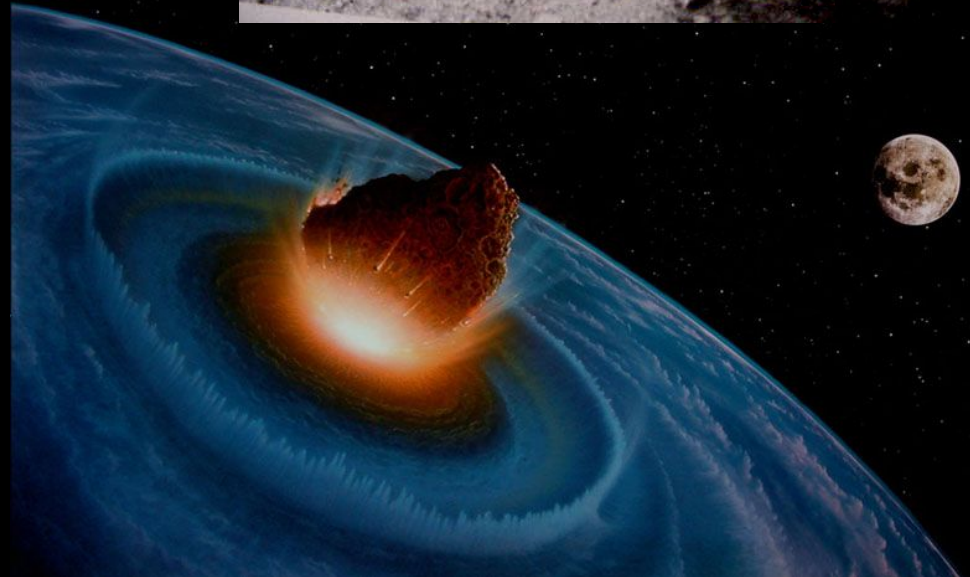


Les météorites, objets de fascination, de science et d'inquiétude

Pierre Thomas, CALA, mai 2006





The Thunderstone of Ensisheim fell in the year 1492

**Les
météorites,
des pierres
tombées du
ciel**

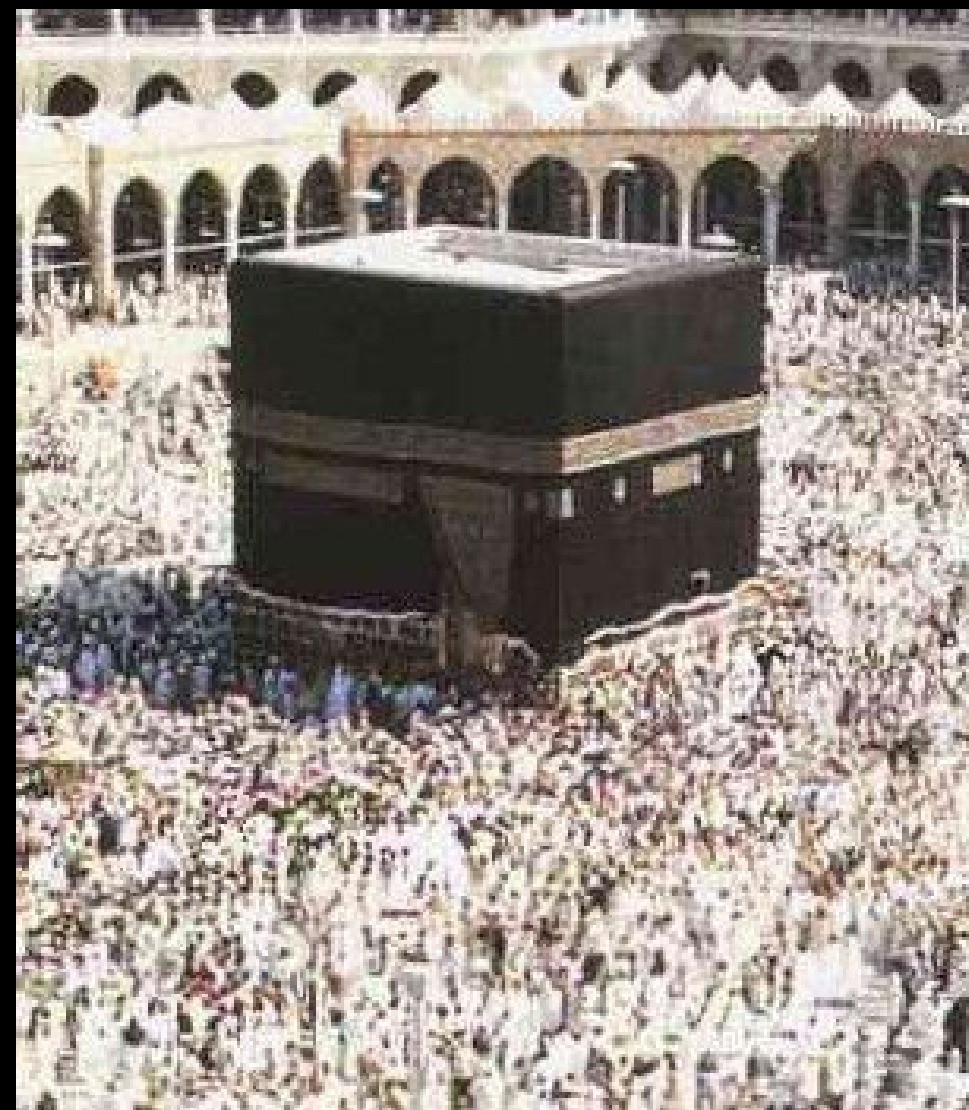
**Objets de superstition
et/ou de culte et de
vénération dans les
temps anciens**





**Un milliard d'hommes se
prosternent théoriquement 5
fois par jour en direction ...**

... d'une météorite



**Sidérurgie et
sidéral ont la même
étymologie indo-
européenne ...**

**... que l'on retrouve dans le
mot latin « sidus sidéris »,
l'astre, le ciel.
Pourquoi ?**





Parce que les premiers objets en fer ont été faits dans « des morceaux de ciel »

Jusqu'au 18eme
siècle, l'intelligencia
puis la science
naissante nient, ou
explique de façon
« terrestre » ces
cailloux « tombés
du ciel »

DES PIERRES
TOMBÉES DU CIEL,
OU
LITHOLOGIE
ATMOSPHERIQUE,
PRÉSENTANT

LA Marche et l'Etat actuel de la Science, sur le
Phénomène des *Pierres de foudre*, *Pluies de
pierres*, *Pierres tombées du ciel*, etc.; plusieurs
Observations inédites, communiquées par MM.
PICTET; SAGE, DARCET et VAUQUELIN; avec un
Essai de Théorie sur la formation de ces *Pierres*.

PAR JOSEPH IZARN, Médecin, Professeur de Physique; de
la Société des Sciences, Belles-Lettres et Arts de Paris; Secrétaire
de la Commission d'Expériences de la Société Galvanique, et
Correspondant de plusieurs Sociétés savantes.

De hoc multi multa, omnes aliquid; NEMO SATIS.
(Inscript. de la Pierre d'Ensisheim.)

A PARIS,
Chez DELALAIN Fils, Libraire, quai des Augustins,
n°. 38, au coin de la rue Pavée.

FLORÉAL AN XI. (1803.)

Deux pierres de 200 liv. et 300 liv.	à Lussheim (Haut-Rhin)	7 novembre 1492	Butenchoën	253	386
	près Vérone	en 1672	Académie de Bourdelot	328	74
				329	76

T A B L E A U

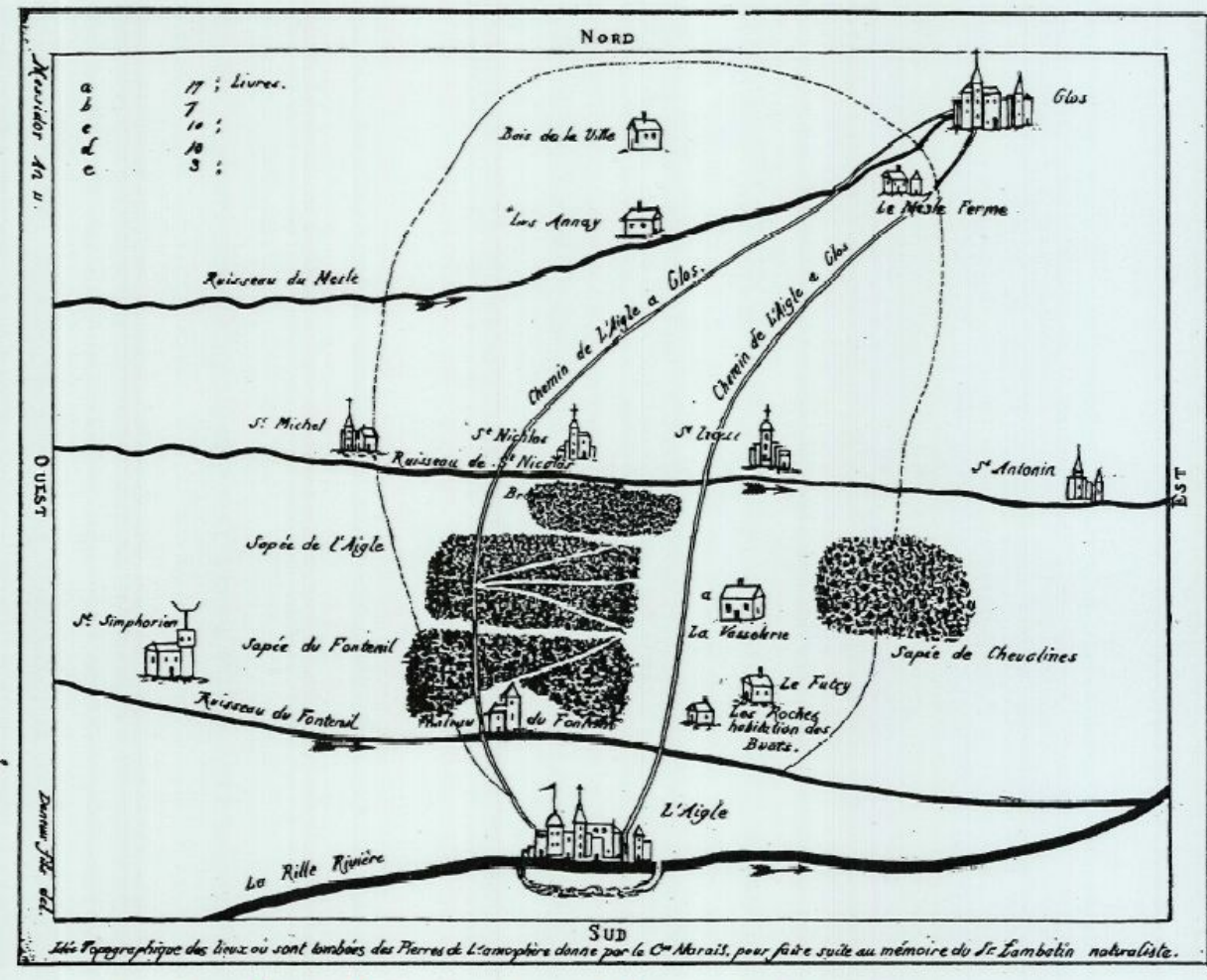
DES PRINCIPALES OPINIONS

Emises jusqu'à ce jour, sur les Substances solides tombées sur notre Globe.

NOMS DES PHYSICIENS QUI LES ONT REGARDÉES COMME

DES PRODUITS LANCÉS DE LA TERRE PAR LES VOLCANS OU LES OURAGANS.	DES SUBSTANCES MINÉRALES FONDUES PAR LA FOUDRE, à l'endroit même où on les a trouvées.	DES CONCRÉTIONS FORMÉES DANS L'ATMOSPHÈRE.	DES MASSES ÉTRANGÈRES A NOTRE PLANÈTE.
<i>Pages.</i>	<i>Pages.</i>	<i>Pages.</i>	<i>Pages.</i>
Fréret 15 et 16	Lemery 7	Descartes. 72	Chladni 115
Gassendi 24	Les Académiciens 61	Lesser 75	Biot 254
Muschembroek 54 et 292	Agricola 75	Goyon-d'Arzas 92	Poisson 258
Barthold 72	Sthal 77	Sir Williams Hamilton . . 97	<i>Bibliothèque Britannique, n°. 174</i>
G. A. Deluc 145	Gronberg 79	Edward King 100	
	Patrin 165	Eusebe Salverte 408	

**Jusqu'au 3 mai 1803, bien peu admettent une
origine extra-terrestre pour ces objets**

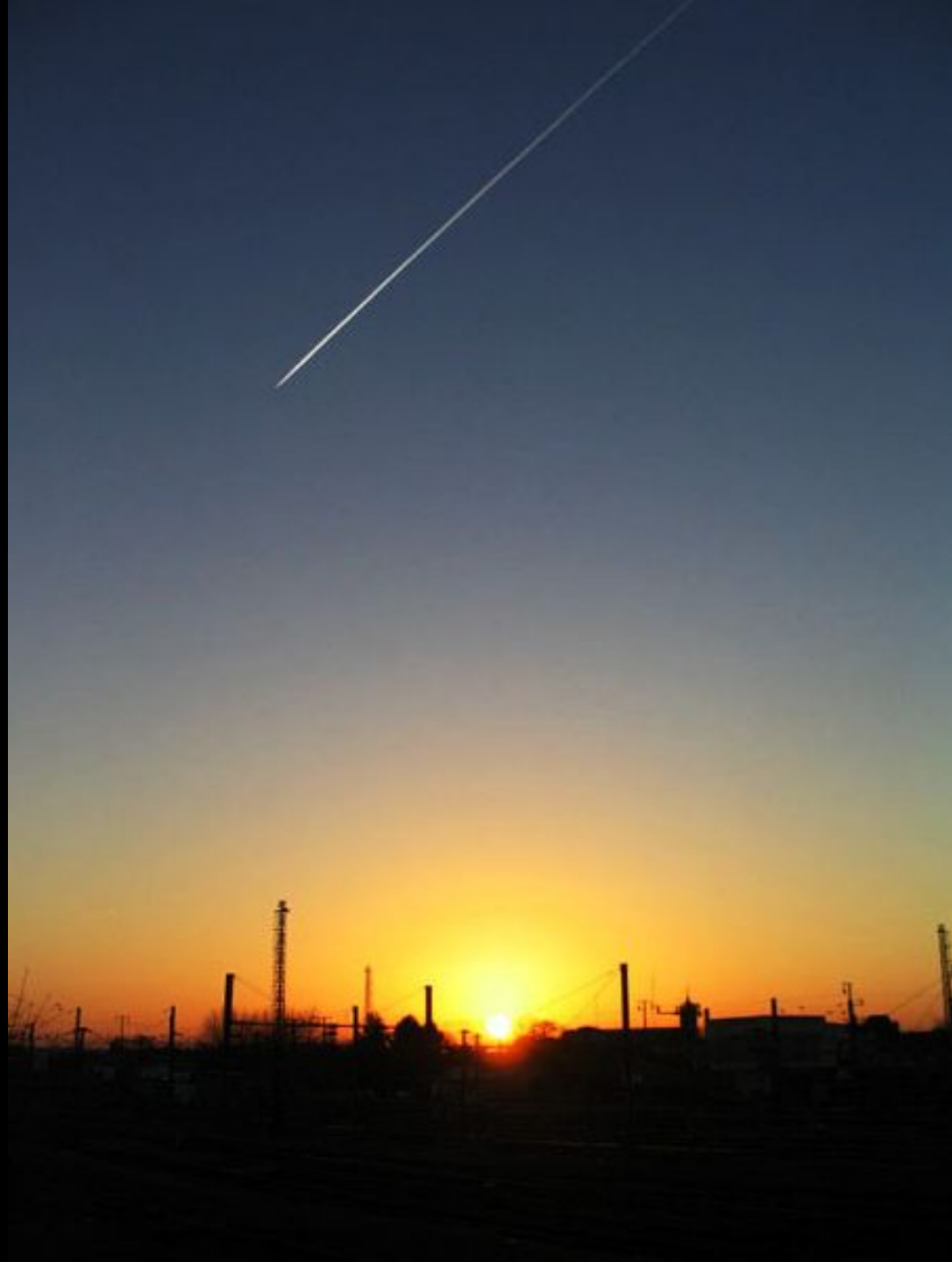


C'est après la chute du 6 floréal de l'an XI (3 mai 1803) à l'Aigle (Orne) que Biot prouve l'origine extra-terrestre des météorites



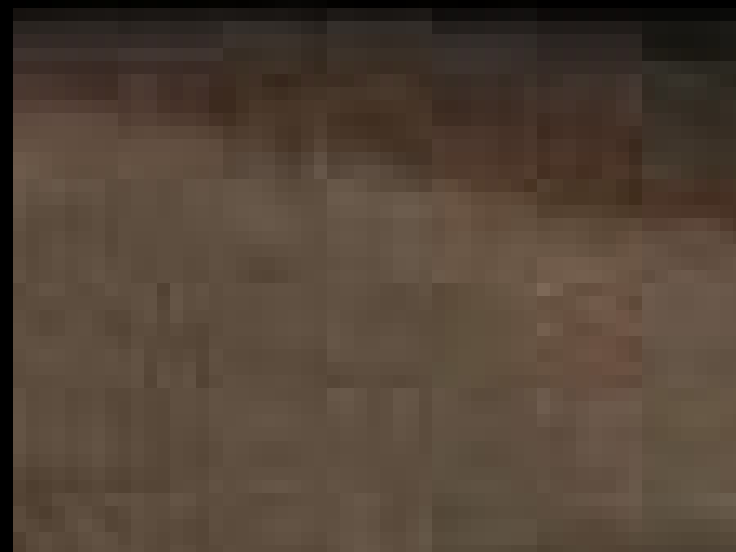
Tout le monde connaît les étoiles filantes, grains de poussières qui brûlent en traversant la haute atmosphère. L'étude de la trace lumineuse montre que la quasi-totalité de ces poussières ont une orbite cométaire

**Certaines sont plus
brillantes que
d'autres**





Encore plus brillantes. La traînée lumineuse peut durer « longtemps ». On les appelle alors « bolide ». La majorité des bolides a une orbite cométaire ; les autres ont une orbite d'astéroïde





On les voit parfois même en plein jour



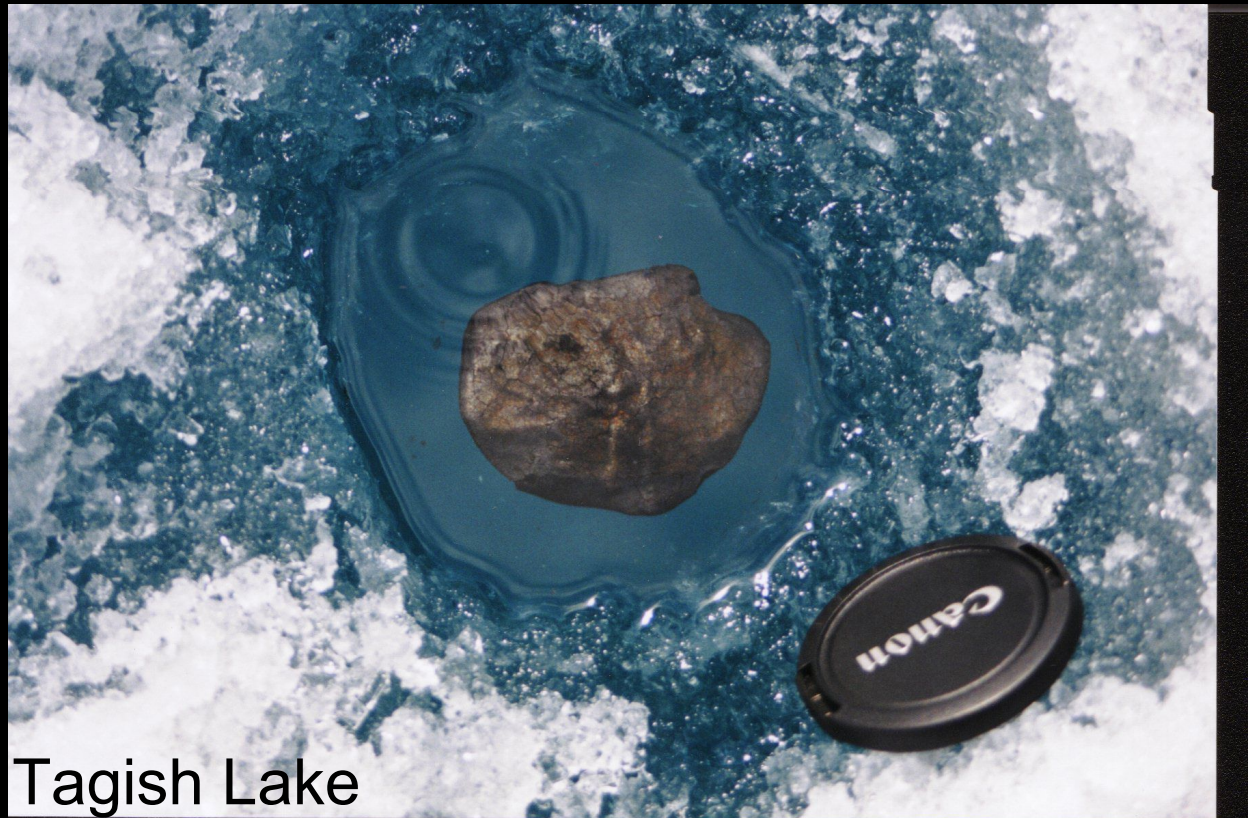
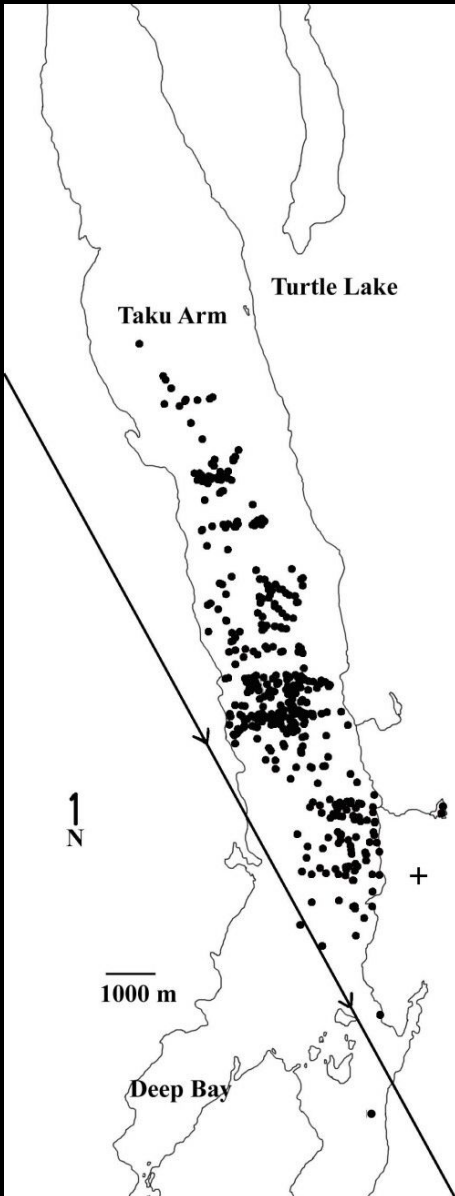
**Aquarelle russe
de 1947**



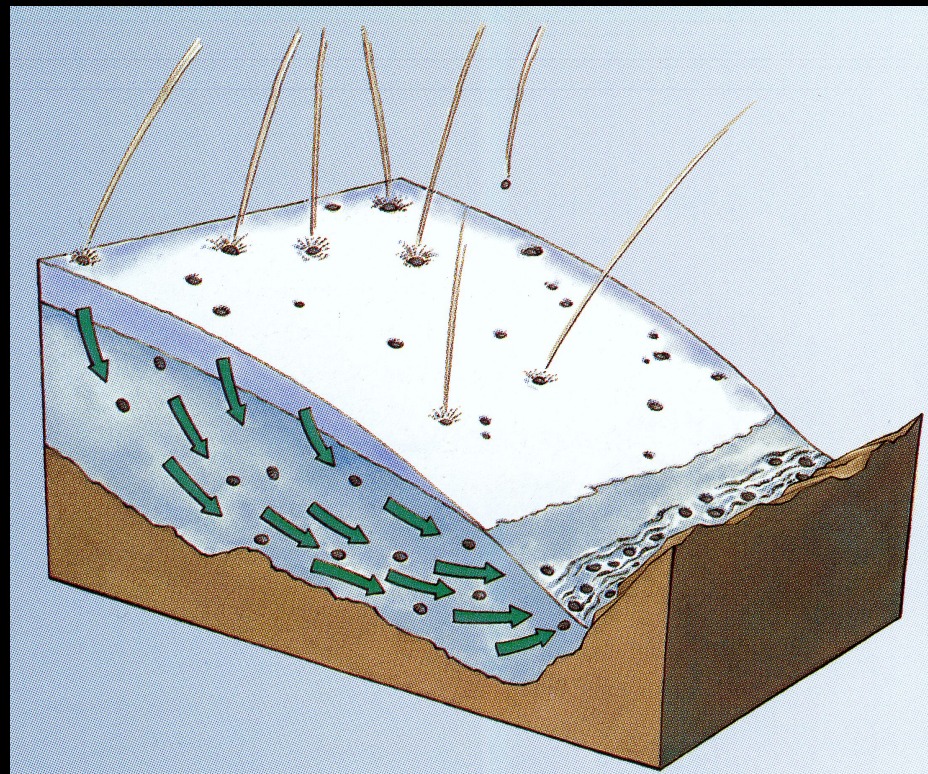
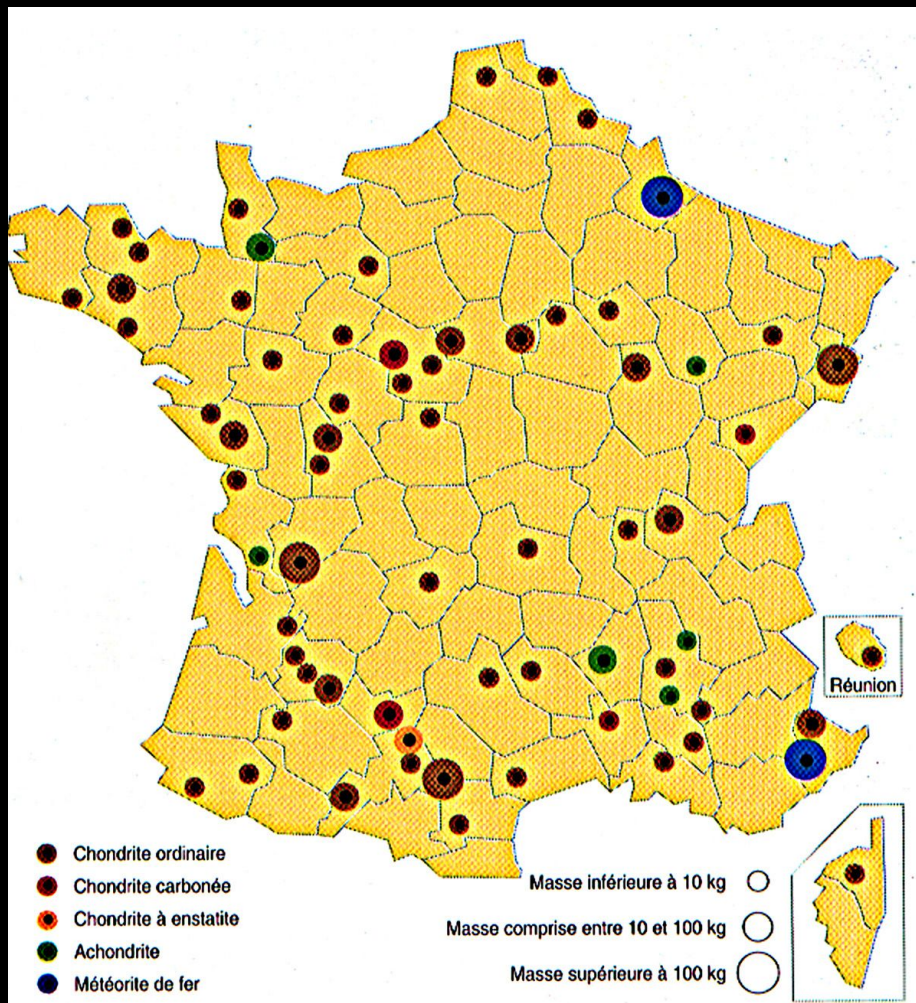
Parfois, le bolide atteint la Terre, en faisant quelques dégâts. On trouve alors une météorite ...

Le 9 octobre 1992 au soir, un objet lumineux traversa le ciel sur plus de 700 km, du Kentucky au New Jersey. Cette boule de feu, unique au début de sa trajectoire (sud Ouest), se scinda en plusieurs dizaines de fragments lumineux. Un de ces fragments, le seul qui soit arrivé au sol et qu'on ait retrouvé, d'un poids de 12 kg, tomba sur la voiture de Miss Michelle Knapp, en perça le coffre et s'enfonça d'une dizaine de centimètres dans le goudron

**... une ou
plusieurs
météorites**



Tagish Lake



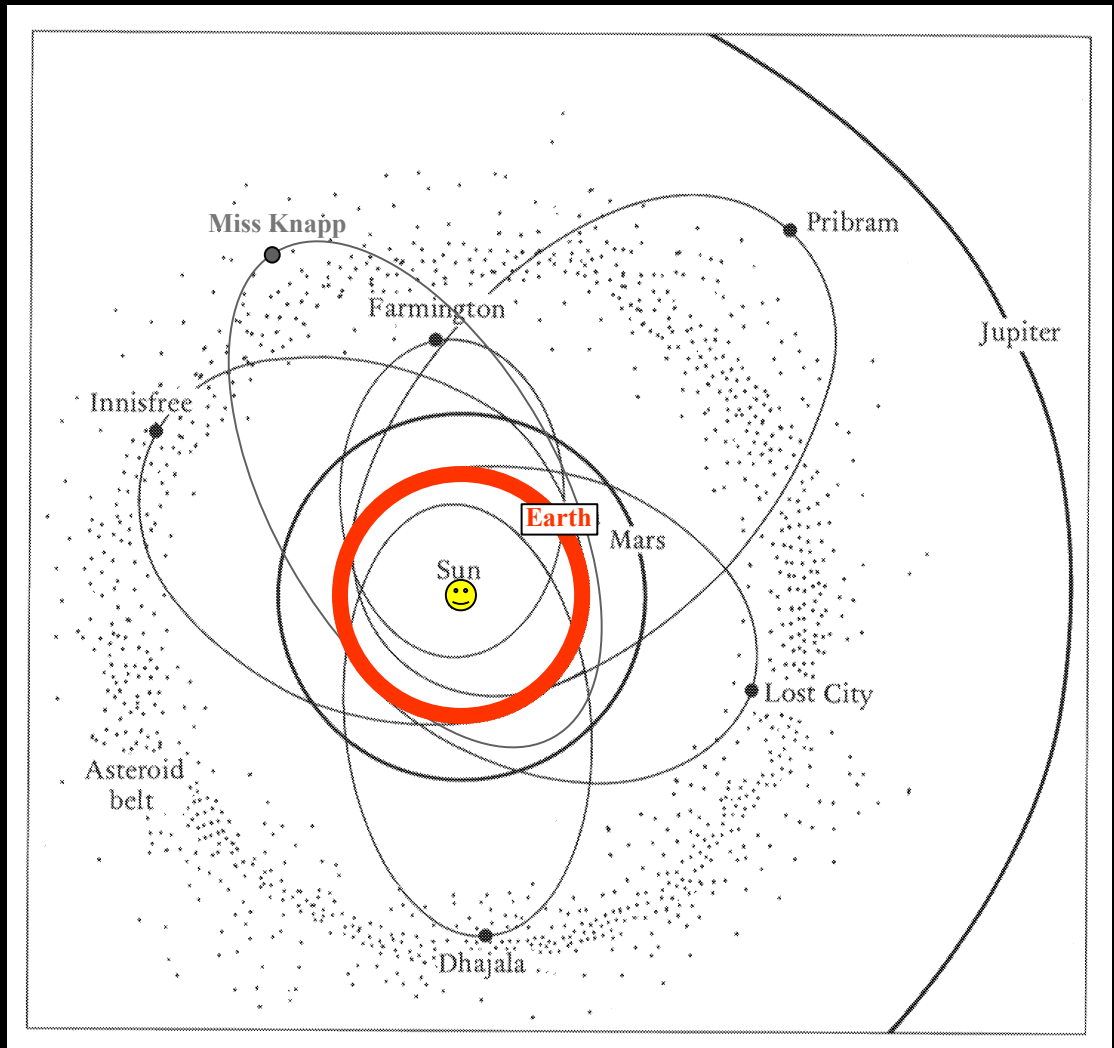
Le mécanisme de concentration des météorites en Antarctique

En général, quand on voit la traînée et qu'on trouve le caillou, on n'a pas pu étudier la trajectoire. Souvent même, on trouve le caillou sans l'avoir vu tomber

Ce qu'on voit sur Terre



On fait l'hypothèse que la trajectoire est une ellipse dont le soleil est un foyer.



Dans 6 cas, on a pu à la fois calculer la trajectoire et trouver le « caillou ». Dans les 6 cas, c'était une trajectoire d'astéroïde géocroiseur, et le caillou était une chondrite.

