#### Les météorites



Support de présentation par Emmanuel Jacquet

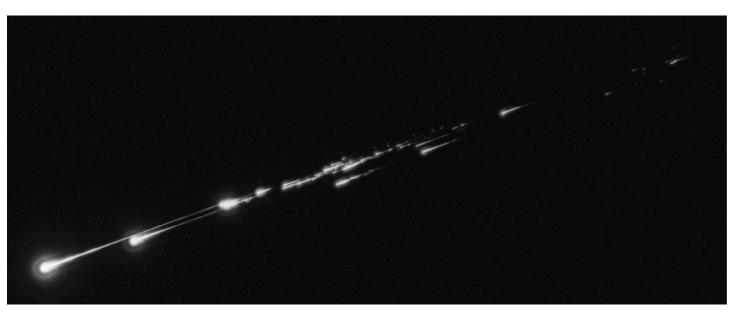
#### Plan de l'exposé

I. Chutes de météorites sur Terre
II. L'origine des météorites : les petits corps du système solaire
III. Les âges des météorites
IV. Les chondrites
V. Les achondrites

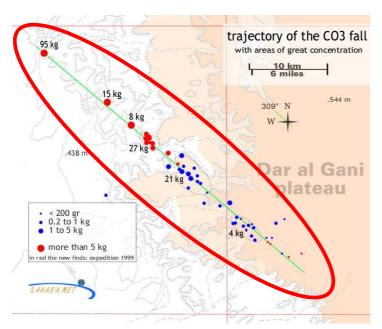
VI. Les sidérites

#### I. Chutes de météorites sur Terre

#### Chutes de météorites



Peekskill (NY, 1992; H6)



Ellipse de chute



Cabin Creek (IIIAB) avec regmaglyptes

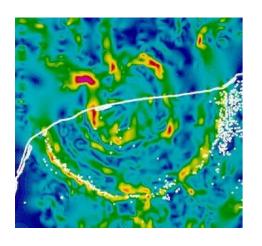


Pultusk (Pologne, 1868, H5) avec croûte de fusion

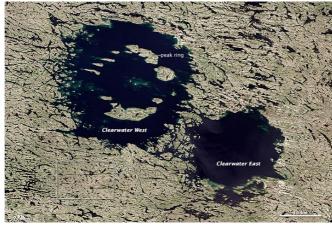
Cratères météoritiques



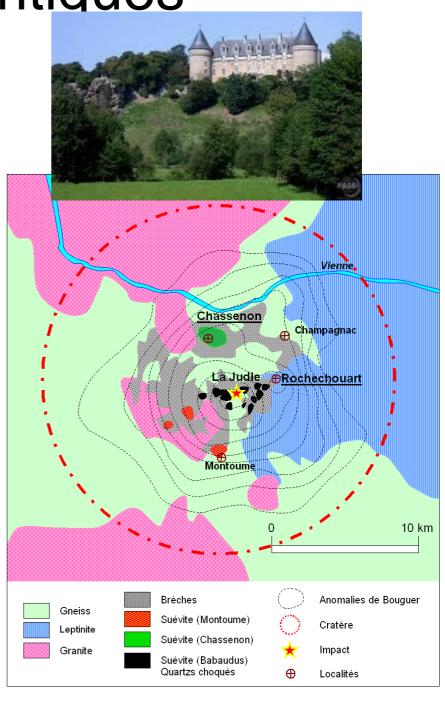
Barringer meteorite crater (AZ, -50 ka, 1,2km)



Chicxulub (Yucatan, -66 Ma, 180 km)

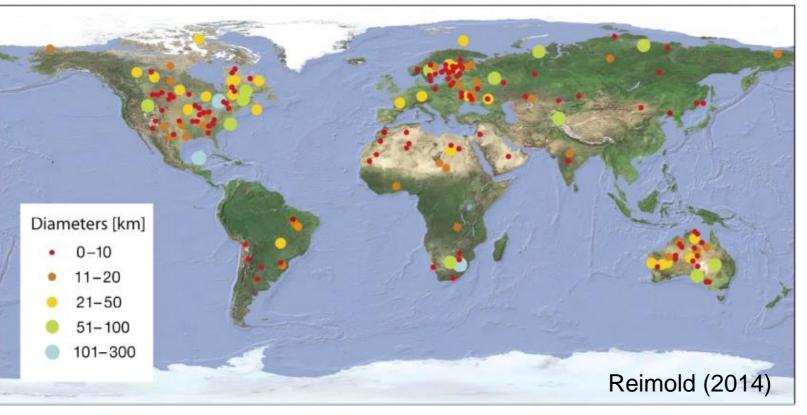


Lacs à l'Eau Claire (Québec, 290 et 360 Ma; 36 et 26 km)



