

# Météorites et Micrométéorites

Les messagères de l'Univers

La mémoire de nos origines

Nos archives



météorite-Gibeon (Namibie)



A sampling of the tiny micrometeoroids collected by Project Stardust.  
Jan 2004-2006, J. Kim, J. Kim, J. Kim, J. Kim, J. Kim, J. Kim

# Sommaire

*Ces voyageuses de l'univers qui viennent « che nou »*

*En astronomie, seule la météorite est palpable !*



- 1 - Qu'elle est leur Histoire terrestre ?
- 2 - D'où viennent-elles ?
- 3 – La Provenance principale
- 4 – Le phénomène (micro)météoritique
- 5 – Les lieux de chutes (micro)météoritiques
- 6 – Comment les reconnaître ?
- 7 – Classification des (micro)météoritiques
- 8 – Quelles sont nos méthodes d'analyses ?
- 9 - Leurs messages
- 10 – Quelques usages
- 11 - Existe-t-il un danger météoritique ?
- 12 - Des programmes de «science participative »
- 13 – Salons / Bourses / Conférences / divers
- 14 – Quelques lectures pour aller plus loin
- 15 – Des sites internet
- 16 - Remerciements

# 1 – Quelle est leur Histoire terrestre ?



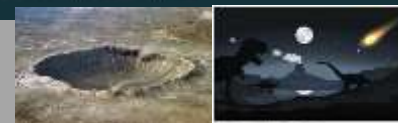
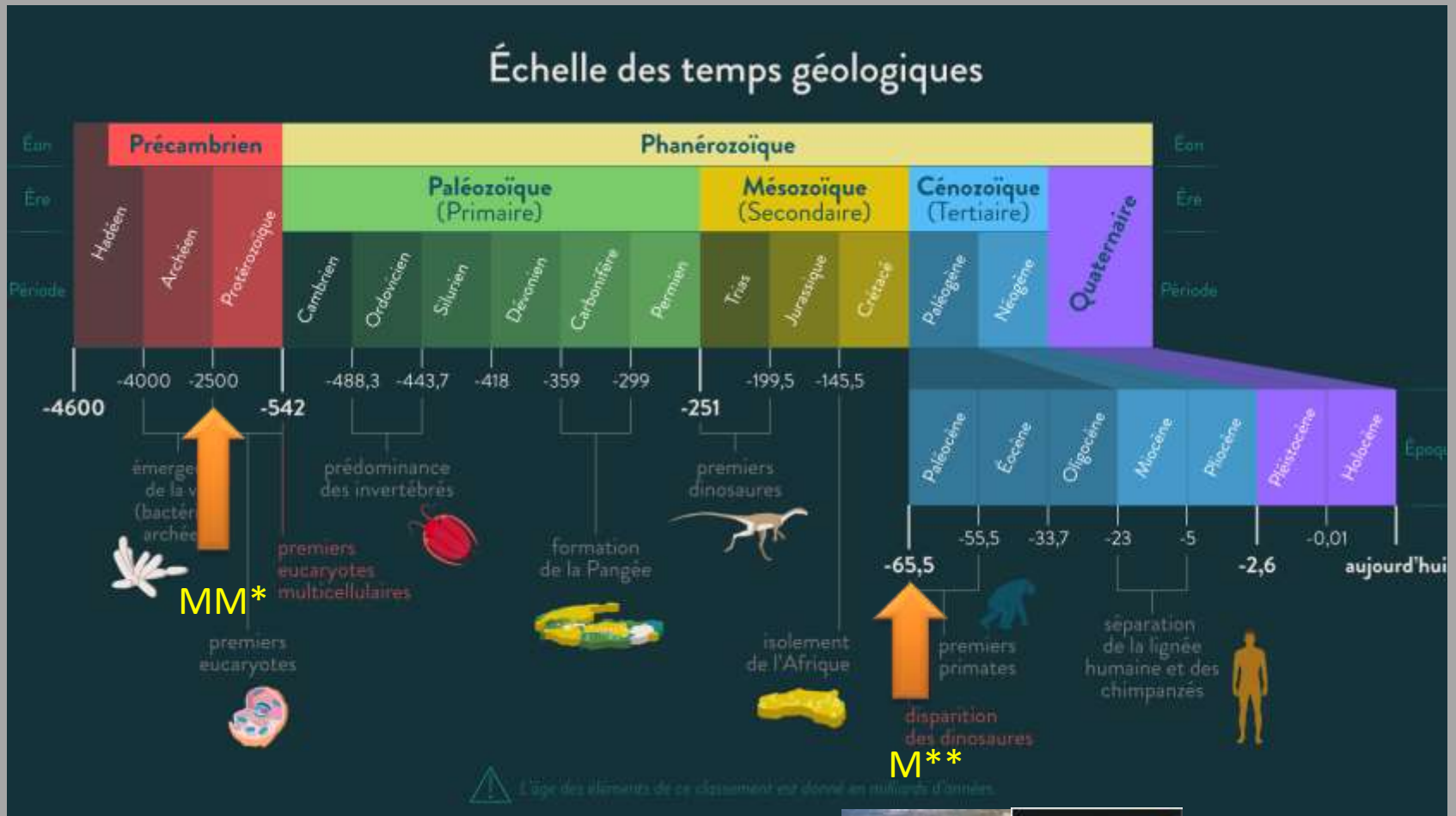
# 1.1 – Dans notre Histoire

- Chute de météorites ou les pluies d'étoiles filantes => présages et croyances
- 1<sup>er</sup> chute enregistrée en France : 7 novembre 1492 à Ensisheim



- L'origine extraterrestre non reconnue : pierres de foudre, éjectas de volcans,...
- 1700 : début des analyses physico-chimiques
- 1794 : EFF Chladni, physicien, suggère que de nombreux petits corps gravitent entre les planètes
- 1803 : JB Biot de la chute de la météorite à Aigle (Normandie) => preuve scientifique d'une origine extraterrestre.
- 20<sup>ème</sup> siècle : cratères lunaires => impacts météoritiques

# 1.2 - Découvertes dans les temps géologiques



(\*) : Ancient Micrometeorites Suggestive of an Oxygen-Rich Archaen Upper Atmosphere (Nature, 2016)

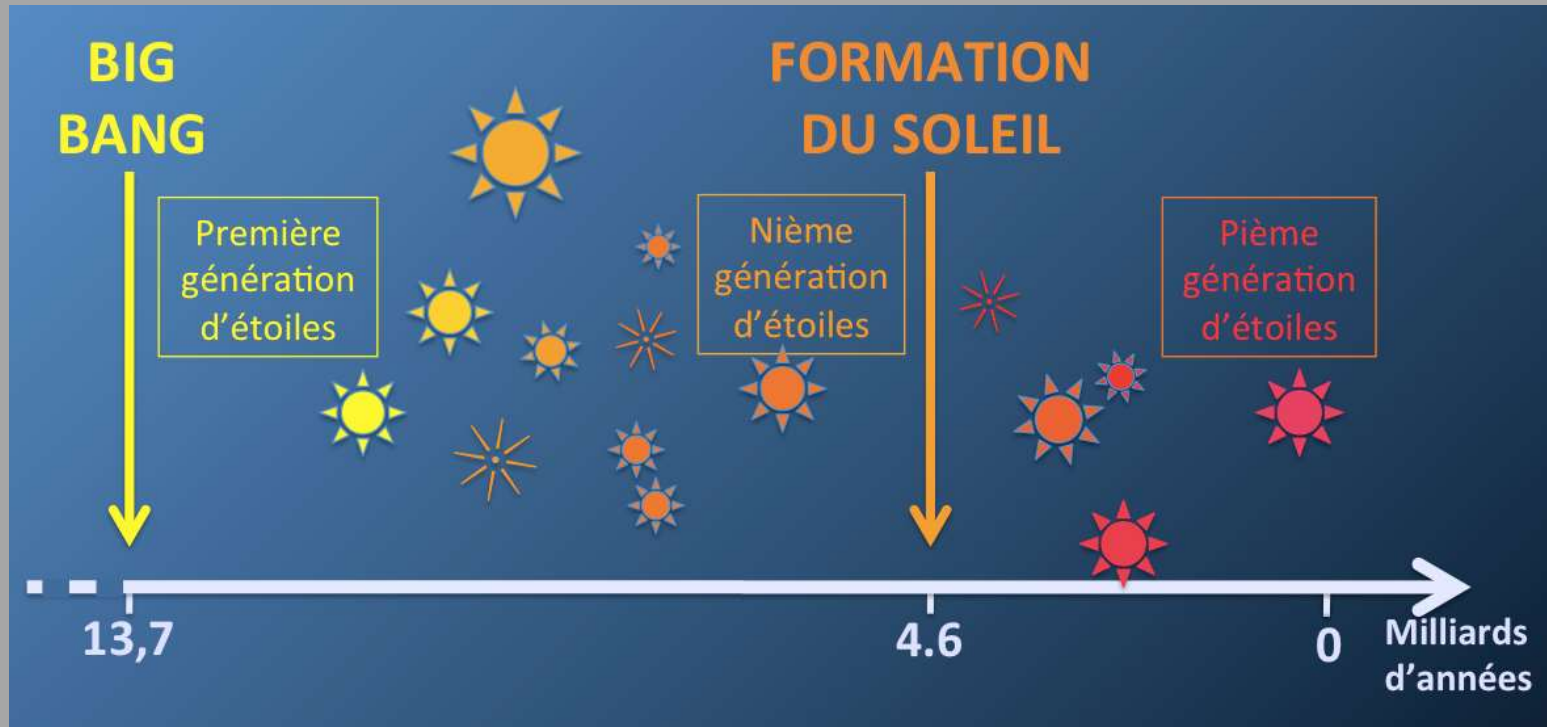
(\*\*) : Le cratère de Chicxulub, péninsule du Yucatan, mesure entre 170 et 300 km. impact d'astéroïde de 10 km de diamètre : extinction dinosaures.



## 2 - D'où viennent-elles ?



## 2.1 - Origine



Mécanisme de création de la matière

Nucléosynthèse : - **Primordiale**

- Stellaire

- Explosive (étoile massive)

- Interstellaire (spallation = rayons cosmiques brisent les noyaux)

## 2.1.a - Formation des éléments

Tableau Périodique des éléments (incomplet)

Éléments produits par le Big Bang																				
par spallation																				
par fusion et réactions d'accompagnement																				
par capture de neutrons																				
1	1																2			
	H																He			
2	3	4													5	6	7	8	9	10
	Li	Be													B	C	N	O	F	Ne
3	11	12													13	14	15	16	17	18
	Na	Mg													Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54		
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe		
6	55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86		
	Cs	Ba	La-Lu Lanthanides	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
7	87	88	89-103																	
	Fr	Ra	Ac-Lr Actinides																	
Lanthanides																				
6	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71					
	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu					
Actinides																				
7	89	90	91	92																
	Ac	Th	Pa	U																



## 2.1.b - Formation des éléments

Tableau Périodique des éléments  
fêté ses 150 ans en 2019

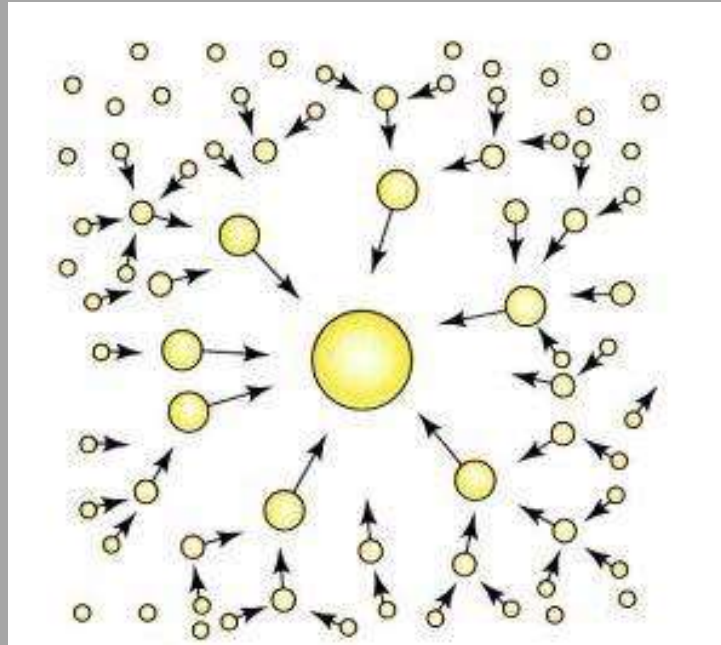
The periodic table shows elements from 1 to 118. Elements highlighted with blue boxes are: H, He, Li, Be, B, C, N, O, F, Ne, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, Ar, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Kr, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, I, Xe, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Fr, Ra, Ac, Th, Pa, U, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, and Lr. A red box highlights U. A champagne bottle is shown above the table.

⇒ Si, Mg, Ca, Fe, Ni, C, O, .....H, He....

*Les étoiles qui « meurent » enrichissent peu à peu le milieu interstellaire en éléments lourds (depuis le carbone jusqu'à l'Uranium)*

⇒ 1<sup>er</sup> étape : Production de molécules : silicates,....

## 2.2 - Accrétion



2<sup>ème</sup> étape : Les premières petites particules (Si,...) s'assemblent par collage (T).

3<sup>ème</sup> étape : Les plus gros objets commencent alors à capturer les plus petits par leur attraction gravitationnelle croissante.

## 2.2 - Accrétion



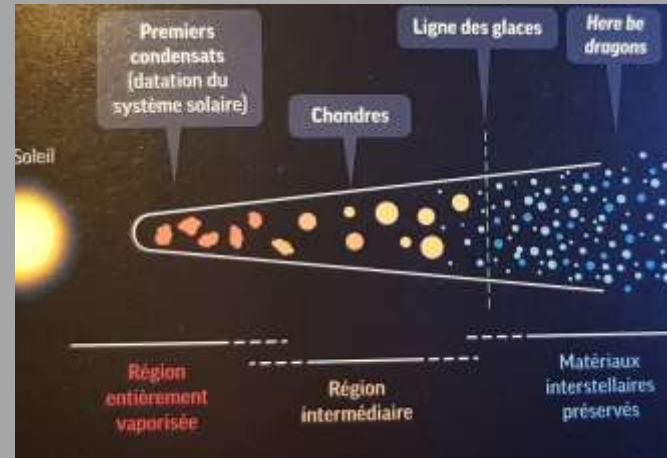
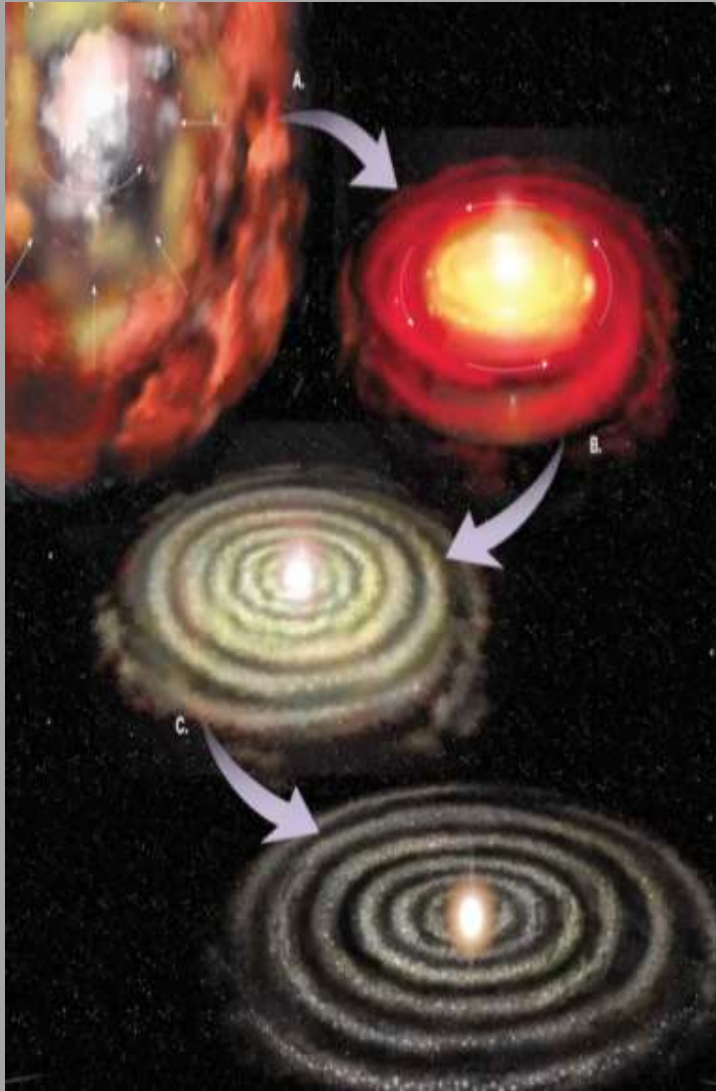
**Bénou** est un astéroïde découvert en 1999 ayant un diamètre d'environ 500 mètres et décrivant une orbite de 1,2 an autour du Soleil. Il s'agit d'un astéroïde géocroiseur Apollon, c'est-à-dire coupant l'orbite de la Terre.

