

Planétologie: Planètes telluriques (du Système Solaire)

Plan du cours (4 séances x 2h)

1^{ère} séance: Du gaz à la proto-planète.

2^{ème} séance: La différenciation planétaire.

3^{ème} séance: Structure interne et dynamique interne des planètes.

4^{ème} séance: Etude des surfaces planétaires et géologie comparée

5^{ème} séance: Mars, géologie, climatologie et cycle de l'eau

Pierre Beck, Laboratoire de Planétologie de Grenoble

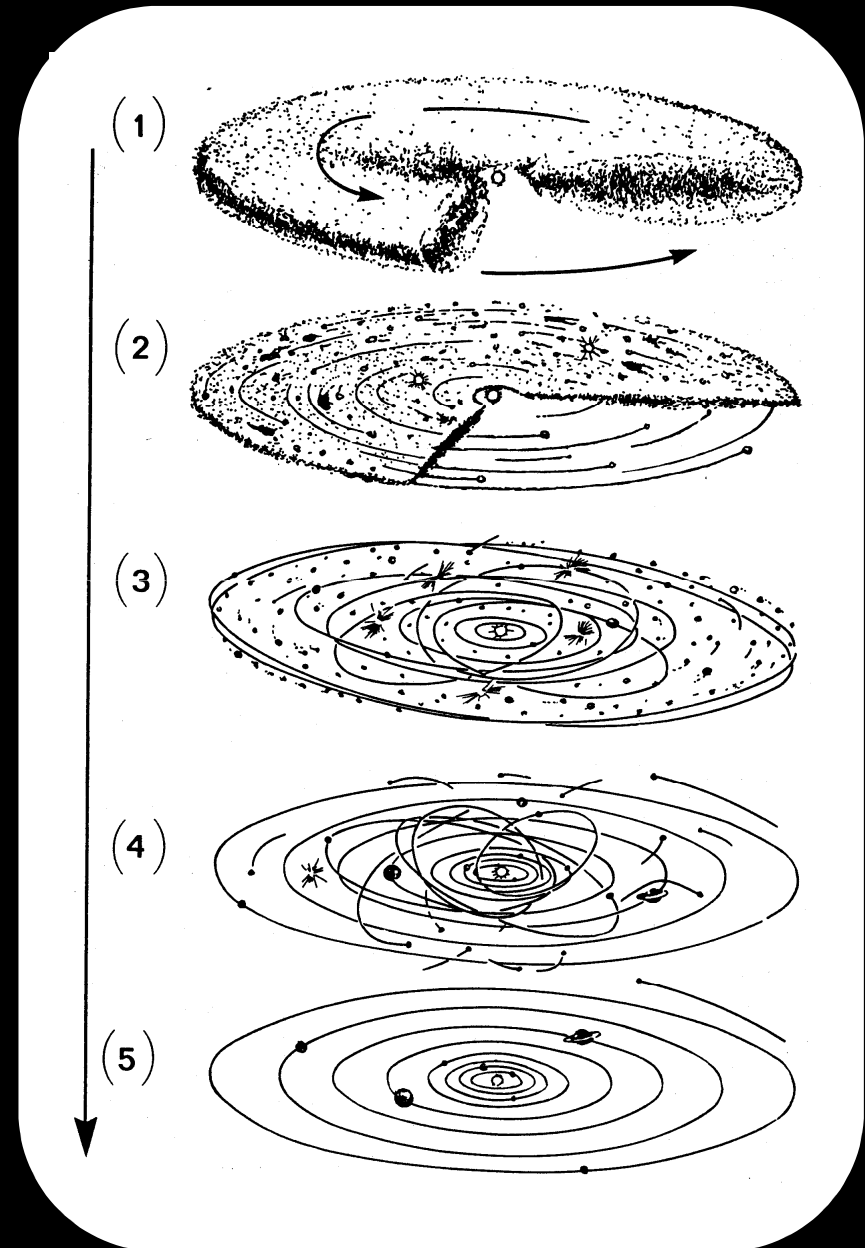
pierre.beck@obs.ujf-grenoble.fr

M2R module de planétologie

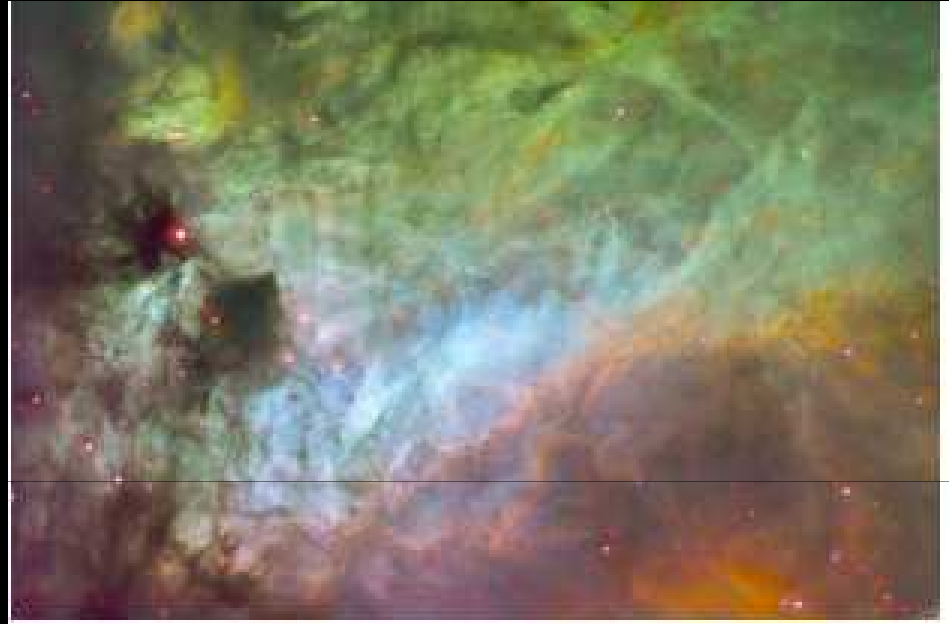
Cours 1: Du gaz à la proto-planète

Pierre Beck
Laboratoire de Planétologie de Grenoble

pierre.beck@obs.ujf-grenoble.fr



Le milieu interstellaire



Dans notre galaxie, 80 % de la masse est celle des étoiles, 20 % l'ISM (interstellar medium)

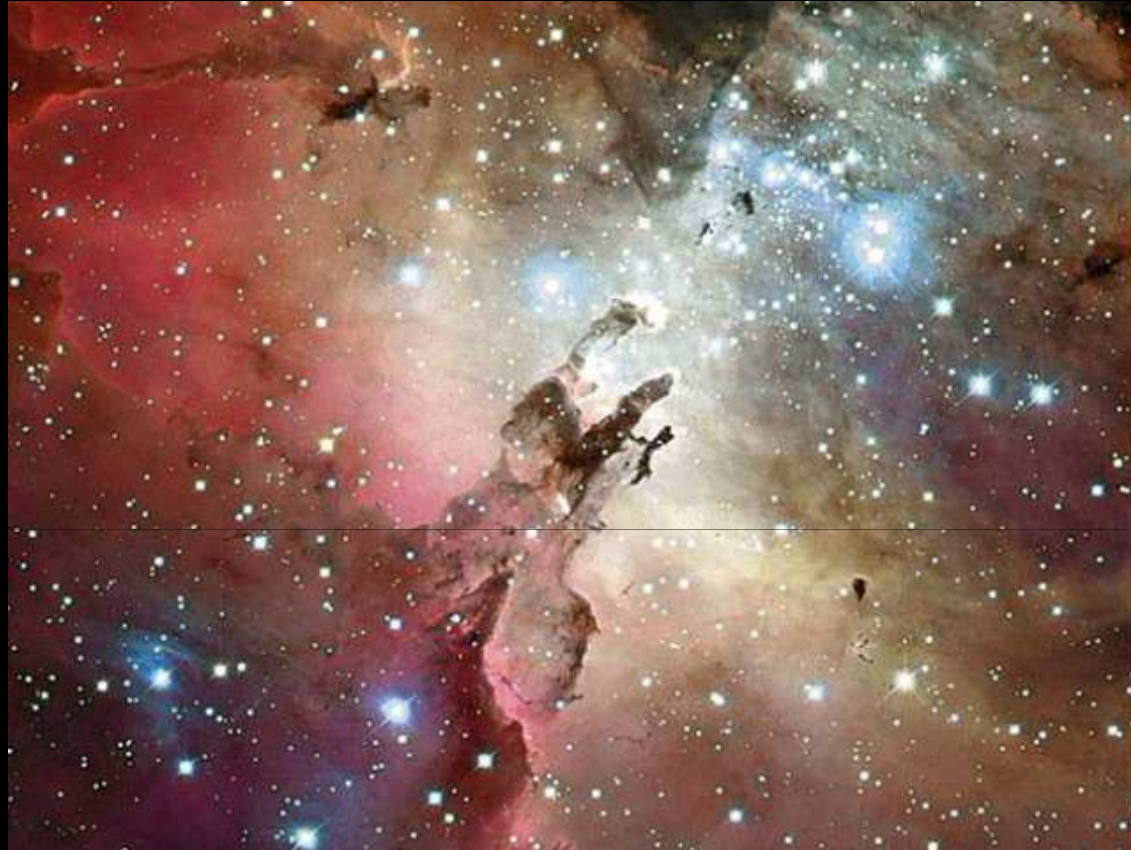
Deux type de régions:

HI (Hydrogène ionisé), 10000 K, < 1 particules/cm³

HII (hydrogène atomique et moléculaire) 10 K, ~ 100 particules/cm³

Les « nuages » sont des zones froides (HI) ou des poussières sont présentes

Où se forment les étoiles?

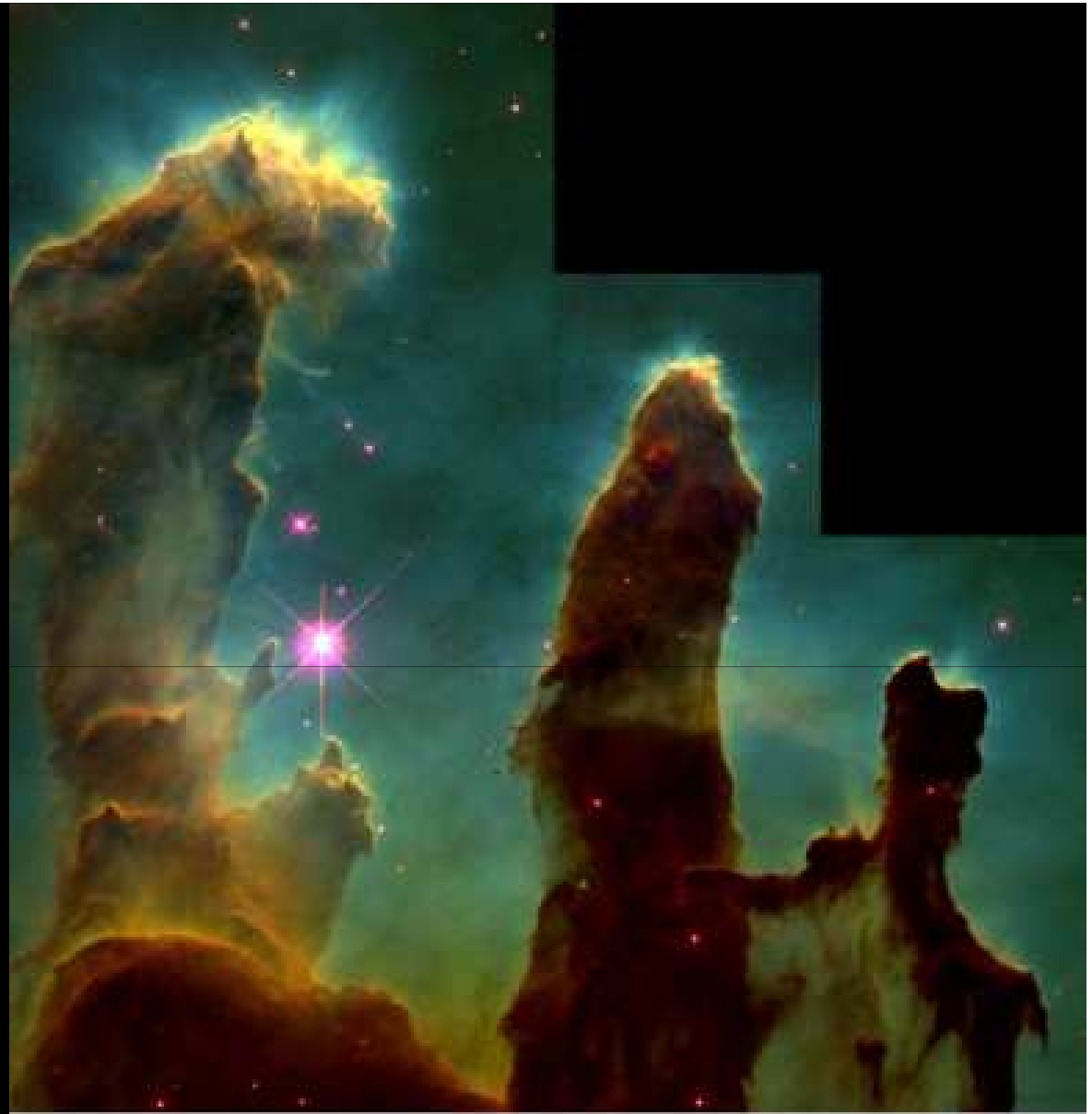


Elles se forment dans les nuages froids.

Régions de formation appelées nébuleuse protostellaires

Les piliers

Les piliers sont des zones d'évaporation des poussières du nuage sous l'effet des rayonnement des étoiles avoisinantes

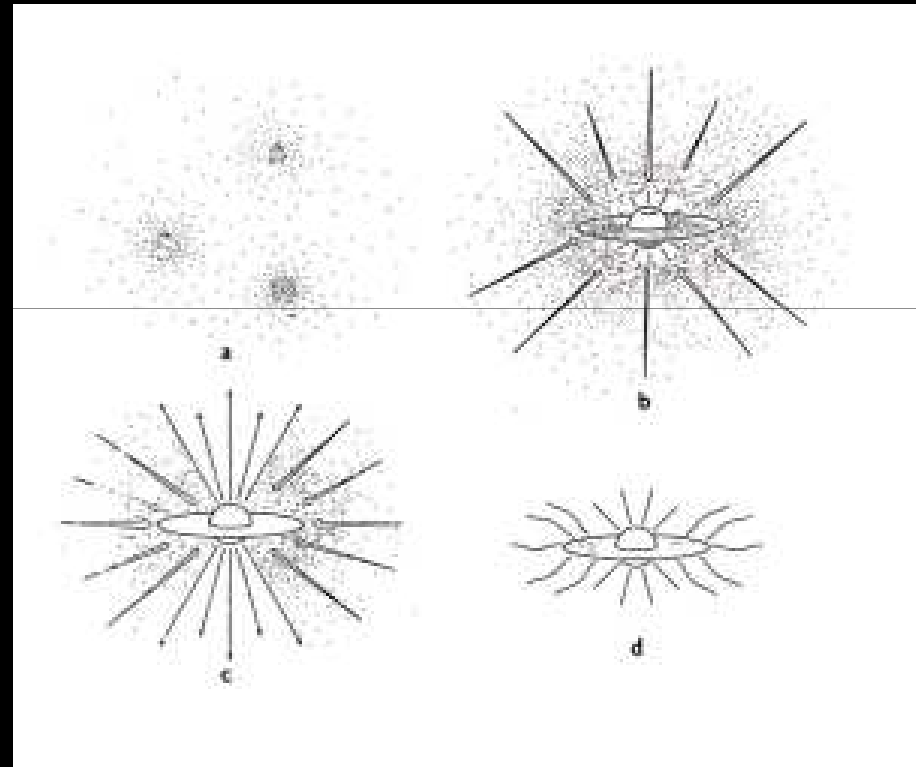


Gaseous Pillars in M16 · Eagle Nebula
Hubble Space Telescope · WFPC2

La formation d'une étoile

Elle se fait par le développement d'instabilité gravitaire.

Une petite instabilité produit l'effondrement catastrophique gravitaire d'une grande région du nuage

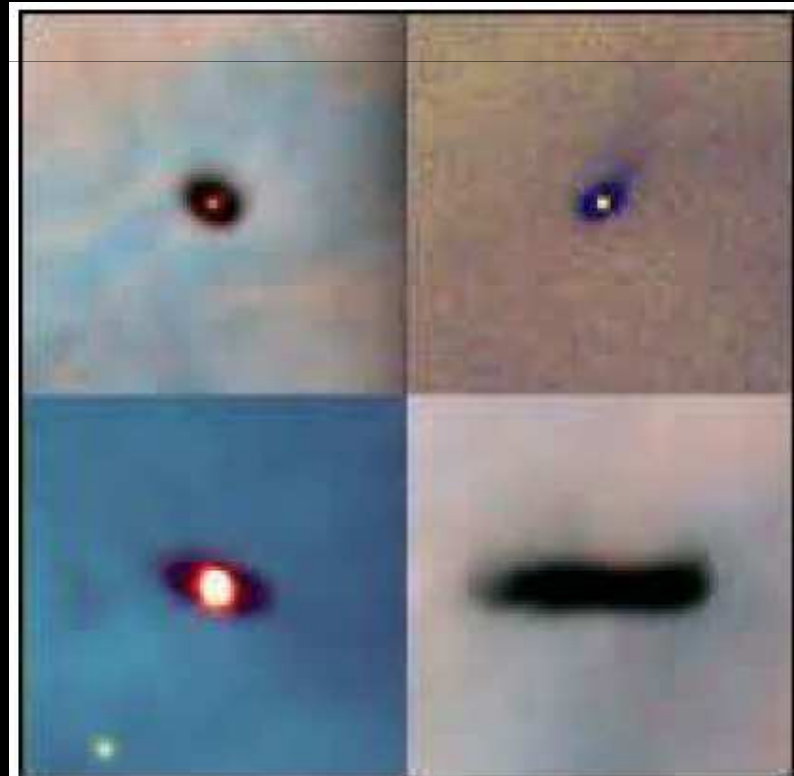
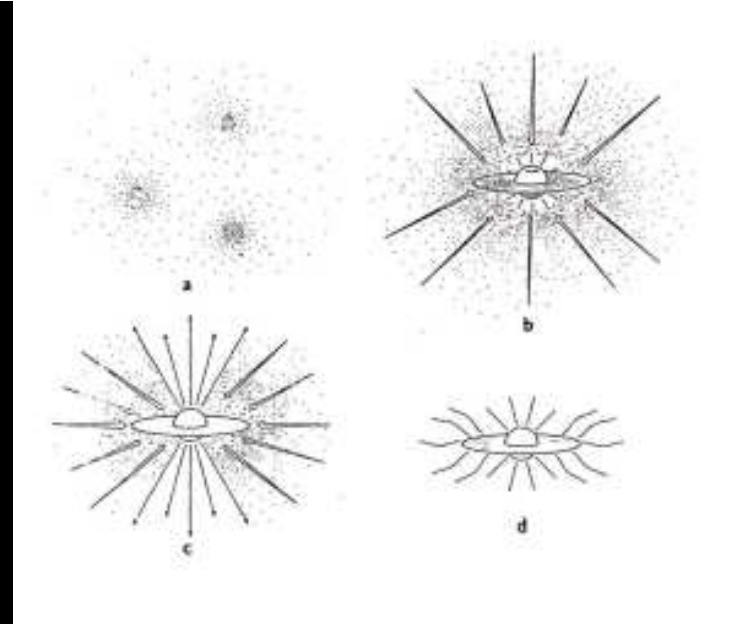


Le disque d'accrétion

La contraction est d'un facteur 10^6 .

Une partie du matériel ne tombe pas sur l'étoile, mais se met en rotation. C'est le disque d'accrétion.

Zone de 10 à 100 a.u. pour le disque d'accrétion du SS

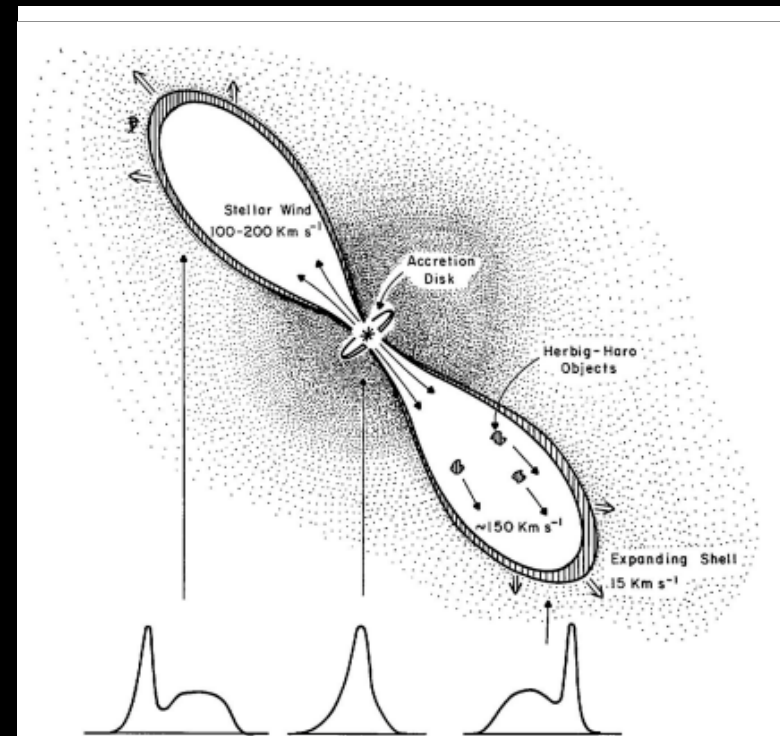
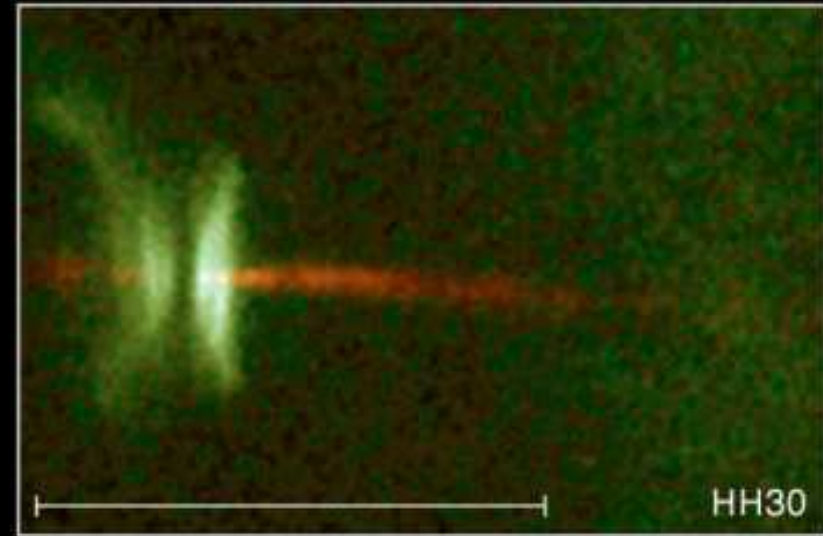


Le jet bipolaire

Suggéré par les observations.

Lié au champ magnétique de l'étoile.

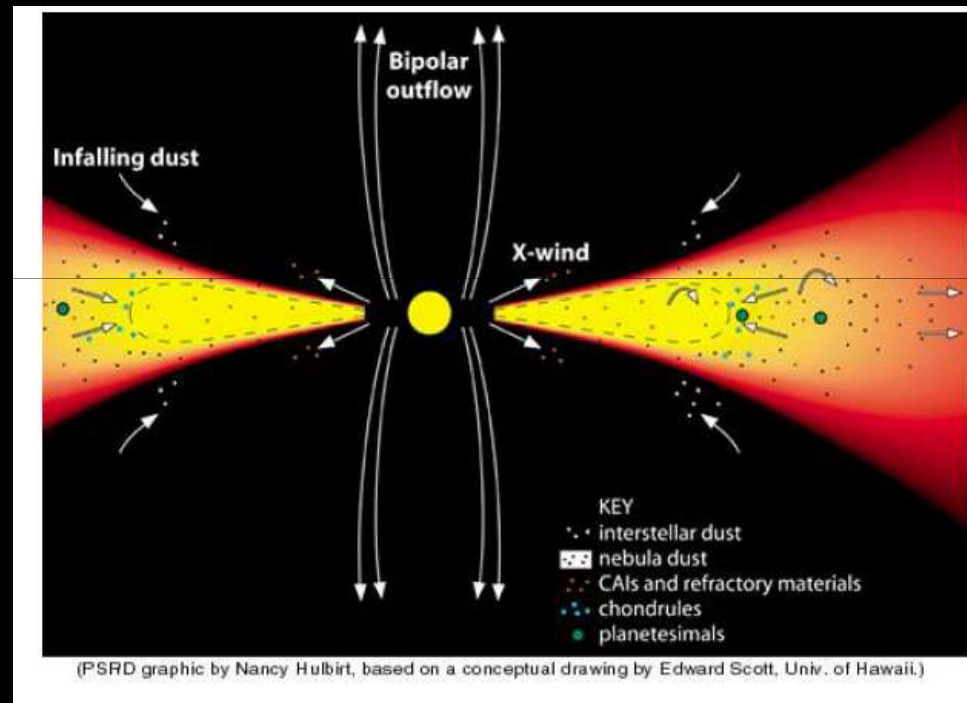
Flux de masse deux coté vu par effet doppler.



Le disque d'accrétion

Les particules de hautes énergies sont éloignées par le champ magnétique intense.

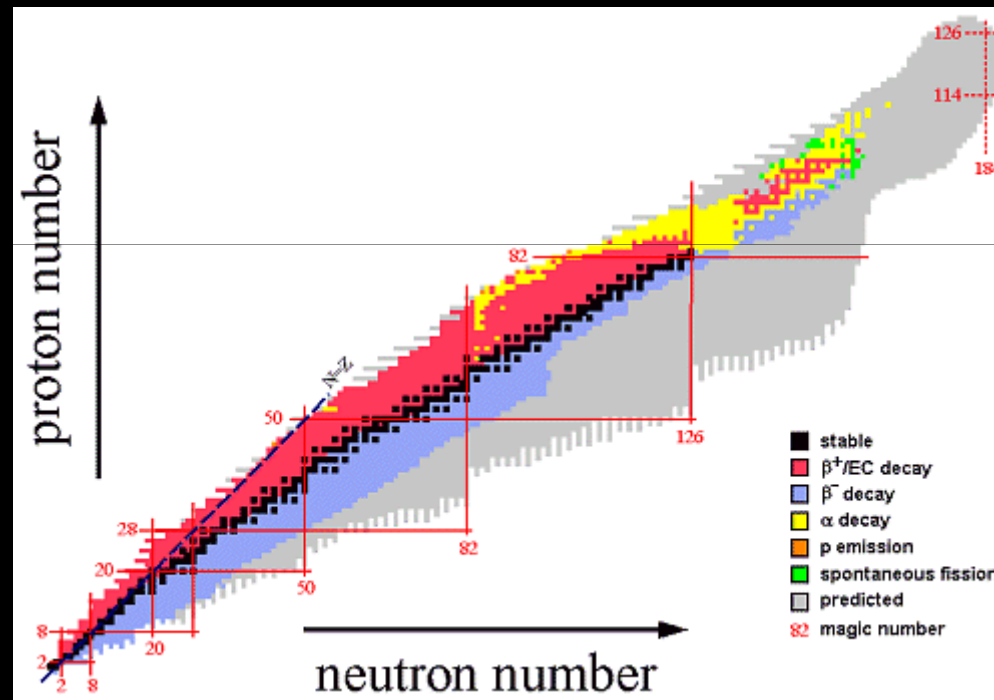
Le flux va suivre les lignes de champ.
Zone de très forte irradiation des particules près de l'étoile.



La composition chimique du Système Solaire

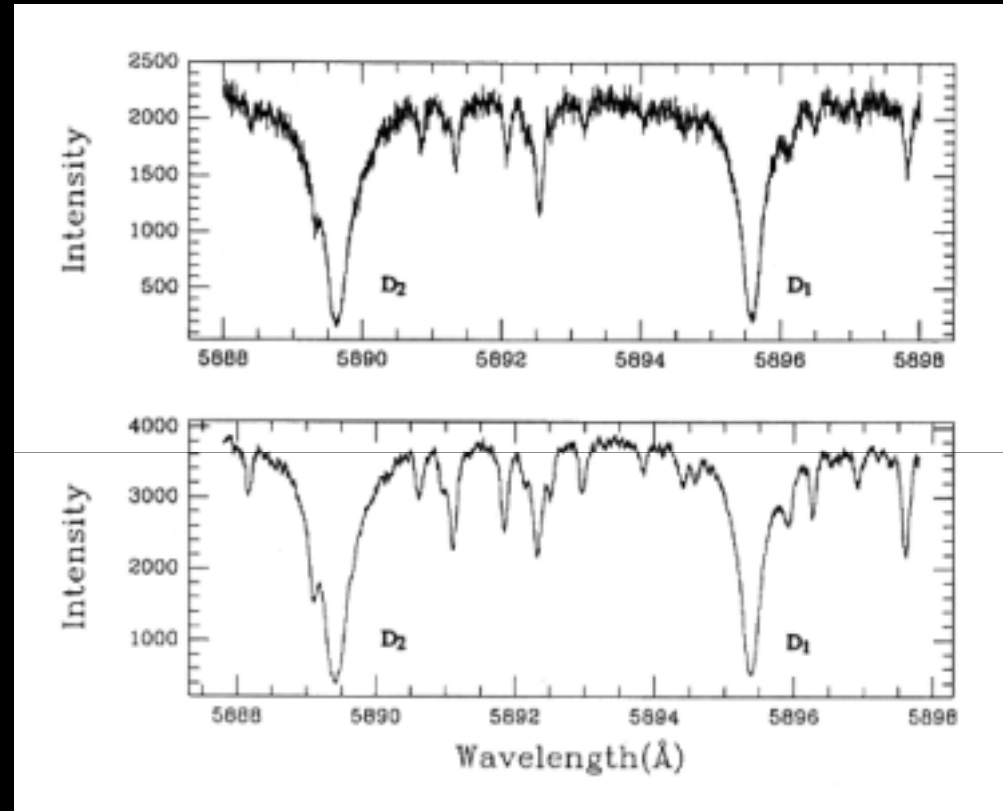
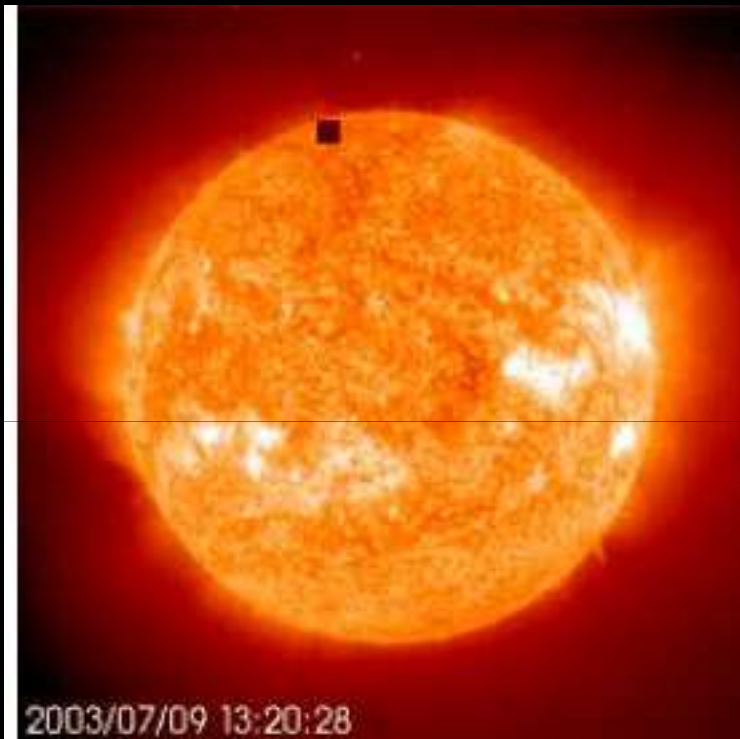
La charte des nucleides

Nucléide= neutron+proton+electrons



Méthode de représentation des différents **nucléides**.