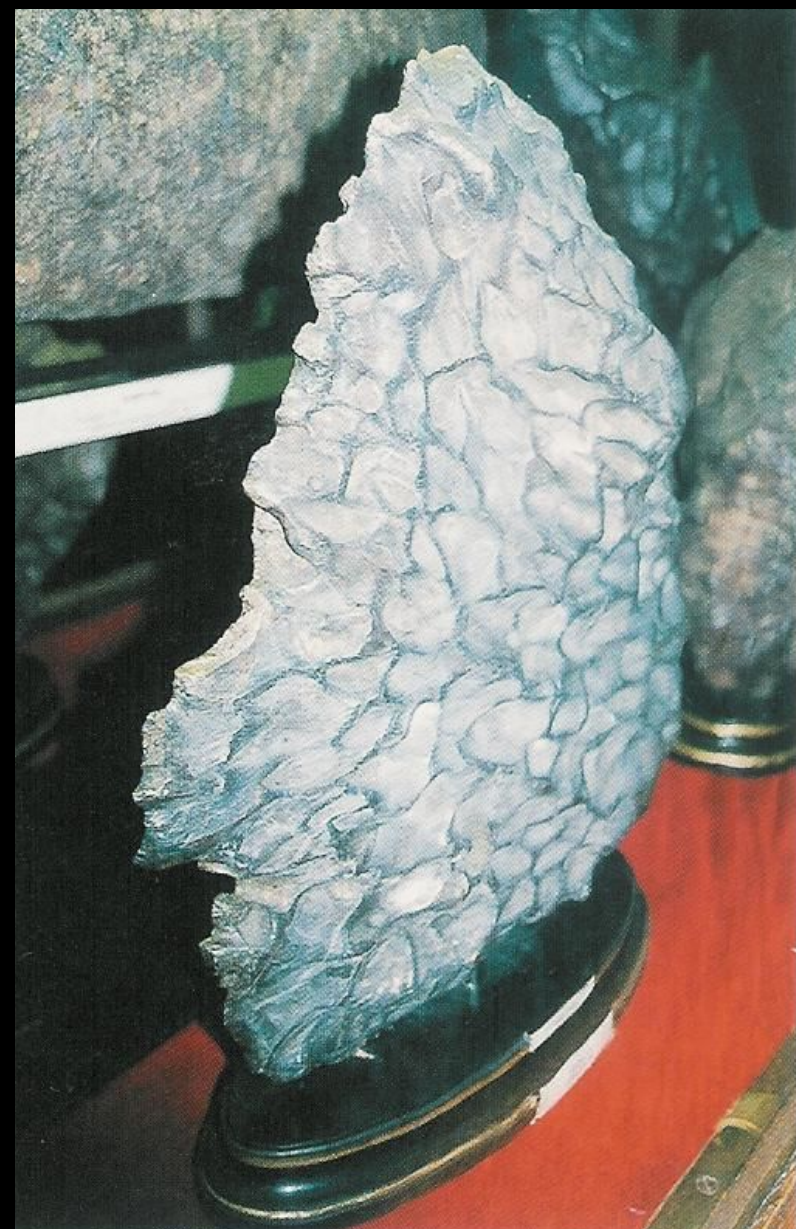
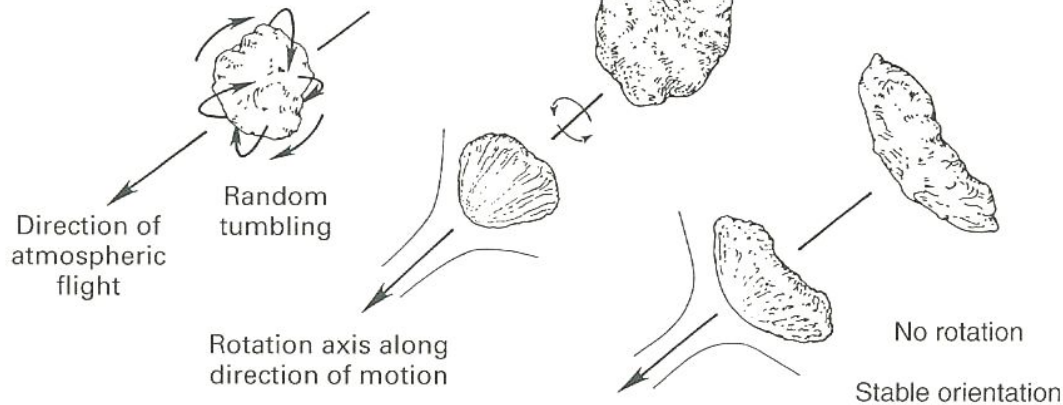


Les météorites sont entourées d'une croûte de fusion, due à la chaleur dégagée par le frottement sur l'atmosphère

Spherical shape

Cone shape

Shield shape



La forme de la météorite traduit le mouvement lors de la traversée de l'atmosphère

Ancienne classification

Météorite
pierreuse
= aérolite
91 %

Météorite de fer
= sidérite
8 %

Sidérolite 1 %
= fer + silicates

Classification actuelle simplifiée

Chondrite

83 %

Olivine + pyroxène
+ 0 à 30 % de fer
dispersés dans la masse
+ 0 à 10 d'H₂O
+ 0 à 4 % de matière
carbonée

Basalte et gabbro 8%
pyroxénite et péridotite

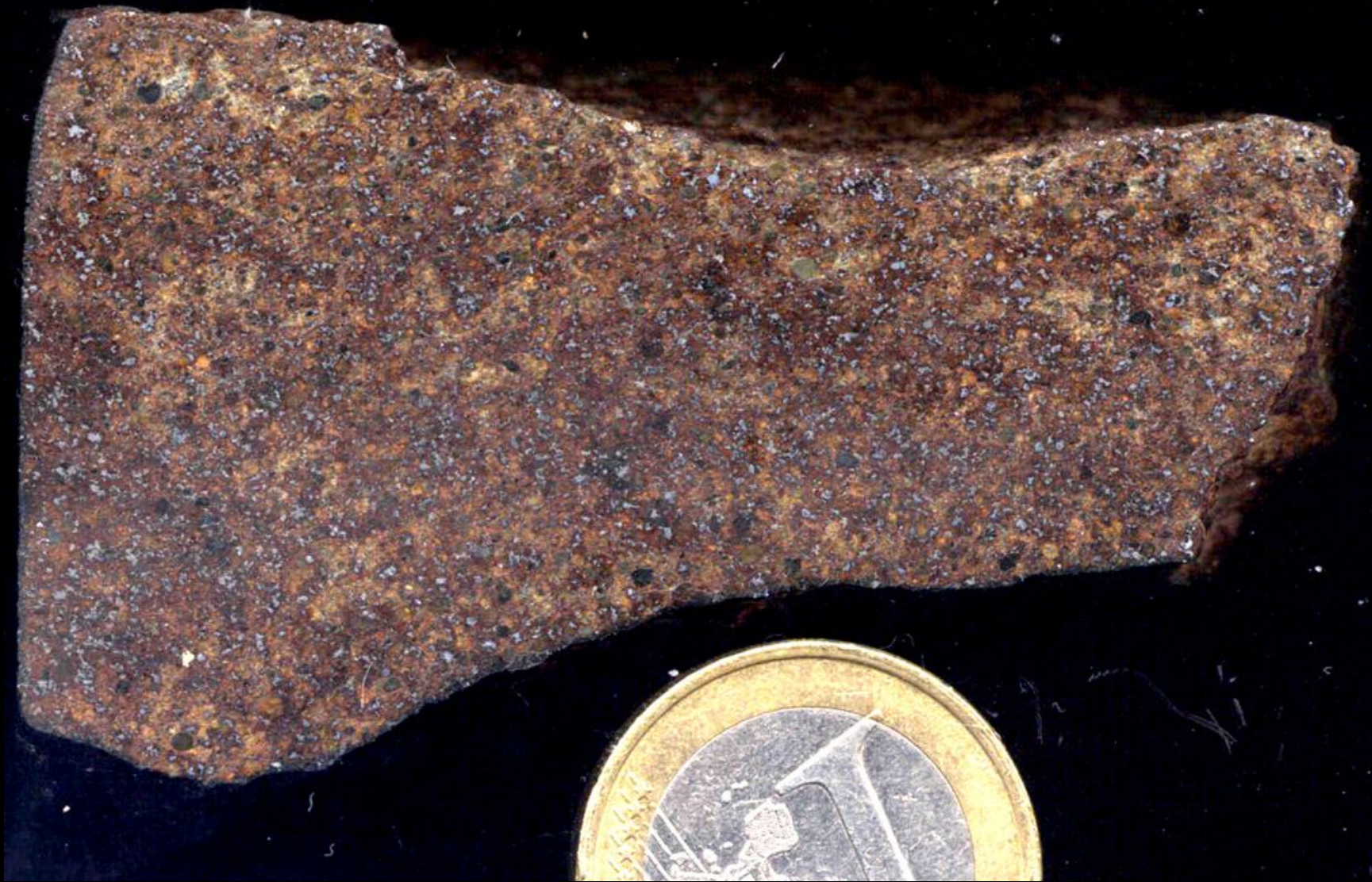
Météorite de fer
= sidérite
8 %

Pallasite et autres 1 %
= fer + olivine

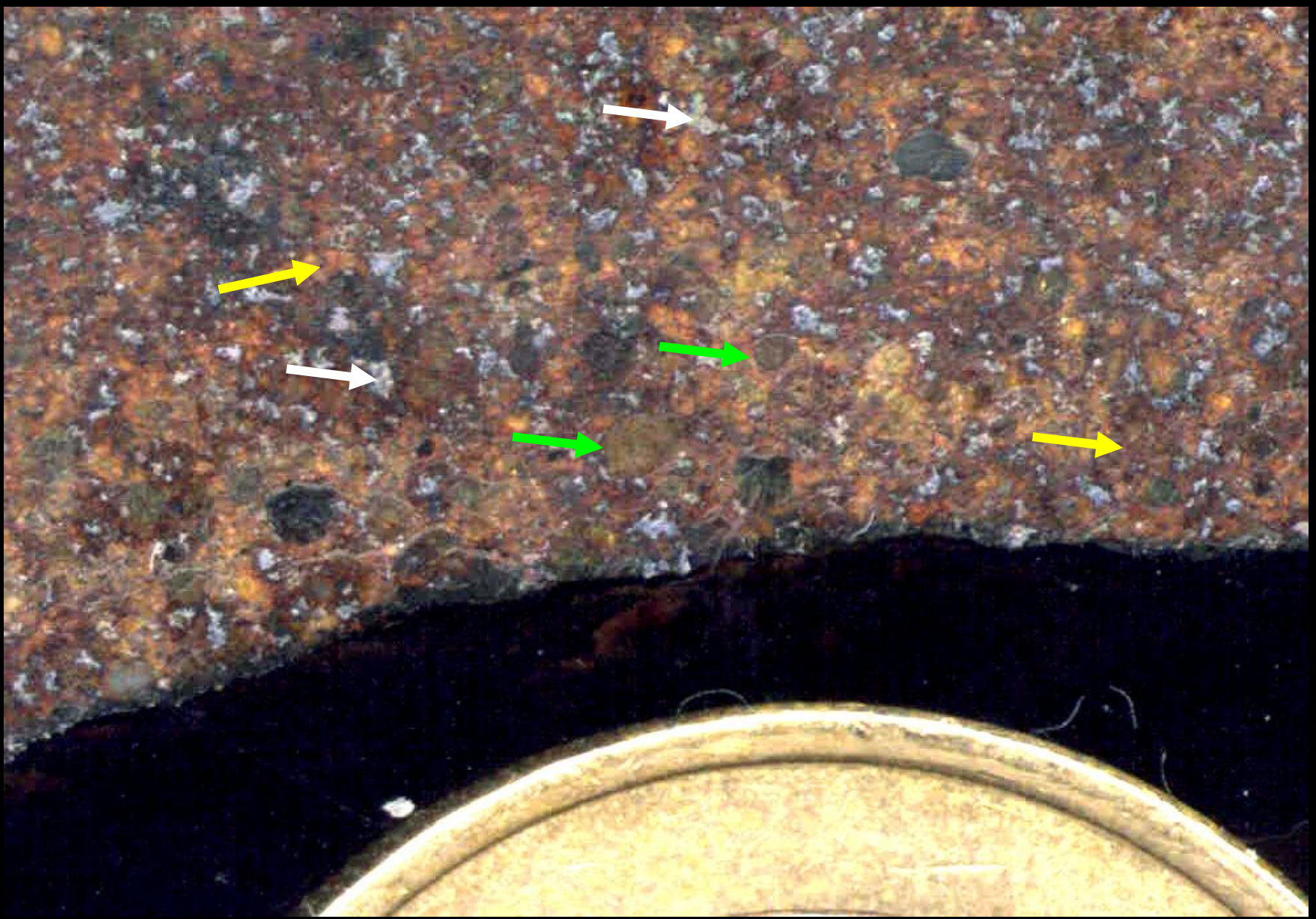


La
classification
(simplifiée)
des
météorites





**Tout d'abord, les chondrites,
dites météorites non différenciées**

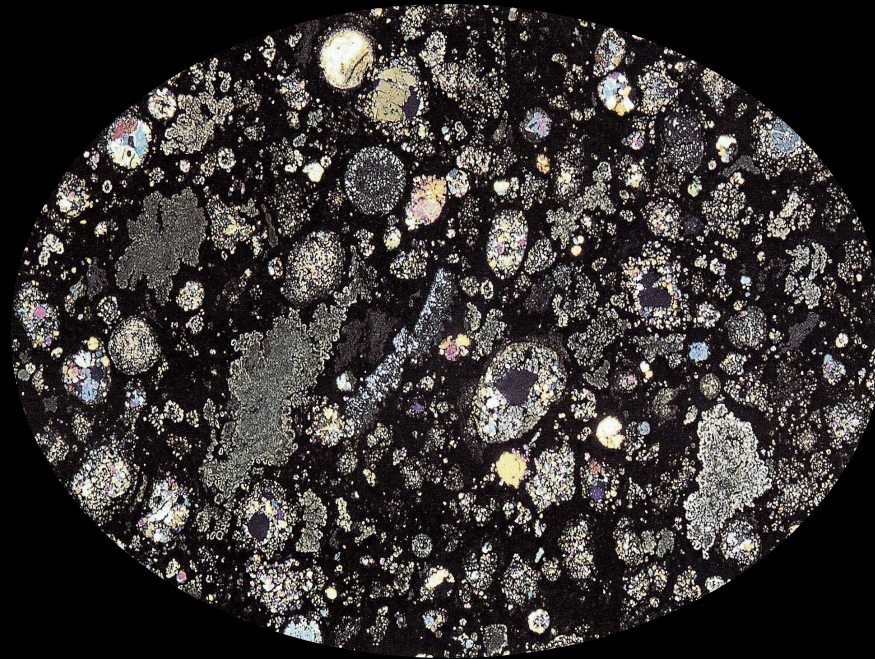
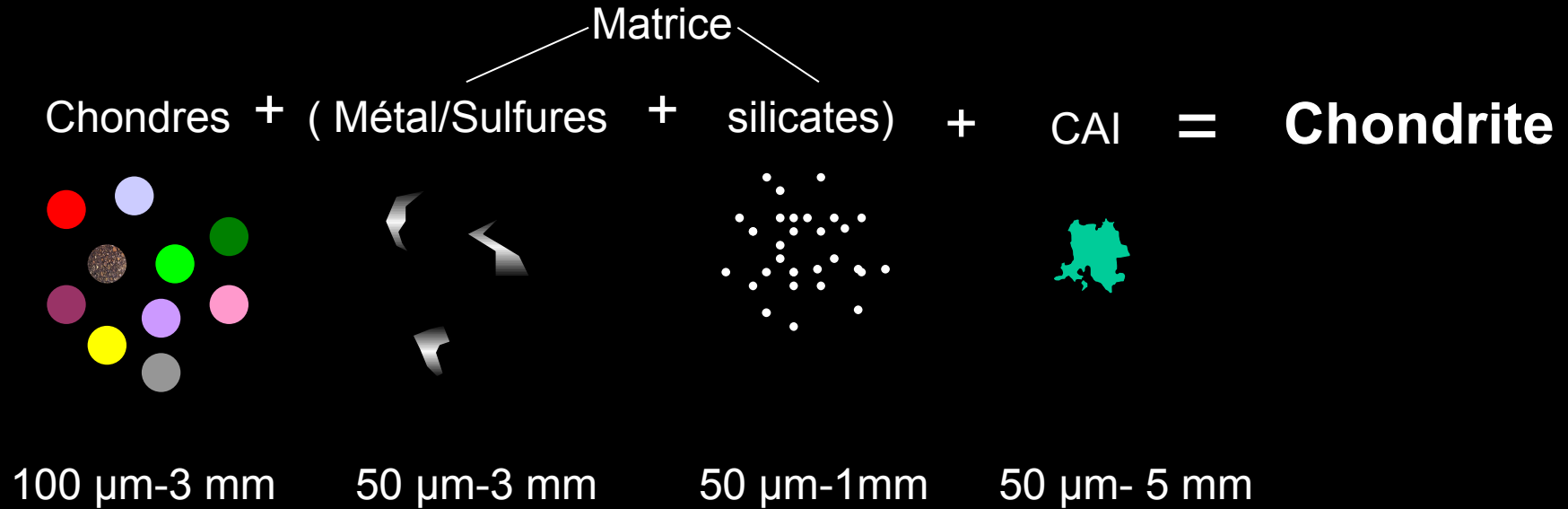


Une chondrite : une matrice de silicates et de fer métallique, et des chondres (petites boules)

**Un autre
type de
chondrite,
dite C, la
chondrite
d'Allende**



Chondrite ...les ingrédients



83 % des
météorites

La matrice : des petits grains de silicates, de métal, de sulfures et parfois de substances carbonées

Table 6.2 Mineralogy and abundance of matrix in chondrites.

Chondrite Type	Matrix (vol%)	Minerals
CI1	> 95	phyllosilicates (serpentine), magnetite, dolomite, pyrrhotite, sulfates
CM2	55–85	phyllosilicates (serpentine), tochilinite, calcite, aragonite, magnetite, epsomite, pentlandite, pyrrhotite
CO3	30–40	olivine (Fa 30–60), phyllosilicates
CV3	35–50	olivine (Fa 40–60), high-Ca pyroxene (Fs 10–50, Wo 45–50), nepheline, sodalite, pentlandite, troilite, magnetite, phyllosilicates
C4–5	50–80	olivine (Fa 30–40), plagioclase (An 20–90) high-Ca and low-Ca pyroxene, magnetite, pentlandite, pyrrhotite
H3, L3, LL3	5–15	olivine (Fa 20–70), low-Ca pyroxene (Fs 1–20), glass, troilite, Fe, Ni, magnetite
Kakangari		Enstatite (Fs 1–10), troilite, Fe, Ni

Source:

Data from Scott, E. R. D. (1988) in *Meteorites and the Early Solar System* (eds. J. P. Kerridge and M. S. Matthews) Arizona Univ. Press, Tucson, p. 721, Table 10.2.1.

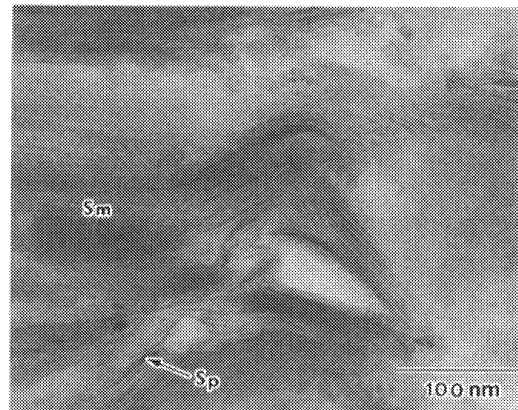
Abondance très variable.

Beaucoup de matrice dans les types primitifs.

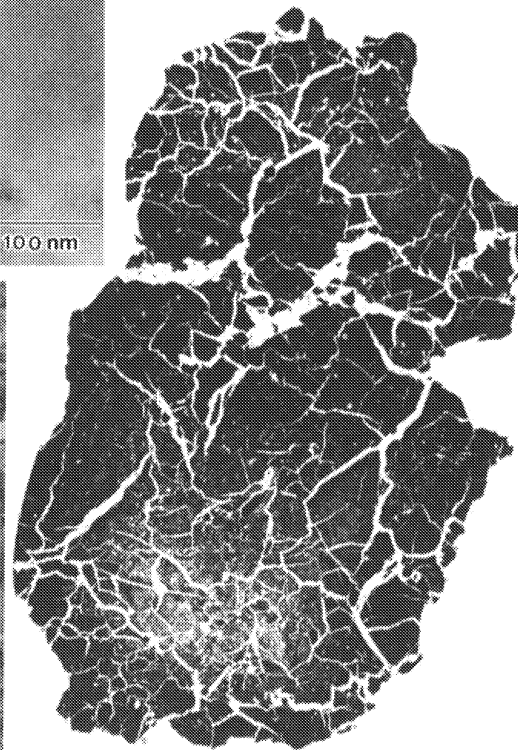
Plus le type est primitif, plus cette matrice a subi l'altération aqueuse.

Altération aqueuse : certaines météorites se sont formées (ou ont été altérées) en présence d'H₂O, à T < 300°C

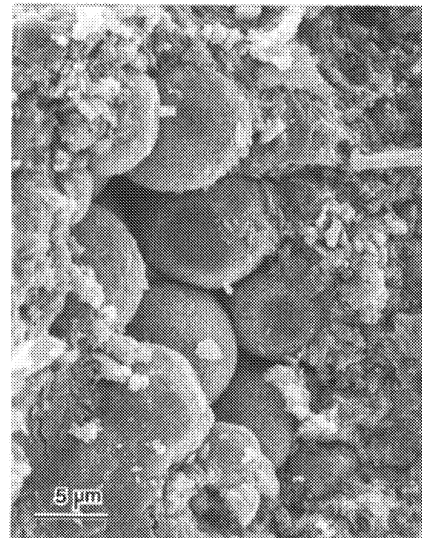
Image TEM:
smectite et serpentine



Veines de phosphates
dans la chondrite
d'Orgueil



Spherules de
magnetite,
oxyde de fer



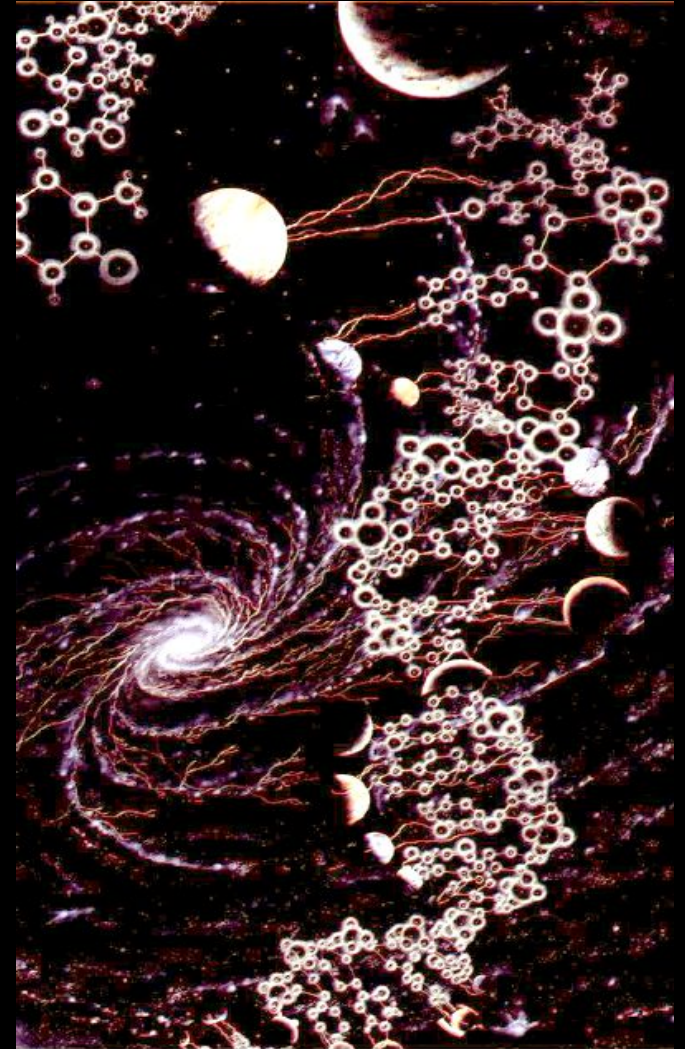
La matière carbonée : présente dans La matrice de quelques % des chondrites

Environ 2.5 % en masse de matière carbonée (jusqu'à 4 %) dans les chondrites C.

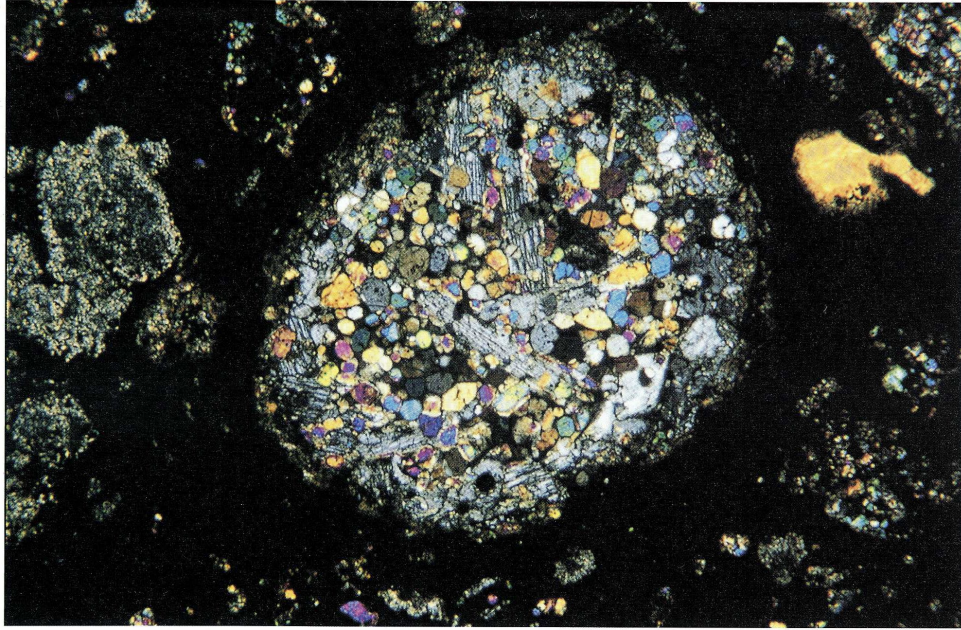
Matière macro-moléculaire insoluble.

- Hydrocarbures
- Acides carboxyliques
- Sucres
- Composés aromatiques dont bases azotées
- Acides aminés

Très étudiée en exobiologie.



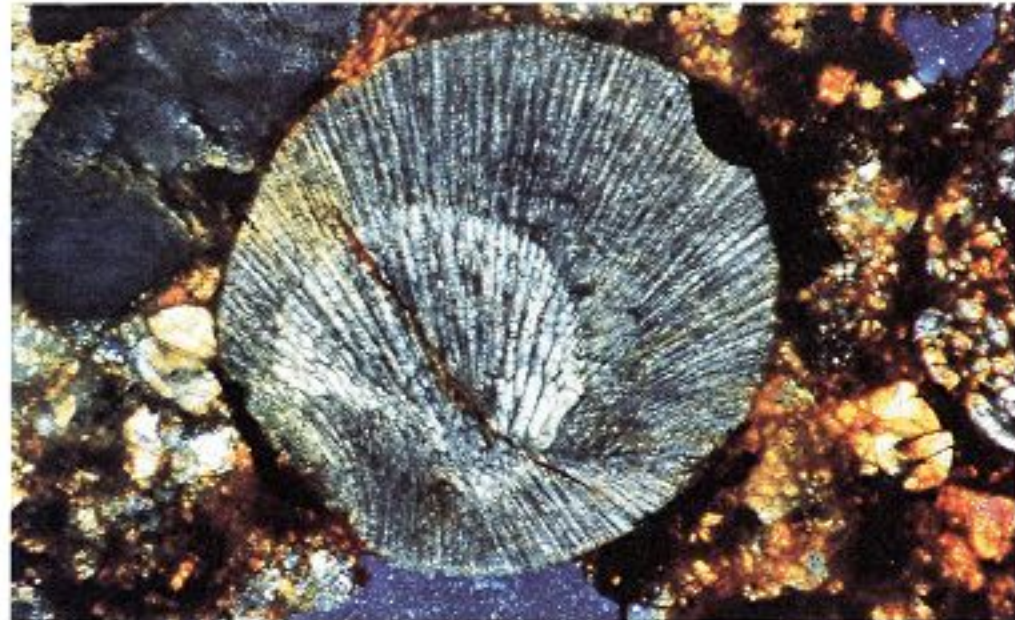
Les différents types de chondres



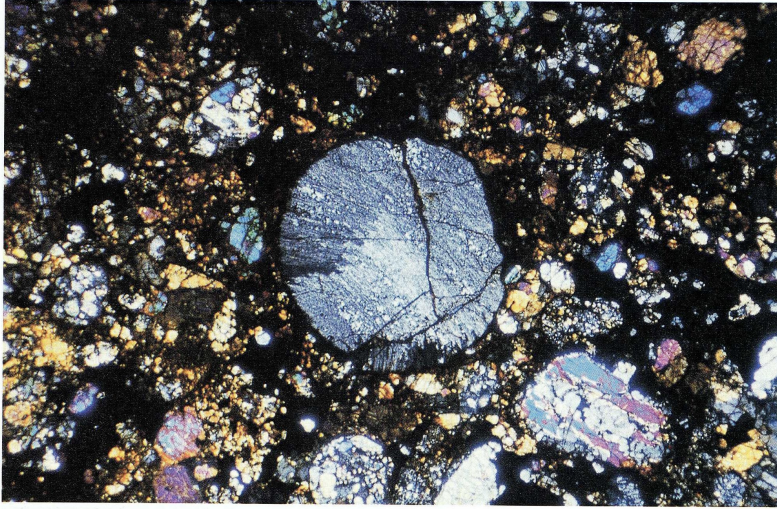
A grains = porphyrique

« A fibres »
= non porphyrique

Les minéraux
principaux : olivine et
pyroxène



Les chondres non-porphyriques (20 %)

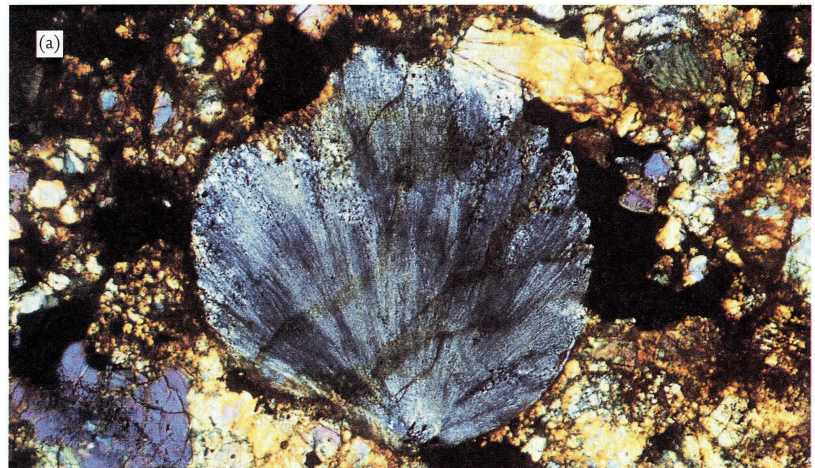


Chondre à taille de grain très fine (Opx).

**Une telle structure
s'obtient par
cristallisation rapide
(entre 100 et 1000°C par
heure) d'un liquide ...**



1 ou 2 points de nucléation



Chondres à pyroxène radial (RP).



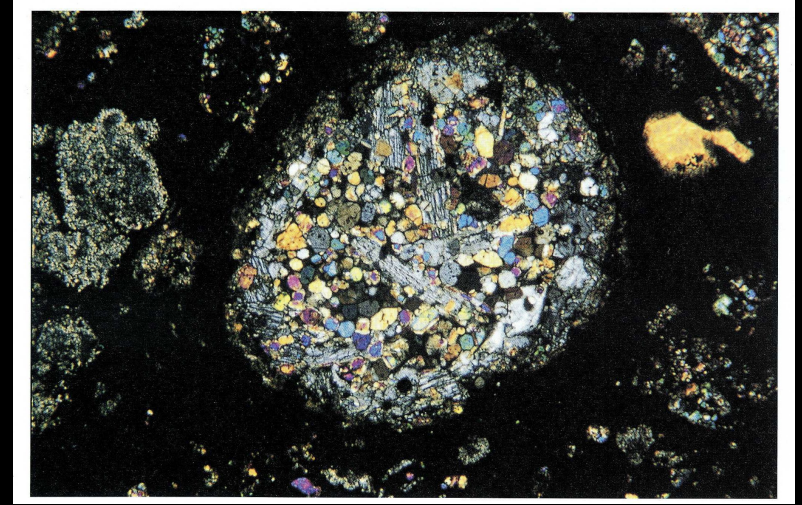
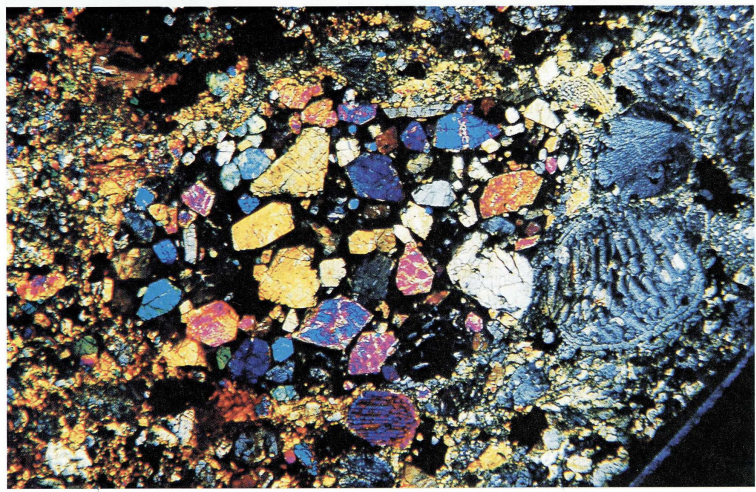
Ça, p-p-par exemple!... Mon whisky-ky qui se met en b-b-boule... Ce n'est p-p-pas.. p-p-possible, voyons!... Est-ce que j'aurais d-d-déjà trop b-b-bu?...



Trop bu ou pas trop b-b-bu...un honnête whisky ne se conduit p-p-pas de cette façon!...Allons, ici, et t-t-tout de suite!...

... liquide
qui était en
apesanteur

les chondres porphyriques (80 %)



La goutte n'était pas complètement liquide : il restait des nucléi sur lesquels vont croître olivine et pyroxène.

Les inclusions réfractaires (CAI), rares et présent seulement dans quelques % des météorites

Minéralogie réfractaire.

Minéraux riches en Ca et Al

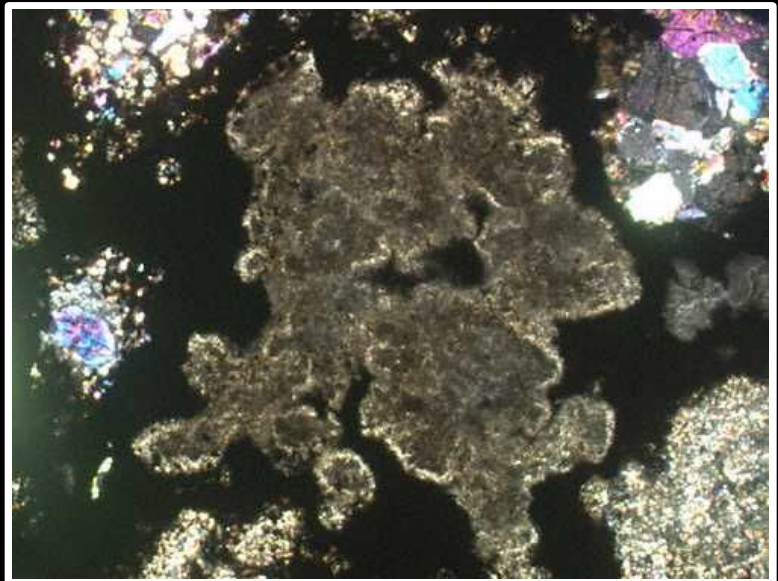
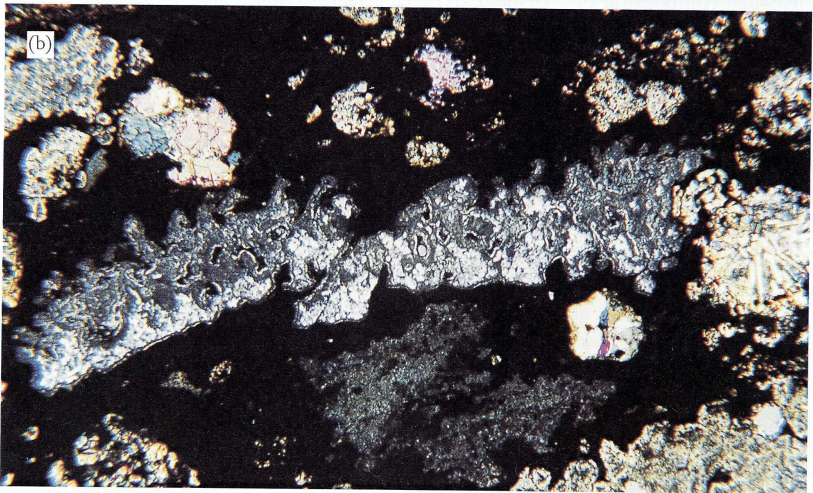
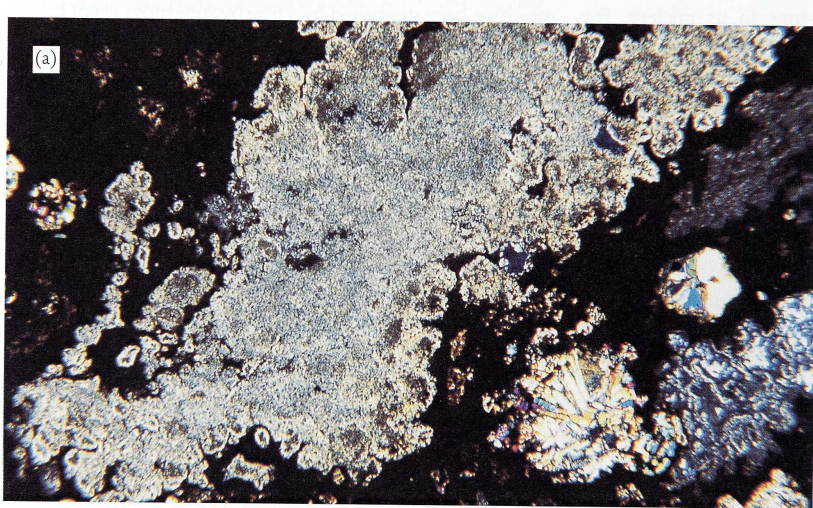
Corindon Al_2O_3