La sonde spatiale OSIRIS-REx lancée en septembre 2016, a atteint Bénou afin de rapporter en 2023 un échantillon de 60 grammes de sol aux fins d'analyse.

## 2.3a - Formation du Système solaire

Supernova

Une jeunesse turbulente



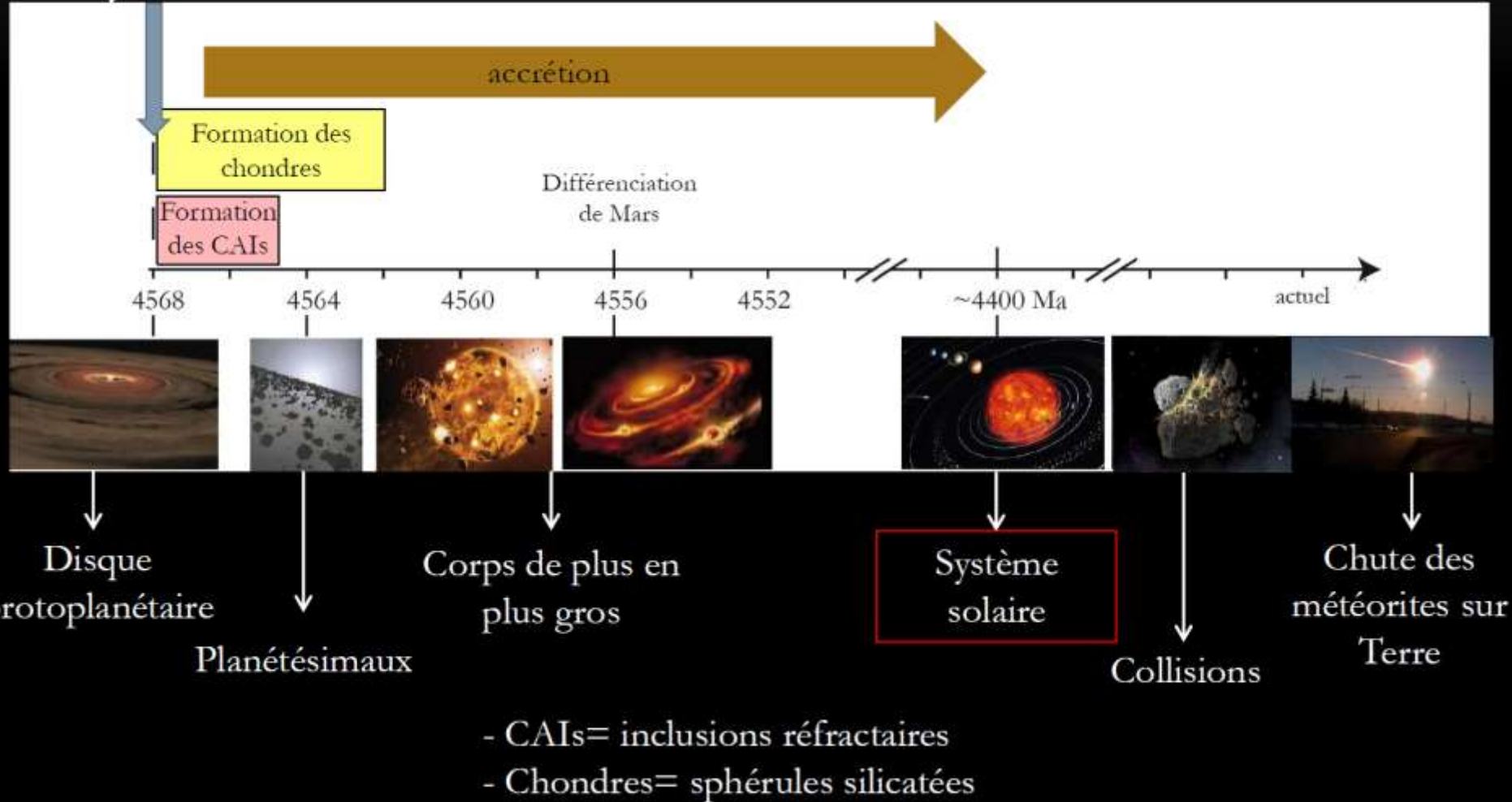
**Processus :** Impacts hyper véloce / fusion / Métamorphisme / irradiation



# Chronologie de la formation et de l'évolution des météorites

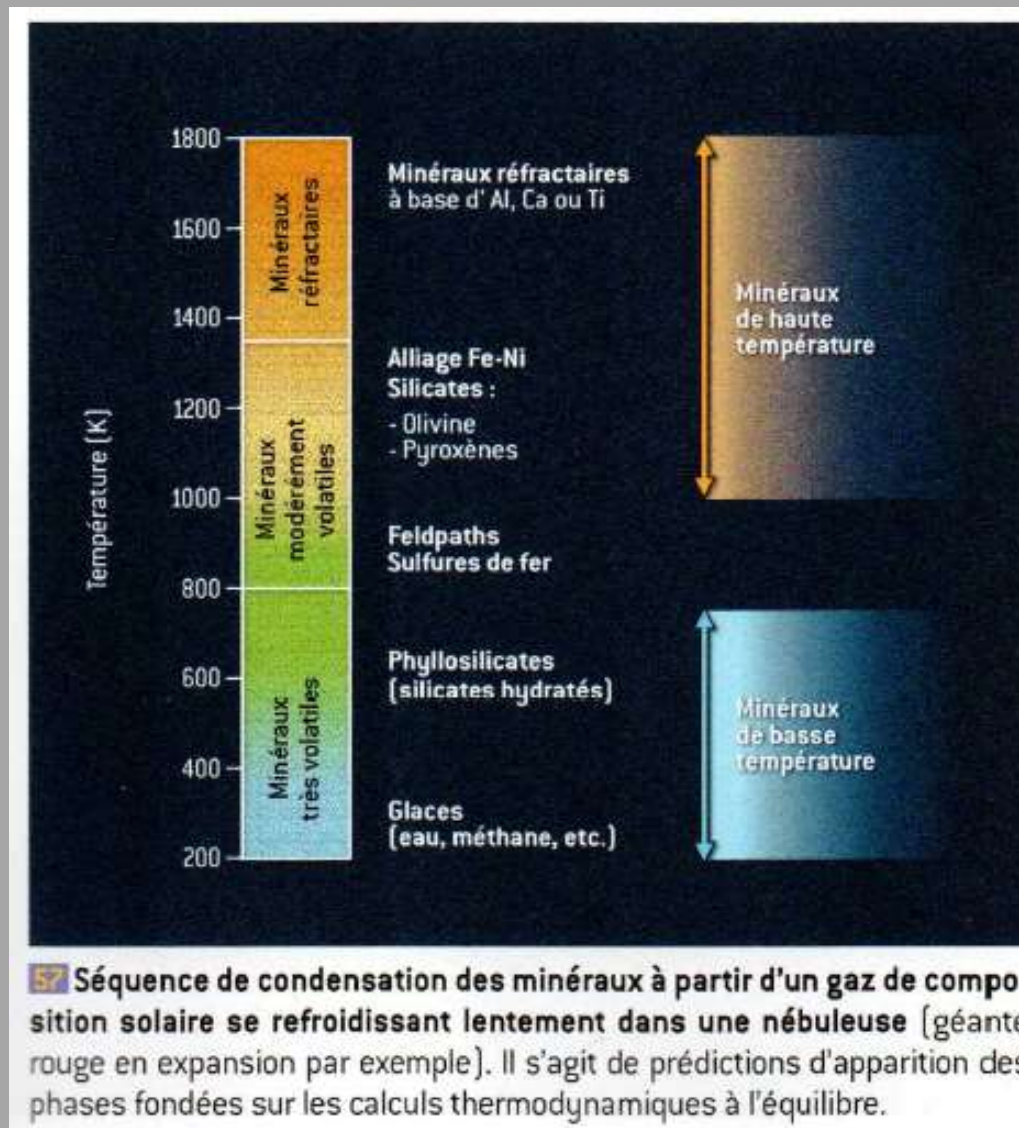
Début de la formation  
du système solaire

Une formation rapide

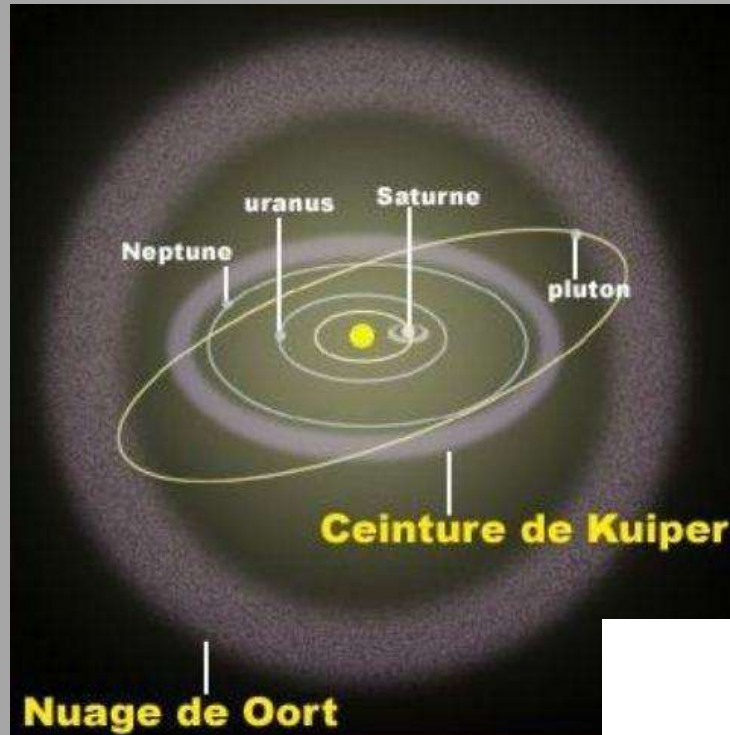




# Ordre d'apparition des minéraux



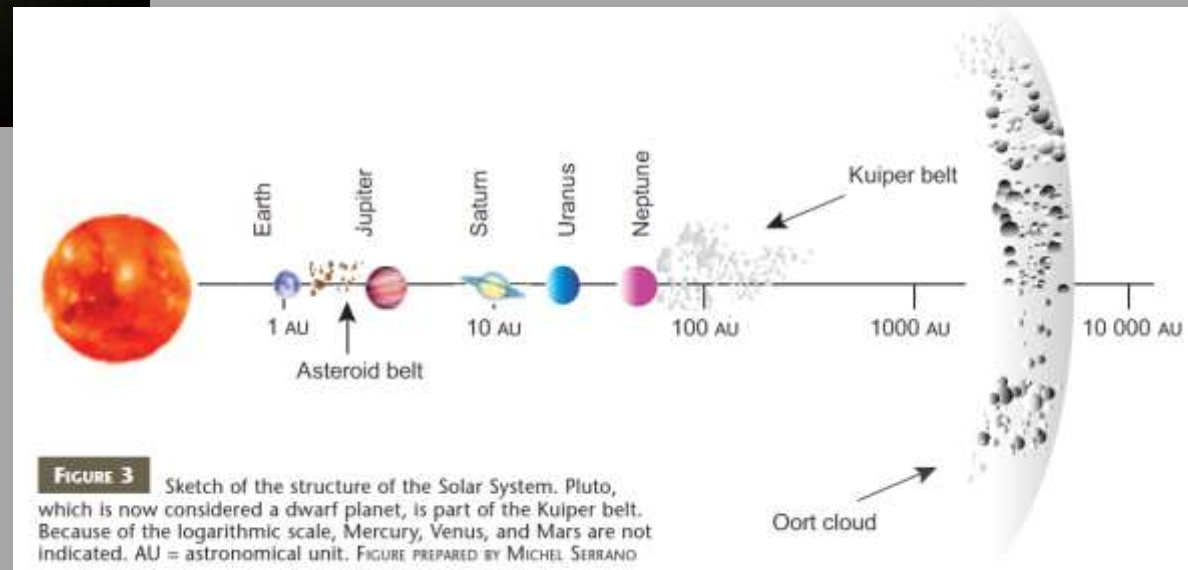
## 2.3b - Formation du Système solaire



Comètes ✎  
Glaces  
Matières solides

Petits corps  
Planètes naines  
Pluton, Makémaké et Hauméa

Glaces  
 $H_2O$ ,  $NH_3$ ,  $CH_4$ , Poussières



Supernova  
Nébuleuse moléculaire

# 3 – Provenance principale

- Matière interstellaire
- Nuage protosolaire
- **Comètes** (Congélateurs contemporains de la formation du système solaire)
- Nuage d'Oort
- Ceinture de Kuiper
- **Ceinture d'astéroïdes** (Collisions => fragments)
- Planètes du système solaire (éjectas)

*Nombreuses observations  
=> reconstituer des orbites  
avant leur entrée dans  
l'atmosphère  
=> orbites elliptiques  
excentriques  
=> l'apogée, se situe entre  
Mars et Jupiter, dans la  
région dite des Astéroïdes*

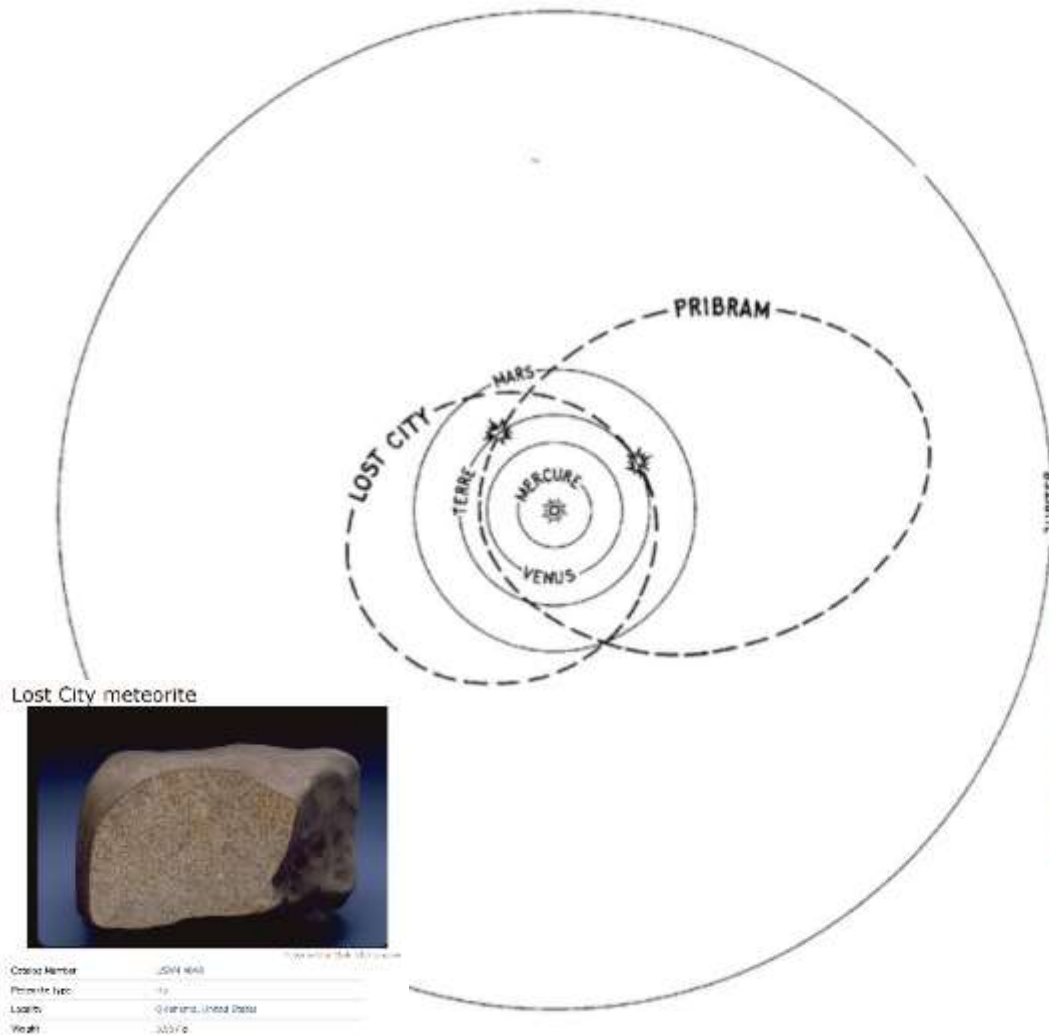
**Terre mais pas que !**



# 3a - D'origine astéroïde

## Les météorites Pibram et Lost-City

La **météorite Příbram** (Chondrite ordinaire H5) est tombée le 7 avril 1959 à l'est de Příbram, ancienne Tchécoslovaquie (aujourd'hui République tchèque)[1]. Quatre morceaux ont été trouvés, le plus grand ayant une masse de 4,425 kilogrammes (9,76 lb) (près du village de Luhý, municipalité de Dolní Hbity).

