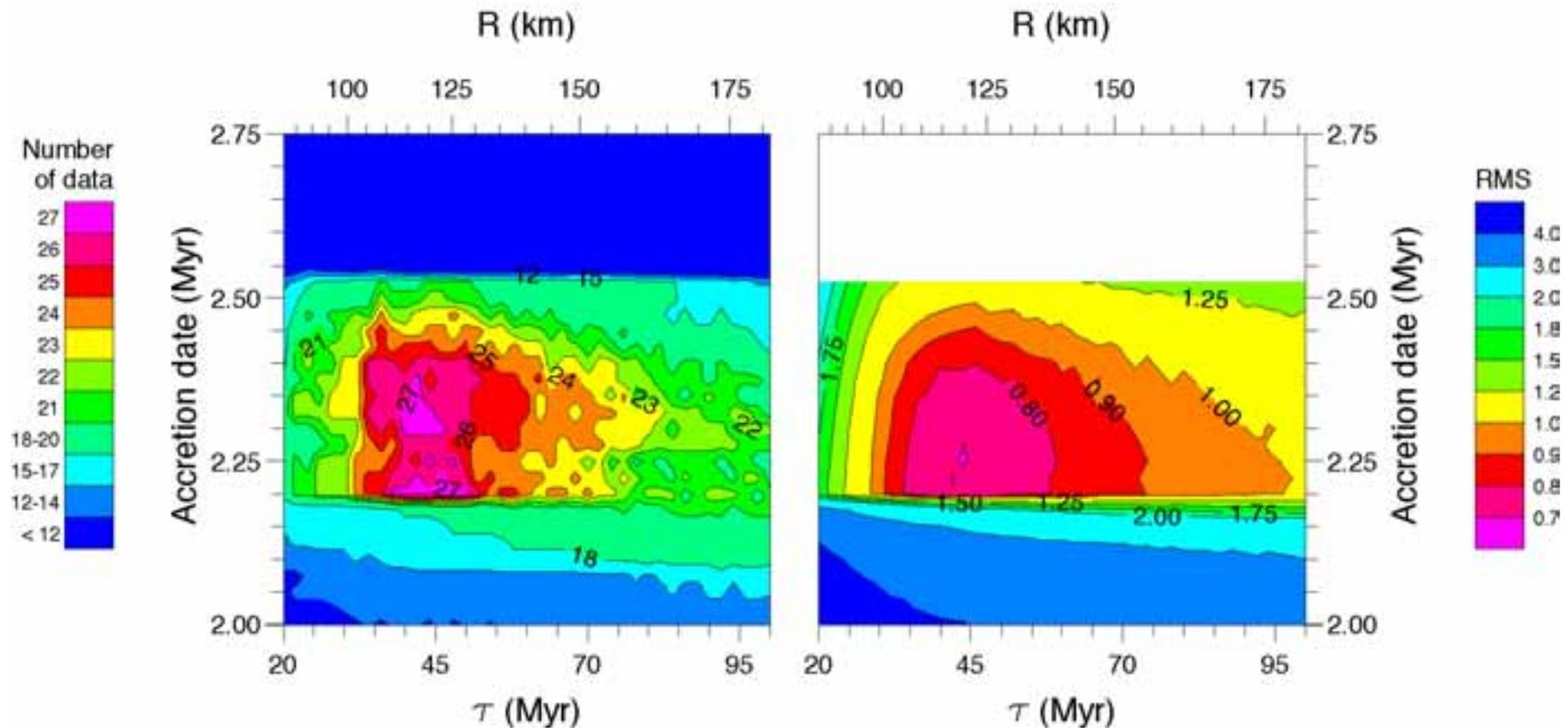
Accrétion instantanée

Paramètres libres

Taille du corps

Date d'accrétion

Age of the solar system: 4568.5 Myr
Temperature of the solar nebula: 292 K
Temperature dependent conductivity
 $k(T) = 4 \times (T_E/T)$ W/mK with $T_E = 292$ K

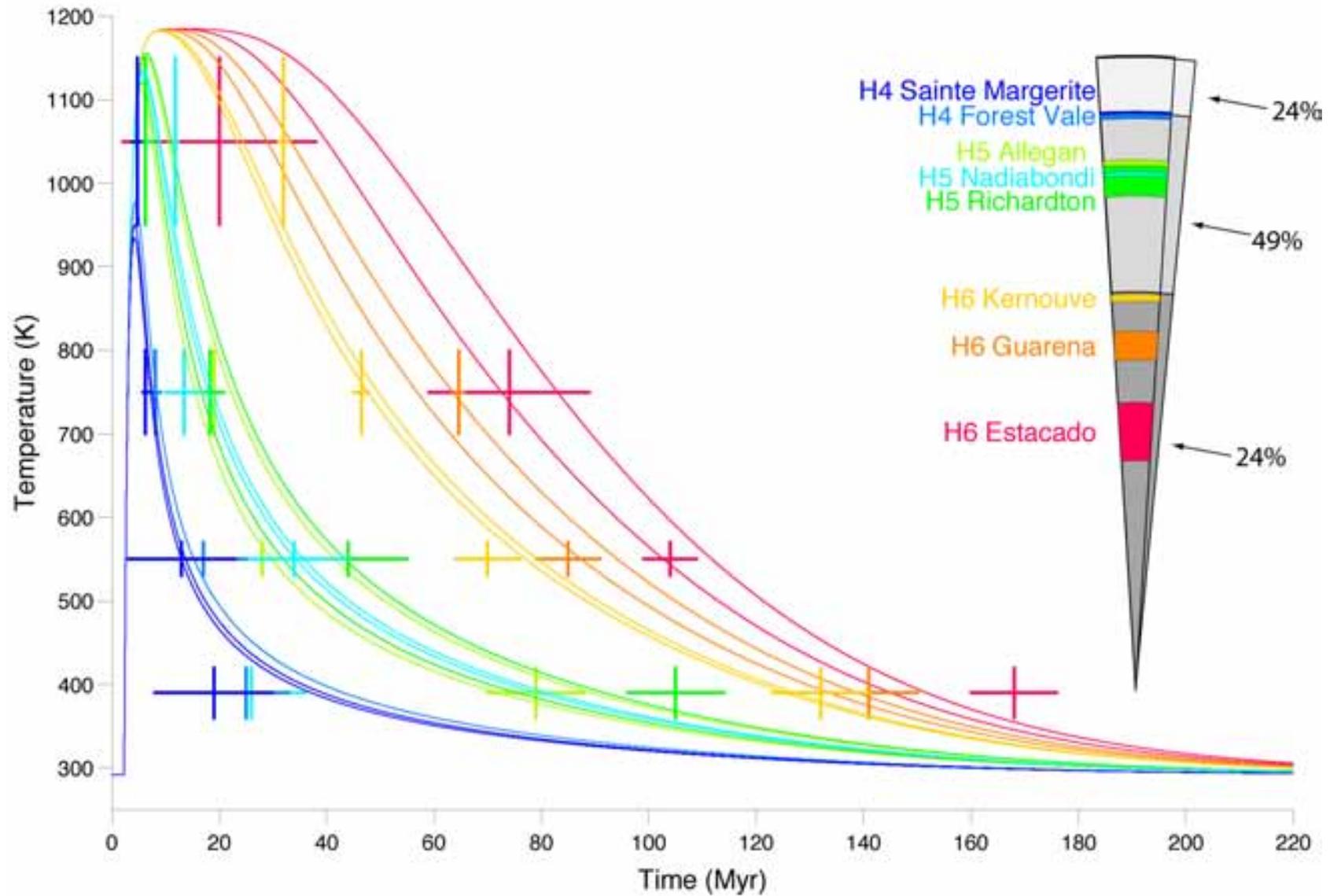


27 données validées

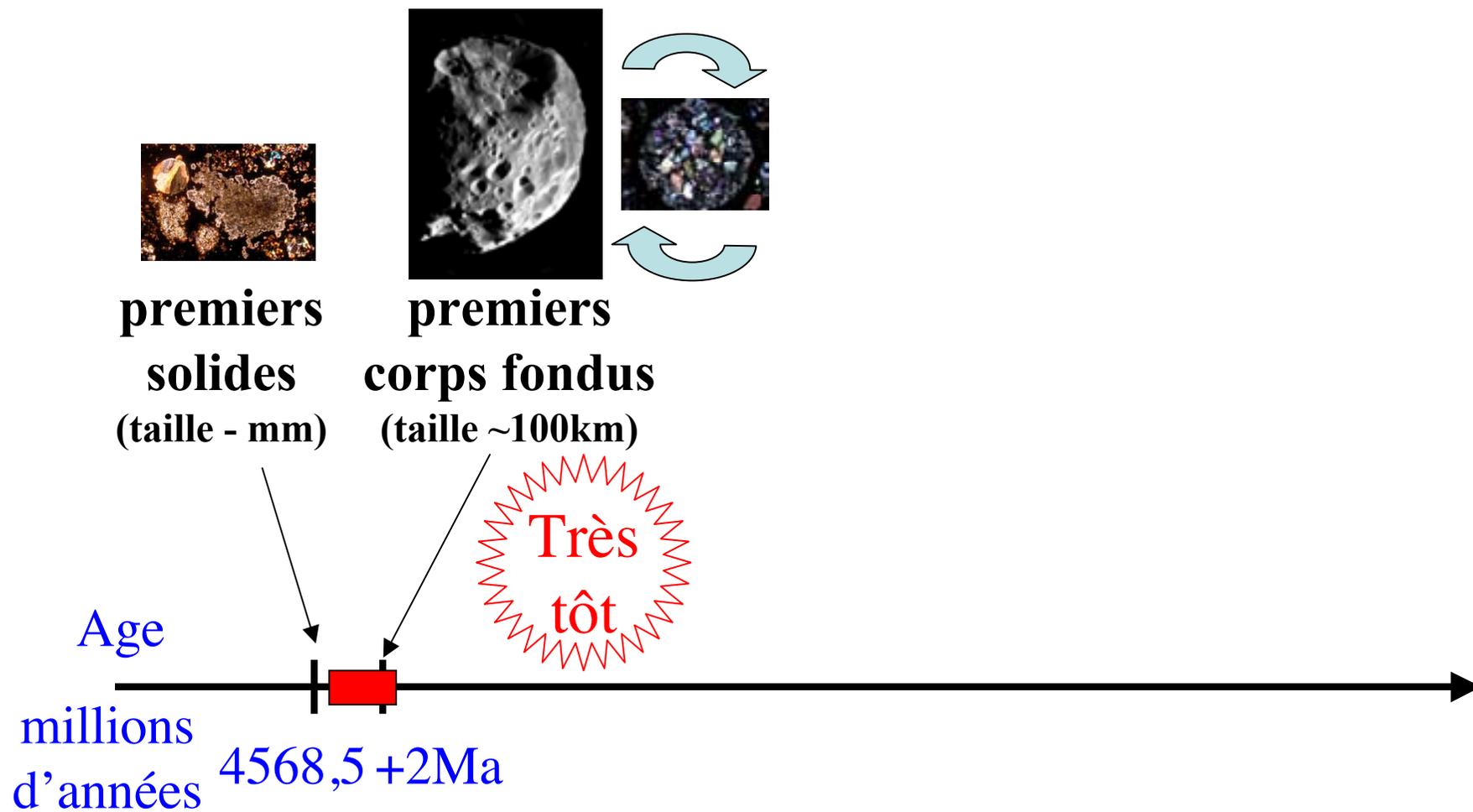
Age \sim CAI+2,3Ma
Rayon de l'ordre de 140km