Hibonite $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$

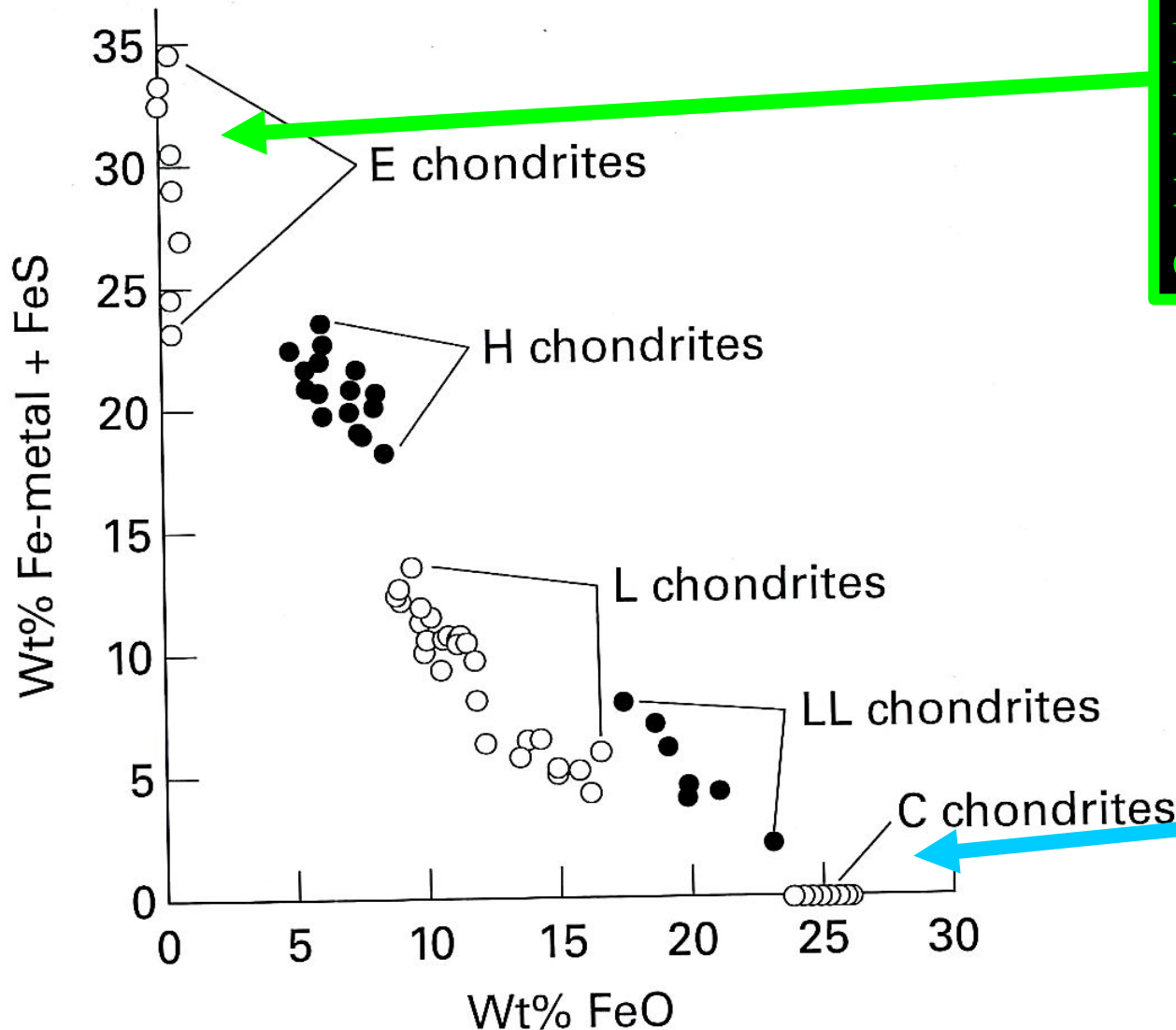
Perovskite CaTiO_3

Melilite $\text{CaAl}_2\text{SiO}_7$

Spinel MgAlO_4



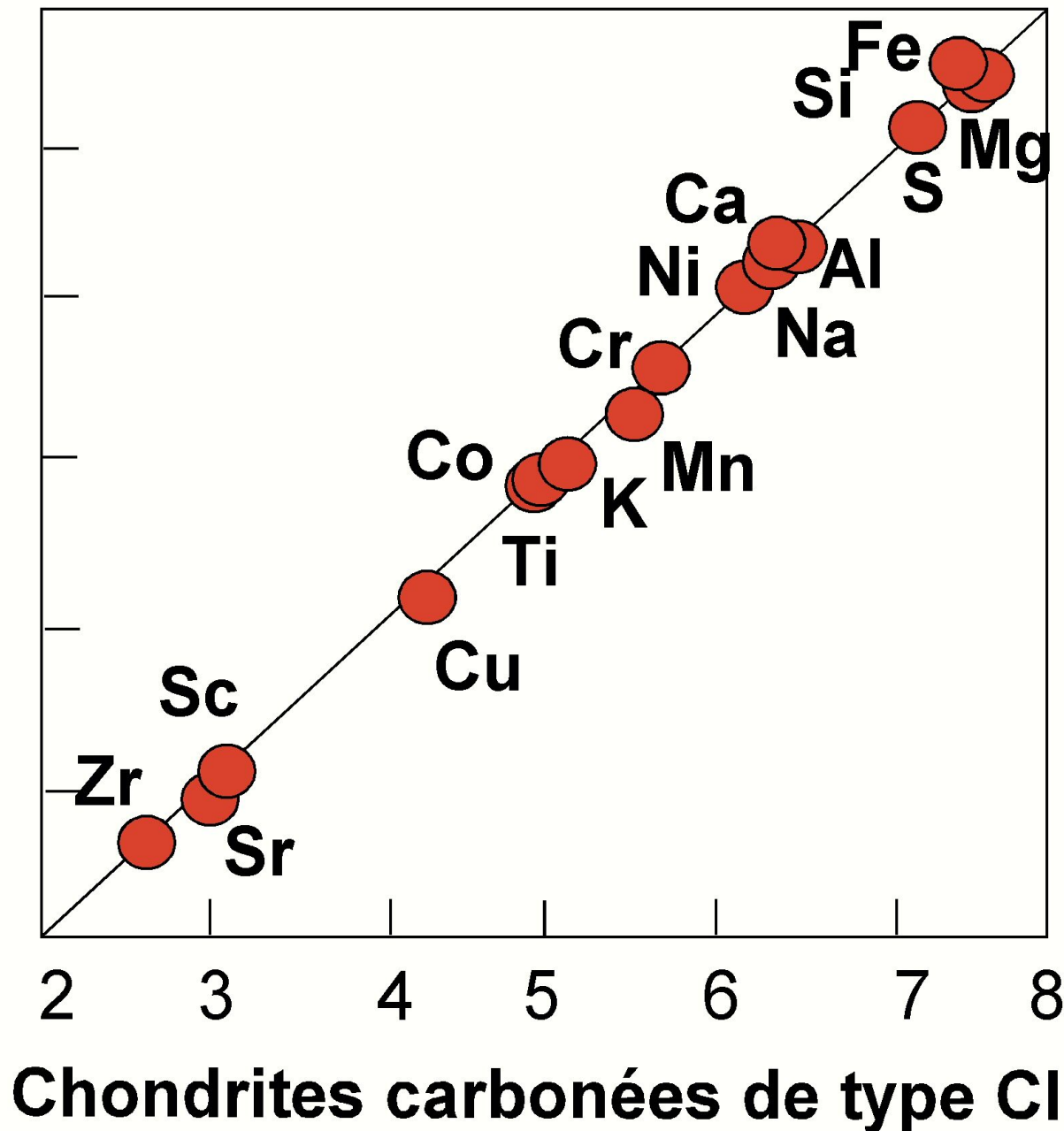
La classification des chondrites : de 25-30 % de fer plus ou moins oxydé ; de 0,01 à 10 % d'H₂O



Fer métallique.
Pas d'H₂O ni de
matière
organique

Fer oxydé. <
10 % d'H₂O. <
4 % de matière
organique

Photoshère solaire



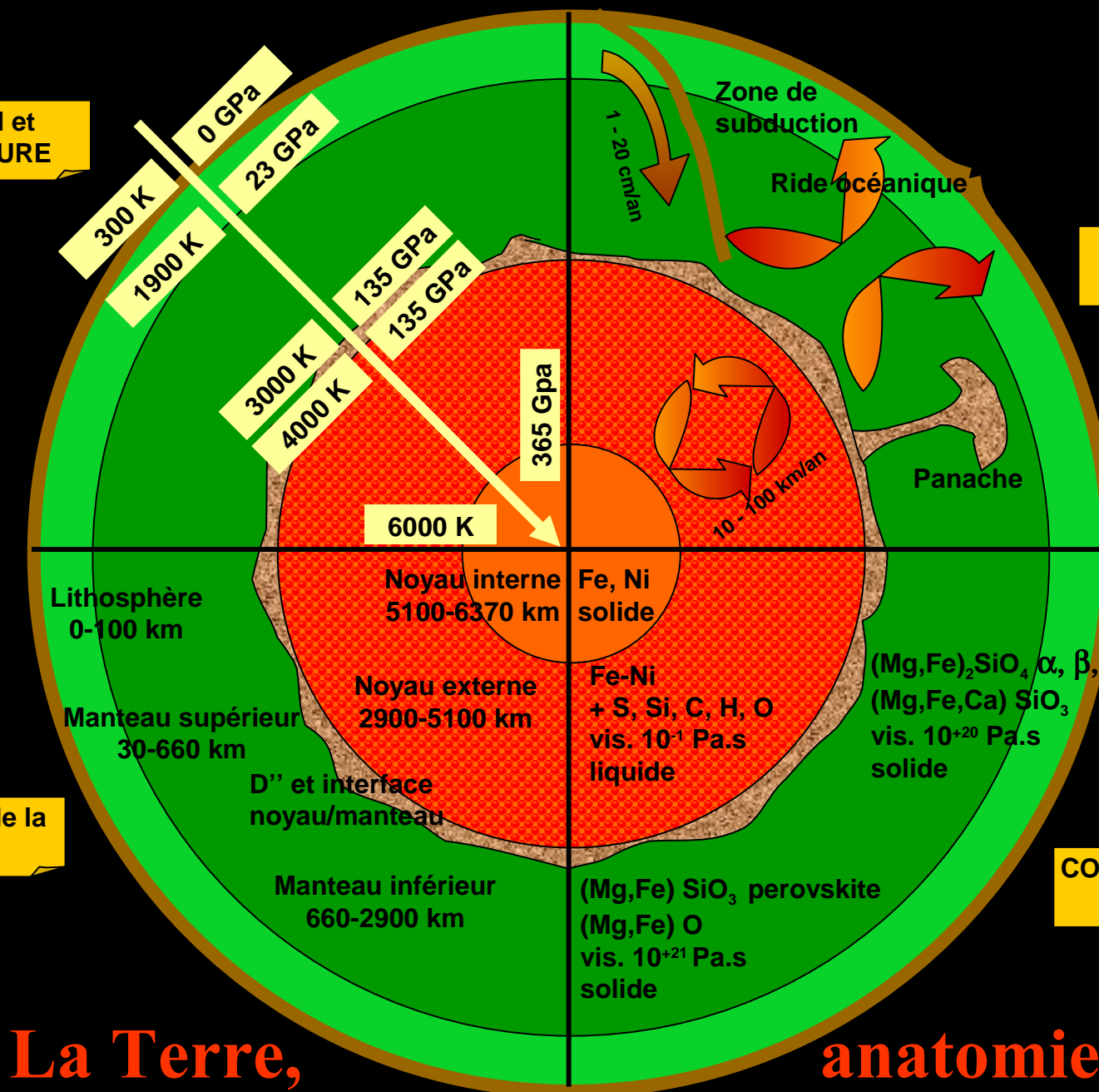
Les chondrites ont la même composition chimique que le Soleil (sauf pour les éléments volatils)

**PRESSION et
TEMPERATURE**

**DYNAMIQUE de la
TERRE**

**ENVELOPPES de la
TERRE**

**COMPOSITION de la
TERRE**



La Terre,

anatomie interne

Composition chimique des enveloppes de la Terre

		<i>Manteau</i>	<i>Noyau</i>	<i>Croûte océanique</i>	<i>Croûte continentale</i>
Volume		82,4	16,2	0,28	1,12
SiO ₂		45 ± 3		47	60
Fe			80 ± 7		
FeO+Fe ₂ O ₃		~ 8		11	3,8
MgO		~ 36		12	3
Al ₂ O ₃		~ 3,5		14	15
CaO		~ 3		9	5
Na ₂ O+K ₂ O		~ 0,33		2,6	6

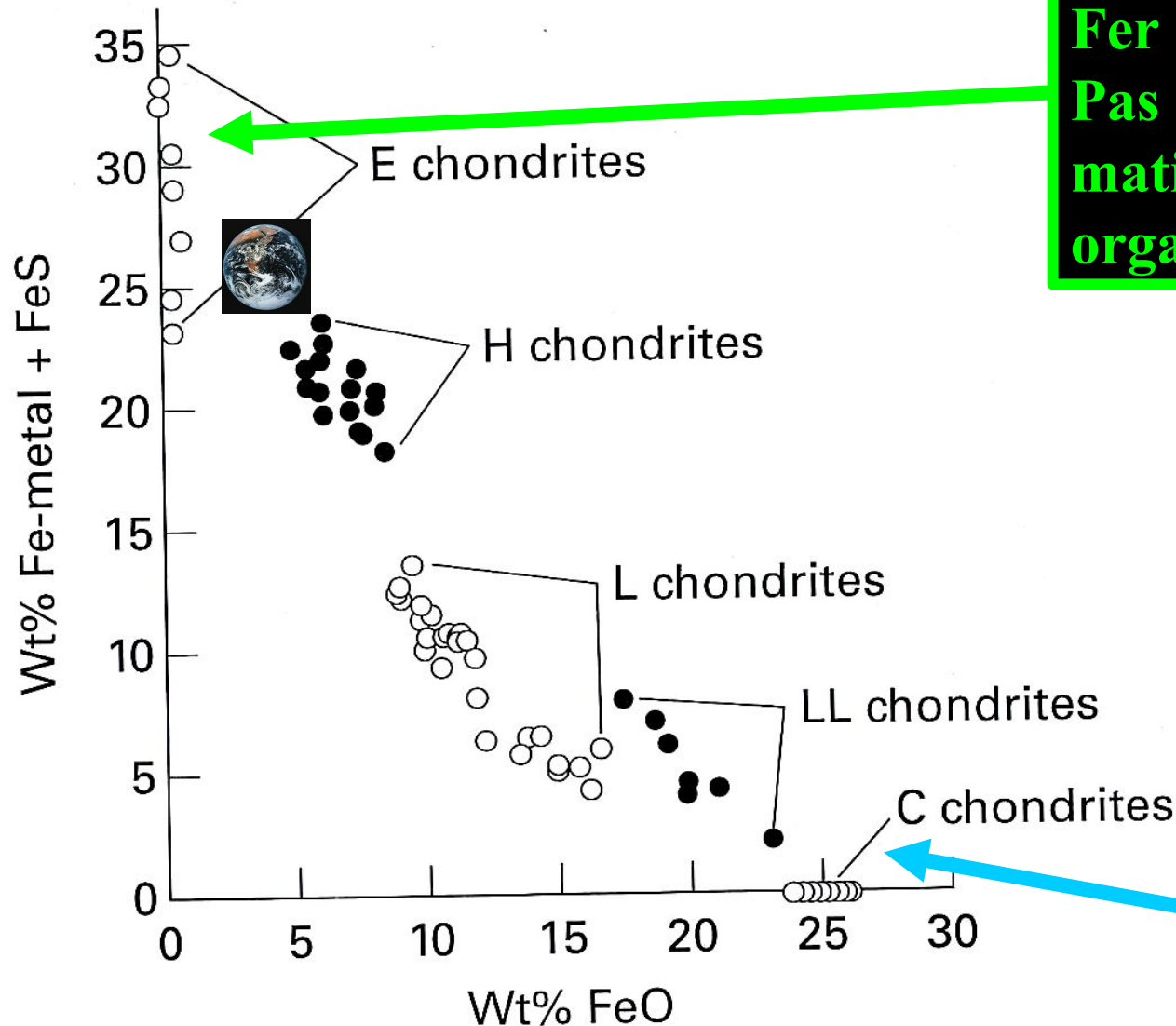
Quand on fait la somme (pondérée) de la composition chimique des enveloppes terrestres, on trouve la composition chimique de la Terre (avec incertitude).

	<div></div> ~ <i>Terre globale</i>	<i>Manteau</i>	<i>Noyau</i>	<i>Croûte océanique</i>	<i>Croûte continentale</i>
Volume	100	82,4	16,2	0,28	1,12
SiO₂	38 ± 3	45 ± 3		47	60
Fe	20 - 24		80 ± 7		
FeO+Fe₂O₃	1 – 5	~ 8		11	3,8
MgO	~ 21	~ 36		12	3
Al₂O₃	~ 1,8	~ 3,5		14	15
CaO	~ 1,5	~ 3		9	5
Na₂O+K₂O	~ 0,8	~ 0,33		2,6	6

Aux incertitudes près, c'est la même que celle des chondrites

	<i>Chondrite ~ Terre globale</i>	<i>Manteau</i>	<i>Noyau</i>	<i>Croûte océanique</i>	<i>Croûte continentale</i>
Volume	100	82,4	16,2	0,28	1,12
SiO₂	38 ± 3	45 ± 3		47	60
Fe	20 - 24		80 ± 7		
FeO+Fe₂O₃	1 – 5	~ 8		11	3,8
MgO	~ 21	~ 36		12	3
Al₂O₃	~ 1,8	~ 3,5		14	15
CaO	~ 1,5	~ 3		9	5
Na₂O+K₂O	~ 0,8	~ 0,33		2,6	6

Dans cette classification déjà vue, la Terre se place entre les chondrites E et H



**Fer métallique.
Pas d'H₂O ni de
matière
organique**

**Fer oxydé. <
10 % d'H₂O et
< 4 % de
matière
organique**

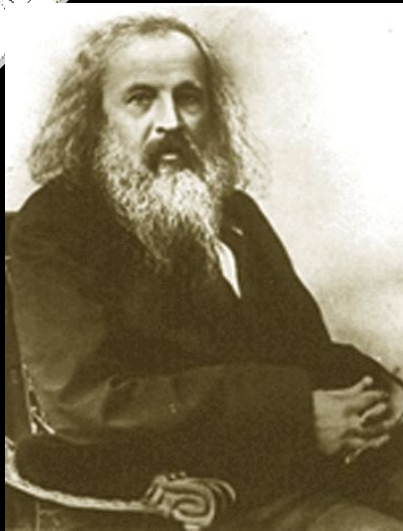
Quelle est l'origine des chondrites ?

Avant de parler de l'origine des chondrites, voici une galaxie, rassemblement de 100 000 000 000 d'étoiles. De quoi est fait une galaxie ?



Dans notre galaxie, la Voie Lactée, le Système solaire est à peu près là !

Dans une galaxie, quelle est la proportion des différents éléments ? Sur 1 000 000 000 d'atomes, il y a (environ) :



Hydrogène : 910 580 000

Hélium : 88 000 000

Oxygène : 800 000

Carbone : 300 000

Azote : 100 000

néon : 100 000

Silicium : 30 000

Magnésium : 30 000

fer : 30 000

soufre : 12 000

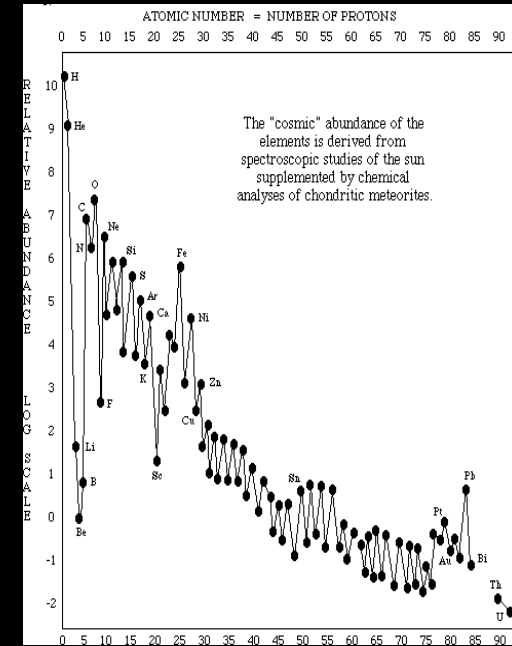
Aluminium : 3 000

calcium : 3 000

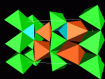
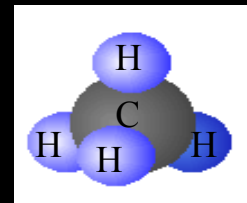
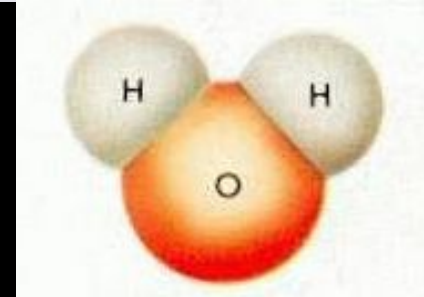
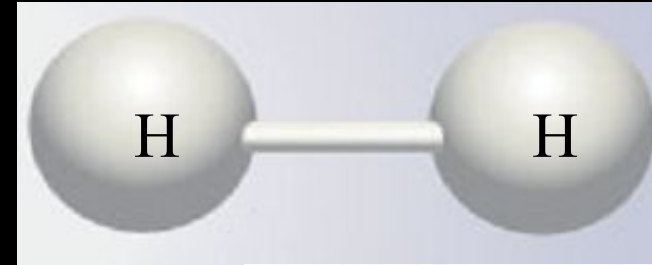
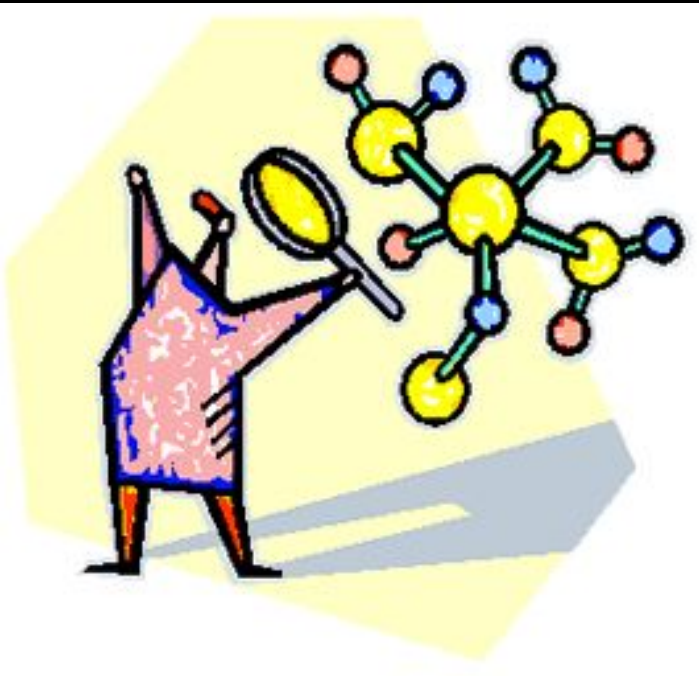
Nickel : 3 000

Sodium : 3 000

Tous les autres : 6 000



Avec tous ces atomes, que peut-on faire comme molécules ? Vu que l'Hydrogène et l'Oxygène sont les 2 éléments les plus abondants (hors gaz rares), rien d'étonnant que l'on puisse faire beaucoup d'H₂O



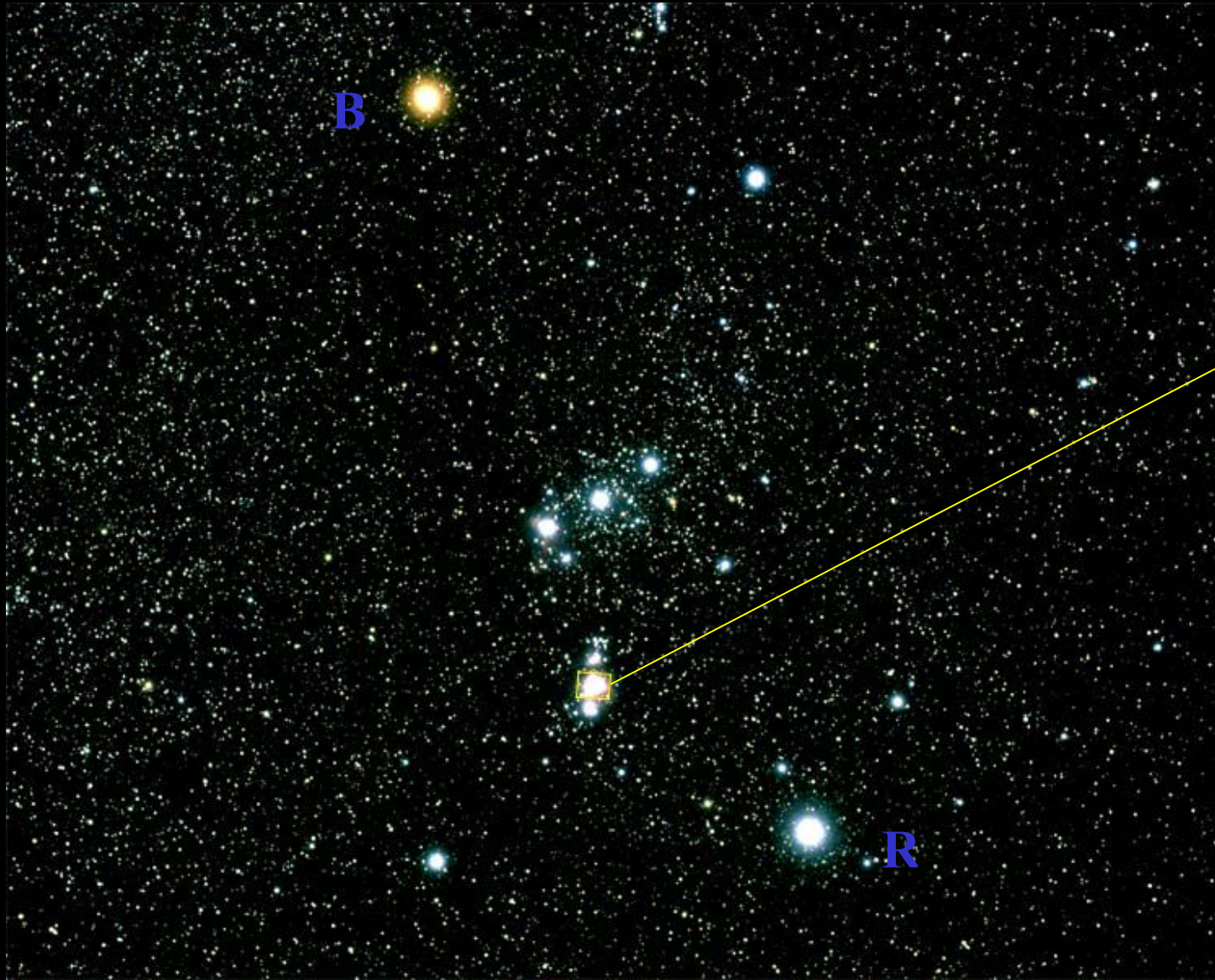
H₂O (l'eau) est la 2eme molécule la plus abondante de l'univers, plus abondante que, dans l'ordre, CH₄ et autres hydrocarbures, CO, NH₃, silicates

On retrouve ces molécules, dont H₂O et silicates, avec des spectres Infra-rouge ou « centimétriques » dans les nébuleuses, nuages de gaz et de poussières internes à notre galaxie

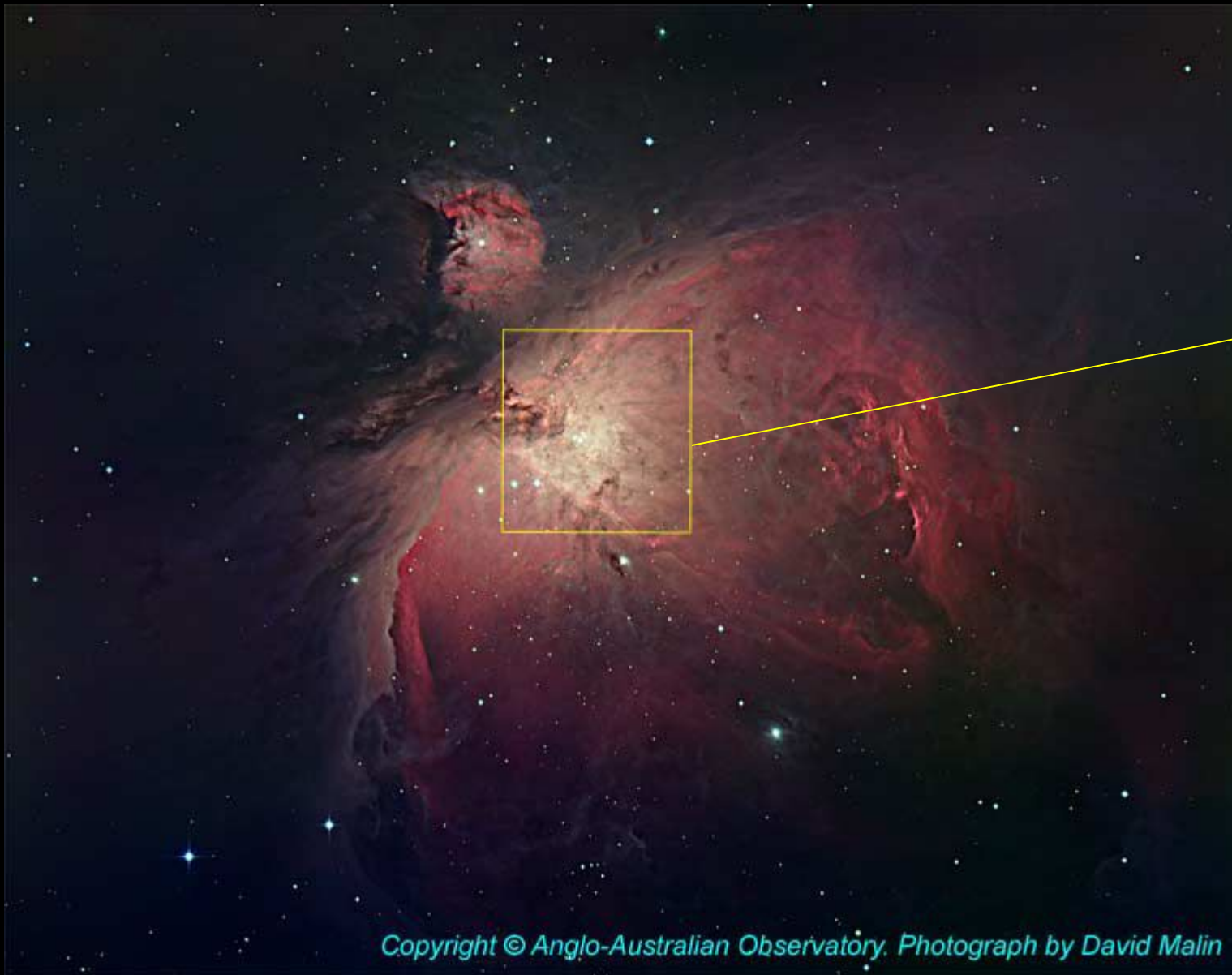


Comment se forment les systèmes stellaires ?

Regardons s'en former dans Orion

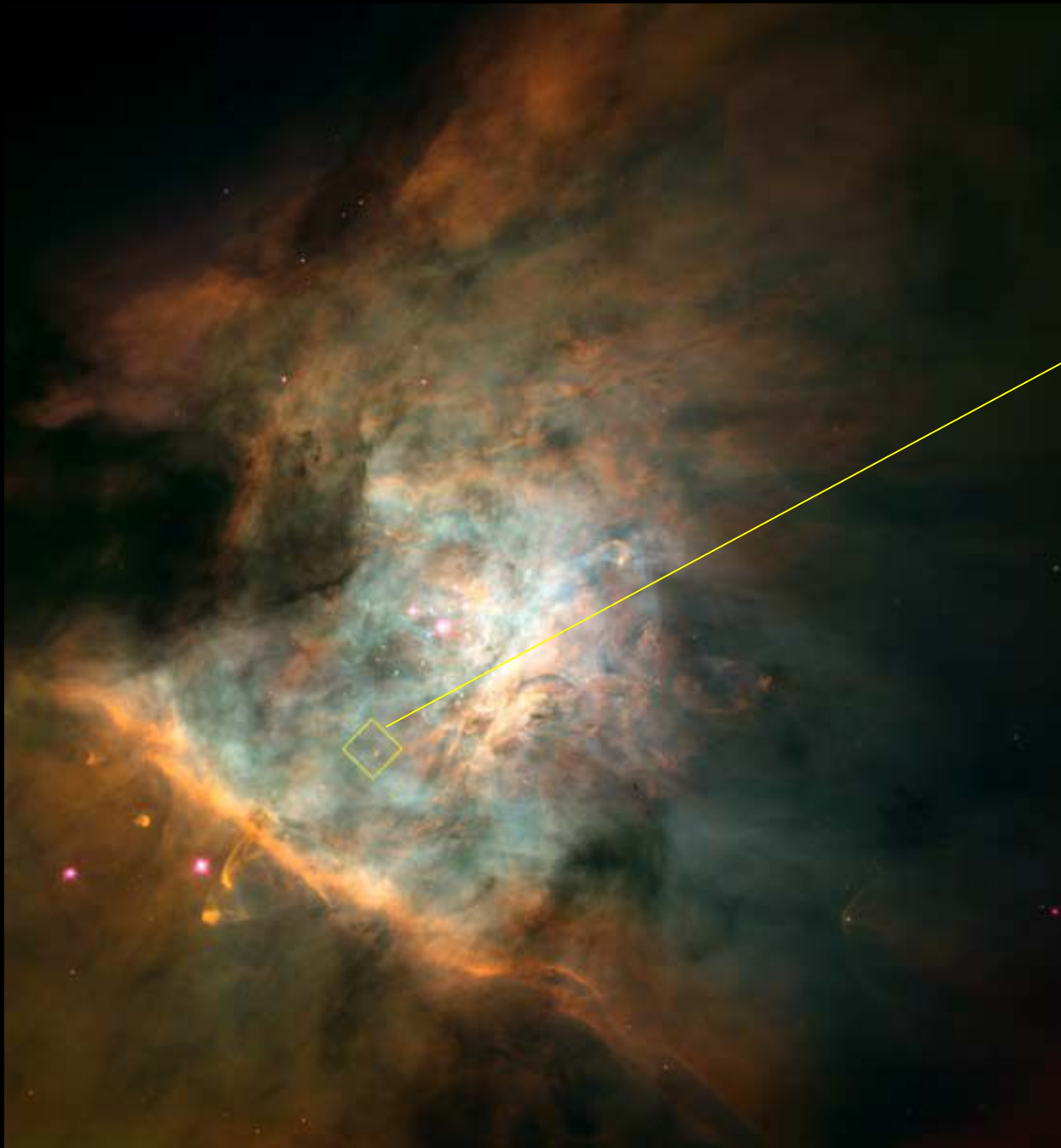


Zoomons sur
le rectangle
jaune

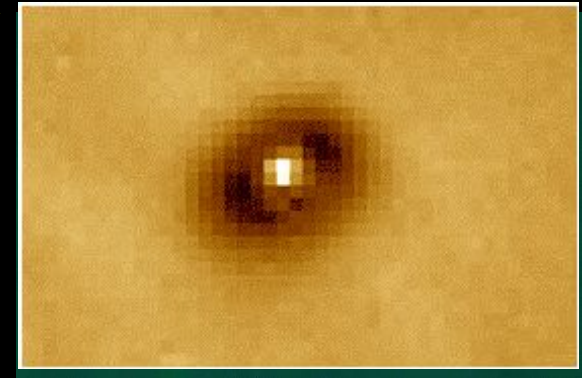
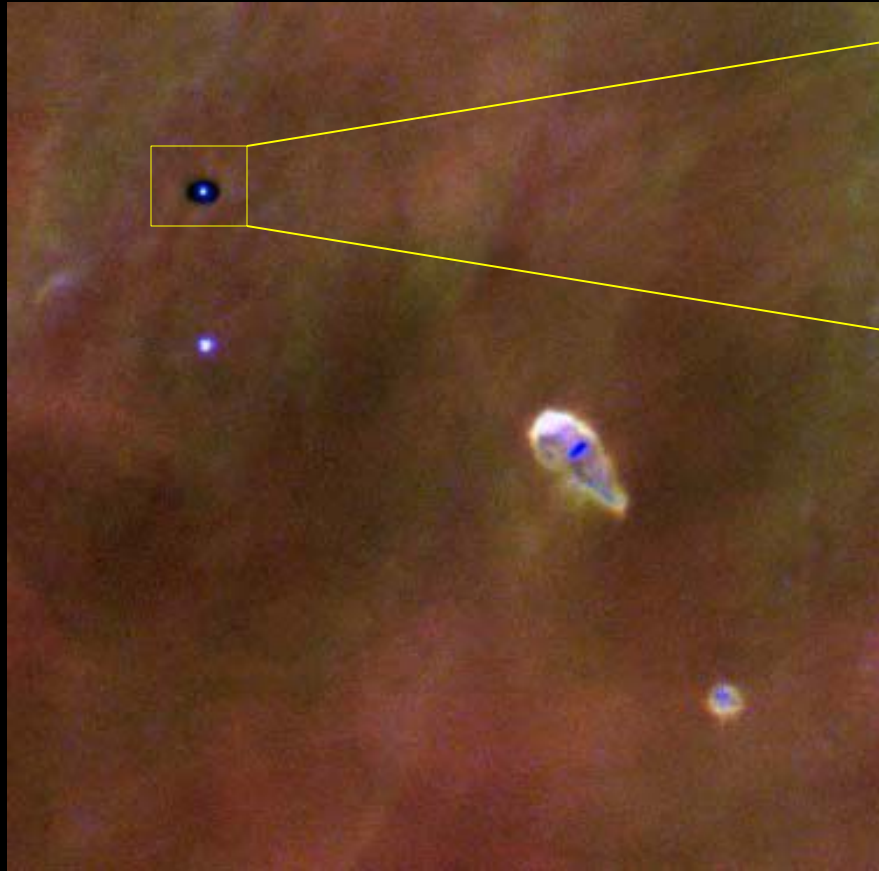


Zoomons
encore

Copyright © Anglo-Australian Observatory. Photograph by David Malin



Encore !



