http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

Les Météorites

Par Tristan FERROIR – LST ENS Lyon

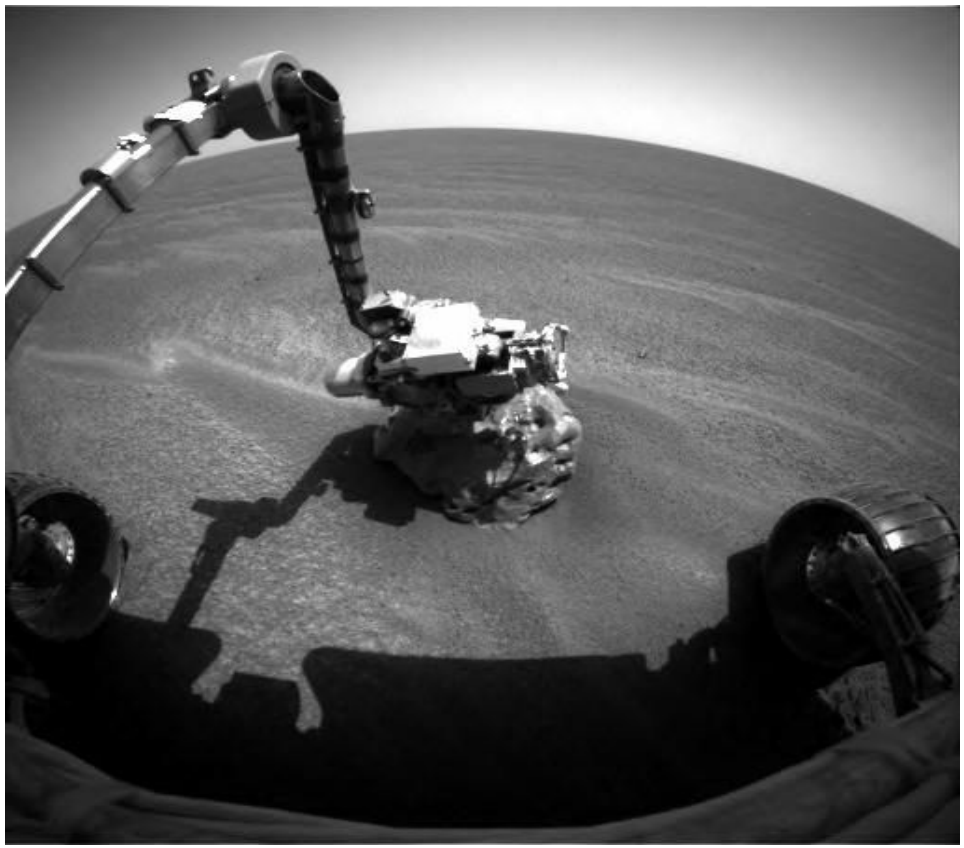
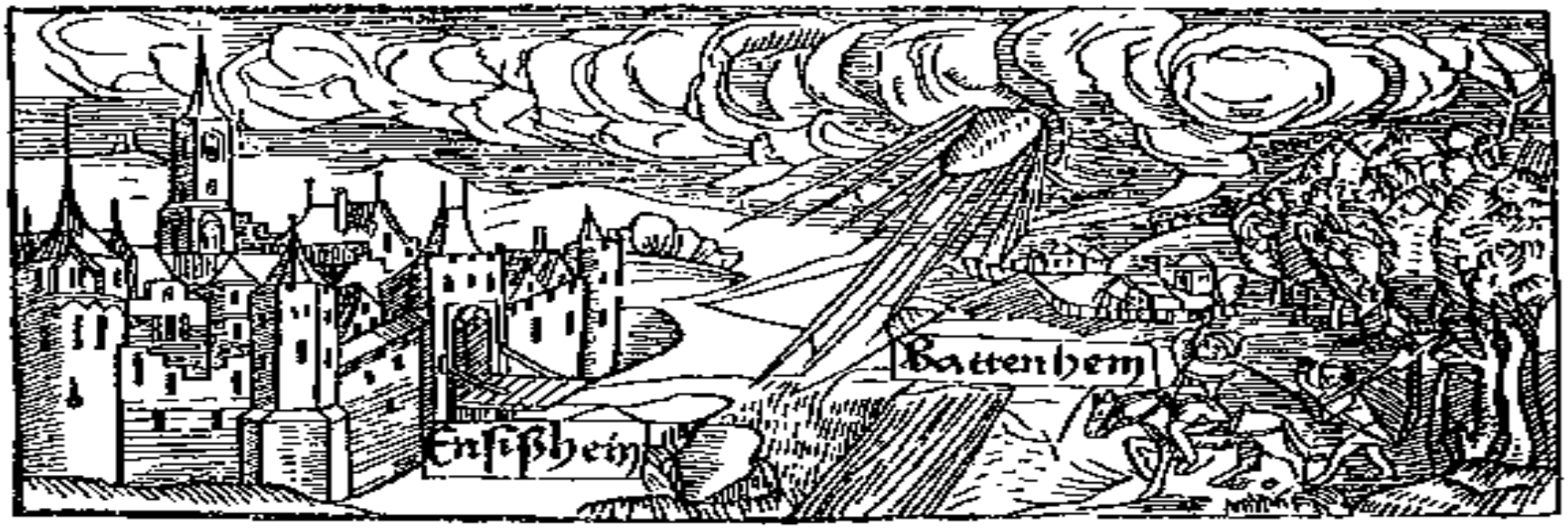


Photo de la NASA montrant une météorite sur Mars vue par le robot Opportunity

http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

Introduction

- Météorite = pierre tombée naturellement sur Terre
- Connu depuis longtemps (décrit par Pline l'ancien)



Chute de la météorite d'Ensisheim, 1492

- Admis après la chute de l'aigle 1806

http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

Introduction

- Flux annuel ~ 10 à 100t/an selon qu'on se place avant ou après l'atmosphère
- La plupart sont des micrométéorites
- La plus grosse : Hoba – 60t

- Ca peut couter cher

(de 15 à 2500$/g)

- Aspect divin

Introduction

Voici les météorites que possèdent le Vatican dont les noms commencent par la lettre A puis par B.

C'est l'une des collections les plus impressionantes montrant l'aspect divin que ces météorites avaient auparavant.

- ADMIRE, Lyon Co., Kansas, USA - Find, 1881 - **Pallasite** - Specimens: Four fragments, total weight 73 (largest piece 20 gm) Fragment, 2 gm.
- AGEN, Lot et Garonne, France - Fall, Sept.5,1814 - **Chondrite H5** veined, xenolithic - Specimens: Fragment with 40% fusion crust, 685 gm, Fragment with 50% fusion crust, 532 gm, Fragment with 25% fusion crust, 446 gm, Fragment with 20% fusion crust, 37 gm, Fragment with 25% fusion crust, 23 gm, Fragment in glass vial, 9.3 gm.
- AHUMADA, Chihuahua, Mexico - Find, 1909 - Pallasite - Specimen: Nearly rectangular slab with two original surfaces, 63 gm.
- AINSWORTH, Brown Co. Nebraska, USA - Find, 1907 - **Octahedrite IIB** - Specimen: Polished slice, 100 gm.
- ALAIS, Gard, France - Fall, March 15, 1806 - **Carbonaceous Chondrite C**I - Specimens: Small fragments, 2.35 gm, 1.4 gm, 1.1 gm, 0.6 gm, Dust and tiny fragments, 0.6 gm, 0.14 gm.
- ALEPPO, Syria - Fall, ca.1873 - Chondrite L6 brecciated - Specimen: Fragment, 0.58 gm.
- ALFIANELLO, Brescia, Italy - Fall, Feb. 16, 1883 - Chondrite L6 - Specimens: Fragment, 2740 gm Fragment of stone with partial fusion crust, 625 gm, Irregular fragment, 154 gm, Fragment with fusion crust, 66 gm, Irregular fragment, 14 gm, Fragments, 3.5 gm, 2.6 gm.
- ALLEGAN, Allegan Co., Michigan, USA - Fall, July 10, 1899 - Chondrite H5 - Specimens: Fragment with 25% fusion crust, 300 gm, Fragment with 30% fusion crust, 146 gm, Fragment, 59 gm, Fragments (2), total weight 3 gm.
- ALLENDE, Chihuahua, Mexico - Fall, Feb. 8, 1969 - Carbonaceous Chondrite CV3 - Specimens: Fragments, 5 gm, 5 gm.
- AMBAPUR, Nagla, Aligarh District, United Province, India - Fall, ay 27, 1895 - Chondrite H5 - Specimen: Fragment, 5.18 gm.
- ANGELICA, Shavano Co. Wisconsin, USA - Find, 1916 - Octahedrite IIIA - Specimen: Piece with two surfaces sawn and polished, 69 gm.
- ANGERS, Maine-et-Loire, France - Fall, June 3, 1822 - **Chondrite L6** veined - Specimen: Irregular fragment, 4 gm.

http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

Introduction

- ANGRA DOS REIS (iron), Rio de Janeiro, Brazil - Find, before 1888 - **Hexahedrite IIA** - Specimen: Individual iron with flight ablation markings, one sawn surface (main mass), on display in case cupola, 5725 gm.
- ANGRA DOS REIS (stone), Rio de Janeiro, Brazil - Fall, Jan.30, 1869 - **Achondrite Angrite** - Specimen: Fragment in double vials, 0.62 gm.
- APOALA, Oaxaca, Mexico - Find, 1889 - Octahedrite IIIB - Specimen: Slice, 78 gm.
- APT, Vaucluse, France - Fall, October 8, 1803 - Chondrite L6 - Specimen: Fragment with 10% fusion crust, 50 gm.
- ARISPE, Sonora, Mexico - Find, 1896 - Octahedrite Anomalous - Specimens: Thick rectangular slice with polished surfaces, 164 gm, Rectangular slab polished and etched on one side, 87 gm, Square prism, 13 gm.
- ARLINGTON, Sibley Co., Minnesota, USA - Find, 1894 - Octahedrite IIE - Specimens: Polished slices etched with name, 25.5 gm, 9 gm.
- ASSISI, Perugia, Italy - Fall, May 24, 1886 - Chondrite H5 - Specimens: Partially fusion crusted small fragments, 0.98 gm, 0.93 gm.
- AUGUSTINOVKA, Ekaterinoslav, Ukraine - Find, 1890 - Octahedrite IIIB - Specimens: Thick rectangular piece with some rough weathered surface badly oxidized, 1200 gm, Entirely oxidized irregular fragment, 128 gm, Completely alterated and oxidized fragment, 120 gm, Oxidized irregualr piece, 108 gm, Completely oxidized fragments, 92 gm, 25 gm, Oxidized fragment, polished on one side, 68 gm, Oxidized irregular piece with polished face, 38 gm, Rectangular wedge-shaped slab, 36 gm, Badly oxidized piece sawn on three surfaces at right angles 33 gm, Triangular prism-shaped piece, one side polished and etched one side polished, one side rough and grooved, 33 gm, Triangular slab, 27 gm, Rectangular slab, polished and etched, now hal rusted, 27 gm, Grooved triangular prism, two sides polished one etched, 23 gm, Three vials oxide and small fragments, approx. 20 gm, Badly, oxidized fragment, 16 gm.
- AUMALE, Alger, Algeria - Fall, August 25, 1865 - Chondrite L6 - Specimens: Fragment with partial fusion crust, 121 gm, Fragment, 19.5 gm,

Introduction

- AUMICRES, Lozere, France - Fall, June 3, 1842 - Chondrite L6 veined - Specimens: Fragment with 15% fusion crust, 72 gm, Fragment, 45 gm, Fragment with fresh breack, 22 gm, Irregular fragment with partial fusion crust, 15.5 gm, Fragment with 5% fusion crust, 14 gm.
- AUSSON, Haute Garonne, France - Fall, December 9, 1858 - Chondrite L5 - Specimens: Fragment with 25% fusion crust, 104 gm, Fragment, 87 gm Fragment with 10% fusion crust, 48 gm, Fragment, 22 gm, Fragment with trace fusion crust, 1.4 gm, Separated chondrules, 0.2 gm, Thin section.
- BABB'S MILL, Greene Co. Tennessee, USA - Find, 1842 - Ataxite anomalous - Specimens: Polished slice, 44.5 gm, Heated slice, 14 gm.
- BACHMUT, Ekaterinoslav, Ukraine - Fall, February 15, 1814 - Chondrite L6 - Specimen: Irregular fragment with two sawn surfaces, 12.6 gm.
- BACUBIRITO, Sinaloa, Mexico - Find, 1863 - Octahedrite anomalous - Specimens: Fragment with one sawn and polished surface, 13 gm, Fragment, 1 gm.
- BALLINOO, Murchison River, Western Australia - Find, 1892 - Octahedrite IIC - Specimens: Slice with polished and etched surface, 332 gm, Truncated pyramid with one rough surface, 21 gm, Irregular slab with one curved rough surface, heated on corner, 13 gm, Rectangular wedge-shaped slab, 4.5 gm.
- BANDONG, West Java - Fall, December 10, 1871 - Chondrite LL6 - Specimen: End piece with two sawn surfaces, 25 gm.
- BARBOTAN, Gers, France - Fall, July 24, 1790 - Chondrite H5 - Specimens: Irregular fragment with partial fusion crust, 83 gm, Irregular Fragment, 61 gm, Two small fragments, 1.9 gm.
- BARRANCA BLANCA, Come Caballo Pass, Atacama, Chile - Find, 1855 - Octahedrite IIE - Specimen: Fragment, 13 gm.
- BARRATTA, Deniliquin Co., Townsend, New South Wales - Find, 1845 - Chondrite L4 - Specimens: Nearly rectangular slab, 97.5 gm, Fragment with one sawn and polished surface, 89 gm, Fragment, 1.4 gm.
- BATH, Brown Co. South Dakota, USA - Fall, August 29, 1892 - Chondrite H4 brecciated - Specimens: Fragment with partial fusion crust, 478 gm, Fragment with sawn surface, 159 gm, Fragment with sawn surface and 15% fusion crust, 38 gm.

Introduction

- BATH FURNACE, Bath Co., Kentucky, USA - Fall, November 15, 1902 - Chondrite L6 - Specimens: Slab with two sawn sides and fusion crust, 44 gm, Triangular slab with one fusion crusted side, i.48 gm.
- BEAR CREEK, Jefferson Co., Colorado, USA - Find, 1866 - Octahedrite IIIB - Specimen: Fragment, 8.9 gm.
- BEARDSLEY, Rawlins Co., Kansas, USA - Fall, October 15, 1929 - Chondrite H5 - Specimens: Slabs, 18 gm, 10 gm (slabs fit together).
- BEAVER CREEK, West Kootenay Dist. British Columbia, Canada - Fall, May 26, 1893 - Chondrite H4 - Specimens: Irregular fragment partially fusion crusted, 205 gm Small fragments, 1.9 gm.
- BEENHAM, Union Co., New Mexico, USA - Find, 1937 - Chondrite L5 veined - Specimen: Slab, 12.8 gm.
- BELLA ROCA, Sierra de San Francisco, Santiago Papasquiaro, Durango, Mexico - Find, 1888 - Octahedrite IIIB Specimens: Thick slice 146.5 gm. Piece, 50 gm.
- BENARES, United Provinces, India - Fall, December 19, 1798 - Chondrite LL6 - Specimen: Individual stone. 1.15 gm.
- BENDEGO, Monte Santo, Bahia, Brazil - Find, 1784 - Octahedrite IC Specimens: Slice with polished surface, 127 gm, Oxidized wedge-shaped end piece, 34 gm, Rectangular wedge-shaped end piece with four sawn surfaces and one surface polished and etched, 9.5 gm, Oxidized fragments, 3 gm.
- BERLANGUILLAS, Burgos, Spain - Fall, July 8, 1811 - Chondrite L6 - Specimen: Irregular fragment partially fusion crusted, 10.85 gm.
- BEUSTE, Pau, Basses-Pyrénées, France - Fall, May, 1859 - Chondrite L5 - Specimen: Fragment with partial fusion crust, 0.35 gm.
- BIELOKRYNITSCHIE, Zaslavl, Volhynia, Ukraine - Fall, January 1, 1887 - Chondrite H4 - Specimen: Irregular fragment with two sawn surfaces, 0.65 gm.
- BILLINGS, Christian Co., Missouri, USA - Find, 1903 - Octahedrite IIIA - Specimens: Slice, 69.5 gm, Oxidized piece, 5.5 gm.

Introduction

- BISCHTUBE, Nikolaev, Turgai, Siberia - Find, 1888 - Octahedrite IA - Specimen: Slice with polished surface, 31.5 gm.
- BISHOPVILLE, Lee Co. South Carolina, USA - Fall, March 23, 1843 - **Achondrite Aubrite** - Specimens: Fragment in wooden circular box with glass top, 4.3 gm, Fragments in glass vial, 1.9 gm.
- BITBURG, Trier, Rhenish Prussia - Find, before 1805 - Pallasite - Specimen: Oxidized fragment, 10 gm.
- BJELAJA, Zerkov, Kiev, Ukraine - Fall, January 15, 1796 - Chondrite H6 - Specimen: Fragment with 30% fusion crust, 13 gm.
- BJURBOLE, Borga, Nyland, Finland - Fall, March 12, 1899 - Chondrite L4 - Specimens: Smooth rounded fragment, 190 gm, Fragments in glass bottle, 3 gm, Fragments and loose chondrules in bottle, 1.25 gm.
- BLUFF, Fayette Co., Texas, USA - Find, ca.1878 - Chondrite L5 brecciated - Specimens: Fragment (?), 234 gm, Fragment, 62 gm, Polished slab, 58 gm, Fragment, 14 gm (fits together with 62 gm fragment) Chips in glass vial, 1.7 gm.
- BOERNE, Kendall Co. Texas, USA - Find, 1932 - Chondrite H6 - Specimen: End piece with one large polished surface, one small polished surface, label on large surface, 215 gm.
- BOHUMILITZ, Vimperk, Bohemia - Find, 1829 - Octahedrite IA - Specimen: Small fragments, 10.5 gm.
- BORGO SAN DONINO, Parma, Italy - Fall, April 19, 1808 - Chondrite LL6 - Specimen: End piece with 40% fusion crust, one sawn surface, 17.5 gm.
- BORI, Betul District, Central Provinces, India - Fall, May 9, 1894 - Chondrite L6 - Specimen: Irregular fragment with partial fusion crust, 23.5 gm.
- BORKUT, Maramaros, Ruthenia, Ukraine - Fall, October 13, 1852 - Chondrite L5 - Specimen: Irregular fragment, 1.7 gm.
- " BOTOCUDOS " (probable synonym for another unknown specimen name) - Iron - Specimen: Slab with sawn edges, 7 gm.
- BOTSCHETSCHKI, Putivi, Ukraine - Fall, end of 1823 - Chondrite L4 - Specimen: Thin section.
- BRAHIN, Minsk, Russia - Find, 1810 - Pallasite - Specimen: End piece with one cut surface, 13 gm.

Introduction

- BRAUNAU, Trutnov, Bohemia - Fall, July 14, 1847 - Hexahedrite IIA - Specimens: Slice, 7 gm, Fused Fragments, 1 gm.
- BREMERVORDE, Hannover, Germany - Fall, May 13, 1855 - Chondrite H/L3 - Specimens: Irregular fragment with partial fusion crust, 16.5 gm, Fragment, 1.15 gm, Thin section.
- BRENHAM, Brenham Township, Kiowa Co. Kansas, USA - Find, 1882 - Pallasite - Specimens: Rusty slice, 2533 gm, Slabs, 248 gm, 133 gm, Slice with one polished surface, 101 gm, Piece, 28 gm, Isolated olivine grains, 3.45 gm, Metal fragment, 0.95 gm.
- BRIDGEWATER, Burke Co. North Carolina, USA - Find, 1890 - Octahedrite IID - Specimens: Polished and etched slices, 40.8 gm, 17 gm.
- BRUDERHEIM, Alberta, Canada - Fall, March 4, 1960 - Chondrite L6 - Specimen: Fragment with 15% fusion crust and saw marks, 11.5 gm.
- BURDETT, Pawnee Co., Kansas, USA - Find, 1965 - Chondrite H5 - Specimen: Slab with one polished surface, 18.5 gm.
- BUR-GHELUAI, Bur-Hagaba District, Somaliland - Fall, October 16, 1919 - Chondrite H5 xenolithic - Specimen: Individual stone with fusion crust and 30% broken surface, 1290 gm.
- BURLINGTON, Otsego Co., New York, USA - Find, before 1819 - Octahedrite IIIE - Specimen: Fragment with three orthogonal polished and etched surfaces, 21 gm.
- BUTLER, Bates Co., Missouri, USA - Find, before 1874 - Octahedrite Plessitic IRANOM - Specimen: Rectangular slice with one original surface, 82 gm.
- BUTSURA, Champaran District, Bihar, India - Fall, May 12, 1861 - Chondrite H6 - Specimen: Irregular fragment with partial fusion crust, 0.5 gm.
- BUSCHOFF, Zemgale, Latvia - Fall, June 2, 1863 -Chondrite L6 veined - Specimen: Irregular fragment, 5 gm.