$R_{\text{body}}=124. \text{ Km}$, $\tau= 47. \text{ Myr}$, $t_{\text{acc}}= 2.25 \text{ Myr}$

$k(T)= 4 \times (T_{\text{E}}/T)^{0.5} \text{ W/mK}$ with $T_{\text{E}}= 292\text{K}$



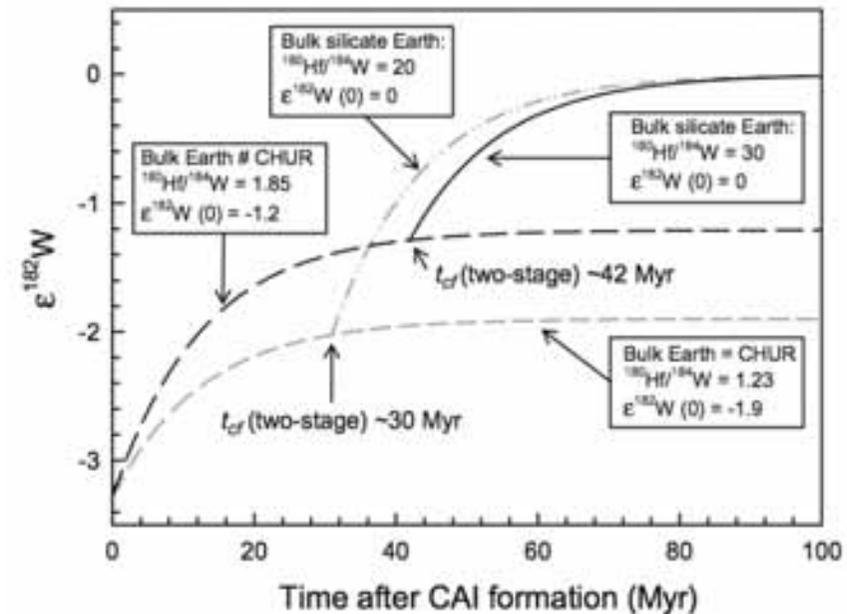
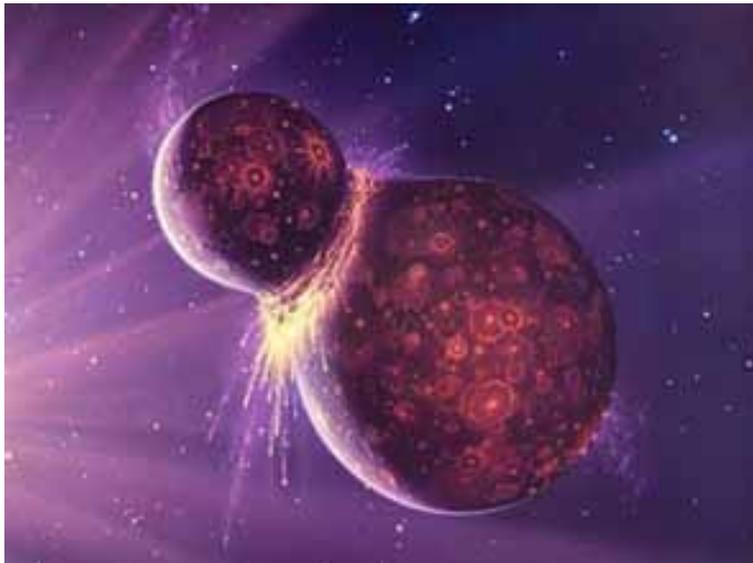
Chronologie de la formation planétaire



Fusion par radioactivité
(^{26}Al : demie-vie 0,7 Ma)

Formation des plus gros corps?

Notre compréhension de la formation de la Lune:

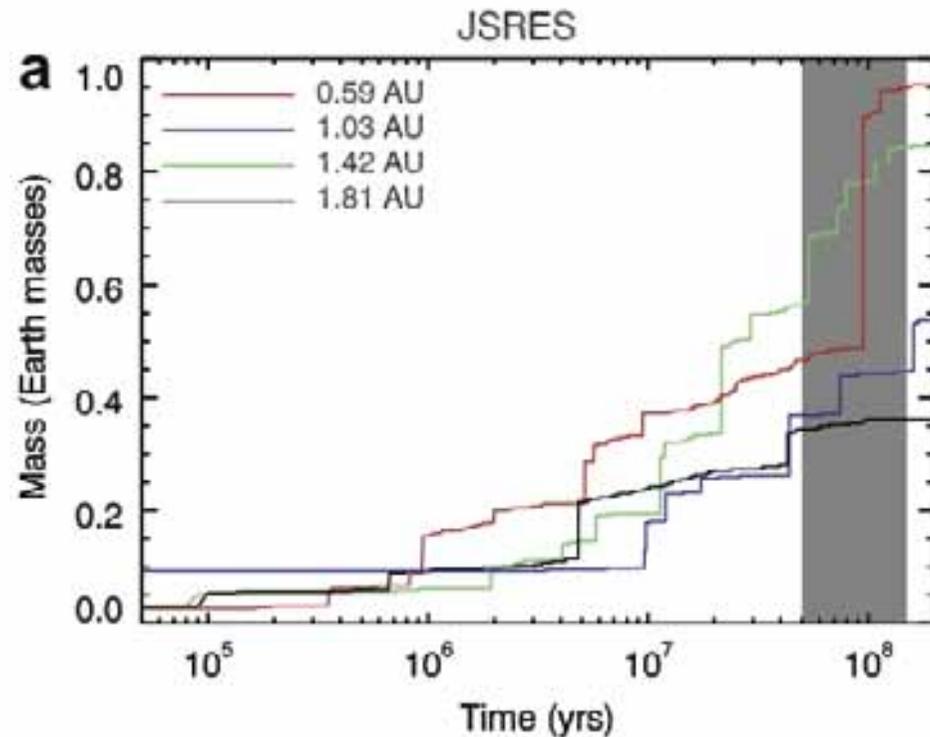


(Kleine et al., 2009)

Un impacte géant vers 30-40 Ma

Formation des plus gros corps?

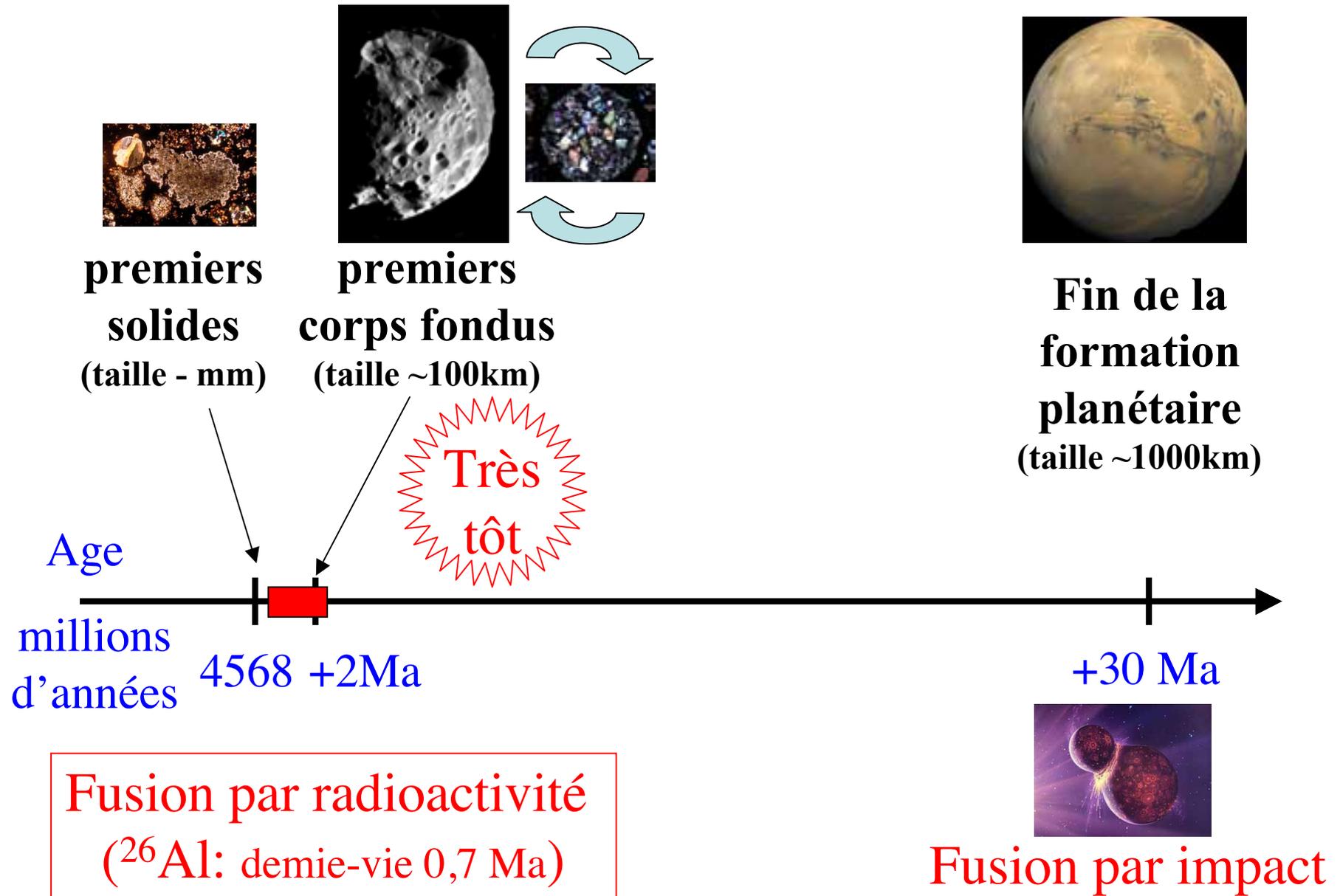
La simulation de la mécanique céleste à N-corps:



(Raymond et al., 2009)

Gros impactes pendant la période 30 à 100Ma

Chronologie de la formation planétaire

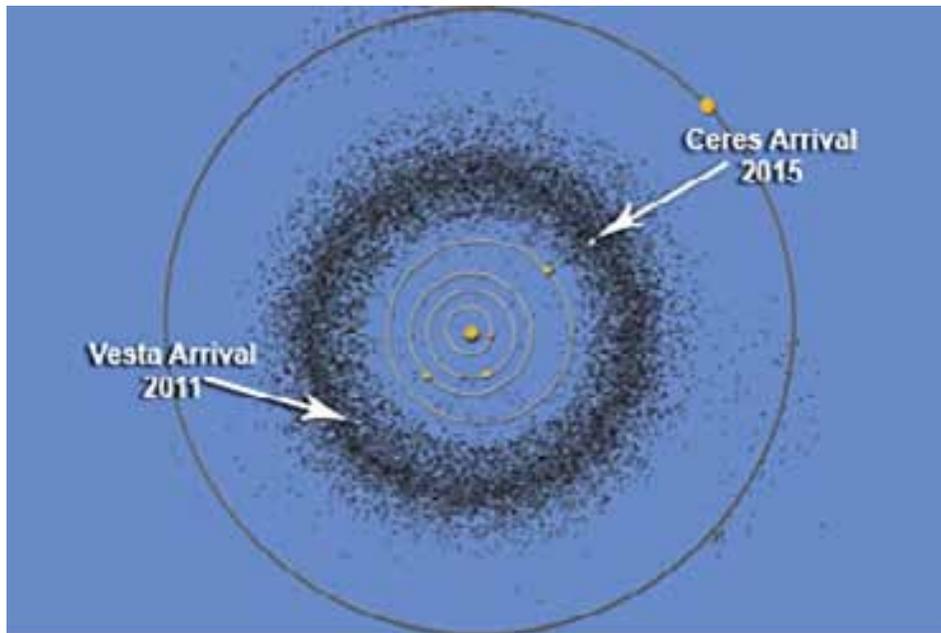
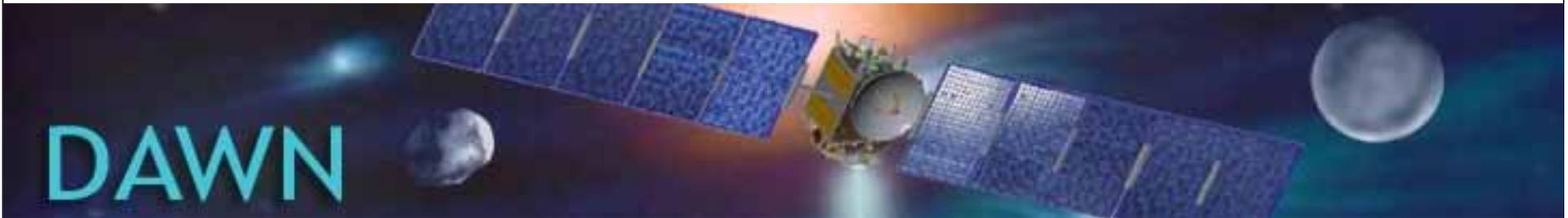


Enjeux des prochaines années?

Comprendre la formation des chondres:

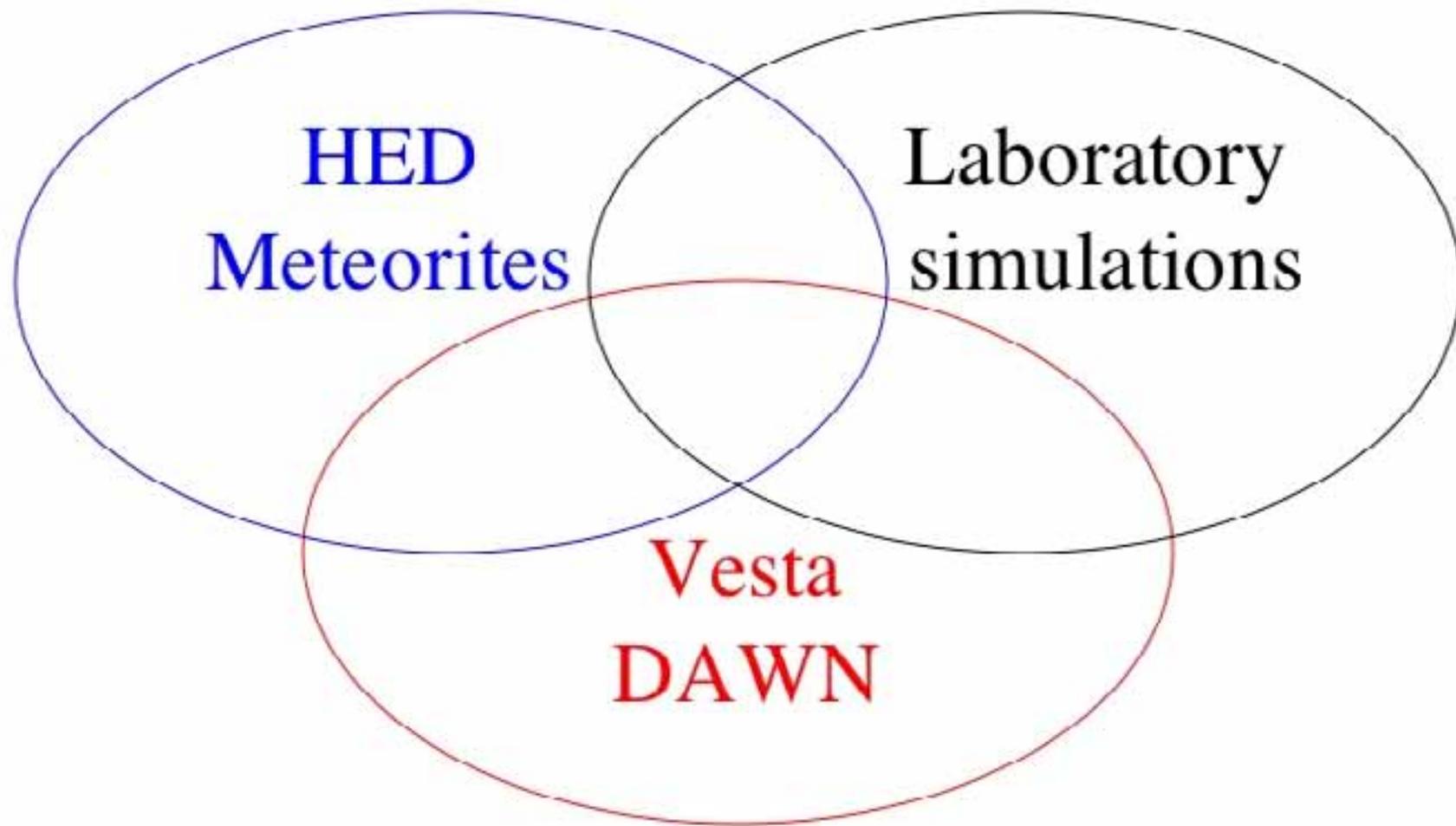
Comprendre les conditions nécessaires pour une accréation très rapide des planétisimaux:

Comprendre le processus de différenciation, surtout sur les « gros » petits corps!