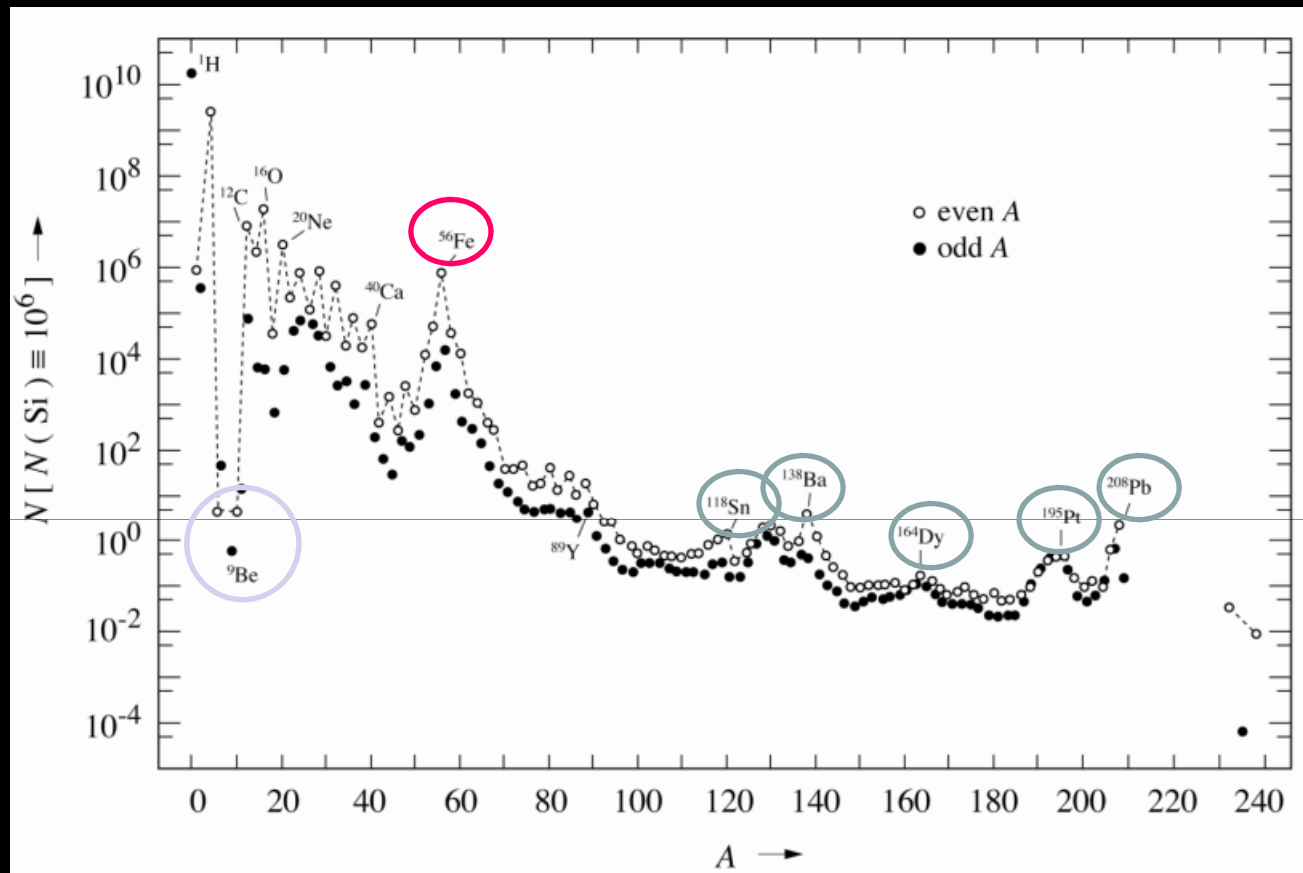
Les abondances Solaires



Elles sont déterminées à partir du spectre d'émission solaire.

Présence de ligne d'absorption/emission liée à des transitions électroniques

Les abondances Solaires

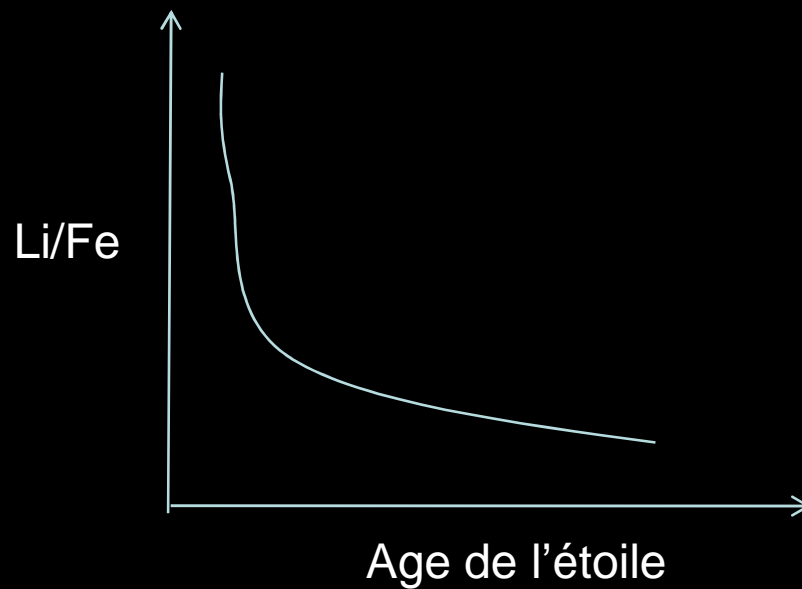


Différence pair/impair
Décroissance quand l'atome s'alourdi
Pic du fer

La nucléosynthèse primordiale

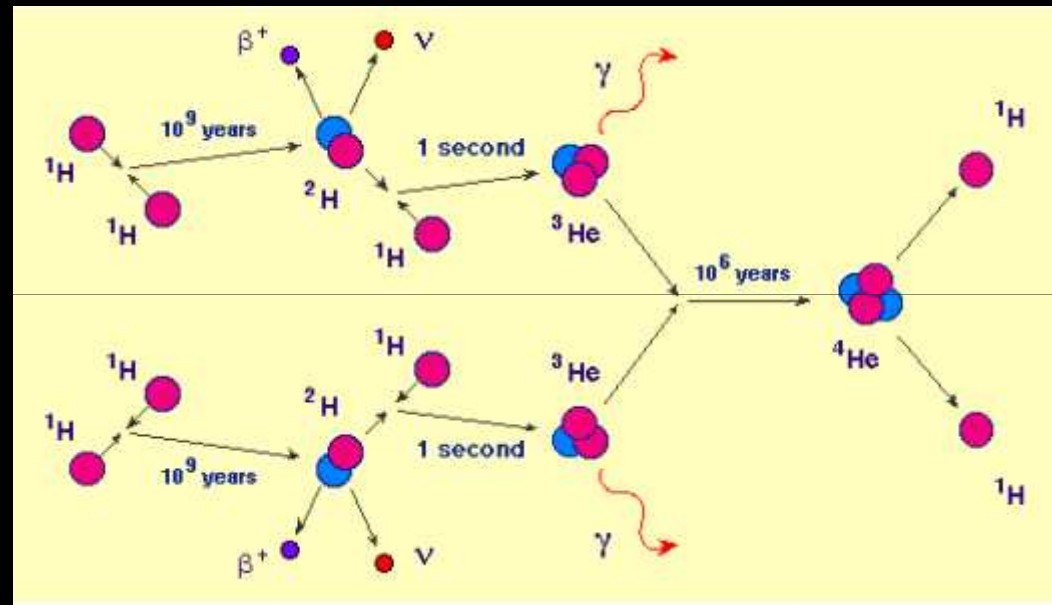
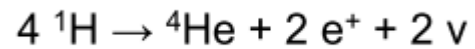
Au moment du Big Bang, on fabrique uniquement certains éléments chimiques.

éléments légers, H, D, T, ${}^7\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$



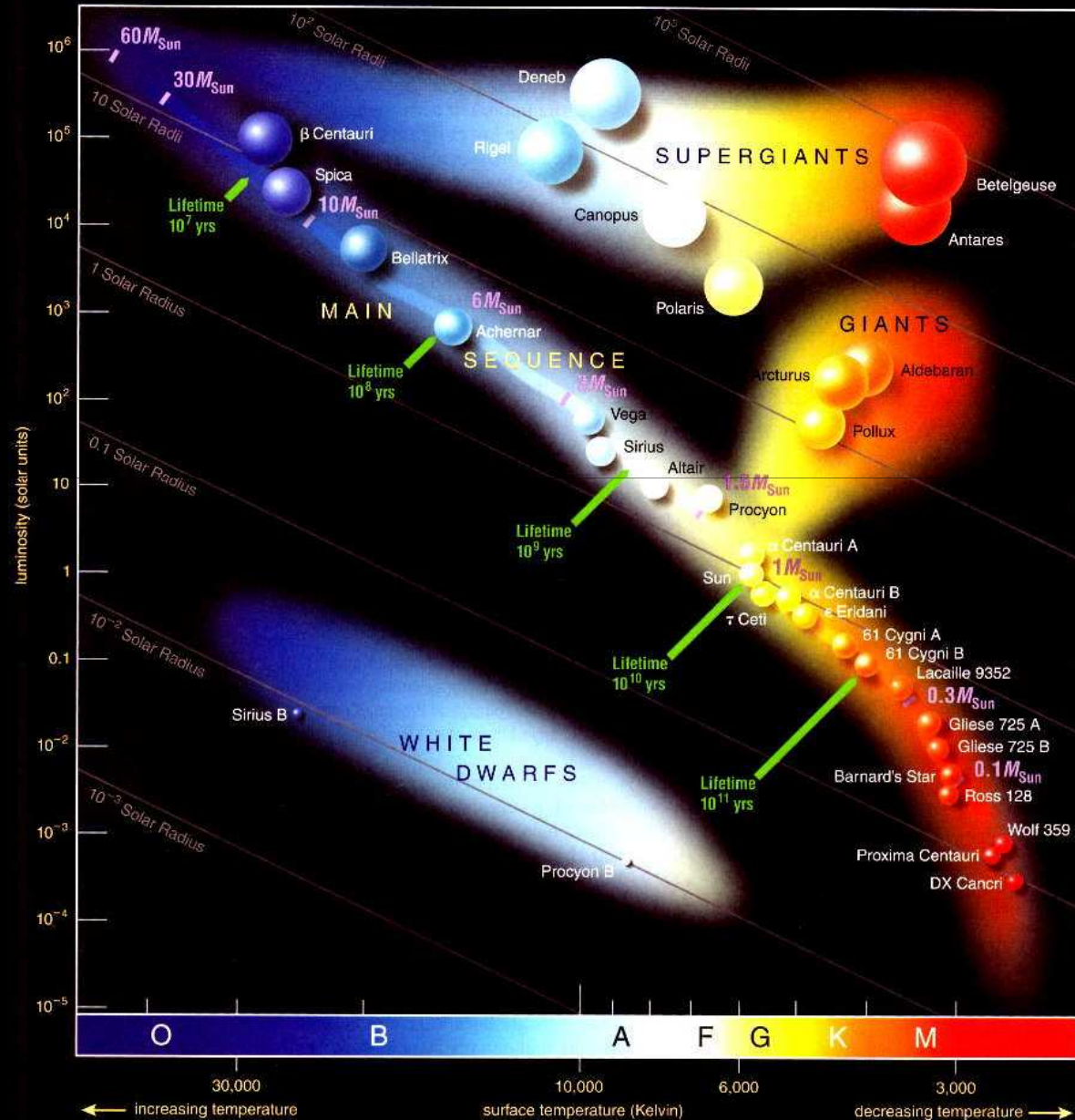
La nucléosynthèse stellaire

La fusion de l'hydrogène



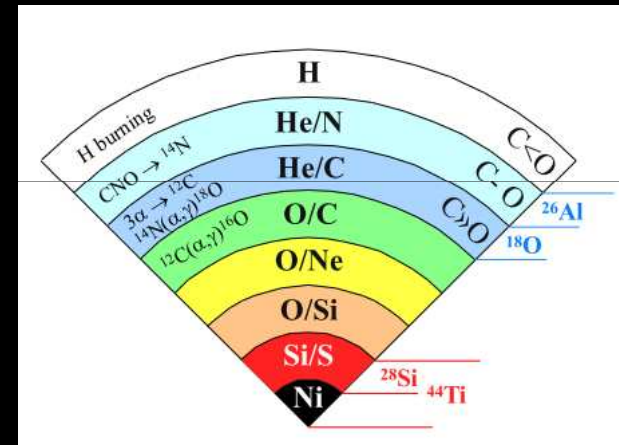
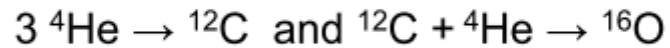
C'est la nucléosynthèse qui se produit au sein du soleil, une étoile de faible masse (et donc qui vit longtemps)

Le diagramme H/R (Hertzprung/Russell)



La nucléosynthèse stellaire

Les étoiles AGB et massives



Formation d'éléments plus lourd.

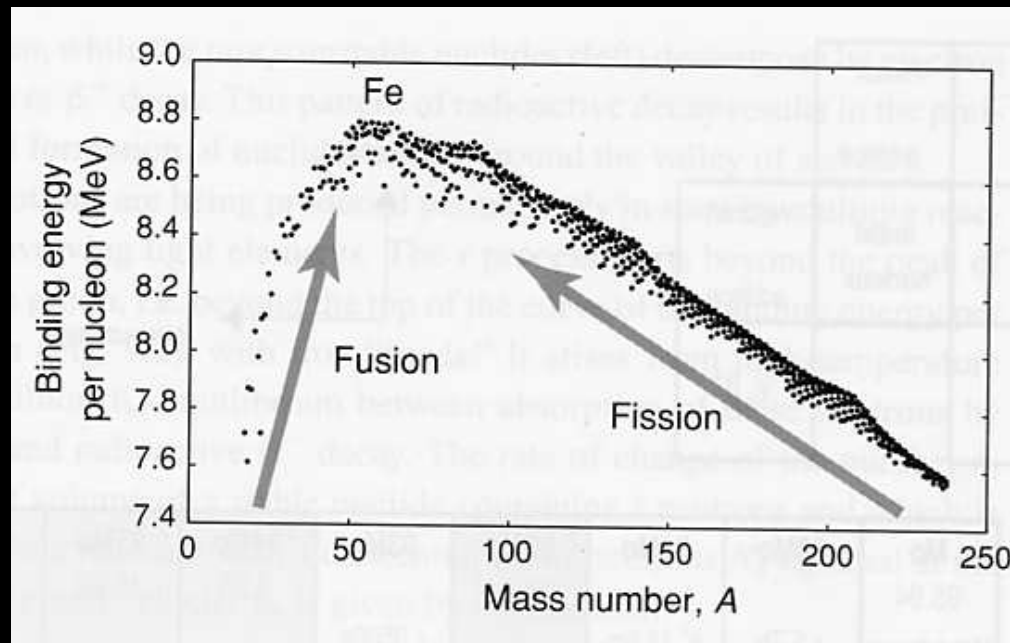
Structure en onion.

Au mieux on arrive à fabriquer jusqu'au Fer

Le pic du fer

Réaction exothermique jusqu'au fer.

Energie de liaison du noyau



Réaction exothermique jusqu'au fer.

Il faut un apport d'énergie pour aller plus loin en masse.

La nucléosynthèse explosive



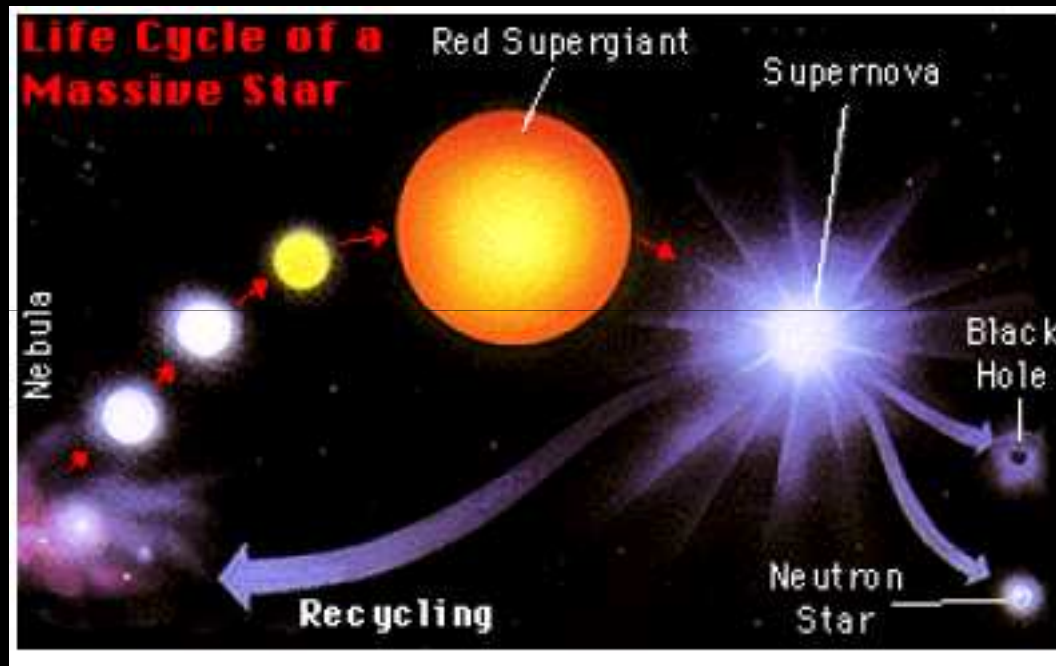
La nucléosynthèse explosive

Une étoile en fin de vie s'effondre et explose.

En a assez d'énergie pour fabriquer la table de Mendeleiev.



Le cycle de vie d'une étoile



« poussières d'étoiles »

REVIEWS OF MODERN PHYSICS

VOLUME 29, NUMBER 4

OCTOBER, 1957

Synthesis of the Elements in Stars*

E. MARGARET BURBIDGE, G. R. BURBIDGE, WILLIAM A. FOWLER, AND F. HOYLE



Hans Bethe



Geoffrey Burbidge



Margret Burbidge



Willy Fowler

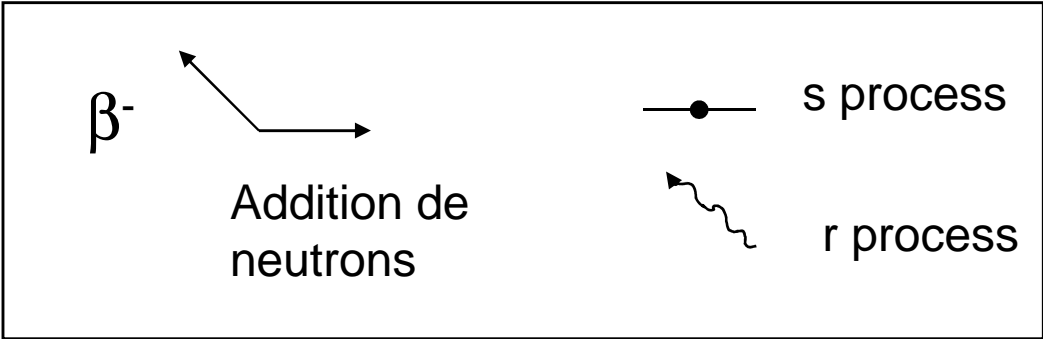
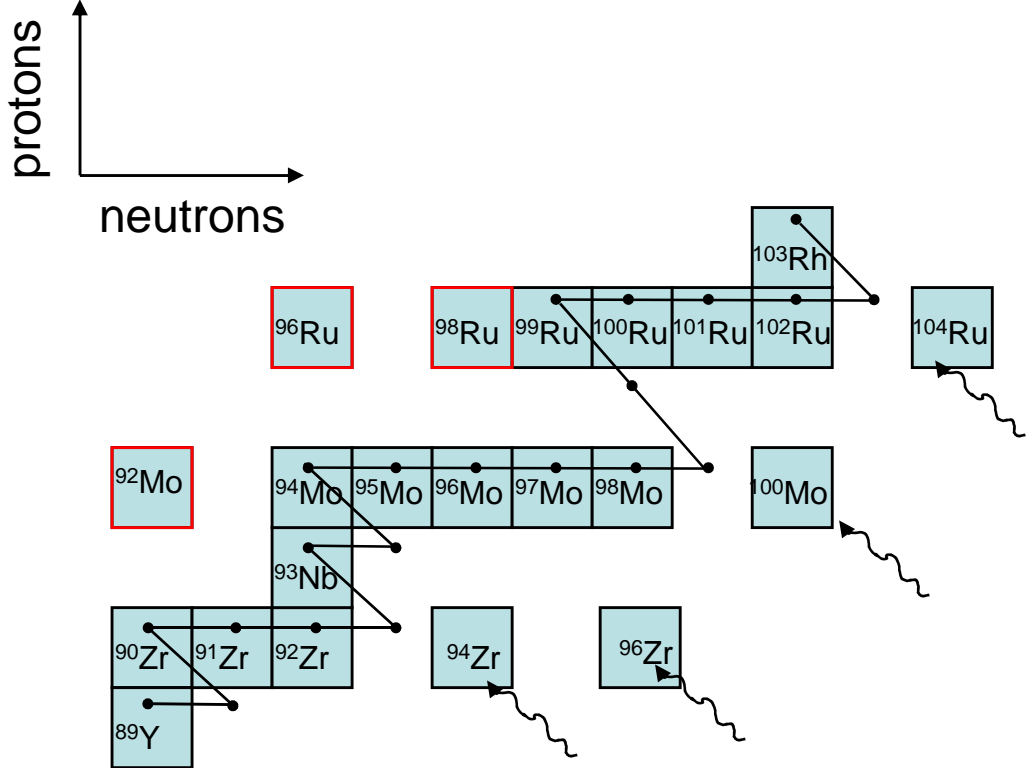


Fred Hoyle

Les compositions isotopiques

3 grands mécanismes

s: slow neutron absorption
 r: rapid neutron absorption
 p: proton absorption



**Chronologie:
Radioactivités longue et
courte**

Loi Curie-Rutherford-Soddy (CRS)

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

Fonction du temps, indépendant de P et T

λ (a^{-1}) la constante de désintégration = probabilité de désintégration pendant dt

$$\Leftrightarrow N = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$T = \ln 2 / \lambda = 0,693 \tau$$



Rappels sur les radioactivités

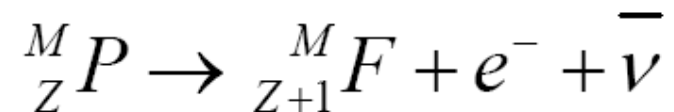
4 grands types de radioactivités.

- beta+ (et capture électronique)
- beta-
- alpha
- fission spontanée

Radioactivité β^-

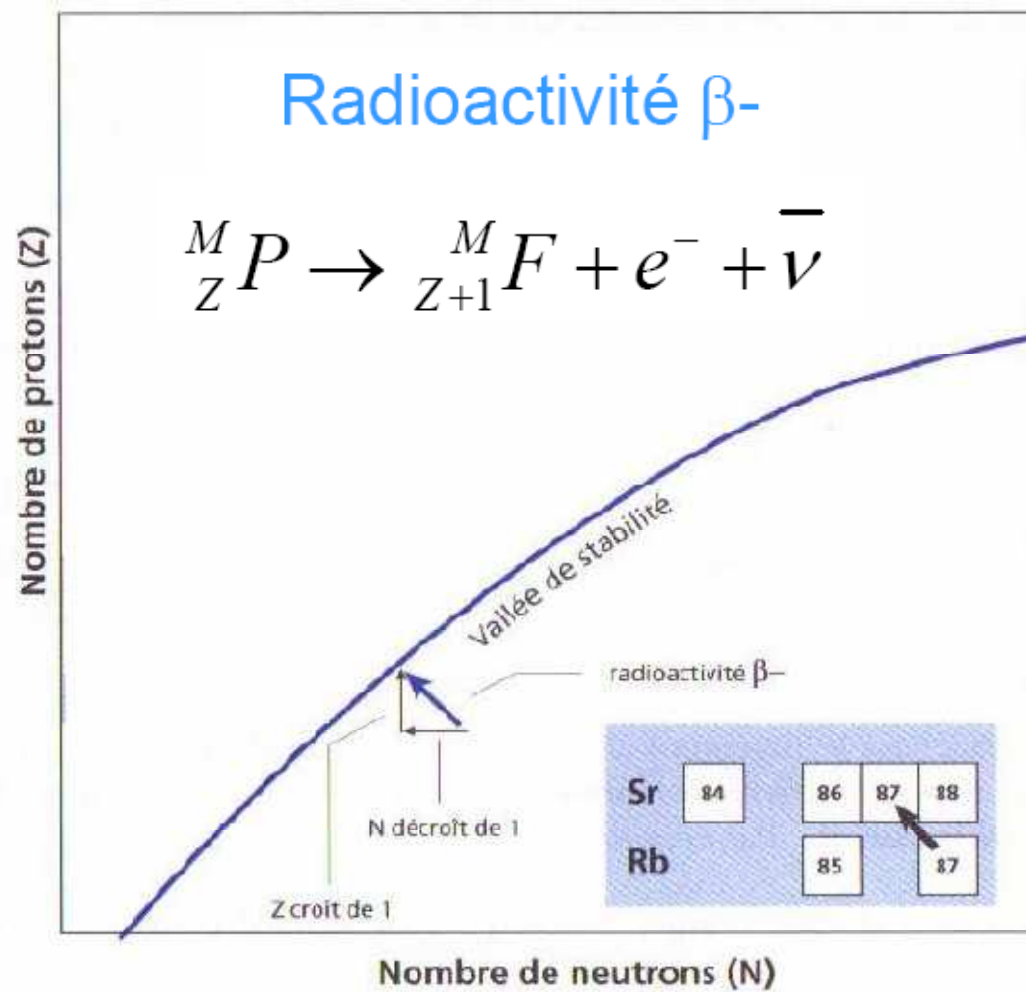
éjection spontanée d'un électron : un neutron devient un proton + un électron (+ un antineutrino)

Père* \rightarrow fils + électron + antineutrino



Ex ${}^{87}\text{Rb}$ to ${}^{87}\text{Sr}$

Rappels sur les radioactivités

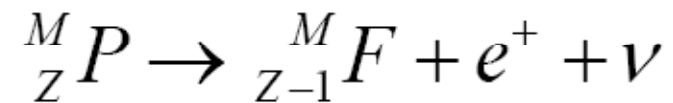


Rappels sur les radioactivités

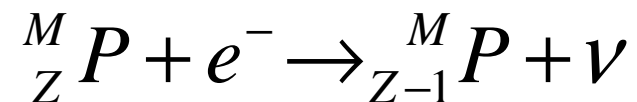
Radioactivité β^+

Expulsion d'un positron (un proton devient un neutron)

Père* \rightarrow fils + positron + neutron

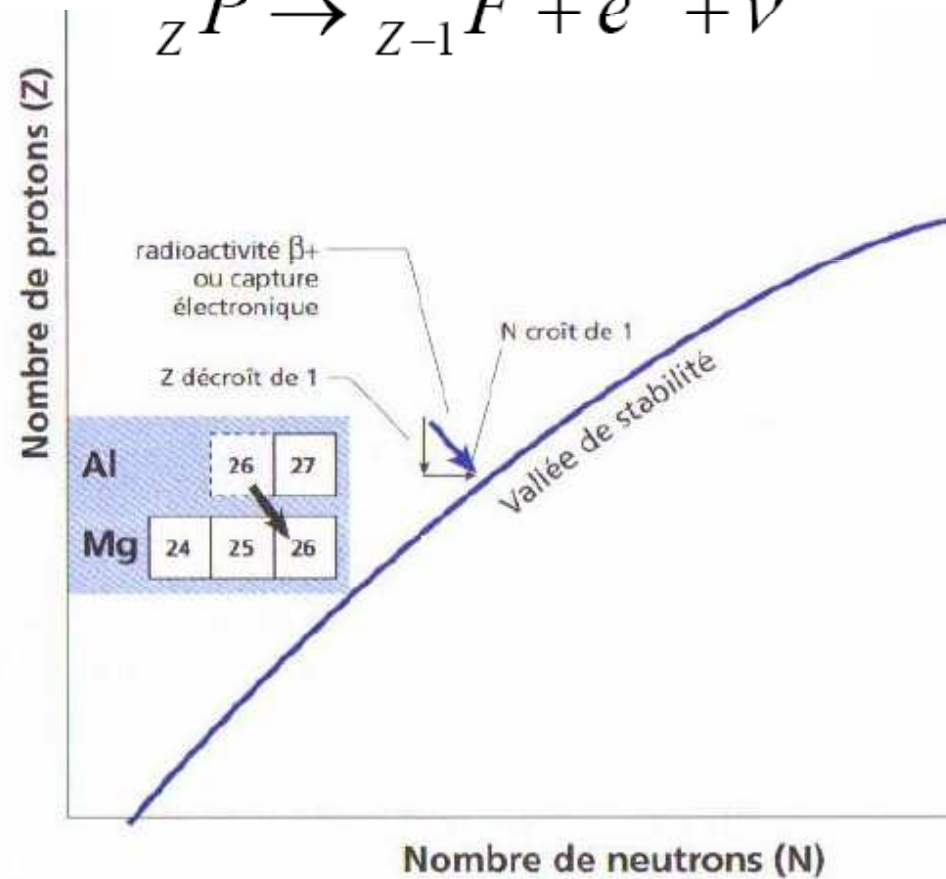
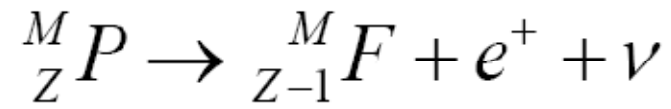


Capture électronique



Rappels sur les radioactivités

Radioactivité β^+



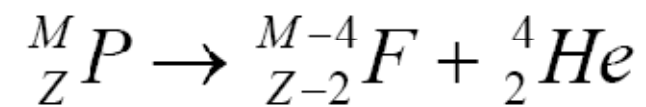
Ex ${}^{26}\text{Al}$ to ${}^{26}\text{Mg}$

Rappels sur les radioactivités

Radioactivité α

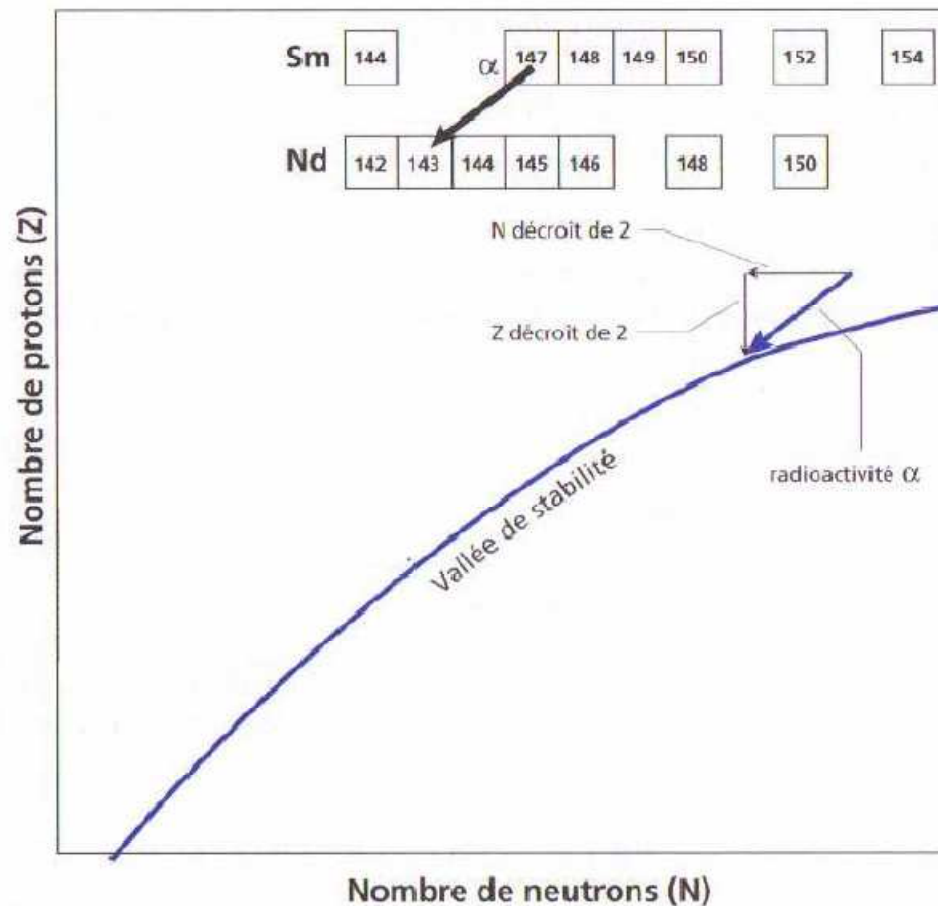
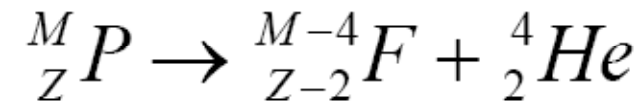
Expulsion d'un noyau d'He.