■ ■ ■

Problématique

- D'où viennent ces roches?
- Sont-elles toutes identiques?
- En quoi peuvent-elles nous être utiles dans la compréhension de l'histoire de la Terre et du système solaire?

I – Quelques caractéristiques distinctives des météorites

http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

A) Comment sait-on qu'une roche est une météorite?

- On la voit tomber et on va la ramasser

http://www.meteorites.com.au/films/

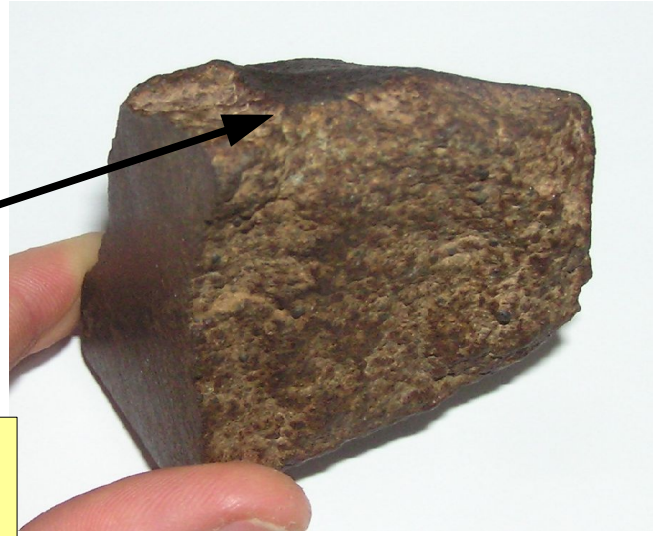
- Elle a une densité élevée (expérience)

Météorite

Roche terrestre du manteau

- Elle possède une croute de fusion

(partie noire qui entoure la météorite)

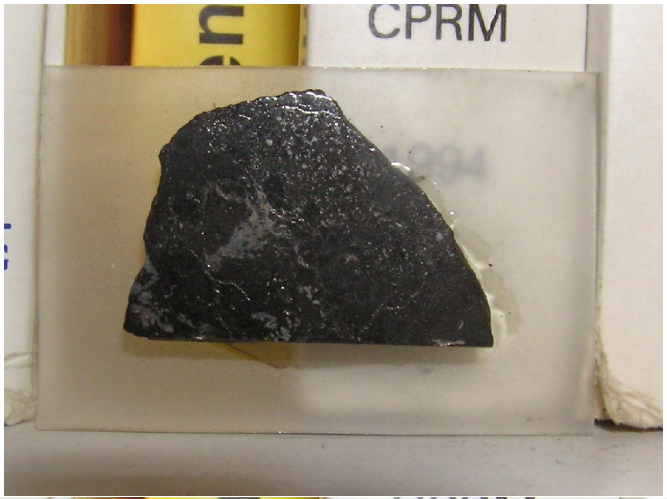


La croute de fusion est due aux frottements entre la météorite et l'atmosphère. La vitesse de la météorite est si grande que l'air oppose une grande résistance (un peu comme quand on est en voiture, qu'on roule vite et qu'on sort la main par la fenetre : on sent la résistance de l'air). Ceci provoque des frottements qui font fondre localement la météorite

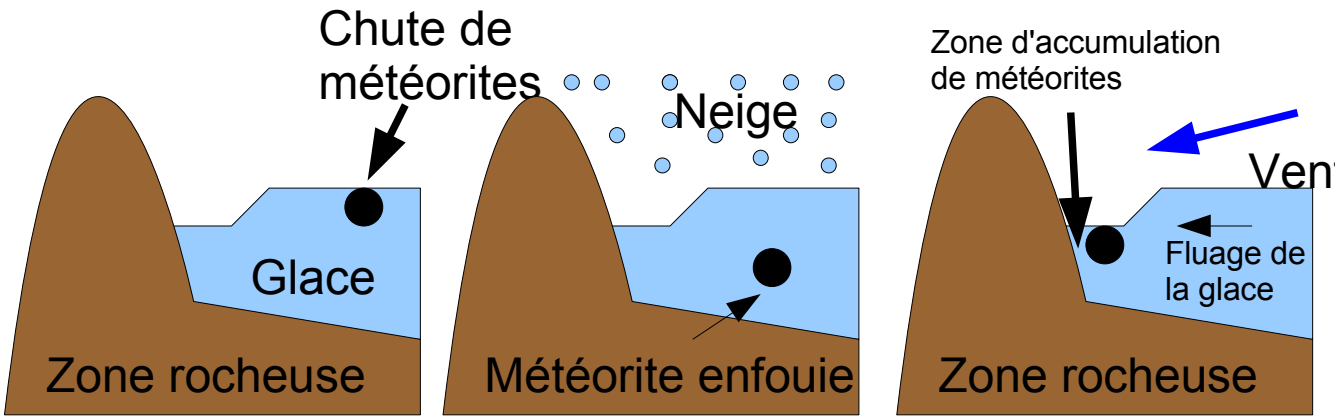
http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

A) Comment sait-on qu'une roche est une météorite?

- Elle est souvent aimantée : certaines d'entre elles contiennent du fer pur.



- On les trouve dans le Sahara (NWA) ou en Antarctique (ALH)

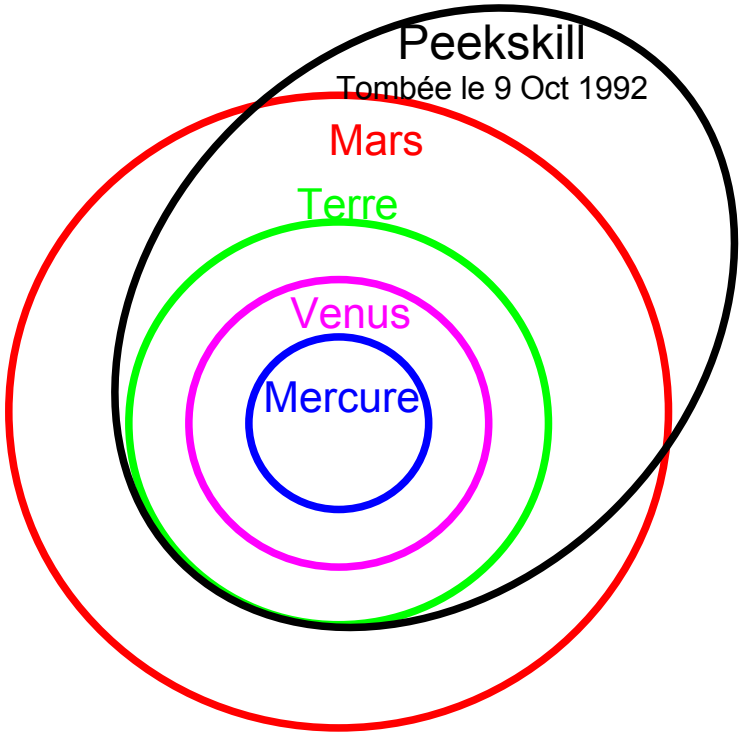


On leur donne le nom de la boite postale la plus proche

http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

A) Comment sait-on qu'une roche est une météorite?

- Détermination de l'origine d'après leur trajectoire



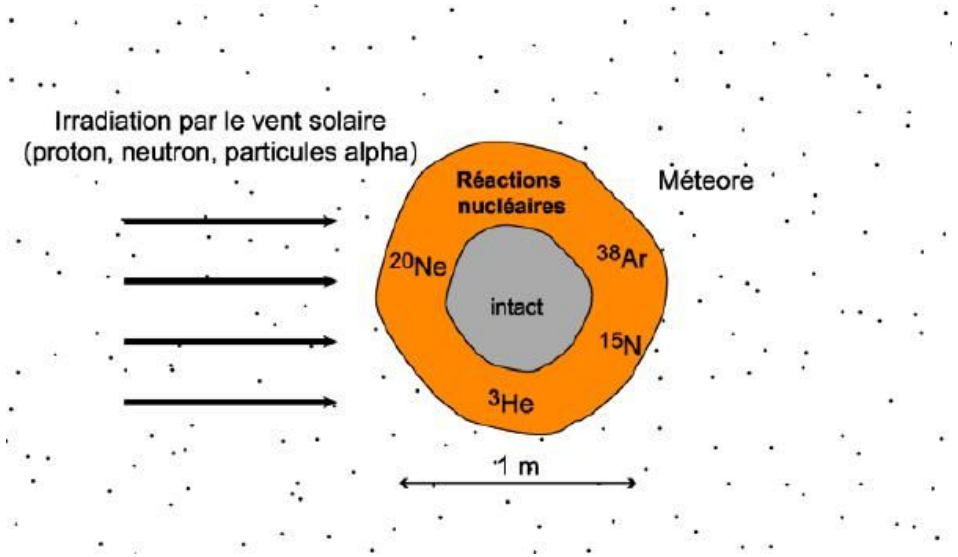
La reconstitution de la trajectoire des météorites, lorsque cela est possible montre que la plupart d'entre elles viennent de la ceinture d'astéroïdes.
Cette zone est située entre les orbites de Mars et de Jupiter.

A gauche, la météorite de Peekskill qui est tombée sur une voiture

http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

A) Comment sait-on qu'une roche est une météorite?

- Elles ont des âges d'irradiation faible

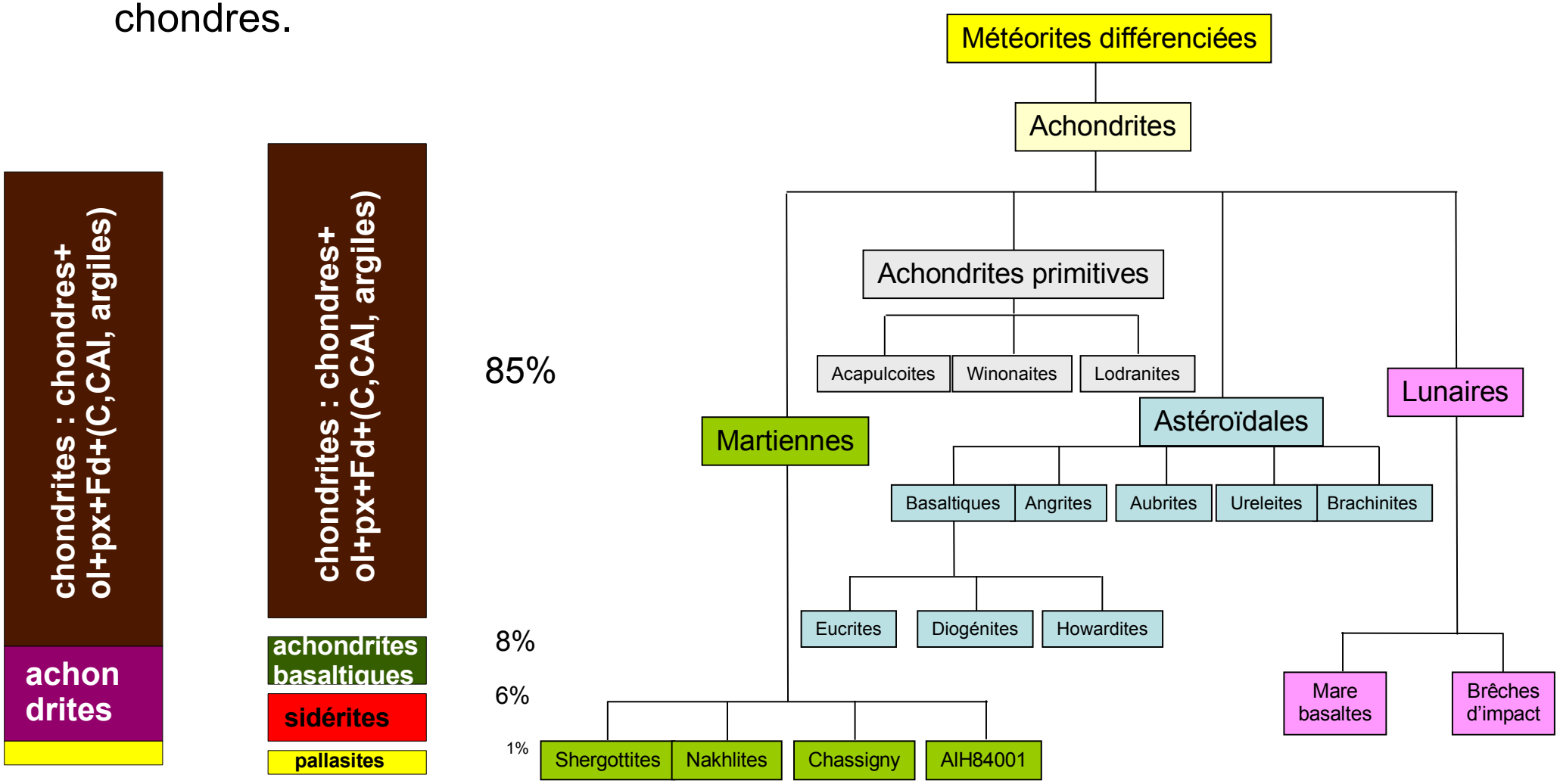


L'irradiation des météorites se produit lorsqu'elle voyage dans l'espace. Pendant ce trajet, elles sont bombardées par les rayonnements cosmiques et galactiques ce qui produit certains isotopes particuliers. Plus il y en a, plus on peut dire qu'elles ont voyagé longtemps.
C'est un petit peu comme nous lorsque nous restons au soleil : plus on y reste longtemps, plus on est bronzé.
Les météorites ont des âges d'exposition qui vont du million d'années à la centaine de millions d'années. Cela veut dire qu'elles ont été arrachées de leur astéroïdes ou de leur planètes il y a 1 à 100 millions d'années.

http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

B) Quelle pétrologie et minéralogie pour les météorites?

- Il existe deux types de météorites : les chondrites (80% des chutes) et les achondrites qui se distinguent par la présence de sphères rondes : les chondres.



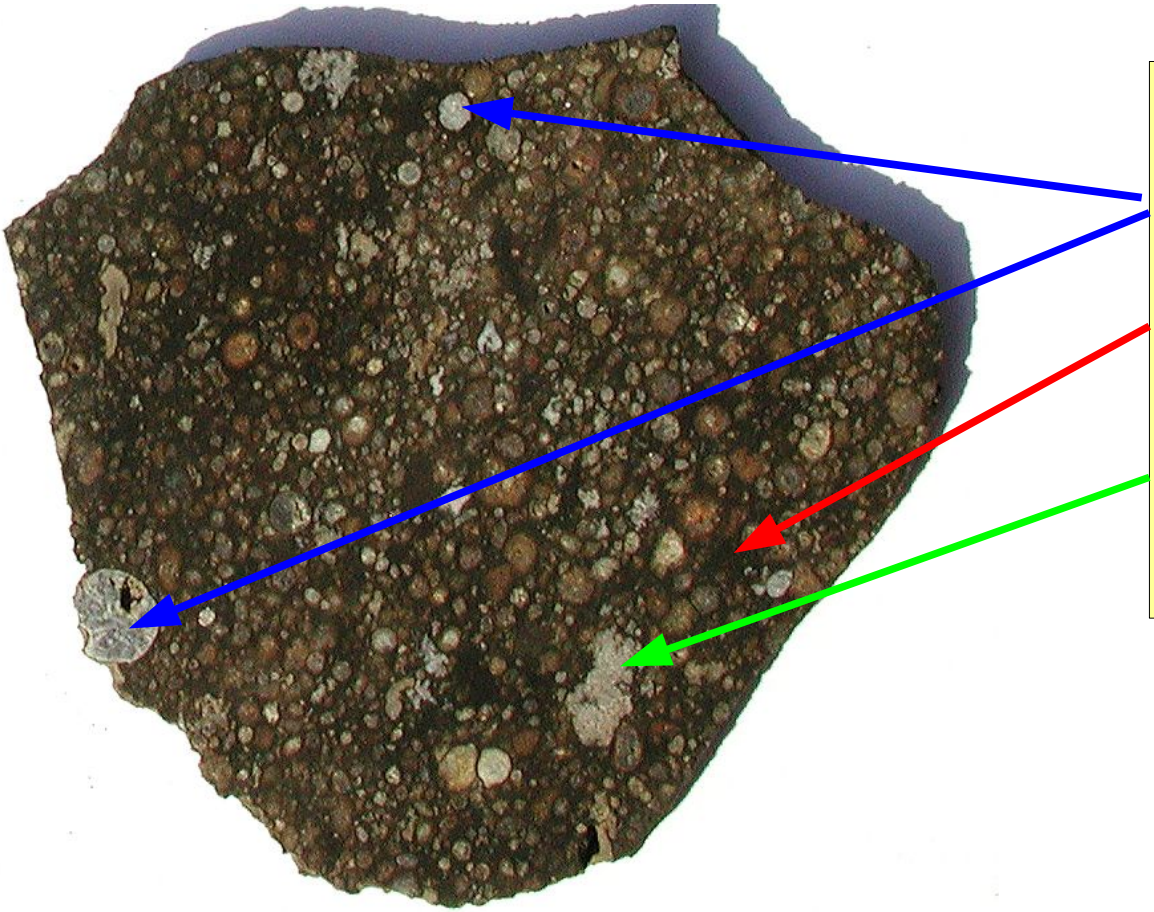
http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

B) Quelle pétrologie et minéralogie pour les météorites?

- Les chondrites représentent 80% des chutes
- Elles tirent leur nom des chondres qu'elle contiennent : ce sont des petites structures rondes.
- Elles peuvent contenir aussi des olivines et des pyroxènes. Certaines de ces chondrites contiennent des CAIs (voir plus loin), d'autre du fer pur.
- Elles peuvent aussi contenir des serpentines, des feldspaths et de la matière organique

http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

B) Quelle pétrologie et minéralogie pour les météorites?



Source : http://www.meteorlab.com/METEORLAB2001dev/offering21o.htm

On peut voir ici les différents constituants principaux d'une chondrite :
- Les chondres qui sont toutes ces structures rondes, plus ou moins grosses
- La matrice, qui fait tenir tous ces chondres les uns aux autres
- Les CAI, mais qui ne sont pas présents dans toutes les chondrites
- Le fer pur, lui aussi non présent dans toutes les chondrites

Géologie isotopique

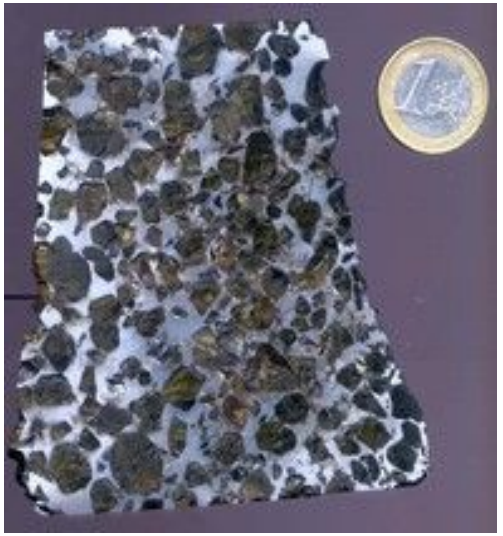
http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

B) Quelle pétrologie et minéralogie pour les météorites?