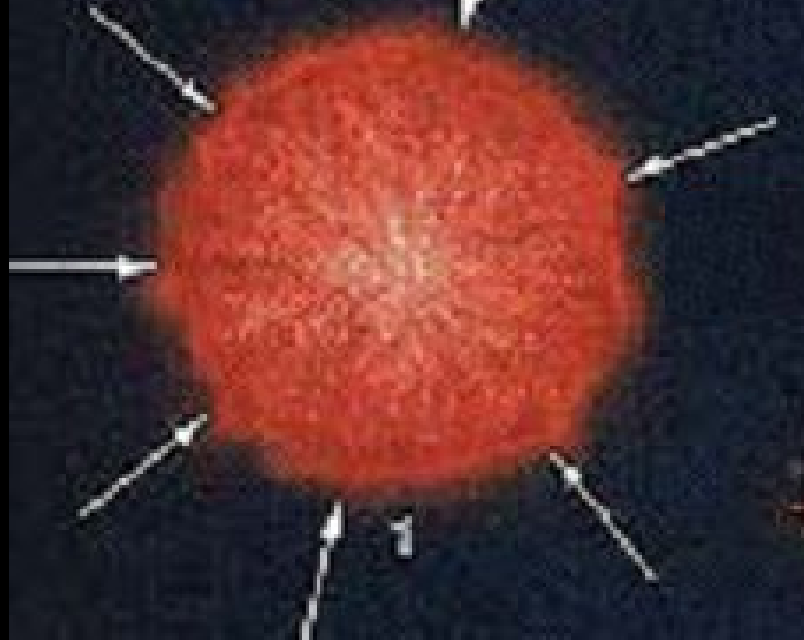
Disque vu
quasiment de face



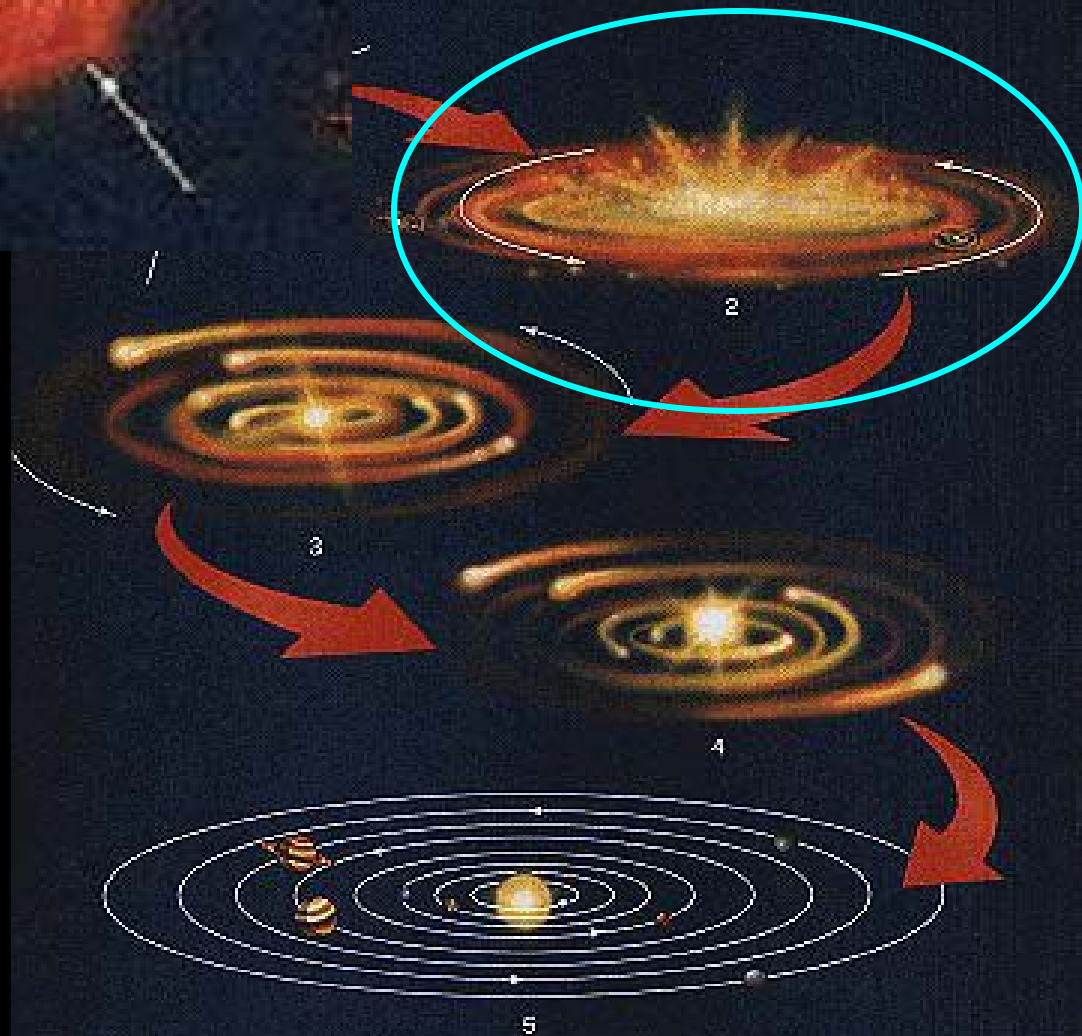
Disque quasiment vu
de profil

**Des proto-étoiles entourées d'un
disque de poussières. En 2006, on
ne peut pas voir mieux, mais on
peut simuler ce qui se passe dans
ces disques**

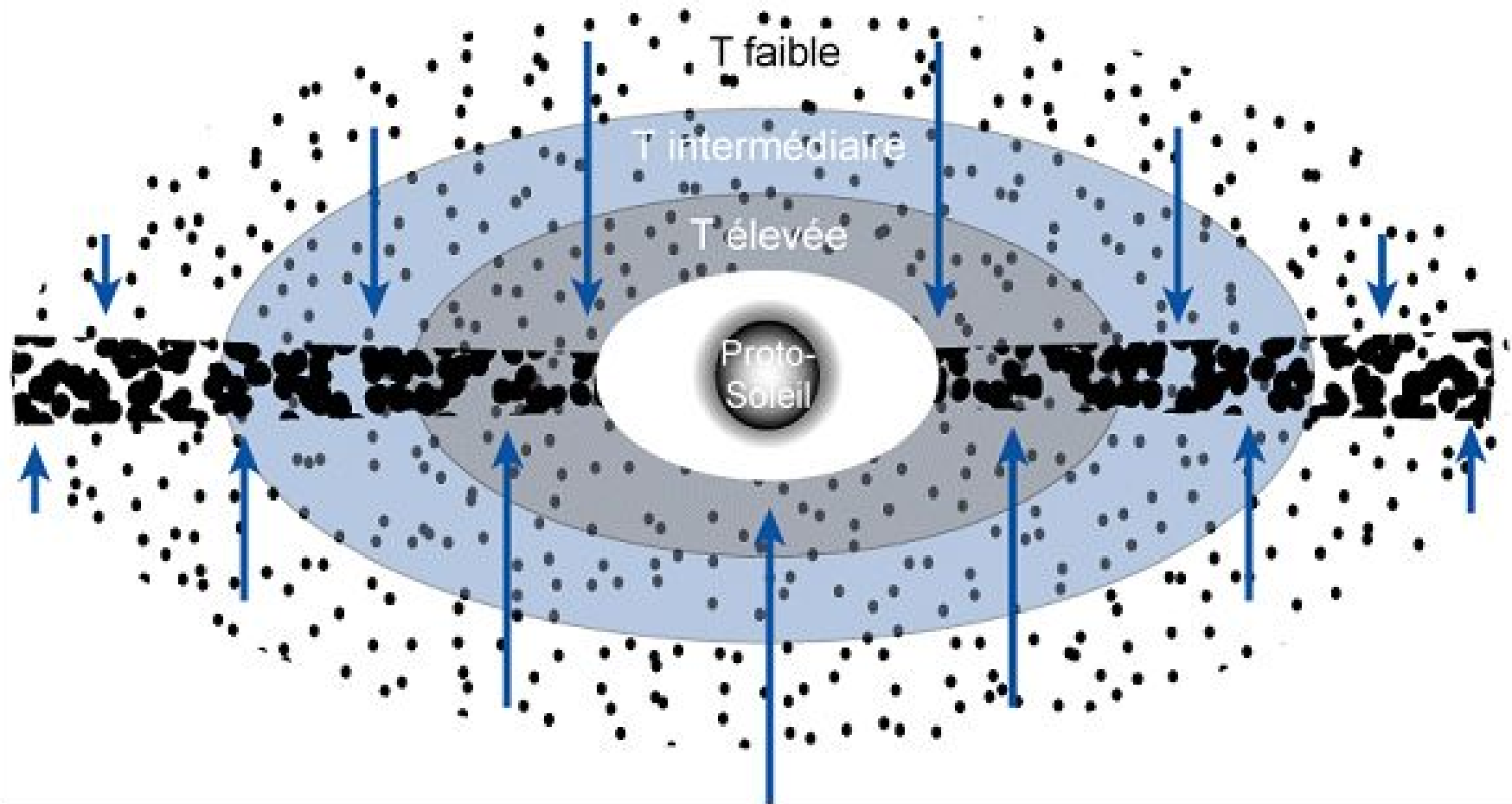
Effondrement d'un nuage en un disque de gaz et poussières autour d'une proto-étoile, puis formation d'un système stellaire. Modélisons le stade 2



Chaisson/
McMillan

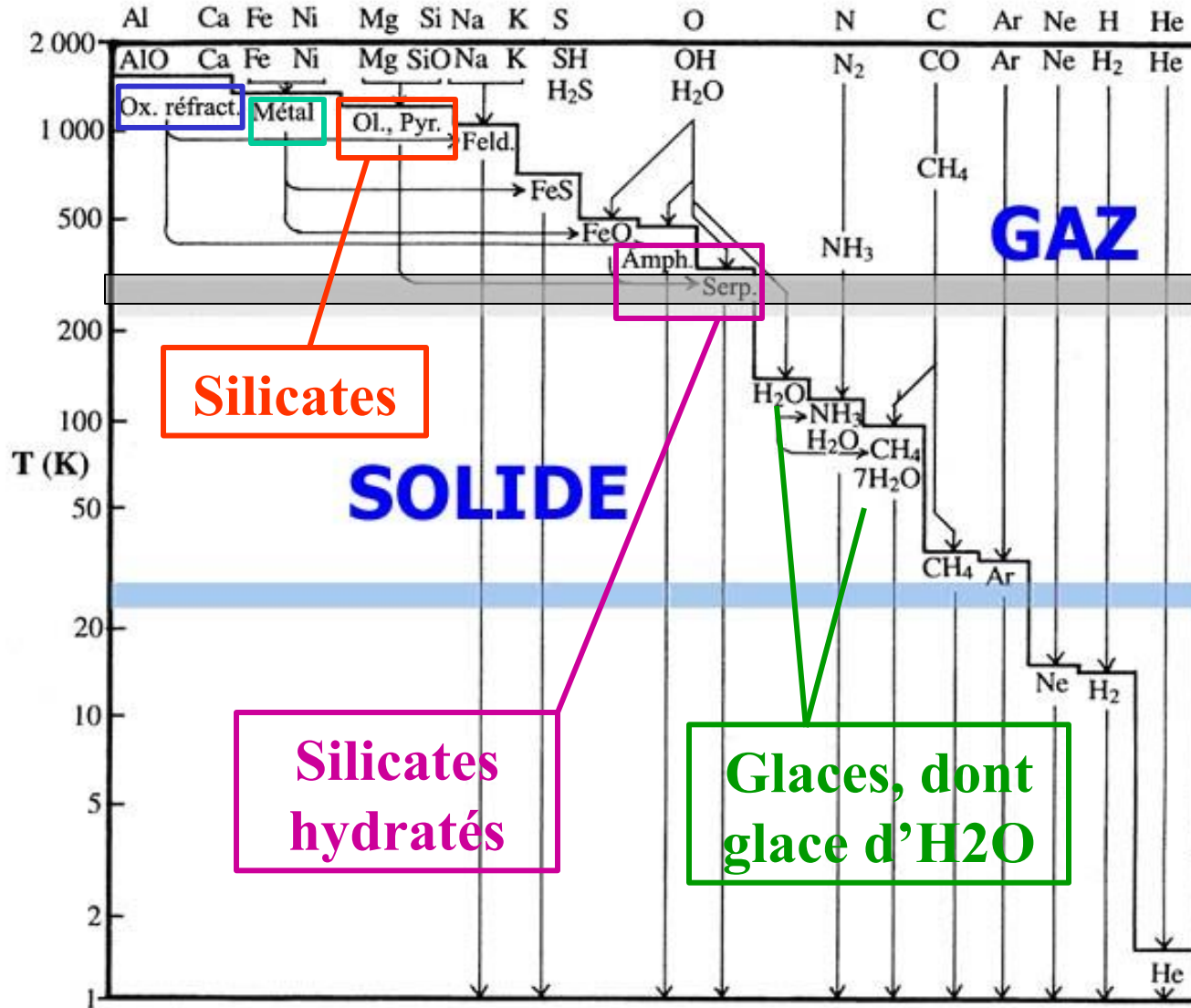
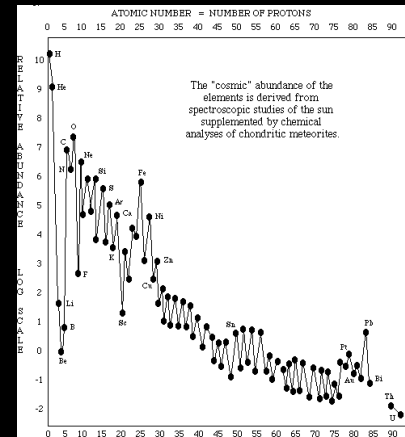


Températures de condensation



Mais en quoi sont les poussières ?

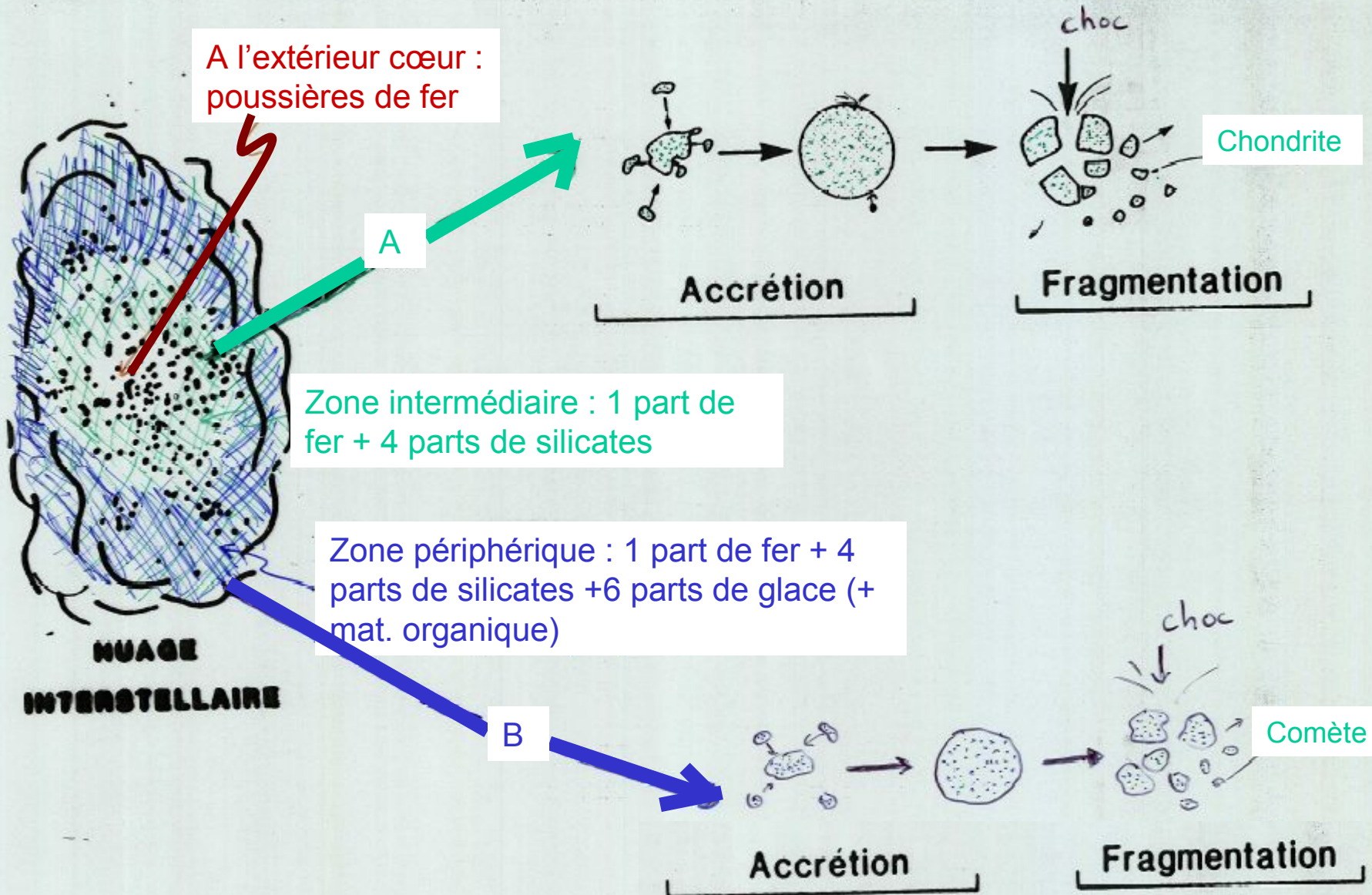
Que se passe t'il si on amène (à très faible pression) un gaz qui à la composition chimique de l'Univers (les 16 éléments les plus fréquents, dans les bonnes proportions) ?



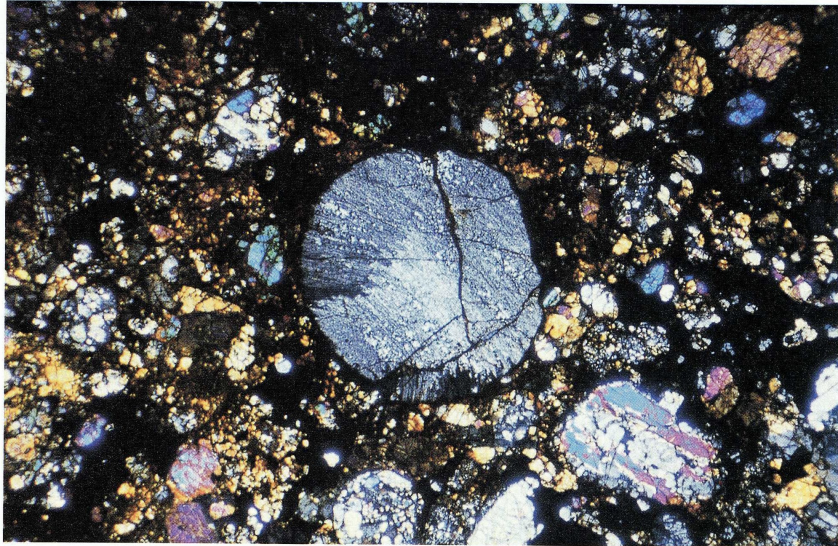
1 part de fer + 3
parts de silicates
légèrement
hydratés

1 part de fer + 3
parts de silicates
+ 6 parts de
glaces

L'origine des chondrites (et des comètes)



(L'origine des chondres)



On pense actuellement que les chondres sont des petites boules de poussière (précurseurs) qui ont été refondues par un événement haute température (plus qu'une condensation directe de la nébuleuse). De nombreuses hypothèses expliquent le très bref coup de chaud dans le nuage :

- (1) Shock-wave heating: réchauffement dû à la friction sous le passage d'une onde de choc
- (2) Radiative heating: réchauffement par absorption du rayonnement électromagnétique solaire
- (3) Lightning: réchauffement par décharge de courants électriques (éclairs)

Ancienne classification

**Météorite
pierreuse**
= **aérolite**
91 %

Météorite de fer
= **sidérite**
8 %

Sidérolite 1 %
= fer+ silicate

Classification actuelle simplifiée

Chondrite

83 %

Olivine + pyroxène
+ 0 à 30 % de fer
dispersés dans la masse
+ H₂O + matière carbonée

Basalte et gabbro
pyroxénite et péridotite
8%

Météorite de fer
= **sidérite**
8 %

Pallasite et autres 1 %
= fer+ silicate

Et
maintenant,
les météorites
non
chondritiques

La classification des météorites non chondritiques est très complexes

CHONDRITES

Carbonées	CI	<i>Orgeuil</i>
	CM	<i>Murchison</i>
	CO	<i>Ornans</i>
	CV	<i>Allende</i>
	CK	<i>Karounda</i>
	CR	<i>Renazzo</i>
	CH	<i>ALH85085</i>

R	<i>Rumuruti</i>
---	-----------------

Ordinaires	LL	<i>Saint-Mesmin</i>
	L	<i>L'Aigle</i>
	H	<i>Flandreau</i>

AL	<i>Acapulco</i>
----	-----------------

Brachinites	<i>Brachina</i>
-------------	-----------------

Enstatite	EL	<i>Eagle</i>
	EH	<i>Saint-Sauveur</i>

METEORITES DIFFERENCIEES

Fers	<i>Staunton</i>	METEORITES de Fer
Fers à inclusions silicatées		
Pallasites	<i>Springwater</i>	

Mésosidérites	<i>Chinguetti</i>
Eucrites	<i>Bouvante</i>
Diogénites	<i>Tatahouine</i>
Howardites	<i>Le Teilleul</i>
Angrites	<i>Angros dos Reis</i>
Ureilites	<i>Novo Urei</i>
SNC	<i>Mars ?????</i>

Basaltes et brèches lunaires

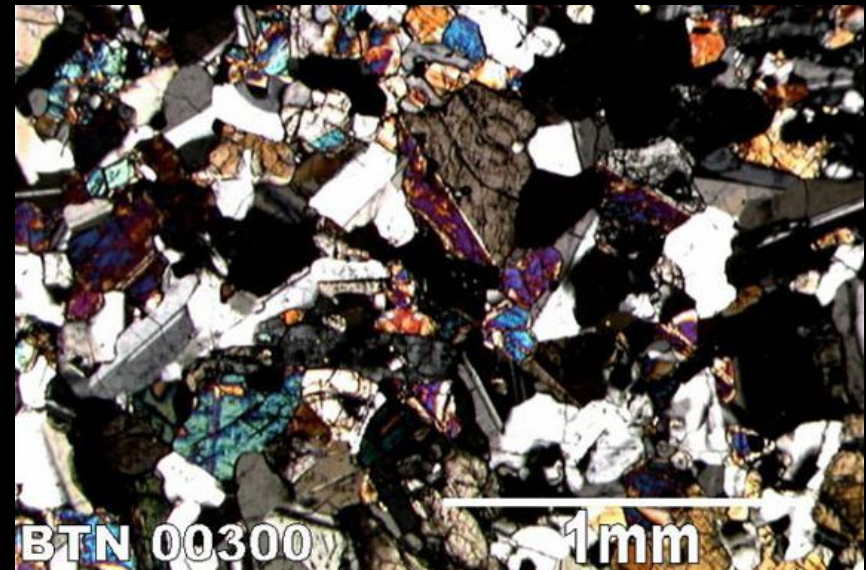
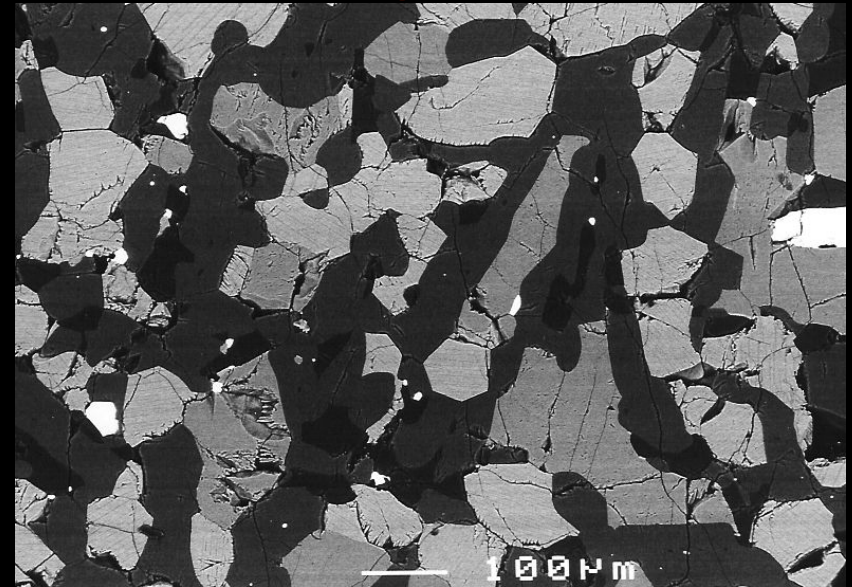
Achondrites

Aubrites *Pena Blanca Springs*

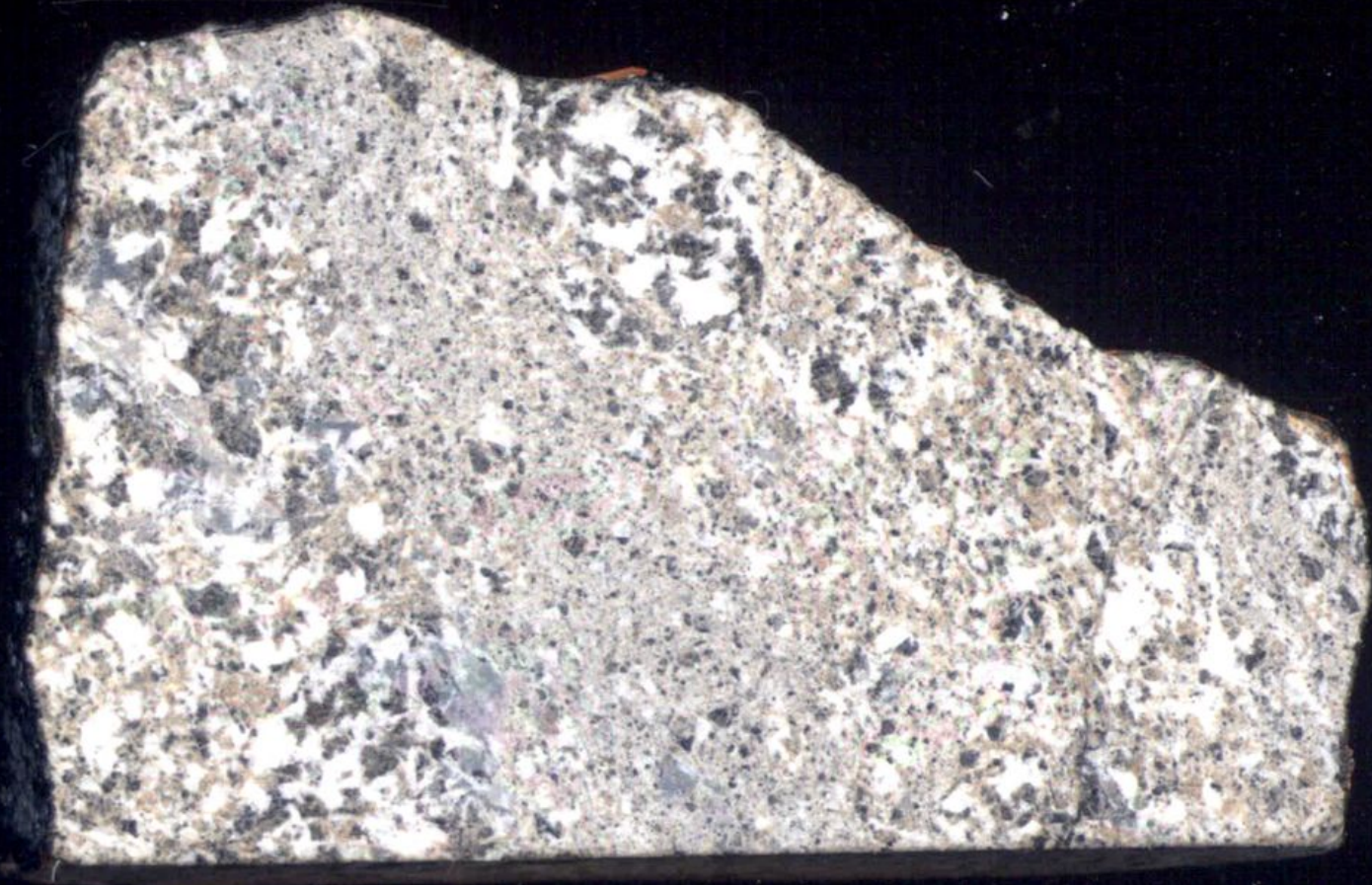
Les eucrites: des basaltes ou des gabbros



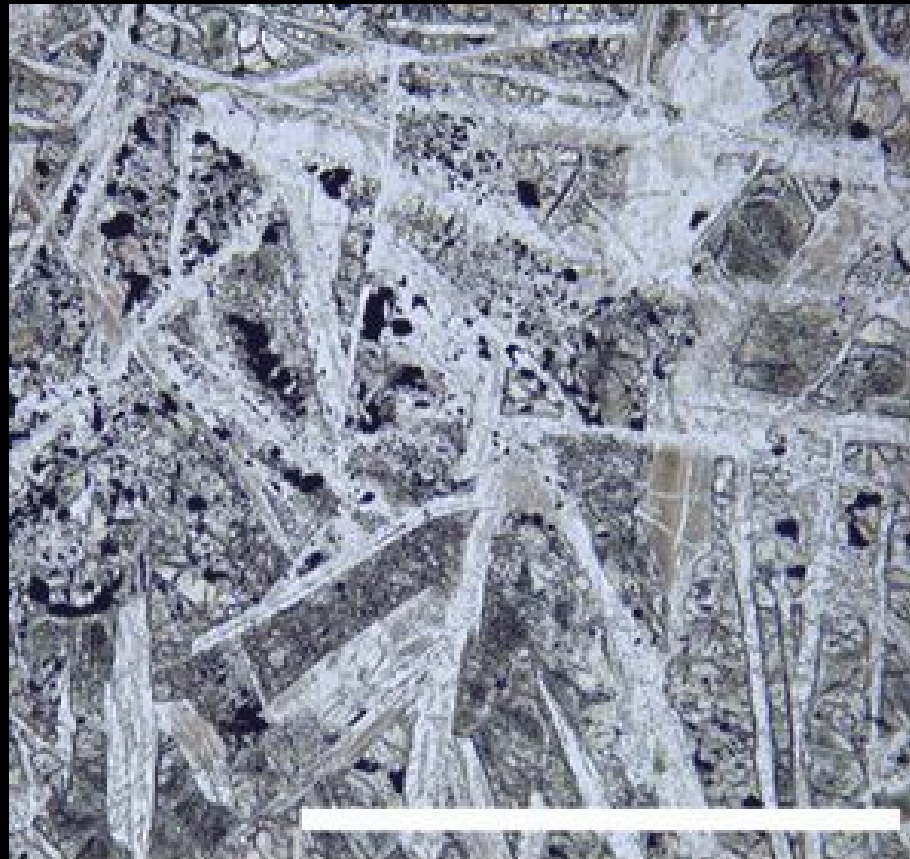
Agoult



Une autre eucrite : Millbillillie

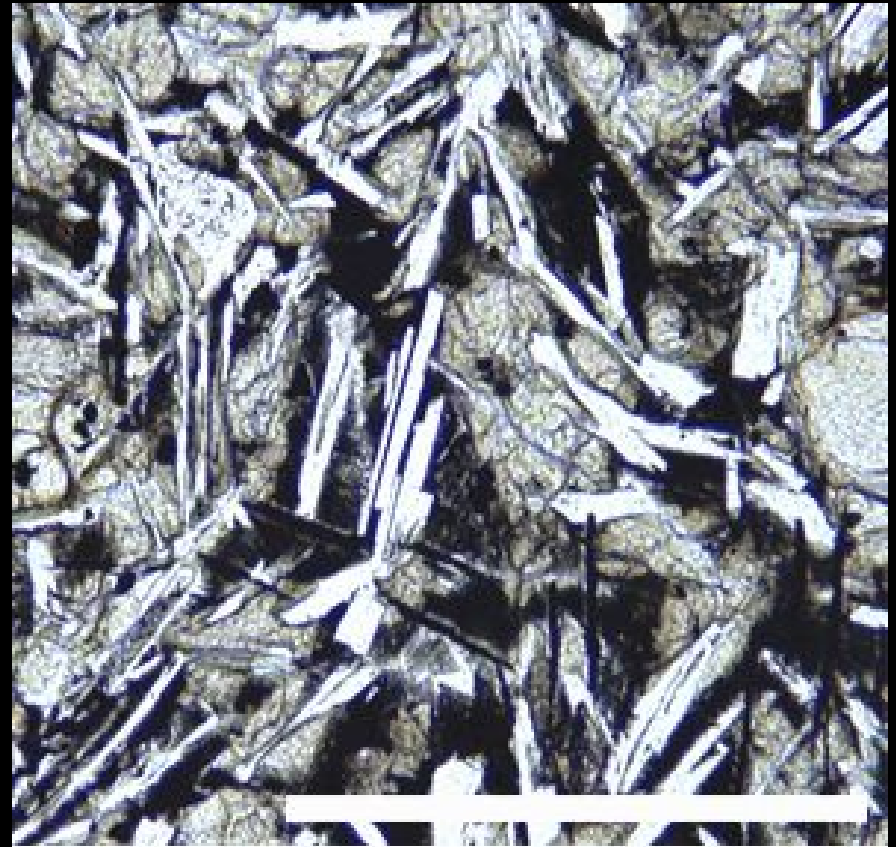


Millbillillie (eucrite)



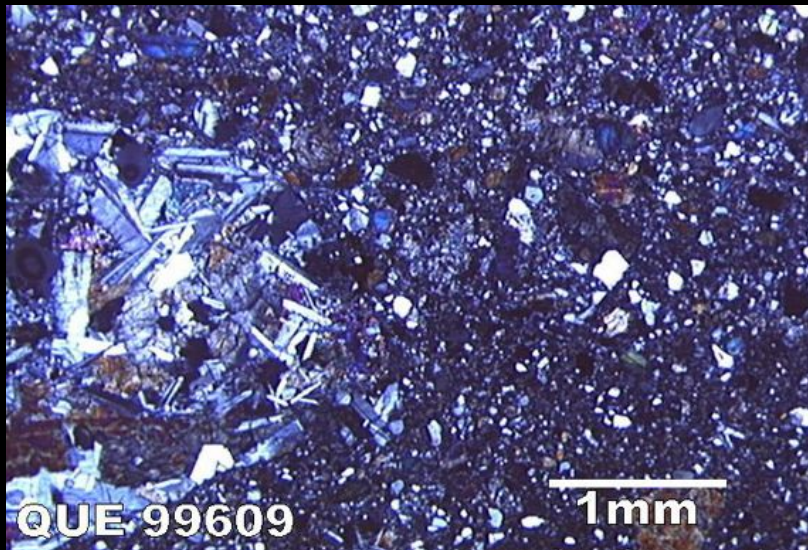
(G. Jeffrey Taylor)

Basalte, Hawaii



(G. Jeffrey Taylor)

Brèches eucritiques & howardites



Une diogénite, la diogénite de Tataouine





Un morceau
de manteau
terrestre



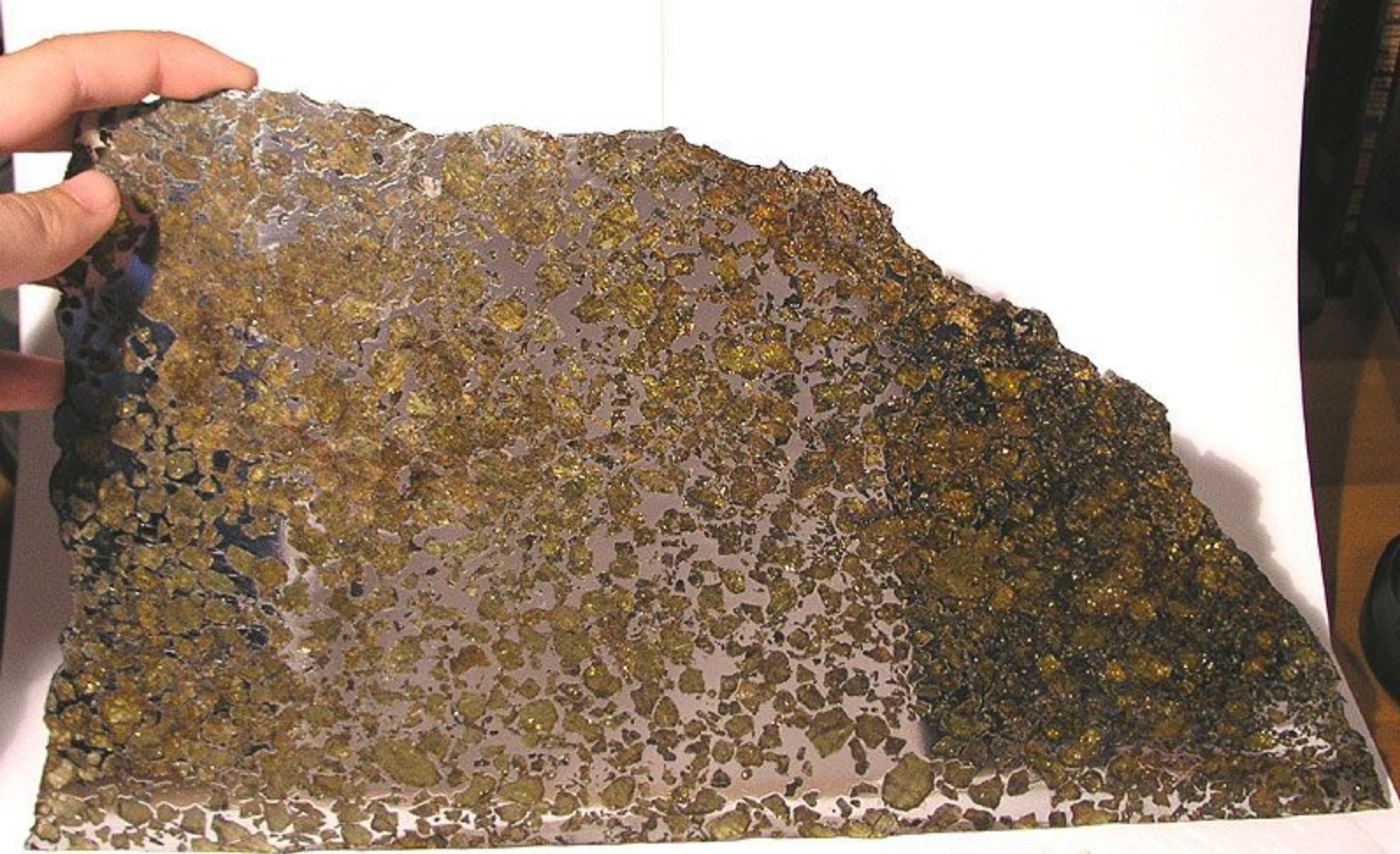
Les diogénites
ressemblent
beaucoup au
manteau de la
Terre