Mission spatiale de la NASA

Survola pendant 18 mois de Vesta, astéroïde différencié de 600km de diamètre



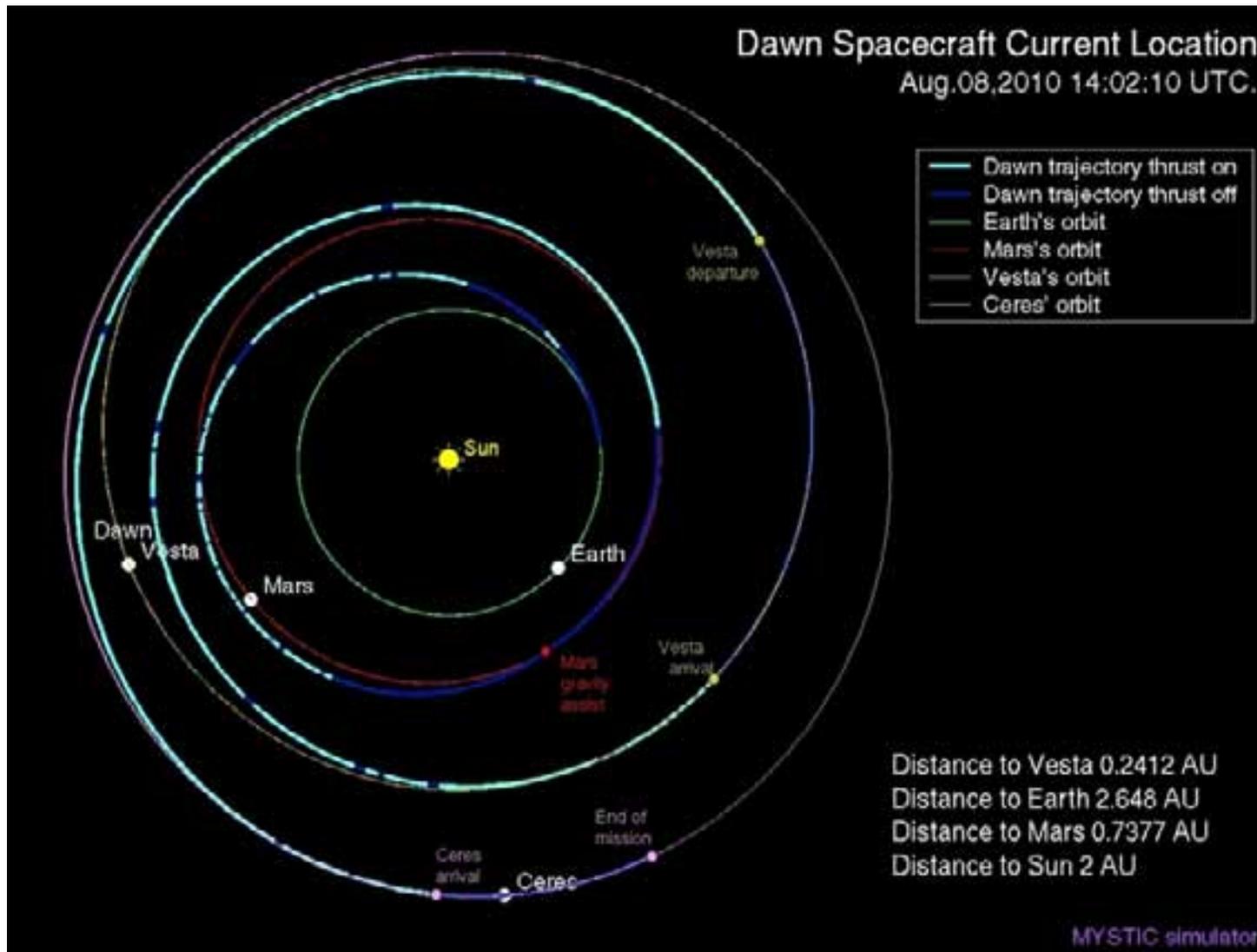
**HED
Meteorites**

**Laboratory
simulations**

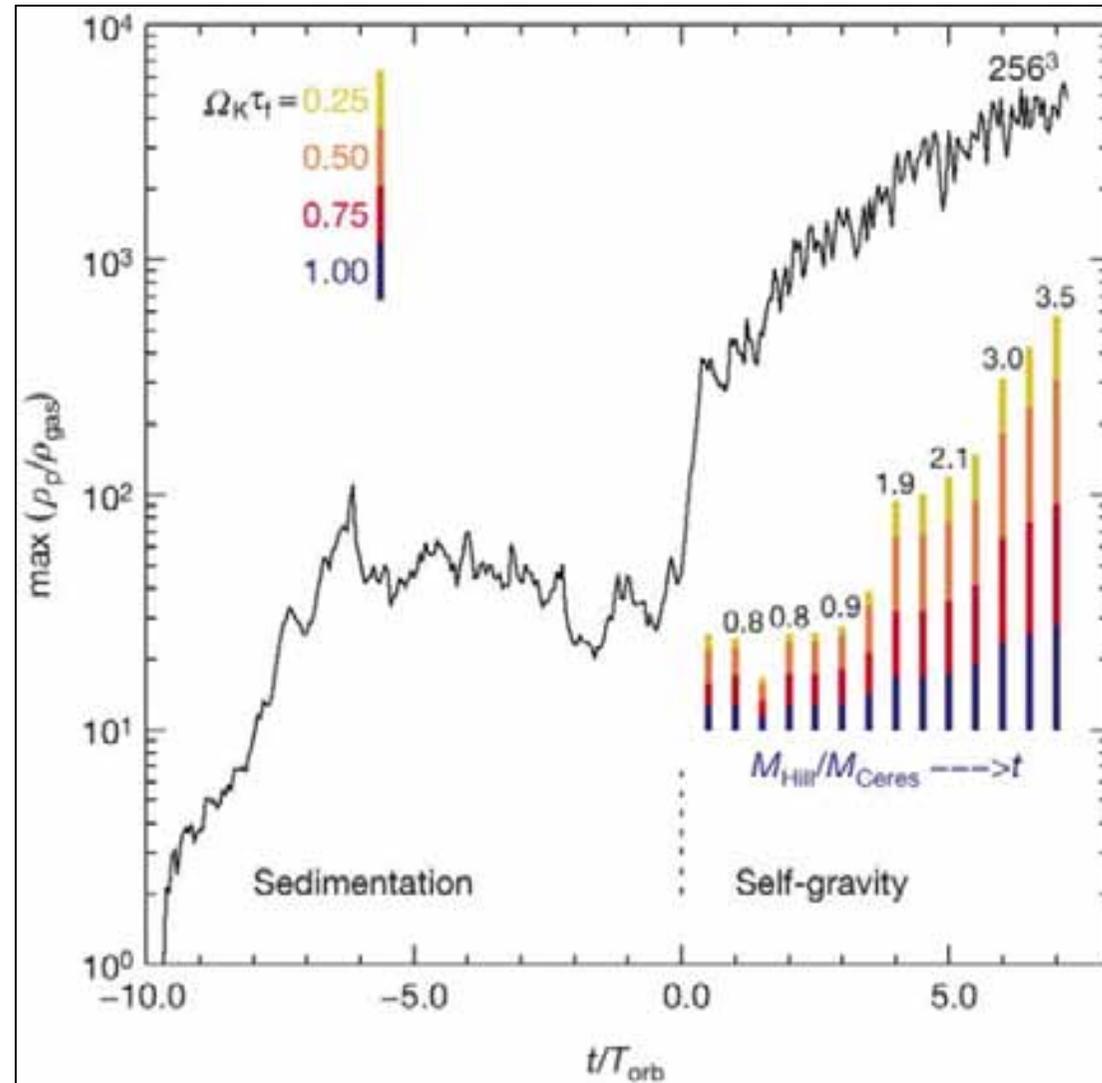
**Vesta
DAWN**

Dawn Spacecraft Current Location

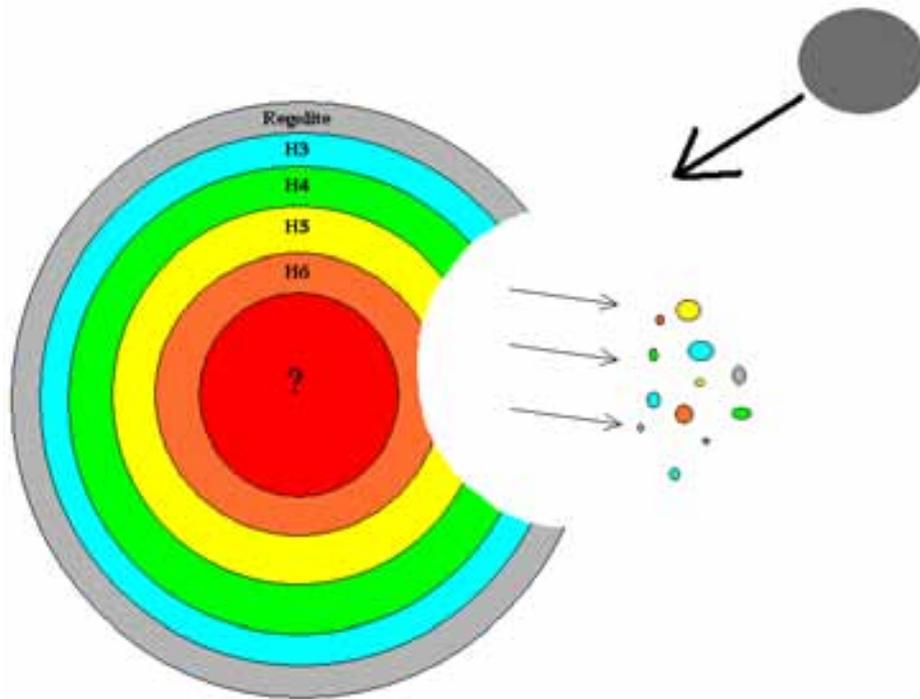
Aug.08,2010 14:02:10 UTC.



Fabrication des planétisimaux.....



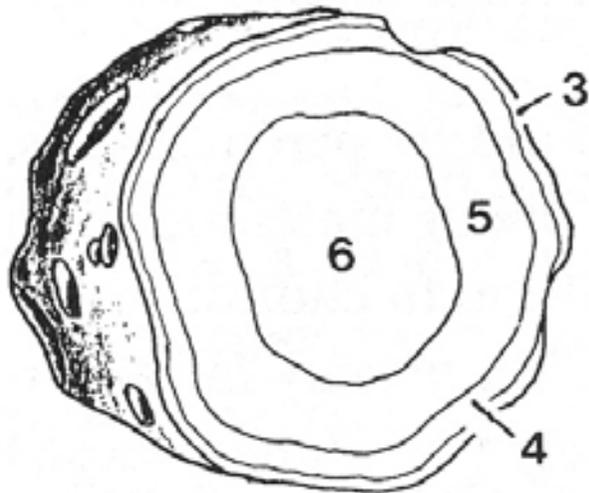
Est-ce que ce corps parent existe dans la ceinture d'astéroïdes?