- Les achondrites : 20% des chutes. Elles ne possède pas de chondres. Elles sont soit ferreuses, soit pierreuses, soit intermédiaire

Source : http://www.meteorites.com.au/media/

Source : Photo P. Thomas



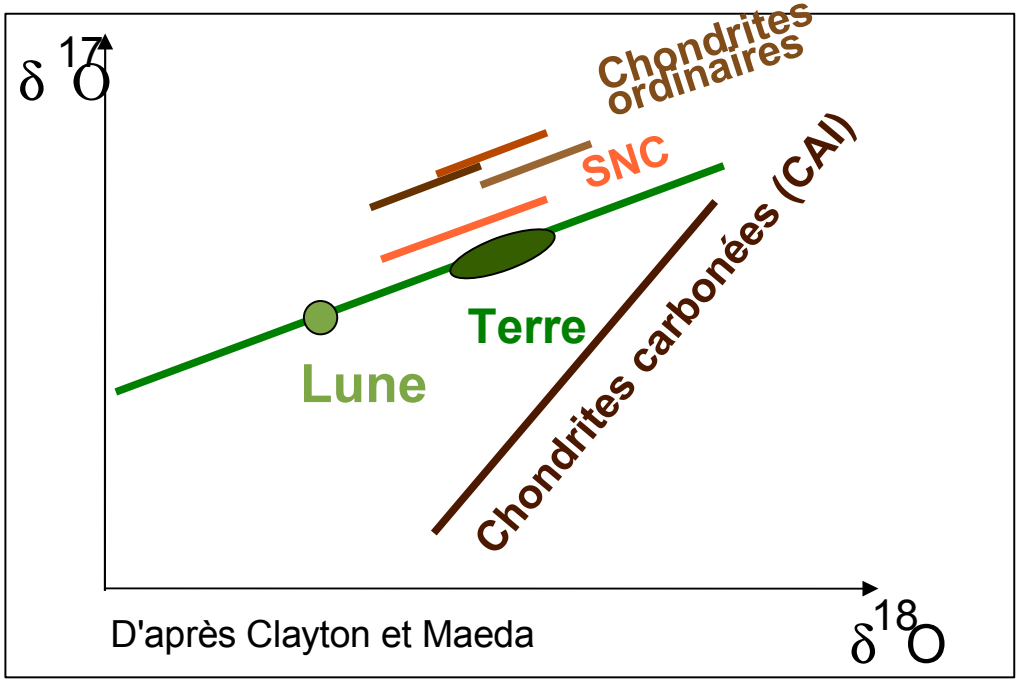
Source : Photo T. Ferroir

Les achondrites sont divisées en beaucoup de classes différentes, surtout pour ce qui est des achondrites pierreuses (à gauche). Les achondrites ferreuses sont souvent appelées sidérite (photo du milieu). Enfin, les achondrites « intermédiaires » ou pallasite sont constituées d'olivine baignant dans une matrice de fer.

C) Des météorites, des corps parents, des événements différents

- On fait le constat d'une certaine diversité pétrologique : comment l'expliquer?
- Etudes des isotopes de l'oxygène
  - Il existe plusieurs corps parents
  - Il existe des fractionnement différents

$$\delta^{18}O = \left[\frac{(^{18}O/^{16}O)_{echant}}{(^{18}O/^{16}O)_{ref}} - 1 \right] \times 1000$$



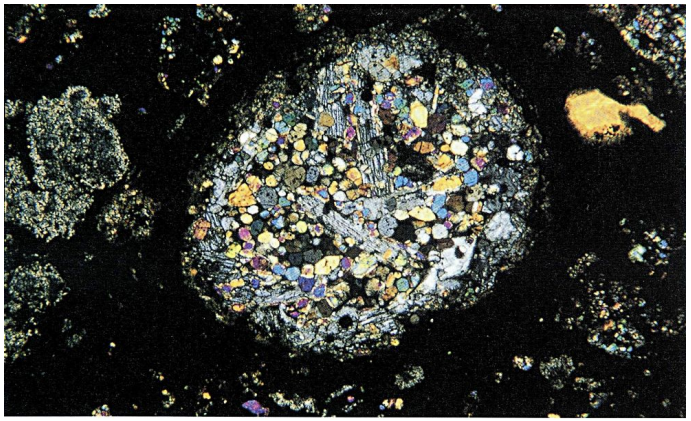
D'après la théorie, chaque échantillon provenant du même corps doit se trouver sur une même droite de pente 1/2. Il est impossible de sauter d'une droite à l'autre. Ce la veut donc dire, par exemple que toutes les SNC viennent du même corps parent. De même, les échantillons lunaires et terrestres se trouvant sur la même droite, la Lune a certainement été formée à partir de la Terre. On constate par contre que les chondrites carbonées ont une pente de 1 (ou plutôt les CAIs qu'elles contiennent)

II – Les chondrites et la formation du système solaire

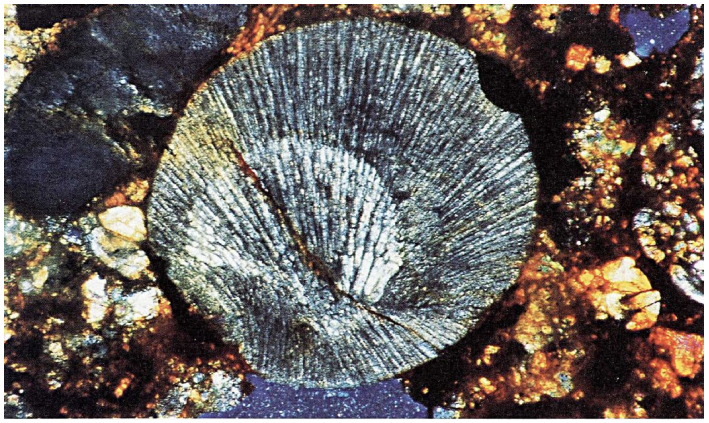
http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

A) Pétrographie des chondrites

- Chondres : structure sphérique formées en rapidement en apesanteur. ~700µ. Ils sont principalement constituées d'olivines et et/ou de pyroxènes



Chondres porphyriques : liquide imparfaitement fondu



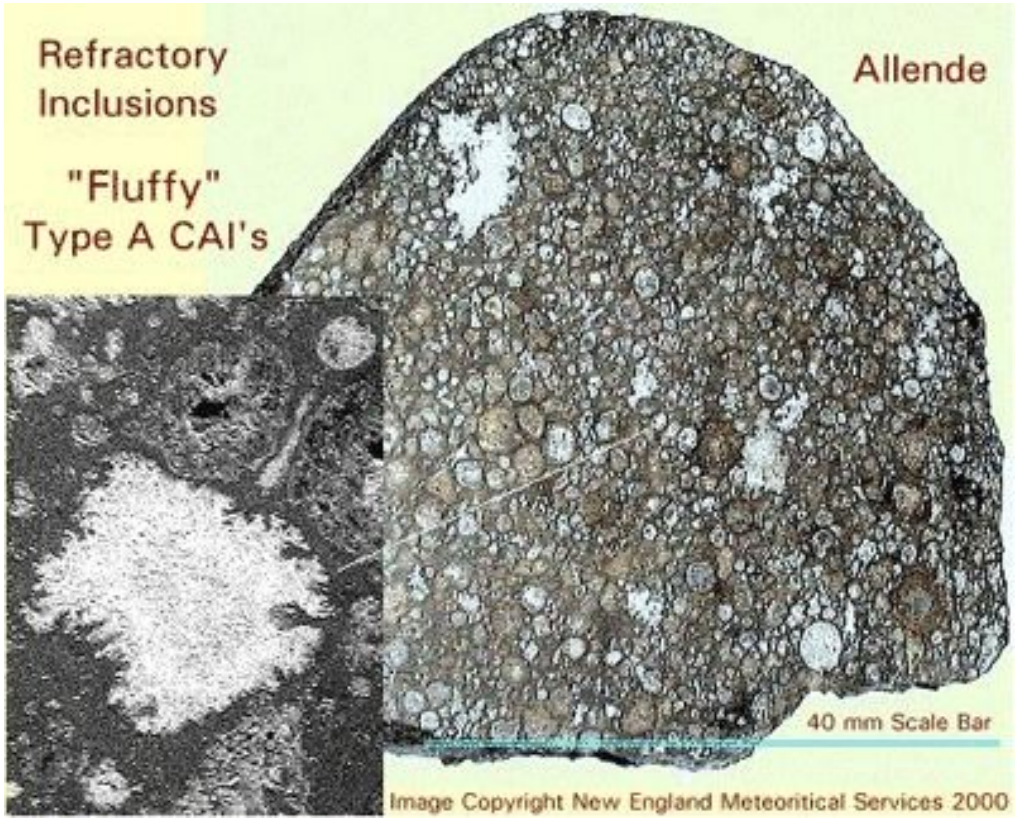
Chondres non porphyriques : refroidissement rapide d'un liquide

Hergé - On a marché sur la Lune

Les chondres sont interprétés comme des billes de magmas ayant cristallisé en apesanteur. Lorsqu'on voit les astronautes de la station spatiale internationale boire de l'eau, cette eau est sous forme d'une bulle. Il faut imaginer que les chondres sont des bulles de magmas qui auraient refroidis très rapidement.
Les chondres auraient été au départ des poussières qui auraient été fondues soit par le passage d'ondes de choc, soit par des éclairs électrostatiques.

A) Pétrographie des chondrites

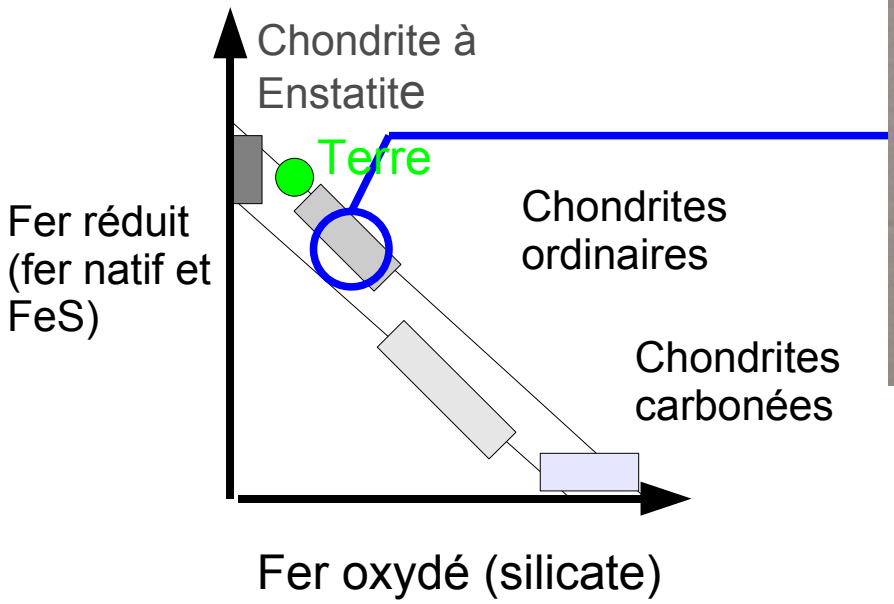
- Les inclusions réfractaires : CAI (Calcium Aluminium-rich Inclusion). Perovskite, hibbonite, feldspaths. Uniquement dans les CC

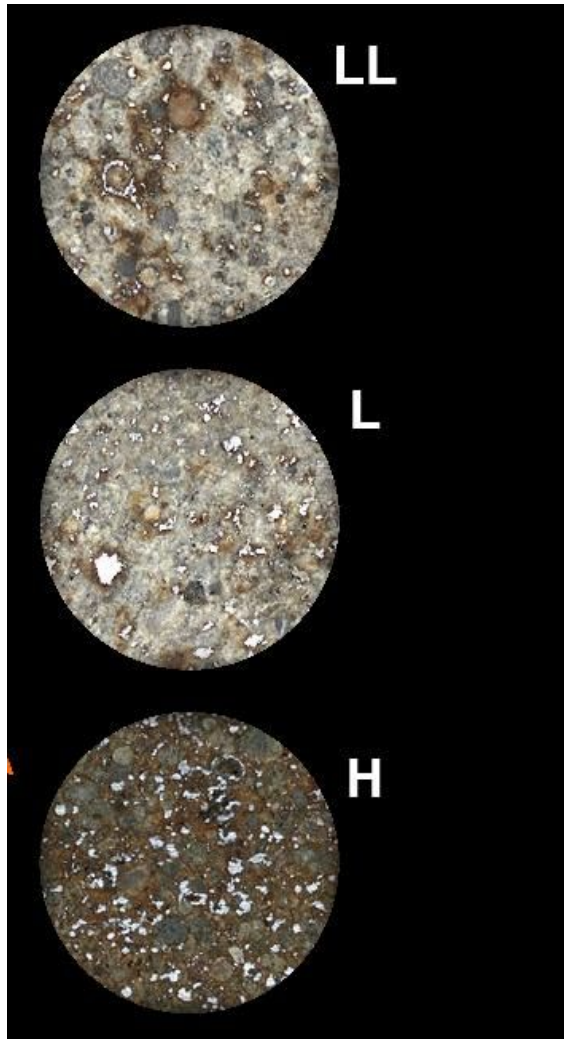


Ces CAI sont constitués d'éléments très peu volatils. Cela veut dire que ces éléments s'assemblent facilement à des hautes températures. Lorsque la température de la nébuleuse solaire a diminué, ce sont les premiers à s'être associés. Comme le nom CAI l'indique, ces inclusions sont essentiellement constituées d'aluminium, de calcium mais aussi de titane par exemple formant des minéraux un peu barbares comme la perovskite ($CaTiO_3$), l'hibbonite, le corindon...

A) Pétrographie des chondrites

- Le fer : sous forme métallique ou oxydé en proportion variable. Donne lieu à la classification des chondrites





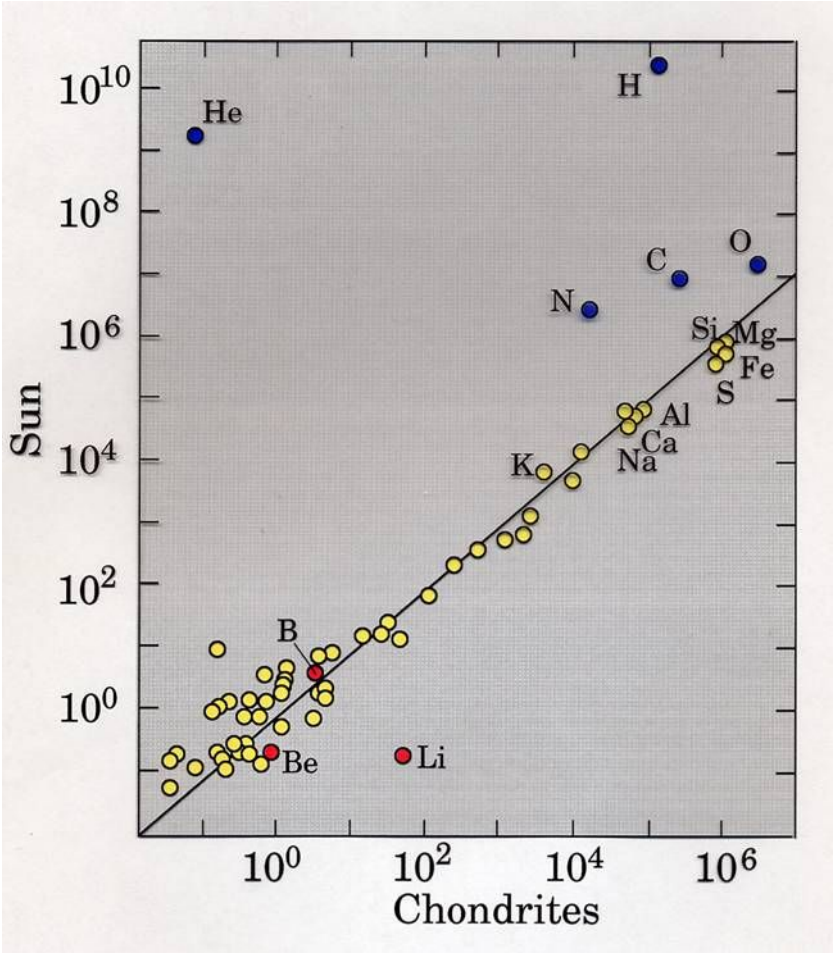
On peut en première approximation réalisé sur une coupe de chondrites sa classification. Il suffit pour cela de regarder la quantité de fer métallique dans la roche. La photo proposé montre qu'il y a beaucoup de fer : on est en présence d'une chondrite H.
A droite des photos montrant la différence entre chondrites H, L et LL.

http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

B) Les chondrites et le système solaire

- Chimie moyenne de la photosphère solaire et des chondrites équivalentes aux volatils près

Le Soleil représente plus de 99% de la masse du système solaire.
On constate que la chimie des chondrites et celle du soleil sont très proches. Bien sur, il y a une différence importante en ce qui concerne les éléments volatils (~ceux qui passent facilement sous forme gazeuses). Cela veut donc dire que les chondrites représentent bien la chimie moyenne des corps rocheux du système solaire, et en particulier qu'elles doivent bien représenter la chimie moyenne de la Terre.
NB : La chimie du soleil est obtenu par des études spectrscopiques. on regarde la lumière qui vient du soleil et selon les longueurs d'ondes on peut en déduire la composition chimique.



http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

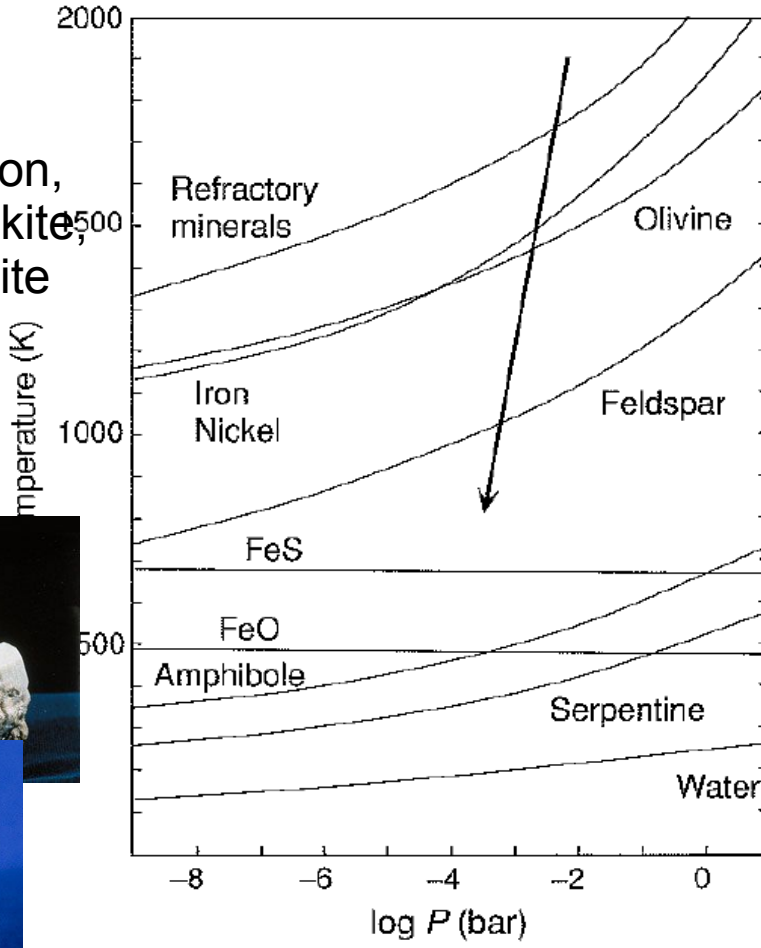
B) Les chondrites et le système solaire

- Séquence de condensation

Ceci est la séquence de condensation. Au départ, la nébuleuse est très chaude et se refroidit progressivement. Au fur et à mesure de ce refroidissement, différents assemblages minéralogiques cristallisent