Les sidérites, les météorites de fer



Détail sur les cristaux d'alliage fer/Nickel





**Les pallasites, mes météorites
préférées : des olivines bien
cristallisées qui « flottent »
dans du fer**

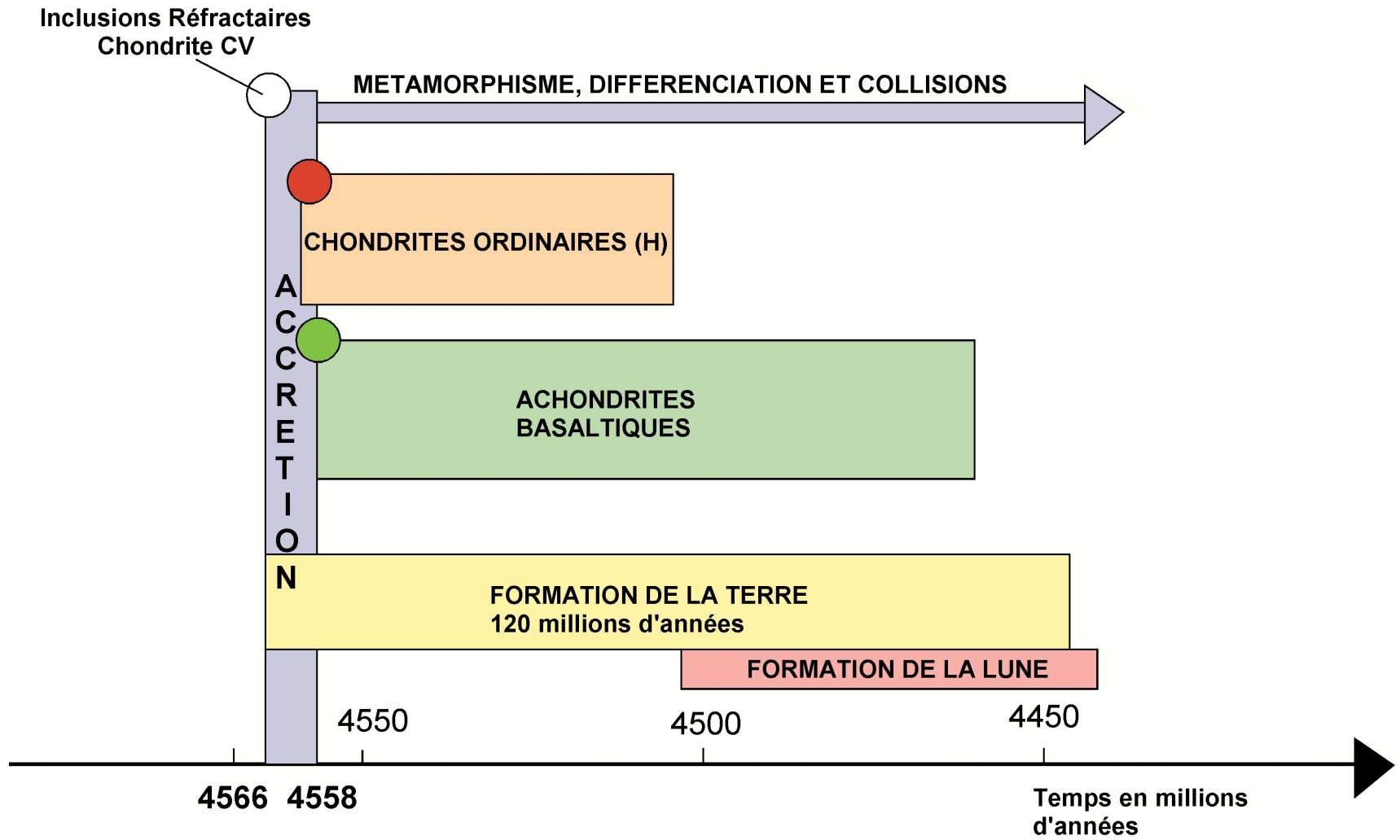


Gros plan sur une pallasite



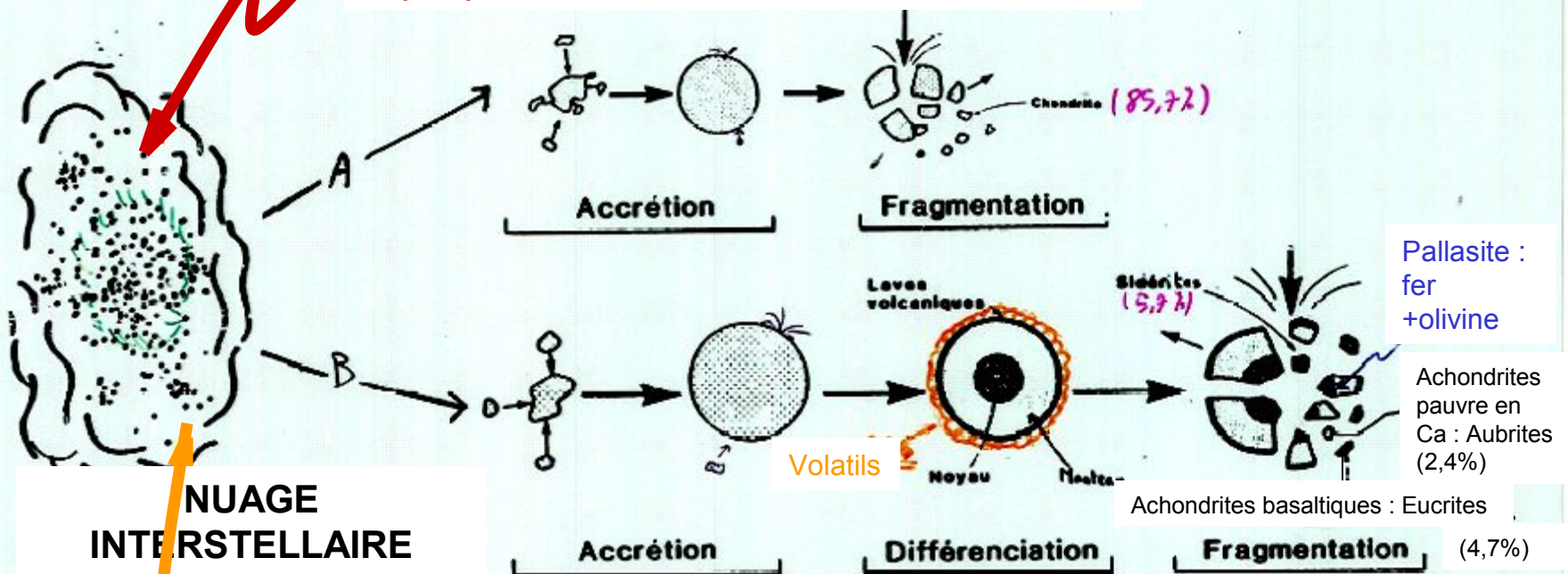
Les météorites ont l'âge de la Terre. Les non chondrites sont un peu plus jeunes que les chondrites

AGES DES METEORITES



L'origine des chondrites et des non chondrites

Poussières : silicates ferreux plus ou moins hydratés, carbonatés et carbonés près du centre, avec de plus en plus de glaces vers la périphérie.

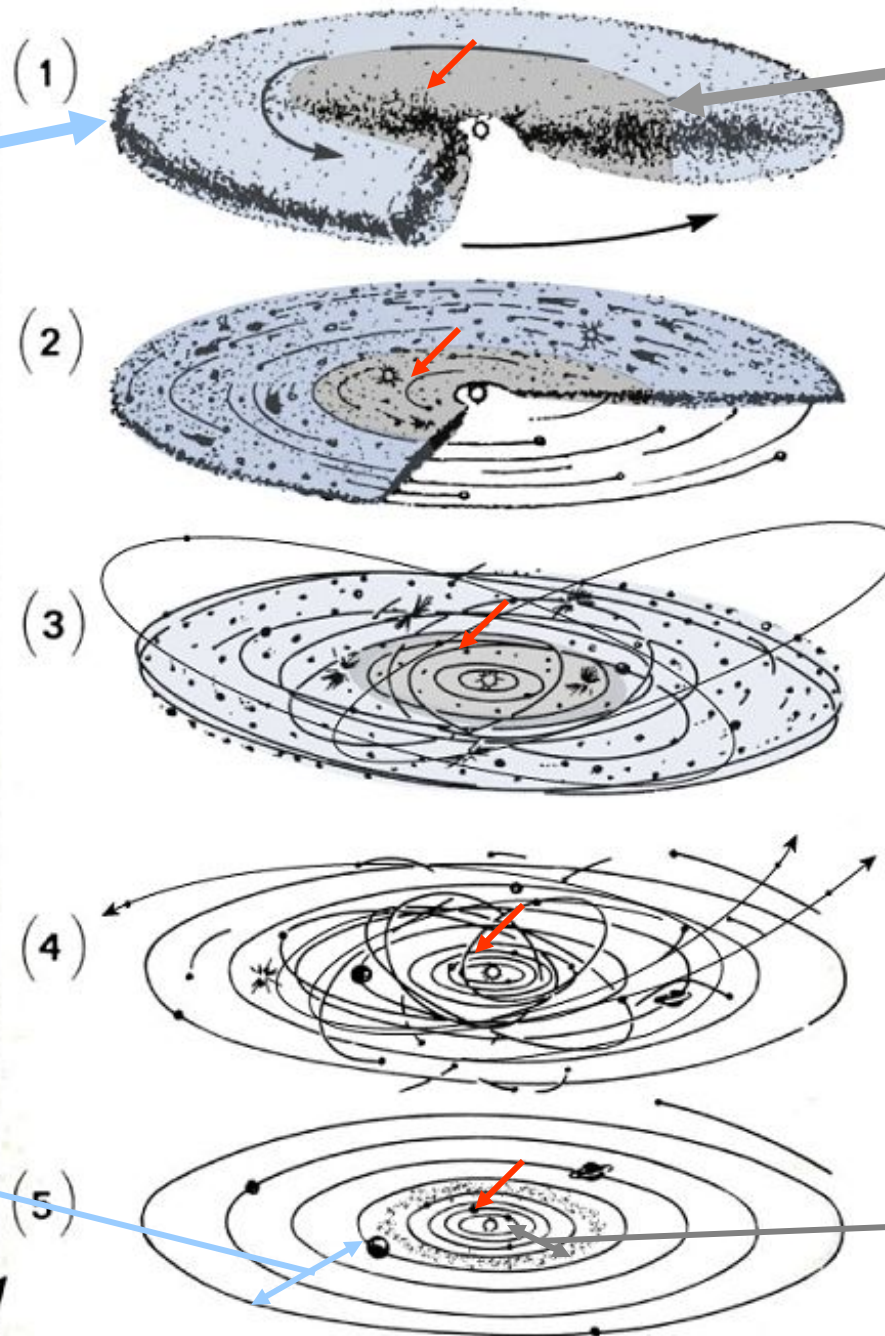


Contemporains à 100 millions d'années près

Gaz : H, He + traces H₂O, CH₃, NH₃, N₂, CO

**Poussières
ferro-silicato-
glacées**

**Poussières ferro-
silicatées**



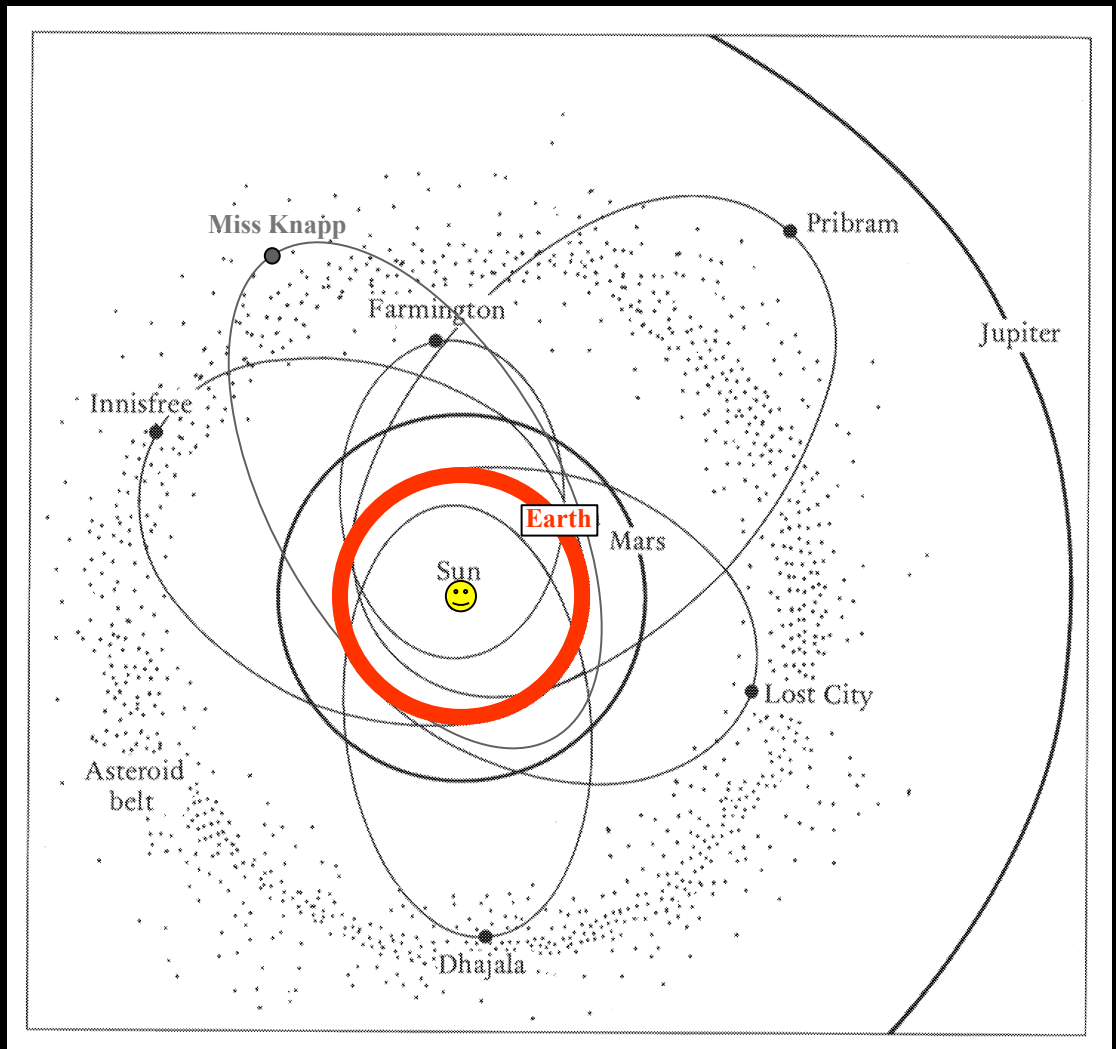
**Planètes et
satellites
« de glaces »
et planètes
géantes**

**Planètes et
satellites
« rocheux » +
astéroïdes**

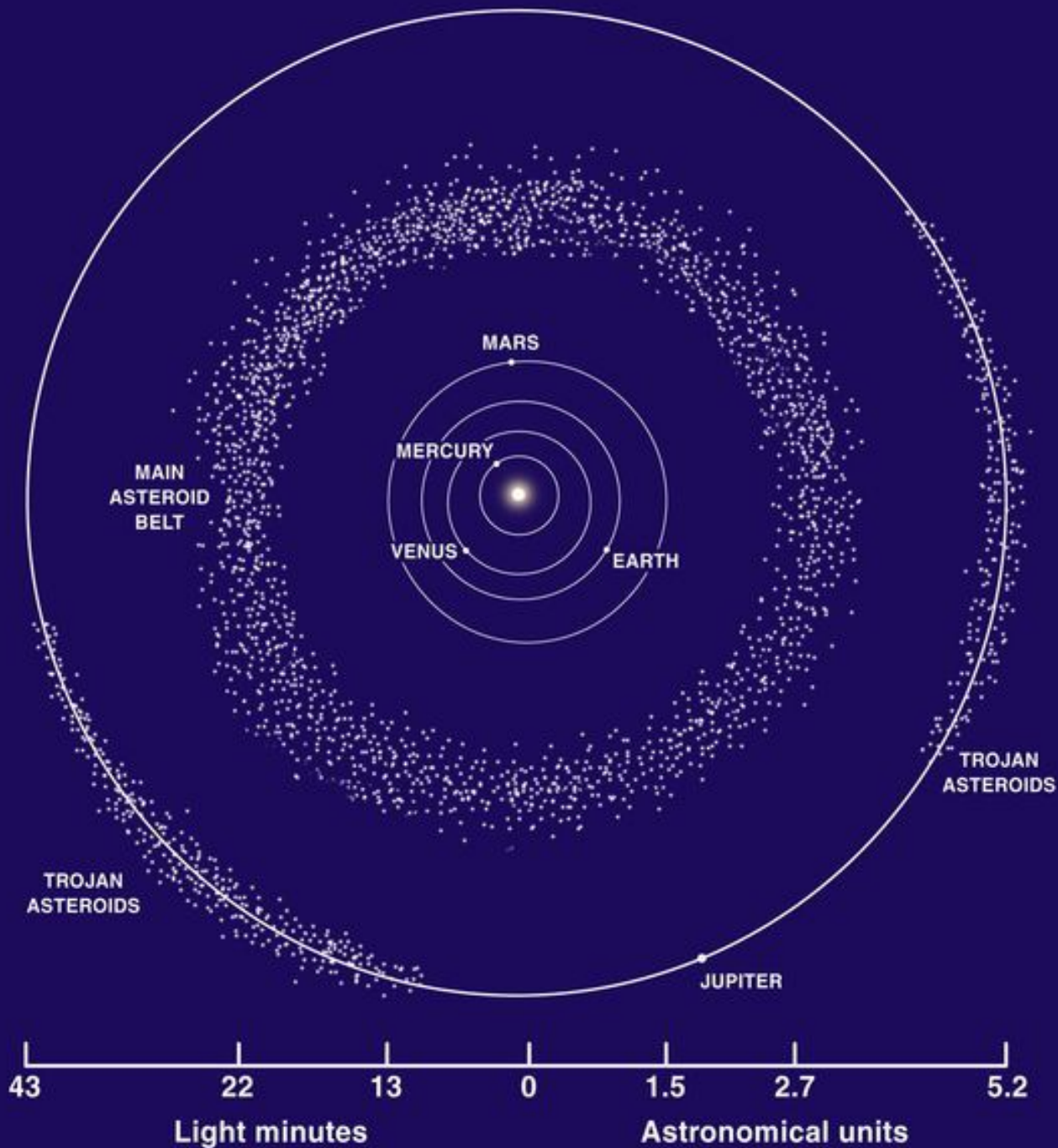
Ce qu'on voit sur Terre



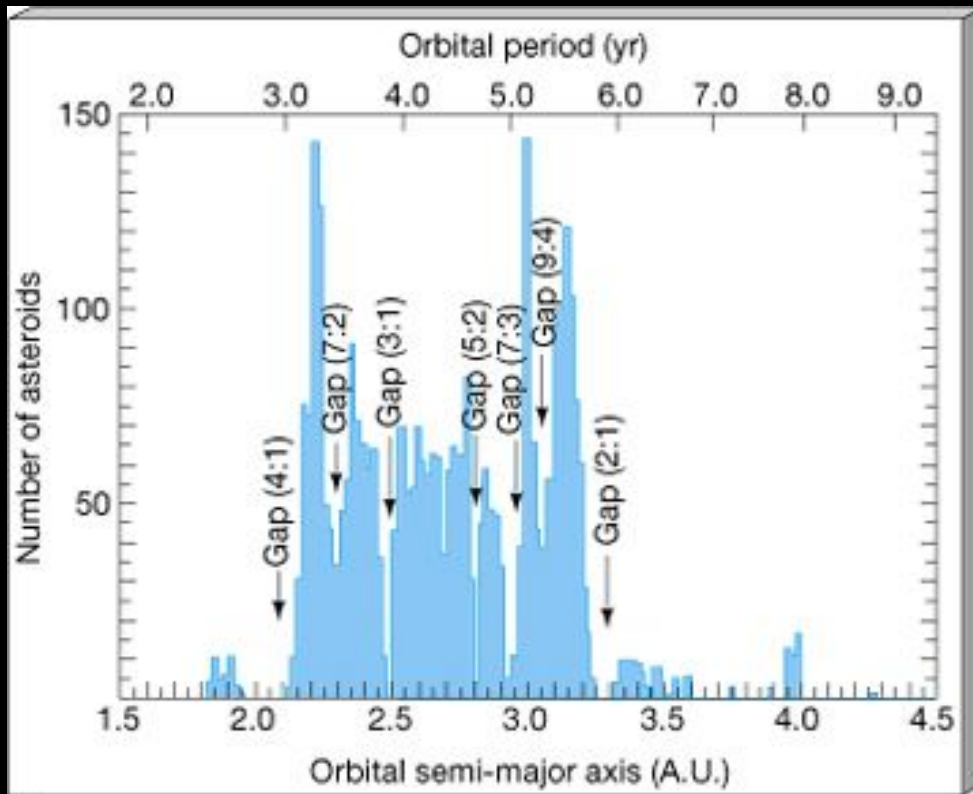
Ce qu'on voit sur Terre



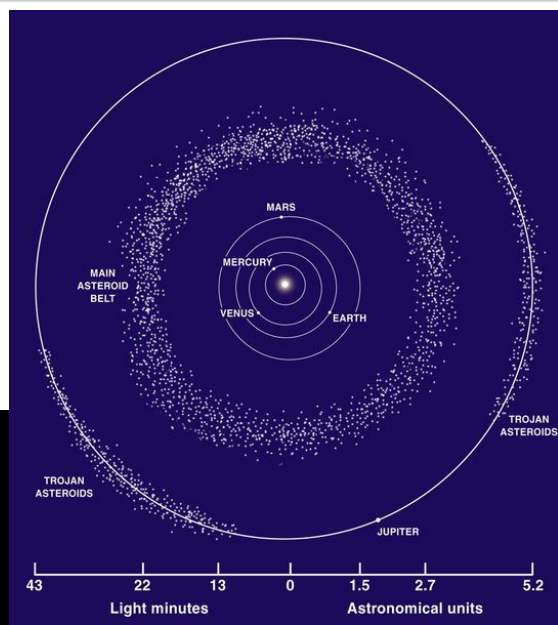
Les météorites sont des micro-astéroïdes géocroiseurs, qui viennent donc de la ceinture située entre Mars et Jupiter



L'origine des astéroïdes : la gravité du gros Jupiter a empêché l'accrétion complète. Sa gravité (et celle de Mars) les « confine » en trois sites



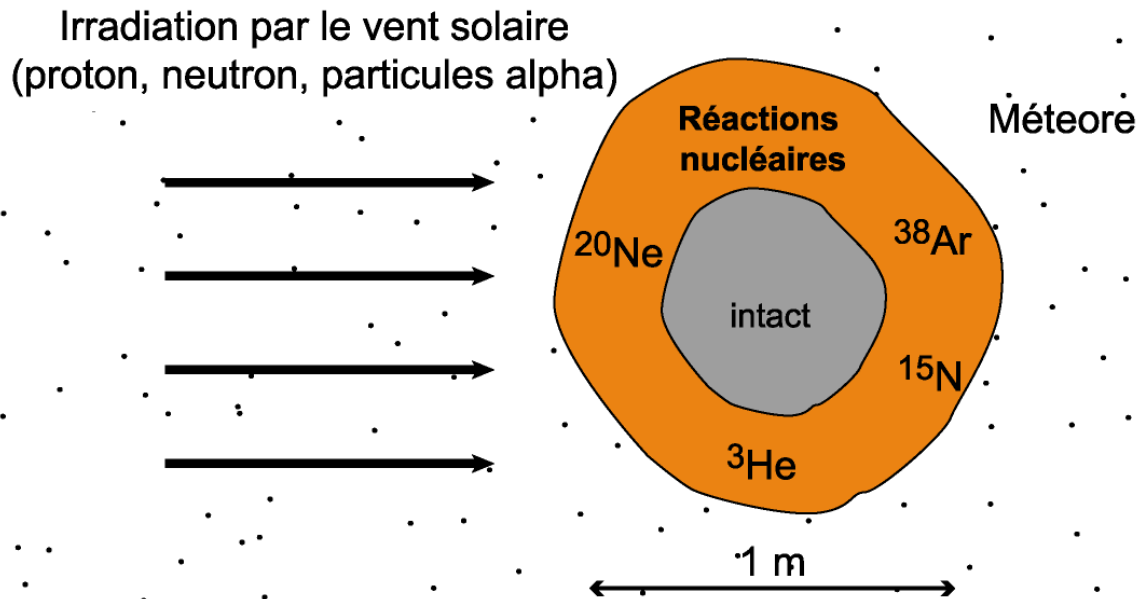
(a)



(b)

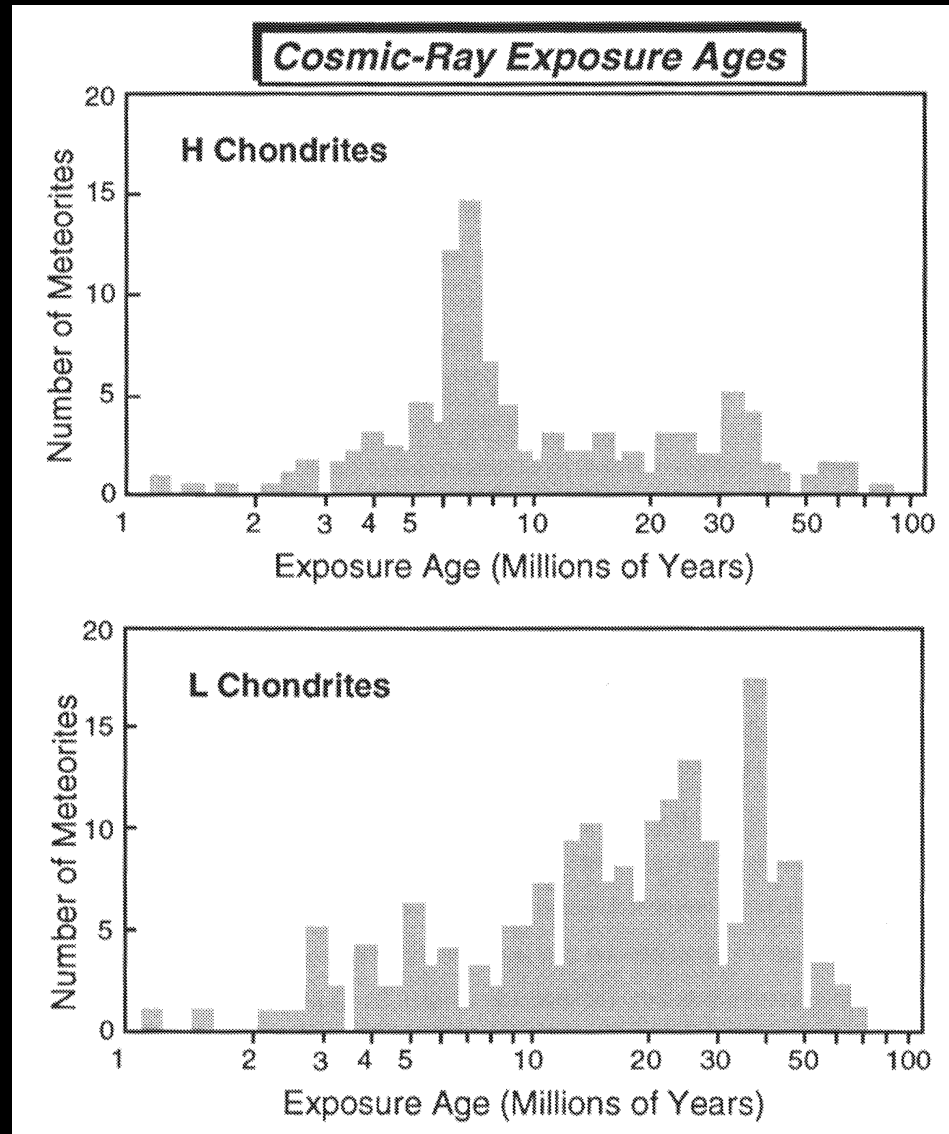
**L'origine des
géocroiseurs :
collision,
déplacement
vers les
zones de
résonances
(lacunes de
Kirkwood),
puis
expulsion**

Quand ont eu lieu ces collisions qui ont placé des « morceaux » dans les lacunes de Kirkwood ? Réponse : les ages d'exposition



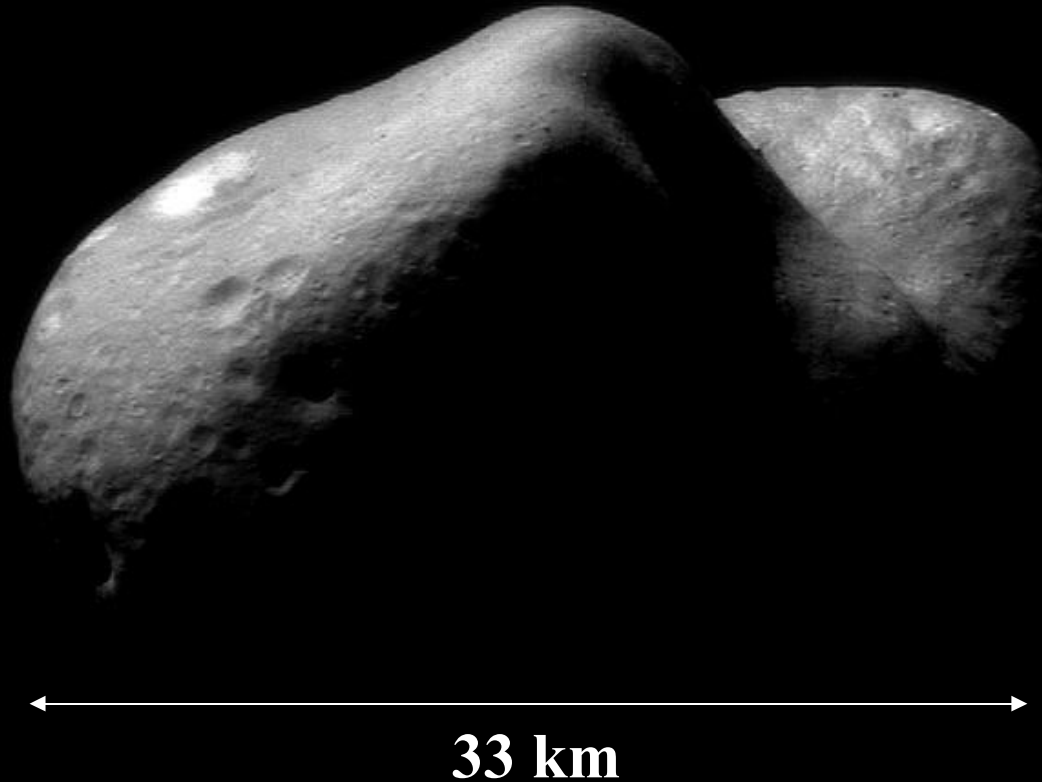
+ rayonnement cosmique galactique.

Ces collisions ont eu lieu récemment (géologiquement parlant)



McSween (2002)

**A-t-on des preuves de ces collisions internes à
la ceinture des astéroïdes ?**



Voici Eros (survol Nasa 2000)

Approchons nous !



Encore !



Encore !



1,4 km

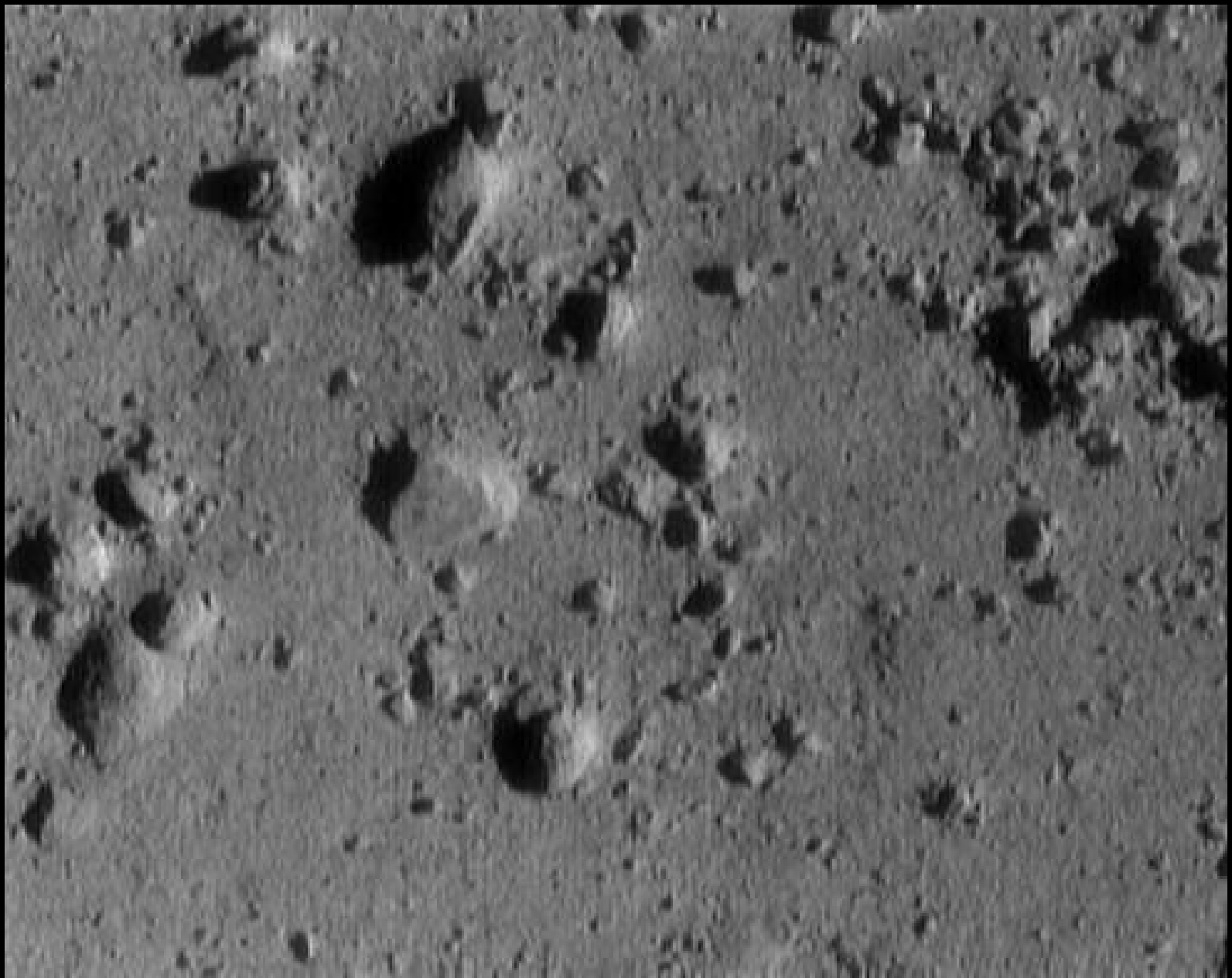


Encore !