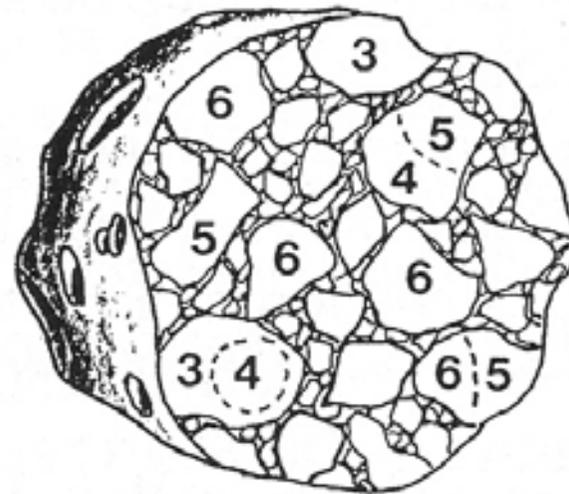
Sur-représentation des types pétrologiques faibles

Est-ce que ce corps parent existe dans la ceinture d'astéroïdes?

Asteroid Structures



Onion Shell



Rubble Pile

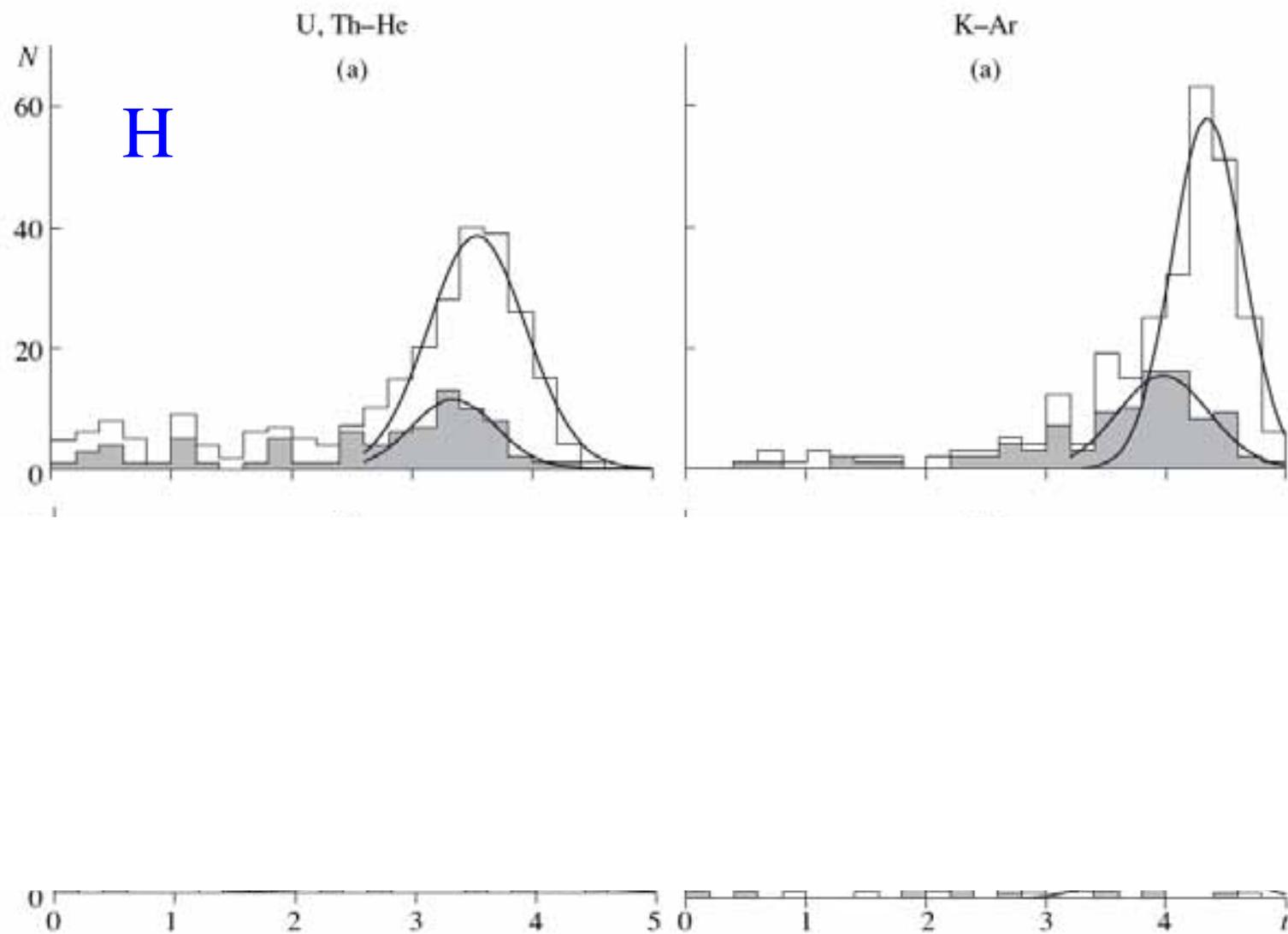
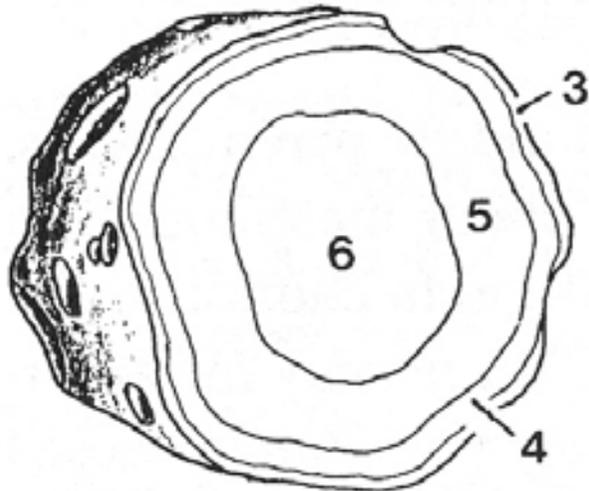
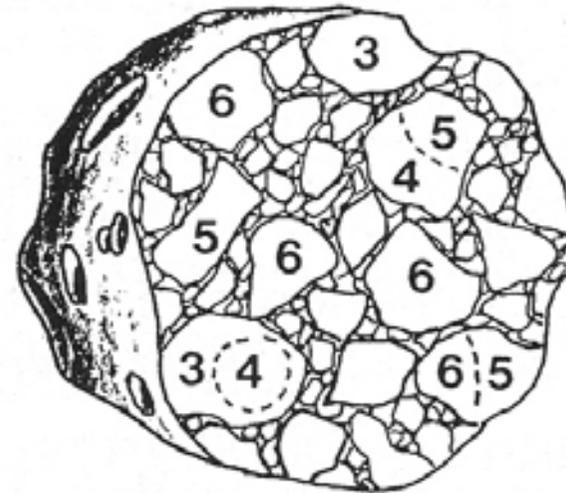


Fig. 2. The distributions of the U, Th-He and K-Ar ages of H (a), L (b), and LL chondrites (c). The shadowed areas of the histograms correspond to meteorite finds (without those found in Antarctica and in deserts).

Asteroid Structures



Onion Shell

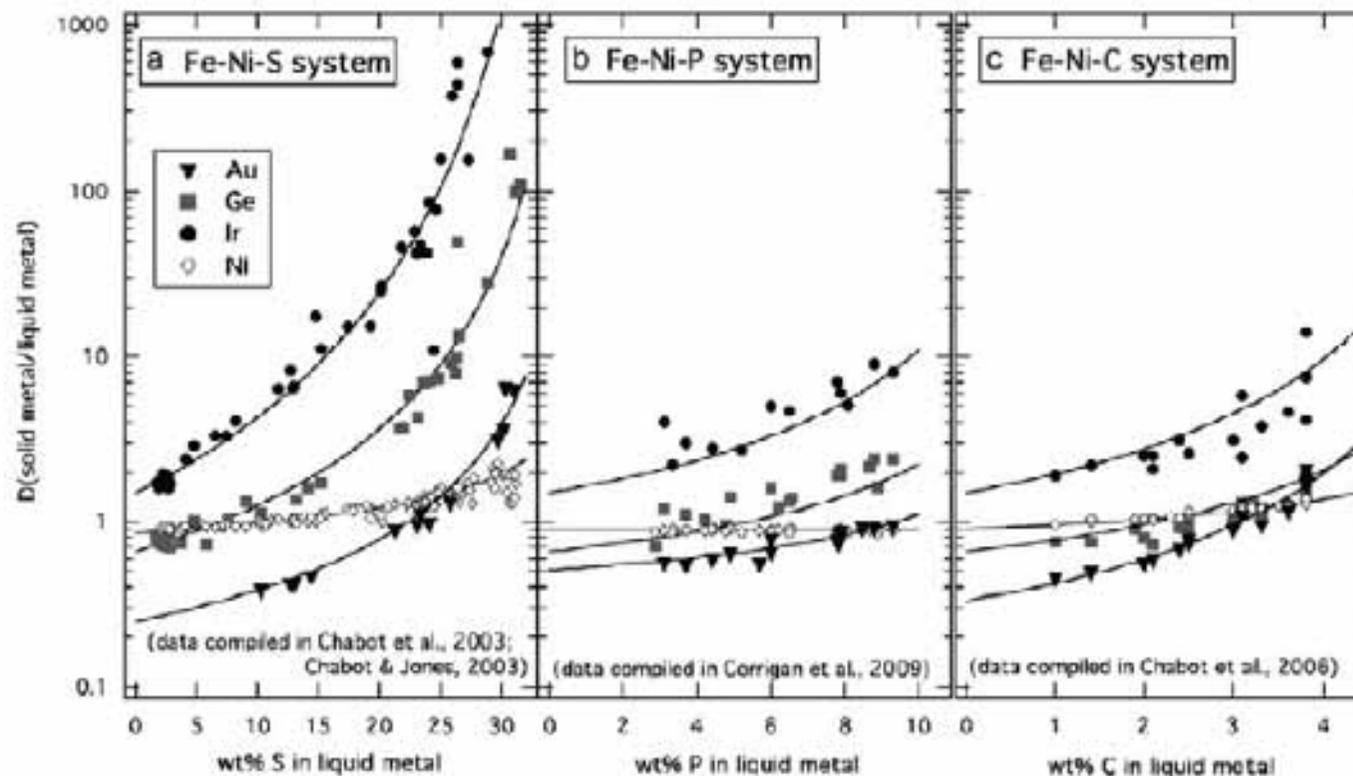


Rubble Pile

Pas la peine d'aller chercher le corps parent initial!....