Père* \rightarrow fils + α



Rappels sur les radioactivités

Radioactivité α



Ex: ${}^{146}Sm$ to ${}^{142}Nd$

1. Outils radiochronologiques

1.2 Les différents types de radioactivités

Table 8.2: LONG-LIVED RADIOACTIVE DECAY SYSTEMS OF GEOCHEMICAL INTEREST

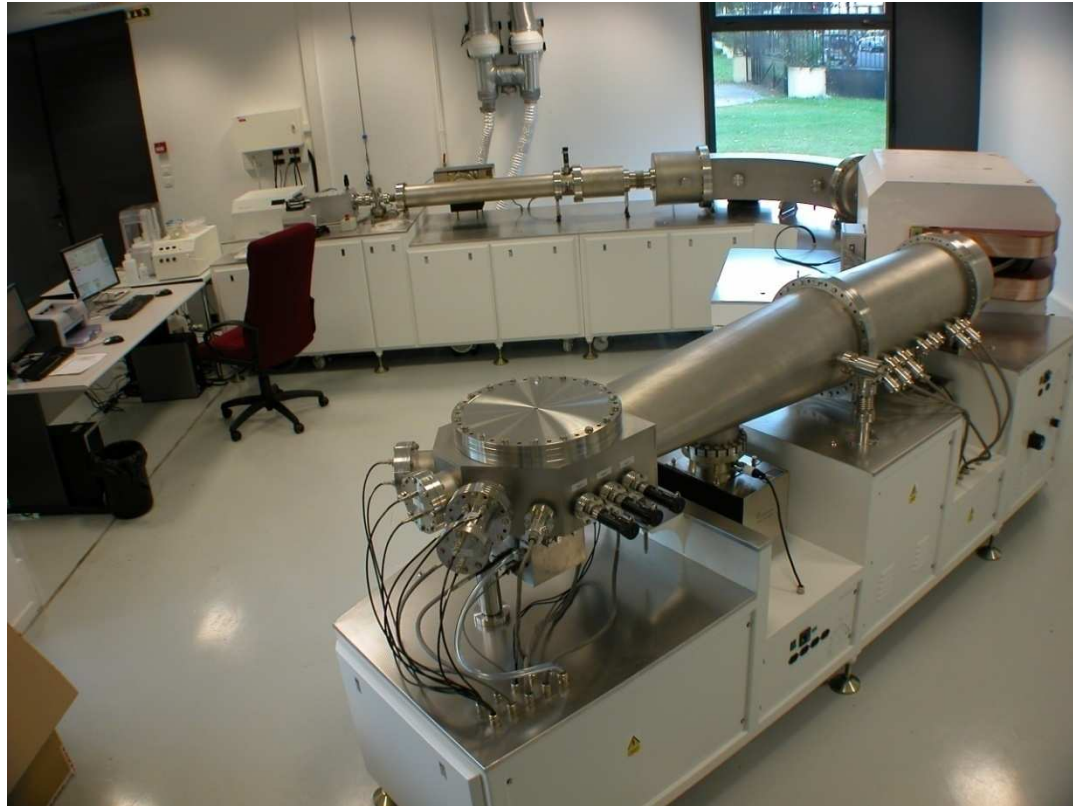
Parent	Decay Mode	λ	Half-life	Daughter	Ratio
^{40}K	β^+ , e.c, β^-	$5.543 \times 10^{-10}\text{y}^{-1}$	$1.28 \times 10^9\text{yr}$	^{40}Ar , ^{40}Ca	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$
^{87}Rb	β^-	$1.42 \times 10^{-11}\text{y}^{-1}$	$4.8 \times 10^{10}\text{yr}$	^{87}Sr	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
^{138}La	β^-	$2.67 \times 10^{-12}\text{y}^{-1}$	$2.59 \times 10^{11}\text{yr}$	^{138}Ce	$^{138}\text{Ce}/^{142}\text{Ce}$, $^{138}\text{Ce}/^{136}\text{Ce}$
^{147}Sm	α	$6.54 \times 10^{-12}\text{y}^{-1}$	$1.06 \times 10^{11}\text{yr}$	^{143}Nd	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$
^{176}Lu	β^-	$1.94 \times 10^{-11}\text{y}^{-1}$	$3.6 \times 10^{10}\text{y}$	^{176}Hf	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$
^{187}Re	β^-	$1.64 \times 10^{-11}\text{y}^{-1}$	$4.23 \times 10^{10}\text{y}$	^{187}Os	$^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$
^{232}Th	α	$4.948 \times 10^{-11}\text{y}^{-1}$	$1.4 \times 10^{10}\text{y}$	^{208}Pb , ^4He	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^3\text{He}/^4\text{He}$
^{235}U	α	$9.849 \times 10^{-10}\text{y}^{-1}$	$7.07 \times 10^8\text{y}$	^{207}Pb , ^4He	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^3\text{He}/^4\text{He}$
^{238}U	α	$1.551 \times 10^{-10}\text{y}^{-1}$	$4.47 \times 10^9\text{y}$	^{206}Pb , ^4He	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^3\text{He}/^4\text{He}$

Note: the branching ratio, i.e. ratios of decays to ^{40}Ar to total decays of ^{40}K is 0.117. The production of ^4He from ^{147}Sm decay is insignificant compared to that produced by decay of U and Th.

Si l'on connaît la quantité initiale, on a une chronologie absolue.

Outils de mesures

Spectromètre de masse



Nu 1700 ENS Lyon

Outils de mesures: chimie

La voie humide:

On dissout la roche (acide fluorhydrique).

On purifie les éléments sur colonnes chromatographiques.

On mesure le rapport sans problème d'interférence. Le liquide est ionisé par une source de chaleur (TIMS) ou au sein d'un plasma (ICP-MS). Très bonne précision.



Outils de mesures: sondes ionique

La voie sèche.

On ne dissous pas la roche.

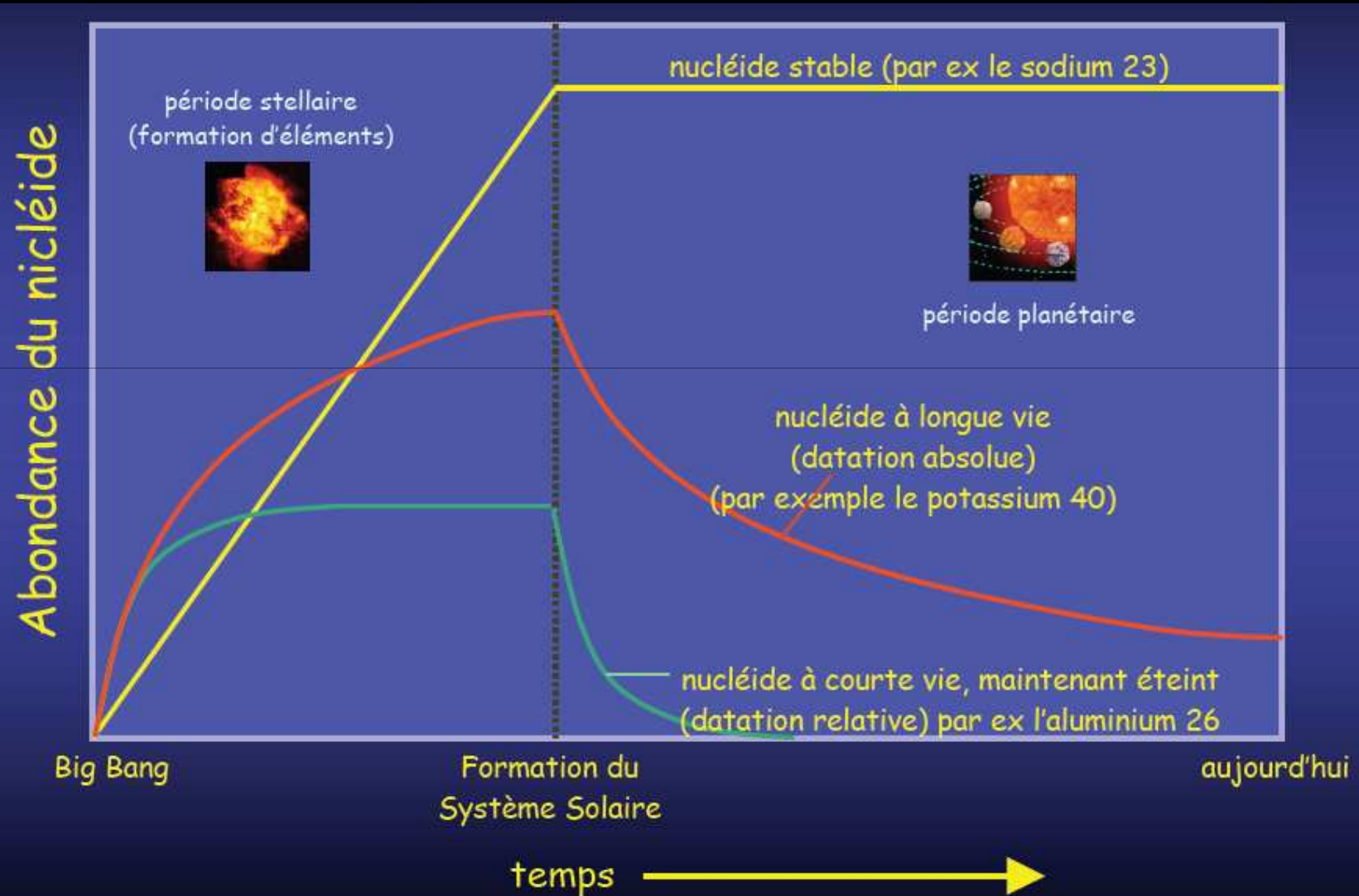
Mesures *in situ*.

-ions secondaires (SIMS et TOF-SIMS)

-on pulvérise avec une source laser et on envoie la poudre vers le spectro (IR, ps to fs).



Radioactivités courtes et longues

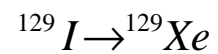


1. Outils radiochronologiques

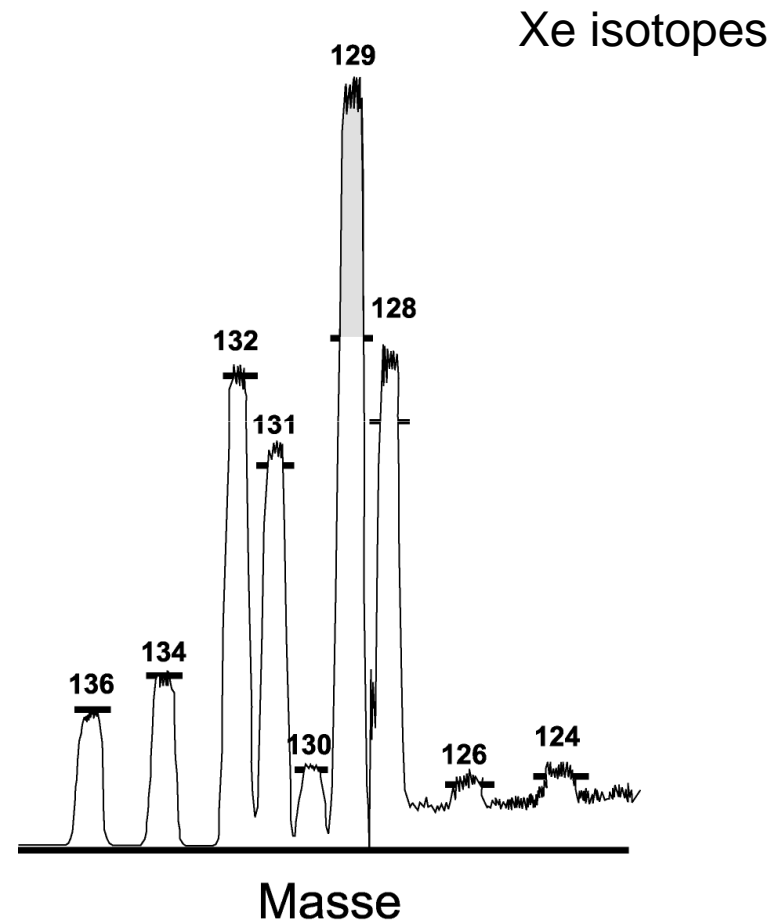
1.3 Les radioactivités éteintes

Radioactivité éteinte: demi-vie très courte devant l'âge du SS: L'élément père est totalement désintégré.

Excès du à la désintégration de l'iode 129.



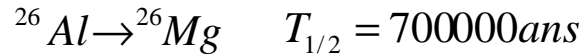
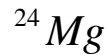
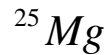
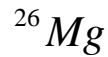
$$T_{1/2} = 16\text{Ma}$$



Chondrite Richardton, Reynolds 1960

Les radioactivités éteintes

Aluminium Magnésium



$$^{26}\text{Mg}_{\text{mes}} = ^{26}\text{Mg}_{\text{SS}} + ^{26}\text{Al}_{\text{SS}} e^{-\lambda t}$$

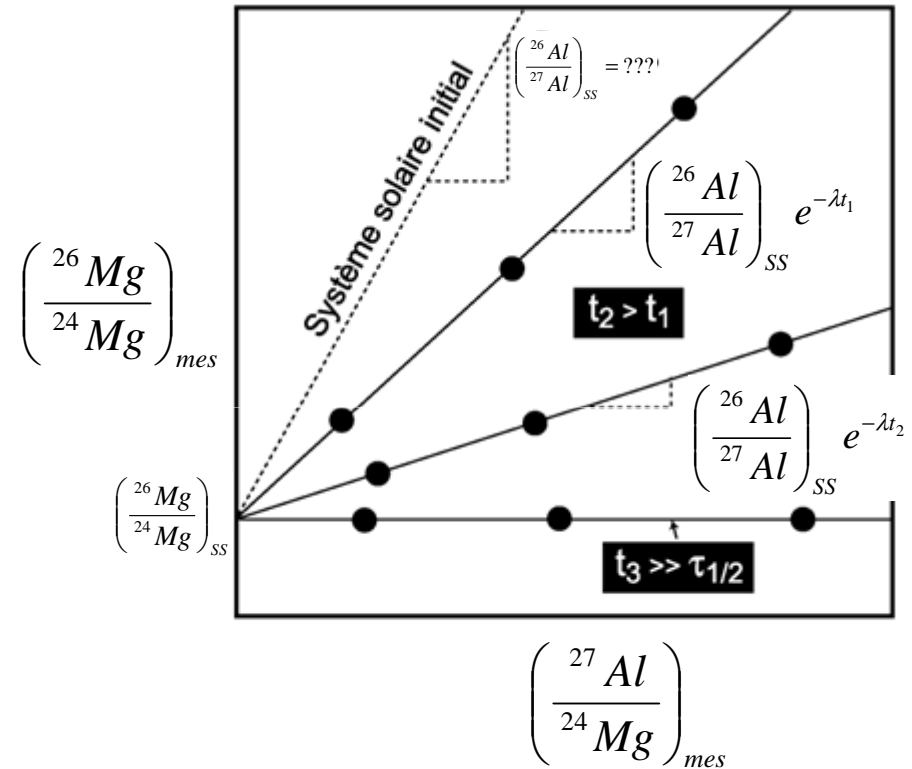
$$^{24}\text{Mg}_{\text{mes}} = ^{24}\text{Mg}_{\text{SS}}$$

$$\left(\frac{^{26}\text{Mg}}{^{24}\text{Mg}} \right)_{\text{mes}} = \left(\frac{^{26}\text{Mg}}{^{24}\text{Mg}} \right)_{\text{SS}} + \left(\frac{^{26}\text{Al}}{^{24}\text{Mg}} \right)_{\text{SS}} e^{-\lambda t}$$

$$\Leftrightarrow \left(\frac{^{26}\text{Mg}}{^{24}\text{Mg}} \right)_{\text{mes}} = \left(\frac{^{26}\text{Mg}}{^{24}\text{Mg}} \right)_{\text{SS}} + \left(\frac{^{27}\text{Al}}{^{24}\text{Mg}} \right)_{\text{mes}} \left(\frac{^{26}\text{Al}}{^{27}\text{Al}} \right)_{\text{SS}} e^{-\lambda t}$$

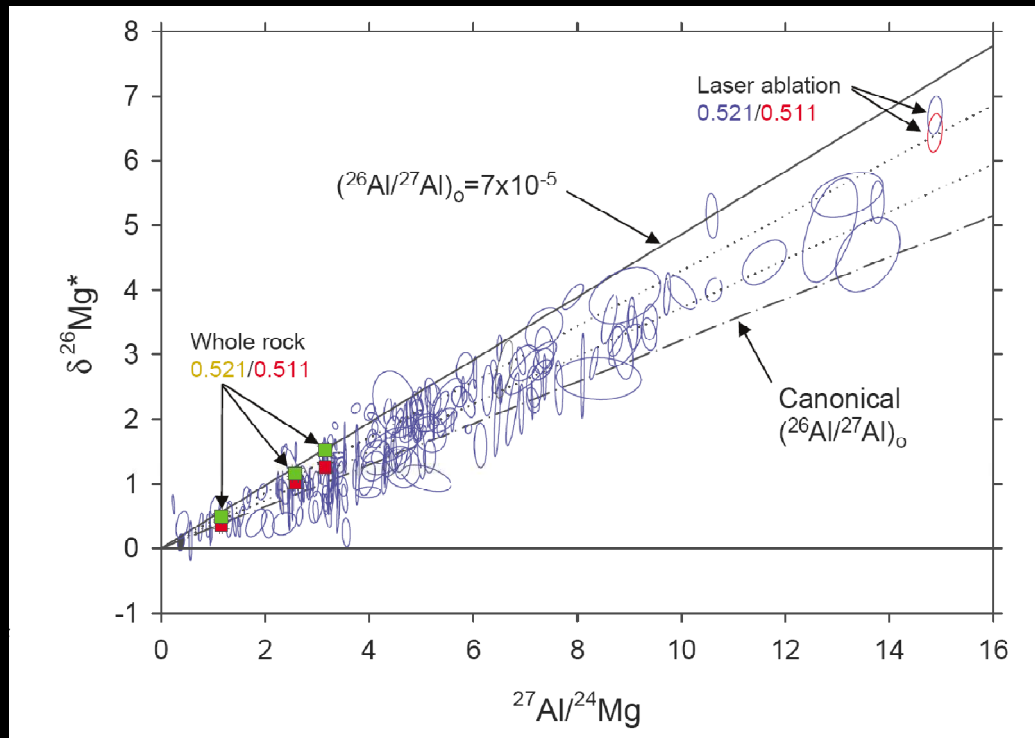
Dépend de la phase minérale

Dépend de la date de formation et du rapport initial



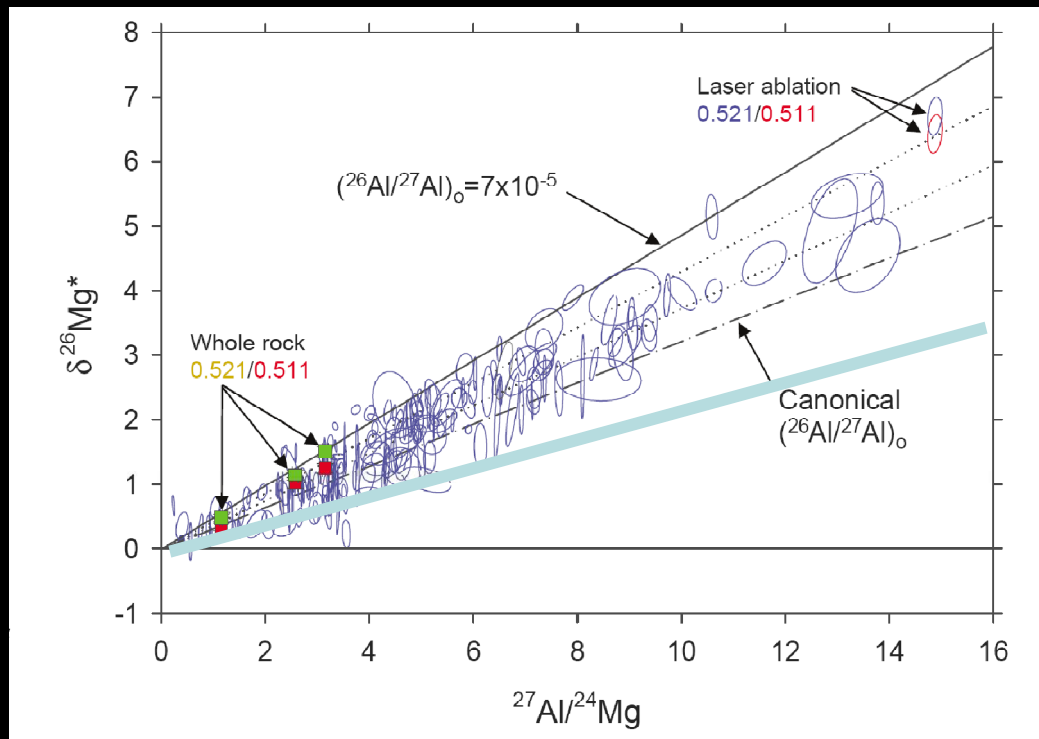
Les radioactivités éteintes

Mesures dans les CAI d'Allende.



Young et al., *Science* 2005

Les radioactivités éteintes



Je suis une météorite qui a un rapport:

$$^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} = 3.5 \cdot 10^{-5}$$

Quel est mon âge?

Les radioactivités éteintes

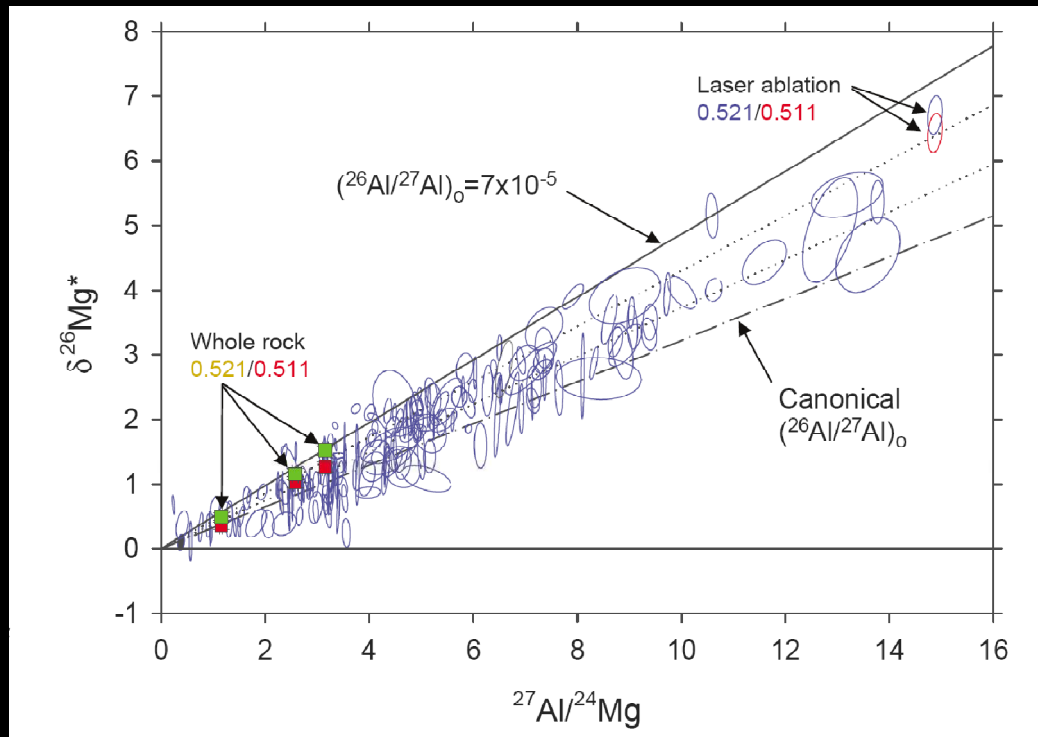
Remarque:

Lorsque l'on date par radiochronologie on date la fermeture d'un échange chimique.
Notion de température de fermeture.

L'utilité d'un système radioactif dépend de la demie-vie et des affinités chimiques du père et du fils (on date une séparation chimique).

Les radioactivités éteintes

Grace à ces radioactivités éteintes on peut construire une chronologie très précise des premiers instants du Système Solaire



Quelques radioactivités éteintes

TABLE 2. Short-lived radioisotopes for which evidence has been found in meteorites.

Radioisotope*	Half-life (m.y.)	Daughter Isotope	Reference Isotope	Initial Abundance	Reference
⁴¹ Ca	0.10	⁴¹ K	⁴⁰ Ca	1.5×10^{-8}	[1]
²⁶ Al	0.74	²⁶ Mg	²⁷ Al	5×10^{-5}	[2]
¹⁰ Be	1.5	¹⁰ B	⁹ Be	$\sim 5 \times 10^{-4}$	[3]
⁶⁰ Fe	1.5	⁶⁰ Ni	⁵⁶ Fe	$\sim 1.5 \times 10^{-6}$	[4]
⁵³ Mn	3.7	⁵³ Cr	⁵⁵ Mn	$\sim 2 \times 10^{-5}$	[5]
¹⁰⁷ Pd	6.5	¹⁰⁷ Ag	¹⁰⁸ Pd	4.5×10^{-5}	[6]
¹⁸² Hf	9	¹⁸² W	¹⁸⁰ Hf	2×10^{-4}	[7]
¹²⁹ I	16	¹²⁹ Xe	¹²⁷ I	10^{-4}	[8]
²⁴⁴ Pu	81	Fission Xe	²³⁸ U	$(4-7) \times 10^{-3}$	[9]
¹⁴⁶ Sm	103	¹⁴² Nd	¹⁴⁴ Sm	8×10^{-3}	[10]
⁷ Be	53 d	⁷ Li	⁹ Be	5×10^{-3}	[11]
³⁶ Cl	0.3	³⁶ Ar, ³⁶ S	³⁵ Cl	$(0.14-1) \times 10^{-5}$	[12]
¹³⁵ Cs	2.3	¹³⁵ Ba	¹³³ Cs	$(1-5) \times 10^{-4}$	[13]
²⁰⁵ Pb	15	²⁰⁵ Tl	²⁰⁴ Pb	10^{-4}	[14]
⁹² Nb	35	⁹² Zr	⁹² Nb	$\sim 1.5 \times 10^{-5}$	[15]

*For the five isotopes in the lower panel, only hints exist that need confirmation.