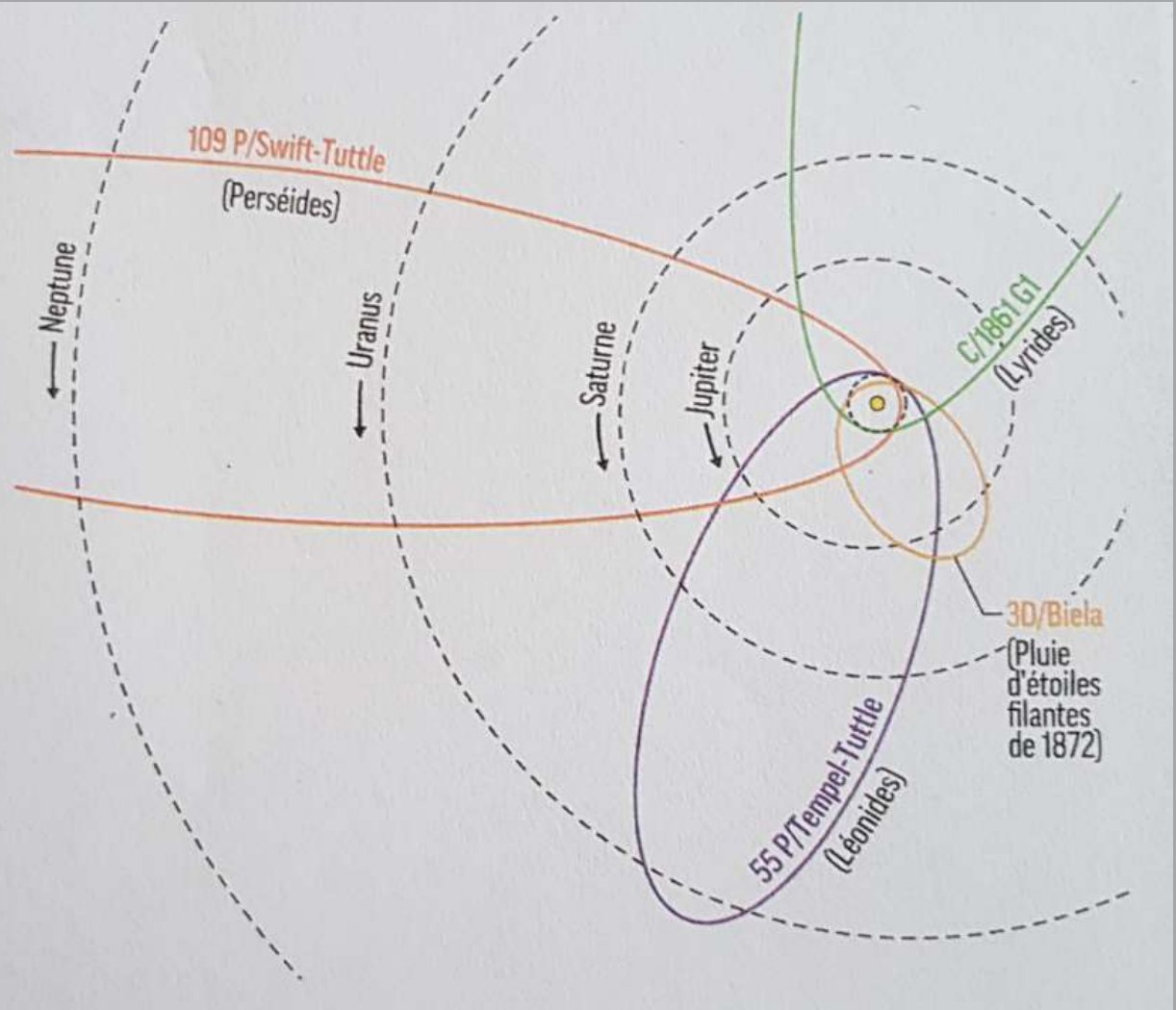


*Reconstitution des orbites des météorites, Pribram et Lost-City, avant leur rencontre avec la Terre. La partie haute de ces orbites, le périhélie, se situe entre Mars et Jupiter, dans la zone des Astéroïdes*



## 3b - D'origine cométaire

**1** L'origine des pluies d'étoiles filantes. Dès le XIX<sup>e</sup> siècle, l'orbite de différentes comètes comme les comètes Tempel-Tuttle et Swift-Tuttle sont associées respectivement aux pluies de météores des Léonides et à celles des Perséides. L'orbite terrestre, en pointillés au centre du schéma, croise toutes ces orbites cométaires. Les pluies de météores ont lieu lorsque la Terre pénètre dans un essaim de débris laissés par les comètes. Chaque essaim est caractérisé par une vitesse de collision des particules allant de 11 à 72 km/s.



Historiquement, le lien entre comète et (micro)météore est affirmé en 1861 (D. Kirkwood)



## 3b - D'origine cométaire

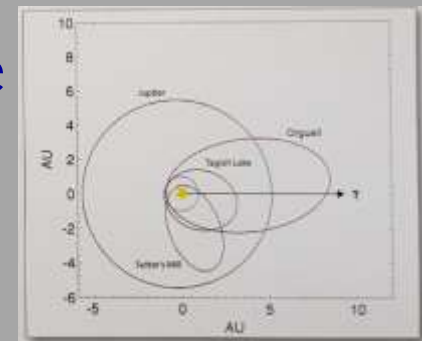
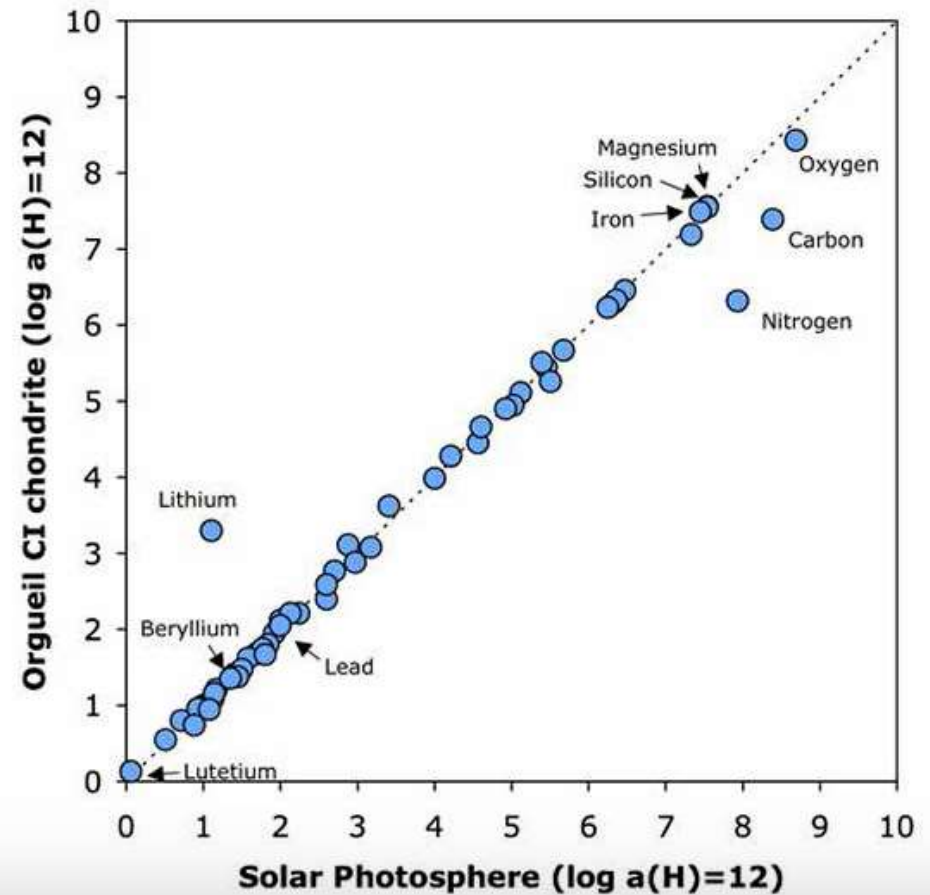
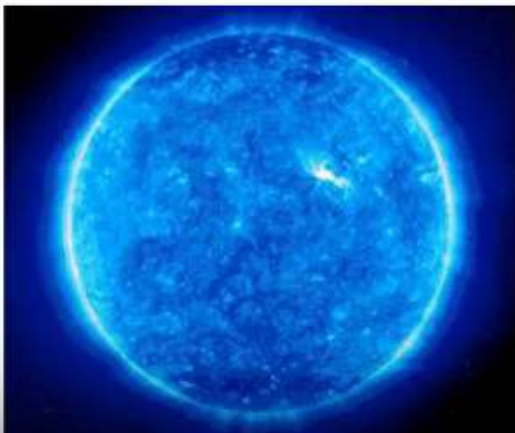
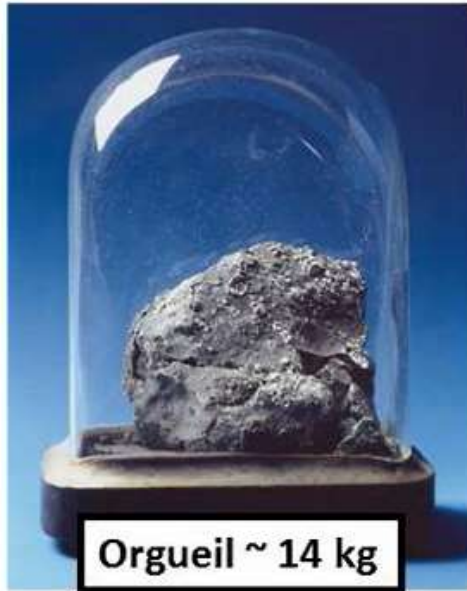


Fig. 4: Orbite de la météorite d'Orgueil pour une vitesse d'entrée atmosphérique de 19 km/s (Gounelle et al. 2006). On a indiqué pour comparaison, l'orbite de deux autres chondrites carbonées, Jupiter-Lake et Sutter's Mill. L'orbite terminale est en bleu.

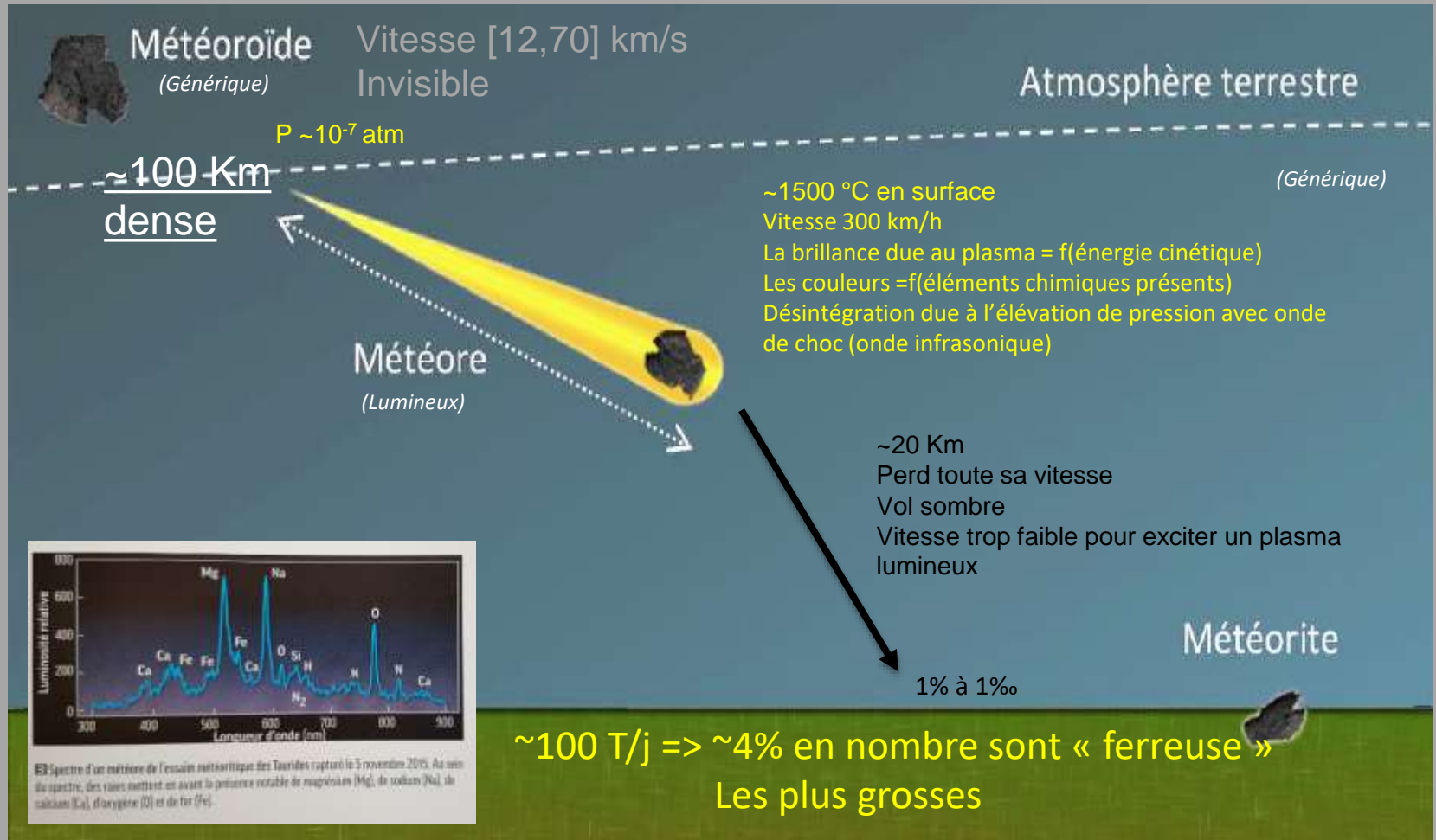


18 mai 1864,  
Météorite d'Orgueil (Tarn et Garonne),  
Chondrite carbonée,  
Composition très proche de la photosphère du Soleil,  
Xe, poussières de diamants, AA,  
Origine cométaire attribuée en 2004 par Pavel Spurný.  
<https://www.youtube.com/watch?v= ofqznb6qrw>  
La météorite d'Orgueil : une chute exceptionnelle de Matthieu Gounelle