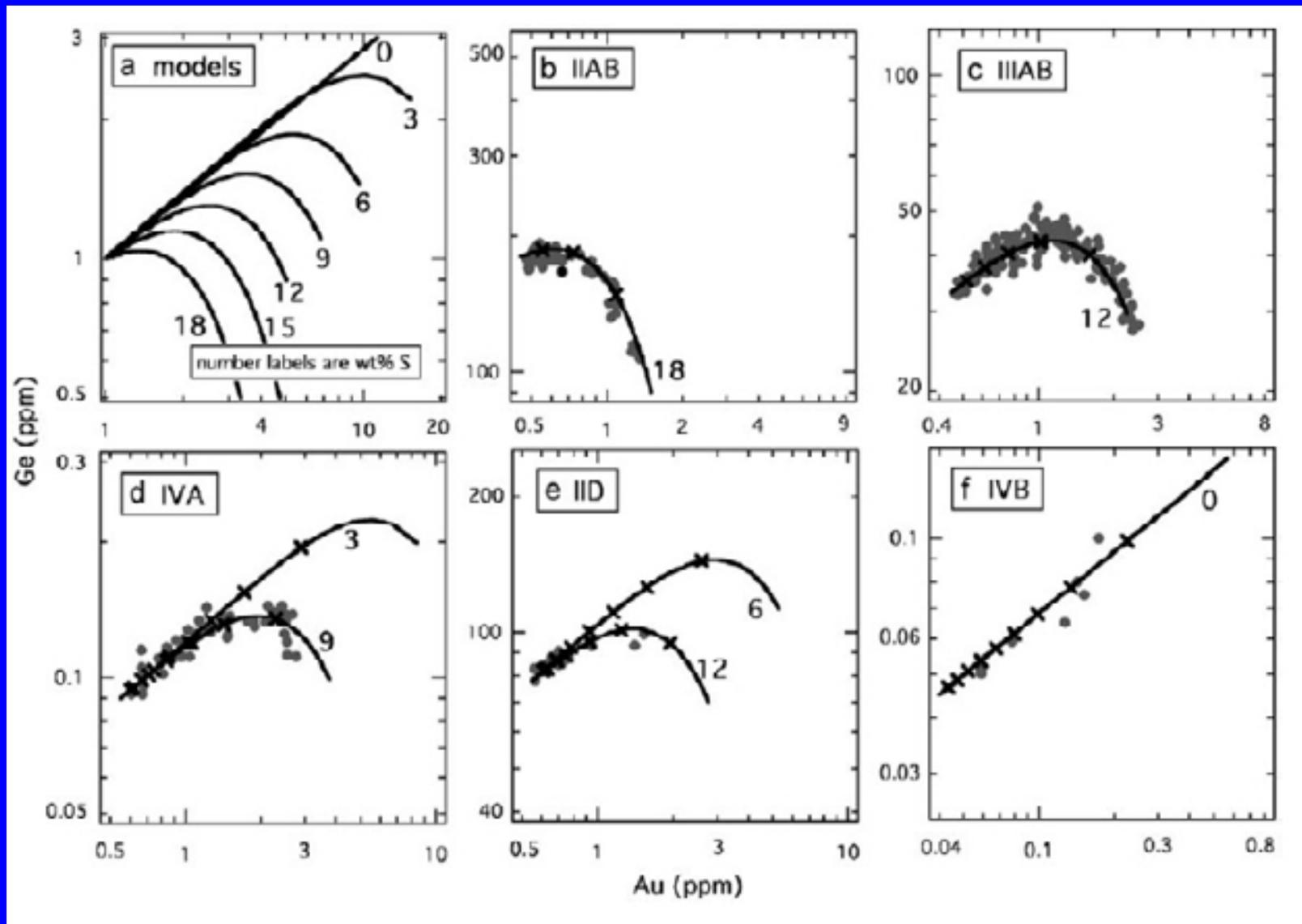
Evidence en faveur de la cristallisation fractionnée

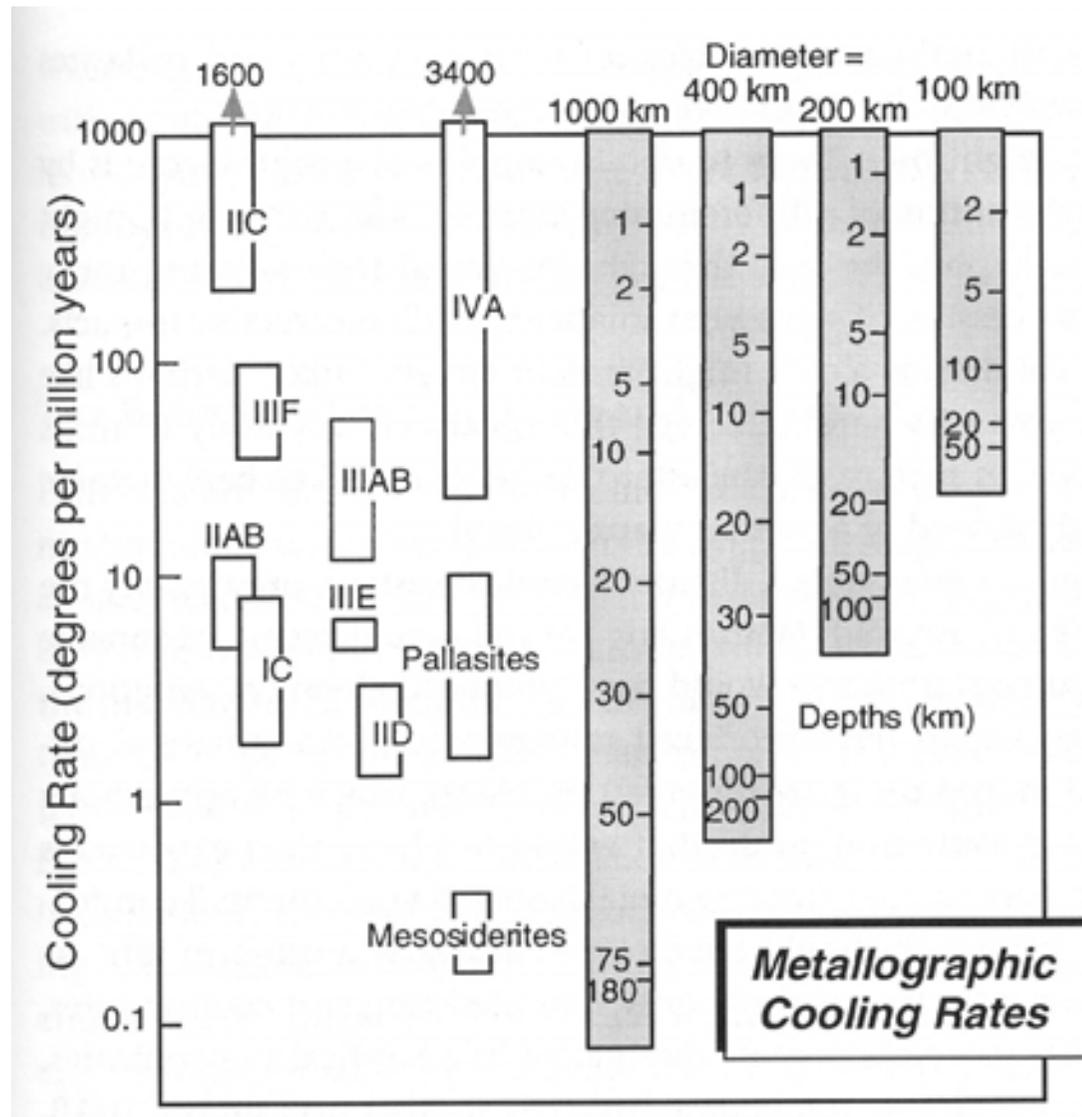
Ces groupes reflètent-ils
des processus de cristallisation fractionnée ?



Coefficients de partage pour Au Ge Ir et Ni pour différents systèmes
(Fe-Ni-S, Fe-Ni-P, Fe-Ni-C).