References: [1] *Srinivasan et al.* (1994, 1996); [2] *Lee et al.* (1976, 1977); [3] *McKeegan et al.* (2000); [4] *Shukolyukov and Lugmair* (1993), *Tachibana and Huss* (2003), *Mostefaoui et al.* (2005); [5] *Birck and Allègre* (1985), *Lugmair and Shukolyukov* (1998); [6] *Kelly and Wasserburg* (1978); [7] *Lee and Halliday* (1995), *Harper and Jacobsen* (1996), *Kleine et al.* (2002), *Yin et al.* (2002); [8] *Jeffery and Reynolds* (1961); [9] *Rowe and Kuroda* (1965); [10] *Lugmair and Marti* (1977), *Lugmair and Galer* (1992); [11] *Chaussidon et al.* (2004); [12] *Murty et al.* (1997), *Lin et al.* (2005); [13] *McCulloch and Wasserburg* (1978), *Hiidaka et al.* (2001); [14] *Nielsen et al.* (2004); [15] *Harper* (1996), *Schönbächler et al.* (2002).

SUR

MOINS
SUR

Une formation par irradiation?

Gounelle et al., 2006

Origine par supernovae???

Origine par irradiation par le soleil jeune.

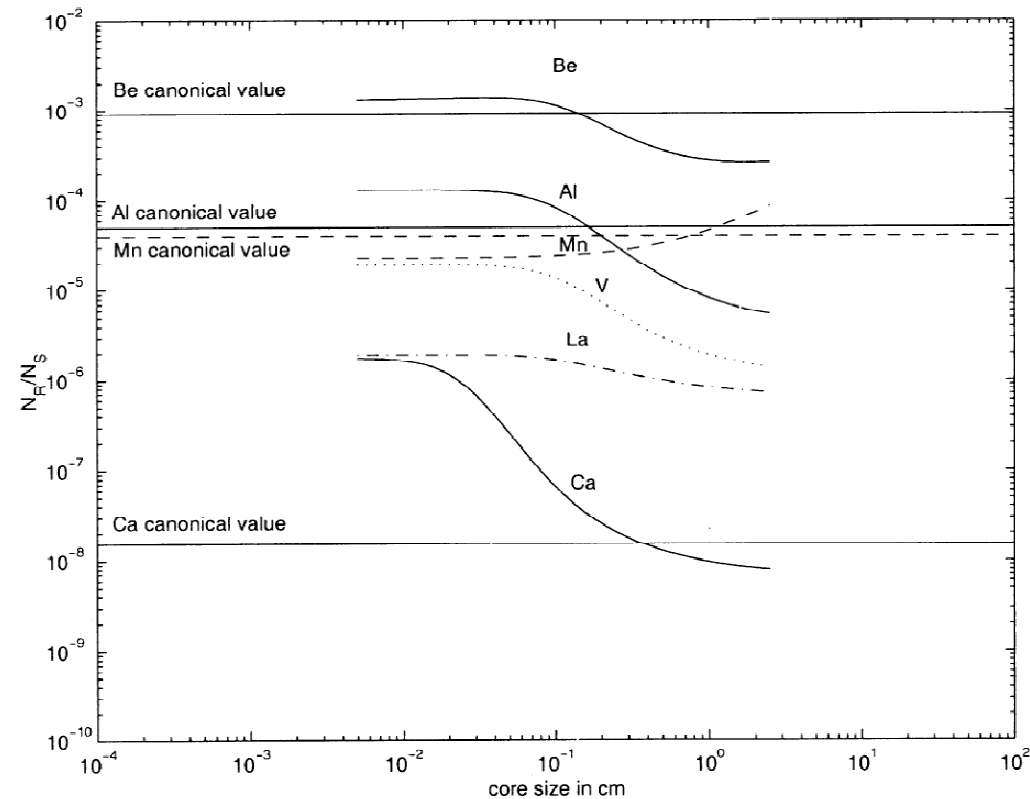
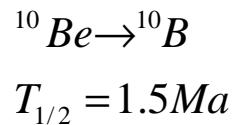
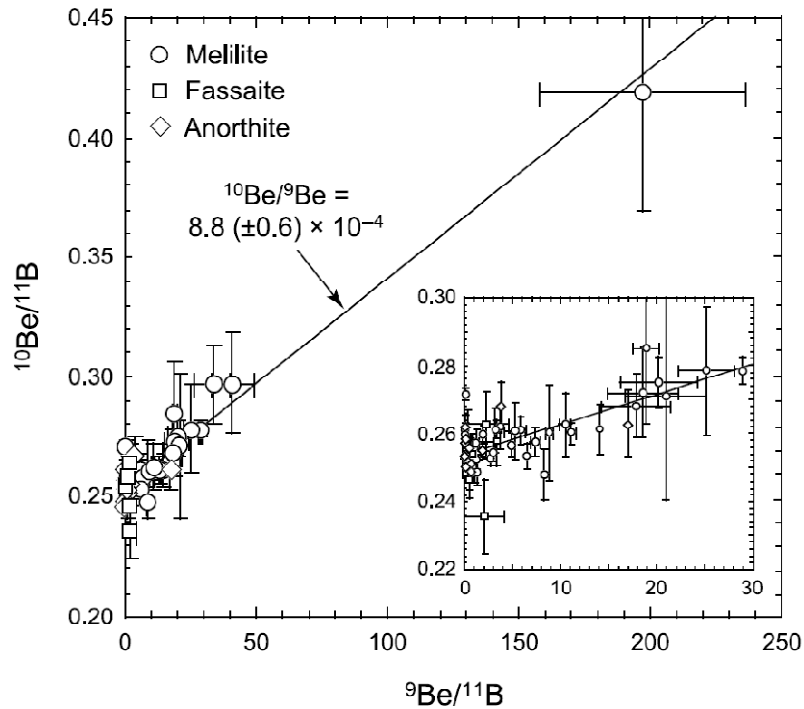
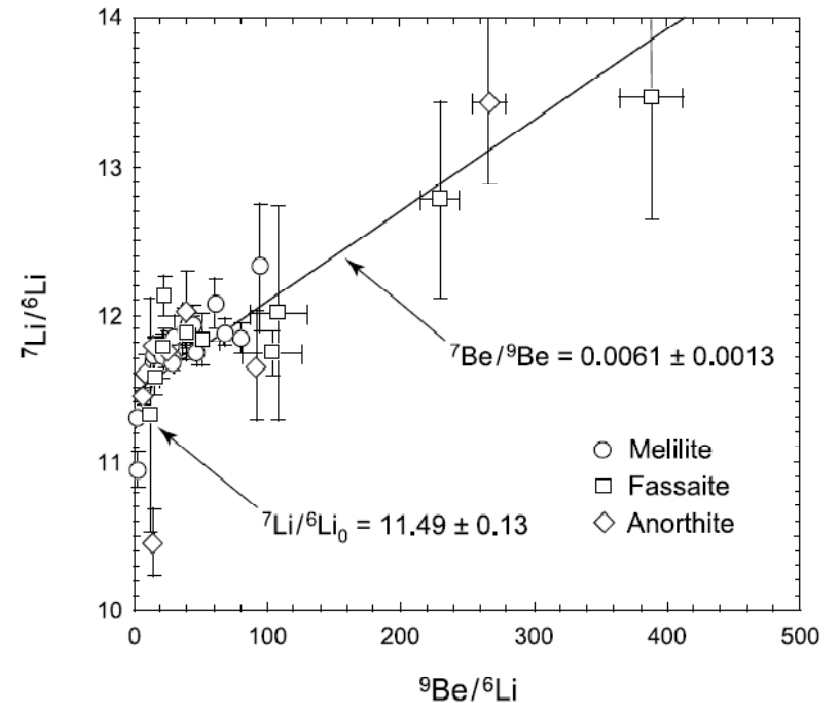


FIG. 3.—Same as Fig. 2d except that 1% of the target ^{40}Ca is distributed uniformly in the ferromagnetic mantle.

Le Beryllium 10



Chaussidon, 2006.



^7Be et ^9Be sont deux isotopes radioactifs produits par spallation.



Le Fer 60

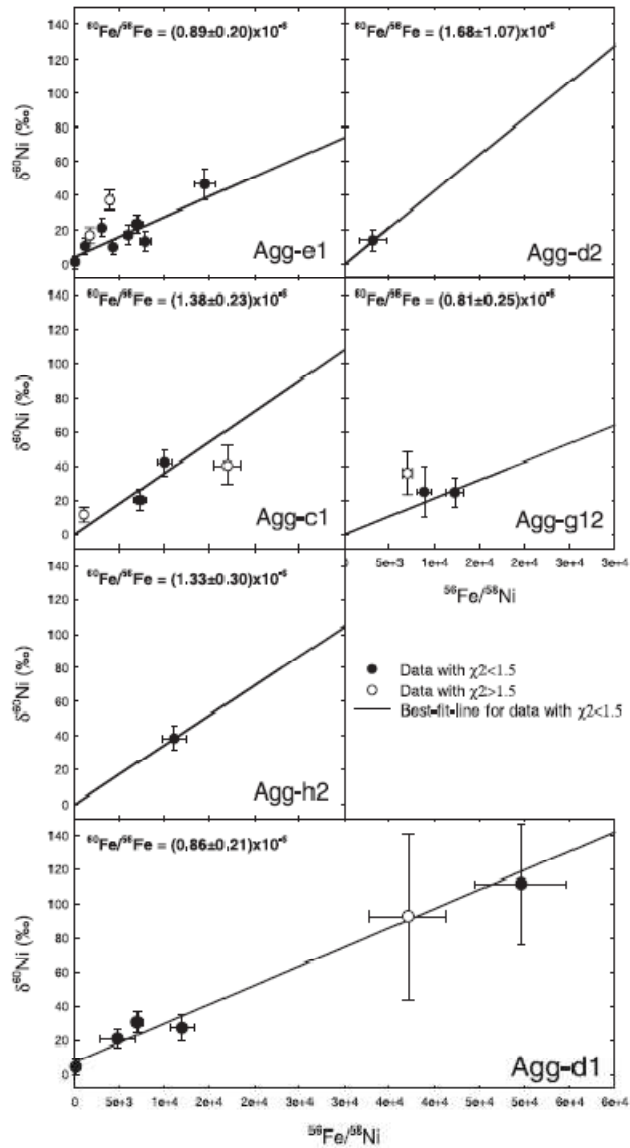


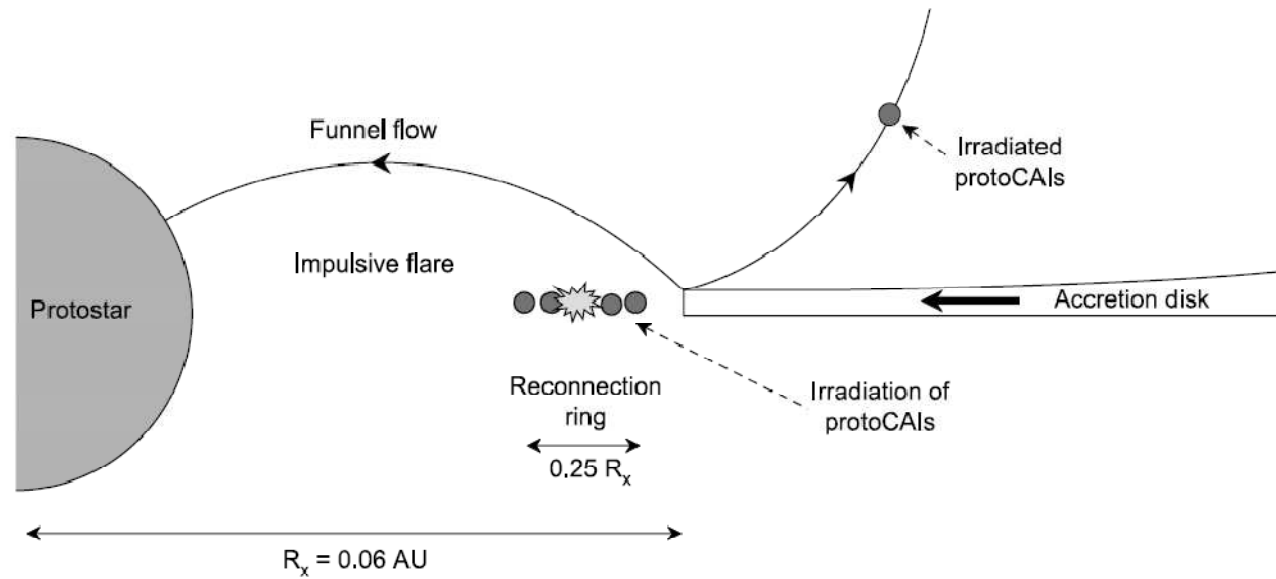
FIG. 3.—Parameter $\delta^{60}\text{Ni}$ as a function of $^{56}\text{Fe}/^{58}\text{Ni}$ for six metal-free troilite aggregates in the Semarkona chondrite. The best-fit lines are calculated for results with $\chi^2 < 1.5$ (filled symbols). Here $\delta^{60}\text{Ni} = [(^{60}\text{Ni}/^{62}\text{Ni})_{\text{sample}} / (^{60}\text{Ni}/^{62}\text{Ni})_{\text{standard}} - 1] \times 1000$. The $^{60}\text{Fe}/^{56}\text{Fe}$ ratios derived from the slopes of each individual aggregate are indicated. For samples c1, d2, g12, and h2 the regression lines were forced through $\delta^{60}\text{Ni} = 0$. All errors are 1σ .

Mostefaoui et al., 2005



Quelle origine pour les radioactivités éteintes?

Irradiation comme source des radioactivités éteintes: chronologie du SS primitif remise en cause...distribution hétérogène.

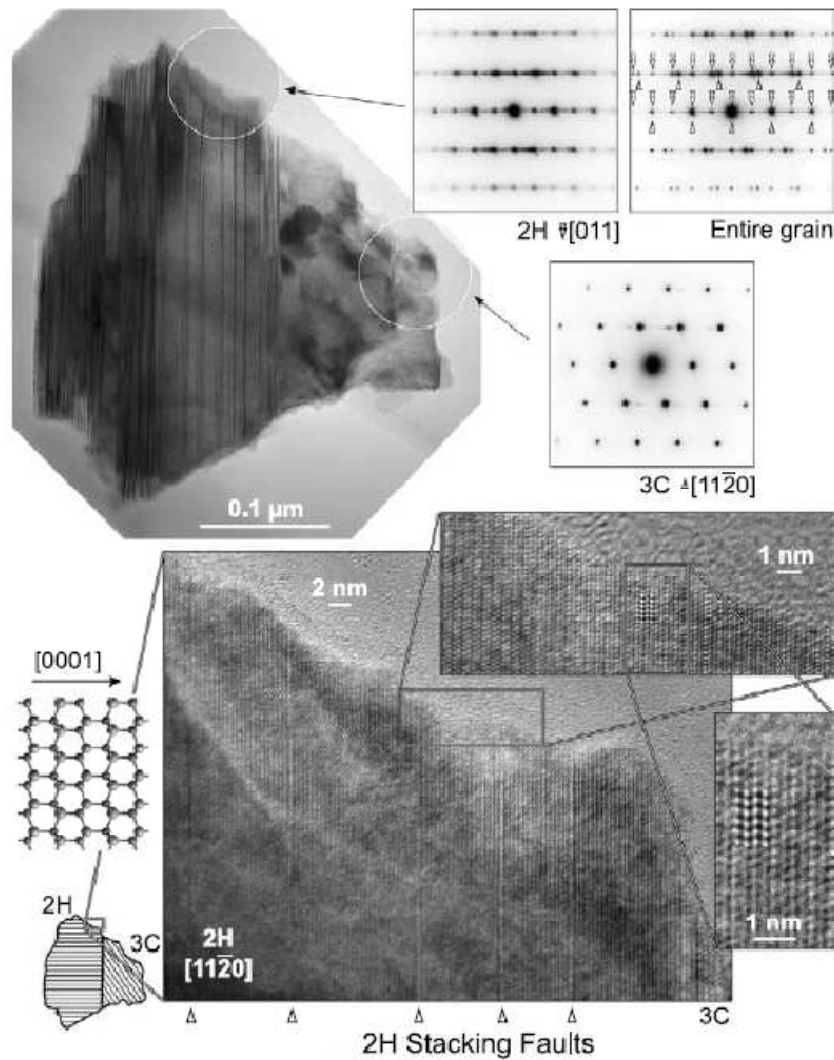


Modèle de Shu (1997)

**Qu'est ce qu'il y avait avant le
Système Solaire?**

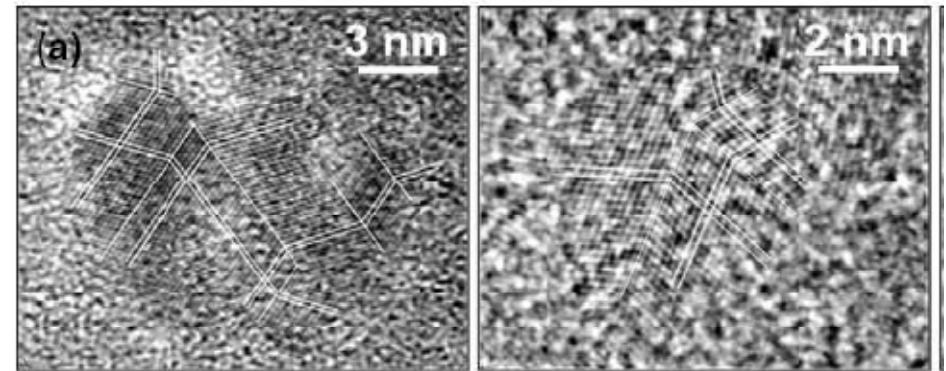
Les grains présolaires

Bernatowicz, 2006

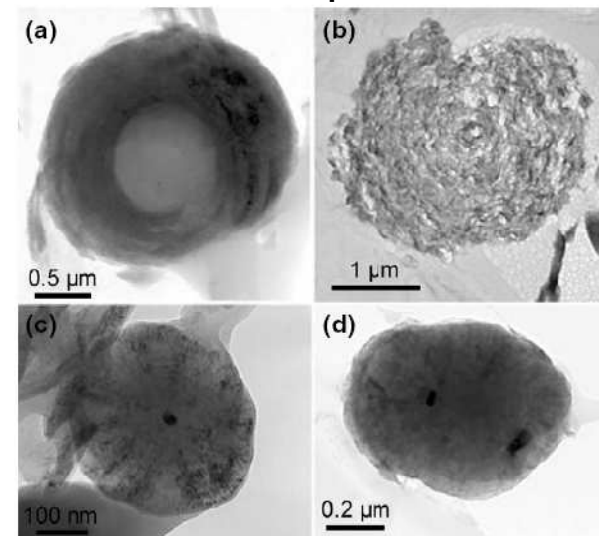


SiC

Diamant (discuté)



Graphite



Les grains présolaires

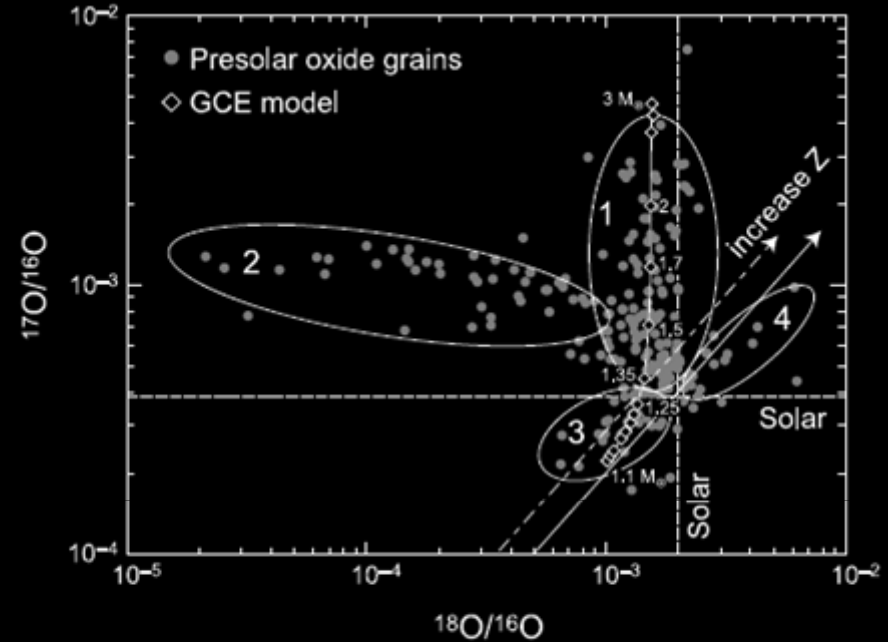
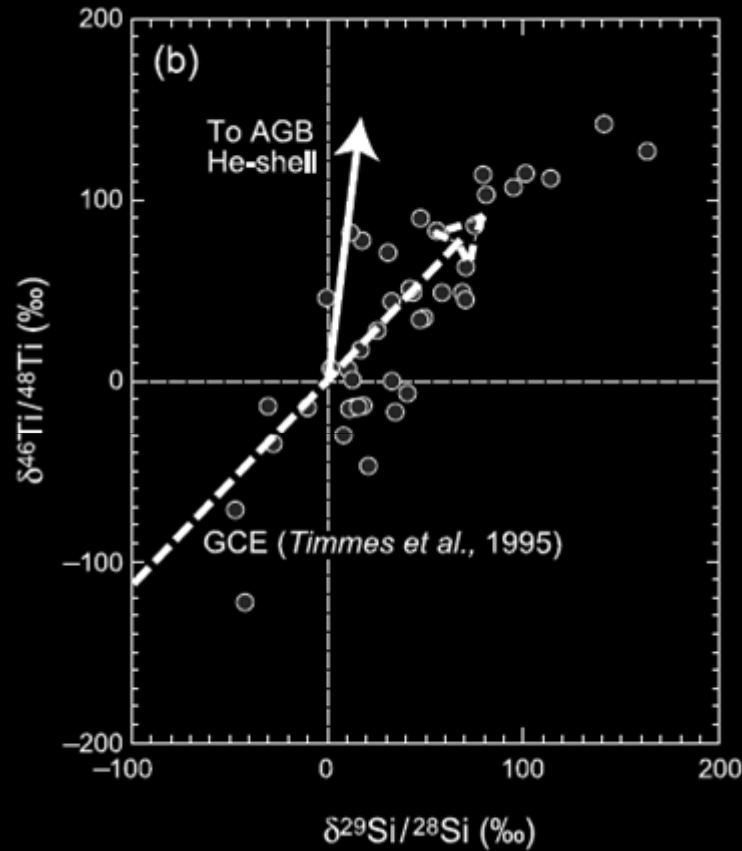
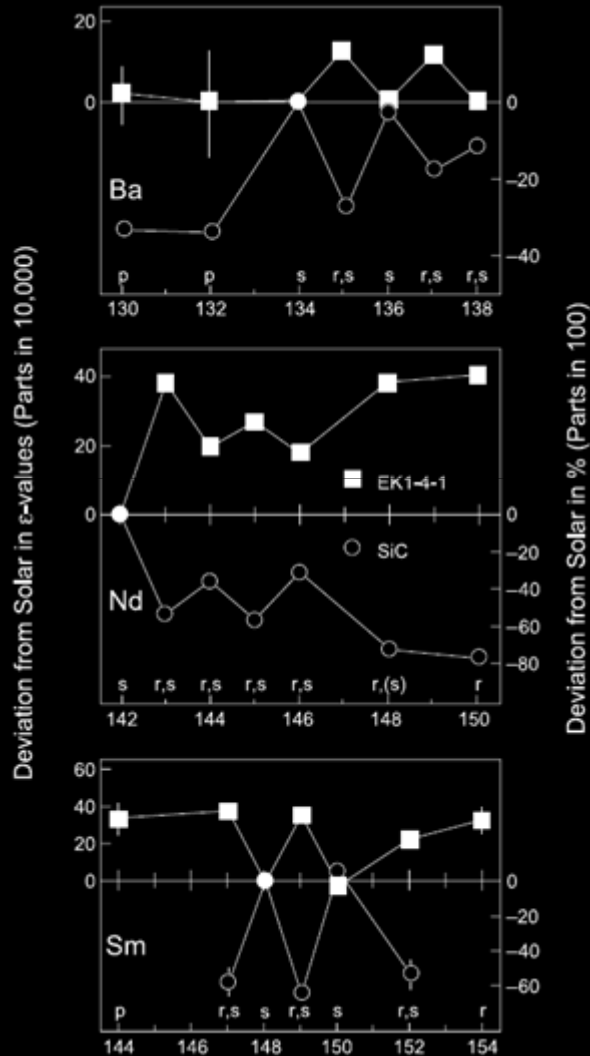


Fig. 7. Oxygen-isotopic ratios measured in presolar oxide minerals (mostly Al_2O_3 and MgAl_2O_4) from meteorites. Ellipses indicate group definitions of Nittler *et al.* (1997). Arrows indicate the expected GCE of O isotopes in the ISM (solid line: $^{18}\text{O}/^{17}\text{O} = 5.2$; dash-dot arrow: $^{18}\text{O}/^{17}\text{O} = 3.5$). Open diamonds indicate predicted average O-isotopic compositions of presolar red giant stars of different masses, taking into account GCE, the first dredge-up, and stellar lifetimes (Nittler *et al.*, 1997); stellar masses are indicated for some points. The good agreement between the GCE model and the Group 1 and 3 oxide grains indicates that these grains formed in red giant stars and that the $^{18}\text{O}/^{17}\text{O}$ ratio of the Sun is not atypical for its age and location in the galaxy. Data from Nittler (1997, and references therein), Choi *et al.* (1998), and Zinner *et al.* (2003).

Nittler and Dauphas, 2006

Anomalies nucléosynthétiques



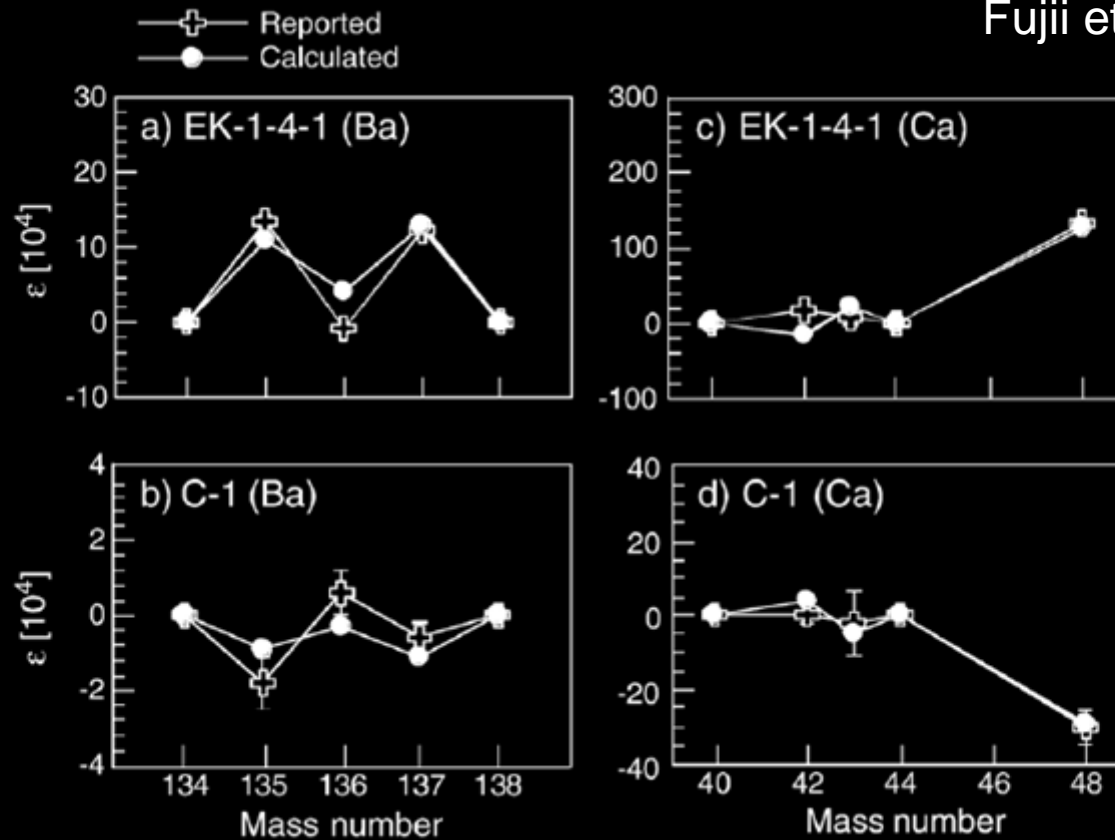
Anomalies dans les CAI d'isotopes issu du processus r.

Spectres opposé à celui du SiC

Mélange de source différentes à l'origine du SS?

Anomalie nucléosynthétiques

Fujii et al., 2006

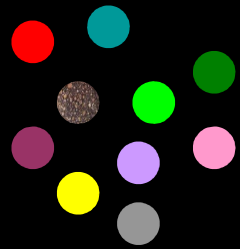


Effet de la nuclear size and shape??