# LA COMPOSITION GLOBALE DU SYSTÈME SOLAIRE



# 4 - Le phénomène (micro)météoritique



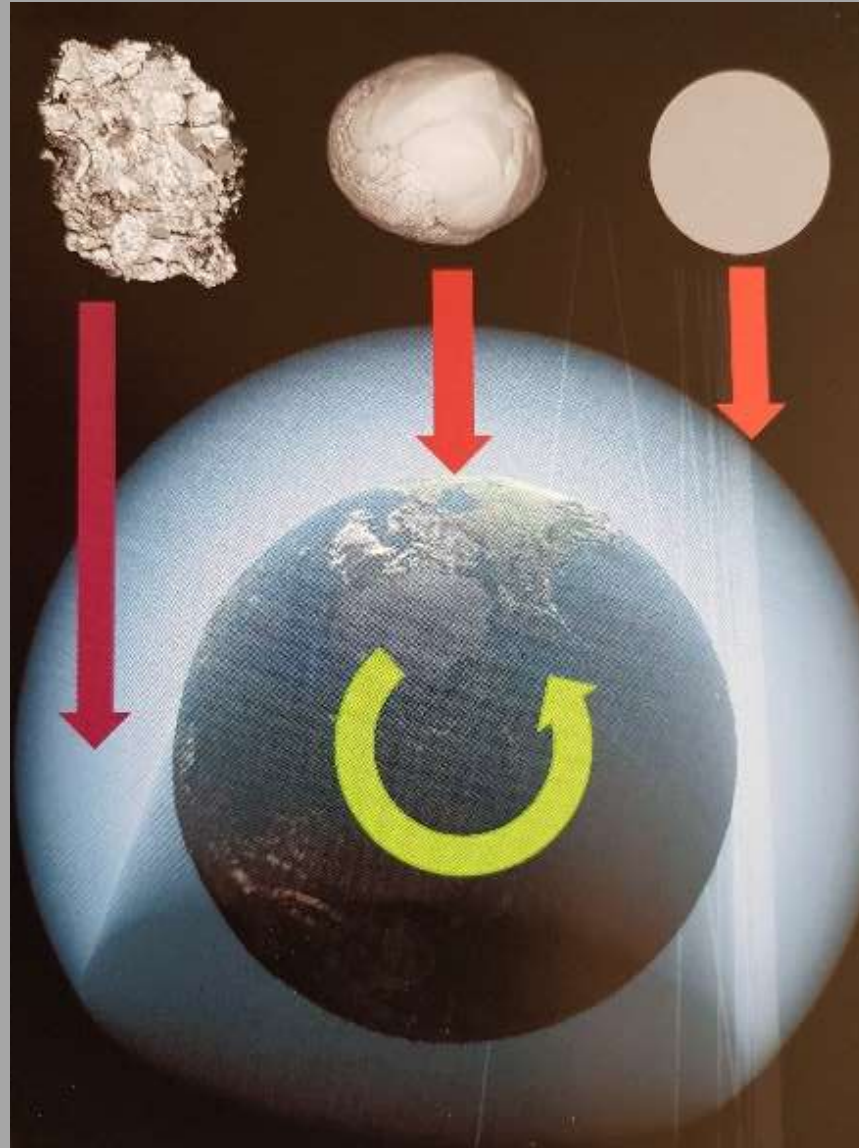
Dénomination = lieu où elle est tombée ex : *Agen, Cañon-Diablo, Mundrabilla...*

# 4 - Le phénomène (micro)météoritique

Entrée dans l'atmosphère terrestre

## Paramètres

- vitesse,
- densité,
- structure
- angle d'entrée dans l'atmosphère





# 4a - Le phénomène – l'effet lumineux



**Tcheliabinsk - Février 2013**  
17 m – 10 000 tonnes



Les Géminides

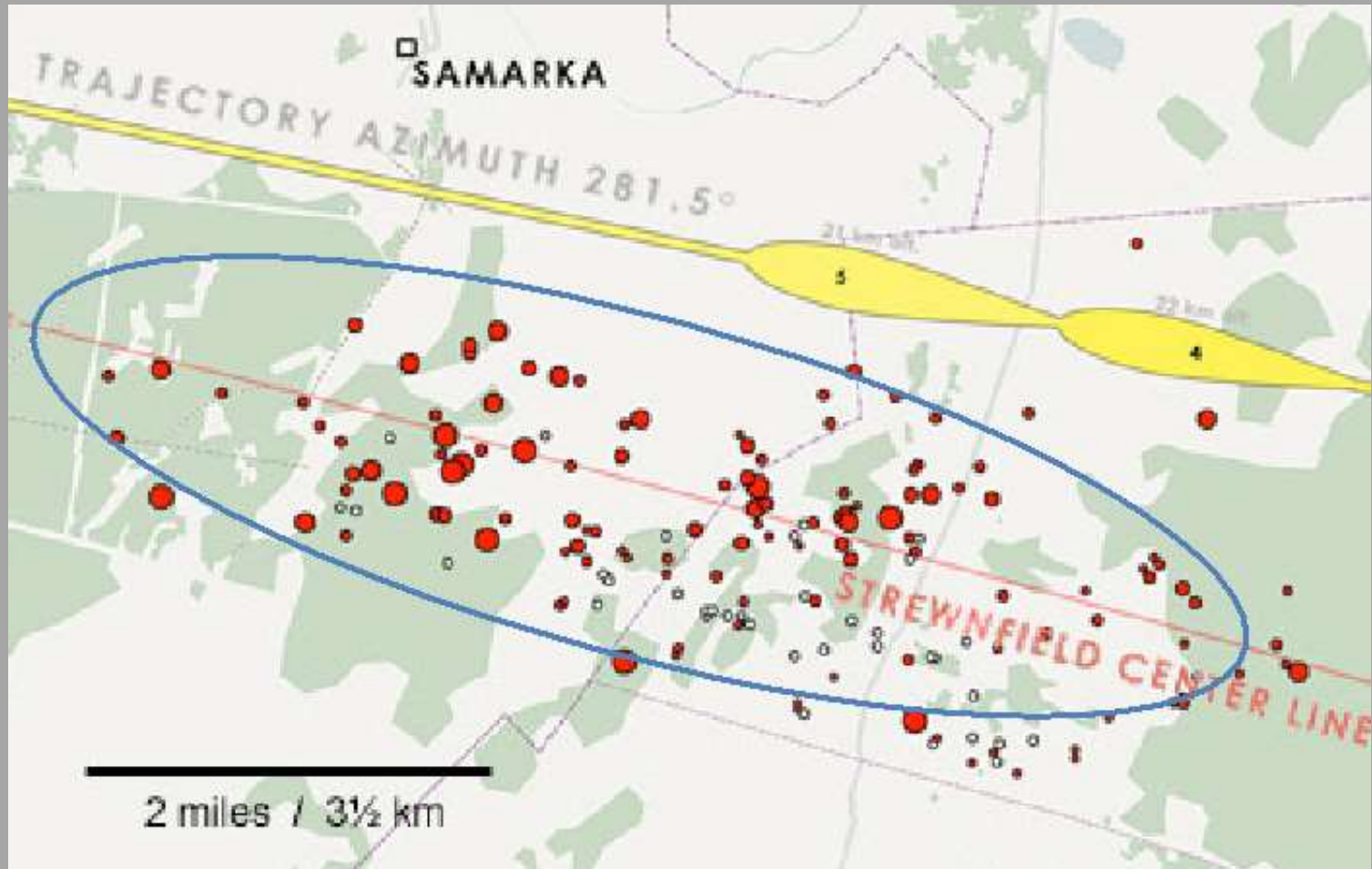
Nom de l'essaim	Date du maximum d'étoiles filantes
Quadrantides	le 3 janvier
Lyrides	le 21 avril
Eta Aquarides	le 4 mars
Bêta Taurides	le 30 juin
Perséides	le 11 août
Orionides	le 20 octobre
Tauride sud	le 5 novembre
Géminides	le 13 décembre
Ursides	le 22 décembre

Chaque année la Terre traverse plus de 300 nuages de poussières plus ou moins denses.



## 4b - Le phénomène – la chute

Champ de dispersion



Quand elle se désintègre => les morceaux retrouvés le sont dans une surface ellipsoïdique

# 4c - Le phénomène – le cratère d'impact



*Meteor Crater, Arizona Ø 1200 m.*



*Tenoumer, Mauritanie, Ø 1800 m.*

- "Cañon-Diablo", météorite métallique
- ~50 000 ans, 100 000 tonnes, diamètre 25 mètres
- Vitesse d'impact 15 kilomètres par seconde.
- Energie dissipée 2 mégatonnes d'équivalent TNT = 150 fois la bombe d'Hiroshima.



L'énergie que renferme une météorite  $E = \frac{1}{2} mv^2$

Les météorites de très grande taille => énergie colossale à cause de leur vitesse (max 70 km/s).

Au point de contact avec le sol :

=> dissipation instantanée de cette énergie,

=> gigantesque explosion

=> volatilise la météorite + forme un cratère

=> roches sont volatilisées, pulvérisées, partiellement fondues et disloquées.

# 4d - Quelques caractéristiques pour les météorites

*Elles se sont formées il y a quatre milliards et demi d'années, en même temps que le système solaire.*

## **NWA 11119**

Mauritanie 4,6 milliards d'années

Une structure porphyritique, avec des gros cristaux provenant d'un magma refroidi lentement.



NWA 11119 est une croûte de fusion de couleur verte claire inhabituelle, une météorite de type achondrite riche en silice et en minéraux.

Crédit : UNM Institute of Meteoritics

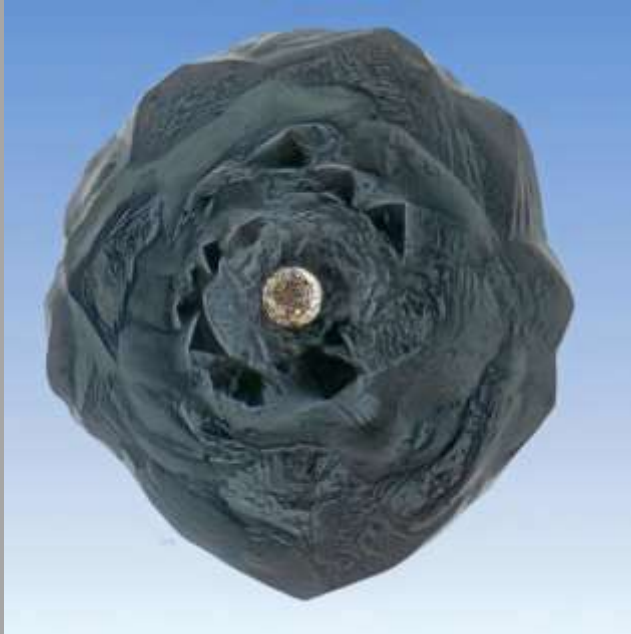
La **météorite d'Hoba**, située sur la ferme d'Hoba West, près de Grootfontein, en Namibie, est la plus grande météorite connue (60 tonnes en un seul morceau) et le plus gros bloc naturel de fer connu à la surface de la Terre.

## **Datation des météorites**

- Âge de formation
- Durée du transfert vers la Terre
- Âge terrestre



## 4d - Quelques caractéristiques pour les micrométéorites



$100 < \text{Taille } \mu\text{m} < 400$

0,000 100 m

0,1 mm



20 €



200 €

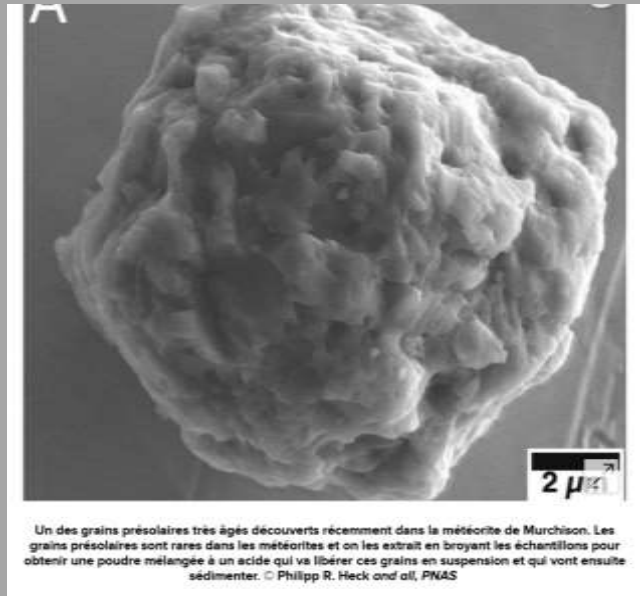
- En quelle quantité : 20 000 t atm./an => 6 000 t /an
- 1 micrométéorite / an /m<sup>2</sup>.



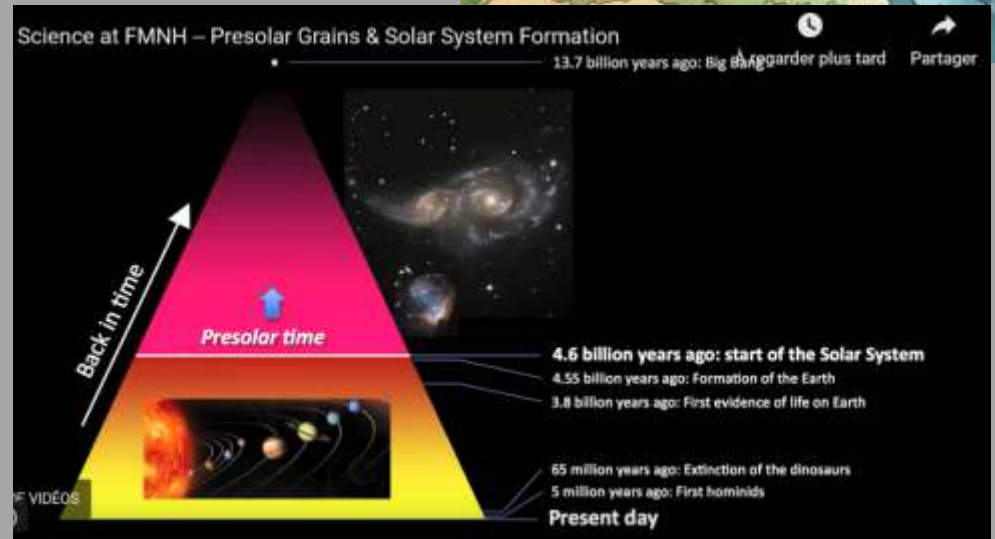
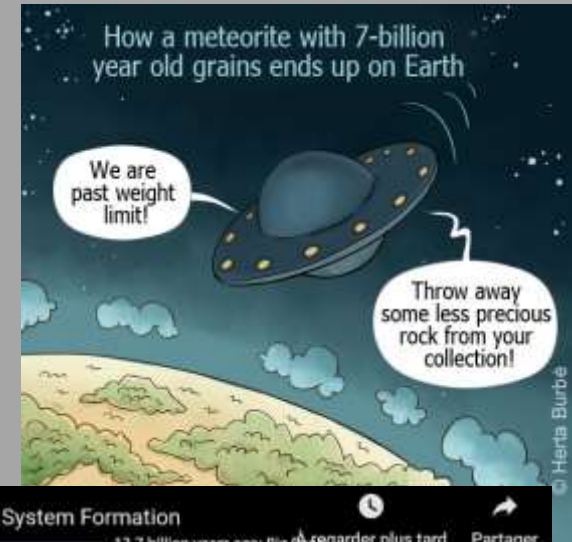
# 4 - Quelques caractéristiques

18 janvier 2020

Grain présolaire datant de 7 mrd d'années => étoile morte avant la naissance du Soleil => trouvés dans la célèbre météorite de Murchison, tombée en Australie en 1969.