Evidence en faveur de la cristallisation fractionnée





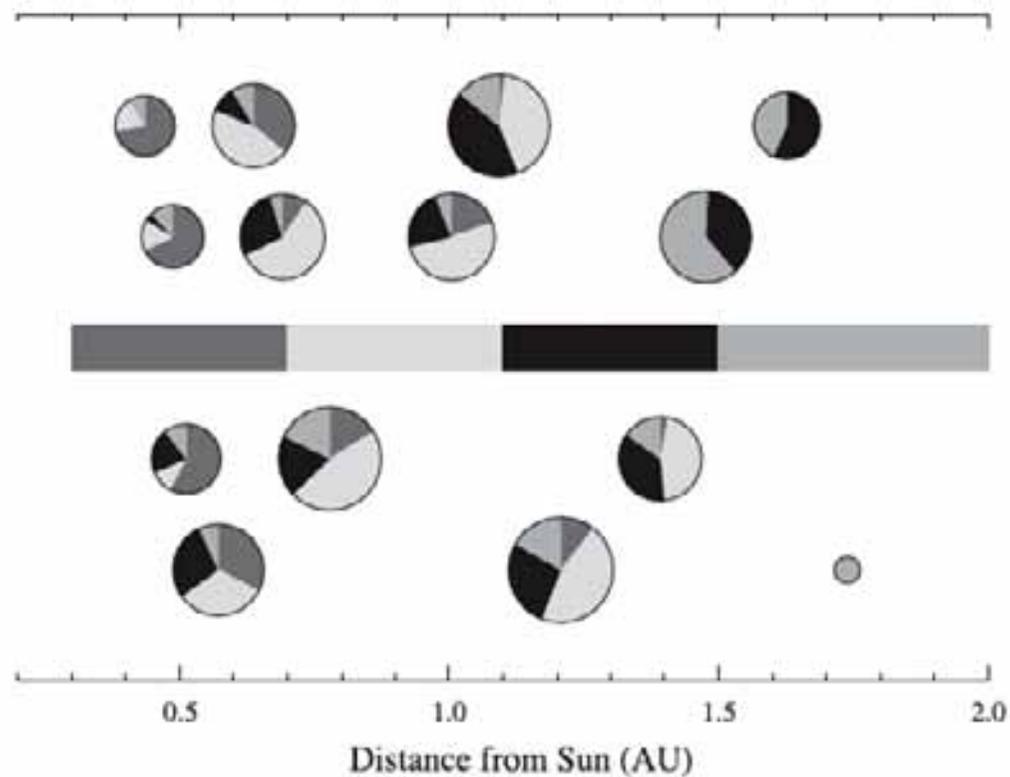
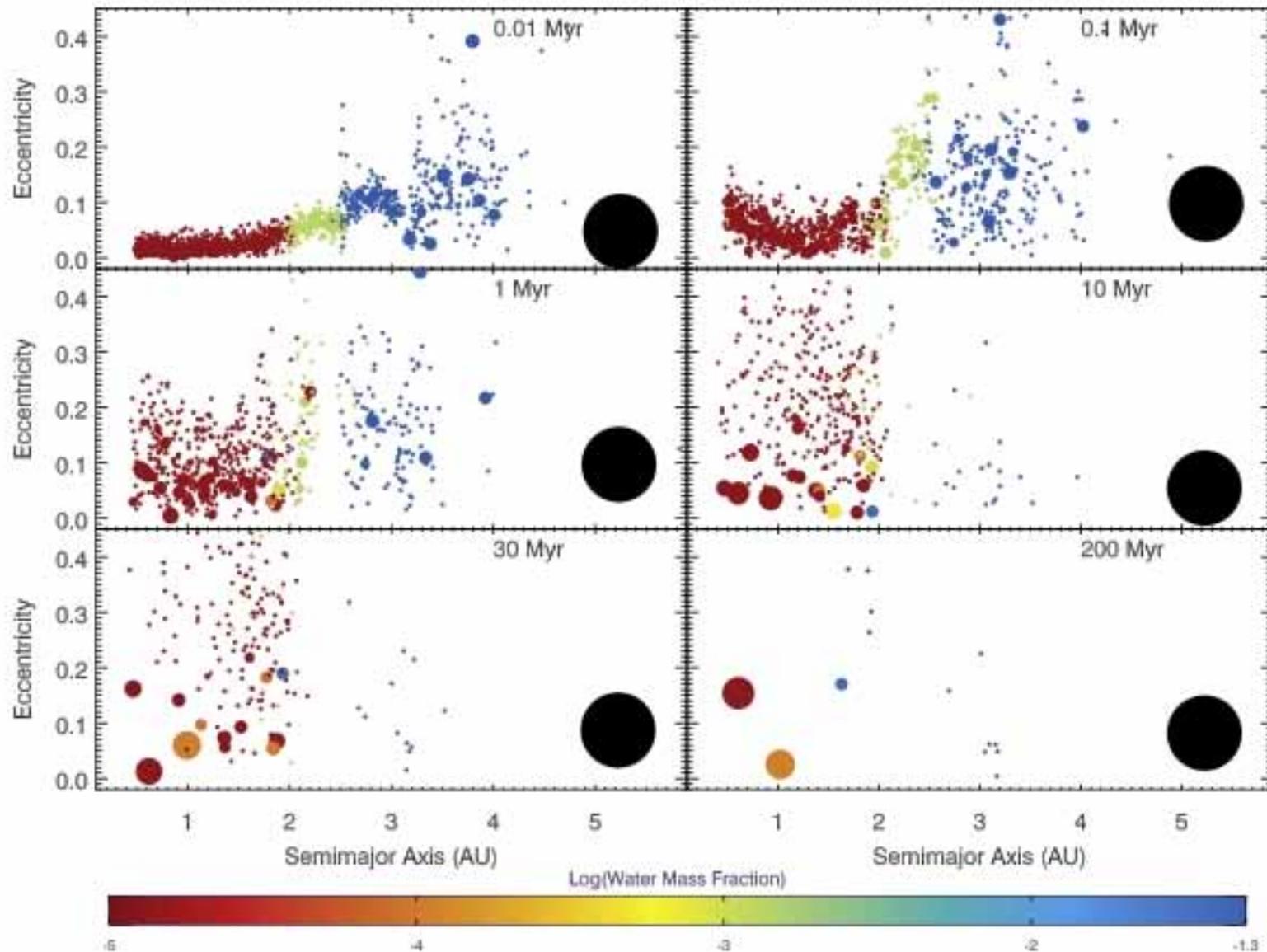


Fig. 3. The results of four numerical simulations of the final stage in the accretion of the inner planets. Each row of symbols shows one simulation, with symbol radius proportional to the radius of the planet. The segments in each pie chart show the fraction of material originating from each of the four zones of the nebula indicated by the shaded rectangles. In each simulation, the largest planet has a mass similar to Earth (results taken from Ref. [62]).

Fabrication des planètes.....



L'origine de la chaleur de fusion pour les gros corps

L'énergie gravitationnelle, qui ne devient importante que pour les planètes les plus grosses (> Mars). Cette énergie est identique à celle des **impacts**! Une forme particulière de cette énergie est la séparation du noyau des planètes.

L'exemple de l'origine de la Lune

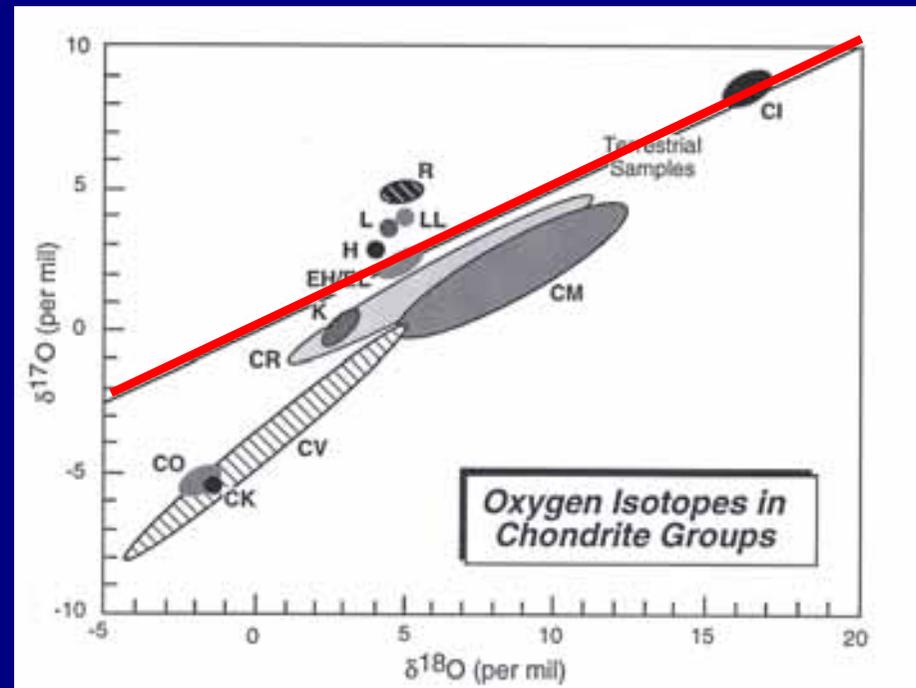
Modèle retenu doit être capable d'expliquer:

Faible densité de la Lune (très peu de noyau métallique)

L'appauvrissement en volatils

La signature identique en isotopes d'oxygène.