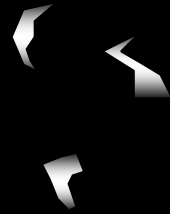
Les chondrites: des fossiles du Système Solaire primitif

Les chondrites

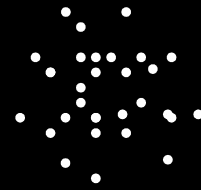
Chondres + Métal/Sulfures + Matrice + CAI



100 μm -3 mm



50 μm -3 mm



< 50 μm



50 μm - 5 mm

Moyenne=600 μm
Environnement à
gravité réduite

=



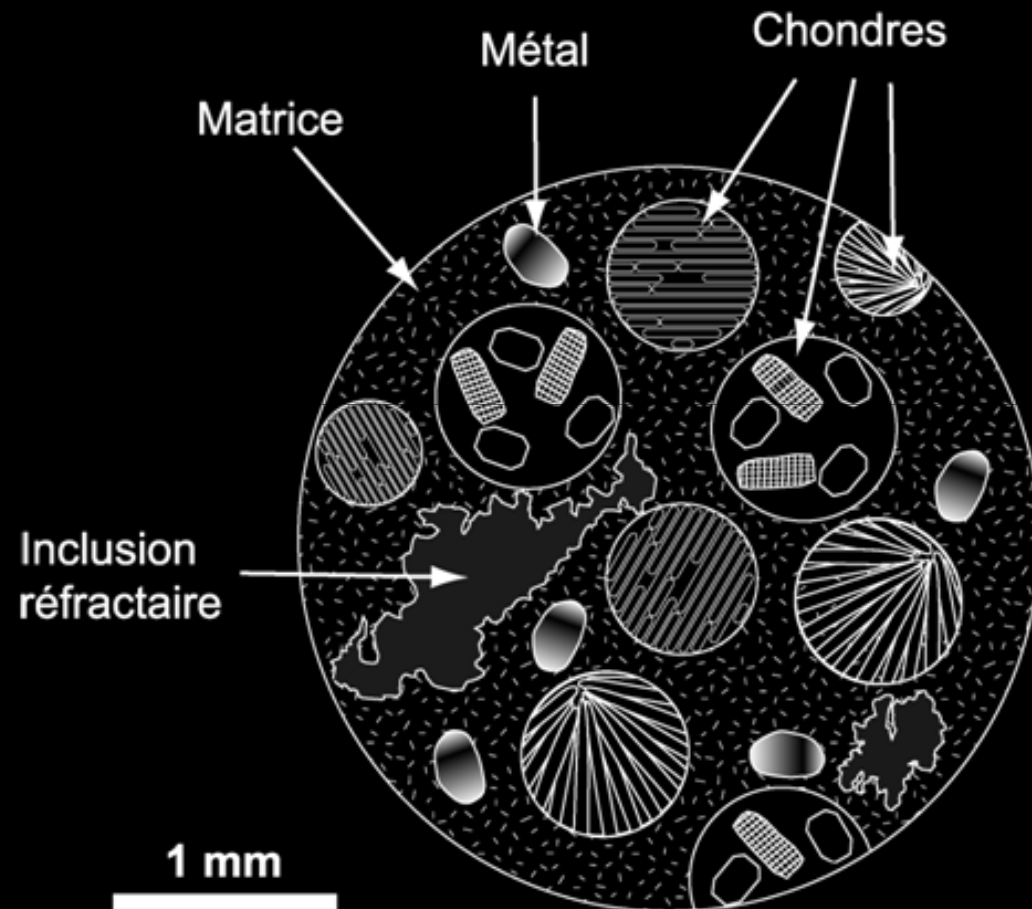
82 % des
météorites

Les chondrites

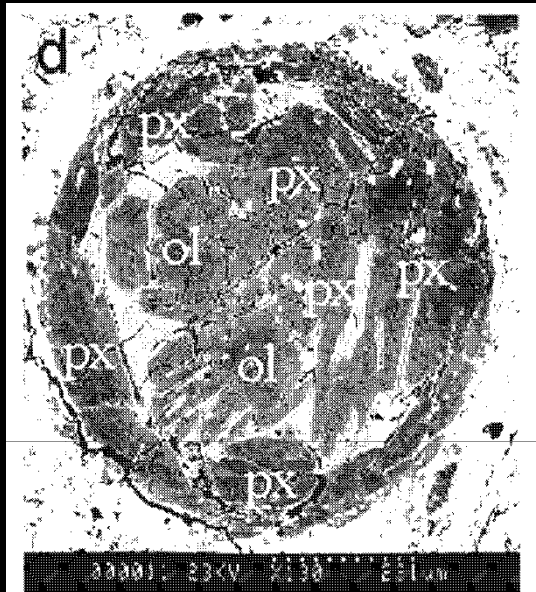


ALLENDE, CV3, MEXICO

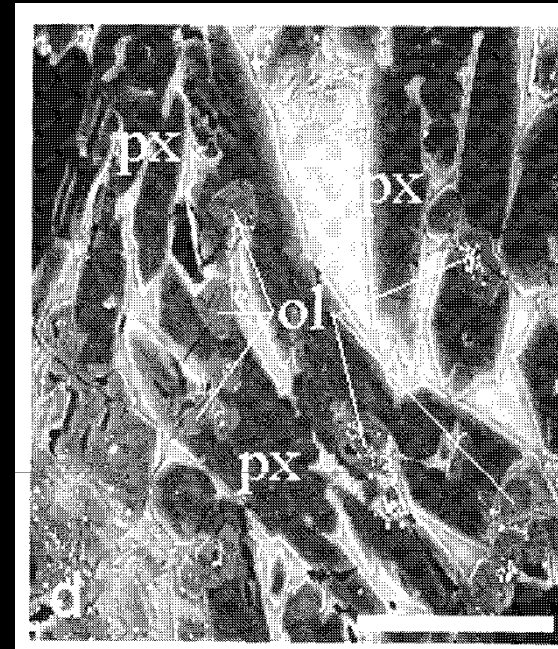
Photo & Collection
Harald Stehlik



Texture des chondres



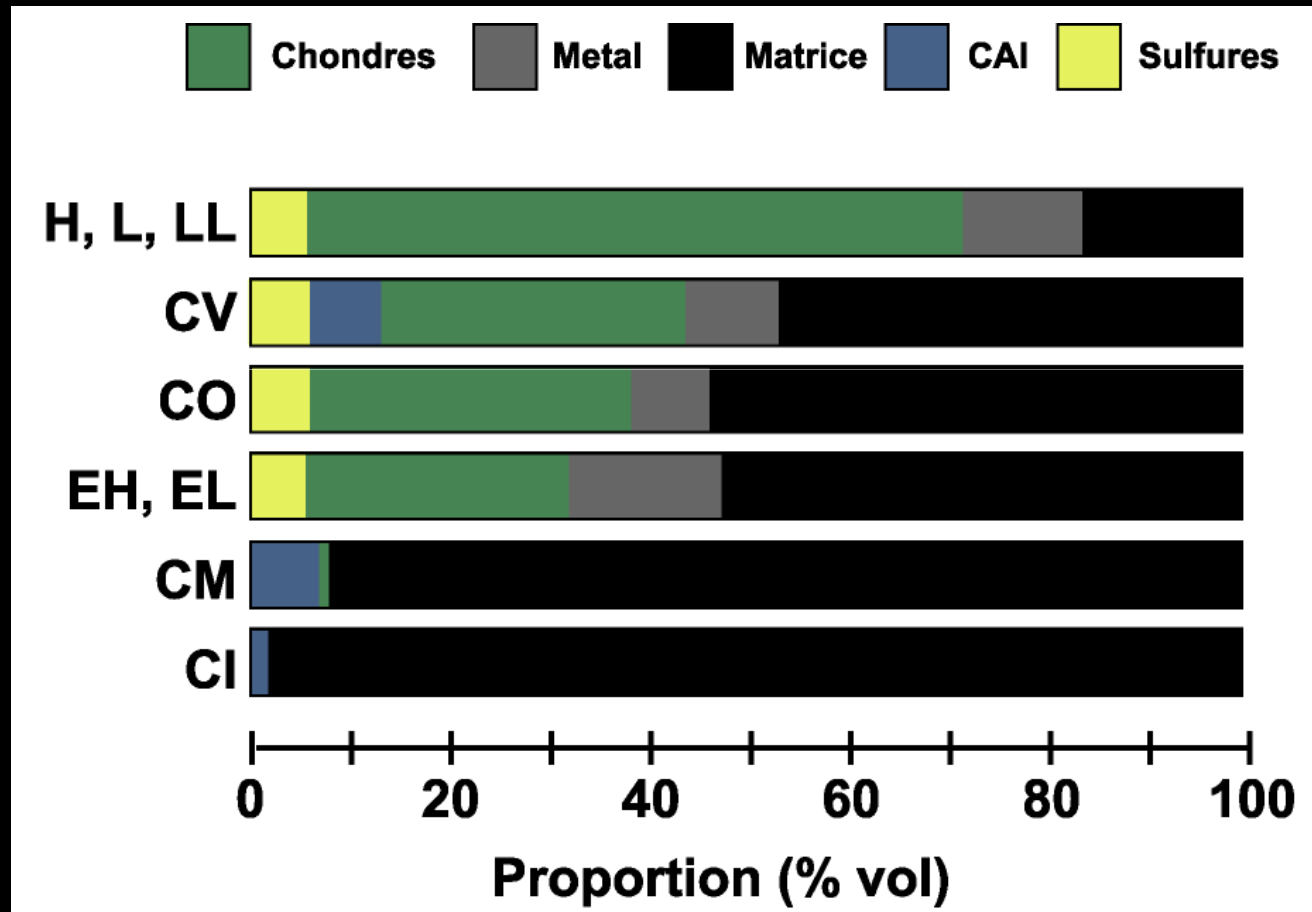
Chondre de la chondrite 3.0
Semarkona



Chondre expérimental
(Tissandier et al., 2002)

Les chondres se sont formés avec un refroidissement rapide $10 \text{ K/h} < dT/dt < 1000 \text{ K/h}$ (expérience de reproduction de chondre).
Leur texture dépend de cette vitesse de refroidissement et du nombre de nucléi (efficacité de la fusion).

Variabilité des chondrites



Les chondrites

Les chondrites sont un peu des roches « sédimentaires ».

Ce sont des mélanges de différents composés ayant pu se former à des endroits différents dans le SS jeune.

La cohésion de la roche résulte probablement d'un léger métamorphisme thermique ayant lieu sur des corps parent >1 km.

On pense que les chondrites viennent de la ceinture d'astéroïde.

Processus secondaire: le métamorphisme

LL3

LL4

LL5

LL6



3.0

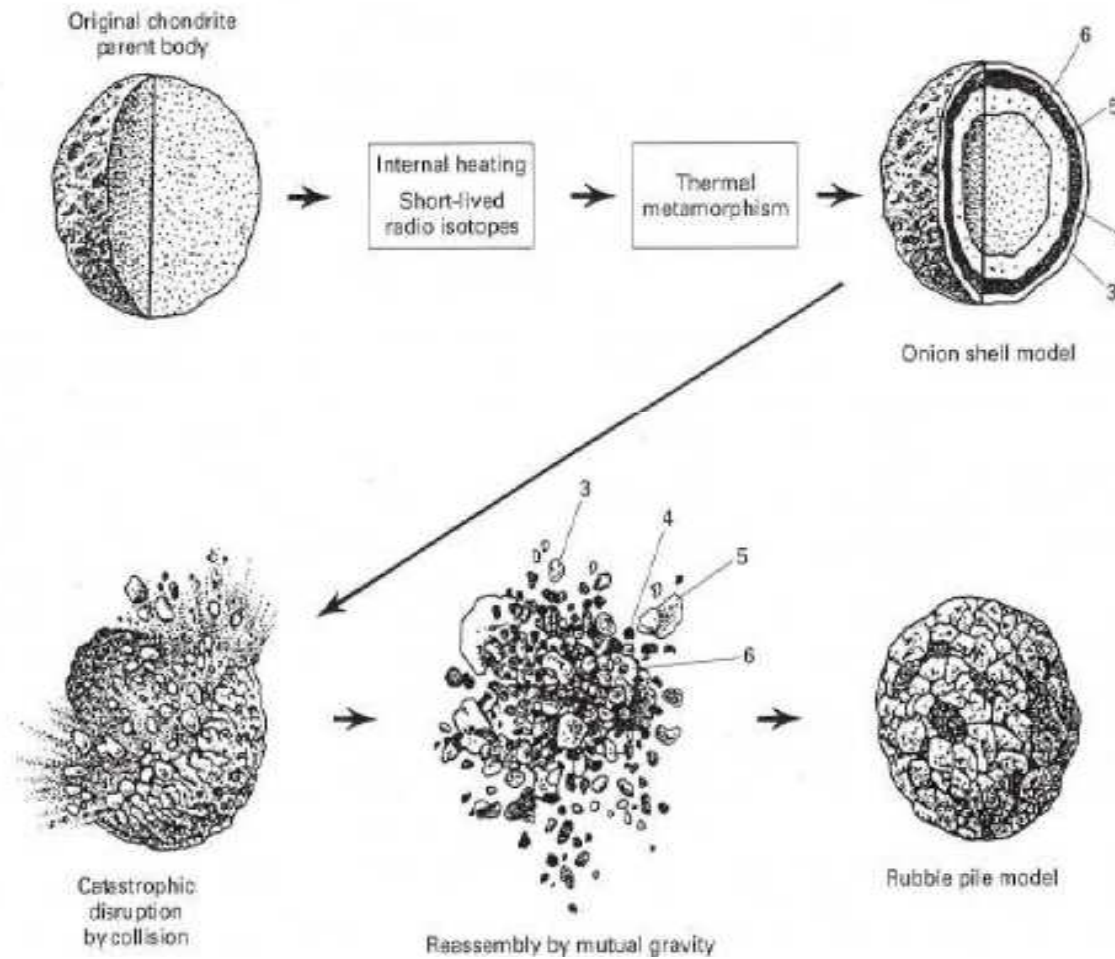
3.9

Métamorphisme croissant
Rééquilibration Fe-Métal/silicate

Non-équilibré

Equilibré

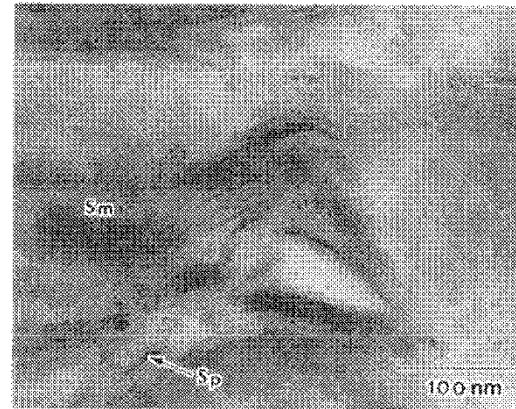
Processus secondaire: le métamorphisme



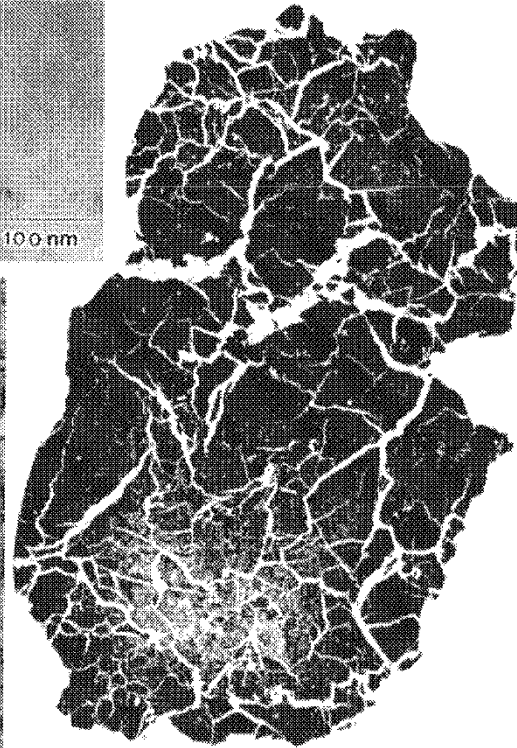
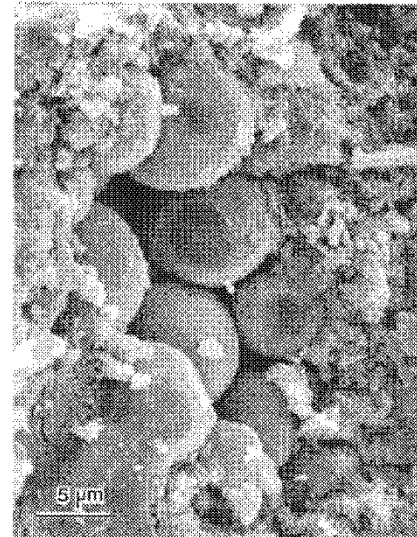
Processus secondaire: L'altération aqueuse

Veines de carbonates
dans la chondrite orgueil

Image TEM:
smectite et serpentine

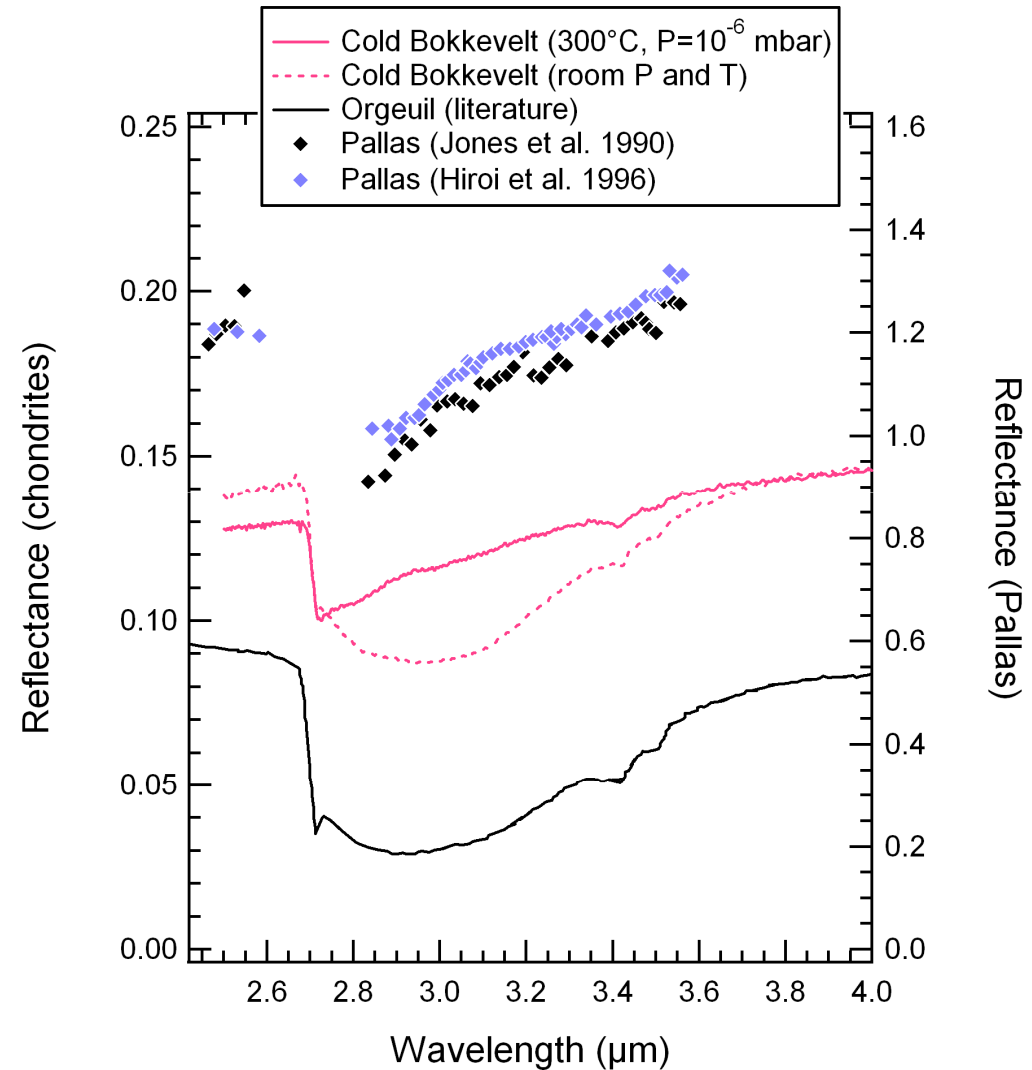
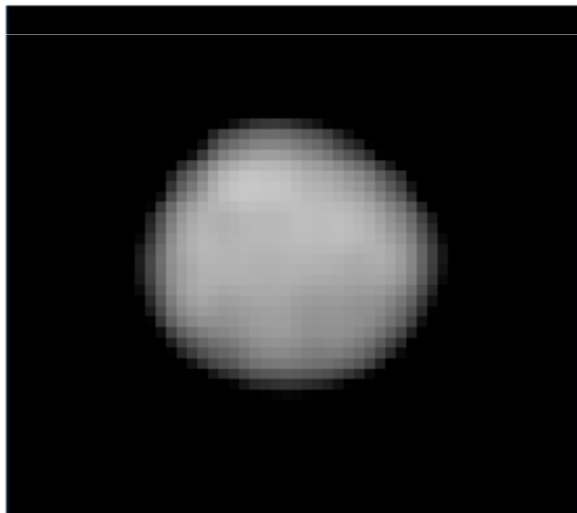


Spherules de
magnetite,
oxyde de fer

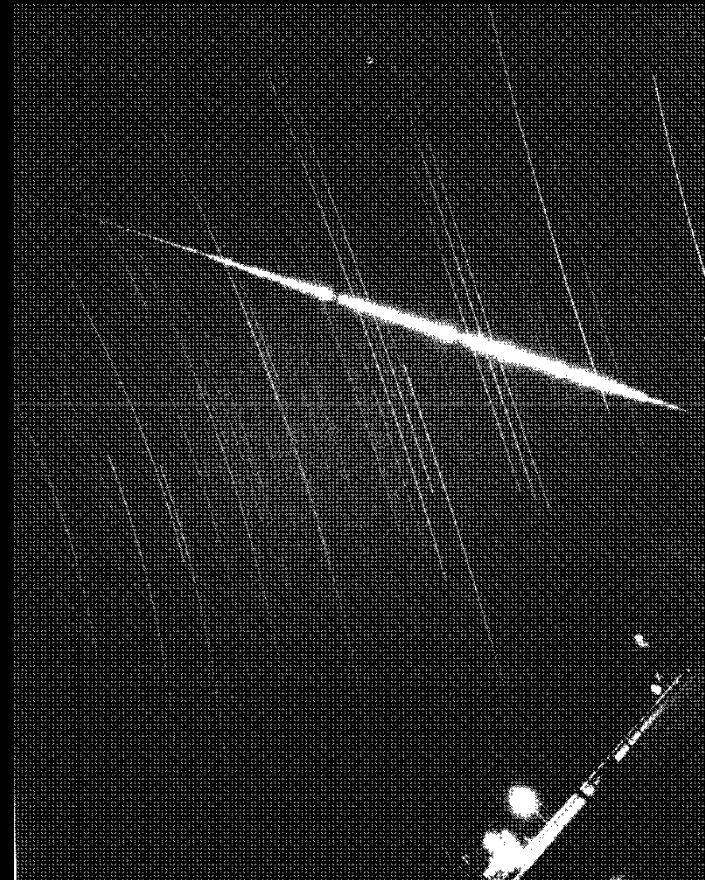
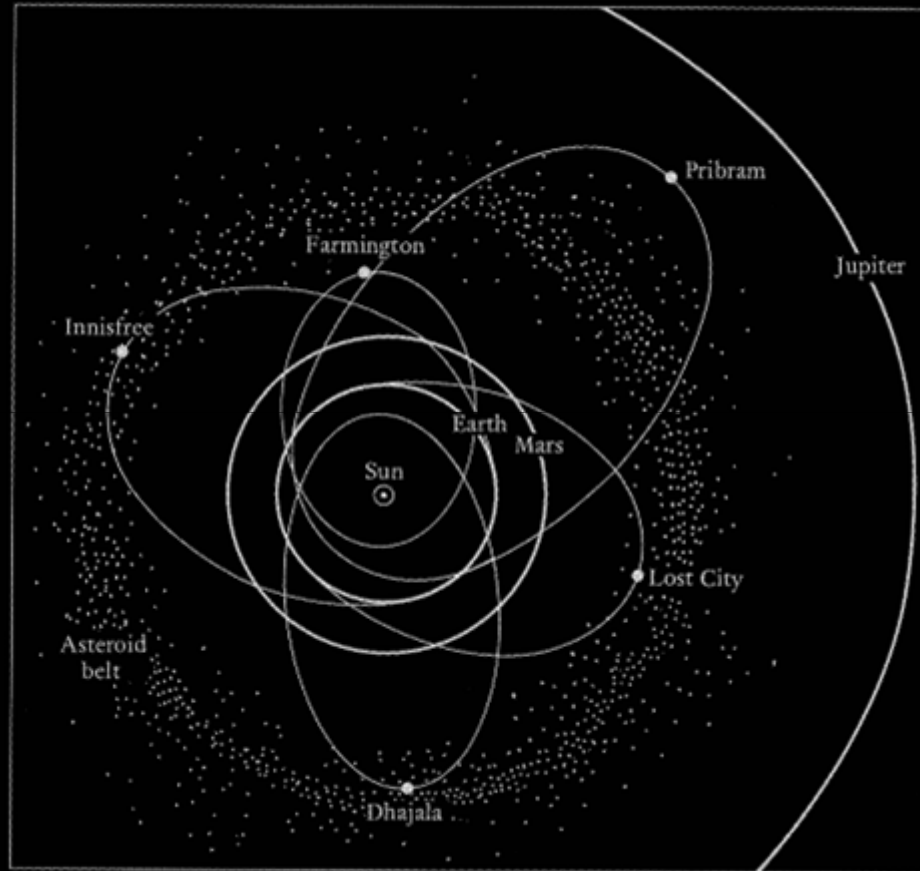


Processus secondaire: L'altération aqueuse

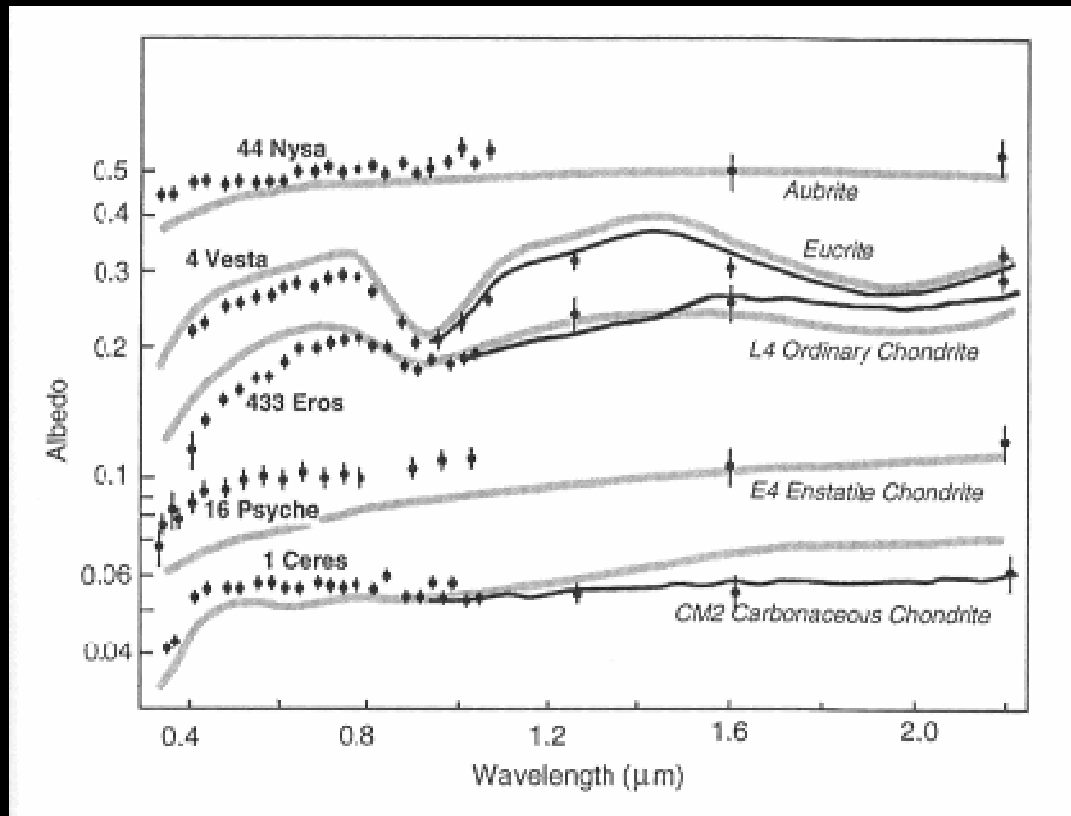
Les chondrites carbonées altérées semblent liées aux astéroïdes de type C (astéroïdes sombre, les plus abondants dans la ceinture)



Origine des chondrites



Origine des chondrites



14 classes d'astéroïdes basées sur leur réflectance (A,B,C,D,E,F,G,M,P,Q,R,S,T,V,'K')

Diversité très supérieure à celle des météorites connues
Effet de la résonance 3:1



Classification des chondrites

Chondrites

Chondrites ordinaires

- LL (Saint-Mesmin)
- L (L'Aigle)
- H (Flandreau)

Chondrites carbonnées

- CI (Orgueil)
- CM (Murchison)
- CO (Ornans)
- CV (Allende)
- CK (Karounda)
- CR (Renazzo)
- CH (ALH 85085)
- CT (Tagish lake)

Chondrites à enstatite

- EL (Eagle)
- EH (Saint-Sauveur)

Achondrites

Météorites de fer (Canyon Diablo)

Pallasites (Springwater)

Mésosidérites (Chinguetti)

H.E.D.