- SiC
- Datation au  $^{21}\text{Ne}$





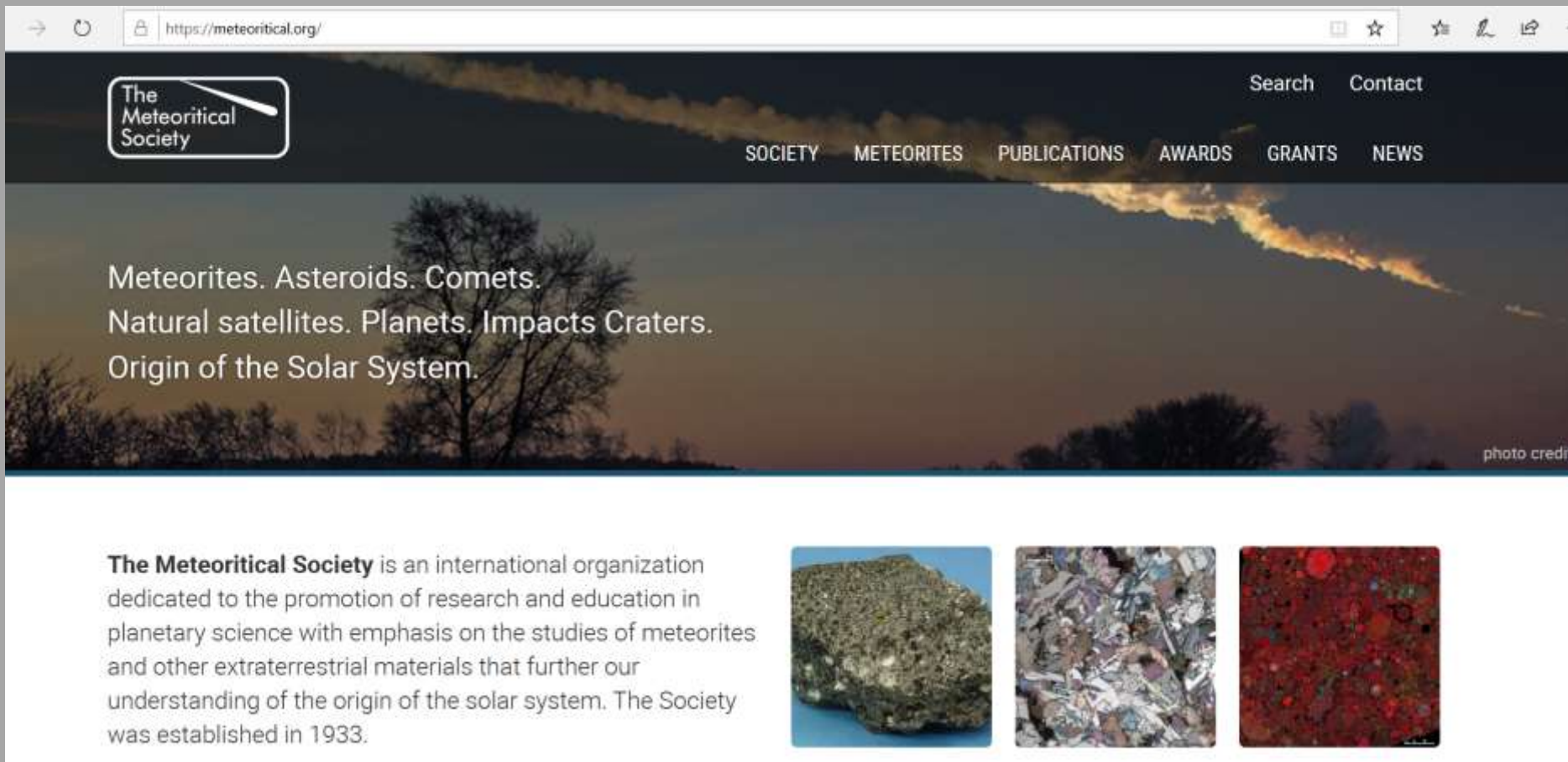
# 5 - Lieux des chutes de météorites en France

Bacqueville (27)  
1999  
Chondrite H6



# 5 – Enregistrement des météorites

28/01/20 : 62 321 météorites classifiées



The screenshot shows the homepage of the The Meteoritical Society website. The browser address bar displays 'https://meteoritical.org/'. The website header features the society's logo on the left and navigation links for 'Search' and 'Contact' on the right. Below the header, a horizontal menu lists 'SOCIETY', 'METEORITES', 'PUBLICATIONS', 'AWARDS', 'GRANTS', and 'NEWS'. The main content area has a dark background with a photograph of a meteor streaking across a twilight sky. Text on the left side of this area reads: 'Meteorites. Asteroids. Comets. Natural satellites. Planets. Impacts Craters. Origin of the Solar System.' Below this, a paragraph describes the society's mission. To the right of the text are three small images: a dark, irregular meteorite specimen; a microscopic view of a mineralogical sample showing various crystal structures; and a microscopic view of a sample with a prominent red color.

**The Meteoritical Society** is an international organization dedicated to the promotion of research and education in planetary science with emphasis on the studies of meteorites and other extraterrestrial materials that further our understanding of the origin of the solar system. The Society was established in 1933.

# 5 – La chute silencieuse des micrométéorites



**On les trouve dans :**

- Les couches sédimentaires,
  - Les sédiments des abysses,
  - Les sédiments des lacs,
  - Dépôts fluviaux,
  - Cryoconite,
  - Glaciers
- Toitures



Méthode de « récolte »  
sur demande @SAB Anne-Laure Gérôme

## 6 - Comment les reconnaître ?



Météorite



Micrométéorite



# 6.1 - Comment les reconnaître ?



## Visuellement

Une météorite a toujours une croûte de fusion dont l'aspect est uniforme (mis à part les éventuels petits grains de métal).

Une roche qui semble lourde

Surfaces planes le plus souvent

Angles émoussés

Renforcements, empreintes d'écoulement (rentrée dans l'atmosphère)

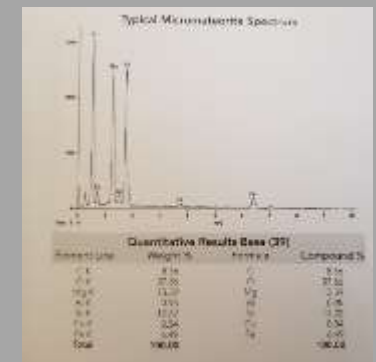
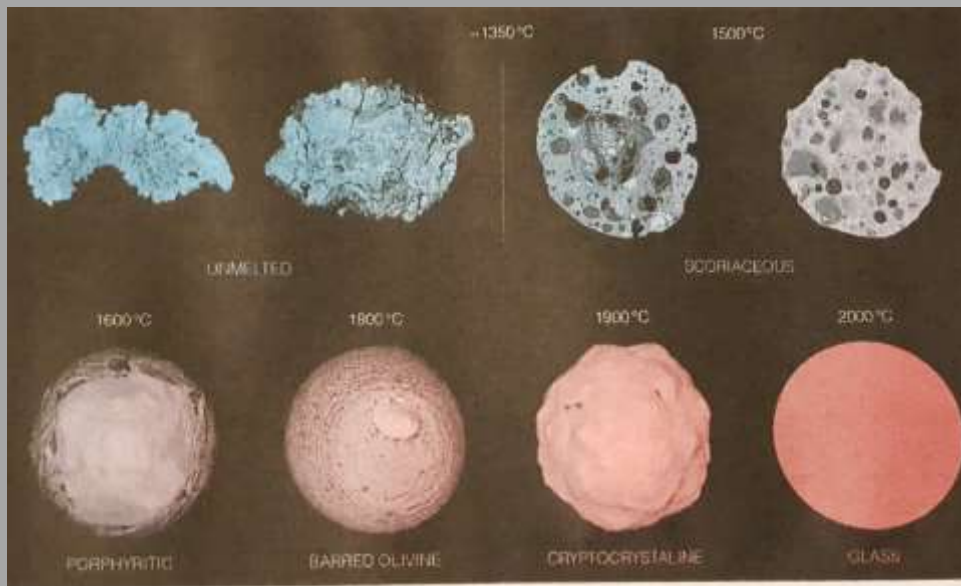
## Scientifiquement

Analyses physico-chimiques / isotopique

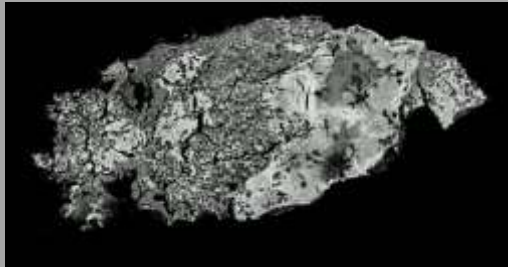


## 6.2a - Comment reconnaître les micrométéorites ?

- 1/3 fondent totalement ou partiellement => sphérules cosmiques,  
=> fusion => différenciation => recristallisation
- 1/3 montrent des signes de chauffage intense => poreuse par perte de gaz, magnétite
- 1/3 pas de signe de chauffage => structure très poreuse et très fragile



## 6.2b - Comment reconnaître les micrométéorites ?

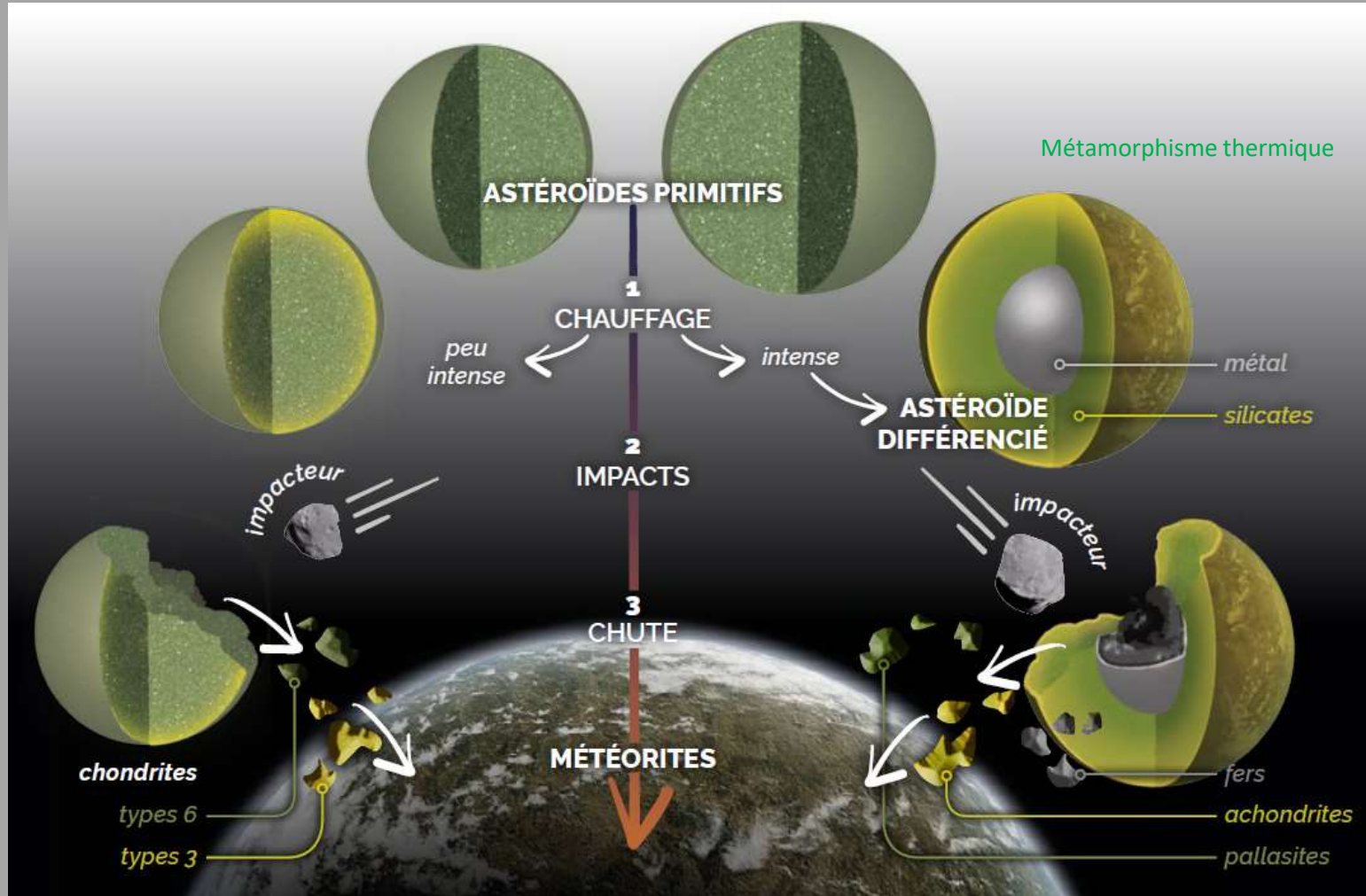


# 7 - Classification des (micro)météorites





# 7a - Classification des météorites - Origine



Pierreuses (petit grains métalliques)/ Mixtes (à part égales) / Métalliques (Fe + Ni)

# 7a<sub>1</sub> - Classification des météorites – Processus

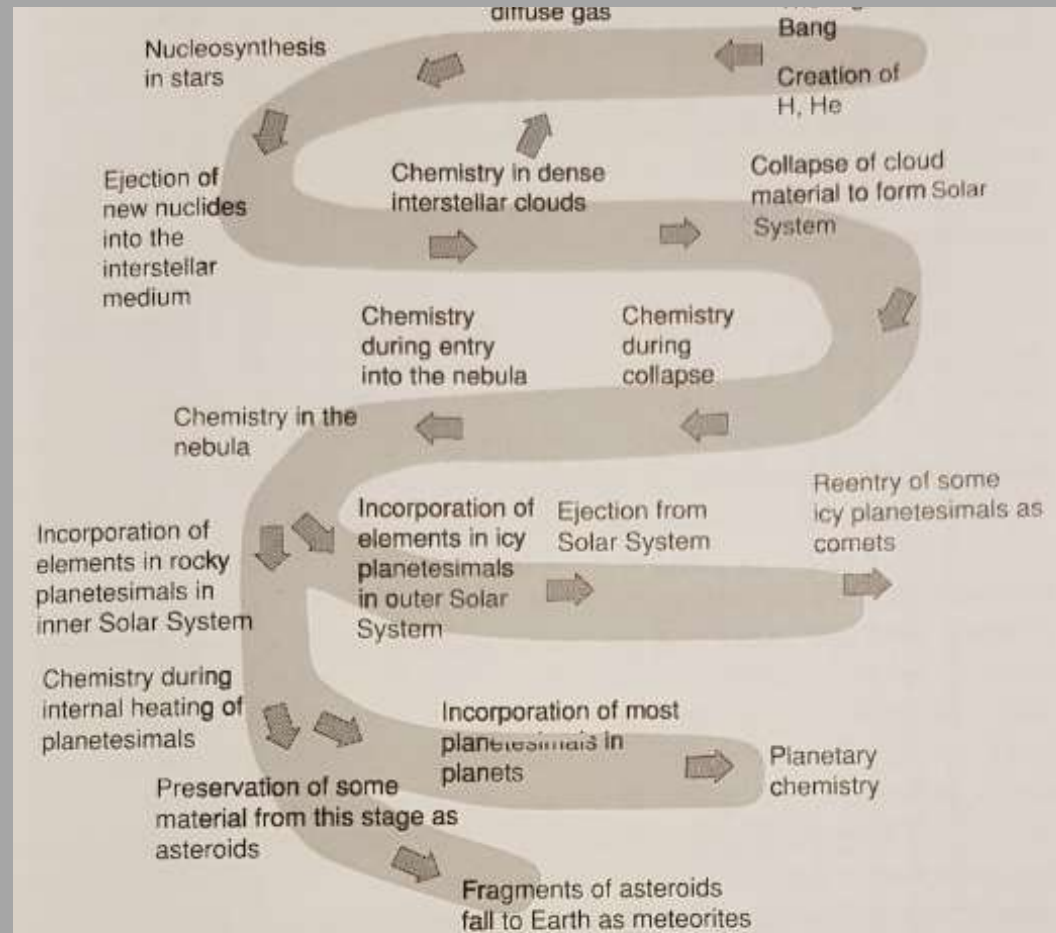
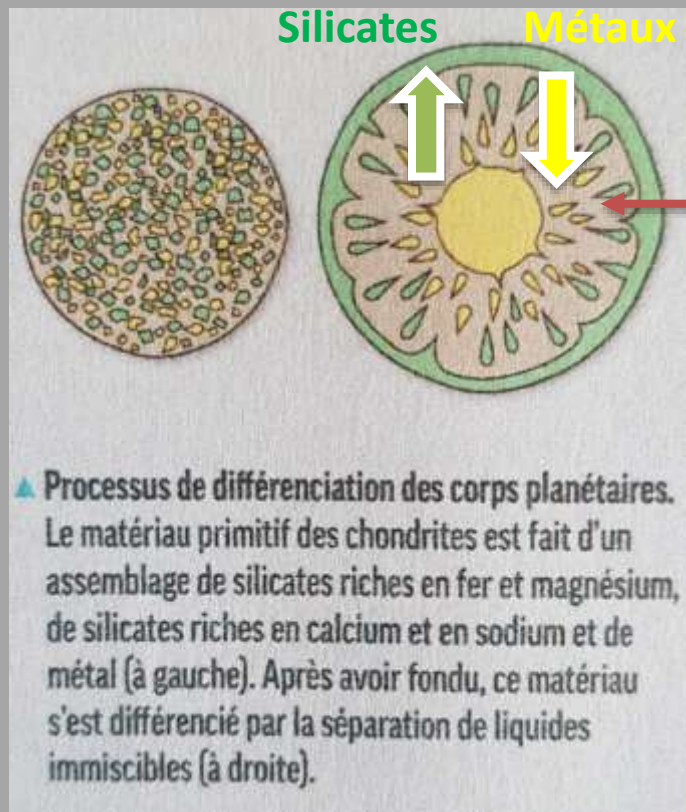


Figure 1.7 Schematic diagram describing all the processes that have potentially affected the composition and texture of meteorites, from the Big Bang, through the formation of interstellar clouds and stars, to nucleosynthesis (which occurs both in stars and subsequently during their explosion as supernovae). Supernova events eject elements into the interstellar medium. Fragmentation of the interstellar cloud results in the formation of planetary precursor chunks of material (planetesimals), which ultimately form comets, asteroids, and planets (after Wood and Chang, 1985).