Corindon, perovskite, hibbonite

Olivine, pyroxene, plagiocalse

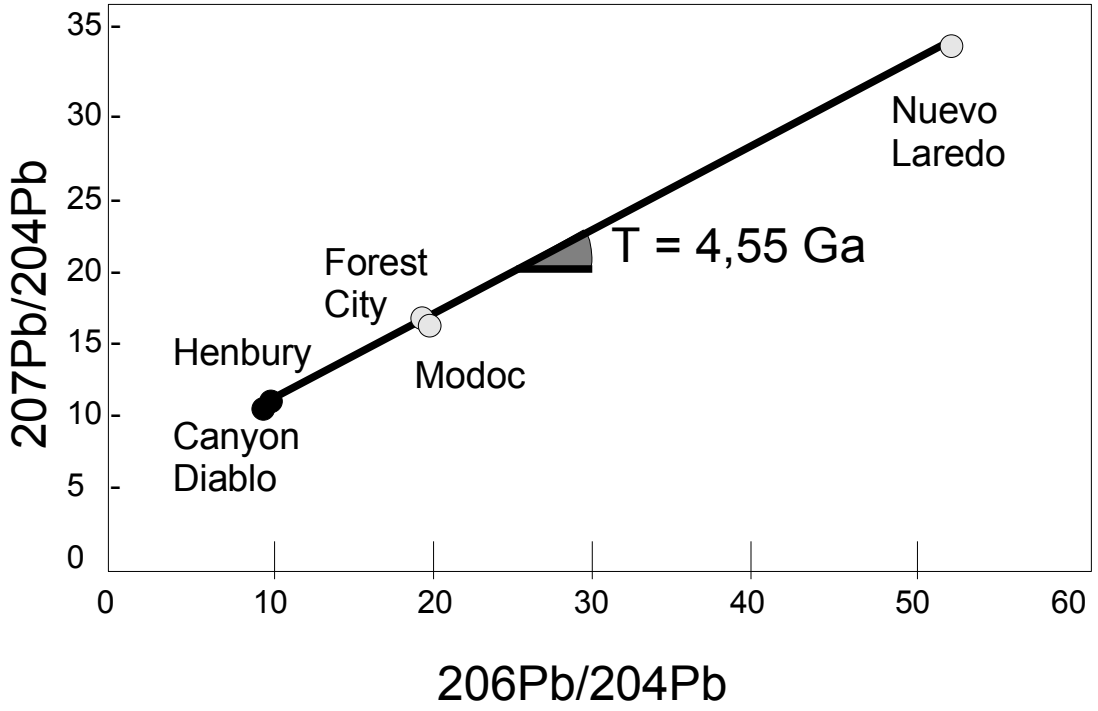


D'après La Géochimie de F. Albarède

http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

B) Les chondrites et le système solaire

- Datation de la formation de la Terre et du système solaire



○ Chondrites

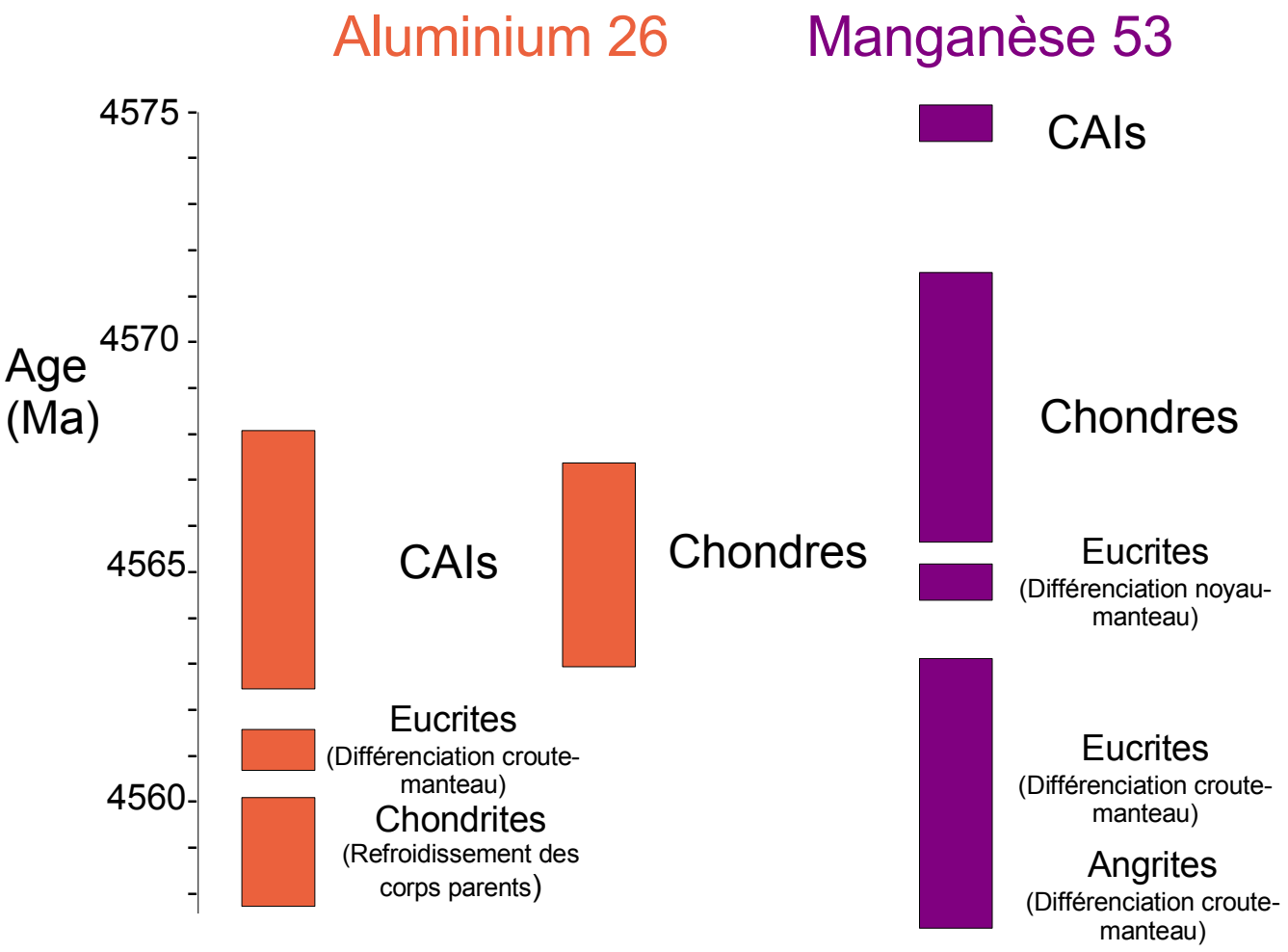
● Météorites de fer

Patterson a mesuré le contenu en différents isotopes du plomb dans certaines météorites.
Cela lui a permis d'établir l'âge du système solaire à 4,55 milliards d'année.

http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

B) Les chondrites et le système solaire

- Datation des événements précoces dans le système solaire par radioactivité éteinte



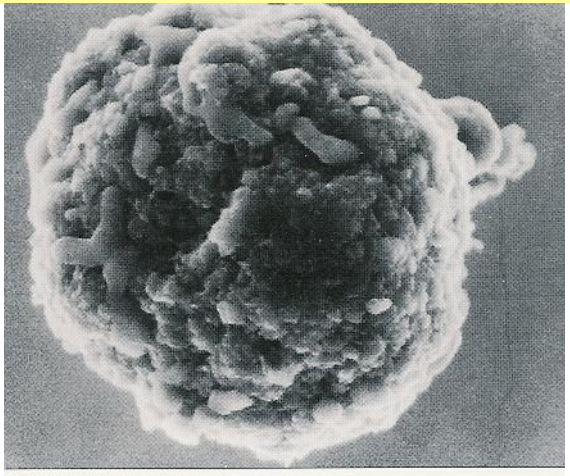
Certains isotopes radioactifs ont été formés au tout début de l'histoire du système solaire par une supernova. Certains de ces isotopes se désintègrent très rapidement (comme le 26Mg ou le 53Cr) ce qui fait qu'il n'en existe plus actuellement. Tout le 26Mg a été transformé en 26Al et tout le 53 Cr en 53Mn. On recherche donc dans les météorites des anomalies de composition en ces isotopes. Ces anomalies par rapport à l'équivalent stable de leur père permet de déduire des âges très précis.

On peut constater que les différents systèmes istopiques donnent des dates bien différentes.
Cependant, l'enchainement des événements proposés reste le même.

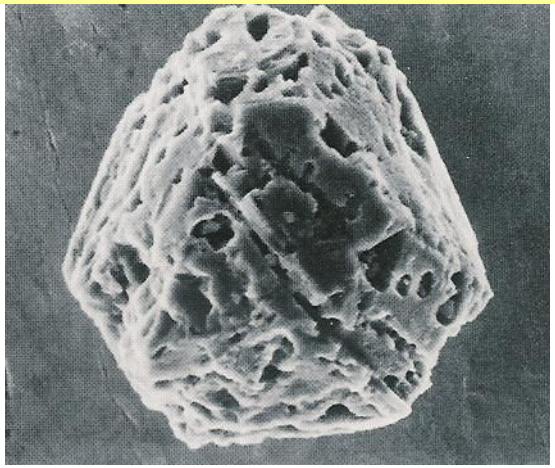
http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

B) Les chondrites et le système solaire

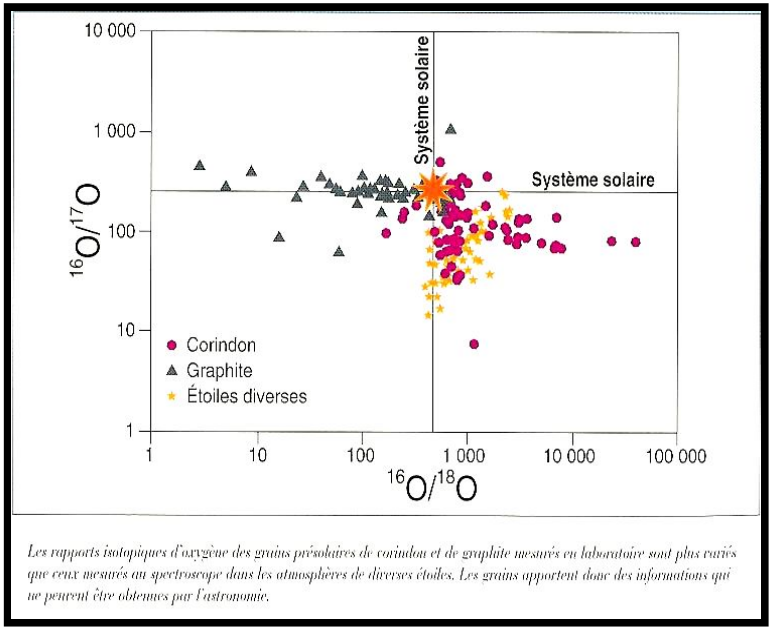
Grain de graphite présolaire (Météorite de Murchison)



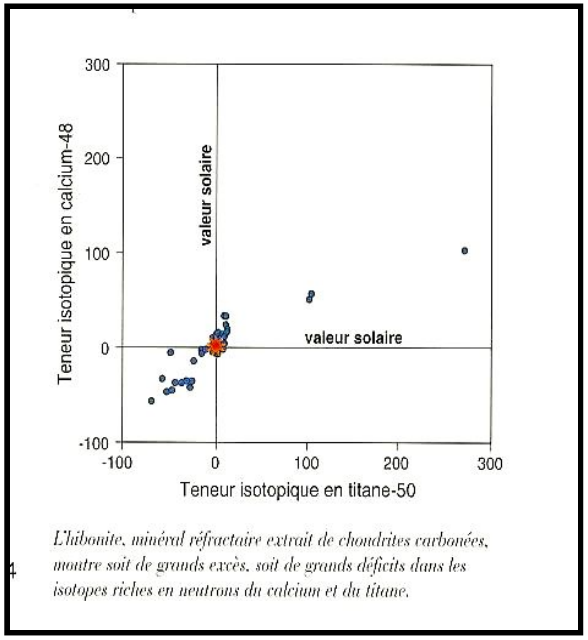
Grain de SiC présolaire (Météorite de Murchison)



Les grains présolaires témoignent de l'environnement de la nébuleuse présolaire



Les rapports isotopiques d'oxygène des grains présolaires de corindon et de graphite mesurés en laboratoire sont plus variés que ceux mesurés au spectroscope dans les atmosphères de diverses étoiles. Les grains apportent donc des informations qui ne peuvent être obtenues par l'astronomie.

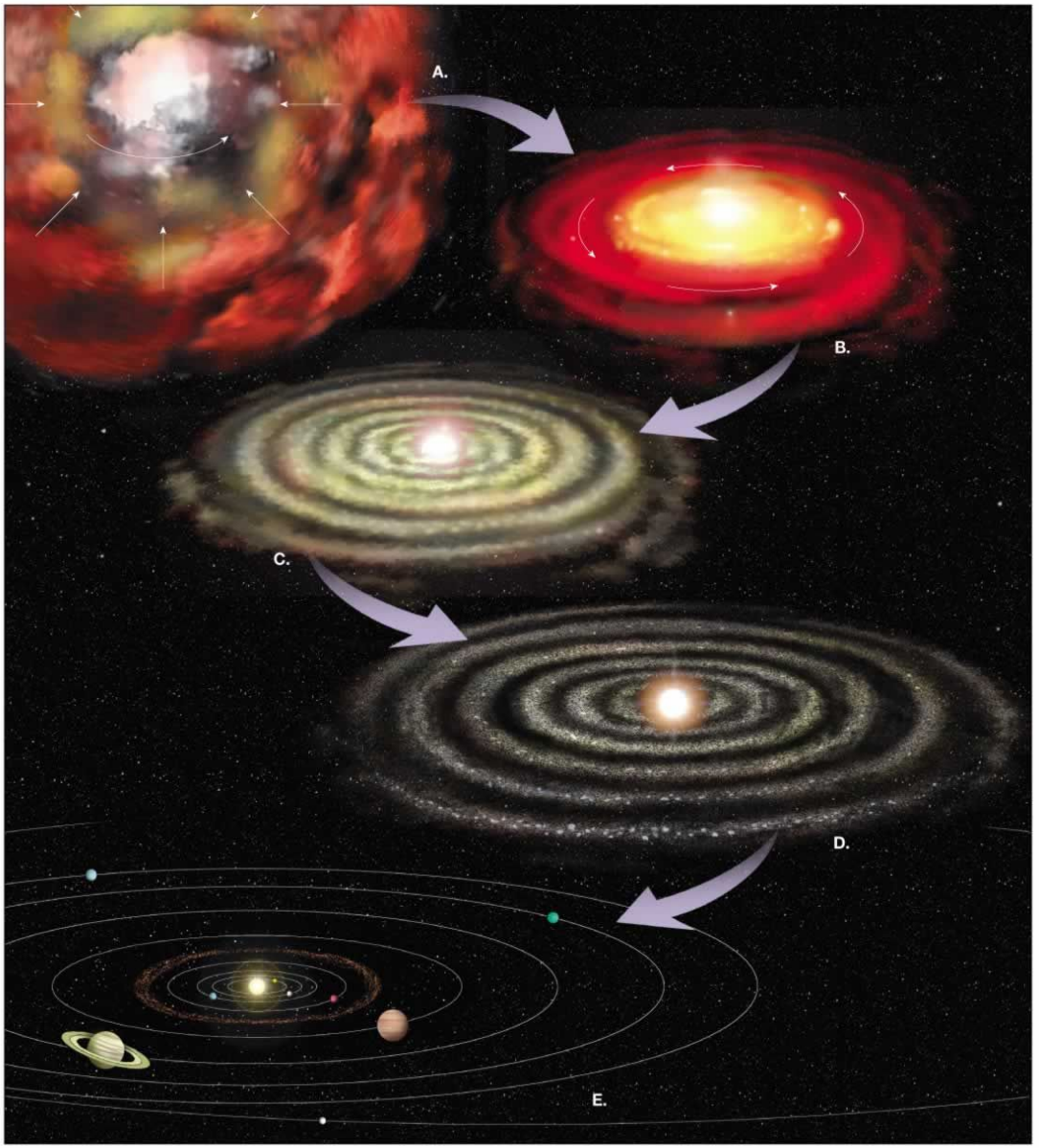


L'hibonite, minéral réfractaire extrait de chondrites carbonées, montre soit de grands excès, soit de grands déficits dans les isotopes riches en neutrons du calcium et du titane.

- Taille <20 μm localisés dans la matrice des chondrites
- Détectés initialement par des excès de Xe et Ne
- Compositions isotopiques « exotiques » indiquant une formation dans des environnements stellaires (supernovae, géantes rouges)
- Présents dans tous les types de chondrites mais plus abondants dans les chondrites primitives
- Types de minéraux : C (diamant, graphite), SiC, Al_2O_3, Si_3N_4

http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

B) Les chondrites et le système solaire

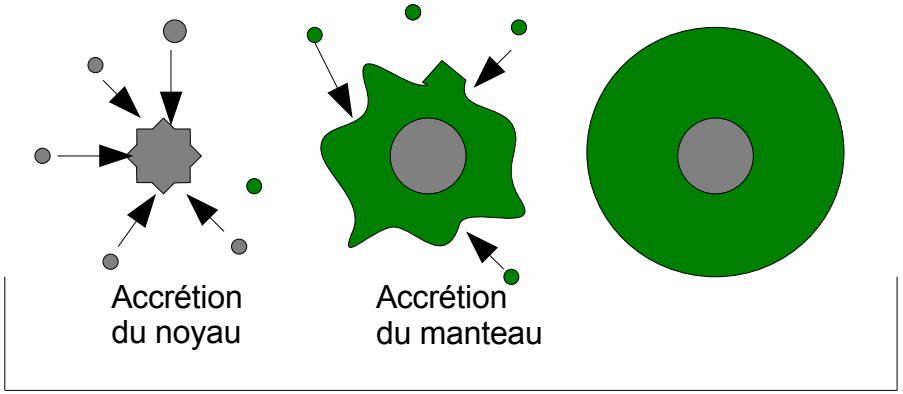


A : Contraction de la nébuleuse présolaire sous l'effet de la gravité
B : Le Soleil s'allume
C : Les poussières et les gaz se condensent et se rencontre pour former de petits objets tels les chondres ou la matrice des chondes
D : Ces poussières s'agglomèrent de plus en plus et forment des corps de plus en plus gros
E : Etat actuel. Nous allons détailler le passage de D à E dans la partie suivante

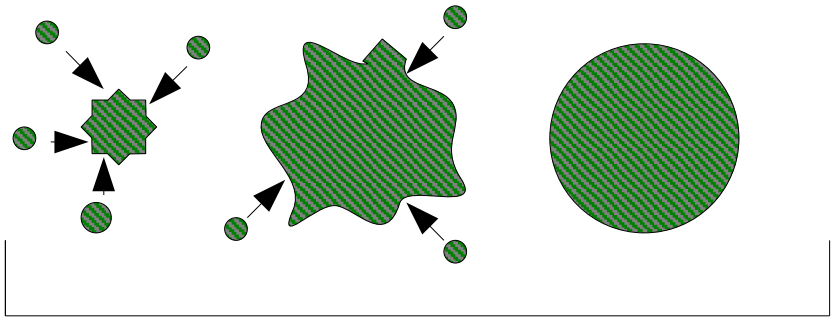
Environnement particulier : Supernova (formation des atomes lourds)
Géante rouge (isotope de l'oxygène) . L'hypothèse de la géante rouge pour les isotopes de l'oxygène a un nouveau concurrent, le self-shielding.

C) Les chondrites et la Terre

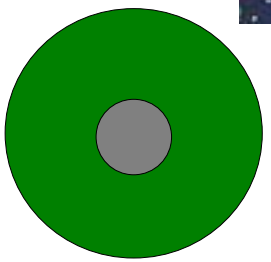
- Comment former la Terre?



Accrétion Hétérogène



Accrétion Homogène



Différenciation

Pour arriver à l'état de la Terre actuelle, il y a deux possibilités :
- on accrète des météorites de fer et on forme le noyau puis on accrète des météorites silicatées et on forme le manteau
- on accrète des chondrites ensemble et on différencie ensuite

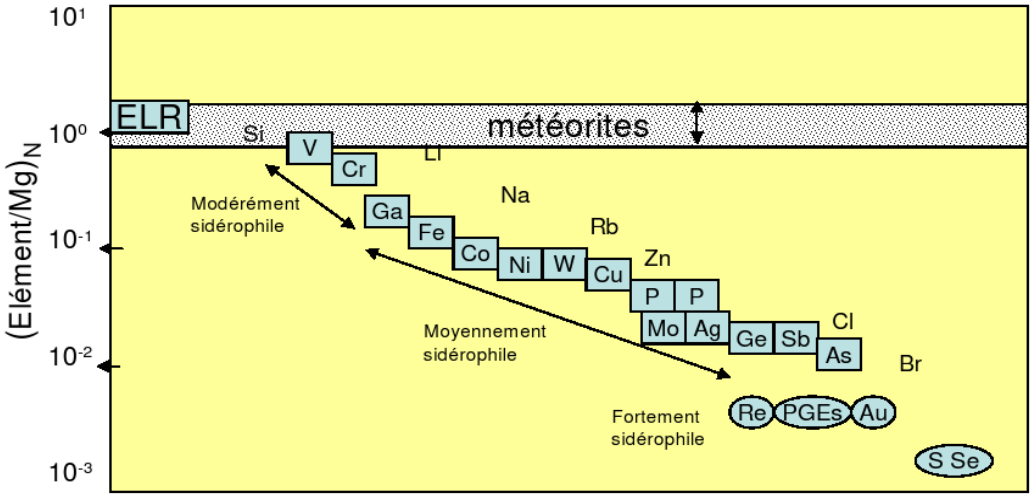
http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

C) Les chondrites et la Terre

- La chimie moyenne de la Terre et des chondrites sont quasi identiques

Chimie moyenne Chondrites	Chimie moyenne Terre globale
O = 31 %	O = 32.4 %
Fe =27.4 %	Fe = 28.2 %
Si = 18.5 %	Si = 17.2 %
Mg = 14 %	Mg = 15.9 %
Ca = 03.5 %	Ca = 01.6 %
Al = 02 %	Al = 01.5 %
Na = 0.6 %	Na = 0.25 %
K = 0.4 %	K = 0.02 %
% d'autres éléments	% d'autres éléments
2.6 %	2.9 %

mais...



POINT 1
Les éléments très sidérophiles on des D(métal-silicates) très grands (ex :Ir)) et pourtant ils sont moins appauvris que prévu dans le manteau.