1,4 km



350 m



12 m

Voici Itokawa, survolé en 2005 par une sonde japonaise

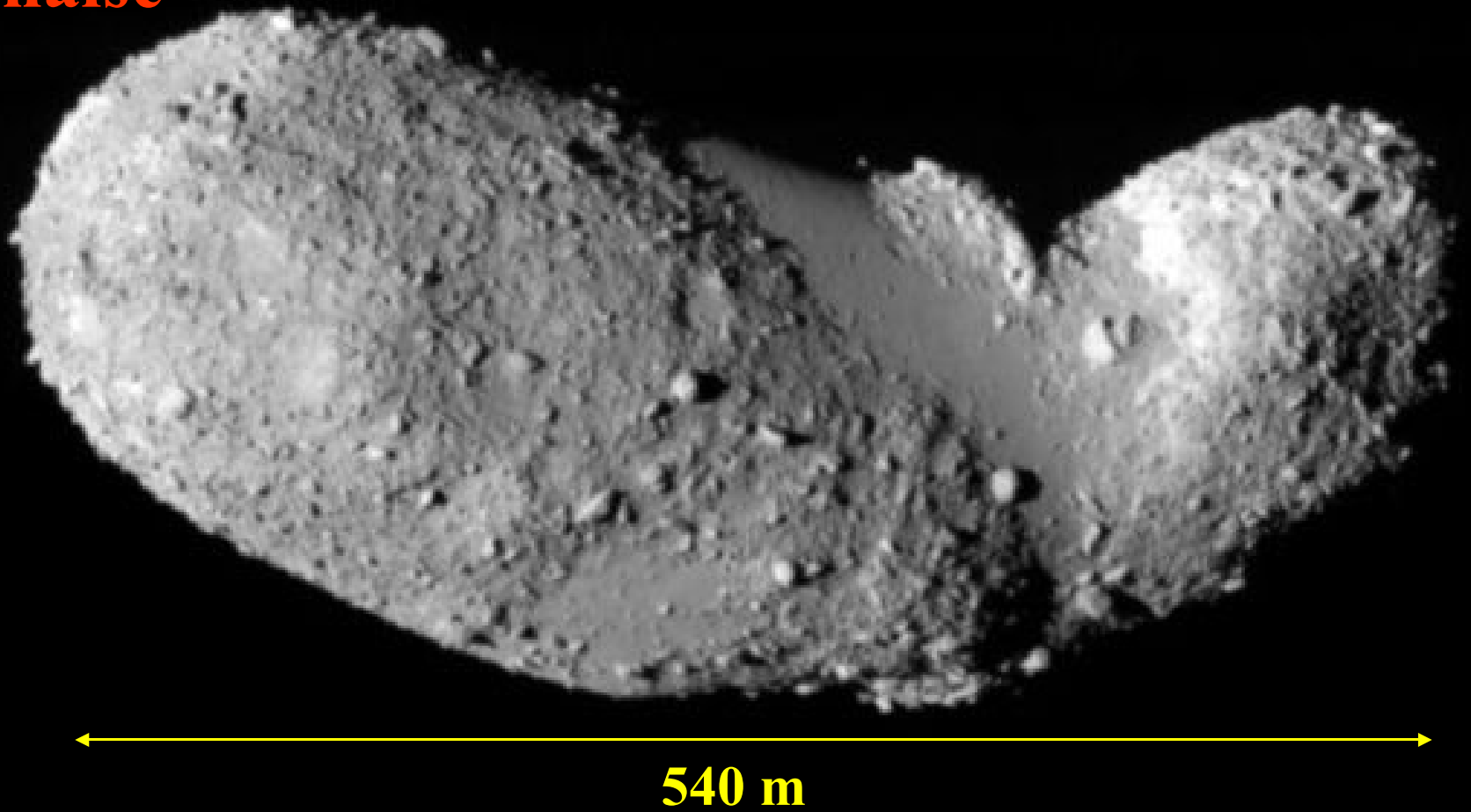


図3 イトカワの +90 度面

Un conglomérat de gros cailloux mal consolidé



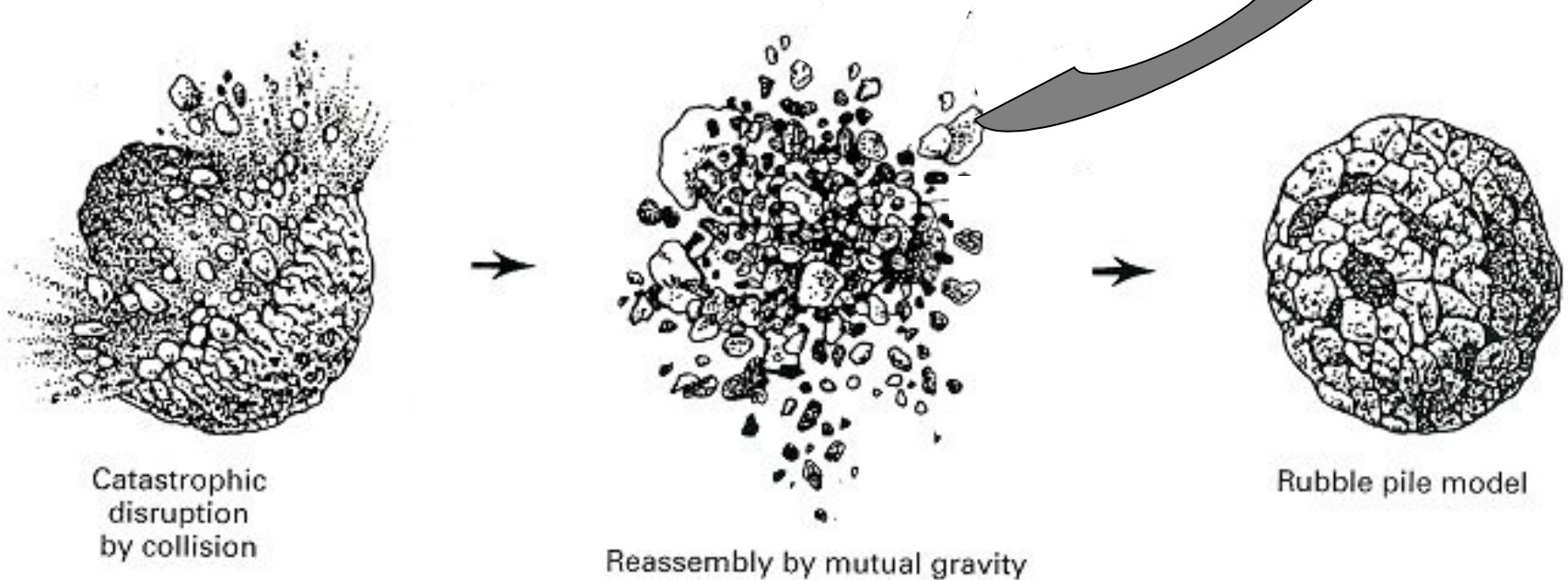




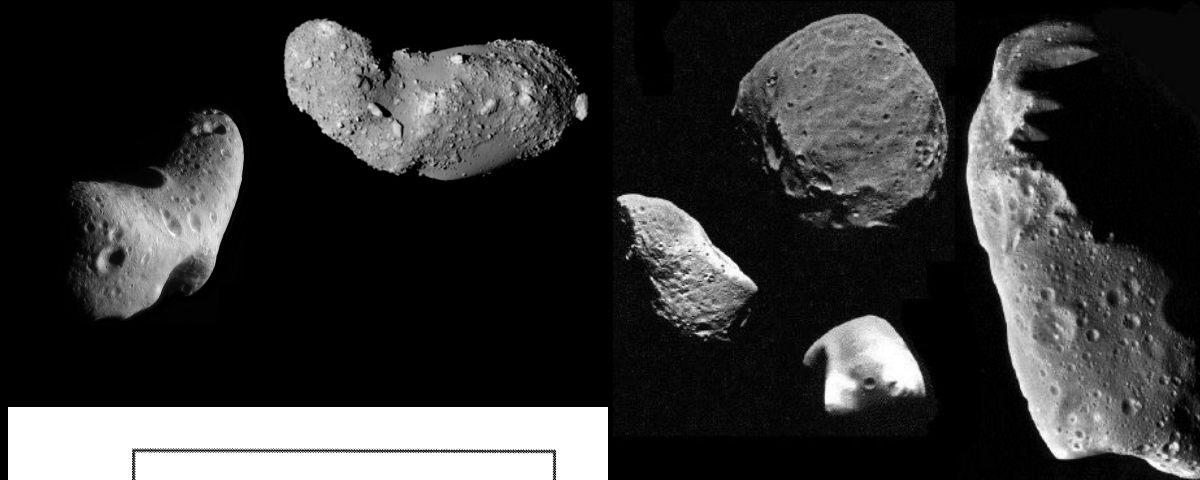


L'origine d'Itokawa : collision / re-accrétion.

Les morceaux qui s'échappent vont devenir géocroiseurs, directement ou via les lacunes de Kirkwood

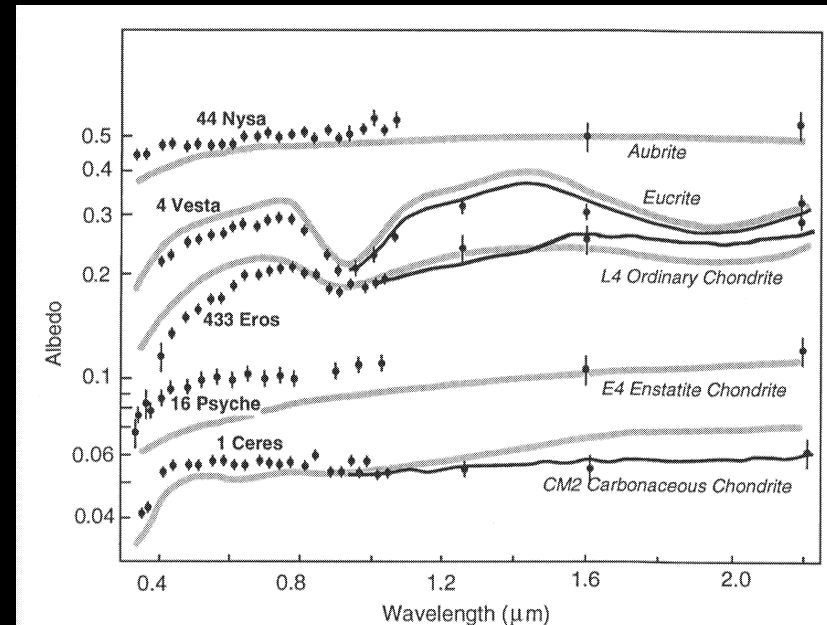
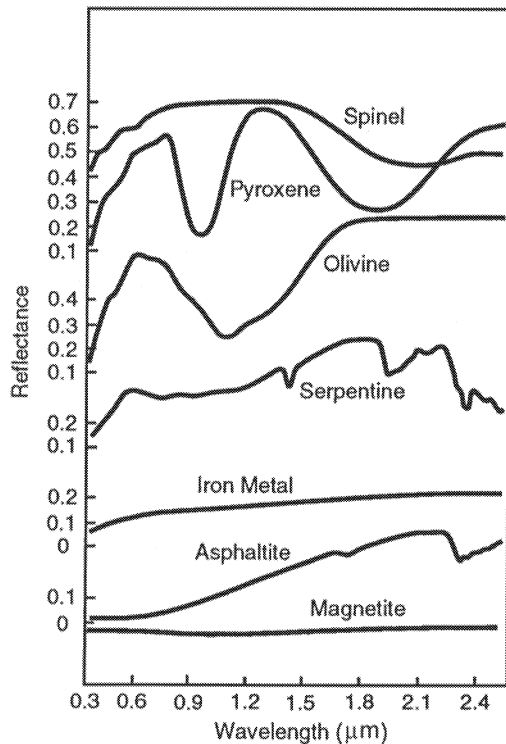


Astéroïdes et météorites : des points communs dans les spectres



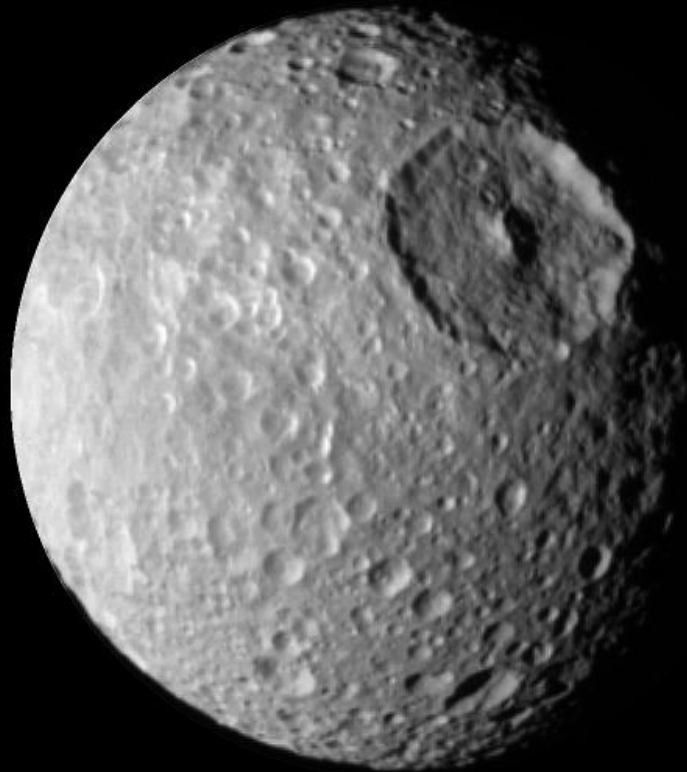
14 classes d'astéroïdes
basées sur leur réflectance
(A,B,C,D,E,F,G,M,P,Q,R,S,T,
V,'K')

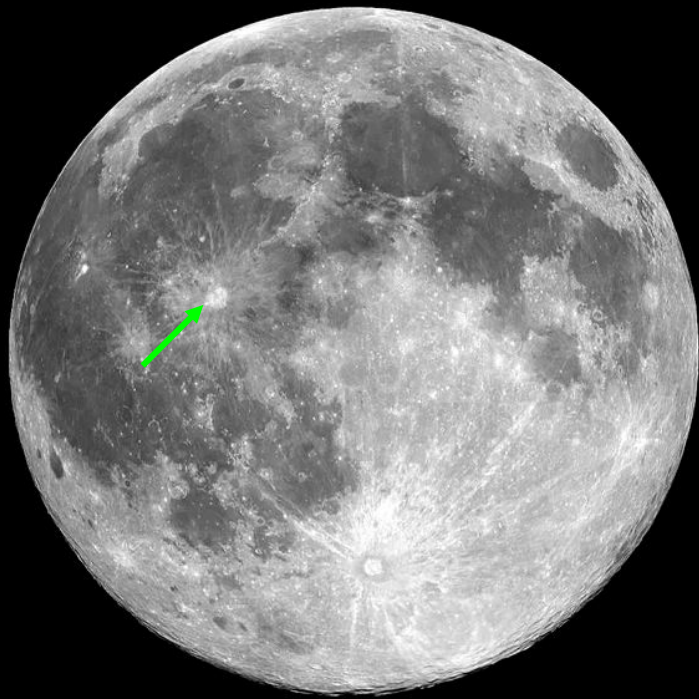
Diversité très supérieure à
celle des météorites connues
On a un échantillonnage
incomplet



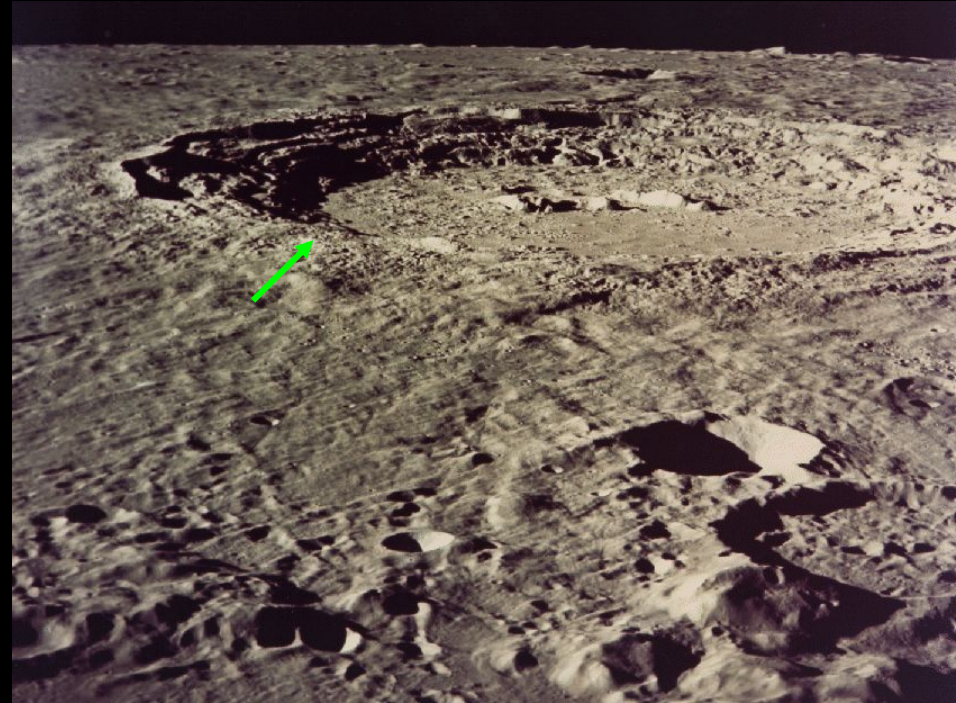
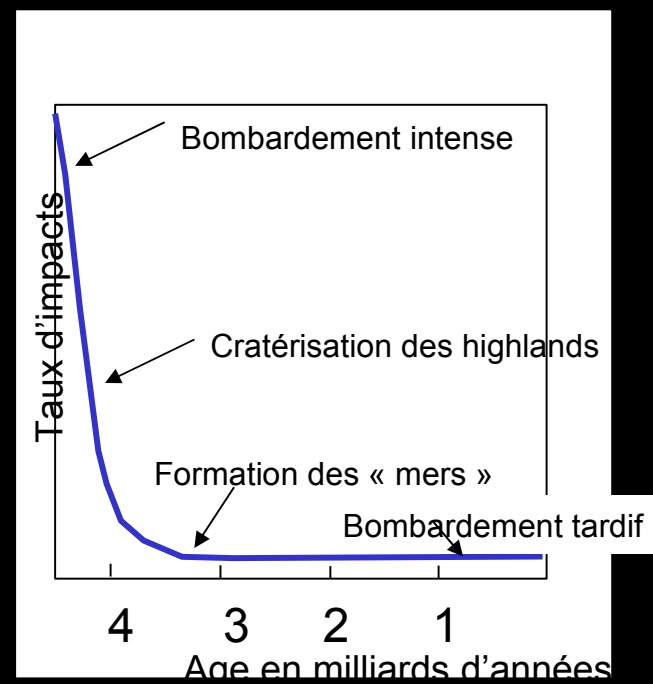
**Des collisions, il n'y en a pas
que dans la ceinture des
astéroïdes.**

Ici, Mimas et Téthys

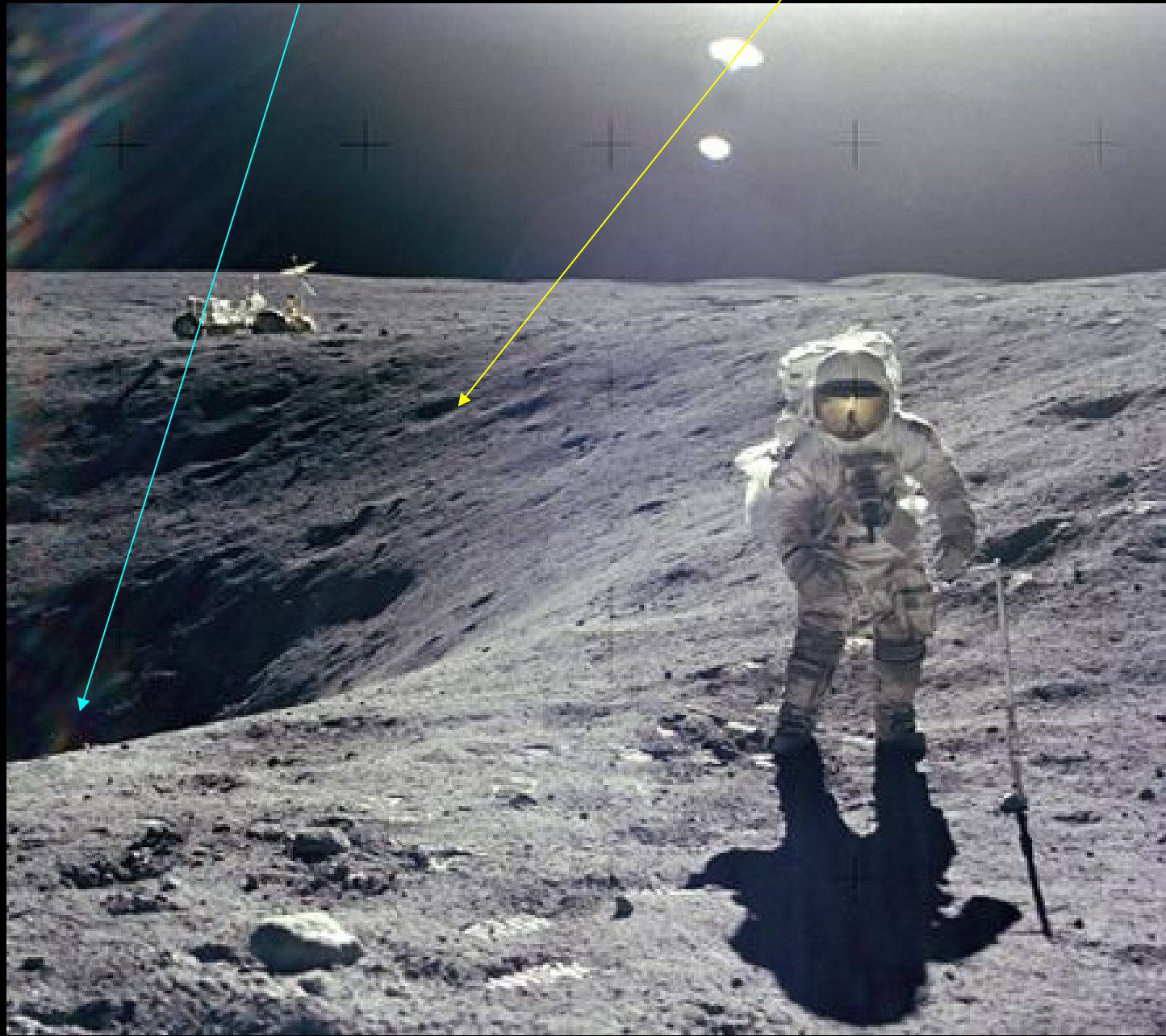




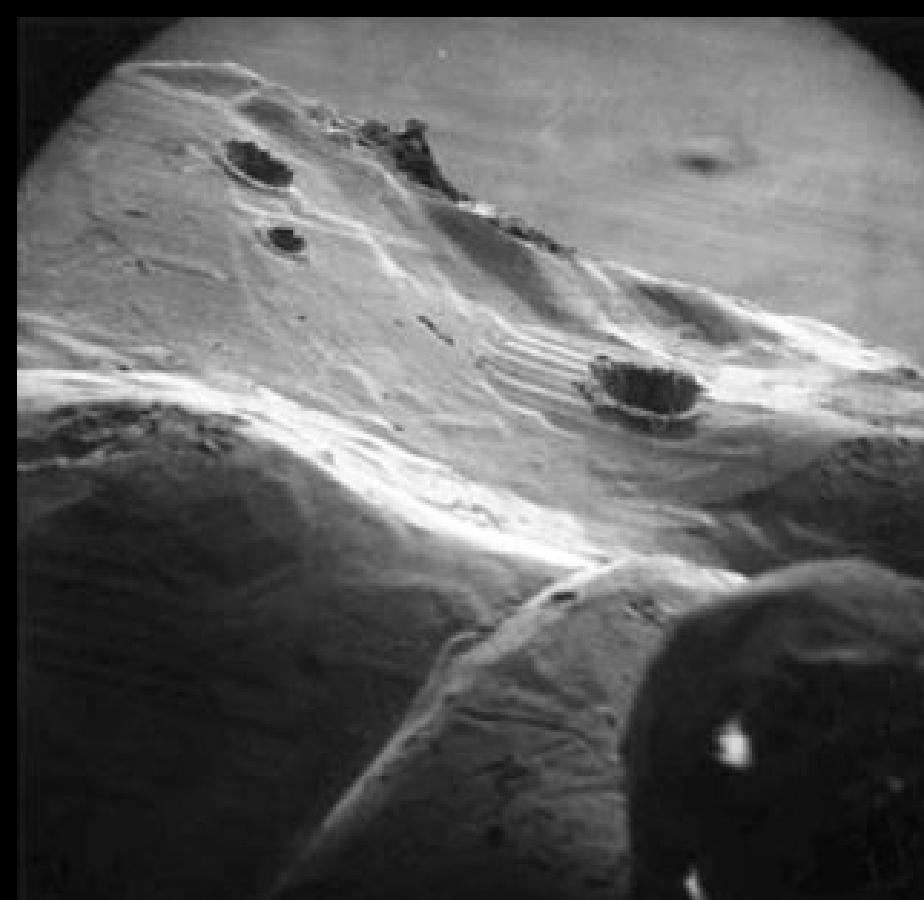
**Il y en a bien
sûr sur la
Lune, et on a
pu les dater.
Il y en a des
« gros », ...**



Il y en a des **moyens** ... , des **petits** ...



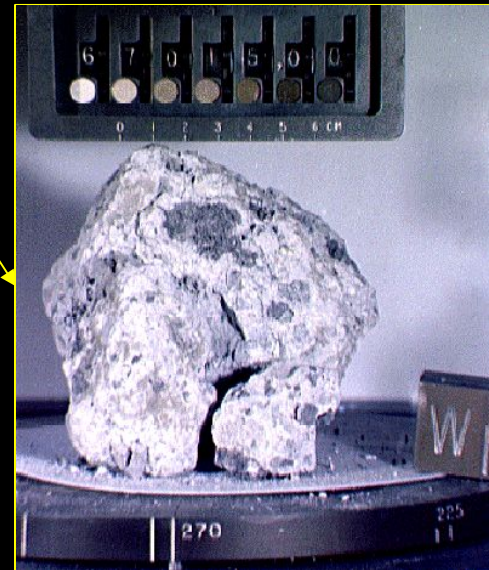
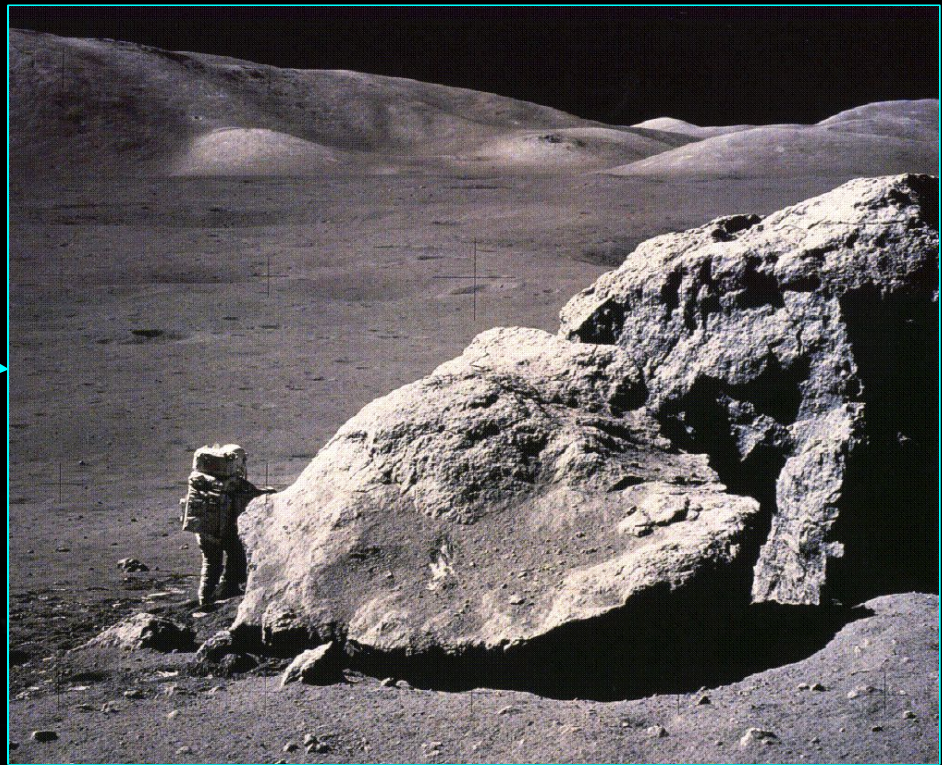
Des « tout petits »



500 microns



Depuis la Lune, des
éjecta de ces cratères
sont retombés sur ...
la **Lune**,
mais aussi sur **Terre**



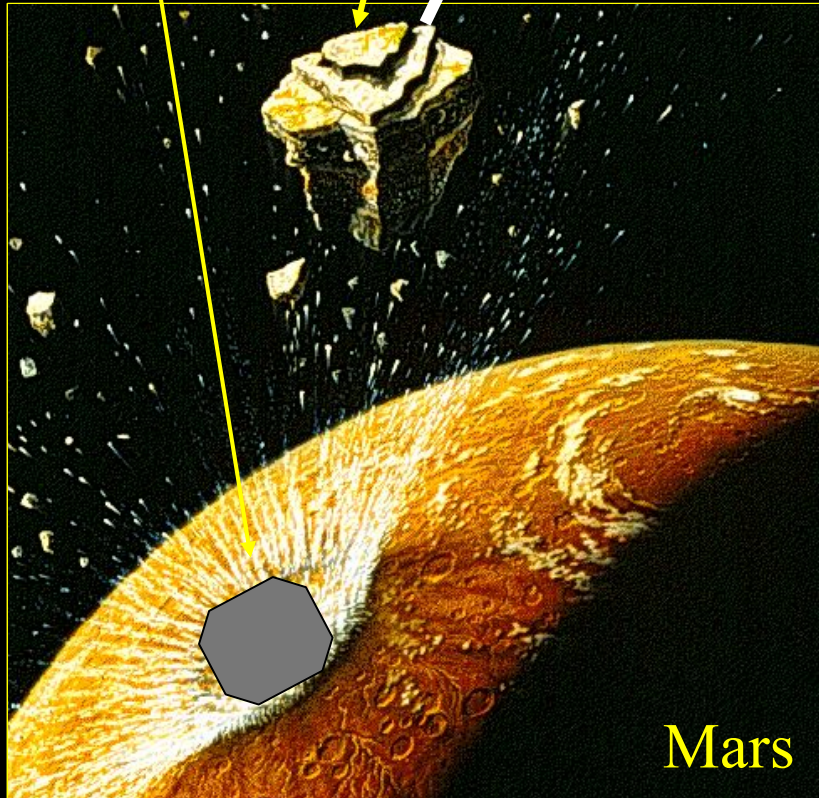
Il y a aussi des cratères sur Mars. Des météorites en viennent-elles ?



Le trajet des possibles météorites martiennes, dites SNC

Impacteur

Météorites
martienne

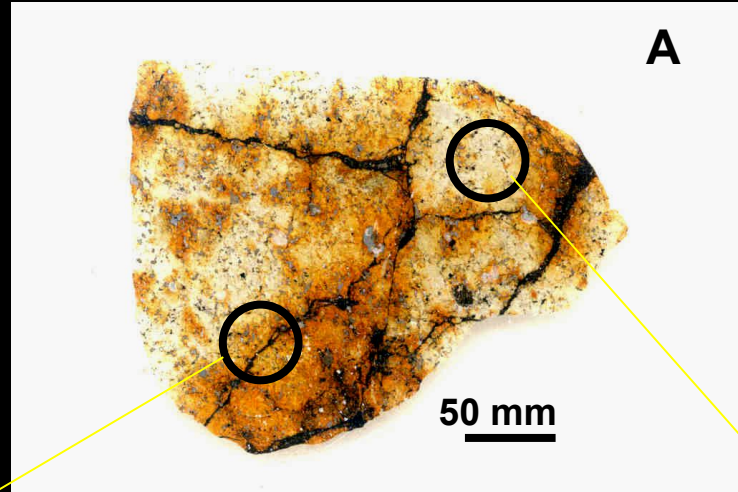


Mars



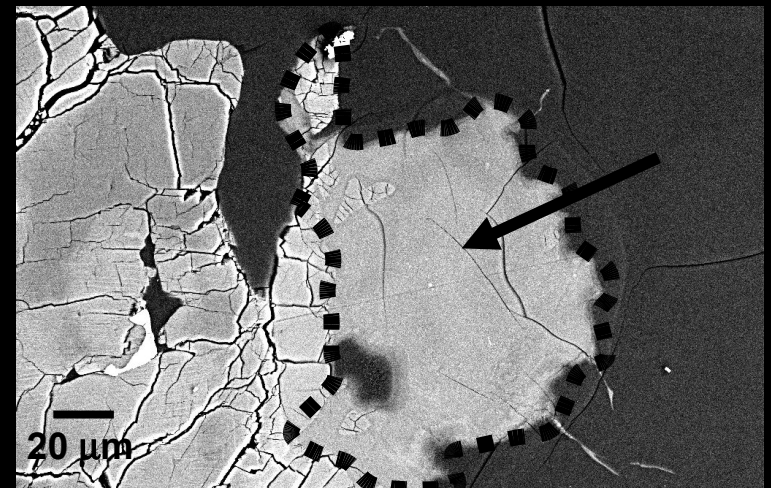
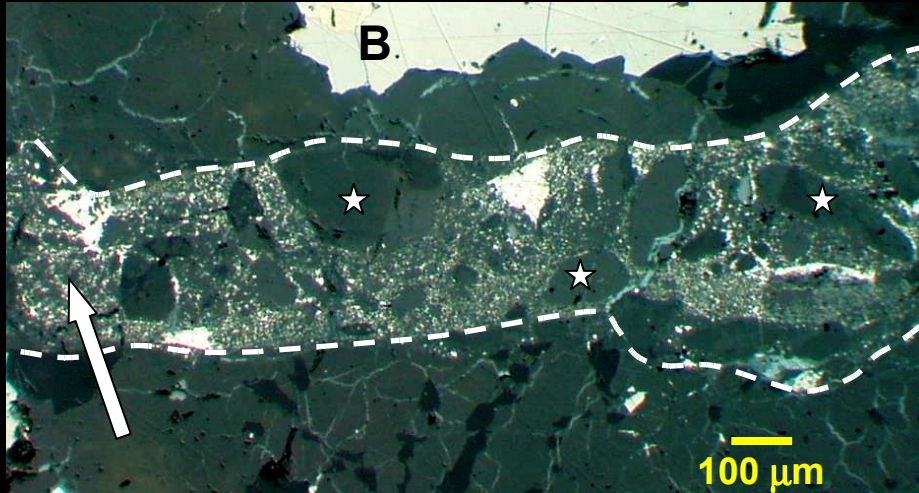
La Terre

Quand une météorite est extraite de son corps parent, cela y occasionne localement des veines ou des poches de fusion



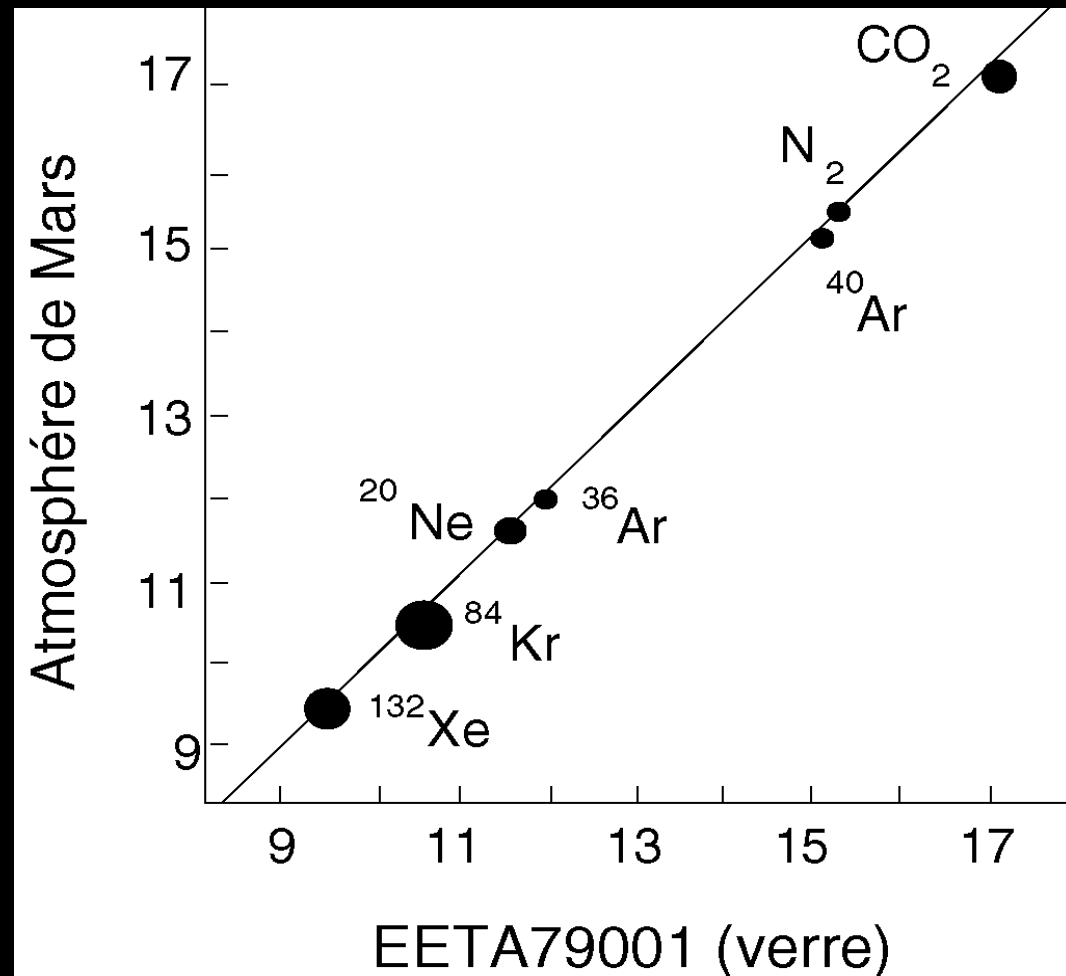
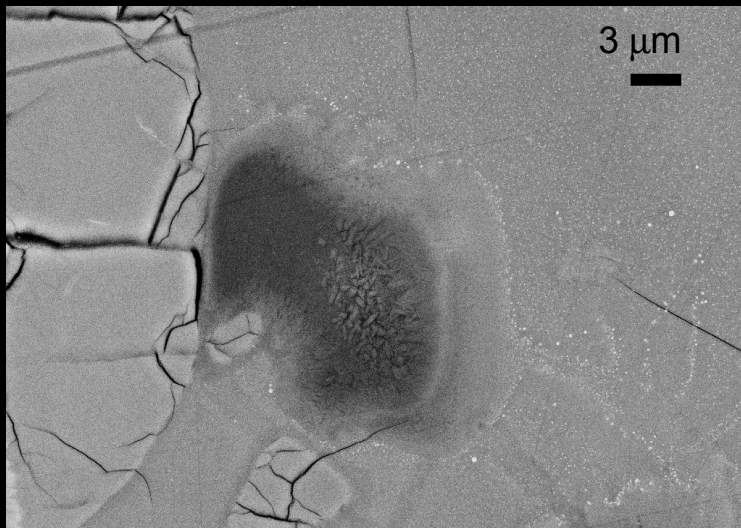
Veine de choc avec fusion