Lune et terre sur la
ligne rouge



Le moment angulaire



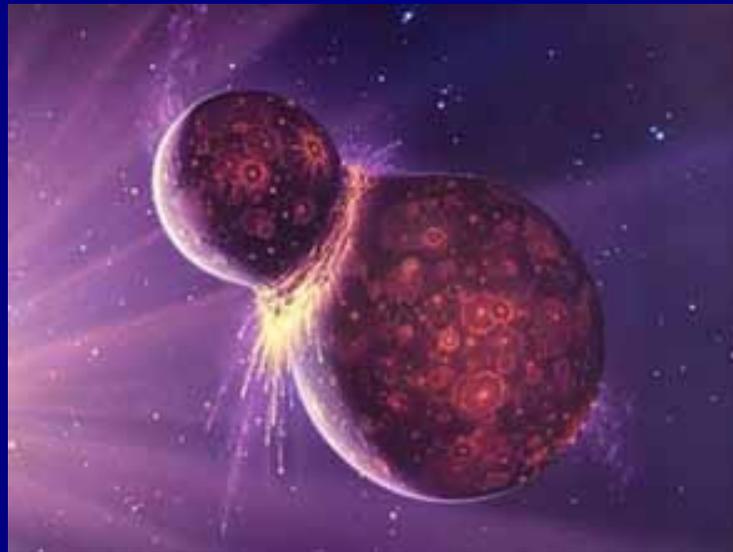
Accrétion



Capture



Fission



Impact

Origine de la Lune

Simulations numériques des impacts entre deux corps:

Modèles des années 90: un objet de masse ~terrestre + un plus petit

Mais, besoin de trop de moment angulaire pour former la lune; la lune trop riche en fer

La solution était une « petite » proto-Terre (0,5 masse terrestre)

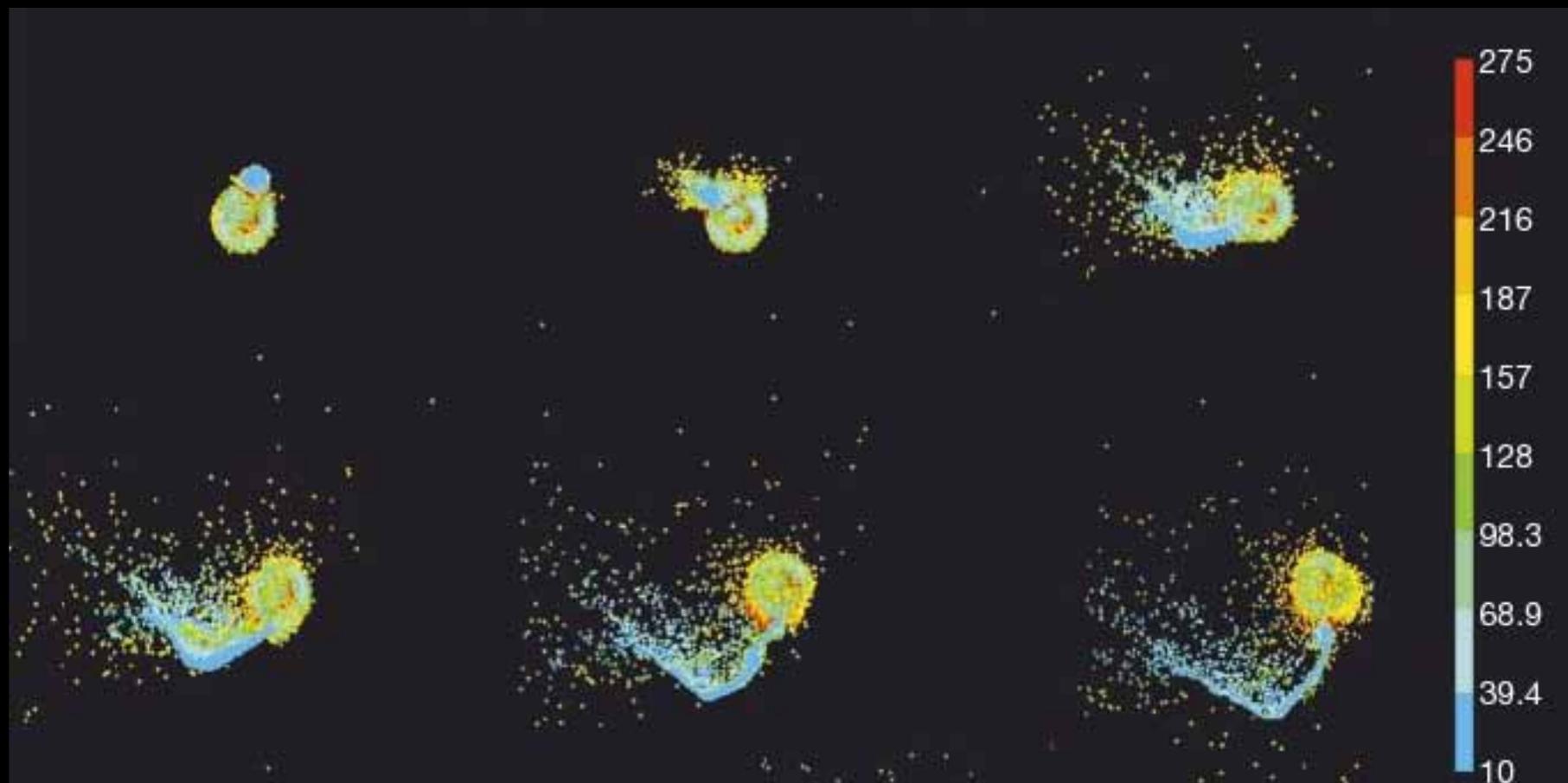
Mais ceci pose des problèmes pour la composition

Les simulations les plus récentes sont capables de former la lune à partir d'une « grosse » proto-Terre

20 min

40 min

1h20



2h

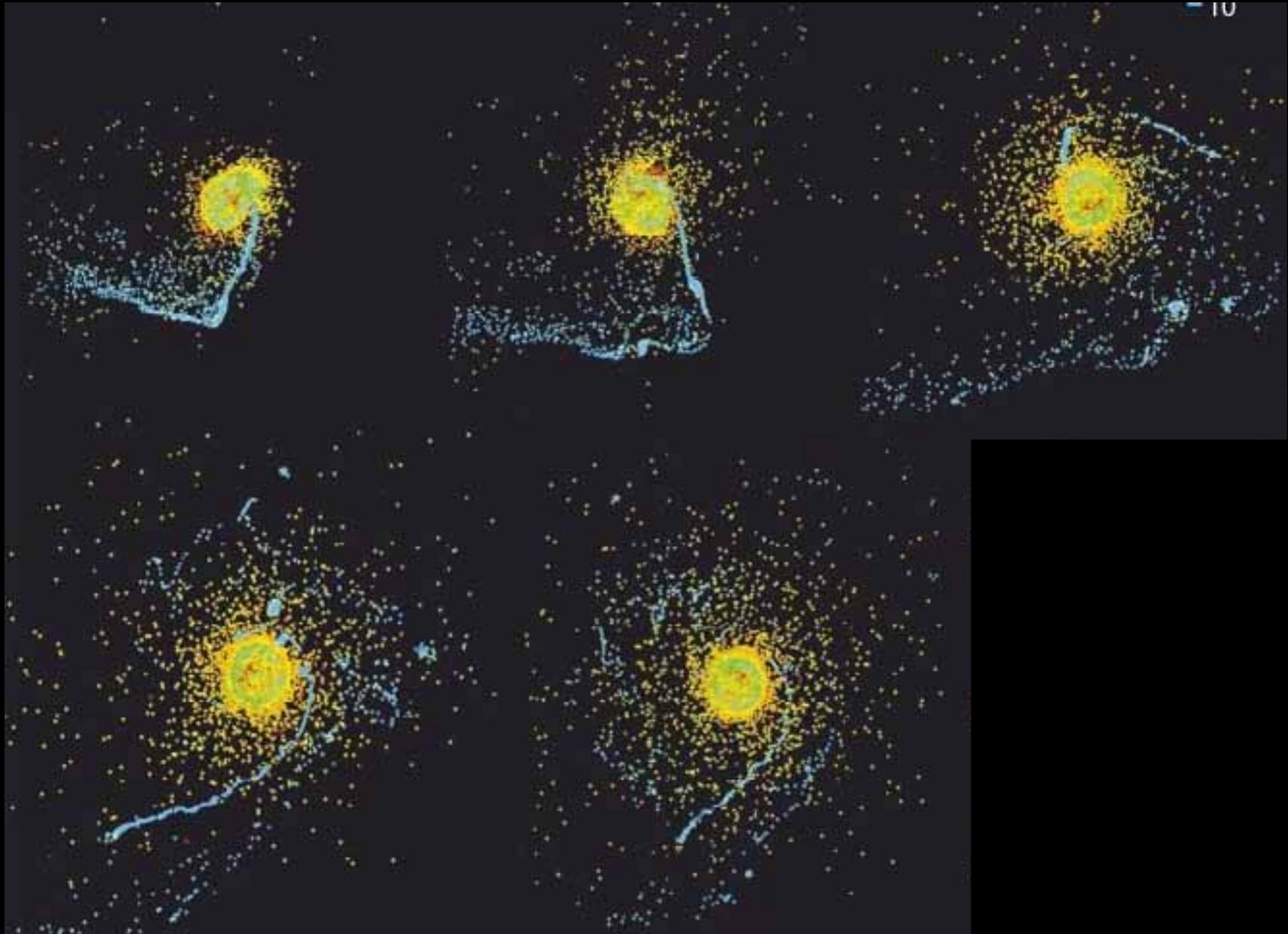
3h

4h

5h

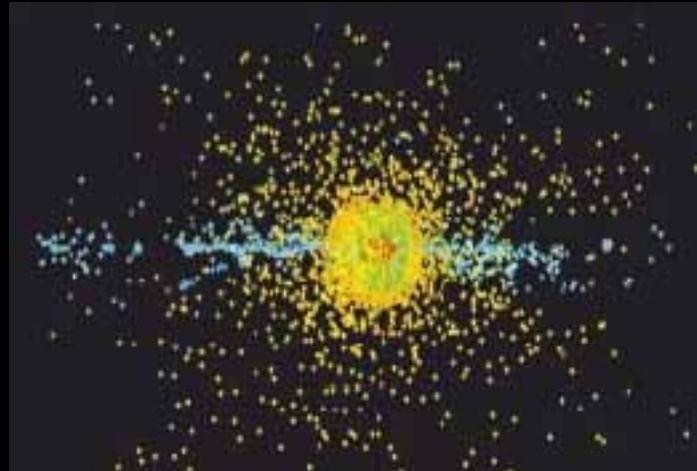
7h

12h



17h

23h



Canup et Asphaug

La lune était certainement fondue en grande partie - existence d'un océan magmatique