⇨
- Le noyau n'a pas fini de se former
- Arrivée tardive de matériel (Vernis tardif)

POINT 2
Pour le Co et le Ni on a DNi/DCo = 10. On devrait donc avoir dans le manteau dix fois moins de Co que de Ni or on observe des quantités identiques !

⇨
- Effet de P et T sur D
- Impact géant (Lune ?)
- Interaction avec le noyau

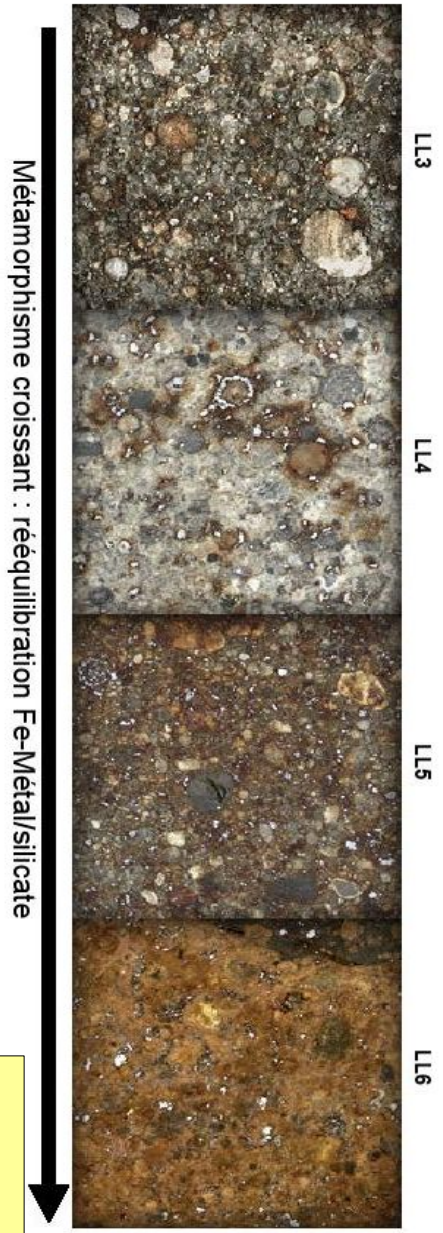
- La Terre a donc du se former par accrétion de chondrites

http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

C) Les chondrites et la Terre

- Métamorphisme des chondrites du à un début de différenciation du corps parent

Critères	Types pétrographiques					
	1	2	3	4	5	6
Homogénéité de la composition chimique des olivines	-	Espacement de ±5% autour de la moyenne		Ecart à la moyenne <5%	Uniforme	
Structure des pyroxènes pauvres en Ca	-	monoclinic		Cristaux monocliniques		
Developpement de Fd secondaire	-	**Absent**		**grains <2µ**	**grains <50µ**	**grains >50µ**
Verre dans les chondres	-	Isotrope, abondance variable		Turbide si présent	Absent	
Minéraux métallique (%max Ni)	-	Pas de Taenite		Kamacite et Taenite présente >20%		
Minéraux sulfurés (Ni moyen)	-	>5mg/g		<0.5%		
Texture des chondres	**Absent**	**Très beaux chondres**		**Jolis chondres**	**Chondres distinguables**	**Chondres laids**
Texture de la matrice	Fine et opaque	Beaucoup de matrice opaque	Matrice opaque	Matrice microcristalline et transparente	Matrice recristallisée	
Quantité de carbone	3-5%	1.5-2.8%	0.1-1.1%		<0.2%	
Quantité d'eau	18-22%	3-11%		<2%		



Le métamorphisme thermique se caractérise par la disparition progressive des chondres et une recristallisation de la matrice conduisant à un rééquilibrage de la roche (on peut en voir un exemple à droite ou les chondres se distingue de moins en moins bien)

http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

C) Les chondrites et la Terre

- A quoi est du ce métamorphisme thermique? Comment peut-on différencier de petits corps?

- L'énergie gravitationnelle n'est pas suffisante

- Les radioactivités existant à cette époque (celle actuelle mais plus vive comme U-Th-Pb mais aussi beaucoup d'autres éteintes) produisent beaucoup de chaleur

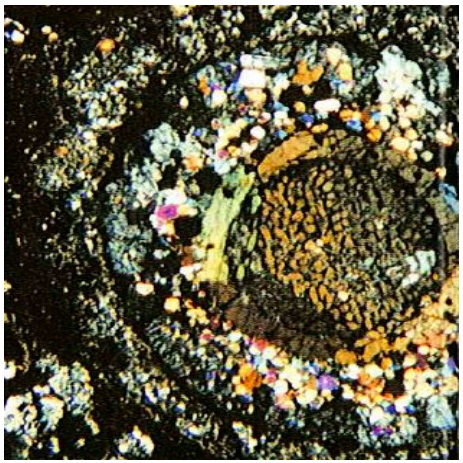


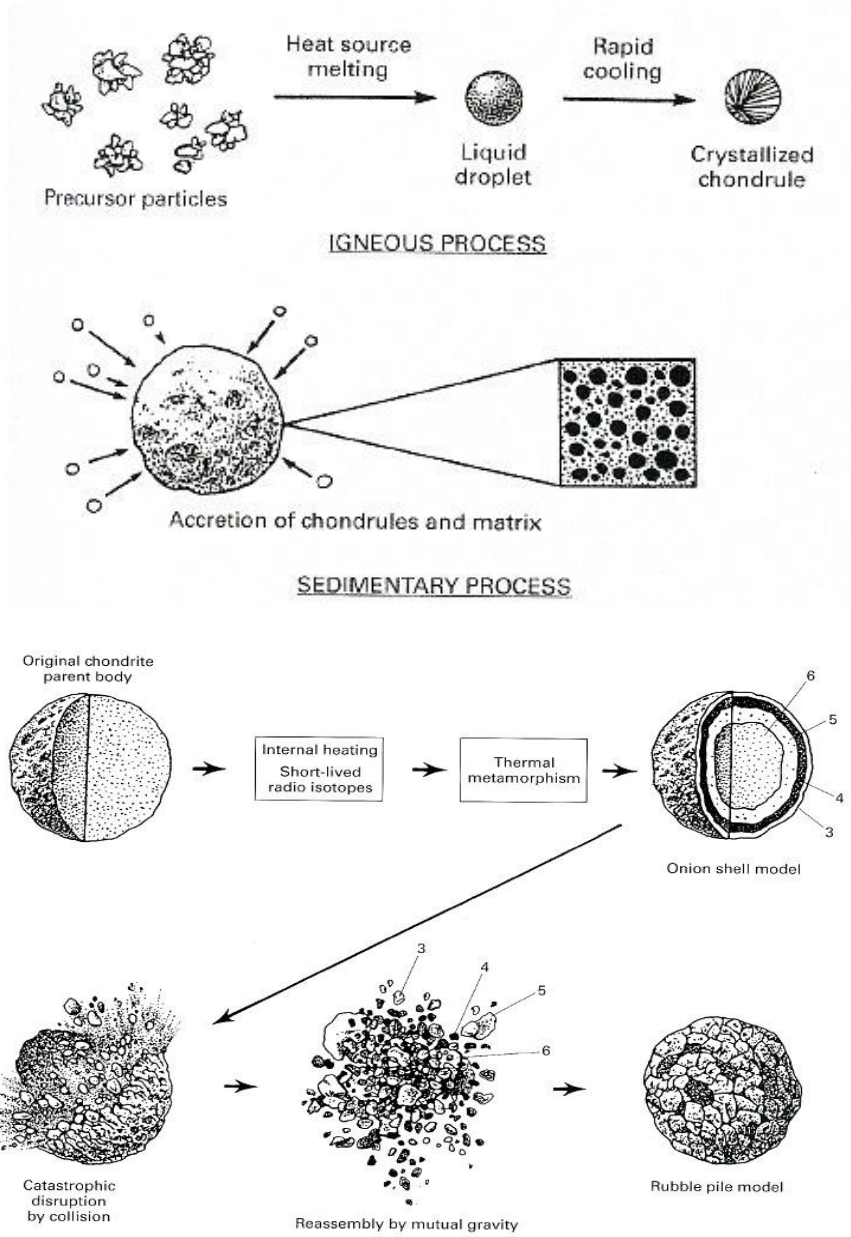
Photo d'un chondre montrant une fusion partielle puis une recristallisation en bordure

Isotope Père	Désintégration	Période (Ma)	Isotope Fils
146Sm	α	103	142Nd
244Pu	3α	82	232Th, Xe
205Pb	$\beta+$	20	205Tl
129I	$\beta-$	17	129Xe
247Cm	3α	15,6	235U
182Hf	$2\beta-$	9	182W
107Pd	$\beta-$	6,5	107Ag
53Mn	$\beta+$	3,7	53Cr
26Al	$\beta+$	0,72	26Mg

* Nucléides détectés grâce à leurs isotopes fils

http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

C) Les chondrites et la Terre



Formation des chondres par chauffage (ondes de chocs, éclairs, condensation direct de liquide à partir d'un gaz)

Accrétion des chondres et de la matrice : formation des chondrites

Accrétion des chondrites sous l'effet de choc et de la gravité. Chauffage par les multiples radioactivités : formation des différents types de chondrites (de plus en plus métamorphisé thermiquement vers l'intérieur). Le corps parent aurait une structure en pelure d'oignon

Possibilité de choc massif qui brise l'ensemble de la planète. Les morceaux se réaccrète sous l'ffet de la gravité et donne une structure en mosaïque.

http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

C) Les chondrites et la Terre

- Le métamorphisme de choc : une fenêtre sur les matériaux mantelliques

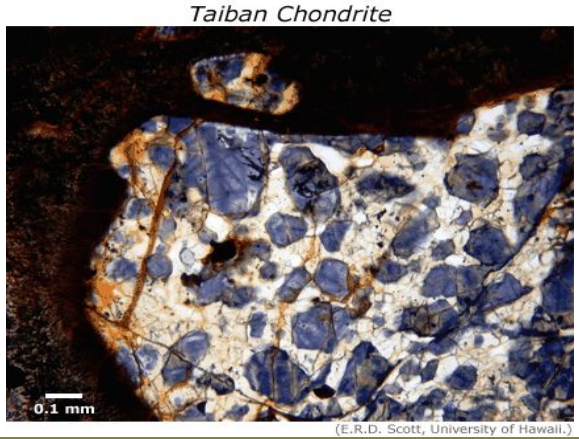
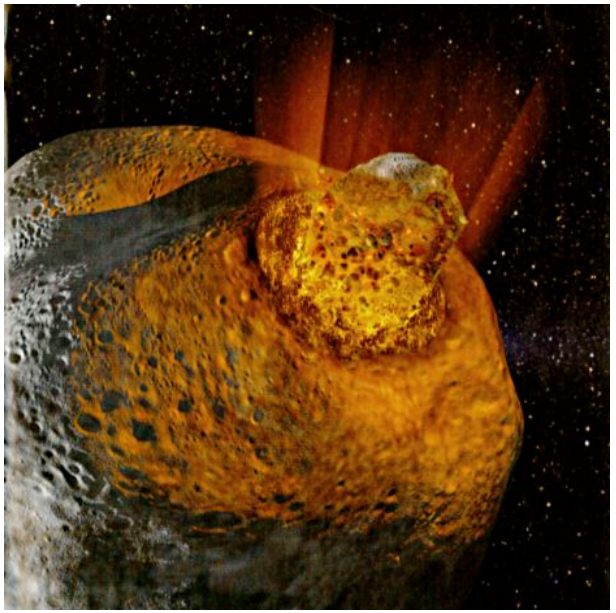


Photo en lumière polarisée non analysée de la chondrite Taiban. En bleu, on voit de la ringwoodite, la phase γ de l'olivine présente sur Terre entre 520 et 660km de profondeur



Lors des chocs extrêmement puissants qui se produisent lorsque de grosses météorites heurtent des planetesimaux, la pression et la température sont telles que des transformations métamorphiques peuvent avoir lieu. On parle de métamorphisme de choc dont les conditions sont très différentes comparés au métamorphisme traditionnel qu'on connait. Les pression enregistrer dans les roches peuvent atteindre une trentaine de GPa soit la pression règnant aux alentours de 700km de profondeur.
Les minéraux nouvellement formés nous renseignent alors sur les phases présentes dans le manteau profond.

Quelques minéraux découverts dans les météorites

Wadsleyite	=	Olivine beta
Ringwoodite	=	Olivine gamma
Maskeylinite	=	Verre de Fd HP
Hollandite	=	Feldspath HP
Seifertite (Post-stishovite)	=	SiO2 HP
Akimotoite	=	Pyroxène HP
Perovskite?	=	Pyroxène HP

http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

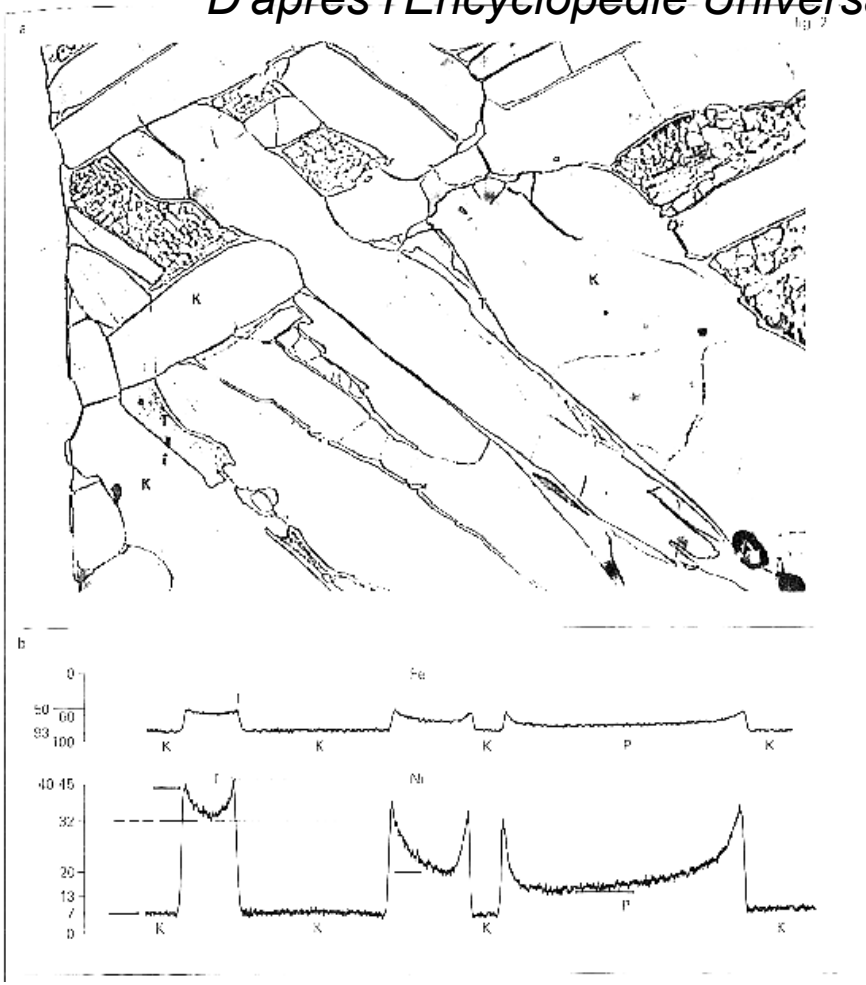
III – Les achondrites : des fragments planétaires différenciés

http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

A) Les météorites de fer

- Sidérite et figures de Widdmanstatten : vitesse de refroidissement et taille des corps parents

D'après l'Encyclopédie Universalis

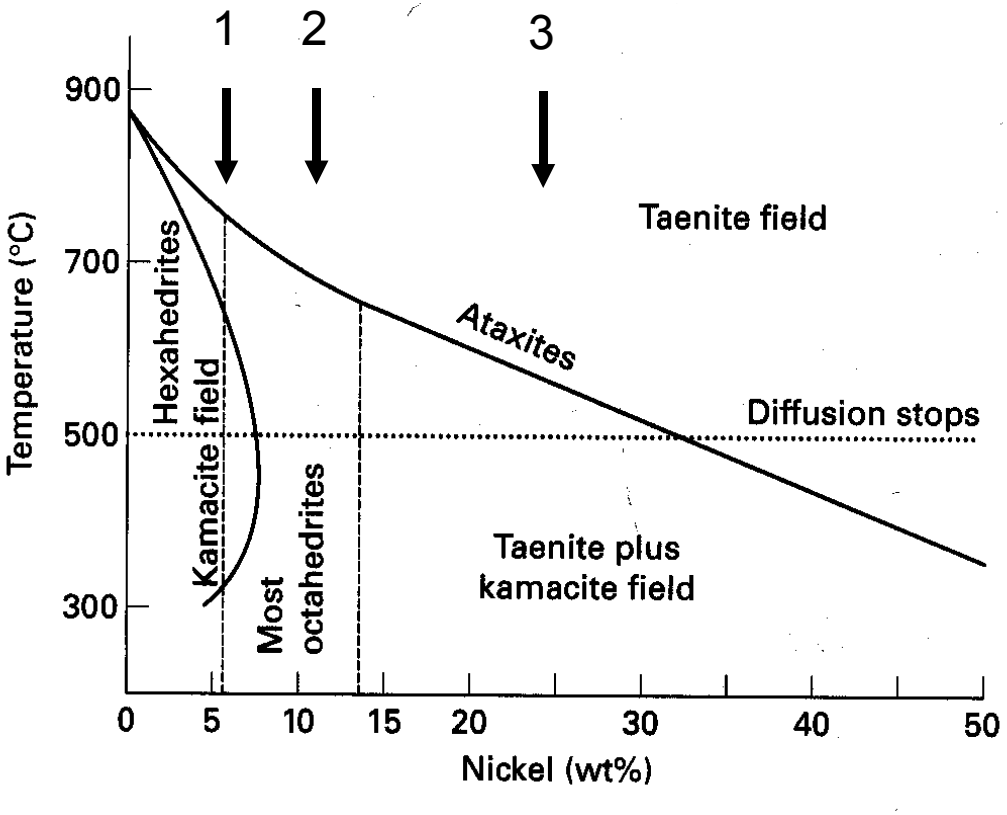


Deux facteurs contrôlent la taille des lamelles des figures de Widdmanstatten : la concentration en Ni et la vitesse de refroidissement. Une concentration élevée en Ni et un refroidissement rapide amène des figures fines. Les déterminations donnent des vitesses de refroidissement entre 5 et 50°C/Ma

http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

A) Les météorites de fer

La transformation de taenite en kamacite se fait à l'éta solide par diffusion de Ni et Fe. La diffusion du Ni est plus efficace dans la kamacite



Refroidissement 1 : formation des hexahédrites

•De 900 °C à 750 °C : taenite à 5 % de Ni

•De 750 °C à 650°C : à 750 °C la taenite libère du Ni et forme de la kamacite avec une concentration de Ni faible. Jusqu'à 650 °C la teneur en Ni de la kamacite augmente pour atteindre 5 %.

•De 650 °C à 500 °C seule la kamacite existe et sa teneur en Ni va croître jusqu'à 7%.

•En dessous de 500 °C la diffusion du Ni s'arrête

•Les météorites qui contiennent de 4,5 à 6,5 % de Ni sont formées de kamacite pure et ne peuvent former de figures de Widmanstätten. Ces météorites sont des hexahédrites

Refroidissement 2 : formation des octahédrites

•Entre 7 et 15 % de Ni le refroidissement conduit à la formation d'un mélange de taenite et de kamacite. La kamacite pousse sur la taenite.

•Il y a formation de figures de Widmanstätten.

•Ces météorites sont les octahédrites et représentent plus de 80% des météorites métalliques

Refroidissement 3 :

•Pour des teneurs en Ni élevées il devient de plus en plus difficile de former de la kamacite. Les météorites correspondantes ont des figures de Widmanstätten très fines. En fait au-delà de 15 % de Ni les météorites sont faites d'inter croissances très fines de kamacite et taenite (la plessite). Au-delà de 30 % de Ni les quelques rares météorites métalliques (les ataxites) sont faites de pure taenite.