Poche de fusion

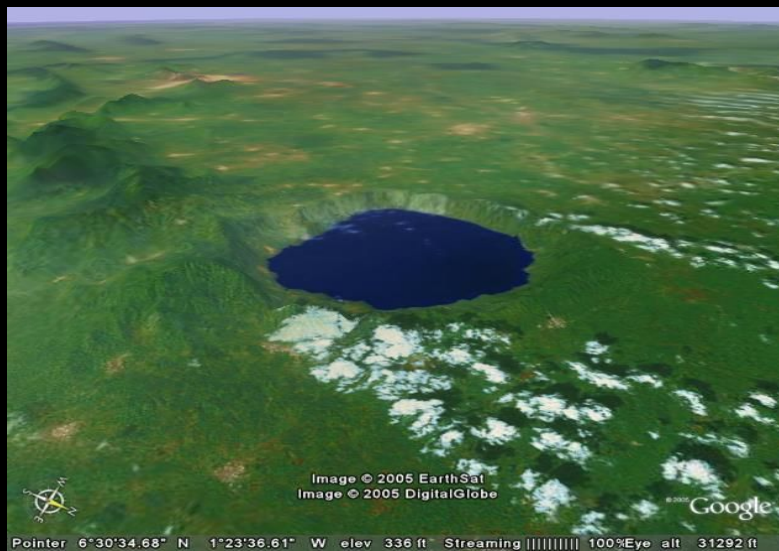
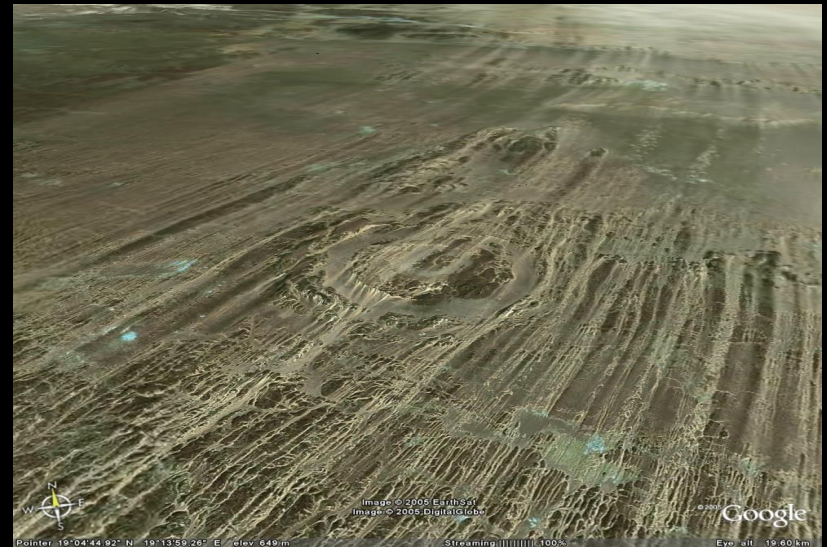
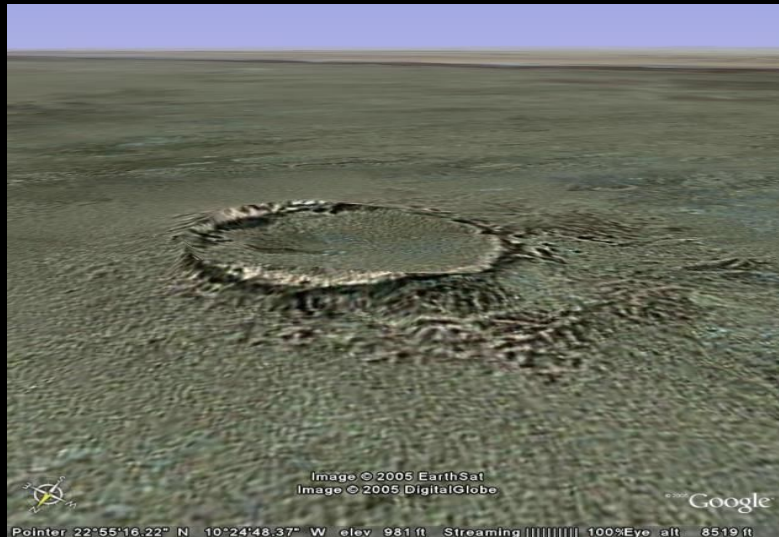


C

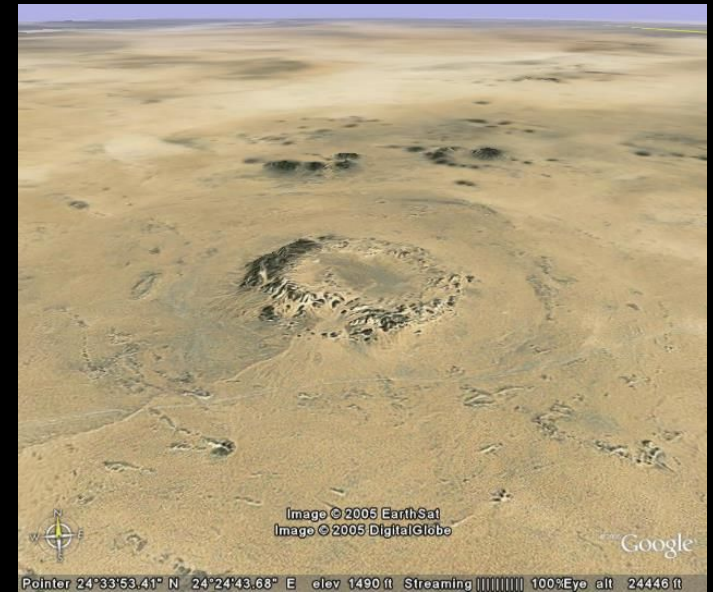
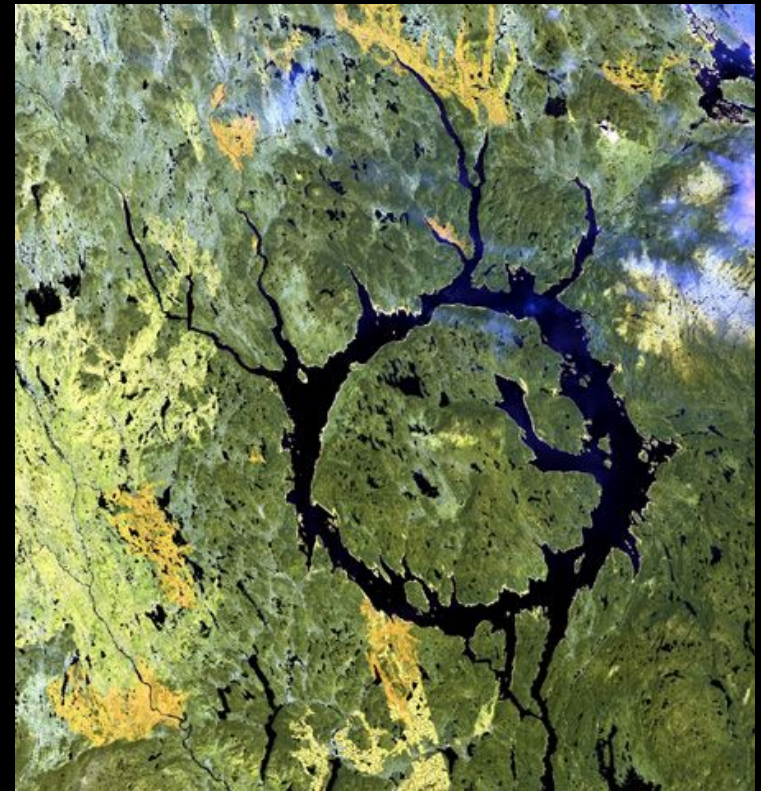
Dans une des SNC, il y a des poches de fusion, qui contiennent des gaz dissous. Ces gaz sont exactement les mêmes que ceux de l'atmosphère de Mars (mesurés par les sondes)



**Des cratères, la Terre en compte plus de 150,
épargnés par l'érosion, la tectonique des plaques ...
En voici 4 !**

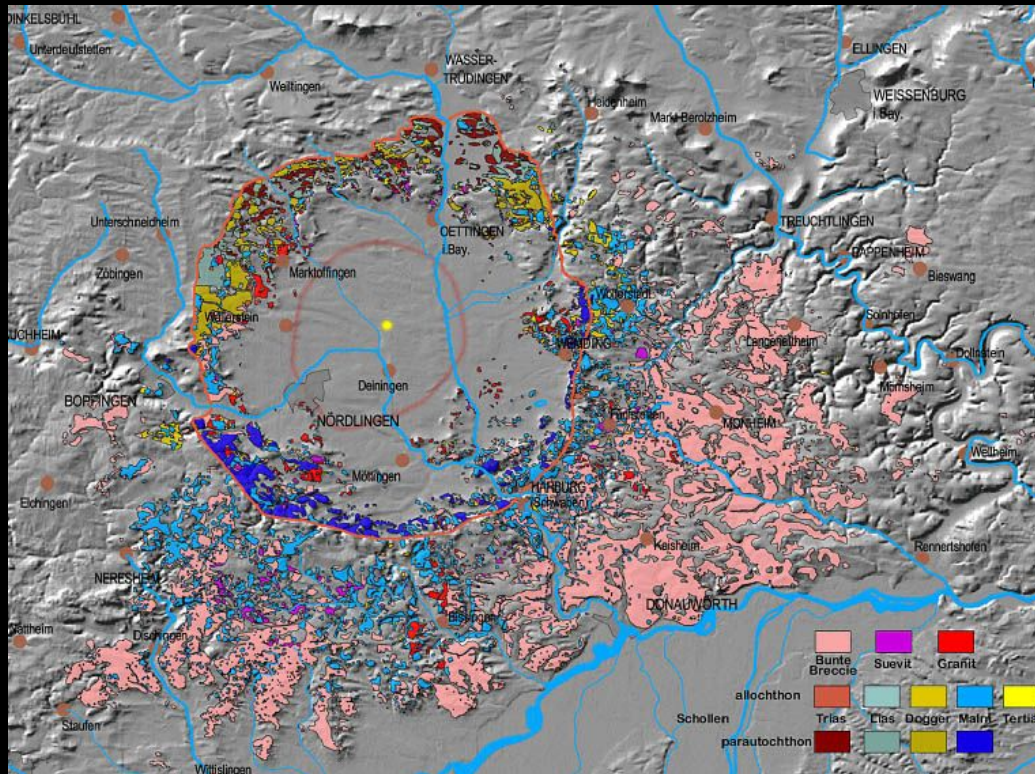


En voici 4 autres !



Un grand cratère européen, le Ries

En couleur sur la carte, ce qu'il reste des éjecta : des brèches et roches broyées

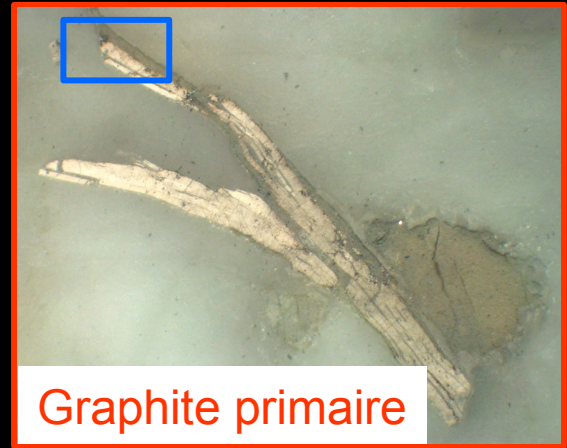
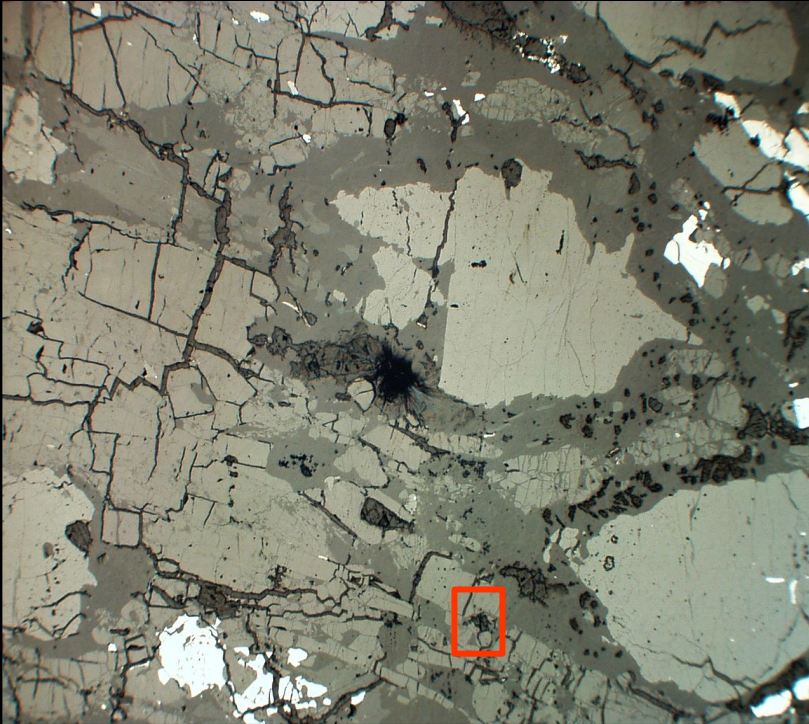


Cratère du Ries,
Bavière
diamètre 24 km
Age : 15 Ma

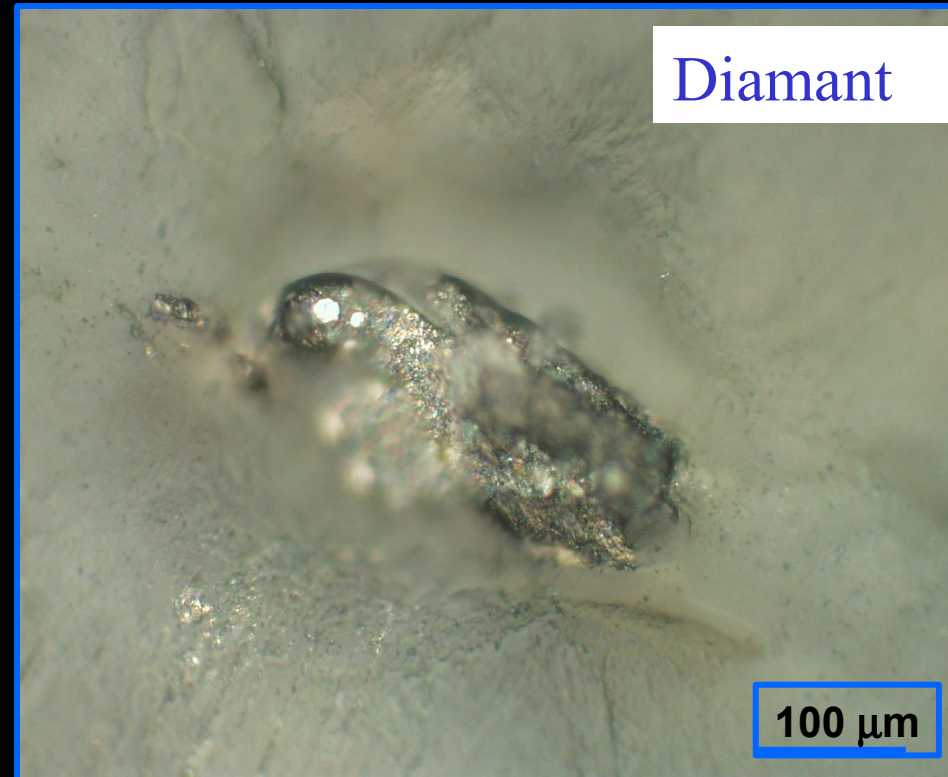


Un exemple de brèche du Ries

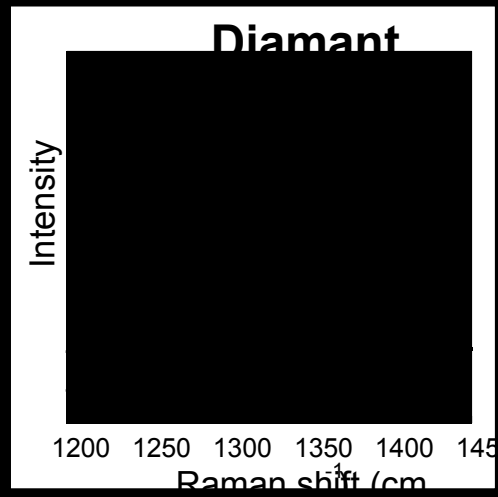
Dans les éjecta, des minéraux d'Ultra Haute Pression, comme le diamant



Graphite primaire



Diamant

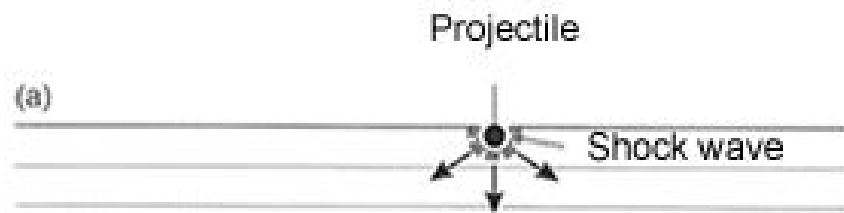


100 μm

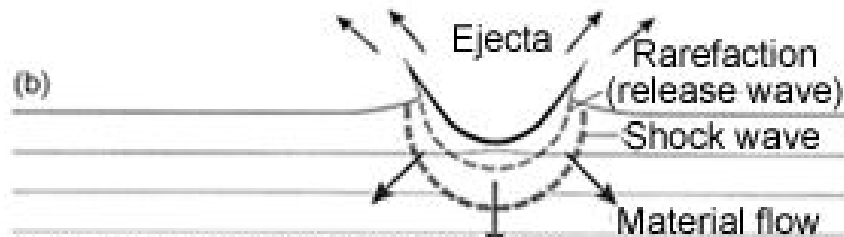


Dans les éjecta, il y a une faible fraction fondue par la chaleur du choc. En tournoyant dans l'atmosphère avant de retomber, les parties fondues prennent la forme des bombes volcaniques

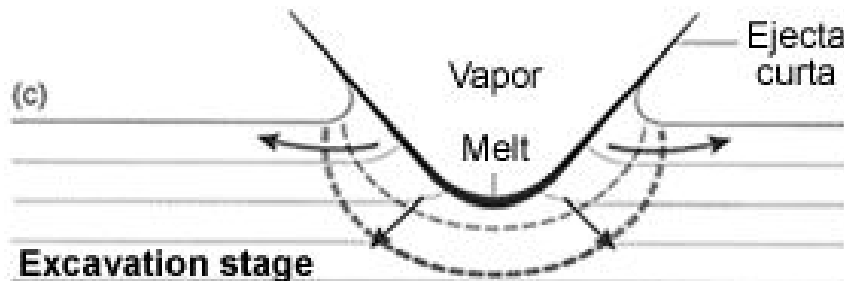
Formation des cratères d'impact



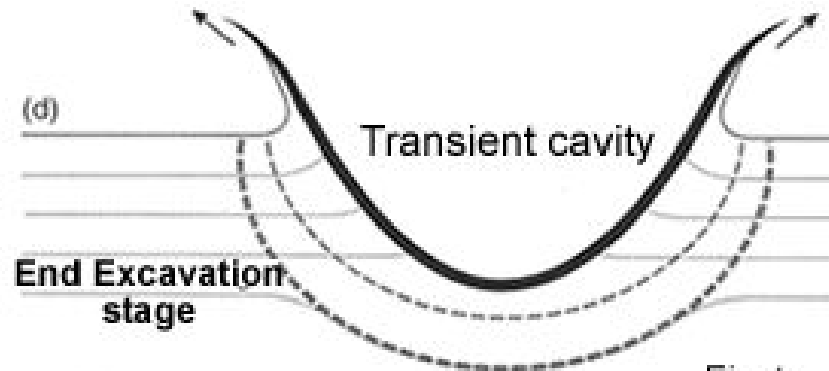
Contact/compression stage



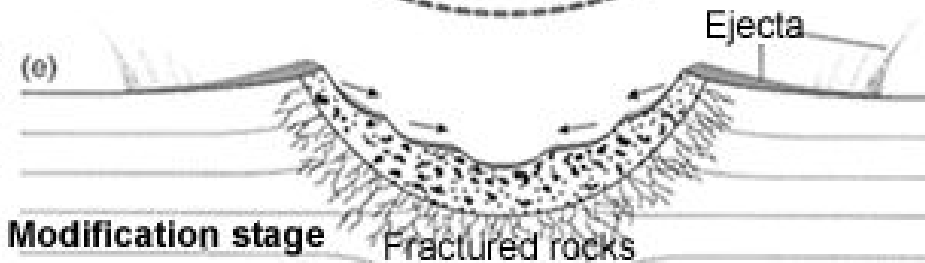
End contact/compression stage



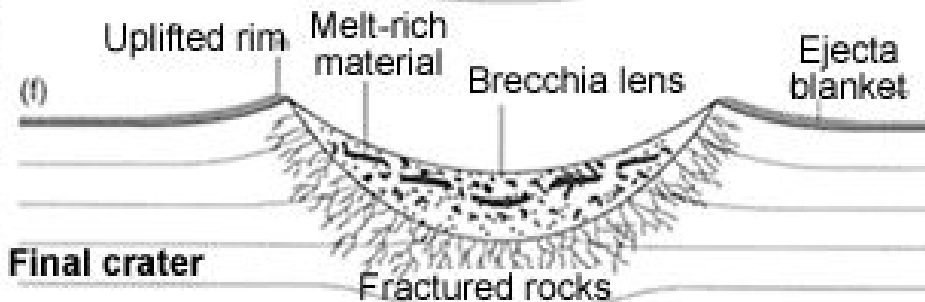
Excavation stage



End Excavation stage

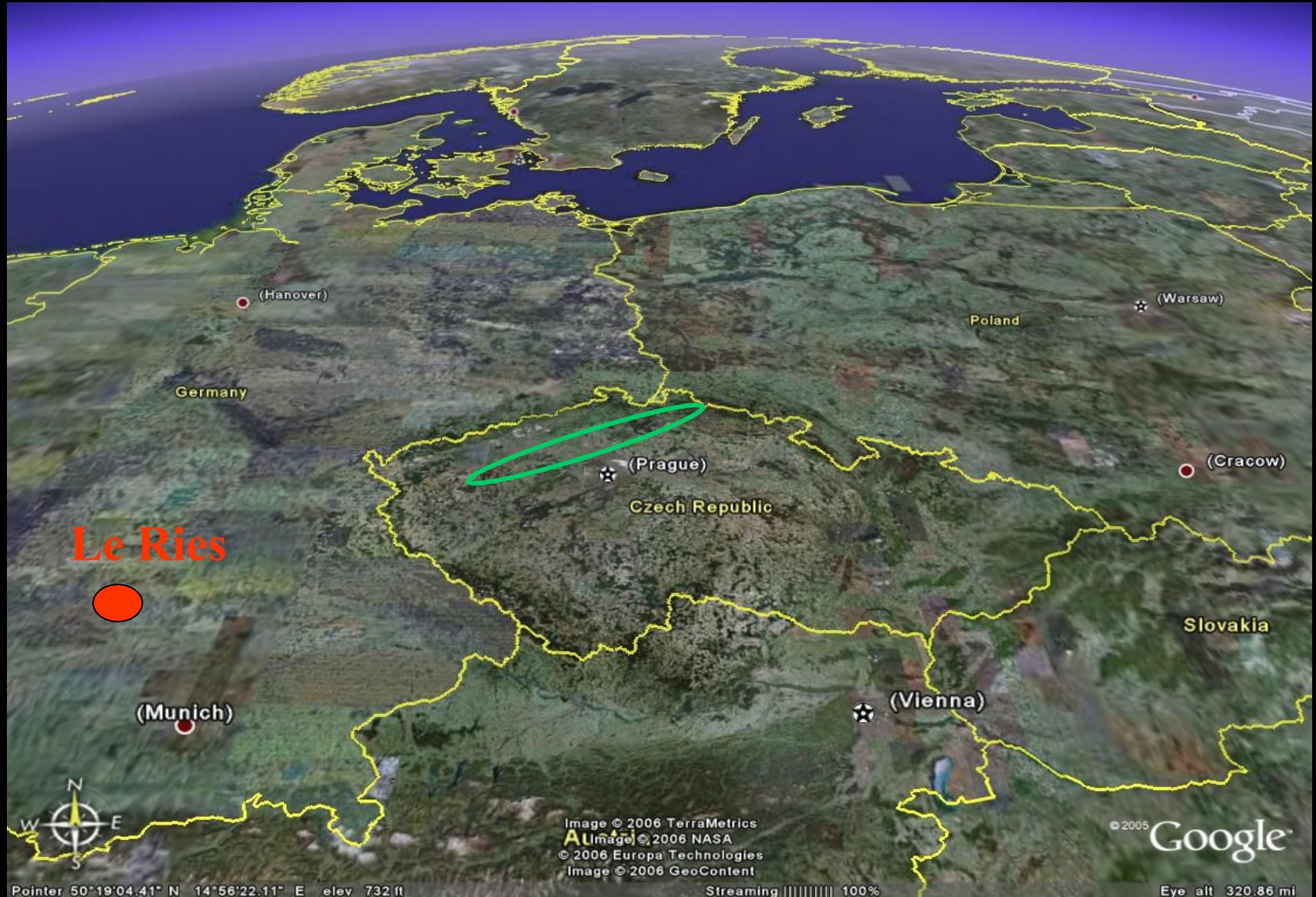


Modification stage



Final crater

Allons au nord de Prague, près de la rivière
« la Moldau », à 350 km du Ries



Dans des
couches de
terrains de 15
Ma, on trouve
(rarement)
d'étranges
morceaux de
verre,
des tectites



Ce sont des éjectas fondus
venant du Ries, nommées
moldavites (en l'honneur
de la Moldau)



Une tectite de Tchèque vue par transparence



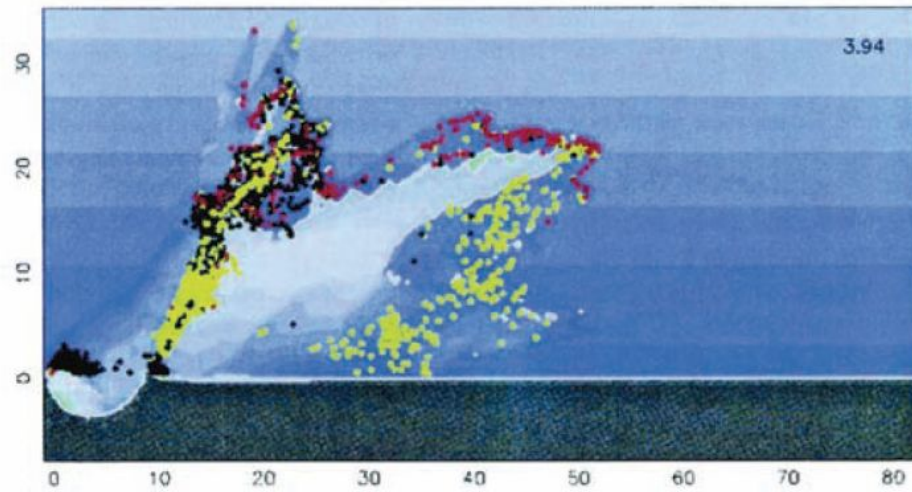


Fig. 22. Tektite ejection model results for the Ries event, from Stöffler et al. (2002). Impact angle was 30° ; projectile speed 20 km/sec. The picture shows material distribution at 3.94 sec after impact; the numbers are km (Red = molten upper layer material; yellow = molten target material; black = solid target material).

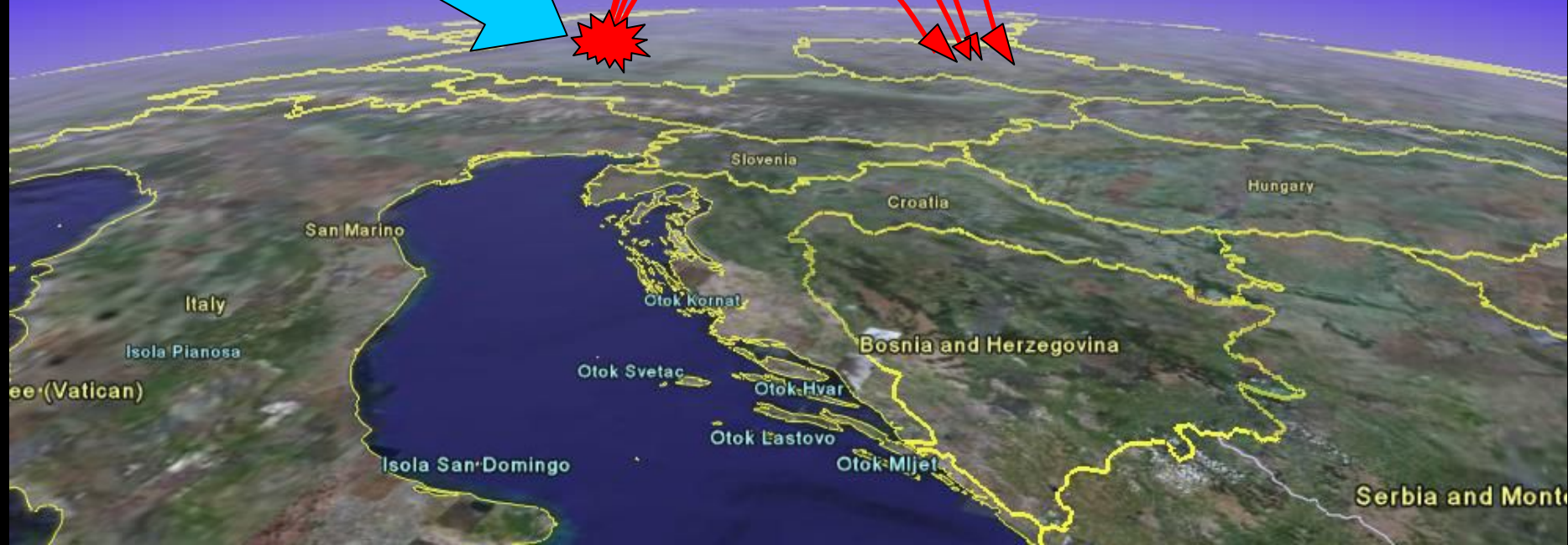
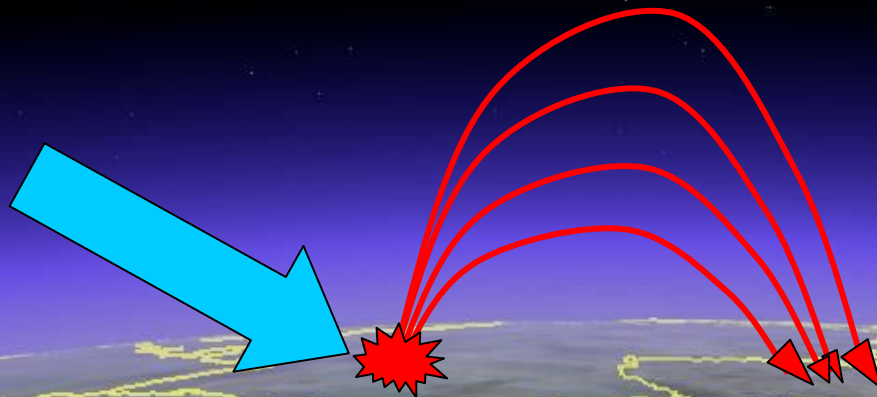
L'origine des tectites : les plus rapides des éjecta fondus sortent du cratère avec une trajectoire balistique, quittent l'atmosphère, s'y solidifient, et retombent de 200 à 2000 km plus loin.

Il y a cinq grands champs de tectites : au sud des USA (cratère au Texas), en Afrique de l'Ouest (cratère au Ghana), en Europe Centrale (cratère en Allemagne), au SE asiatique et dans le désert lybique (cratères inconnus)

L'origine des tectites

Ejection de « gouttes de Terre fondues » sur trajectoire balistique ($V < 28\,000$ km/h) hors atmosphère

Impact oblique





**Les tectites
ont une
couleur
variée
(cela
dépend de
la géologie
du site du
cratère) ...**

... de taille variée



La majorité des tectites n'ont pas de forme particulière. Certaines sont sphériques, comme ...





Sur une trajectoire balistique en dehors de l'atmosphère, on est en apesanteur !

Ejection de « gouttes de Terre fondues » sur trajectoire balistique ($V < 28\,000$ km/h) hors atmosphère



D'autres ont des formes particulières. Une histoire de rotation !



sphérique



en haltères



en goutte ou
en poire

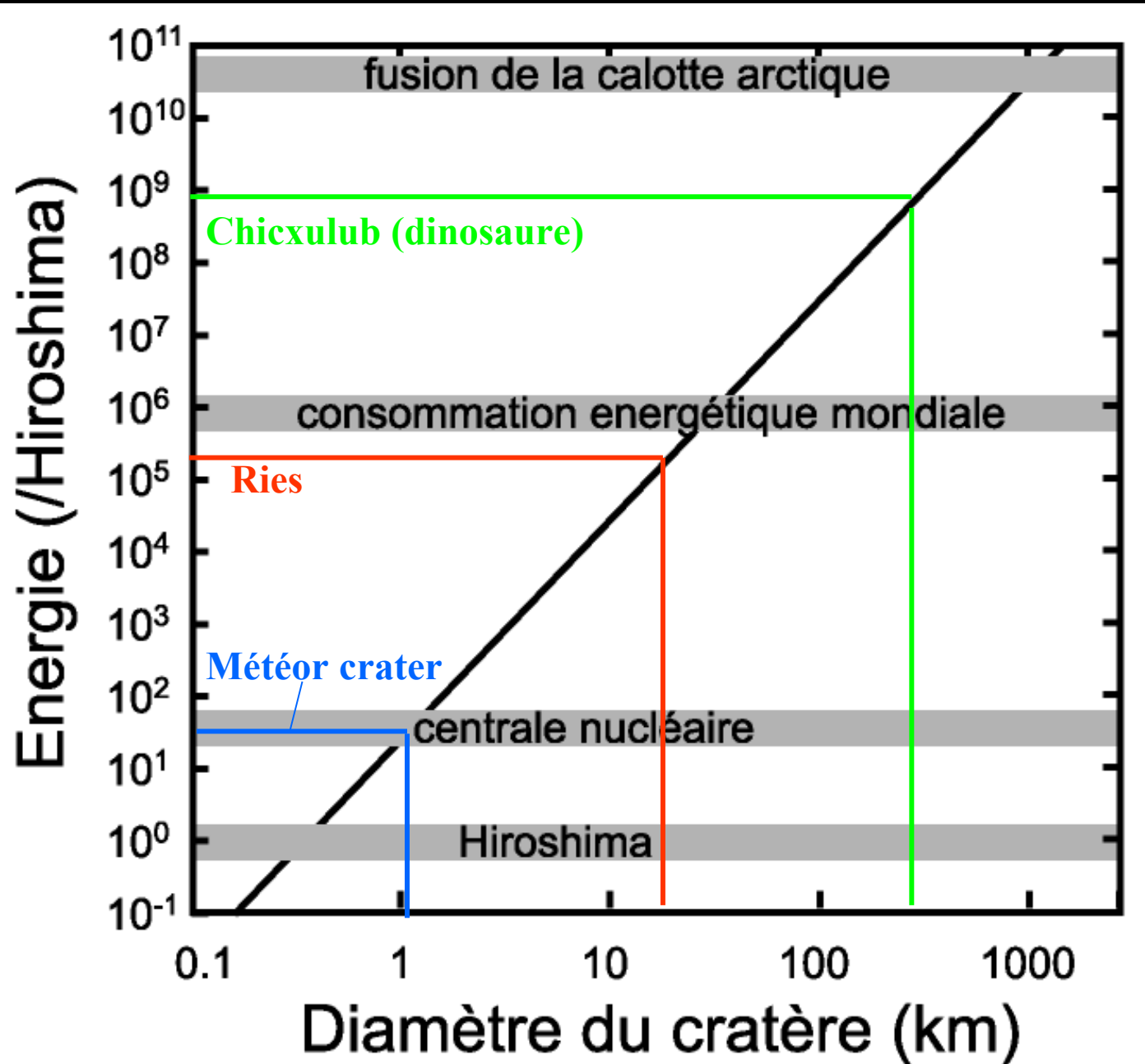


ellipsoïdale

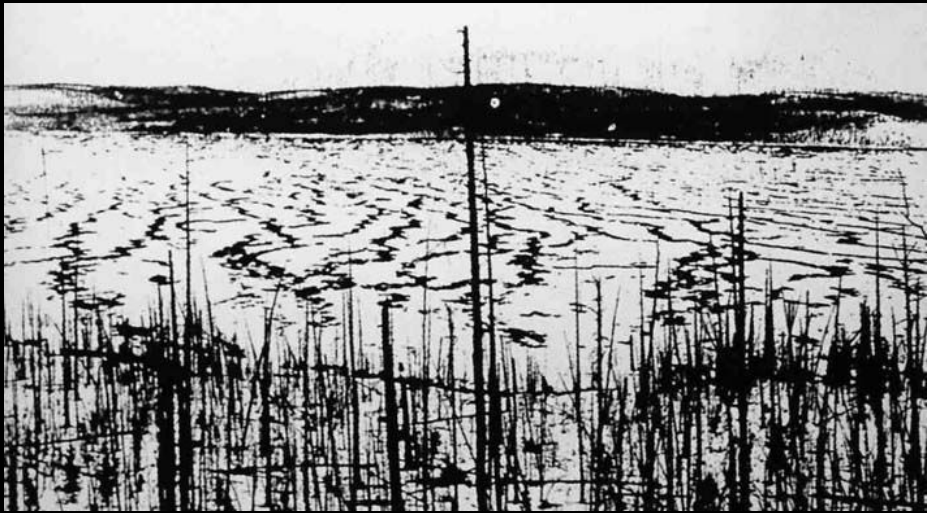
Une larme de la Terre (moldavite = tectite de Tchéquie)



Les impacts mettent en jeu d'énormes quantités d'énergie ($1/2 mV^2$)



Est-ce un
danger
réel ?