- Eucrites (Juvinas)
- Diogenites (Tatahouine)
- Howardite (Le Teilleul)

Météorites martiennes

- Shergottites (Shergotty)
- Nakhrites (Nakhla)
- Chassignites (Chassigny)
- ALH 84001

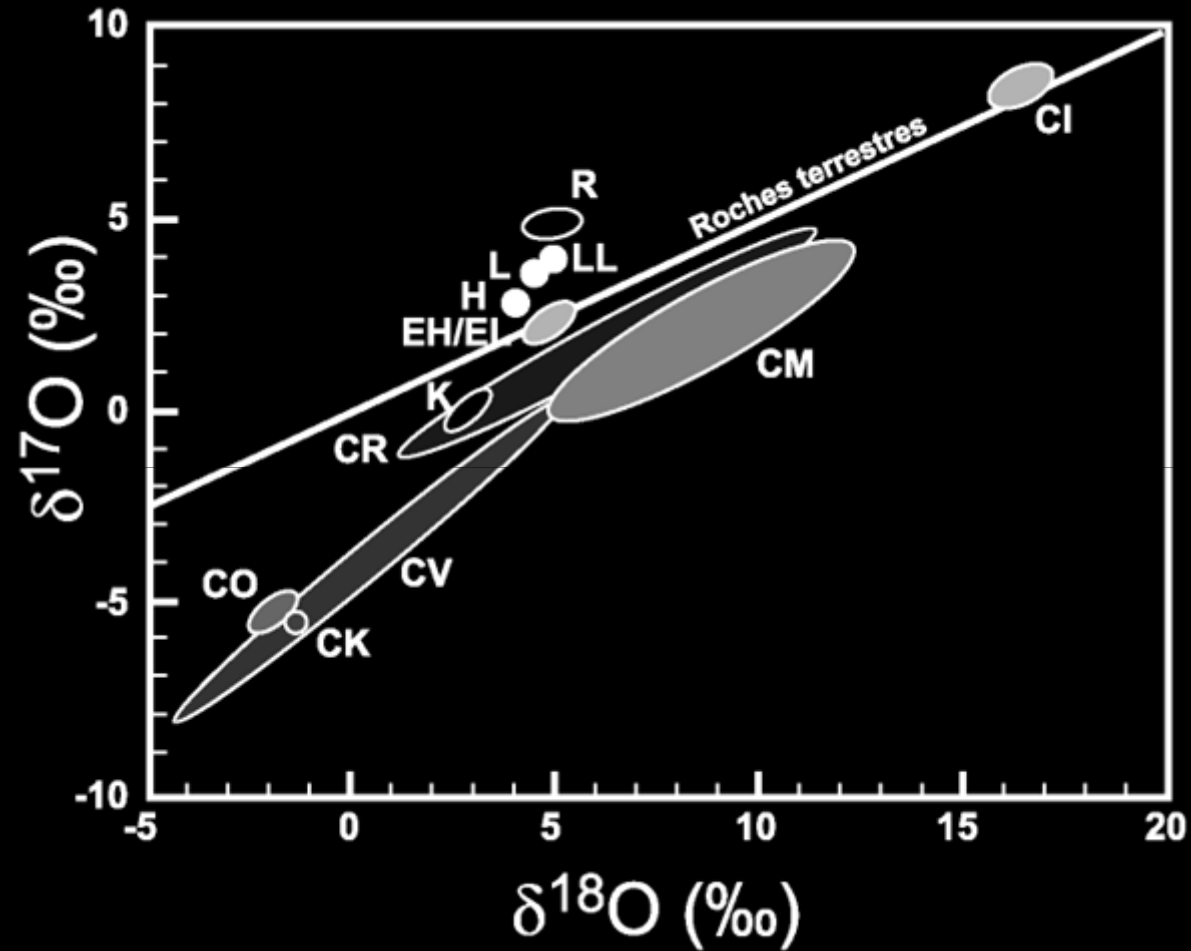
Lunaites (NWA 479)

Aubrites (Peña blanca Springs)

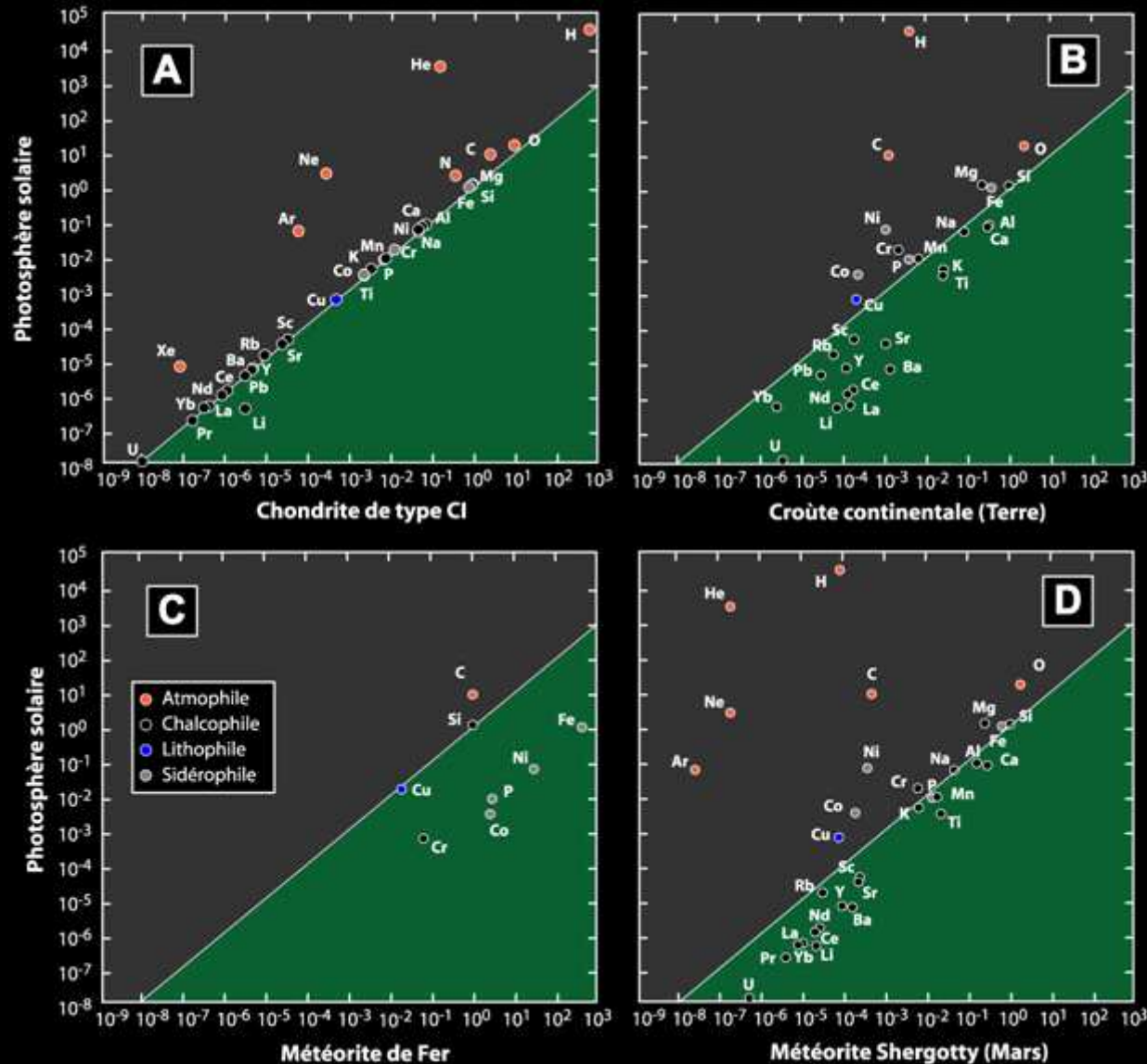
Ureilites (Novo Urei)

Angrites (Angra dos Reis)

Les isotopes de l'oxygène



Des objets très primitifs

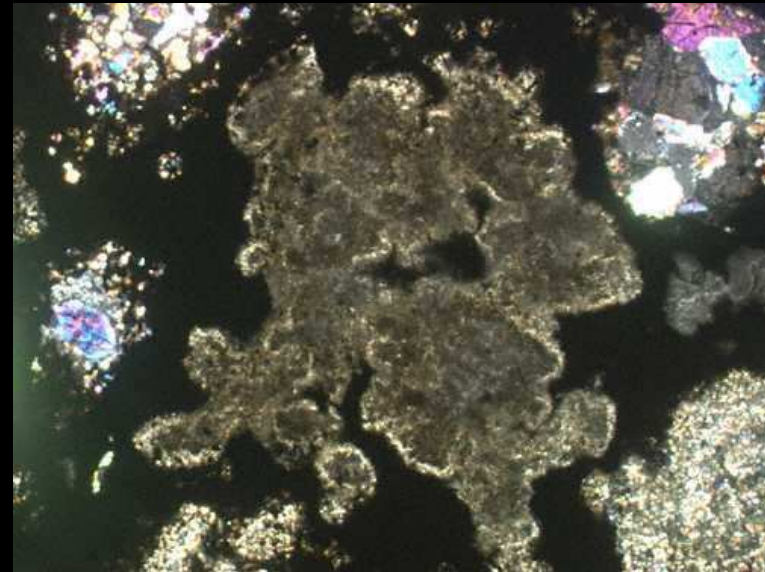
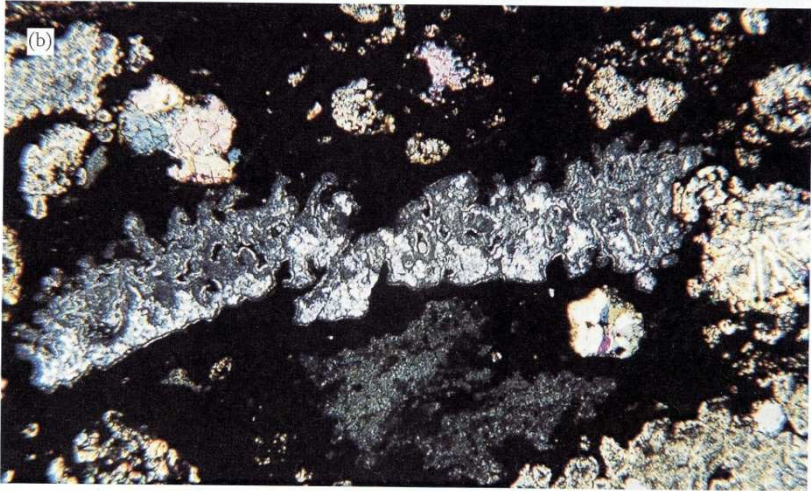
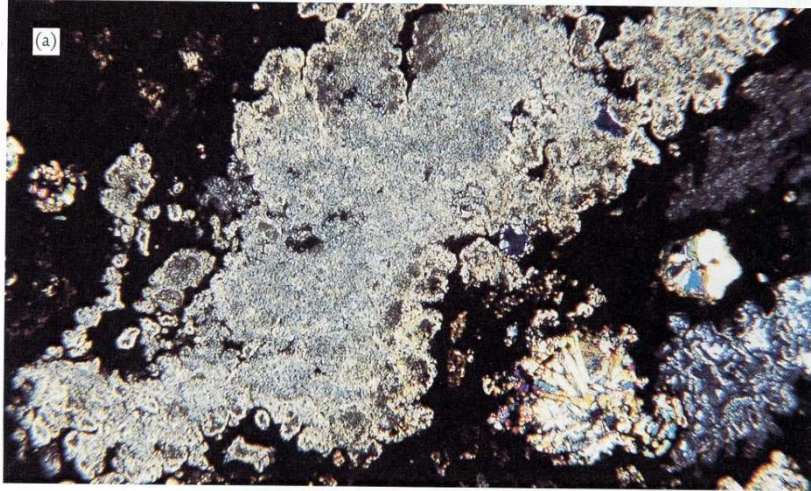


Les chondrites et plus particulièrement les chondrites carbonées ont des compositions chimiques très proches de celle de la photosphère solaire, excepté pour les éléments légers.

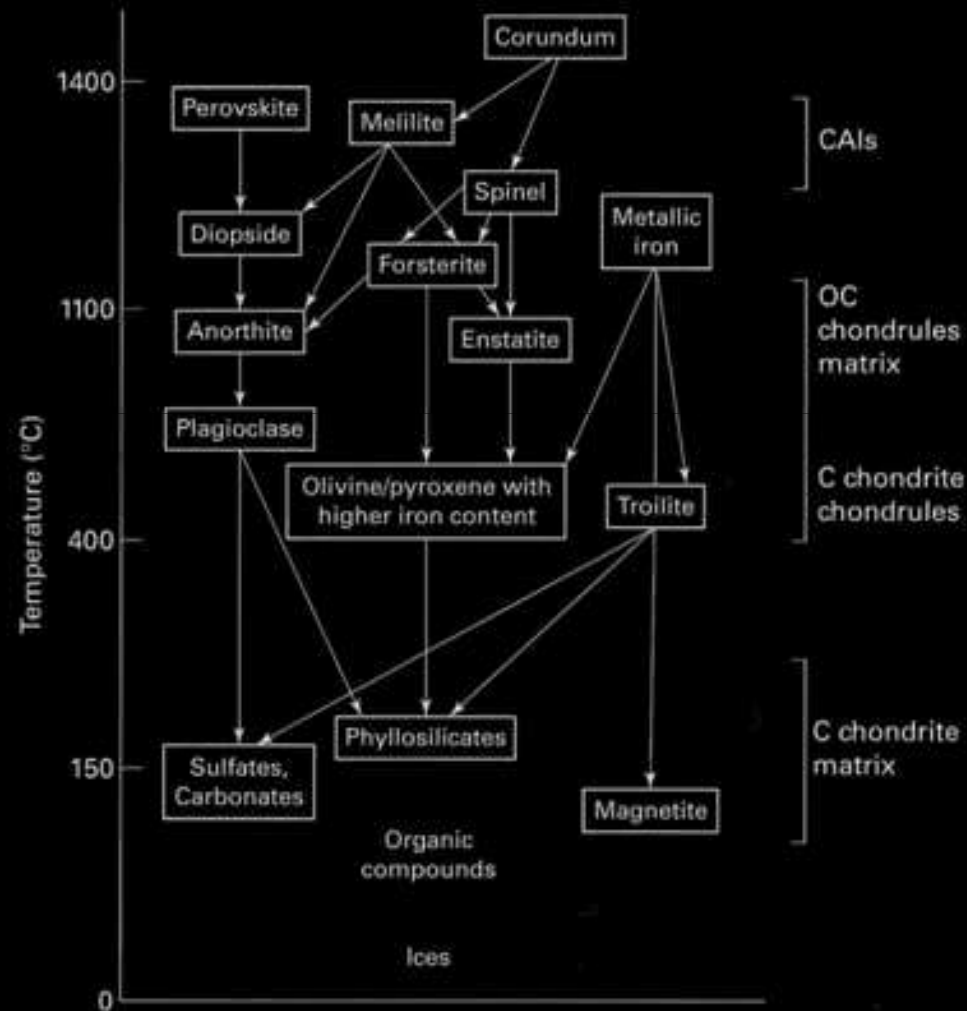
Les inclusions réfractaires

Minéralogie réfractaire.

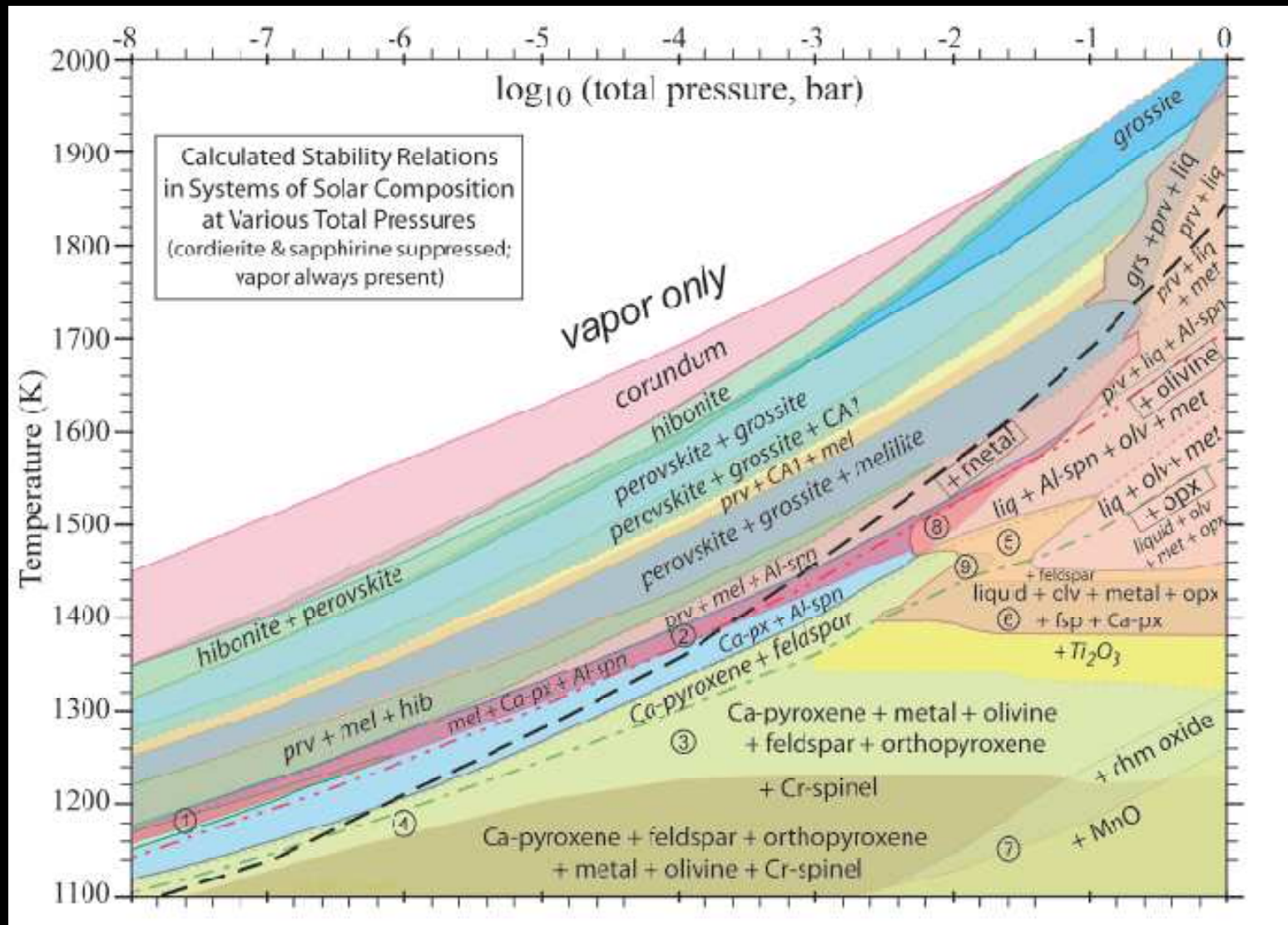
Minéraux riches en Ca et Al
Corindon Al_2O_3
Hibonite $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$
Perovskite CaTiO_3
Melilite $\text{CaAl}_2\text{SiO}_7$
Spinel MgAlO_4



La séquence de condensation

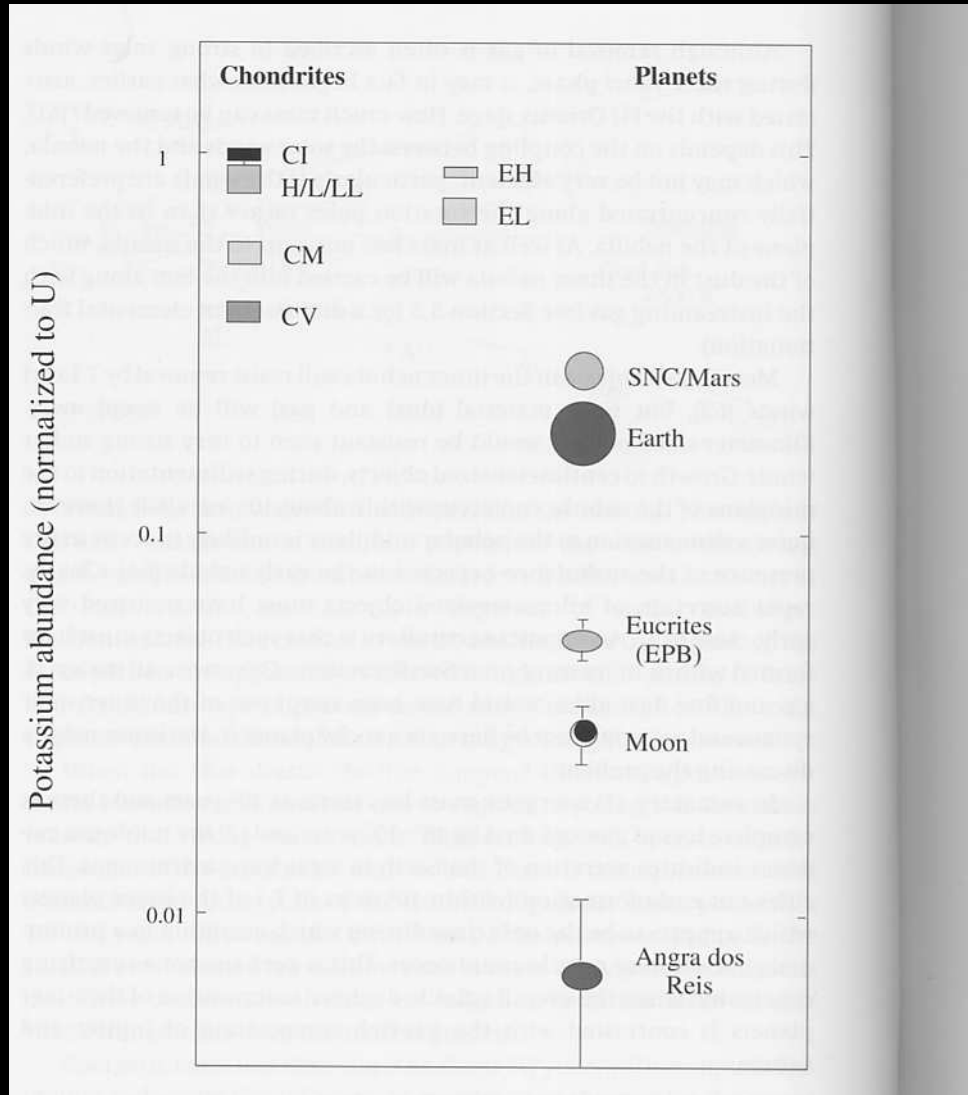


La séquence de condensation

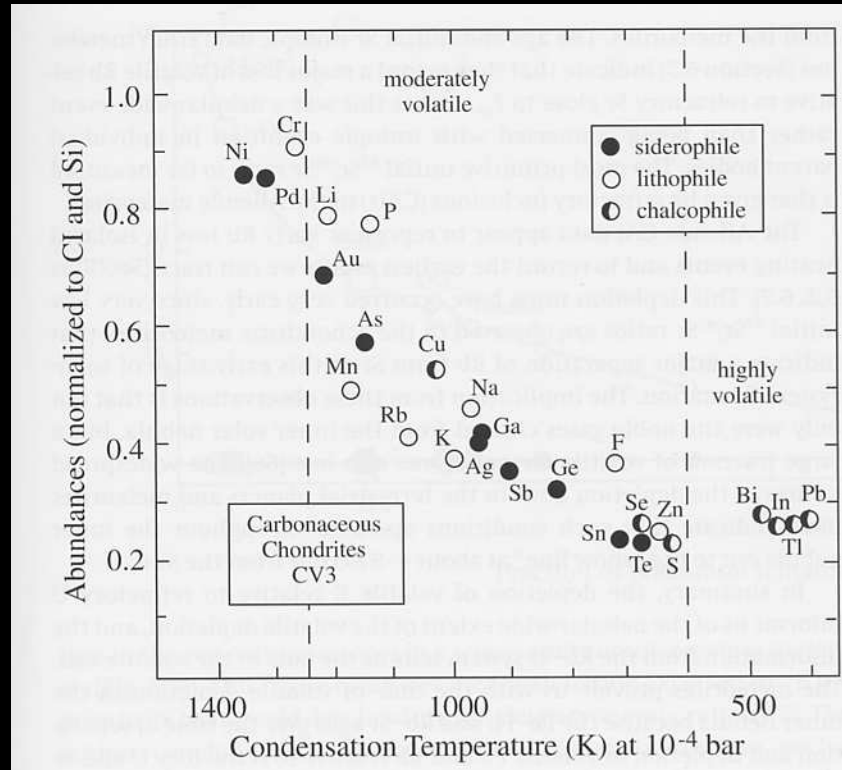


Ebel, 2006

La perte des volatiles

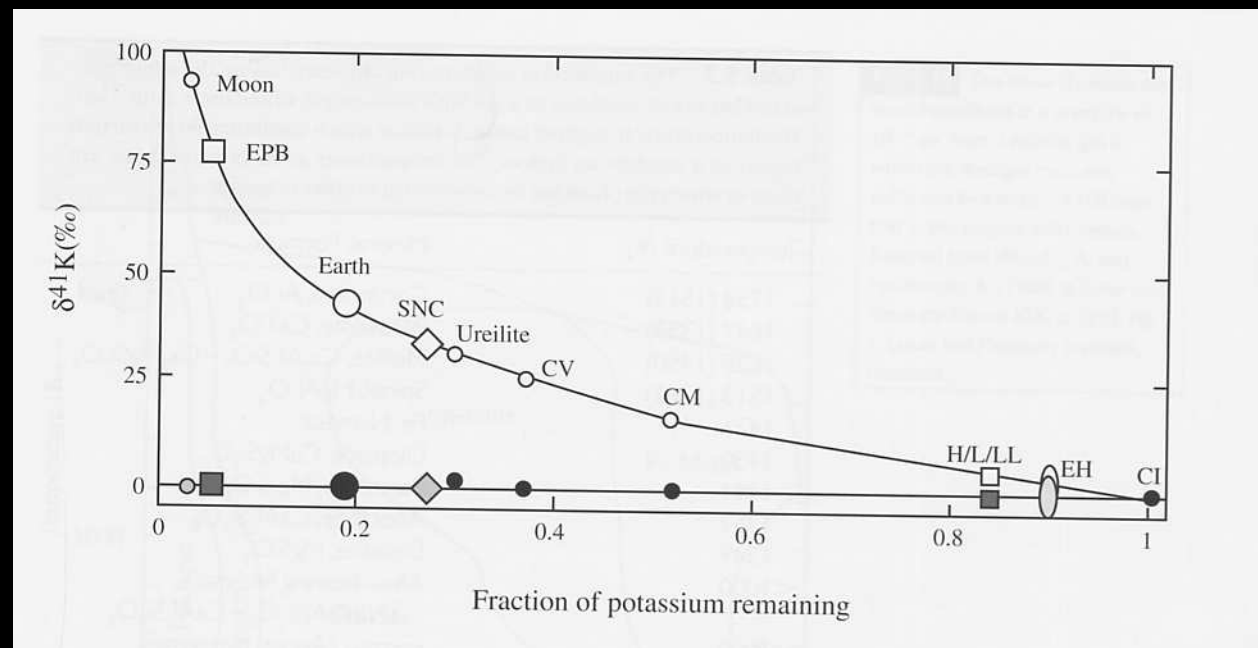


La perte des volatiles

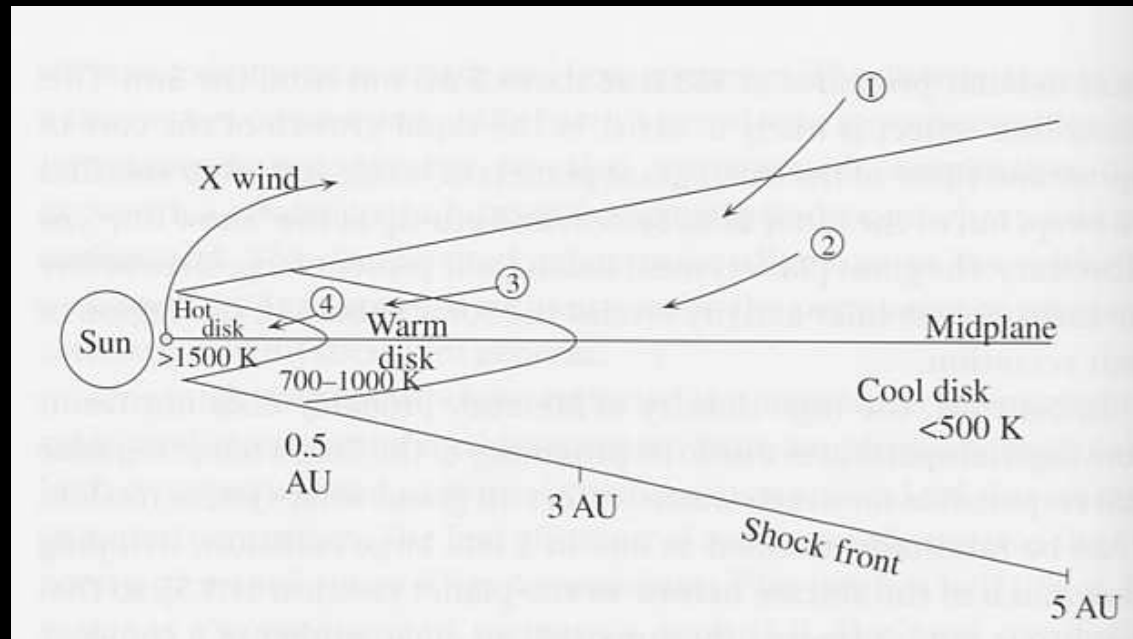


La perte des volatiles

$$R=R_0F^\alpha$$



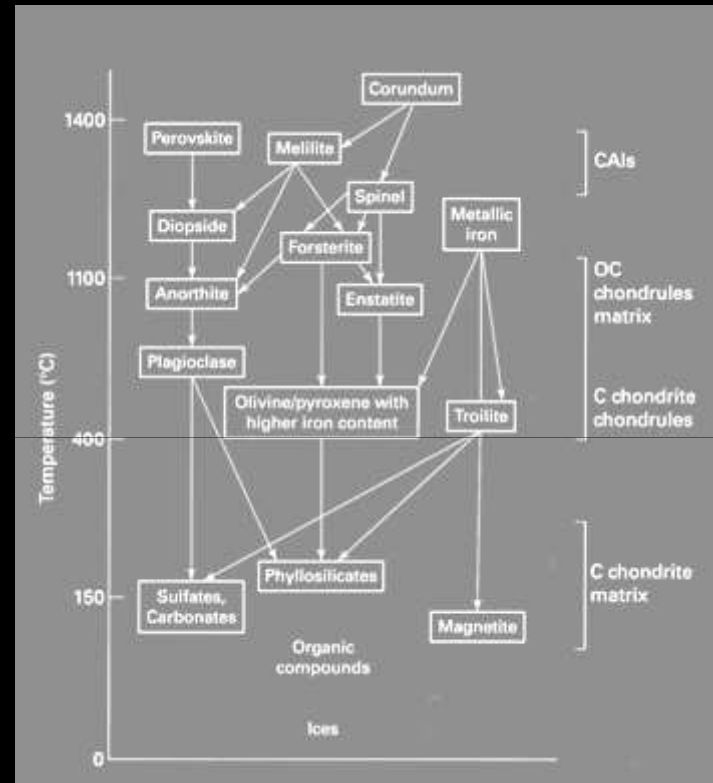
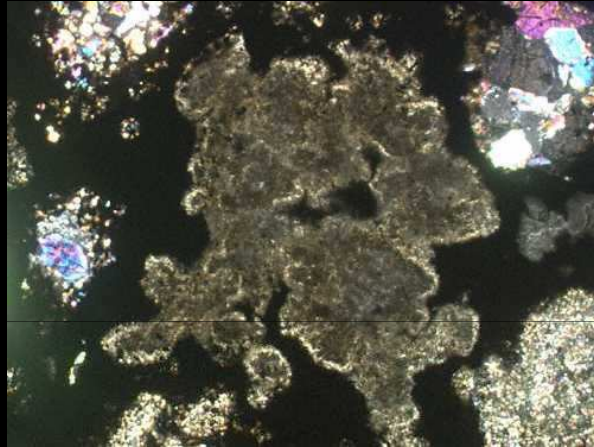
La perte des volatiles



Formation dans des lieux différents?

Evaporation/condensation lors de la formation des chondres?