## 7b - Qu'est ce que le processus de différenciation ?



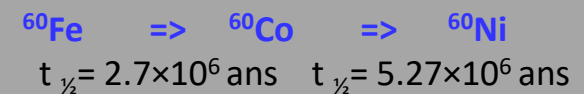
f (Température, gravité)



Radioactivité héritée du nuage protosolaire



$$t_{1/2} = 7.17 \times 10^5 \text{ ans}$$



$$t_{1/2} = 2.7 \times 10^6 \text{ ans} \quad t_{1/2} = 5.27 \times 10^6 \text{ ans}$$

Eléments de courtes périodes dégageant bcp de chaleur

# 7c - Classification des météorites – Classement simple

Comparaison entre le nombre de chutes observées (fréquence) et le poids total des fragments récupérés

	fréquence	poids
météorites pierreuses	95.6 %	33.7 %
météorites métalliques	3.2	64.7
météorites mixtes	1.2	1.6

Chondres  
0,1 à 1mm  
Formées par cristallisation rapide de la forme liquide



- Olivine,
- Pyroxènes
- Plagioclases

Fragments de noyaux planétaires



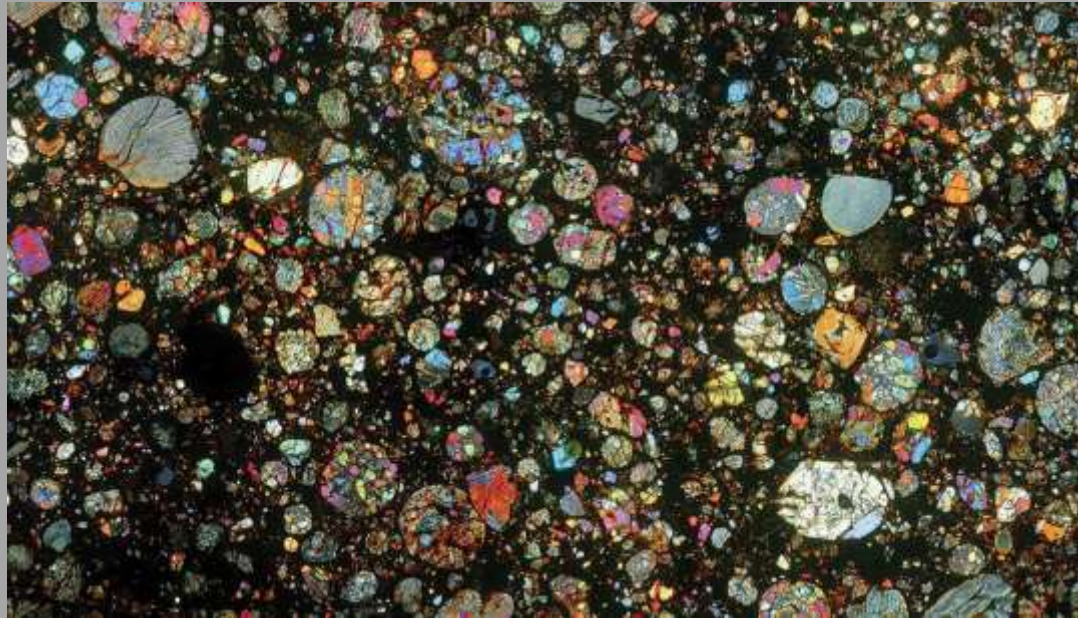
Empreintes de doigts (Regmaglyptes)





## 7c - Classification des météorites – Zoom sur les chondres

Lame mince d'une chondrite en lumière polarisée analysée



Cristallisation, en état de microgravité, de gouttelettes de magma silicatés *riches en Fe et Mg*

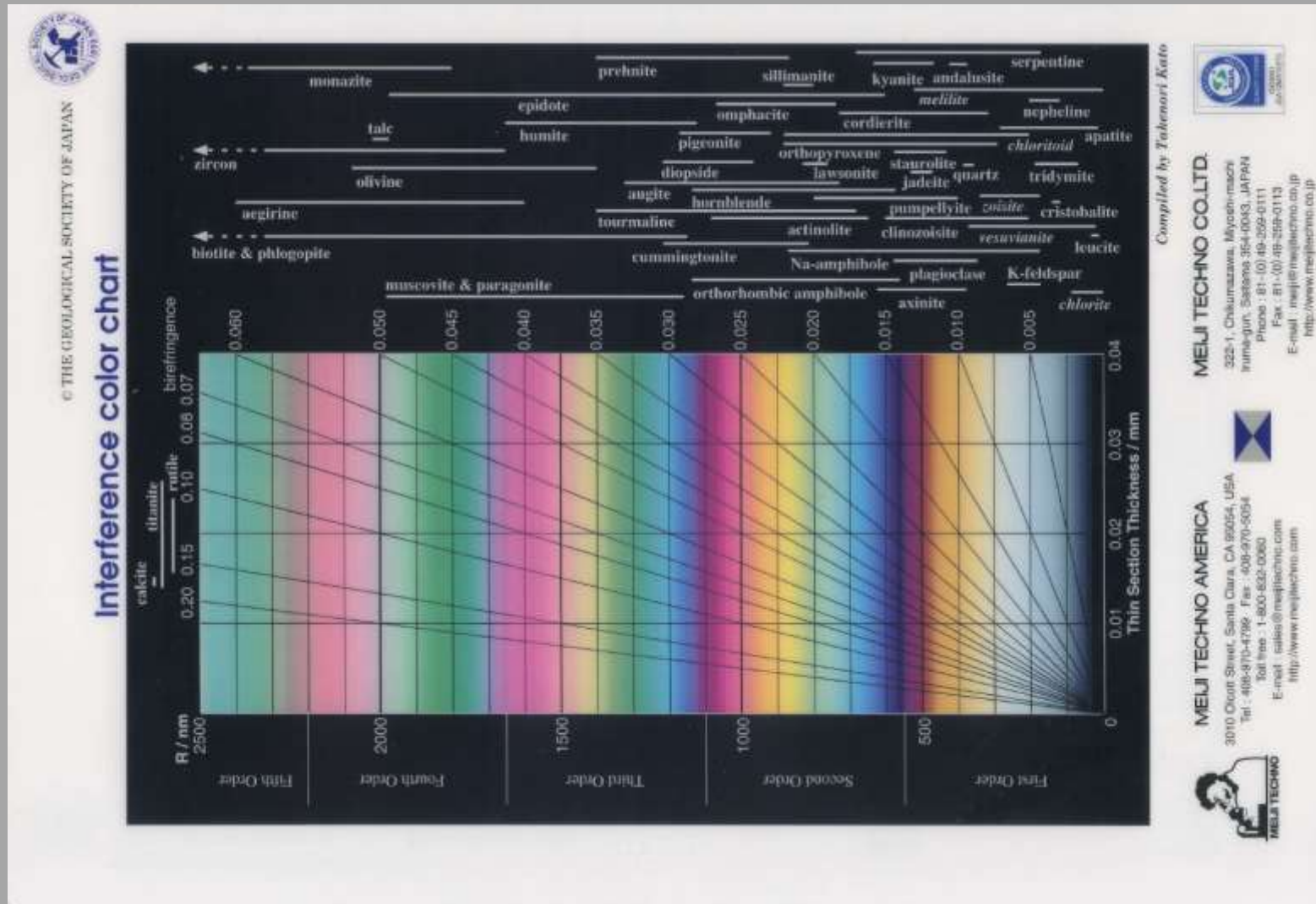
*Chondres = Sphérules de 0.1 à quelques mm de diamètre,*

*Pour cette raison on les appelle chondrites.*

*Structure en sphérules est totalement inconnue dans les roches terrestres.*

# 7c - Classification des météorites – Zoom sur l'identification des minéraux

Tableau pour identification des minéraux sous lumière polarisée analysée

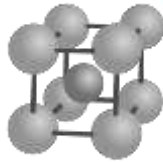


# 7c - Classification des météorites – Zoom sur les météorites de Fer (octaédrite)

Obtenues par un refroidissement très très long  $\sim 1^\circ\text{C} / \text{Ma}$   
Ne peut être reproduit en laboratoire

Ni 10% (5%)

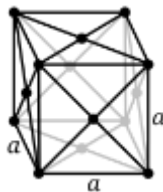
Réseau CC



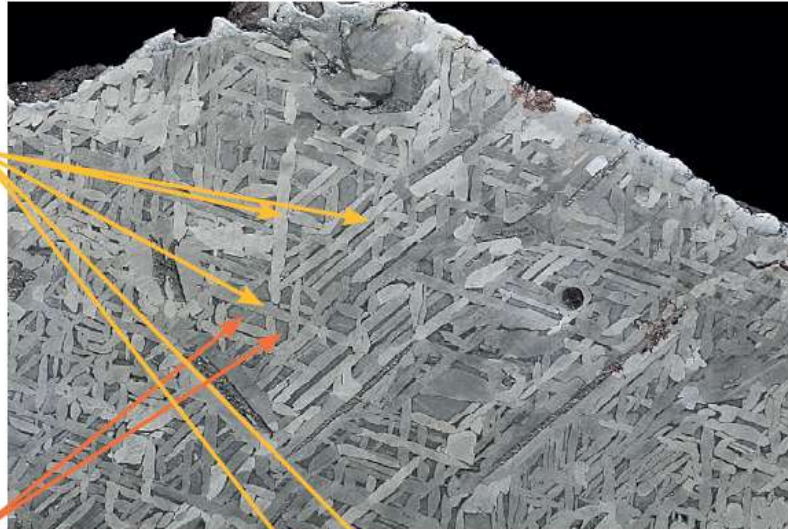
Alliage  
kamacite

65% >Ni >10%

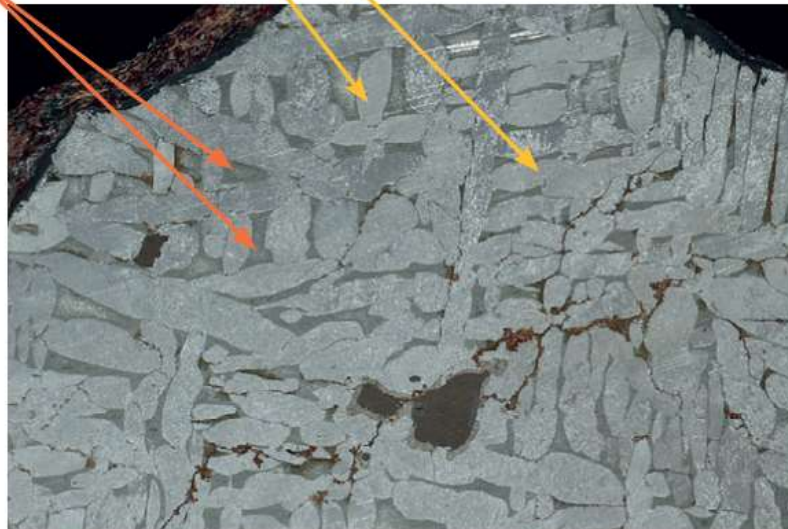
Réseau CFC



Alliage  
taénite



Gros grains long  
de kamacite



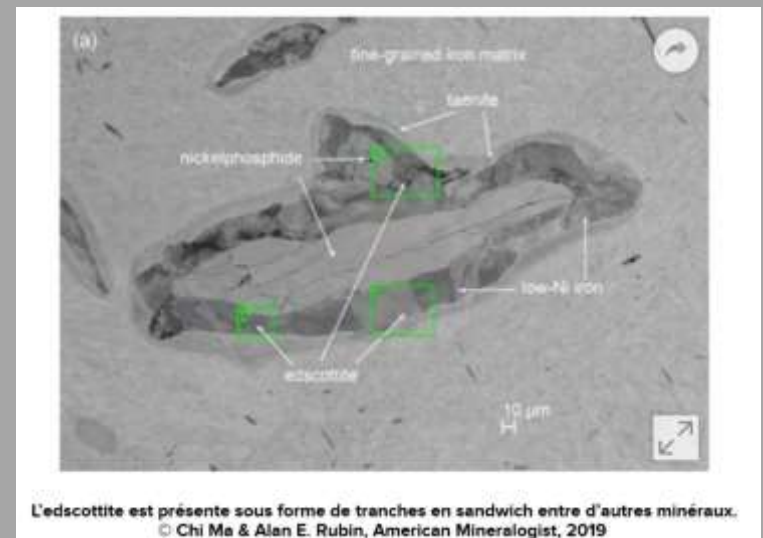
Les bandes de Widmanstätten  
diminuent avec l'enrichissement  
en nickel de la météorite



# Météorite de Wedderburn

<http://www.geologypage.com/2019/09/scientists-confirm-the-discovery-of-a-mineral-never-before-seen-in-nature.html>

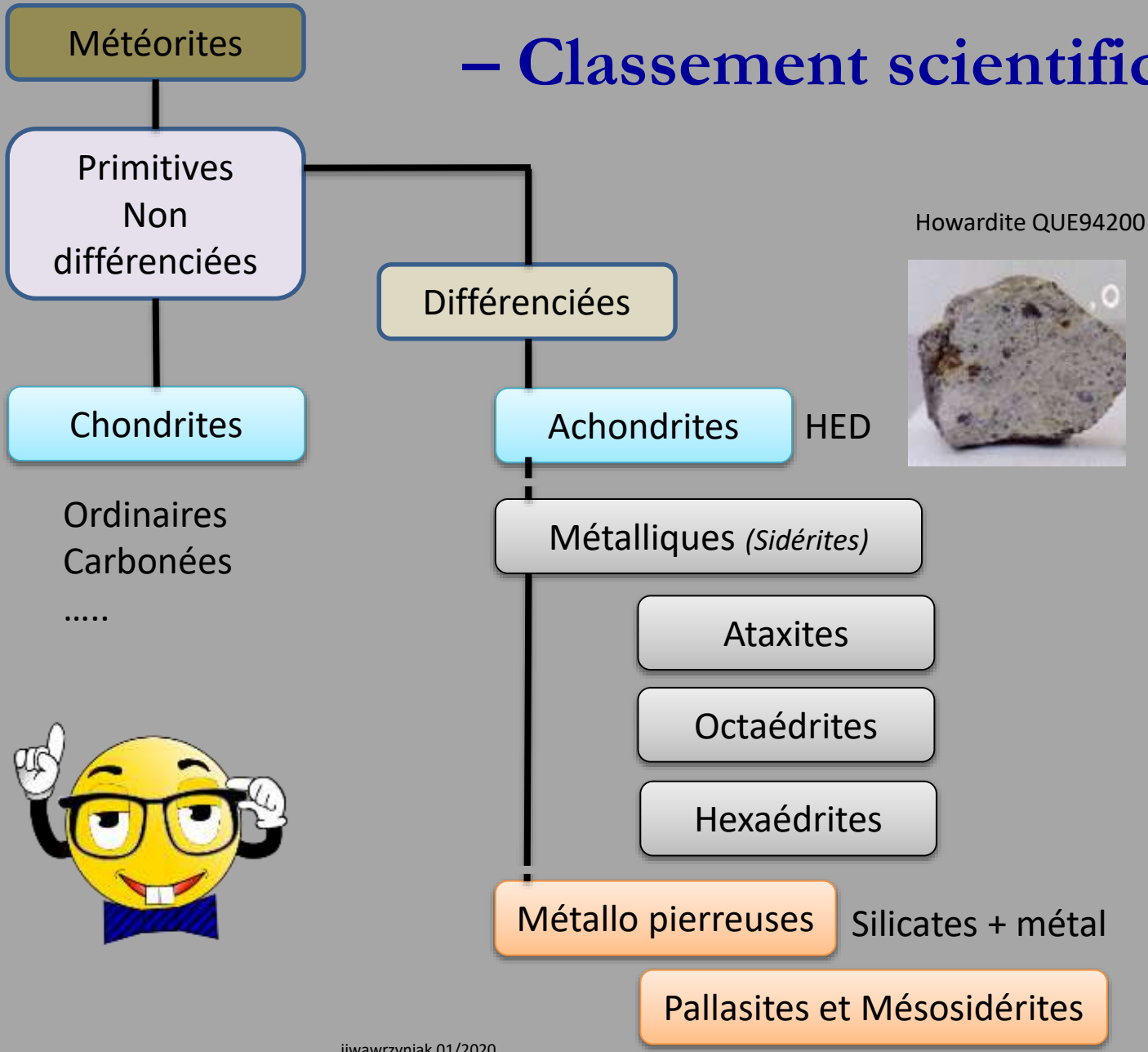
En 2019, il a été annoncé que de l'edscottite ( $\text{Fe}_5\text{C}_2$ ), un minéral jusque là introuvable dans la nature, avait été identifié dans un échantillon de la météorite Wedderburn. On pense que le minéral a été créé au cœur d'une autre planète.