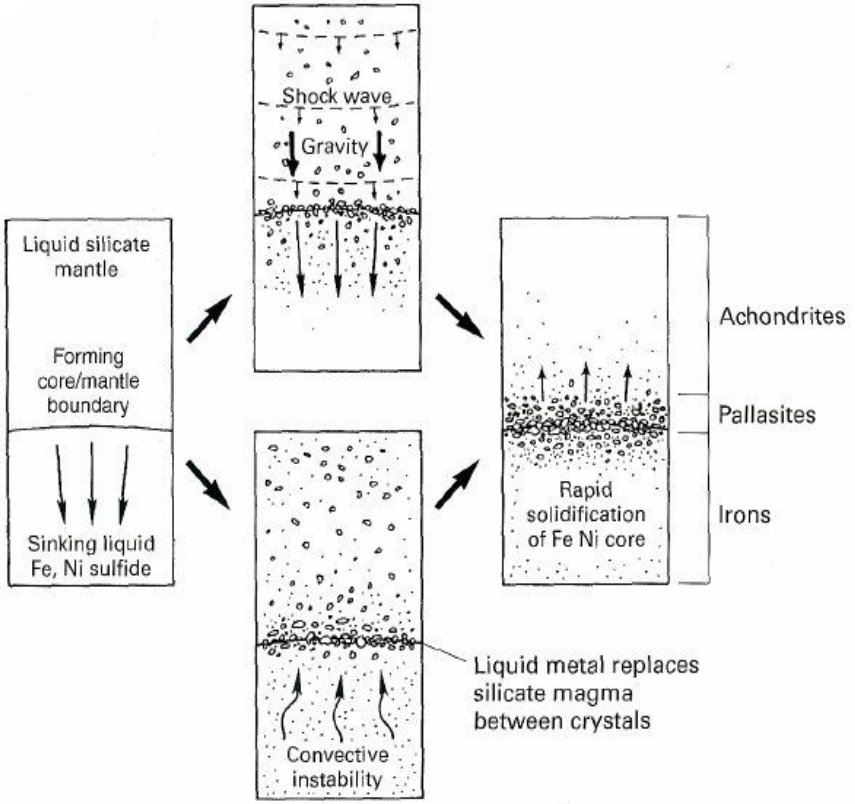
http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

A) Les météorites de fer

- Les Pallasites : des analogues de la CMB?

Assemblage olivine-fer

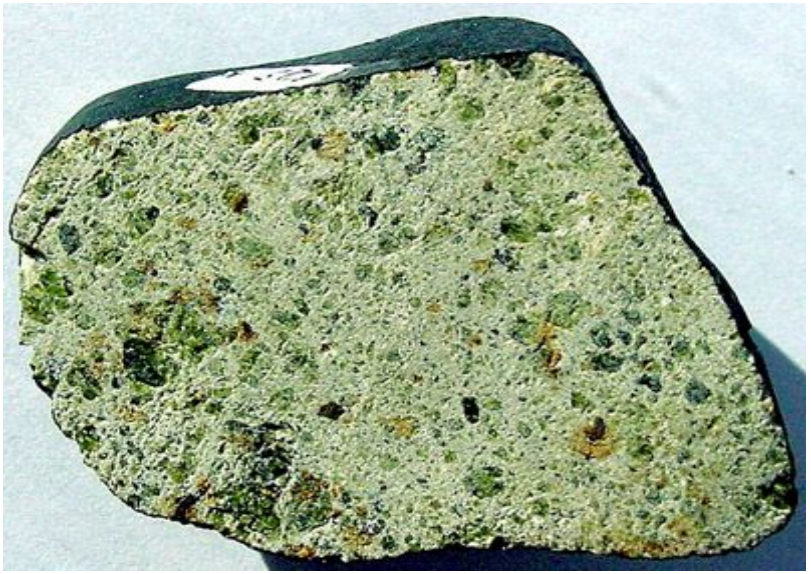
Réserve : - mélange
- olivine et non pérovskite



Formées de Fe-Ni (7 à 17% de Ni) et d'olivines (Fo_{80-90})
•Minéraux accessoires : troilite, chromite, schreibersite
•3 groupes : isotopes de l'oxygène. Le groupe le plus important les MG (Fo>80 et métal entre 14 et 16 % de Ni) et un plus petit les ES (plus riche en Fa et métal entre 8 et 12 %). Un groupe nouveau avec des pallasites contenant 5% vol d'orthopyroxènes autour des olivines.
•Formation dans deux types de corps parents

B) Les HED et l'astéroïde 4-Vesta

- Pétrologie des HED
  - Howardites : brêches d'eucrites et de diogénite
  - Eucrites : basalte ou cumulat
  - Diogenite : orthopyroxénite (~gabbro - péridotite)



Source http://www.meteorite-times.com/Back_Links/2002/April/Meteorite_of_Month.htm

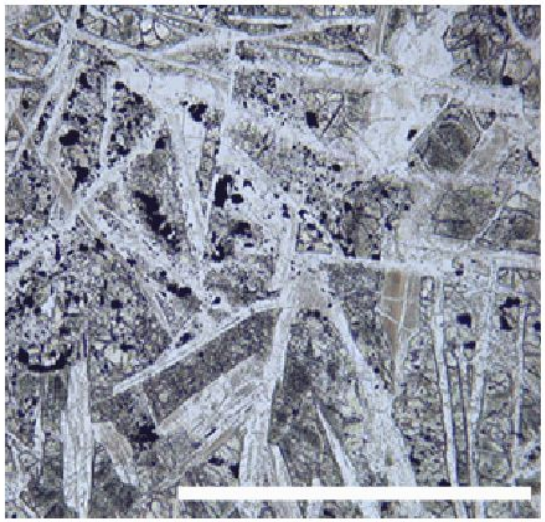
Diogénite

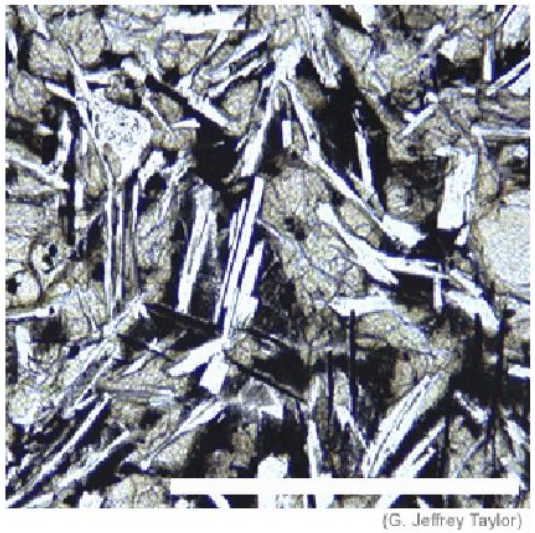
Source : http://www.meteorites.com.au/media/

Eucrite

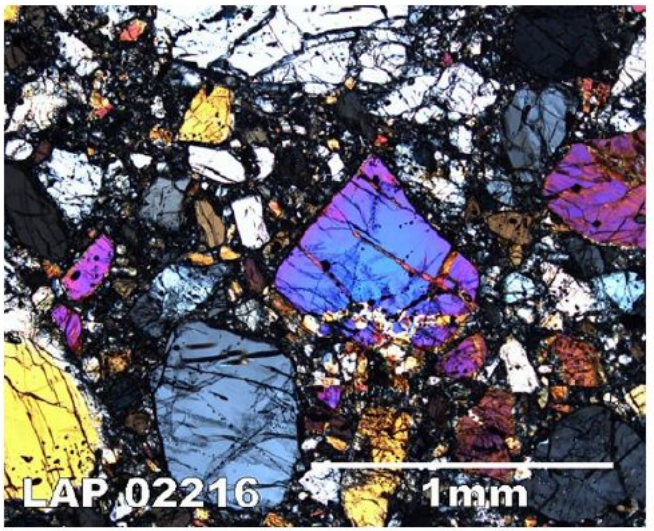
http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

B) Les HED et l'astéroïde 4-Vesta





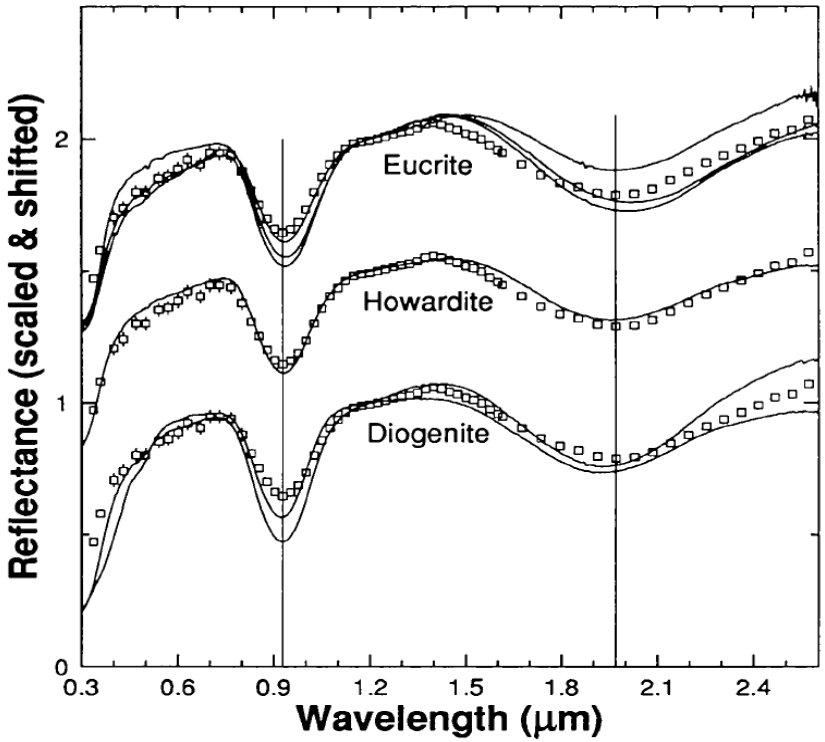
Comparaison d'une eucrite à gauche et d'un basalte de Hawaii à droite

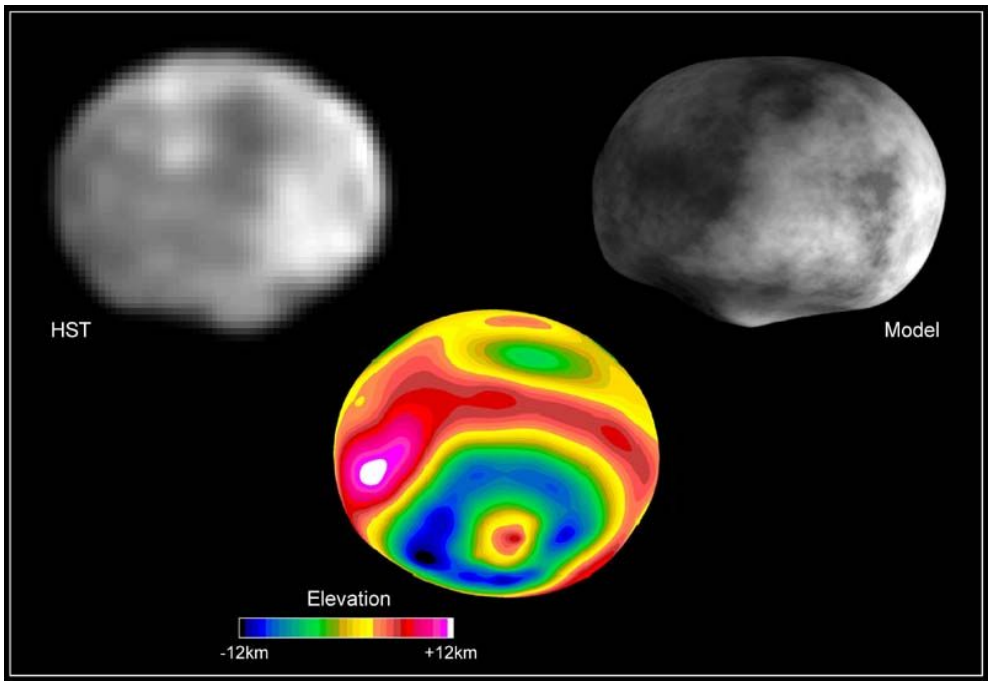


Lame mince d'une diogénite

B) Les HED et l'astéroïde 4-Vesta

- Comparaison de reflectance

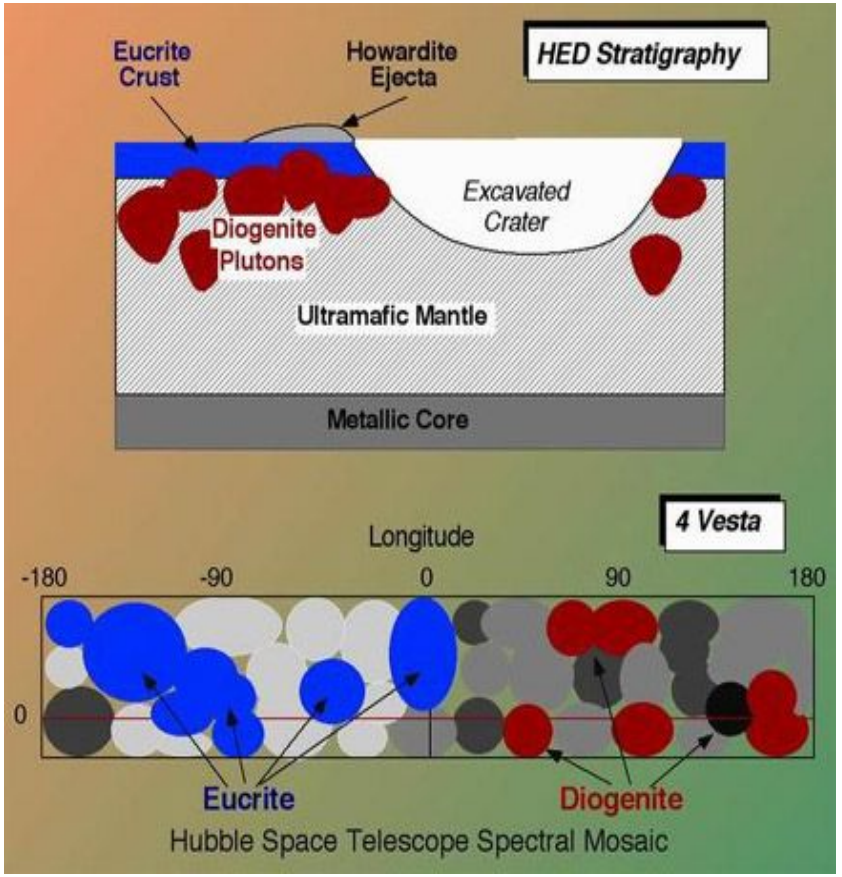




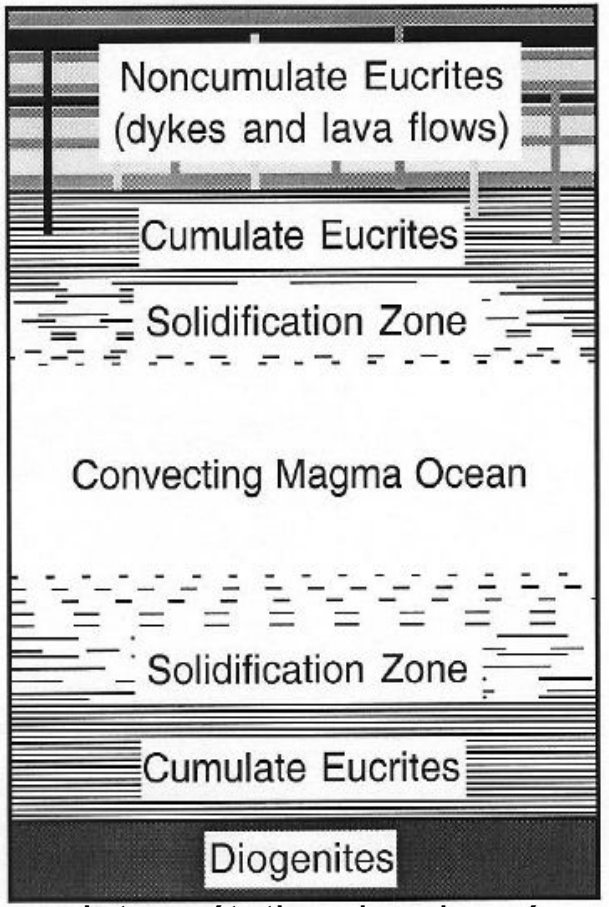
En laboratoire ont été mesurés les spectres de reflectances des différentes classes constituant les HED. Par télescope, on a pu obtenir le spectre de reflectance de différents astéroïdes dont Vesta. En comparant ces spectres, on constate des bandes d'absorption commune (0,93 et 1,97μ) communes aux HED et à Vesta. Ceci est un bon argument pour supposer que les HED viennent de Vesta. De plus, la carte altimétrique montre l'existence d'un énorme cratère d'impact sur cet astéroide.

http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

B) Les HED et l'astéroïde 4-Vesta



Interprétation de la cartographie obtenue par Hubble



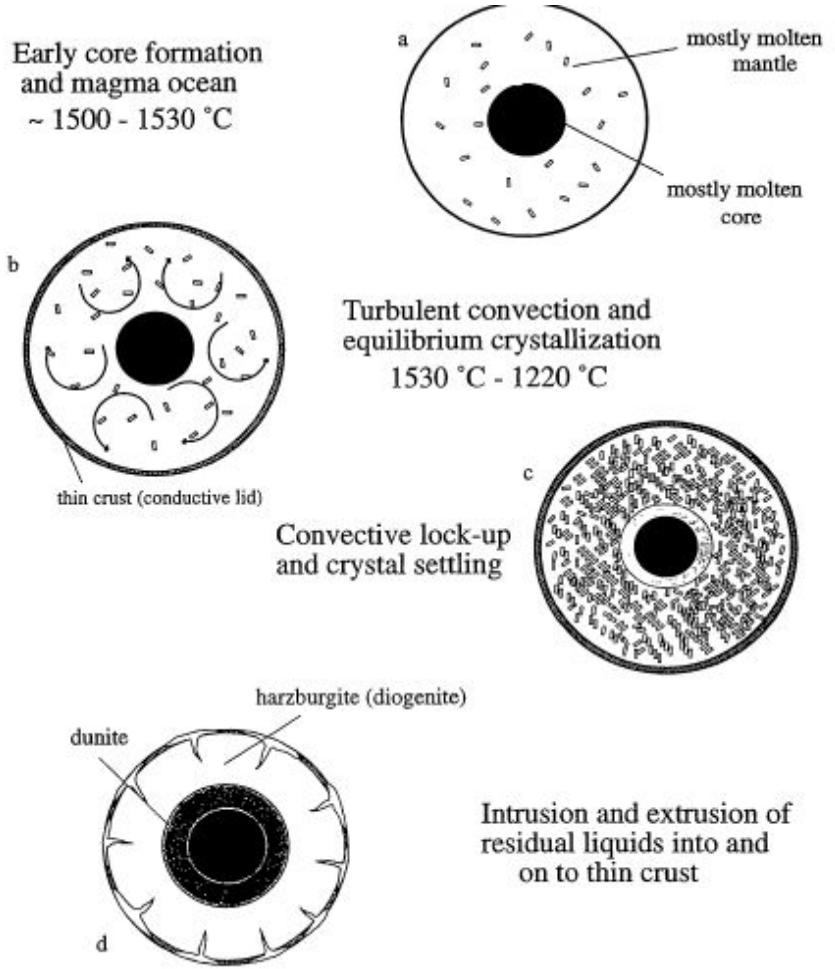
Barrat et *al.*

Interprétation des données géochimiques et pétrologiques

Les derniers liquides de l'océan magmatique à cristalliser forment le magma parent des eucrites qui par cristallisation va donner les eucrites cumulatives et les eucrites non cumulatives. Le bombardement météoritique qui survient après va pouvoir remanier la croute eucritique et le manteau diogénitique et former les howardites
Les données de géochimie et pétrologie précise le modèle proposer par simple cartographie satellitaire.

http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

B) Les HED et l'astéroïde 4-Vesta



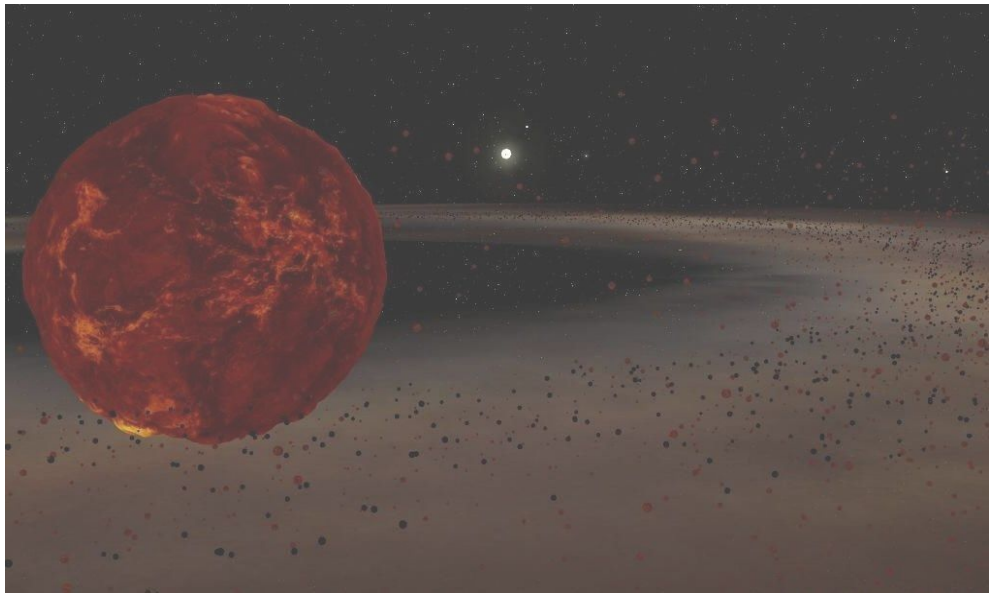
Scénario de formation de Vesta en tenant compte des données pétrologiques et géochimiques