Inclusions réfractaires et l'âge du Système Solaire

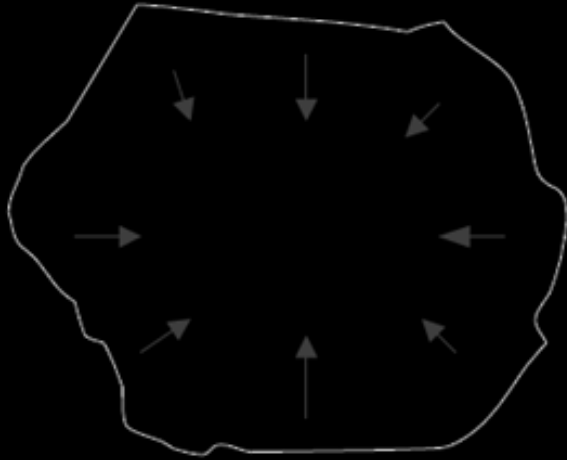


Chute d'Allende: bcp de matériel d'une chondrite « primitive » disponible à la communauté.

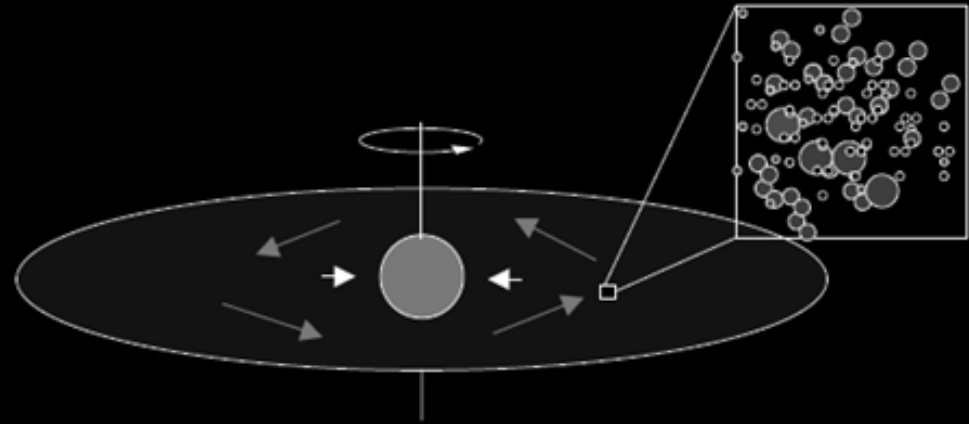
3.TD Calcul de l'âge du SS

De la poussière à la proto-planète

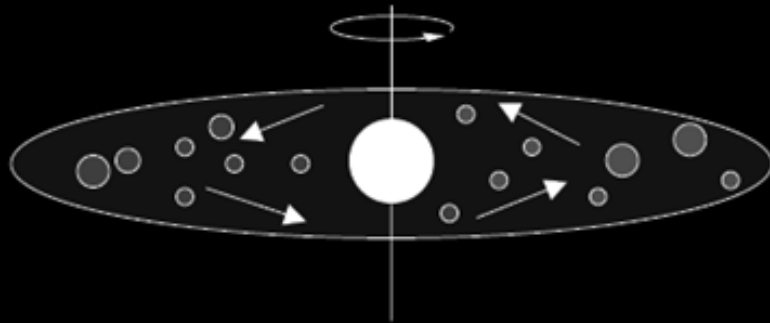
Les 4 stades de l'acréation



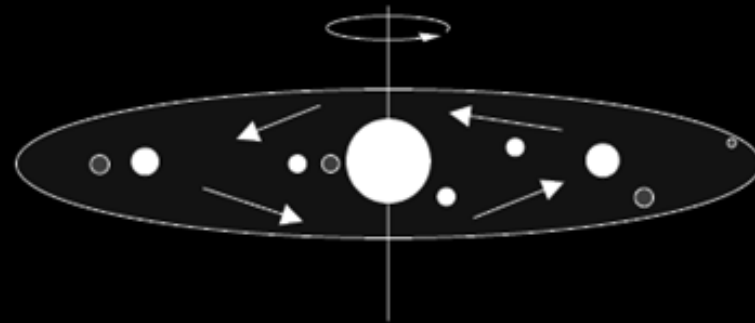
(1) Gravitational collapse of gas and dust.



(2) Formation of rotating nebular disk: gas and dust falling onto the midplane and proto-Sun. Formation of initial millimeter-to centimeter-sized objects from gas/dust aggregates.



(3) Protoplanetary disk: Gravitational accretion of 10–100-m objects upto 10–100 km.



(4) Evolved disk: Nebular gas cleared, collisions and secondary impacts and planetary/post-planetary formation.

Chondrule sorting

Temps de ralentissement= temps
nécessaire pour que $V_{\text{particule}}=V_{\text{gaz}}$

($r < \text{mean free path} \sim 1\text{m}$)

$$t_s = \frac{r\rho_s}{c\rho_g}$$

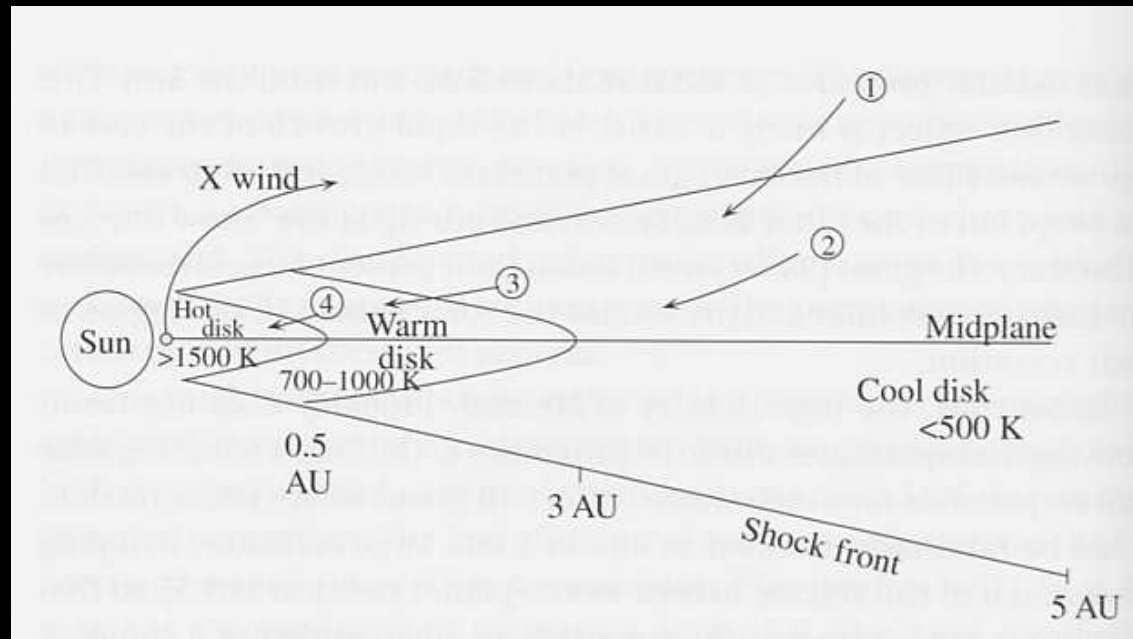
*Si des fluctuations de vitesses sont
présentes (et particulièrement de la
turbulence) on va trier les grains.*

Les particules de $R < 1\text{ mm}$ sont totalement couplées avec le gaz (avec gradient de pression du cœur vers l'extérieur).

Les autres sont découplées et évoluent à la vitesse képlérienne.

Les particules moyennes (1mm-1m) subissent un head-wind et dérivent vers le soleil.

Les 4 stades de l'acrétion



Mécanismes de collage

Quelle force de collage?

- Force de Van der Waals
- Electrostatique
- Magnétique
- Dissipation lors de la collision (fusion)

Vitesse maximale de la collision pour collage.

Energie de surface

$$V_{stick} = \frac{2(E/r)^{5/6}}{Y\rho_s^{0.5}}$$

Module de Young

R=1 μm $V_{stick} \sim 5 \text{ cm/s}$
R=100 μm $V_{stick} \sim 0.025 \text{ cm/s}$
(for quartz)

Mécanismes de collage

$$V_{stick} = \frac{2(E/r)^{5/6}}{Y\rho_s^{0.5}}$$

$$R=1 \mu\text{m} \quad V_{stick} \sim 5 \text{ cm/s}$$

Vitesse relative négligeables mais:

$V_{therm}=0.4 \text{ cm/s}$ qui gouverne les collisions

→ Croissance

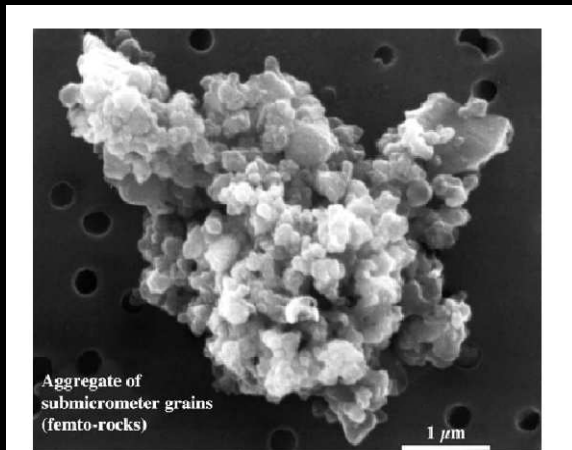


Fig. 2. A CP interplanetary dust particle. The nanogram particle is a porous aggregate of large numbers of submicrometer grains, which individually contain GEMS, glass, crystalline materials, and organic components. The fragile particle has not been subject to compaction since its formation in the solar nebula. The individual components in the particle are likely to be the accretionary units that are representative of the time and location in the solar nebula disk where the particle accreted.



Compaction (roulement)
(à partir de ~1cm)



Messenger, 2006

Mécanismes de collage

Une fois compactées les particules deviennent de plus en plus découplée du gaz, et les vitesses de collisions augmentent.

Les particules sédimentent alors dans le plan équatorial.

Lorsque la taille d'1m est atteinte on se heurte à un problème: les vitesses de collisions et de dérive ont un maxima.

Ces blocs de 1 m seraient « nétoyés ».

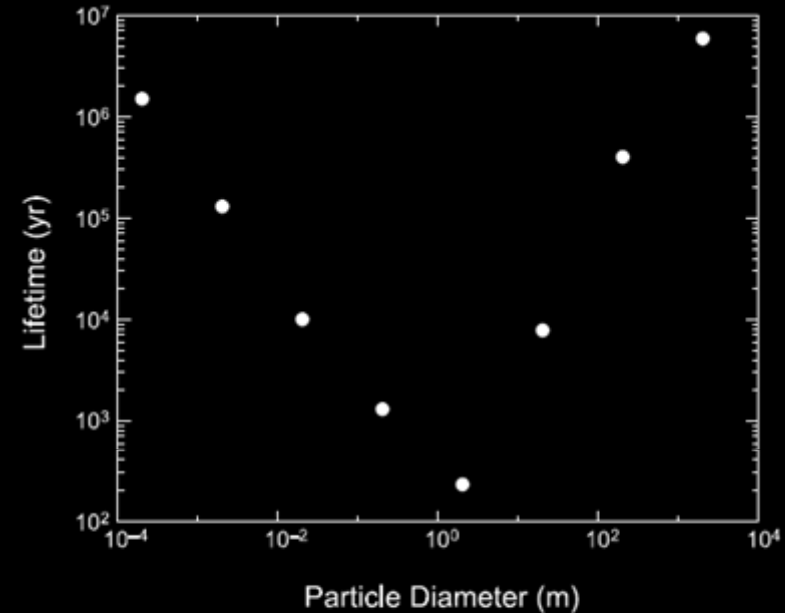


Fig. 1. Lifetime of spherical particles against drift due to gas drag, at 2.5 AU in the solar nebula, as a function of particle size. Gas density is 10^{-9} g/cm³ at 1 AU, varying as $1/r^2$. Adapted from Weidenschilling (1977).

Comment augmenter les vitesse de collision et la vitesse de croissance?
Il faut concentrer les particules.

La barrière du mètre

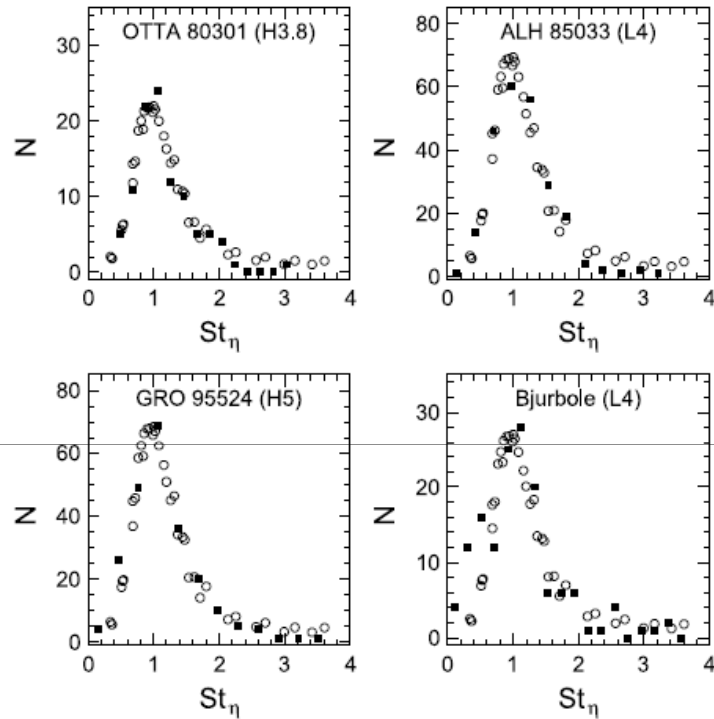


Fig. 4. Comparison of observed chondrule size-density distributions $N(r_p)$ from four different meteorites (solid symbols) with theoretical predictions (open symbols) (Cuzzi *et al.*, 2001). The observed distributions are merely assumed to peak at $St_\eta = t_s/t_\eta = 1$ and are aligned with the predictions (which have no free parameters and are the same in all panels).

La solution: concentration par turbulence.

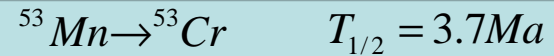
Modèles de distribution en taille.

→ Fingerprint

→ $t_s/t_\eta = \alpha * r$

Agglomération et Mn/Cr

Le système Mn/Cr



Mn est plus volatil que le chrome.

Mn est enrichi dans la matrice et appauvri dans les chondres.

On peut dater la séparation chondre/Matrice

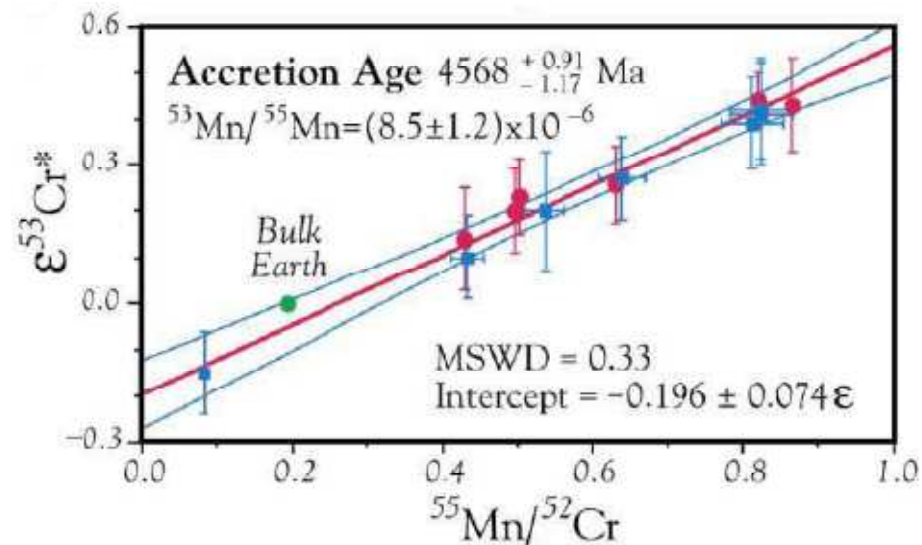
Agglomération et Mn/Cr

DATING THE FIRST STAGE OF PLANET FORMATION

FREDERIC MOYNIER, QING-ZHU YIN, AND BENJAMIN JACOBSEN

Department of Geology, University of California Davis, One Shields Avenue, Davis, CA 95616; moynier@geology.ucdavis.edu,
yin@geology.ucdavis.edu, jacobsen@geology.ucdavis.edu

Received 2007/ October 1; accepted 2007/ November 6; published 2007/ November 16



Du km à la protoplanète

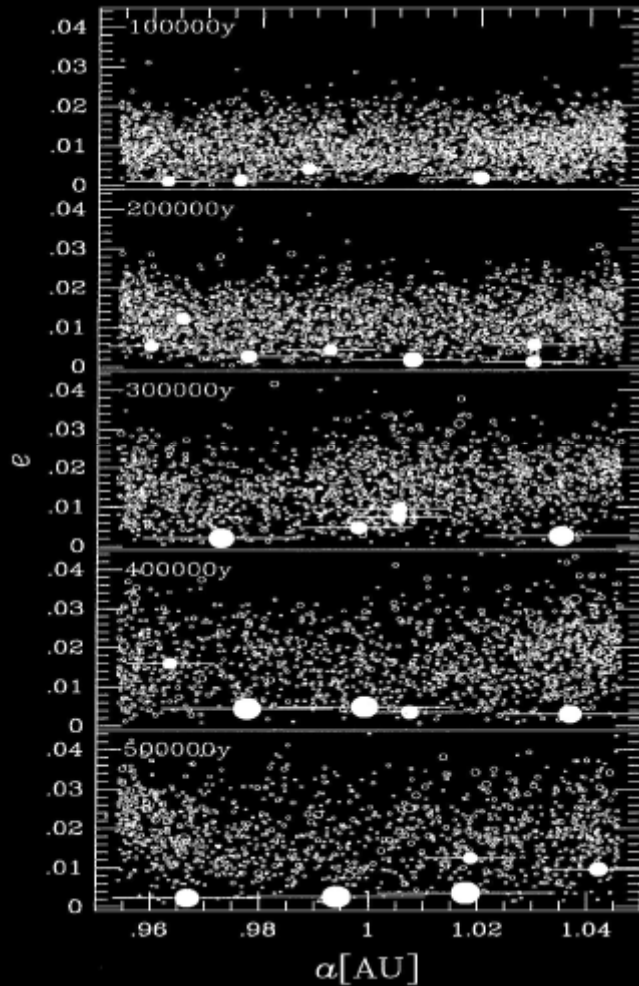
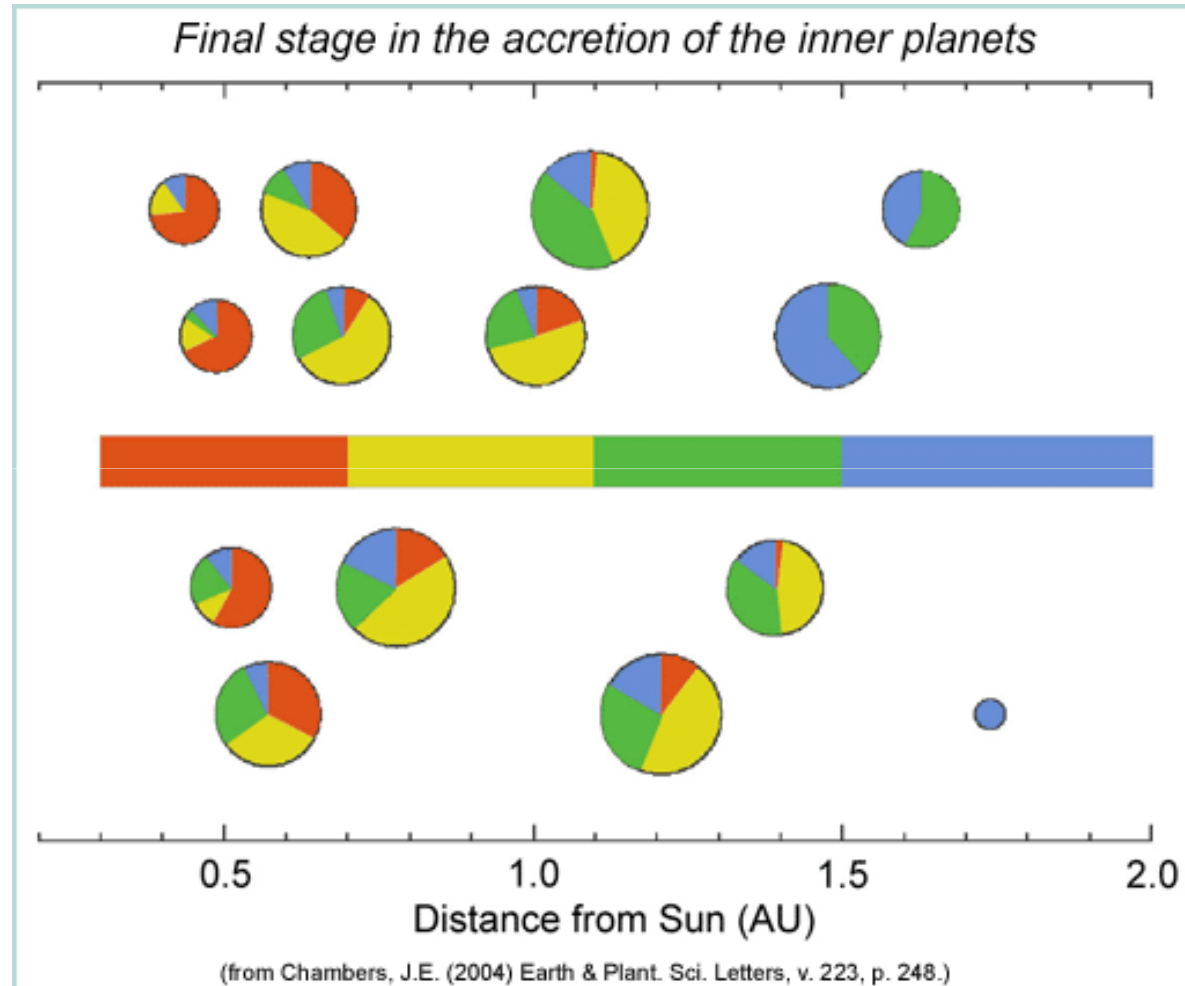


FIG. 7. Snapshots of a planetesimal system on the a - e plane. The circles represent planetesimals and their radii are proportional to the radii of planetesimals. The system initially consists of 4000 planetesimals whose total mass is 1.3×10^{27} g. The initial mass distribution is given by the power-law mass distribution with the power index $\alpha = -2.5$ with the mass range $2 \times 10^{23} \leq m \leq 4 \times 10^{24}$ g. The numbers of planetesimals are 2712 ($t = 100,000$ years), 2200 ($t = 200,000$ years), 1784 ($t = 300,000$ years), 1488 ($t = 400,000$ years), and 1257 ($t = 500,000$ years). The filled circles represent protoplanets with mass larger than 2×10^{25} g and lines from the center of the protoplanet to both sides have the length of $5r_H$.

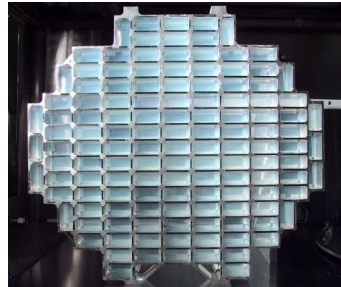
Kokubo et Ida., 2000, *Icarus*

Mélange radial dans le disque



Chambers et al., 2004

Mélange radial dans le disque



Stardust encounter wild-2

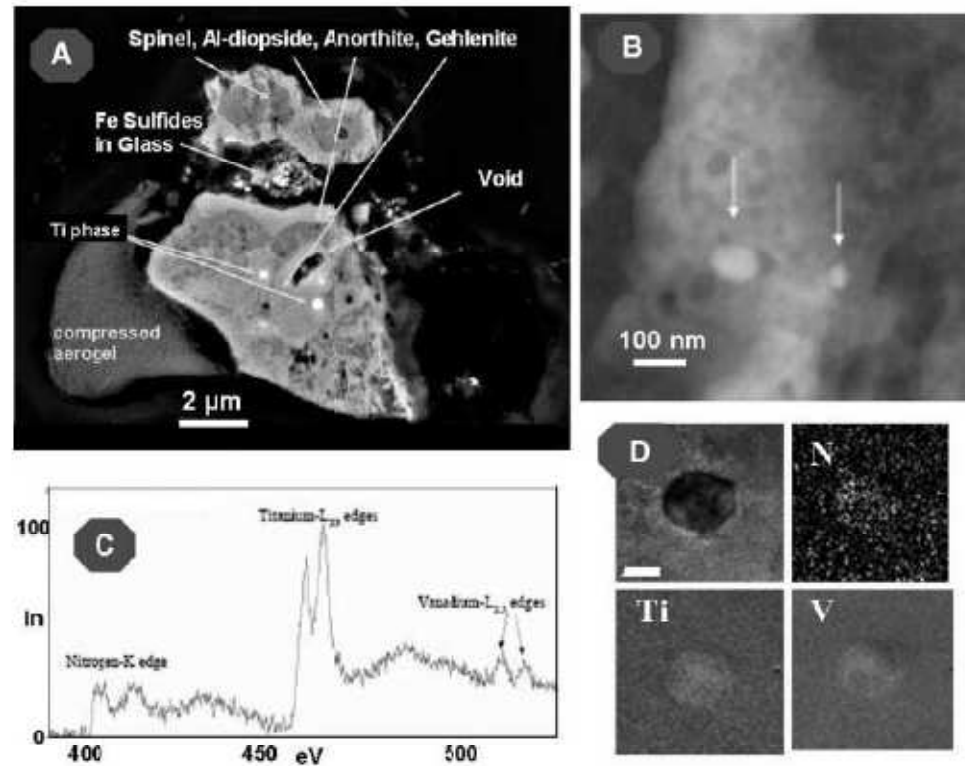


Fig. 4. The CAI-like grain from track 25. (A) Backscattered electron (BSE) image of the CAI-like grain from track 25, showing the gray shell of compressed-to-melted aerogel at lower left. (B) High-angle annular dark-field TEM image of two osbornite grains (arrows) within spinel. (C) EELS spectrum of an osbornite grain showing peaks for N, Ti, and V; scales represent intensity (In) and energy (in electron volts). (D) EELS element maps of an osbornite grain: BSE, N, Ti, and V. Scale bar, 40 nm.

Zolensky et al., Science 2006

Chronologie

Le Système Al/Mg

CAI in Allende



Lee et al., 1976

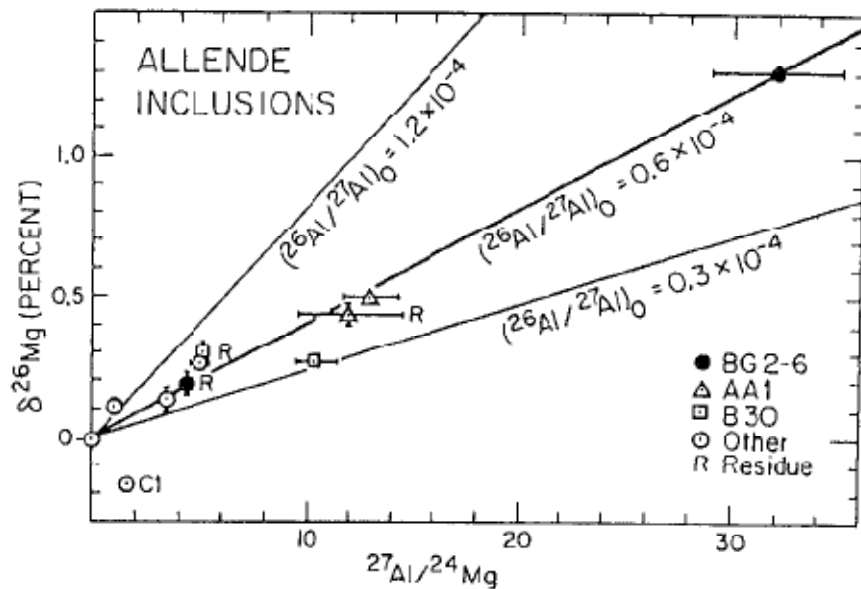
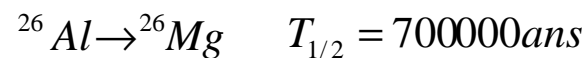
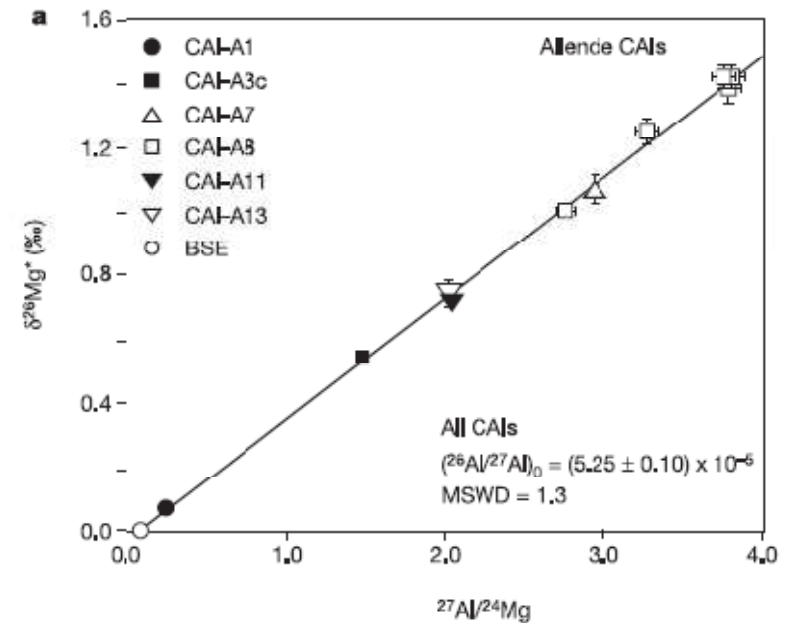


Fig. 2. Al-Mg evolution diagram for Allende samples. The correlation line for BG2-6 yields $(^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al})_0 = 0.6 \times 10^{-4}$ and contrasts sharply with the correlation line for B30 which has essentially zero slope and much higher initial $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$.