Edscottite, du nom du découvreur de la météorite, le cosmologiste Edward Scott



# 7c - Classification des météorites – Classement scientifique



# 7d - Classement des micrométéorites

Classement des MM par ordre d'abondance :

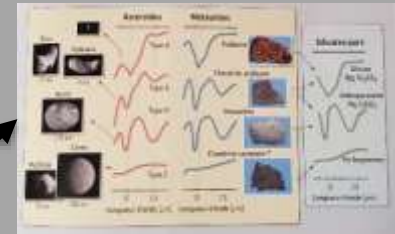


- **S-Type (Silicate)** : 95% de toutes les sphérules
  - Sous classement de formation avec l'augmentation de la température :
    - Porphyritique Po
    - Olivine rayées BO
    - Cryptocristalline CC
    - Vitreuse V
- **I-Type (Iron)** : 4%, elles sont composées de métal natif, bille de Fe/Ni, Wüstite (FeO), Magnétite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)
- **Fer/silicate** <1%
- **G-Type** : le reste

2007 The classification of micrometeorites Matthew Genge, Matthieu Gounelle  
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1945-5100.2008.tb00668.x>

# 8 - Quels sont nos moyens d'analyses ?

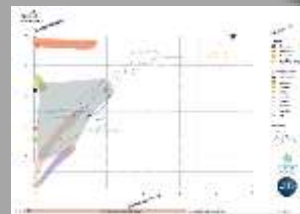
Utilisation d'un faisceau d'informations  
Méthode de la géologie, géochimie, astrophysique



- Spectre de réflectance (fraction de la lumière IR incidente)
- lame mince en lumière polarisée
- Abondance comparées de gaz
- Densité / Conductivité /  $\chi_m$

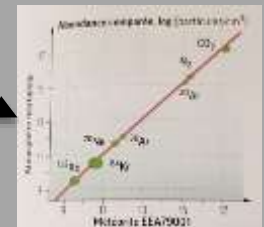
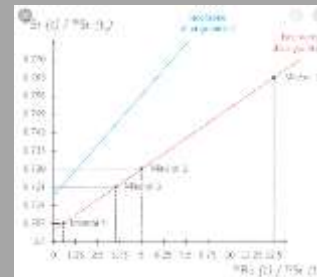


Chimie : MEB, MET



Radiochronologie et mesure de la radioactivité naturelle

N'hésitez à me rapporter vos « trouvailles » pour identification primaire



# 9 - Leurs messages

- Contribuent à la connaissance de la composition primitive de notre système solaire,
  - nous aide à comprendre comment le soleil et son cortège de planètes se sont formés,
  - Grâce à l'analyse des chondrites et des métalliques on déduit la composition des planètes,
  - D'où elles viennent,
- Composition isotopique voisine de celle du soleil et quand elle est différente cela provient d'évènements datant de plus de 4,5 milliards d'années,
- Apport de molécules prébiotiques qui interrogent sur l'apparition de la vie sur Terre et également en exobiologie.





## 9a - Zoom sur les Chondrites carbonées



- Noire
- Peu de chondres
- Les plus « primitives des chondrites »
- Renferment de l'eau et des matières composés organiques ( C, O, H, N)
  - => apport d'eau sur la Terre ?
  - => briques de la vie terrestre ? Les Acides Aminés détectés sont D et G.
- Restée dans les régions froides donc non altérées
- On y trouve des grains présolaires : lors de l'explosion de la supernova

# 9b - ZOOM sur les micrométéorites

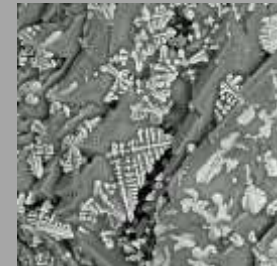
## Le « message » après entrée dans l'atmosphère

=> Composition chimique Fe, Ni,...autres éléments

=> Oxydation du Fe par réaction avec l'oxygène de l'atm. terrestre  $\text{FeO}$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

=> Evolution de l'atmosphère terrestre (mesure de l'oxydation du Fe)

=> Evolution du Fe en magnétite  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  avec « enregistrement » du magnétisme terrestre



=> Paléomagnétisme : non perdu sur les MM ferreuses non fondues, perdu pour les autres MM

=> Le transport moléculaire : libération des gaz (Néon,...) lors de l'entrée dans l'atmosphère terrestre, acides aminés (simulation), combustion de molécules organiques

=> Microréacteur biochimique ( $\text{H}_2\text{O}$ ) => synthèse de « briques » élémentaires

# 10 - Quelques usages des météorites

## Dague de Toutânkhamon



Source : Science et Avenir

10,8% Ni  
Spectrométrie fluorescence X



Source : University Oxford



Le fer « pur » n'existe pas sur Terre (à une exception - cheminée volcanique)

Les météorites ferreuses ont été la source de fer pour des populations que ne maîtrisaient pas la technologie du haut fourneau (égyptiens, inuits).



Photographie : Pierre Thomas

# 11 - Existe-t-il un danger météoritique ?





# 11 - Existe-t-il un danger météoritique ?

On estime à 500 le nombre de météorites de taille notable qui tombent chaque année sur la terre.

La surface de notre planète étant d'environ 500 millions de km<sup>2</sup>, la probabilité qu'une ville de 250'000 habitants (surf. ≈10 km<sup>2</sup>) reçoive une météorite est de une fois tous les 100'000 ans.

Pour une maison particulière de 200 m<sup>2</sup>, un tel événement ne se produirait qu'une fois tous les 5 milliards d'années.

Quant à un homme de 0.5 m<sup>2</sup>, cette probabilité n'est que d'une fois pour 2000 milliards d'années environ !

Toutefois, avec une population de 6 milliards d'habitants, la probabilité qu'un habitant de la Terre soit frappé par une météorite

est tout de même **d'une fois tous les quatre siècles !**



Ann Hodges est la seule personne connue de l'Histoire à avoir été blessée par cet objet tombé du ciel.

Ann Hodges a été blessée par la météorite. © DR

L'unique météorite **mortelle** historiquement attestée est la chute de la météorite de Valera au Venezuela qui a tué une vache le 15 octobre 1972

# 11 - Existe-t-il un danger météoritique ?

## Probabilités de chutes



Taille	Risque de heurter la Terre	Puissance explosive En équivalent TNT	Nombre estimé	Découverts
Jusqu'à 1 m	Une fois par an	Bombe d'Hiroshima (15 Kt)	4 millions	< 0,1 %
1 m à 10 m	Une fois tous les 10 ans	Météorite de Tcheliabinsk (17 à 20 m ; 0,5 Mt)	1 million	0,6 %
10 m à 100 m	Une fois tous les 10 000 ans	Tsar Bomba (Bombe la plus puissante 50 Mt)	30 000	16 %
100 m à 1 000 m	Une fois tous les 500 000 ans à 1 million d'années	Apophis (375 m ; 750 Mt)	5 440	77 %
Plus de 1 000 m	Une fois tous les 1 à 300 millions d'années	Chicxulub (fin des dinosaures) (10 à 15 km ; 100 000 000 Mt)	930	98 %

Estimation des risques et conséquences d'un impact d'astéroïde en fonction de sa taille  
D'après l'infographie de l'ESA

Le télescope américain Ground-based Electro-Optical Deep Space Surveillance (GEODSS) < 10m



# 12 - Programmes de « science participative »

**FRIPON :** Identifier les chutes de météorites en France, a déployé en France un réseau composé d'une centaine de caméras vidéo et d'une vingtaine de récepteurs radio VHF afin de traquer les météores, calculer leur orbite, leur trajectoire dans l'atmosphère et la zone possible de chute au sol.



**Vigie-Ciel :** Promeut la science des météores auprès du grand-public, forme des volontaires chercheurs de météorites tombées au sol et dispense de nombreux cours et conférences.

**Se former animateur  
Vigie Ciel**



**Stardust@home :** Analyser des impacts de micrométéorites



**Récolte de  
micrométéorites**

**Vigie cratère :** découvrir de nouvelles structures d'impact sur Terre.





# 13 - Salons / Bourses/ Conférences /divers

1 au 16 février – Tucson, Arizona

19 au 21 Juin - Bourse aux Météorites 2020 à Ensisheim, Palais de la régence

25 au 28 Juin - Mineral & Gem 2020 à Sainte-Marie-aux-Mines, parc des expositions

Juin - Conférence de Jon Larsen, Dijon, à définir

Septembre - 20ème Bourse Minéraux et Fossiles de Saint Pierre en Port

Achat/Vente : <http://www.carionmineraux.com/>

Vente aux enchères





# 14 - Quelques lectures pour aller plus loin

## Météorites

Les météorites – Matthieu Gounelle

Une belle histoire des météorites – Matthieu Gounelle

Impacts, des météorites aux cratères – Sylvain Bouley

Meteorites : Witnesses of the origin of the solar systems" - Ludovic Ferrière



## Micrométéorites

On the trail of stardust – Jon Larsen

In search of Stardust – Jon Larsen

Meteor showers and their parent comets - Pete Jenniskens

## Général

Ce que disent les minéraux – Patrick Cordier et Hugues Leroux

# 13 - Des sites internet



## Radiodétection Météorites :

American Meteor Society : <https://www.amsmeteors.org/>  
Meteoritics and Chosmochemistry : <http://karmaka.de/>

## Micrométéorites

Project Stardust de Jon Larsen : <https://fr-fr.facebook.com/micrometeorites/>

**Astéroïdes :** <https://asteroidday.org/about/>

## Museum

Museum Histoire Naturelle de Wien :  
[https://www.nhm-wien.ac.at/en/research/mineralogy\\_\\_petrography/meteor](https://www.nhm-wien.ac.at/en/research/mineralogy__petrography/meteor)

Museum National Histoire Naturelle :  
<https://www.mnhn.fr/fr/collections/ensembles-collections/mineralogie-geologie/meteorites>

**Météorite de l'Aigle** <http://www.normandie-tourisme.fr/pcu/musee-de-la-meteorite-de-laigle/laigle/fiche-PCUNOR061FS00096-1.html>

# 16 - Remerciements



« Merci » aux auteurs des ouvrages : Les météorites – Matthieu Gounelle; Une belle histoire des météorites – Matthieu Gounelle, Impacts, des météorites aux cratères – Sylvain Bouley; On the trail of stardust – Jon Larsen; In search of Stardust – Jon Larsen; qui m'ont permis la réalisation de cette présentation imagée,

« Merci » à Vigie Ciel et Fripon ainsi qu'au MNHN et notamment au Pr. Mathieu Roskosz,

« Merci » à Google pour son aimable et active collaboration,

« Merci » à la SAB et à Anne Laure Gérôme pour son aide et les images empruntées à sa présentation « Micrométéorites » du 8 janvier 2020.

# A suivre.....

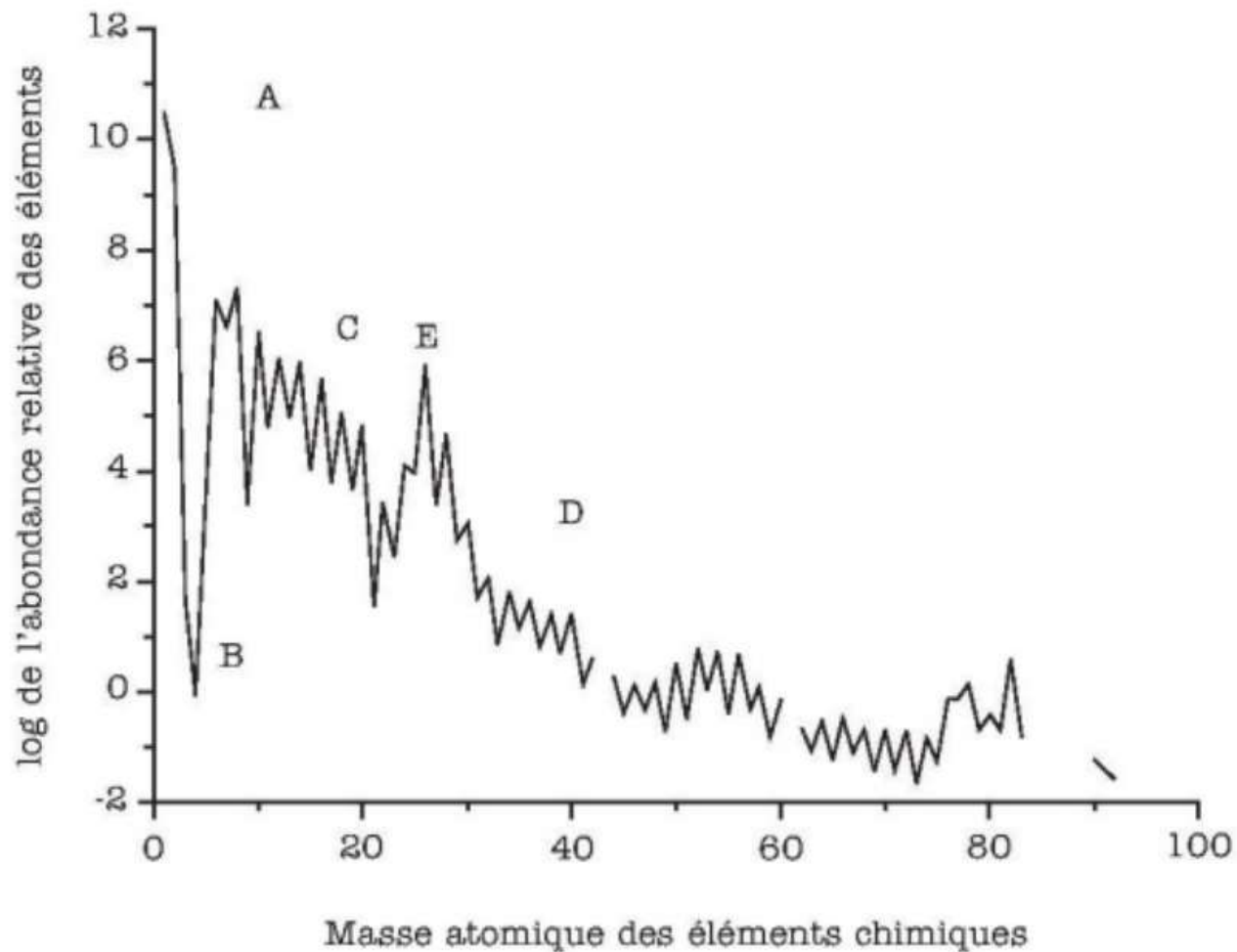
**La Radioastronomie**

**Détection des météorites et astres**

**Compléments météoritiques**

# ANNEXE







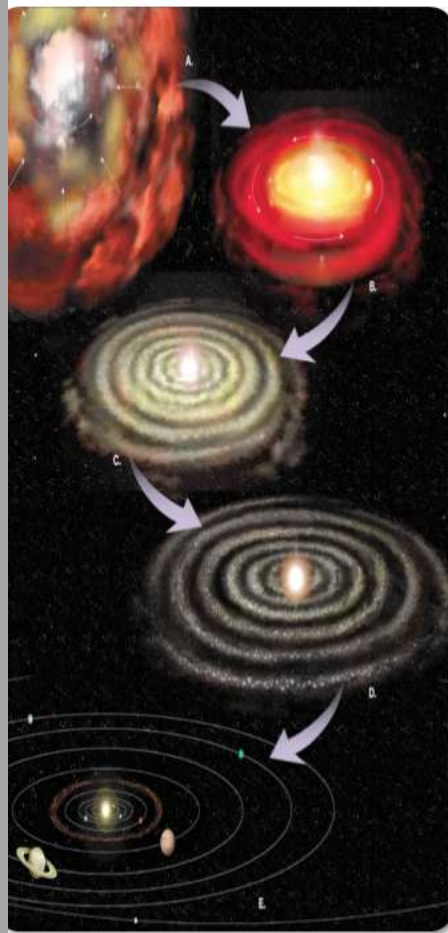
Agrandir  Original (jpeg, 133k) 