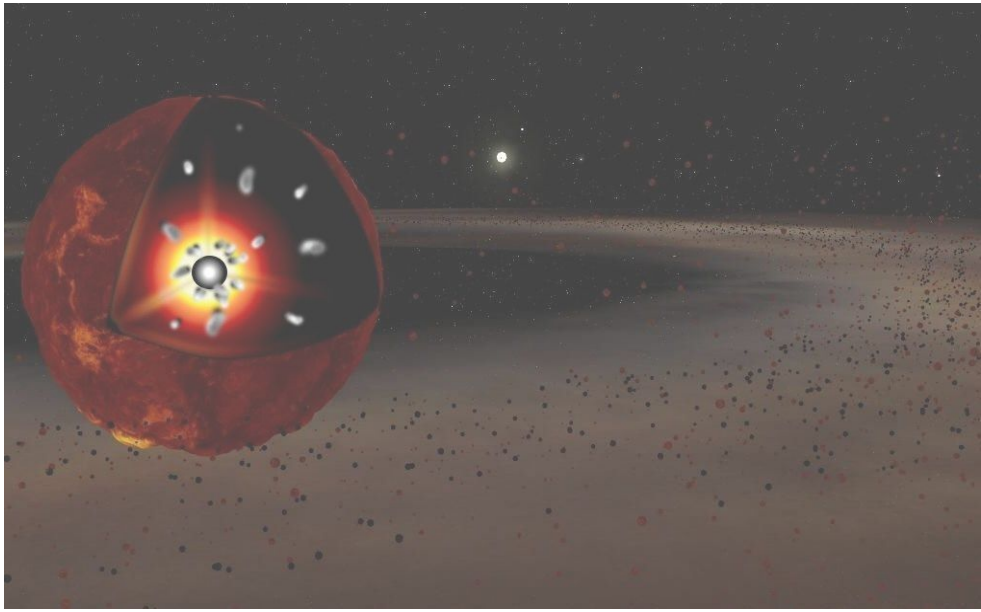
a – Séparation d'un liquide métallique et d'un liquide silicatée par simple immiscibilité et densité
b – Cristallisation à l'équilibre et convection dans l'océan magmatique
c – La cristallisation se poursuit et la conection s'arrete due à une trop forte viscosité
d – Les liquides résiduels sont expulsés à la surface (eucrite) et les cumulats s'accumulent (diogénites)

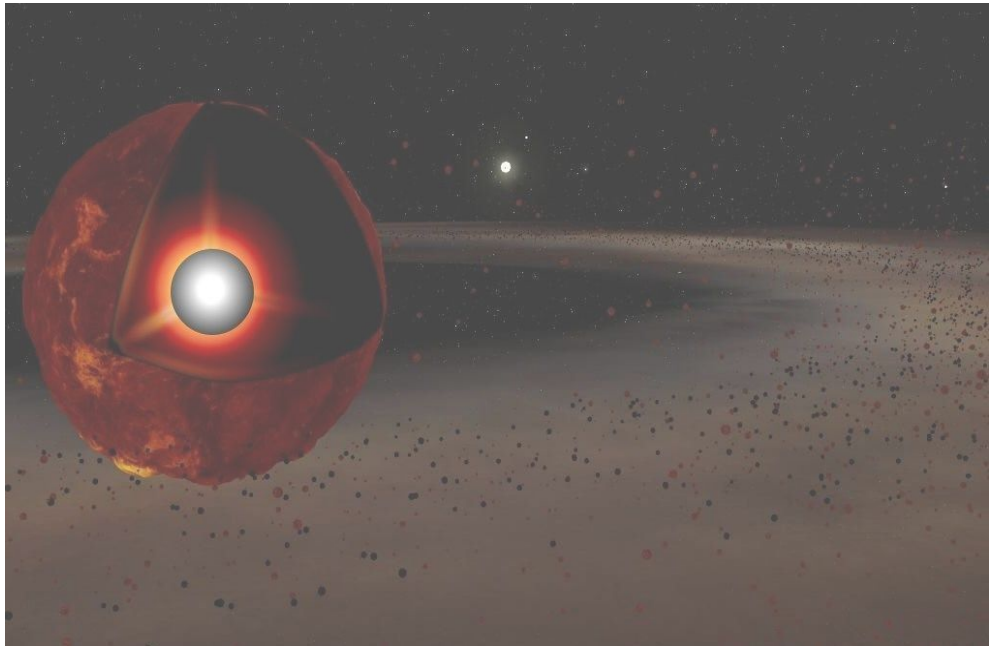
Les impacts météoritiques remanient ensuite la surface et forme les howardites

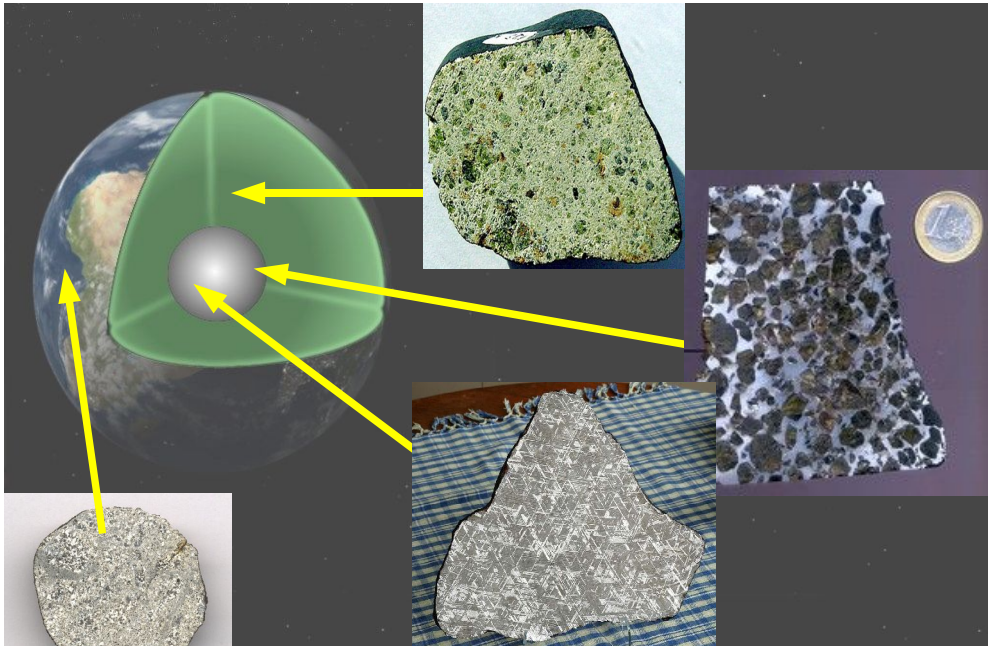
http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

C) Comment interpréter ces météorites différenciées?



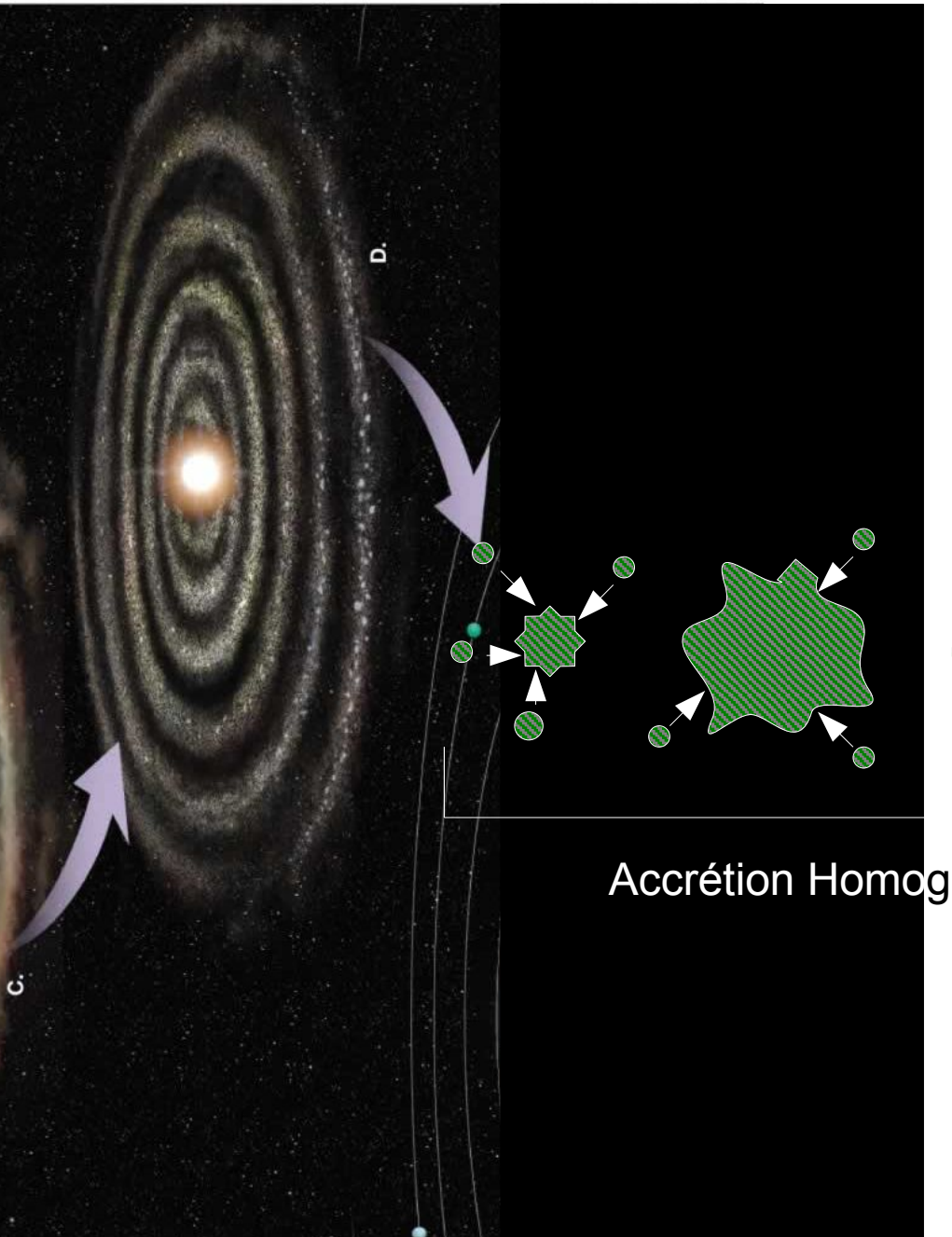


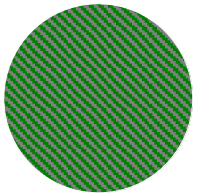




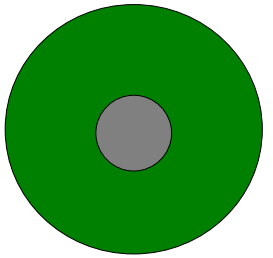
http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

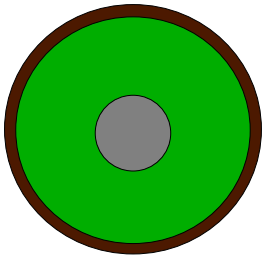
C) Comment interpréter ces météorites différenciées?





Accrétion Homogène



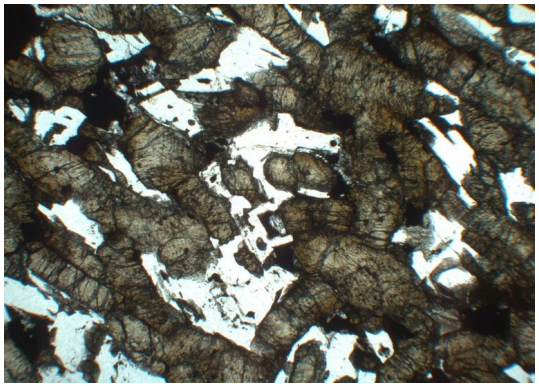
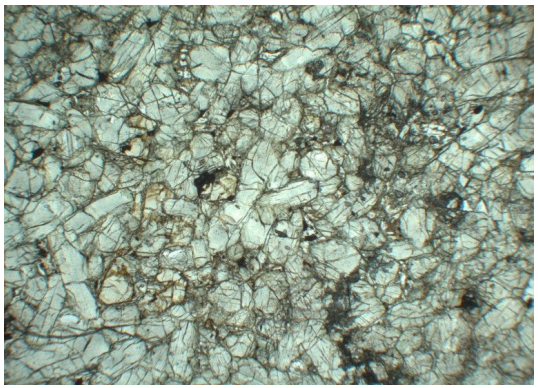
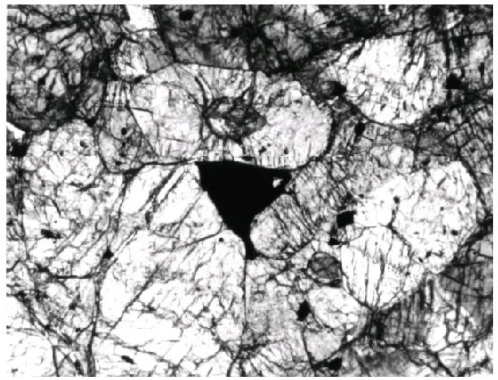
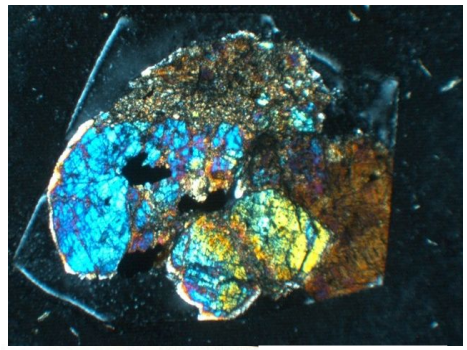
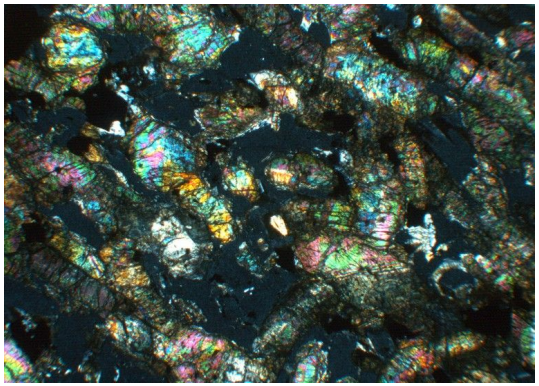
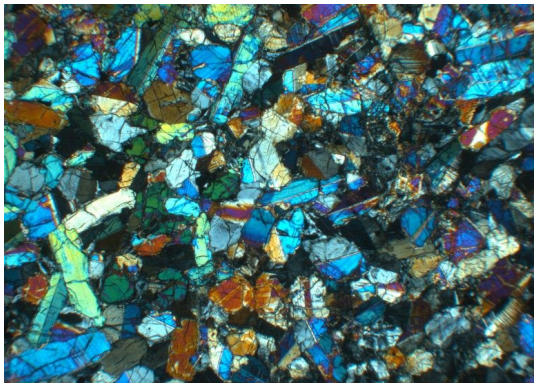
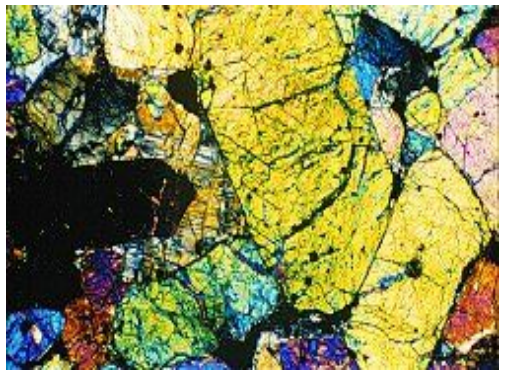


Différenciation

http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

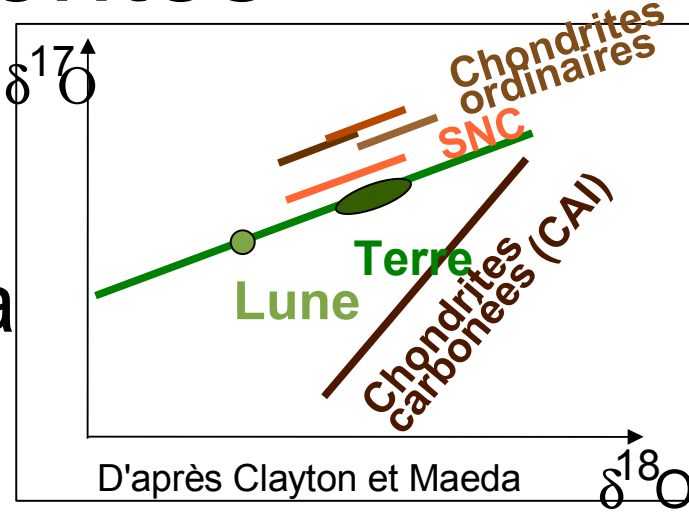
D) Les SNC : des météorites venues de Mars

- Pétrologie :

Shergottites	Nakhlites	Chassignites	ALH84001
basalte, picrite, lherzolithe	clinopyroxénites (~gabbro)	dunites	clinopyroxenite à CaCO3
			
			

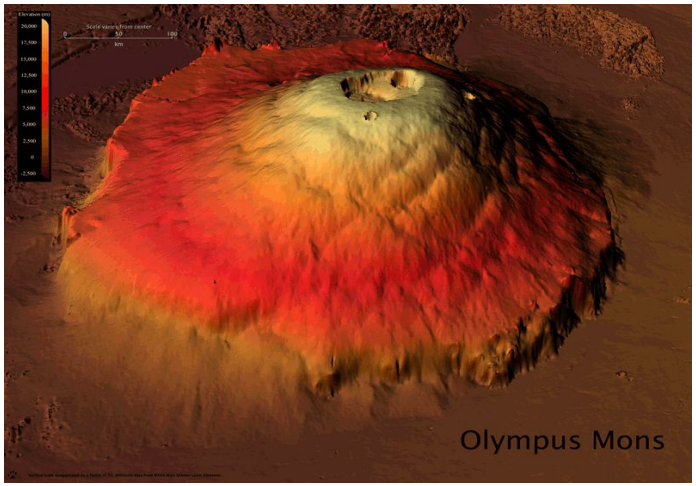
http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

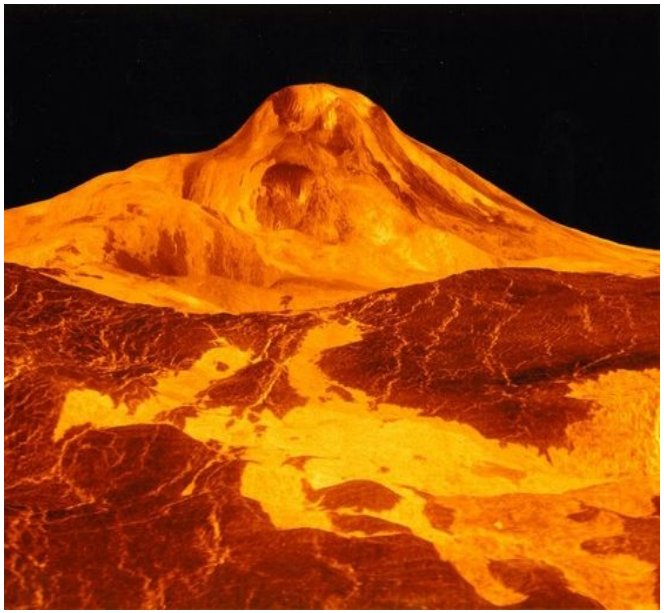
D) Les SNC : des météorites venues de Mars