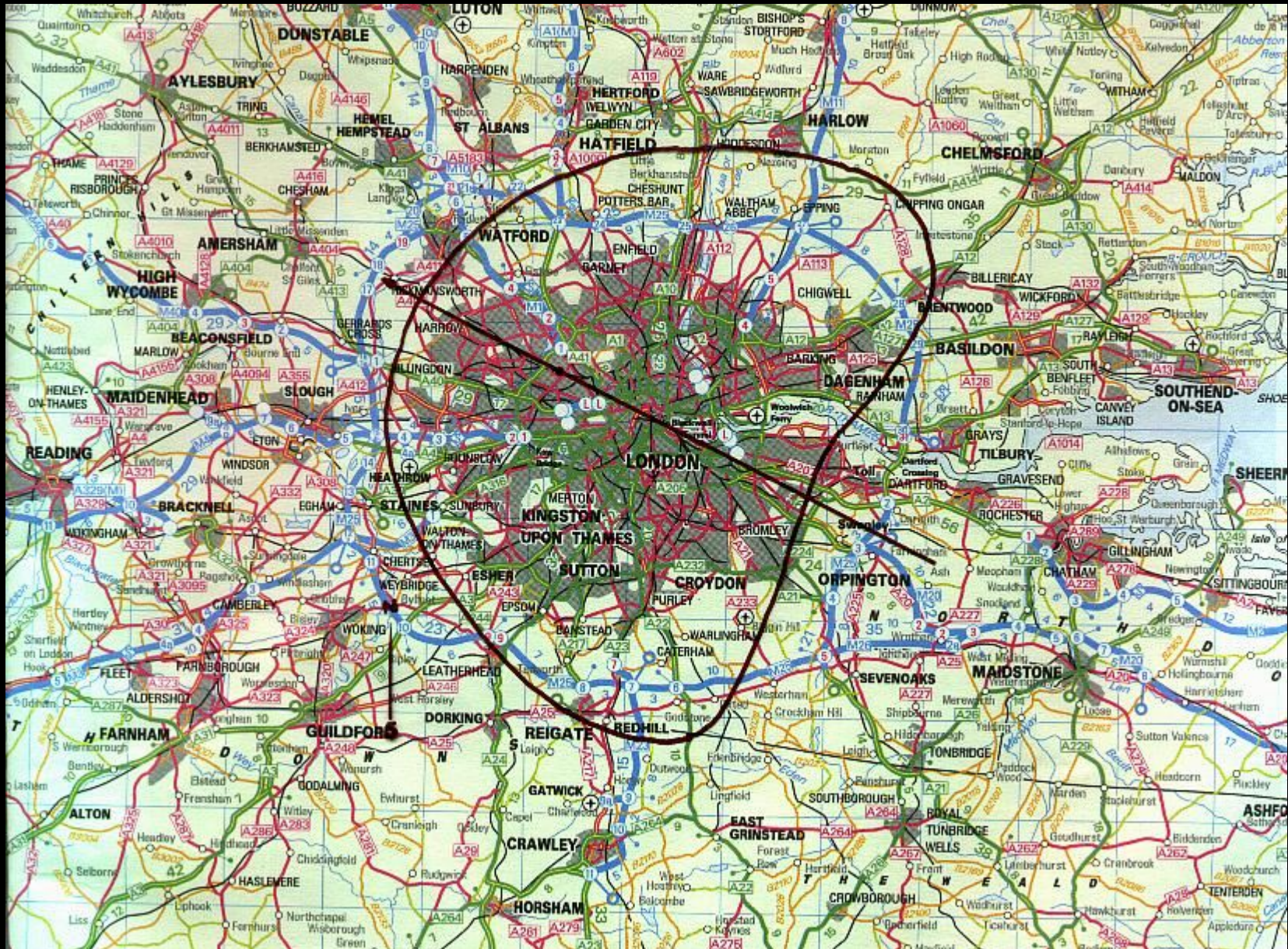


Les risques sur Terre. Le cas de la Tunguska (1908)

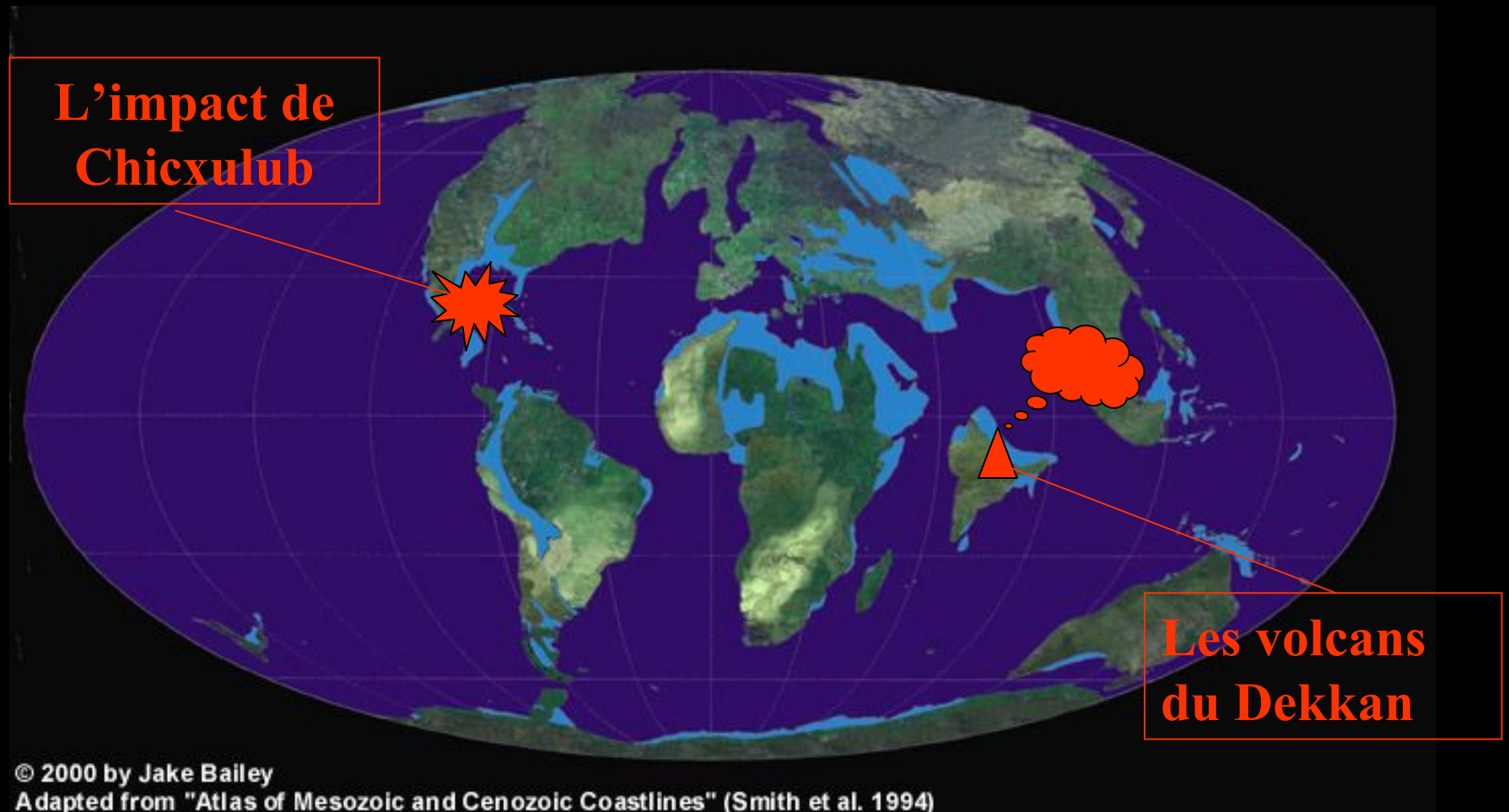
Le 30 juin 1908
***A moins de 20 km de
l'épicentre de Tunguska les
600 à 700 rennes de Vasiliy
Dzhenkoul furent
instantanément réduits en
cendres, les chiens furent
brûlés vifs, toutes les tentes
des nomades furent brûlées
ainsi que tous les stocks de
nourriture et de bois.....***



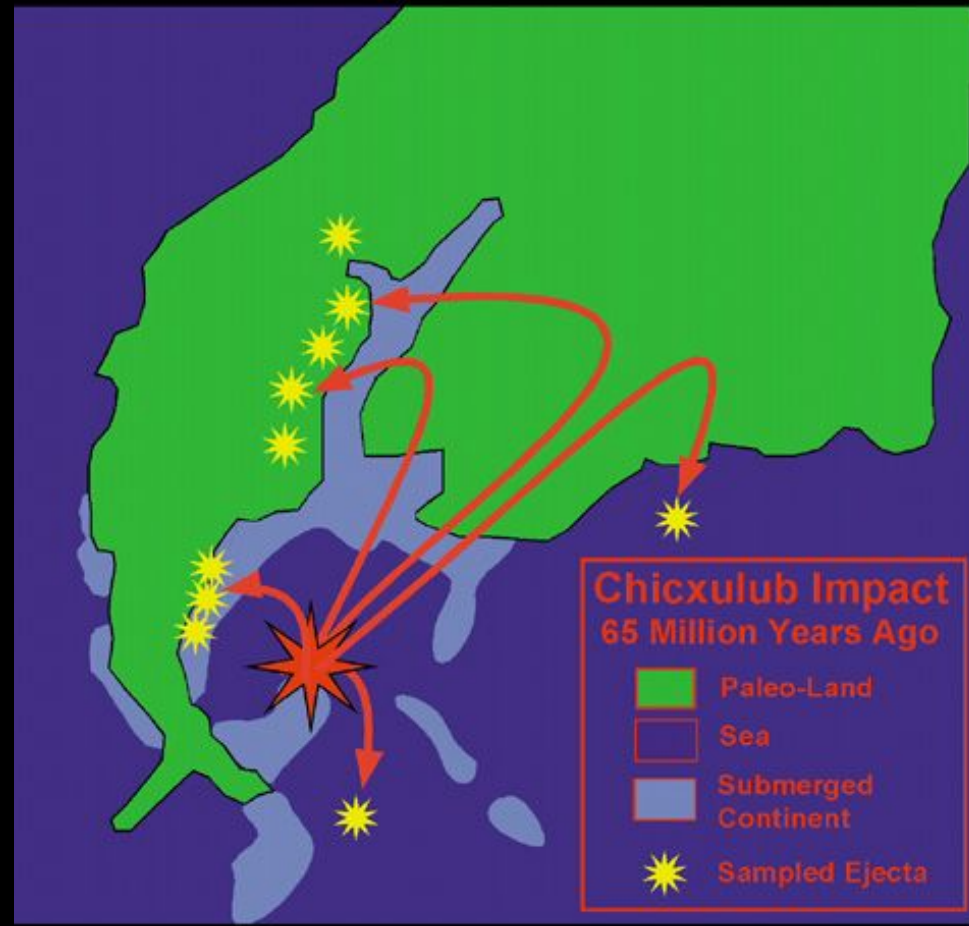
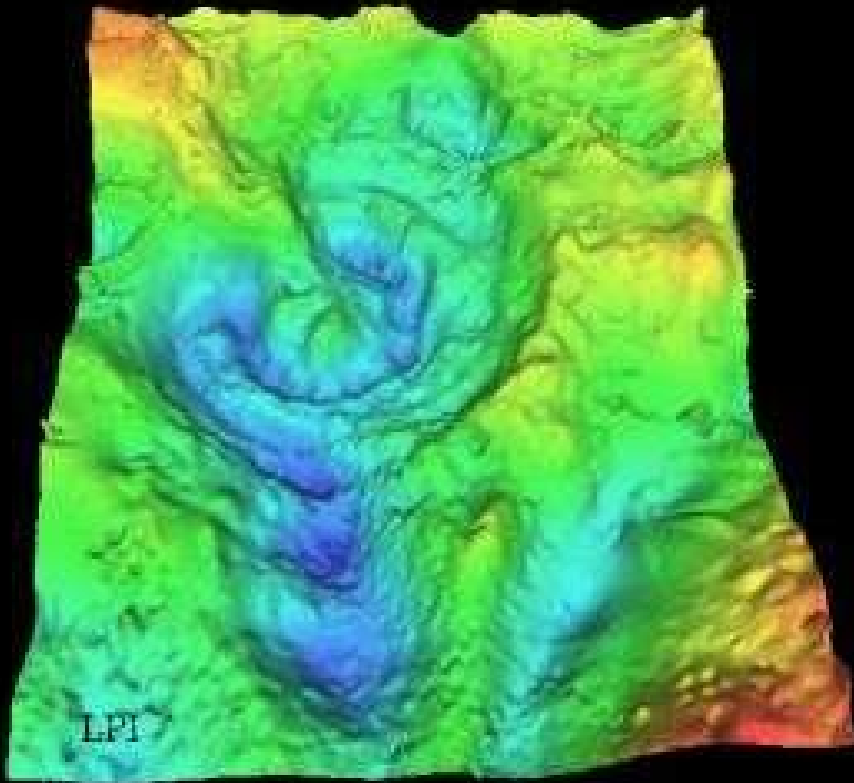
La zone de destruction de la forêt de la Tunguska reportée sur un plan du Grand Londres



Il y a 65 Ma, une gigantesque catastrophe écologique extermina 95% des dinosaures. Deux causes possibles, d'ailleurs non incompatibles. Etudions l'une d'elles, l'impact d'une grosse météorite (D = 10 à 15 km)



Le cratère cicatrice : le cratère de Chicxulub, que la géophysique révèle sous les sédiments du Yucatan



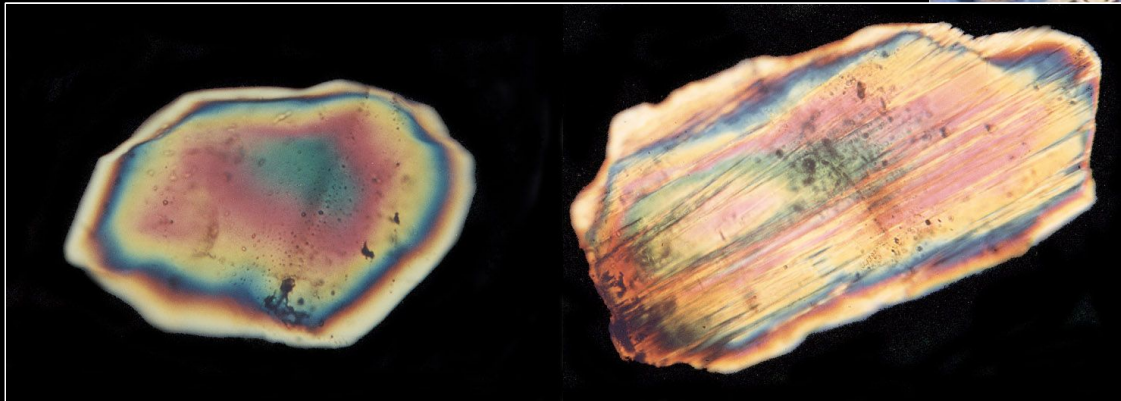
Des traces sur tout le globe



Une couche d'argile sans calcaire et riche en Iridium



Des micro-tectites partout



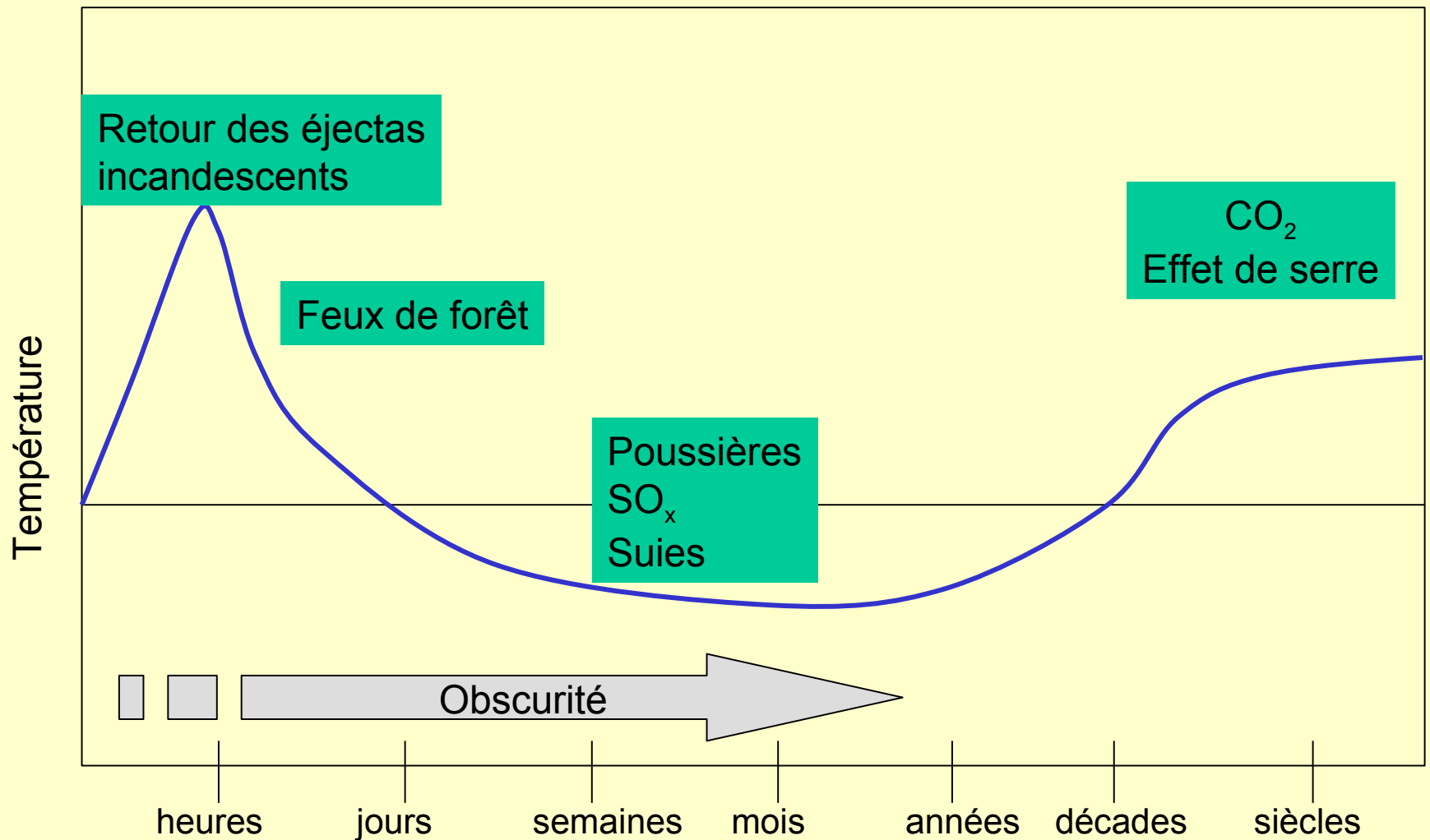
Des grains de quartz avec des traces de choc

Modélisation de la chute des éjecta incandescents

Dispersion des éjectas incandescents

Kring et Durda, 2001

Modélisation des effets climatiques

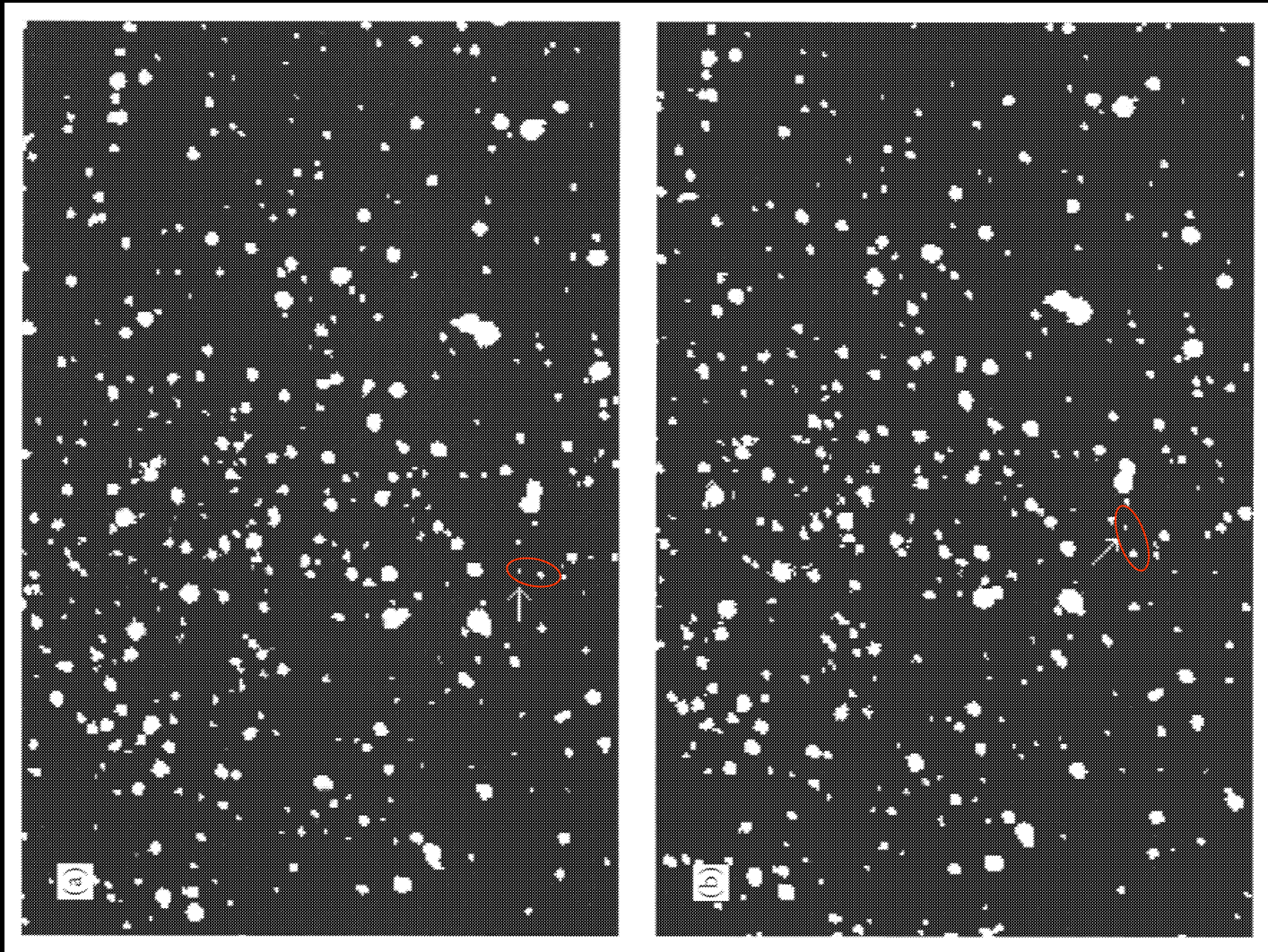


Ce que disent les cratères terrestres et lunaires sur les probabilités des collisions

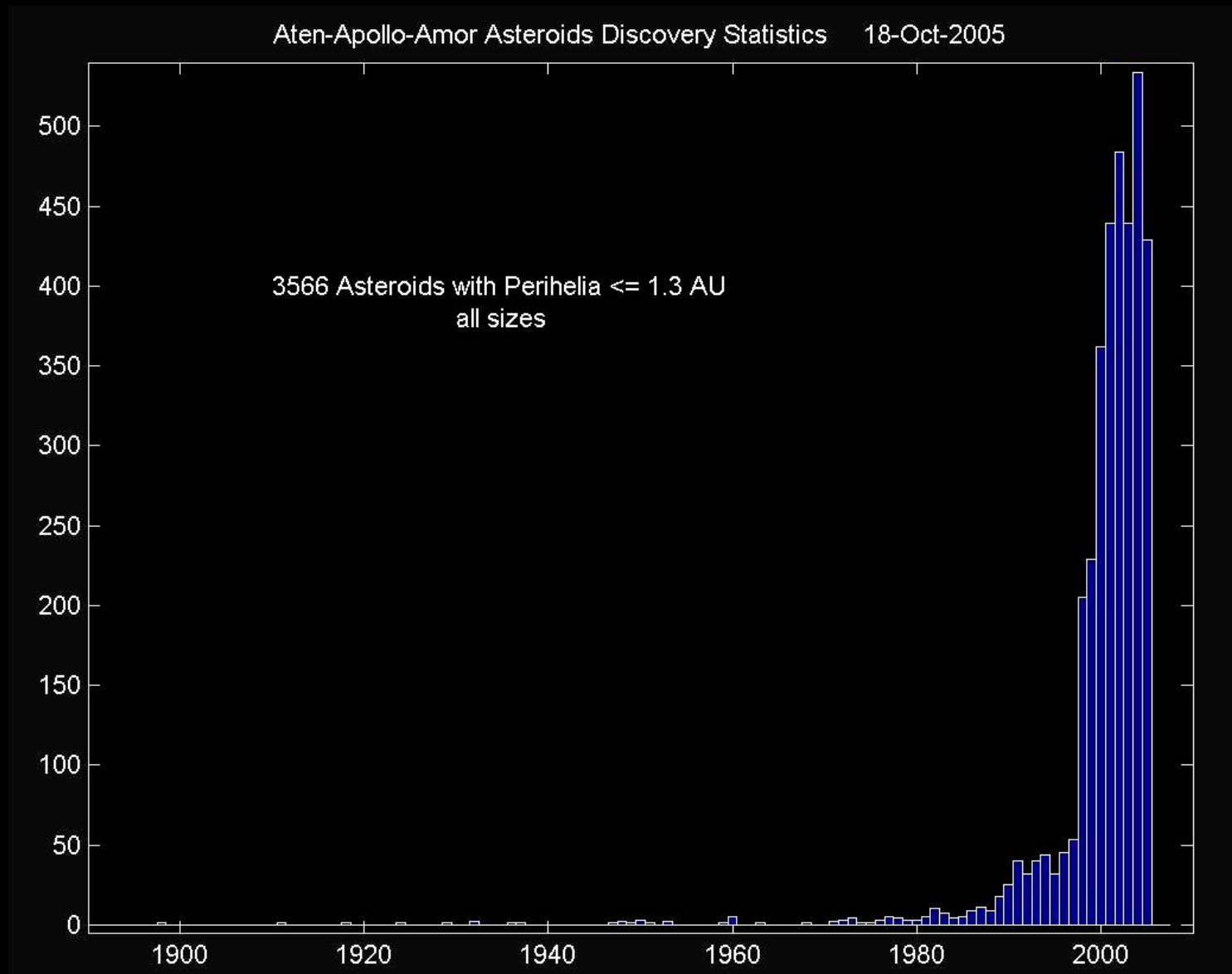
Taille de l'objet	Fréquence (1 par)	Exemple et énergie
<50 m	Fréquent (100 000 tonnes/an)	Combustion dans l'atmosphère
50 m	100 à 1000 ans	Tounguska-12 MT
100 m	1 000 à 100 000 ans	Météor Crater-15 MT
500 m	0,1 à 1 Ma	Mien-11 10 ³ MT
1 km	1 à 20 Ma	Rochechouart-9 10 ⁴ MT
5 km	20 à 100 Ma	Popigai-1 10 ⁷ MT
10 km	100 à 500 Ma	Chicxulub-1 10 ⁸ MT
>20 km	40 à 200 vers 3,9 Ga	?????
>100 km	Probable entre 4,6 et 3,9 Ga	?????
>1000 km	1 ou plus ?	?????

Diamètre du cratère : environ vingt fois le diamètre de la météorite

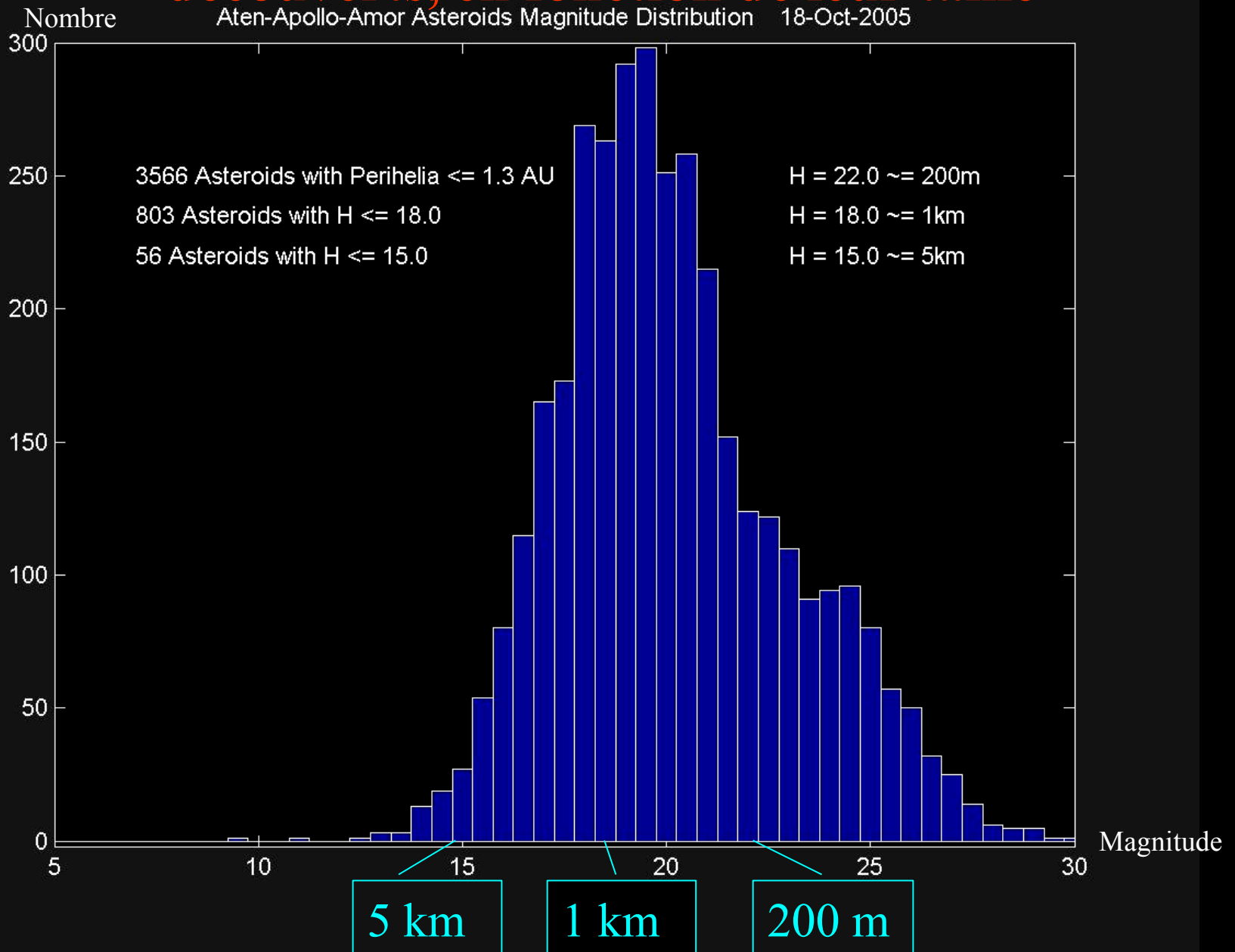
Autre méthode : chercher les astéroïdes géocroiseurs



Le nombre des géocroiseurs découverts chaque année. On en trouve depuis qu'on en cherche !



Le nombre des géocroiseurs (ou quasi géocroiseurs) découverts, en fonction de leur taille



Fri Jan 27 10:03:40 GMT 2006



Une semaine banale, la semaine du 26 avril au 2 mai 2006

1 AU = ~150 million kilometers

1 LD = Lunar Distance = ~384,000 kilometers

Object Name	Close Approach Date	Miss Distance (AU)	Miss Distance (LD)	Estimated Diameter*	Relative Velocity (km/s)
(2006 HS30)	2006-Apr-26	0.0144	5.6	6.6 m - 15 m	8.25
(2001 SG276)	2006-Apr-26	0.0900	35.0	770 m - 1.7	14.69
(2006 GB1)	2006-Apr-27	0.0382	14.8	48 m - 110 m	7.79
(2006 HW5)	2006-Apr-28	0.0456	17.7	36 m - 81 m	8.22
(2004 GU9)	2006-Apr-30	0.1684	65.5	150 m - 340 m	7.00
(2006 HY57)	2006-Apr-30	0.1709	66.5	220 m - 490 m	16.36
(2003 SN214)	2006-Apr-30	0.1779	69.2	69 m - 150 m	15.47
(2006 JE)	2006-May-02	0.0215	8.4	45 m - 100 m	25.62
(2006 HH56)	2006-May-02	0.0317	12.3	41 m - 91 m	15.13
(2000 EM26)	2006-May-02	0.1092	42.5	120 m - 270 m	10.42

Diameter estimates based on the object's absolute magnitude

THE TORINO SCALE

Assessing Asteroid/Comet Impact Predictions

No Hazard	0	The likelihood of collision is zero, or is so low as to be effectively zero. Also applies to small objects such as meteors and bolides that burn up in the atmosphere as well as infrequent meteorite falls that rarely cause damage.
Normal	1	A routine discovery in which a pass near the Earth is predicted that poses no unusual level of danger. Current calculations show the chance of collision is extremely unlikely with no cause for public attention or public concern. New telescopic observations very likely will lead to re-assignment to Level 0.
Meriting Attention by Astronomers	2	A discovery, which may become routine with expanded searches, of an object making a somewhat close but not highly unusual pass near the Earth. While meriting attention by astronomers, there is no cause for public attention or public concern as an actual collision is very unlikely. New telescopic observations very likely will lead to re-assignment to Level 0.
	3	A close encounter, meriting attention by astronomers. Current calculations give a 1% or greater chance of collision capable of localized destruction. Most likely, new telescopic observations will lead to re-assignment to Level 0. Attention by the public and by public officials is merited if the encounter is less than a decade away.
	4	A close encounter, meriting attention by astronomers. Current calculations give a 1% or greater chance of collision capable of regional devastation. Most likely, new telescopic observations will lead to re-assignment to Level 0. Attention by the public and by public officials is merited if the encounter is less than a decade away.
Threatening	5	A close encounter posing a serious, but still uncertain threat of regional devastation. Critical attention by astronomers is needed to determine conclusively whether or not a collision will occur. If the encounter is less than a decade away, governmental contingency planning may be warranted.
	6	A close encounter by a large object posing a serious, but still uncertain threat of a global catastrophe. Critical attention by astronomers is needed to determine conclusively whether or not a collision will occur. If the encounter is less than three decades away, governmental contingency planning may be warranted.
	7	A very close encounter by a large object, which if occurring this century, poses an unprecedented but still uncertain threat of a global catastrophe. For such a threat in this century, international contingency planning is warranted, especially to determine urgently and conclusively whether or not a collision will occur.
Certain Collisions	8	A collision is certain, capable of causing localized destruction for an impact over land or possibly a tsunami if close offshore. Such events occur on average between once per 50 years and once per several 1000 years.
	9	A collision is certain, capable of causing unprecedented regional devastation for a land impact or the threat of a major tsunami for an ocean impact. Such events occur on average between once per 10,000 years and once per 100,000 years.
	10	A collision is certain, capable of causing a global climatic catastrophe that may threaten the future of civilization as we know it, whether impacting land or ocean. Such events occur on average once per 100,000 years, or less often.

Fig. 2. Public description for the Torino Scale, revised from Binzel (2000) to better describe the attention or response that is merited for each category.

L'échelle des risques, dite « Echelle de Turin », combinaison entre la probabilité du choc et la gravité des effets

**C'est sur ces conclusions réjouissantes, et
après 130 diapositives, qu'il est temps de
s'arrêter. Les météorites méritaient bien qu'on
y consacre 1h 30 à 2h.**

Merci de votre

attention