Bizzarro et al., 2004

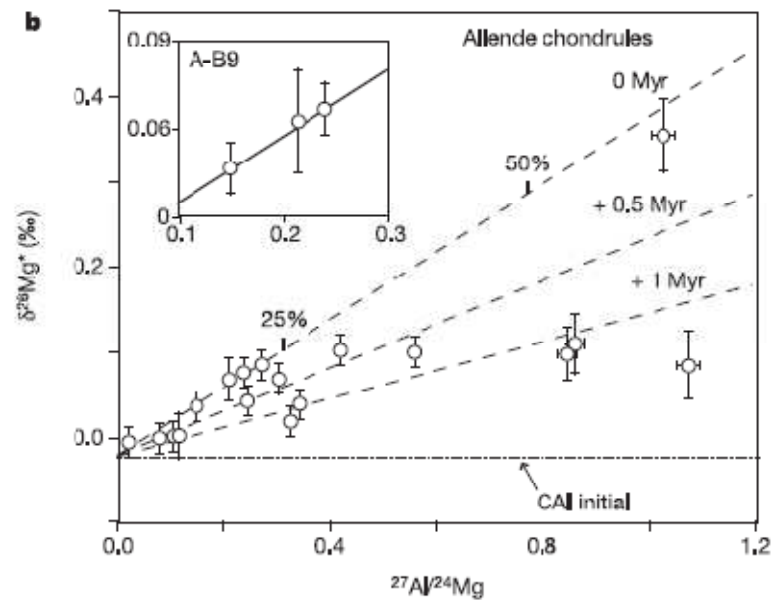


Le Système Al/Mg

Chondres d'Allende

Mg isotope evidence for contemporaneous formation of chondrules and refractory inclusions

Martin Bizzarro^{1,2}, Joel A. Baker^{1,3} & Henning Haack²



Comparaison au Pb/Pb

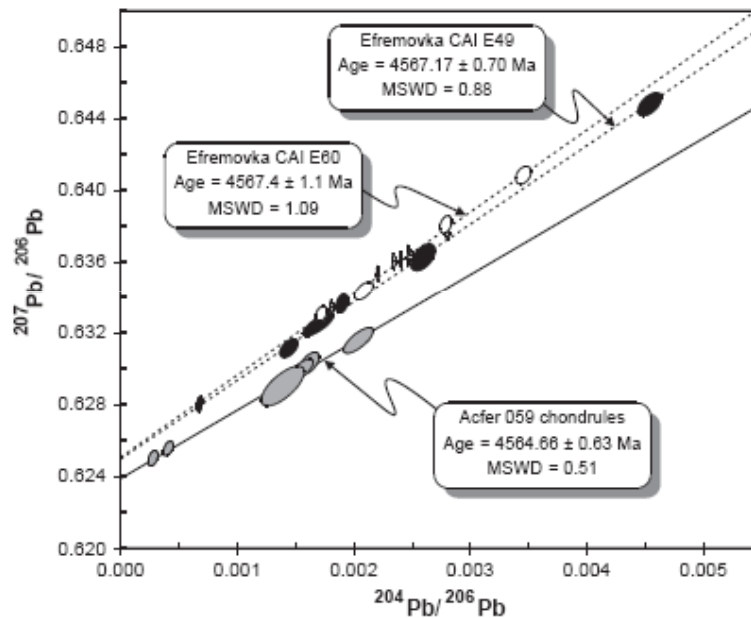


Fig. 1. Pb-Pb isochrons for the six most radiogenic Pb isotopic analyses of acid-washed chondrules from the CR chondrite Acfer 059 (solid line), and for acid-washed fractions from the Efremovka CAIs (dashed lines). $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ratios are not corrected for initial common Pb. Error ellipses are 2σ . Isochron age errors are 95% confidence intervals.

2-3 Ma entre CAI et chondrites.

Oupss...

Itoh and Yurimoto, Nature, 2003

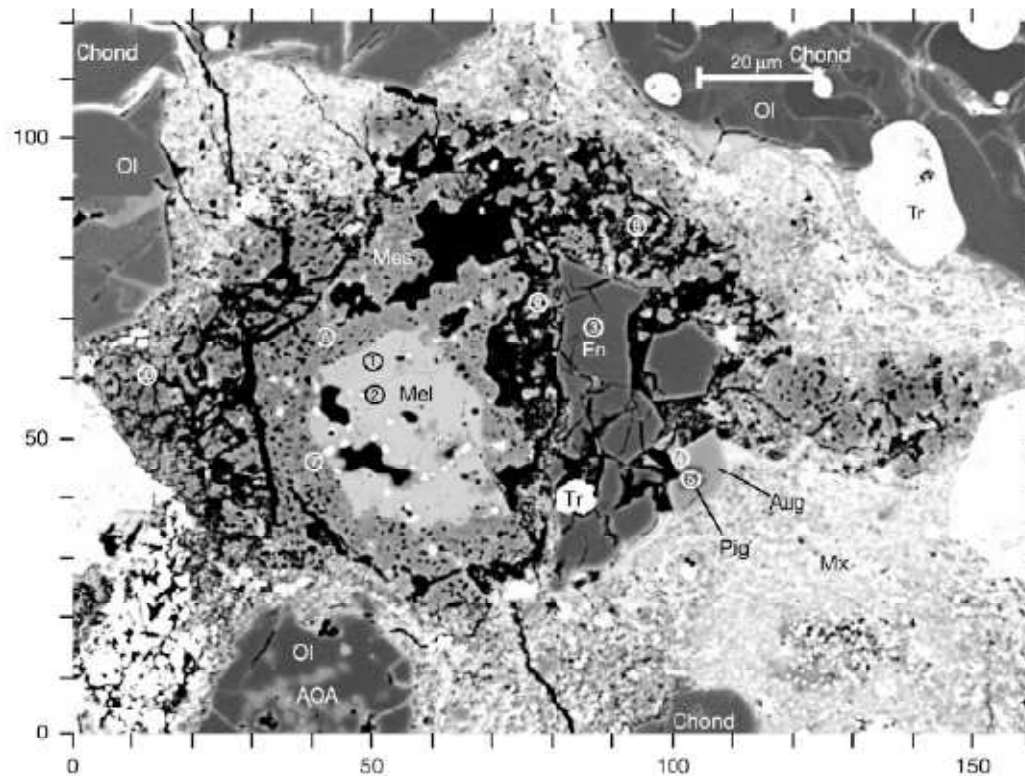


Figure 1 Back-scattered electron image of the chondrule-bearing CAI. The object, named A5, was found in a thin section (no. 56-4 from the National Institute of Polar Research, Tokyo) of the Y81020 CC3.0 chondrite. Horizontal and vertical scales are in μm . Scale bar also at top right. Locations of SIMS analyses are shown by numbers corresponding to those in Table 1. The circle size round each number shows the approximate analytical area of O isotopic composition by SIMS. The CAI consists of a large central polycrystalline melilite ($\text{Ca}_{10-13}\text{Mg}$) clast in which individual melilite crystals are about $20\ \mu\text{m}$ across. Fine perovskite grains (white spots) are scattered in and around the melilite. The melilite clast is enclosed by a porous mesostasis (Mss) composed of a fine-grained mix of Al-rich clinopyroxene (lighter area; MgO, 13.3 wt%; Al_2O_3 , 18.1; SiO_2 , 37.5; CaO, 24.2; TiO_2 ,

6.3; other elements <0.1) and Al-rich glass (darker area; MgO, 7.0–10.6 wt%; Al_2O_3 , 41.2–43.9; SiO_2 , 24.6–33.3; CaO, 11.7–16.7; TiO_2 , 0.6–1.9; Cr_2O_3 , 0.3–1.0; FeO, 0.3–1.2; other elements <0.1). Also enclosed by the porous mesostasis is a pyroxene assemblage dominated by enstatite (En) with minor pigeonite (Pig) and augite (Aug). The augite is an overgrowth on the pigeonite. Troilite (Tr) is minor phase associated with the pyroxene assemblage. Troilite and Fe-Ni metal (white spots) are scattered in the mesostasis near the pyroxene assemblage. The right lower side of the CAI is broken surface where the pyroxene assemblage directly borders the matrix (Mx). Other abbreviations: Ol, olivine; Chond, chondrule; AOA, amoeboid olivine aggregate.

Une chronologie remise en cause

**On early Solar System chronology: Implications of an heterogeneous spatial distribution
of ^{26}Al and ^{53}Mn**

MATTHIEU GOUNELLE^{1,2,*} AND SARA S. RUSSELL²

¹CSNSM-Université Paris XI, Bâtiment 104, 91 405 Orsay, France

²Department of Mineralogy, The Natural History Museum, Cromwell Road, London SW7 5BD, UK

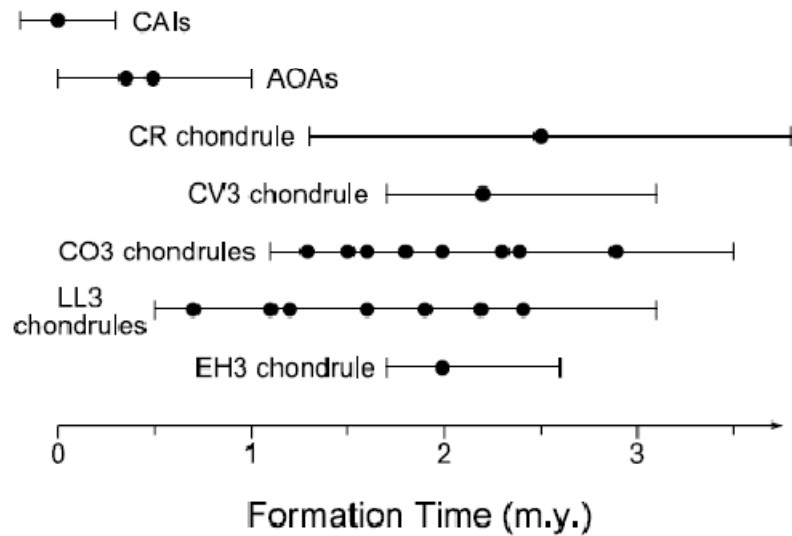
(Received April 14, 2004; accepted in revised form December 23, 2004)

Chronologie: bilan

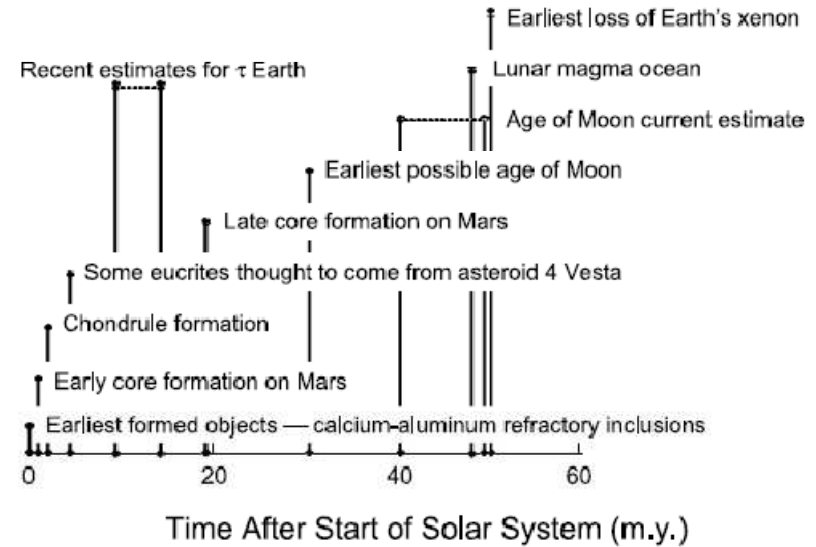
Nichols 2006

Meteoritic Constraints			
		Radiometric Technique	References
Fiducial point: CAI formation	4.5672 ± 0.0006 G.y.	Pb-Pb	[1]
CAI formation duration	50 k.y.	Pb-Pb	[2]
	300 ± 100 k.y.	Al-Mg	[3]
	~500 k.y.	Pb-Pb	[1]
Formation of parent bodies (10–100 km)	~5–10 m.y.	²⁶ Al, ⁶⁰ Fe heat sources	see text
HED parent body (Vesta, 525 km)	2 m.y.	Mn-Cr	[4]
	4.2 ± 1.3 m.y.	Hf-W	[5]
	~5 m.y.	Hf-W	[5,6]
	5 m.y.	Al-Mg	[7]
H chondrites	3 m.y.	²⁴⁴ Pu, ⁴⁰ Ar- ³⁹ Ar	[8]
Iron meteorite parent body	1–2 m.y.	Al-Mg, Hf-W	[9,10]
Mars (6800 km)	13 ± 2 m.y.	Hf-W	[5]
Earth (12,756 km)	33 ± 2	Hf-W	[5]
Chondrite parent-body formation duration	2.5 m.y.	Pb-Pb	[1,11,12]
Iron meteorite parent-body formation duration	5 m.y.	Re-Os	[13]

Chronologie: bilan



Chambers, 2006



Halliday and Kleine, 2006

Chronologie: dynamique et astronomique

Dynamical Constraints			
	Heliocentric Distance		
10–100 km	~1–10 k.y.		
1–10 km to Moon (3476 km)/Mars (6794 km)	~100 k.y.	at 1 AU	[14]
Mercury (4880 km)/Mars (6794 km)	~100 k.y.		
Earth (12,756 km)	~100 m.y.		
Ceres-sized (933 km)	~50 k.y.	at 1 AU	[14]
	~500 k.y.	at 2 AU	
	~5 m.y.	at 2.5 AU	
Gas giants (for comparison)	~1–10 k.y.		[15]
Astronomical Constraints			
	Technique		
Circumstellar Disk Lifetimes	~5–15 m.y.	IR, millimeter, submillimeter emission	[16,17]
	3–6 m.y.	IR, millimeter, submillimeter emission	[18]

References: [1] *Amelin et al.* (2002); [2] *Bizzarro et al.* (2004); [3] *Young et al.* (2005); [4] *Lugmair and Shykolyukov* (1998); [5] *Kleine et al.* (2002); [6] *Kleine et al.* (2004); [7] *Srinivasan et al.* (1999); [8] *Trieloff et al.* (2003); [9] *Bizzarro et al.* (2005); [10] *Kleine et al.* (2005); [11] *Bizzarro et al.* (2004); [12] *Kunihiro et al.* (2004); [13] *Horan et al.* (1998); [14] *Kortenkamp et al.* (2001); [15] *Boss* (2003); [16] *Strom et al.* (1989); [17] *Skrutskie et al.* (1990); [18] *Haisch et al.* (2001).

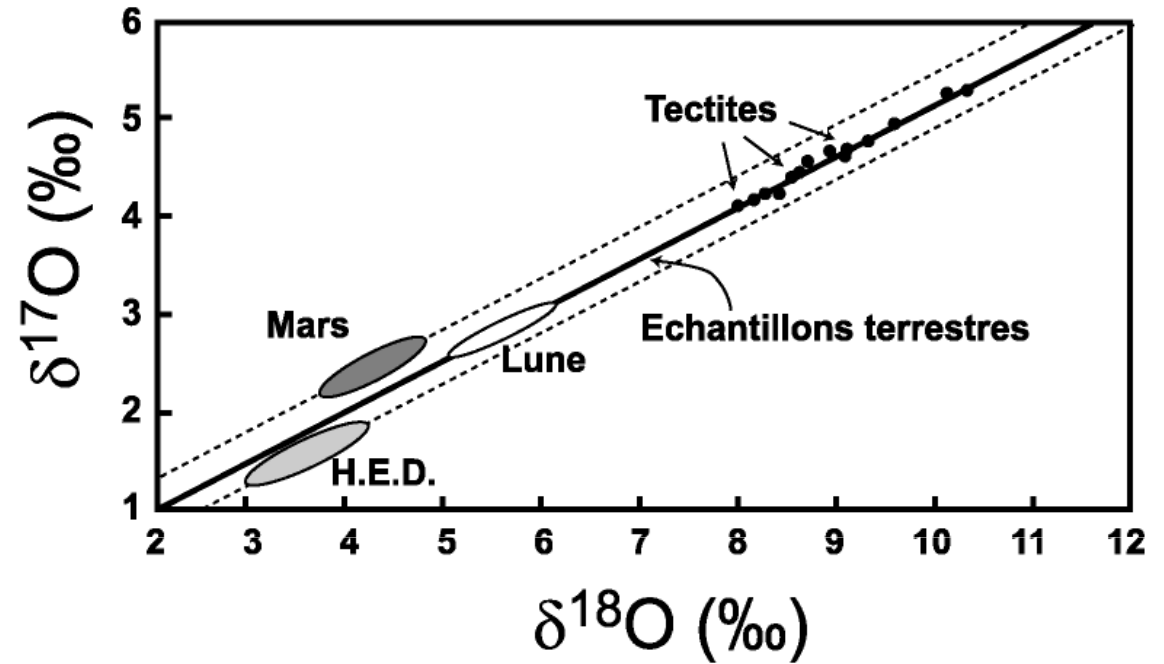
Nichols 2006

La formation de la Lune



5. De l'accrétion à la différenciation

5.4 La formation de la Lune



La Lune est la Terre semble avoir des choses en commun...

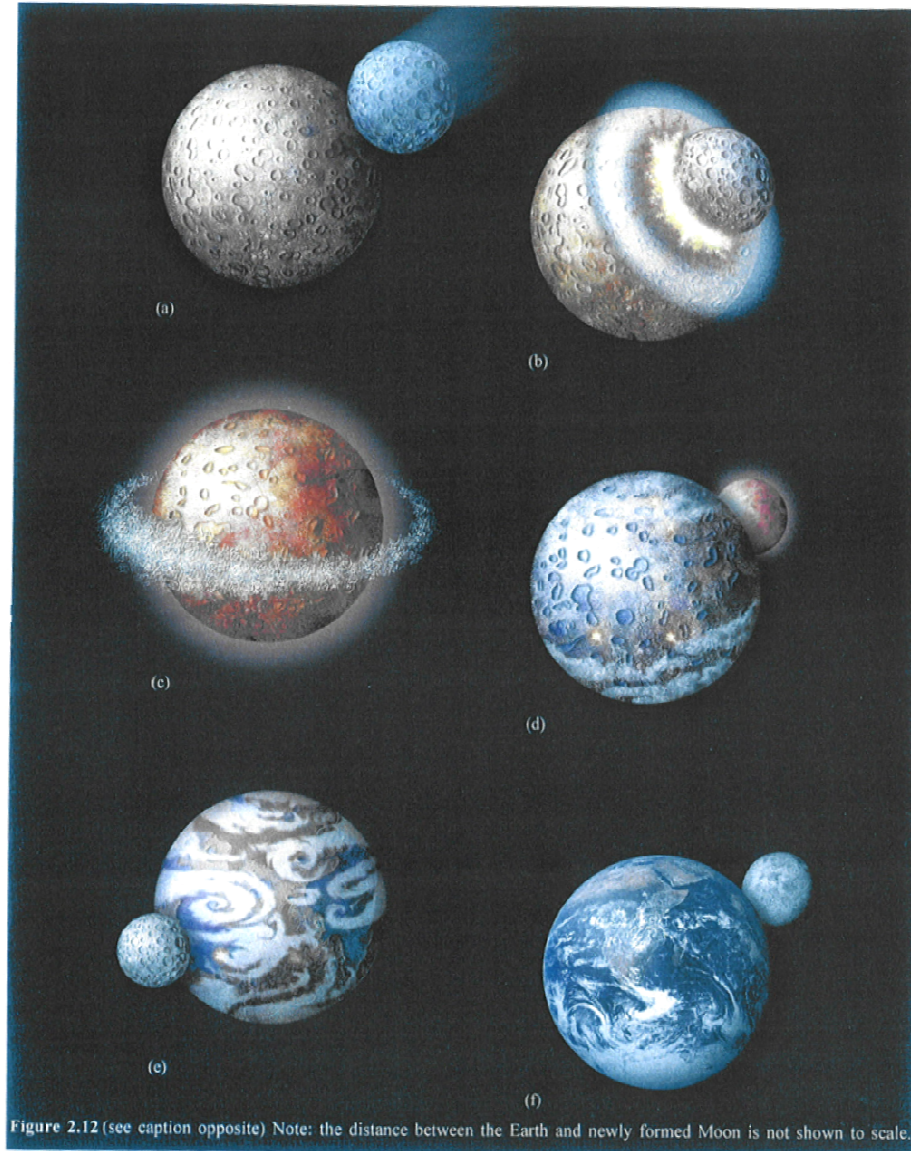
5. De l'accrétion à la différenciation

5.4 La formation de la Lune

Modèle préféré:

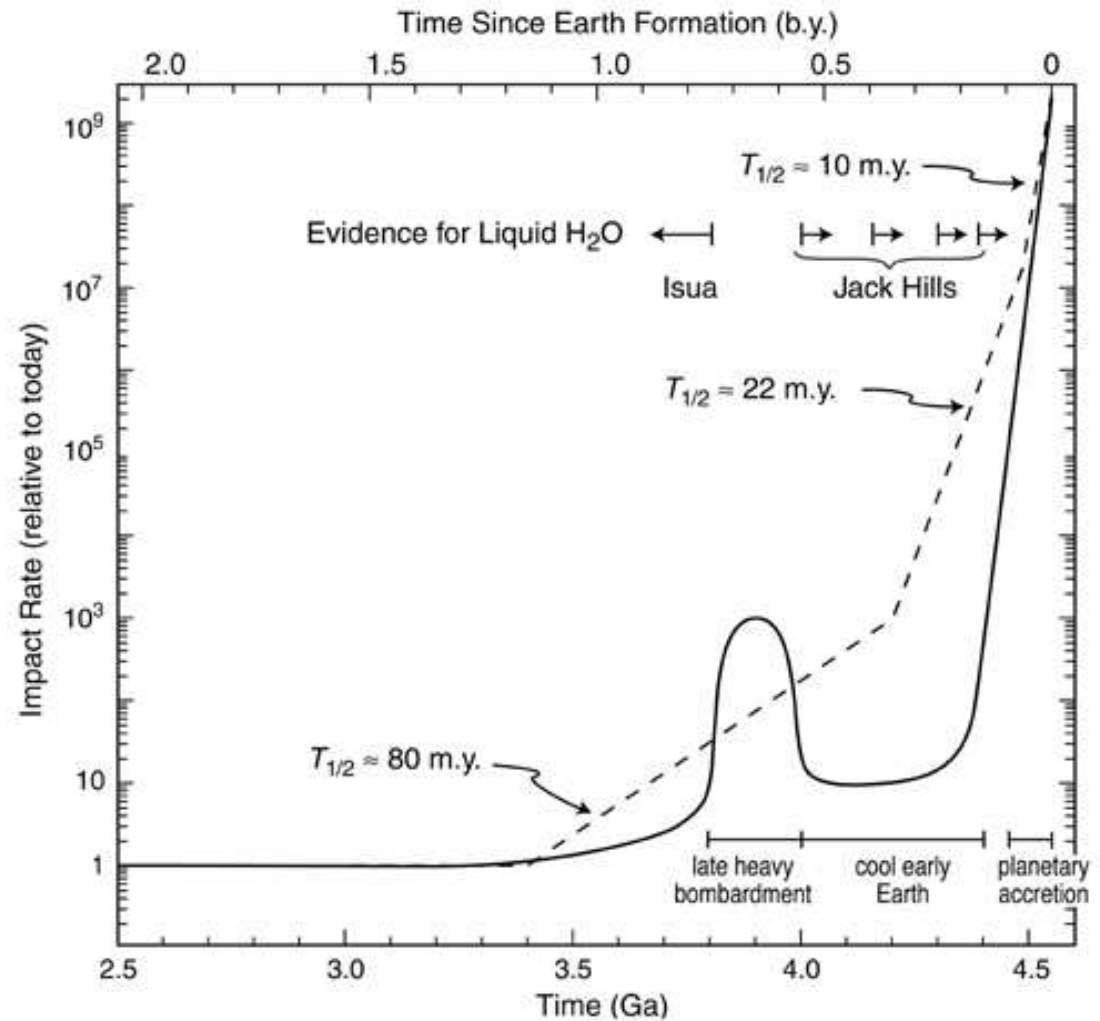
-impact rasant sur la Terre par un objet de la taille de Mars.

-formation d'un anneau de poussière qui va se réaccréter.



5. De l'accrétion à la différenciation

5.5 Le bombardement tardif et l'accrétion des volatiles



Le bombardement tardif

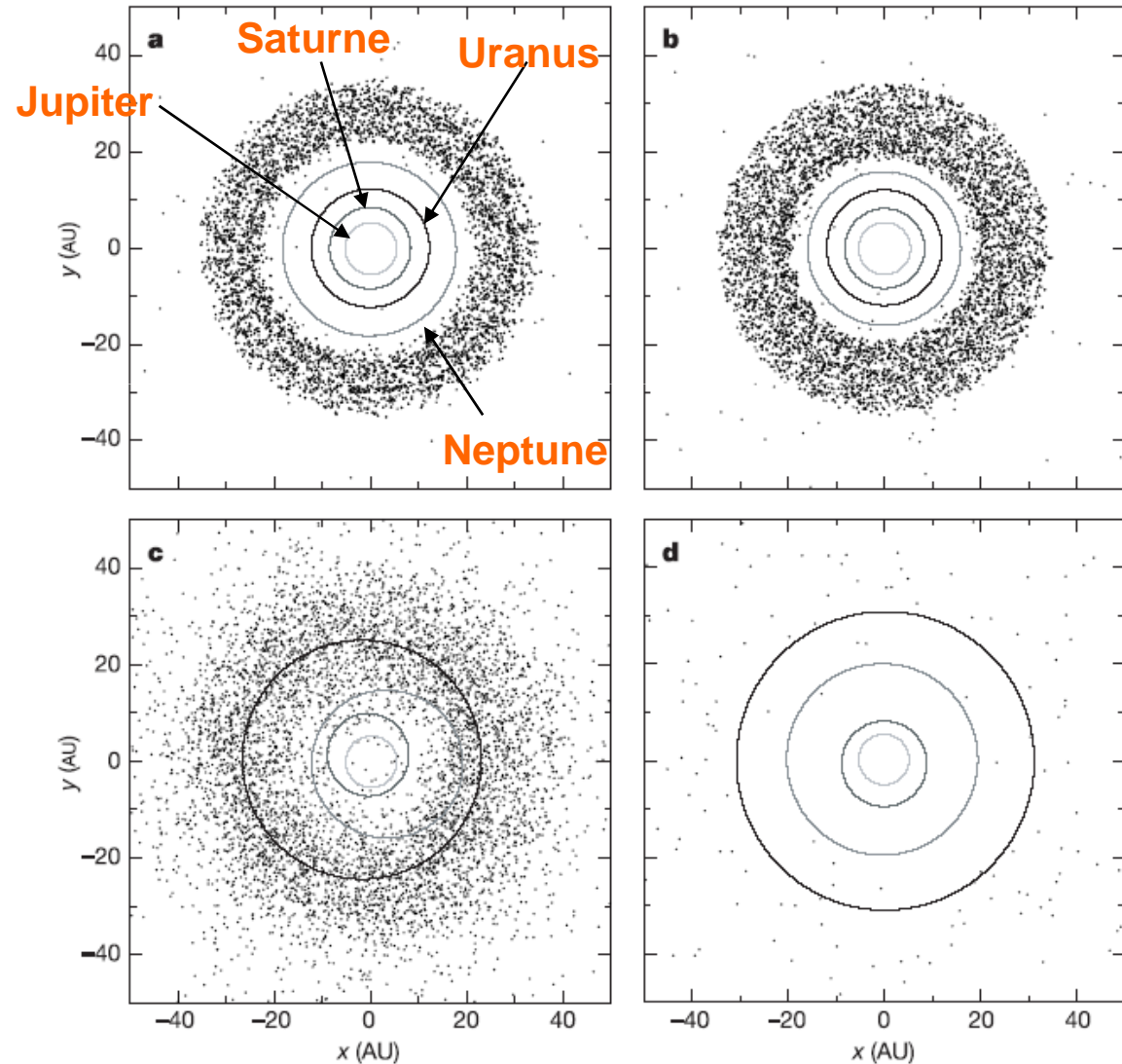
Gomes et al. (2005) *Nature*

Lorsque les planètes géantes sont formées une « ceinture de Kuiper » est présente.

Migration planétaire.

Echange orbite entre Uranus et Neptune

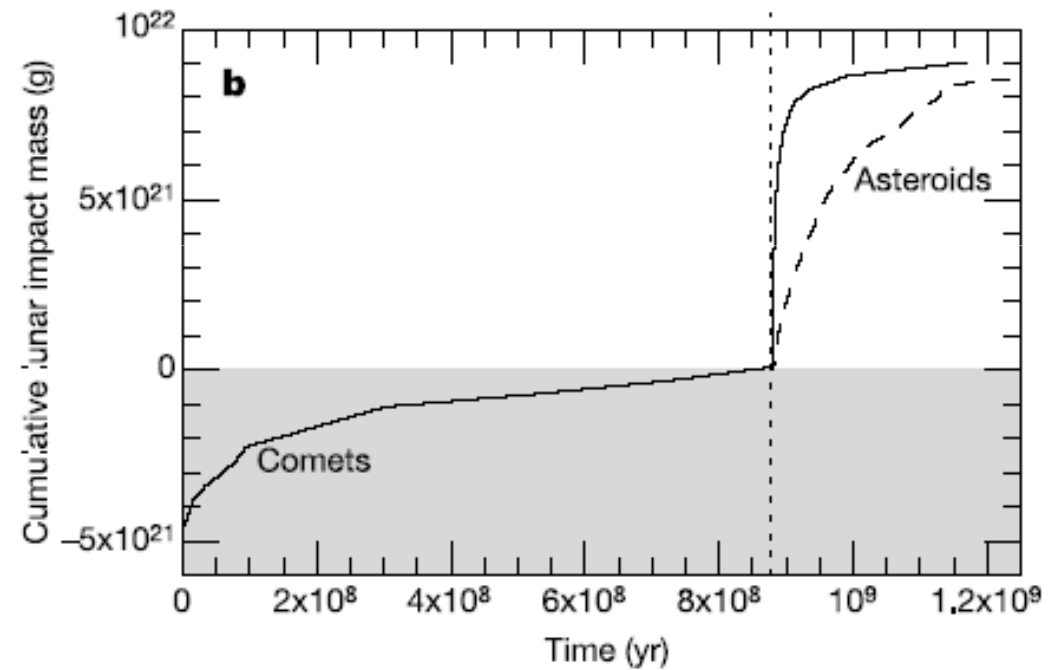
Instabilité et bombardement cataclysmique.



Le bombardement tardif

Celui-ci arrive à $t=3.8$ Ga
d'après les modèles.

Sur la Lune observation entre
3.8 Ga et 4.1 Ga



Le bombardement tardif



Evolution astronomique future

1/100 collision mercure
avec Venus ou le Soleil

1/2500 collision Mercure,
Mars ou Venus avec la
Terre dans 3,34 Ga

Laskar, 2009