- Nakhlites et Chassignites : ~ 1.5Ga
- Shergottites : 150Ma

➡ Issues d'un corps à activité volcanique récente





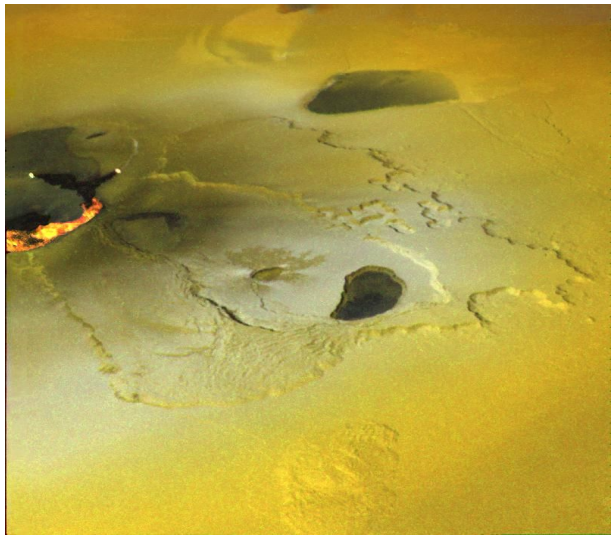
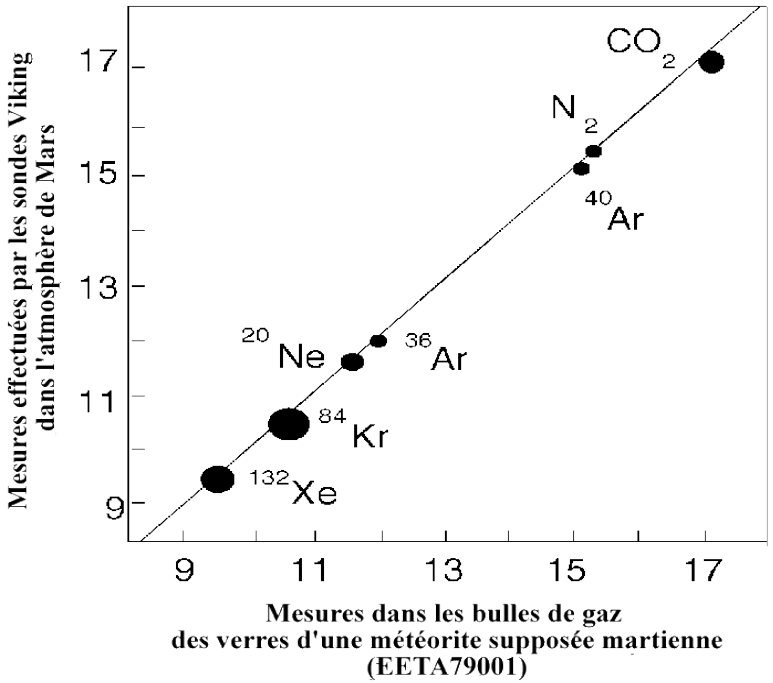


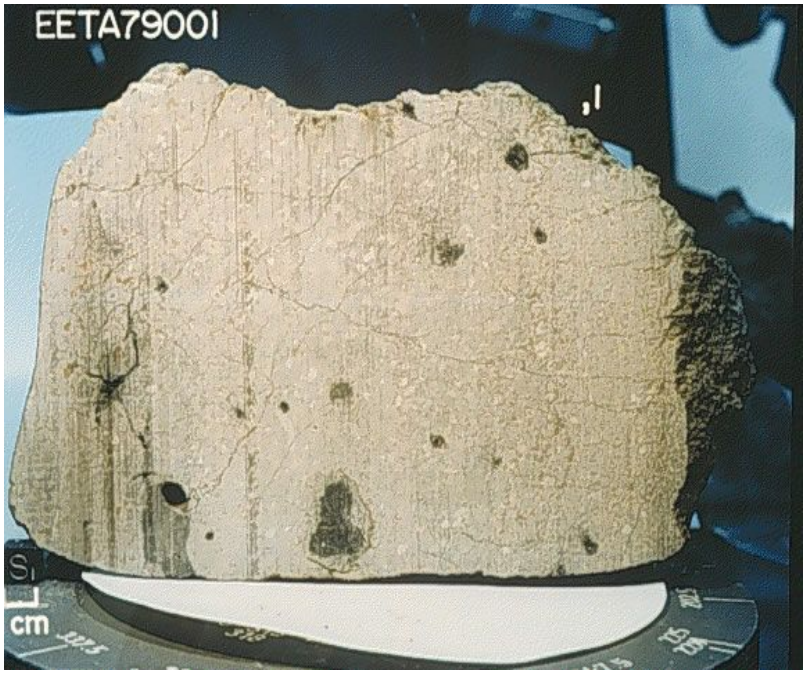
Photo : NASA

http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

D) Les SNC : des météorites venues de Mars

- Atmosphère martienne et bulles de gaz piègées



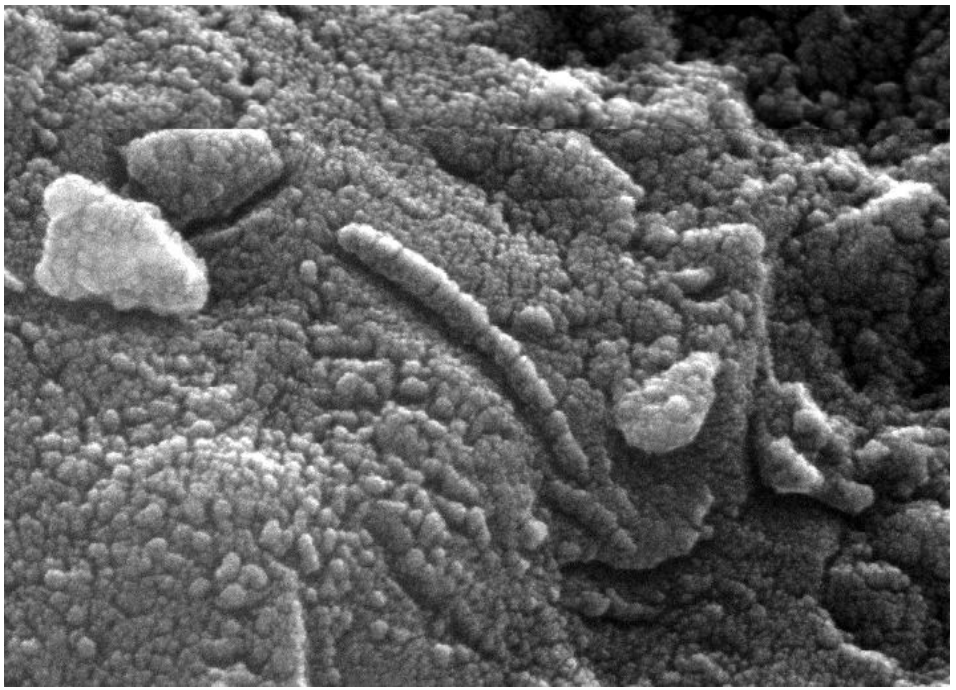


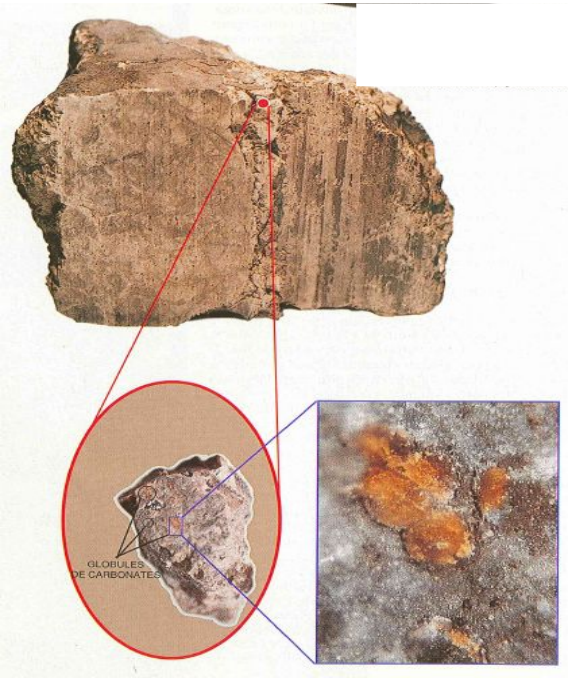
Source : NASA

La teneur des gaz trouvés dans des poches de fusion de la météorite EETA79001 a été comparée, après normalisation à l'azote, à celle mesurée par les sondes Viking. On trouve une très bonne correspondance entre les deux. On peut donc penser que la météorite EETA79001 vient de Mars. Si l'une des SNC vient de Mars, d'après les isotopes de l'oxygène, toutes viennent de Mars.

http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

D) Les SNC : des météorites venues de Mars

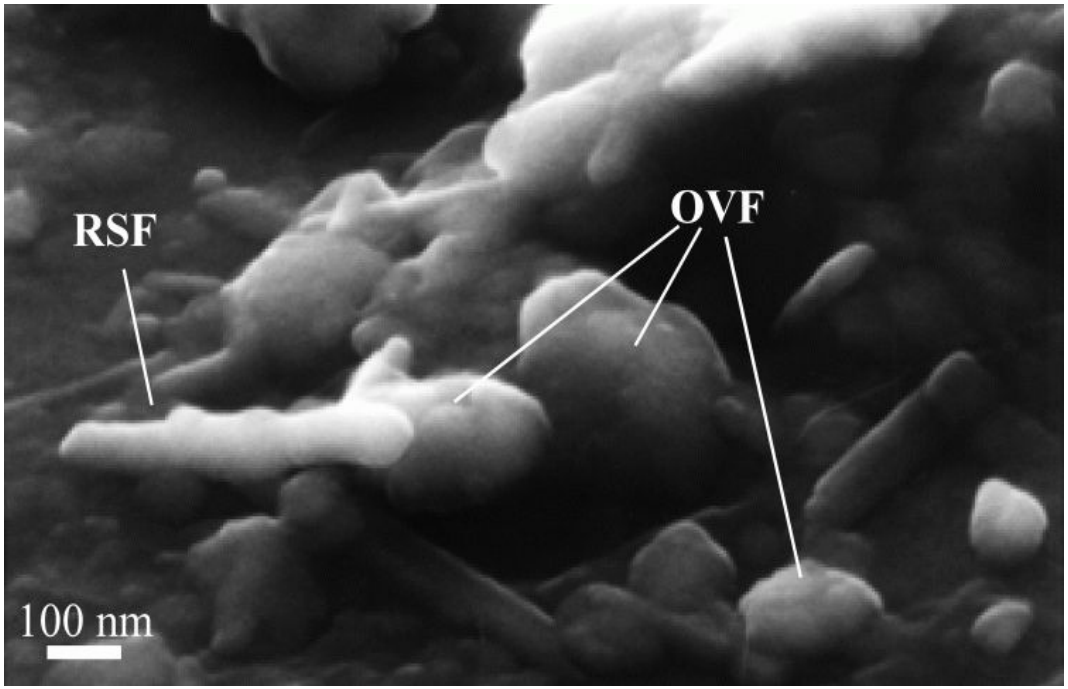




1. On note la présence, dans des fissures de la météorite, de carbonates dont la surface est tapissée de molécules organiques simples (hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)).
2. Associés à ces carbonates, on trouve des nanocristaux de magnétite (Fe_3O_4) et de sulfures de fer qui ressemblent à ceux synthétisés par des bactéries terrestres dites magnétotactiques.
3. Ces carbonates dont la formation date d'environ 4 Ga (datation Rb/Sr et Pb/Pb) se sont formés sur le corps parent d' ALH84001. La zonation chimique de ces carbonates en éléments majeurs (Mg, Ca) est probablement associée à la circulation de fluides hydrothermaux martiens dans les fissures. Les carbonates d'ALH84001 présentent une variabilité de composition chimique associée à une croissance concentrique. Une telle variabilité indique des changements dans les conditions d'oxydo-réduction peu fréquent dans le monde minéral.
4. A la surface des carbonates, des structures allongées de quelques dizaines à quelques centaines de manomètres de long sont observées. D'après les chercheurs de la NASA, ces structures pourraient être des fossiles de bactéries.

http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

D) Les SNC : des météorites venues de Mars



MÉTÉORITE	TATAHOUINE	ALH84001
ORIGINE	Ceinture d'astéroïdes	Planète Mars
TEMPS DE SÉJOUR SUR TERRE	70 ans dans le désert tunisien	13 000 ans en Antarctique
COMPOSITION MINÉRALOGIQUE	Orthopyroxène	Orthopyroxène
PARTICULARITÉS MEB grossissement faible	Présence d'agrégats de carbonates formées dans le désert tunisien	Présence d'agrégats de carbonates formées il y a plusieurs milliards sur Mars
PARTICULARITÉS MEB grossissement fort	Objets nanométriques cylindriques d'origine terrestre !	Objets nanométriques cylindriques d'origine???

Dans la nuit du 27 juin 1931, les habitants de Tatahouine, base militaire française en Tunisie, sont réveillés par un fort grondement, accompagne d'une lueur intense durant une demi-minute. Après quelques recherches, les militaires français découvrent le lendemain des fragments d'une roche curieuse dont les spécialistes reconnaissent l'origine extraterrestre. Ils en expédient quelques morceaux au Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris.
En 1994, Alain CARION, un collectionneur éclairé, retourne sur le site d'impact et récolte de nouveaux fragments de la météorite.
On peut donc comparés deux types d'échantillons : ceux prélevés rapidement et mis à l'écart de l'altération terrestre et des échantillons ayant subit les effets d'un séjour de 64 ans dans un environnement désertique.
En examinant au microscope électronique des échantillons collectés en 1994, nous avons eu la surprise de découvrir à l'intérieur de certaines fractures des agrégats de microcristaux de calcite à la surface des grains de pyroxène.

Cette association minéralogique est en tout point comparable à celle observée sur ALH84001. Ces carbonates sont absents dans les échantillons collectés en 1931. Les compositions isotopiques en oxygène et en carbone de ces carbonates sont quasi-identiques à celles des carbonates du sol où la roche a séjourné. Cela montre qu'ils résultent de la circulation d'un fluide terrestre.
A la surface des carbonates, des images de microscopie électronique à fort grossissement révèlent la présence de formes allongées de diamètre 50 à 70 nm et de longueur de 200 à 600 nm. On y observe aussi des formes ovoïdes de 100 à 200 nm de diamètre. Ces objets ressemblent à s'y méprendre à des bactéries. Sur leurs parois, on note la présence de cristaux de NaCl.

Conclusion

- Deux grandes classes de météorites
- Témoins de la formation du système solaire
- Fenêtre sur la Terre : sa composition chimique, la nature des minéraux la constituant
- Témoin de la formation et de la différenciation des planètes
- « Echantilloneurs » naturels de surfaces

http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

Conclusion

- Il existe d'autres familles de météorites

- Aubrites

•Formées sous conditions réductrices (proches du Soleil ?)
•Brêches monomictes d'enstatite avec olivines, plagioclases et traces de sulfures (FeS) et de métal
•Probablement formées à partir d'un matreriel proche des chondrites à enstatite

- Angrites

•Basaltes appauvri en alcalins
•Minéralogie dominée par la fassaite diopside riche en Al et Ti et plagioclases
•Olivine et autres mnx accessoires (troilite, phosphate …)
•Pourraient provenir de Vénus (?!)

- Ureilites

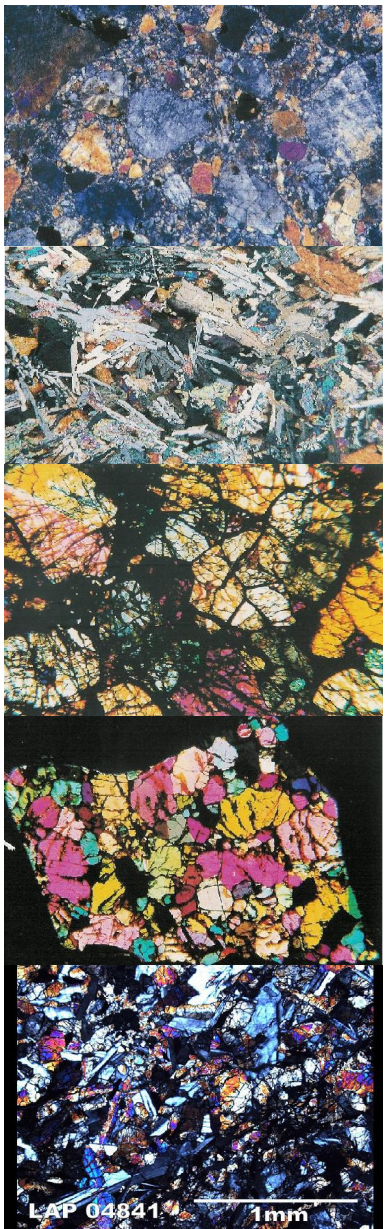
Roches ultrabasiques
•Minéralogie : Olivine, clinopyroxènes, **graphite et diamant**
•Réduction des olivines au contact du carbone
•Cristaux de grande taille
•On pense qu'elles se sont formées sur un seul corps parent mais cen'est pas sûr.
•Origine du carbone :primaire ou injecté pendant un choc

- Bracchinites

Roches ultrabasiques
•Minéralogie : olivine dominante, clinopyroxène, feldspath
•Cristaux de grande taille
•Minéralogie proche de Chassigny

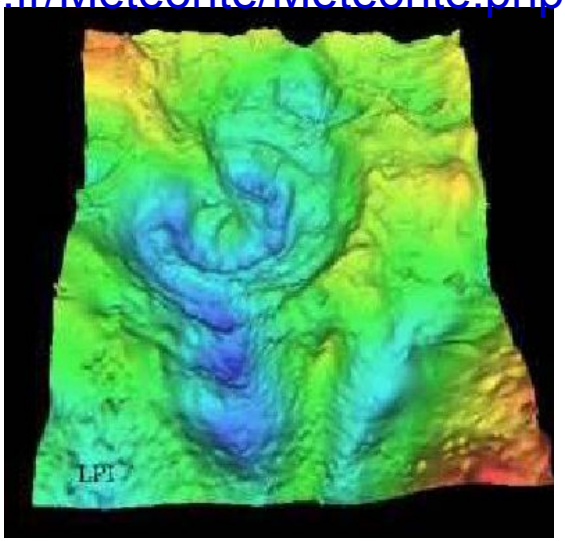
- Lunaites

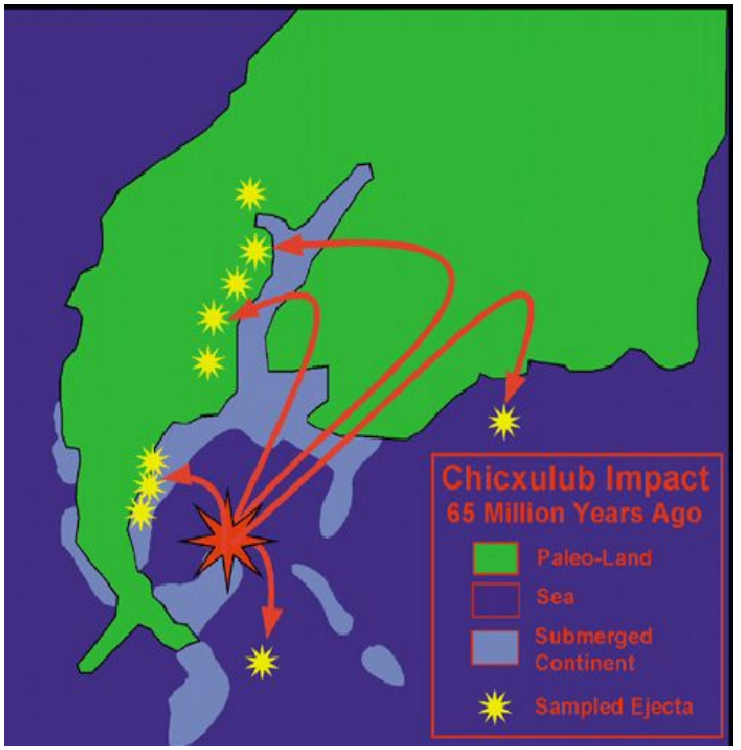
• Basalte, anorthosite ou brèche
• Proviennent de la Lune



http://tristan.ferroir.free.fr/Meteorite/Meteorite.php

Conclusion



- Météorites et crise biologiques

Taille de l'objet	Fréquence (1 par ….)	Exemple et énergie
<50 m	Fréquent (50 000 tonnes/an)	Combustion dans l'atmosphère
50 m	200 à 400 ans	Tounguska-12 MT
100 m	1 000 à 5 000 ans	Barringer-15 MT
500 m	0,1 à 0,5 Ma	Mien-11 10^3 MT
1 km	1 Ma	Rochechouart-9 10^4 MT
5 km	10 à 50 Ma	Popigai-1 10^7 MT
10 km	100 à 500 Ma	Chicxulub-1 10^8 MT
>10 km	40 à 200 vers 3,9 Ga	?????
>100 km	Probable entre 4,6 et 3,9 Ga	?????
>1000 km	1 ou plus ?	?????