Fig. 1 – Courbe des abondances des différents éléments chimiques (en échelle logarithmique) en fonction de leur masse atomique : la région A correspond à la nucléosynthèse primordiale (voir le chapitre 23) ; la région B est celle des espèces chimiques produite par l'interaction des rayons cosmiques avec le milieu interstellaire, la région C est celle qui correspond à la fusion thermonucléaire, la région D aux réactions d'absorption de neutrons et la région E au pic du Fer « façonné » par les réactions de photodésintégration

## Principaux minéraux des météorites

<i>Péridots</i>		<i>Sulfures :</i>	
<i>olivine</i>	$(Mg,Fe)_2SiO_4$	<i>troilite</i>	$FeS$
<i>Pyroxènes :</i>		<i>pentlandite</i>	$(Fe,Ni)_9S_8$
<i>enstatite</i>	$MgSiO_3$	<i>daubréelite</i>	$FeCr_2S_4$
<i>ferrosillite</i>	$FeSiO_3$	<i>oldhamite</i>	$(Ca,Mg)S$
<i>diopside</i>	$CaMgSi_2O_6$	<i>Oxydes :</i>	
<i>hédénbergite</i>	$CaFeSi_2O_6$	<i>chromite</i>	$FeCr_2O_4$
<i>pigeonite</i>	$(Mg,Fe,Ca)_2Si_2O_6$	<i>magnétite</i>	$FeFeO_4$
<i>Feldspaths :</i>		<i>ilménite</i>	$FeTiO_3$
<i>plagioclases</i>	$(Na,Ca)(Al,Si)_4O_8$	<i>spinelle</i>	$MgAl_2O_4$
<i>orthose</i>	$KAlSi_3O_8$	<i>Divers :</i>	
<i>Ferronickel :</i>		<i>apatite</i>	$Ca_5(PO_4)_3Cl$
<i>kamacite</i>	$Fe$ (Ni<7.5%)	<i>whitlockite</i>	$Ca_3(PO_4)_2$
<i>taenite</i>	$Fe$ (Ni >20%)	<i>schreibersite</i>	$(Fe,Ni)_3 P$
<i>tétrataenite</i>	$FeNi$ (Ni >50%)	<i>cohenite</i>	$(Fe,Ni)_3 C$
<i>Minéraux argileux :</i>		<i>osbornite</i>	$TiN$
<i>serpentine</i>	$(Mg,Fe)_3Si_2O_5(OH)_4$	<i>perryite</i>	$Ni_3Si$
<i>cronstedite</i>	$Fe_4SiO_5(OH)_4$	<i>graphite</i>	$C$



**Gaz et  
poussières**



**Grains  
présolaires**

**Gaz et  
grains**



**Inclusions  
réfractaires**

**Planétésimaux**



**Chondres  
& grains  
de métal**

**Premiers petits  
corps**

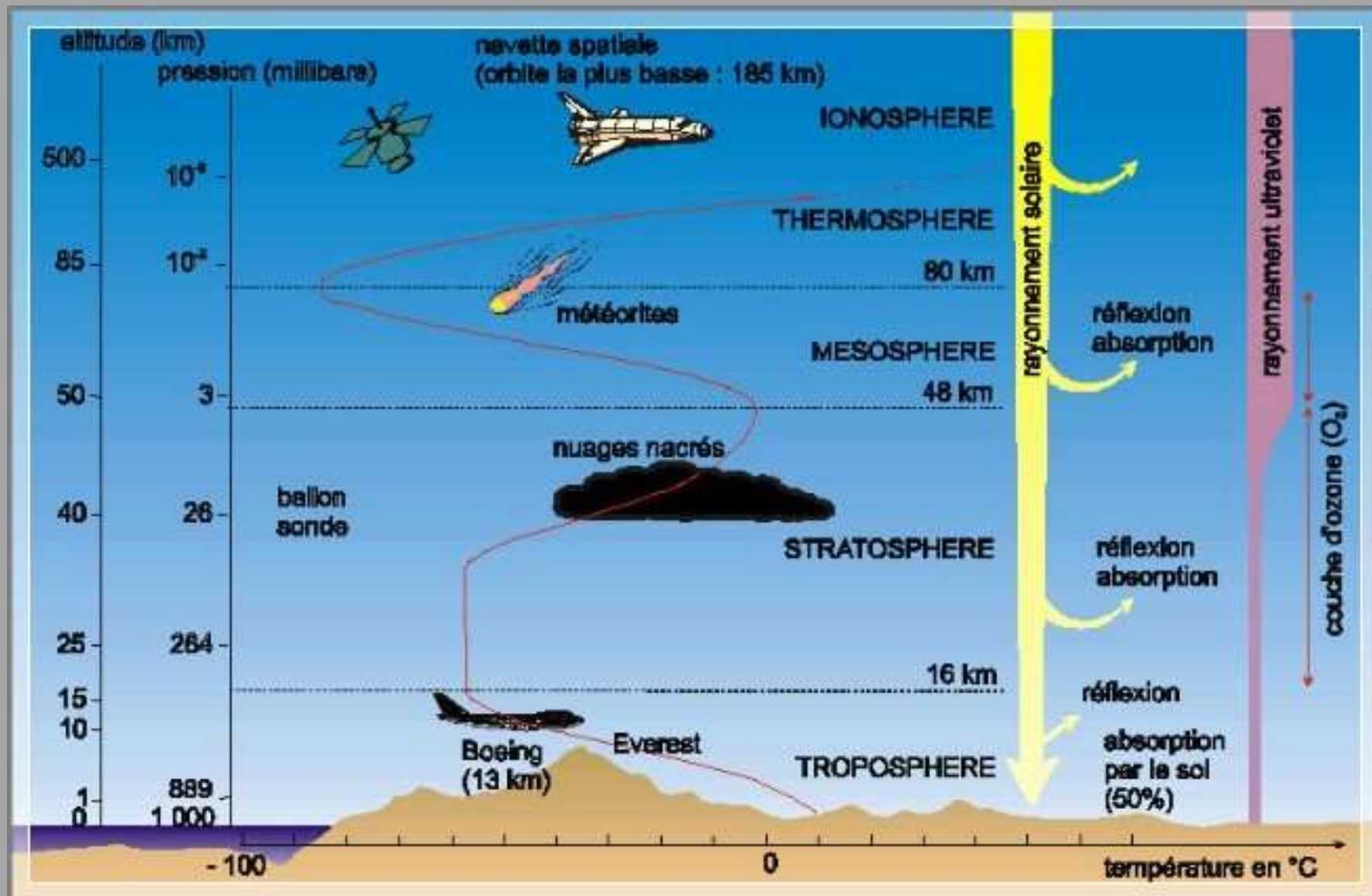


**Chondrites  
(météorites  
primitives)**

**Planètes  
et petits  
corps**



**Corps  
parents des  
météorites  
différenciées**





 Big Bang	 Large stars	 Supernovae
 Cosmic rays	 Small stars	 Man-made



## The origins of I-type spherules and the atmospheric entry of iron micrometeoroids

Matthew J. GENGE<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Impact and Astromaterials Research Centre (IARC), Department of Earth Science and Engineering, Imperial College London, Exhibition Road, London SW7 2AZ, UK

<sup>2</sup>Department of Mineralogy, The Natural History Museum, Cromwell Road, London SW7 2BT, UK

\*Corresponding author. E-mail: m.genge@imperial.ac.uk

(Received 27 February 2016; revision accepted 03 March 2016)

**Abstract**—The Earth's extraterrestrial dust flux includes a wide variety of dust particles that include FeNi metallic grains. During their atmospheric entry iron micrometeoroids melt and oxidize to form cosmic spherules termed I-type spherules. These particles are chemically resistant and readily collected by magnetic separation and are thus the most likely micrometeorites to be recovered from modern and ancient sediments. Understanding their behavior during atmospheric entry is crucial in constraining their abundance relative to other particle types and the nature of the zodiacal dust population at 1 AU. This article presents numerical simulations of the atmospheric entry heating of iron meteoroids to investigate the abundance and nature of these materials. The results indicate that iron micrometeoroids experience peak temperatures 300–800 K higher than silicate particles explaining the rarity of unmelted iron particles which can only be present at sizes of <50 µm. The lower evaporation rates of liquid iron oxide leads to greater survival of iron particles compared with silicates, which enhances their abundance among micrometeorites by a factor of 2. The abundance of I-types is shown to be broadly consistent with the abundance and size of metal in ordinary chondrites and the current day flux of ordinary chondrite-derived MMs arriving at Earth. Furthermore, carbonaceous asteroids and cometary dust are suggested to make negligible contributions to the I-type spherule flux. Events involving such objects, therefore, cannot be recognized from I-type spherule abundances in the geological record.

### INTRODUCTION

Micrometeorites (MMs) are extraterrestrial dust particles <2 mm in size recovered from the surface of the Earth (Genge et al. 2008) and represent that fraction of interplanetary dust population at 1 AU to survive atmospheric entry. Micrometeorites have been collected from Antarctic ice and traps, and deep-sea sediments (Brownlee and Bates 1983; Maurette et al. 1991; Taylor et al. 2000; Duprat et al. 2007; Rochette et al. 2008) and have provided important information on the population of dust-producing small bodies in the solar system including parent bodies not sampled by meteorites. The majority of MMs, however, are thought to have affinities to primitive carbonaceous and ordinary chondrites (Kurat et al. 1994; Genge et al. 1997, 2008; Genge 2008; Cordier et al. 2011a, 2011b)

and include samples of fine-grained matrix, chondrules, and refractory inclusions typical of these meteorites.

Iron-nickel metal is a fundamental component of primitive meteorites, in particular in the ordinary chondrites which comprise 3–20 wt% metal (Jarosewich 1990), and is observed within MMs as small inclusions within unmelted particles and rare immiscible droplets of metal within melted particles (e.g., Genge et al. 2008). Considering that metal grains within chondritic meteorites can have grain sizes up to several mm, particularly within equilibrated ordinary chondrites (Brearley and Jones 1998), the absence of unmelted grains dominated by metal might suggest that the parent bodies of MMs are metal deficient compared with those of meteorites or that metal grains are subject to additional biases in dust production, transport, or atmospheric entry.

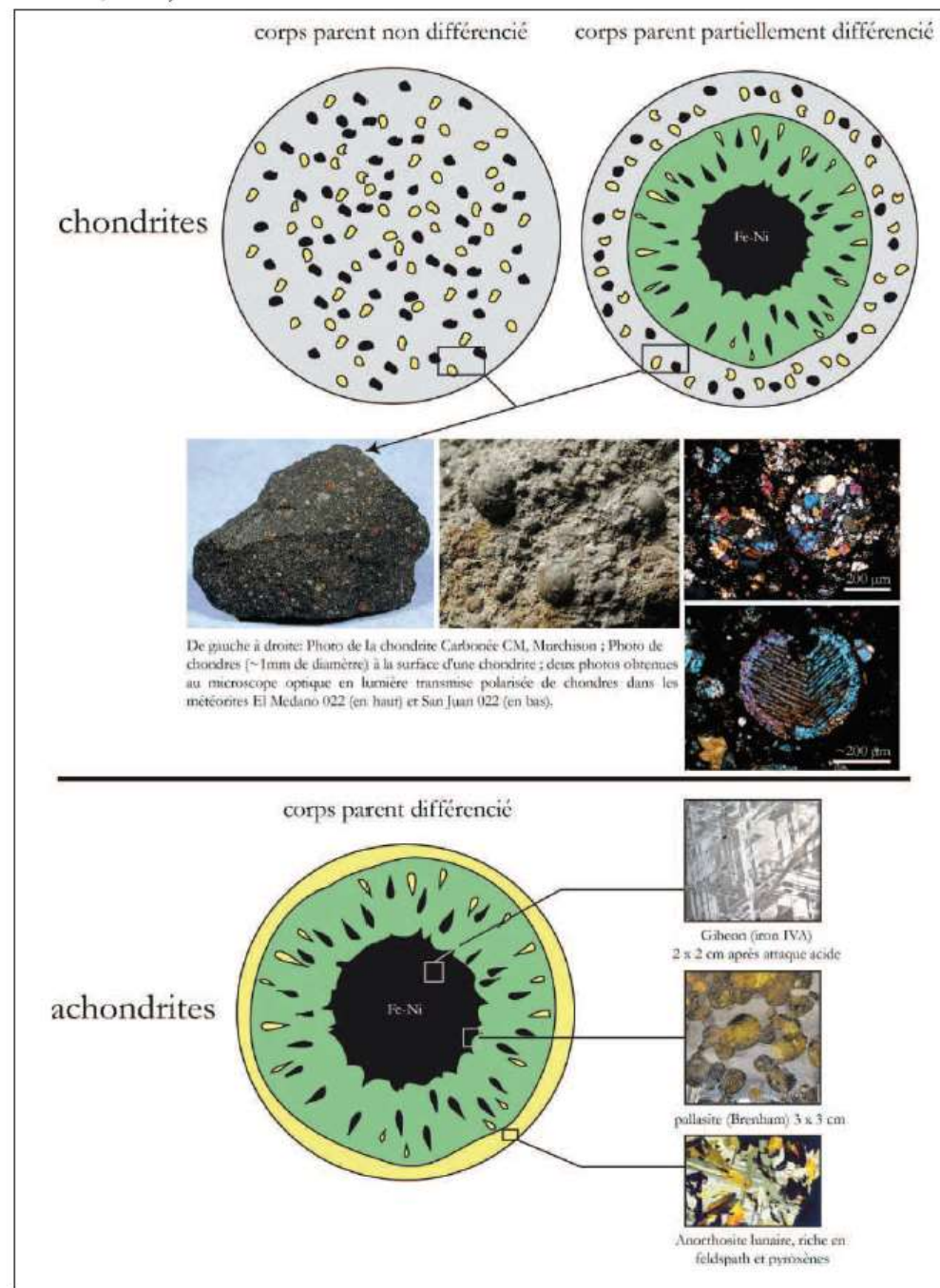


Fig 1.3 Présentation schématique des grands groupes de météorites.