Rochechouart (Limousin, -201 Ma, 25 km)

#### Cratères dans le monde (~200)



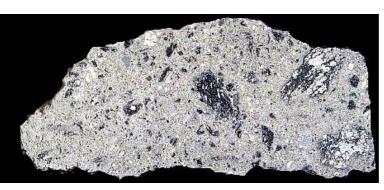


**Tectites** 

#### **Quelques impactites...**



Cône de percussion (Steinheim)



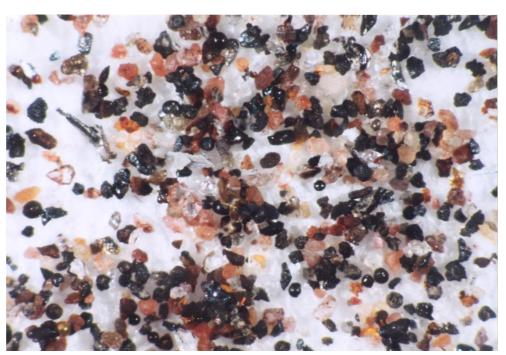
Suévite (Ries)

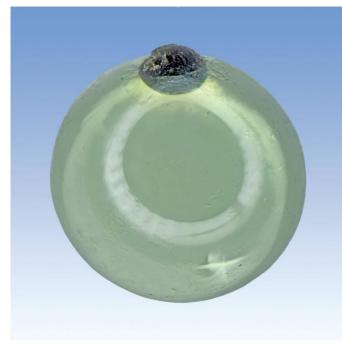


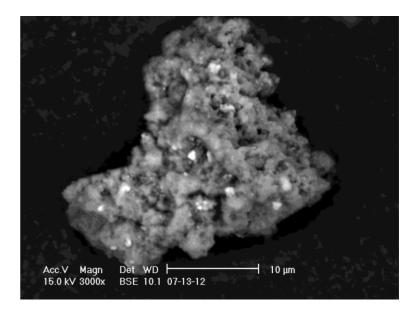
Tagamite (Rochechouart)



#### Micrométéorites





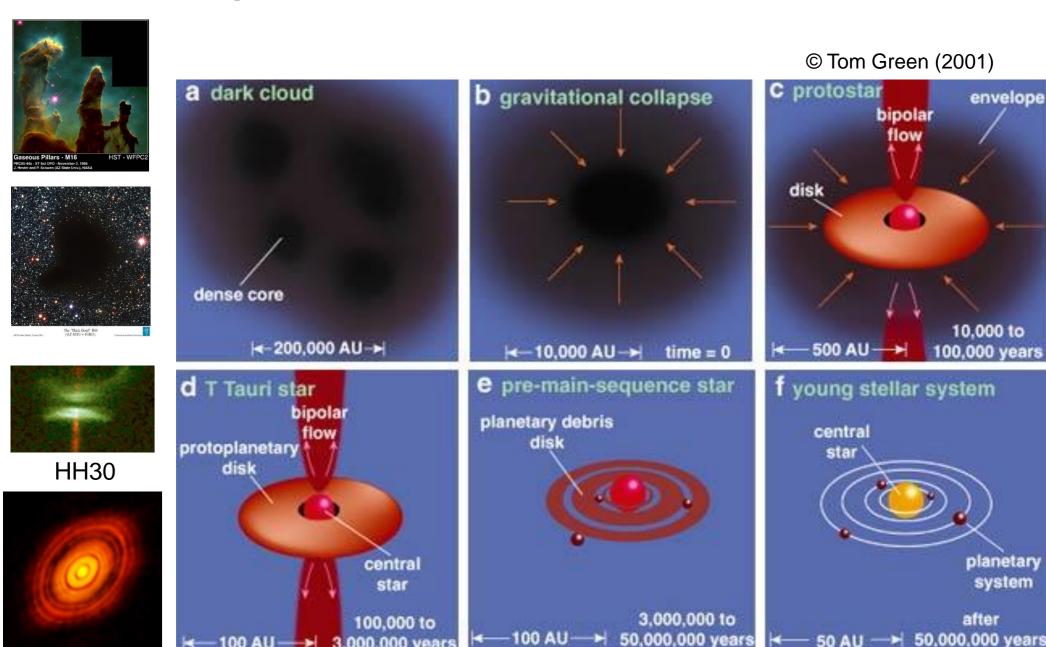


Sphérule cosmique (Bray & Larsen)

Micrométéorite finement grenue

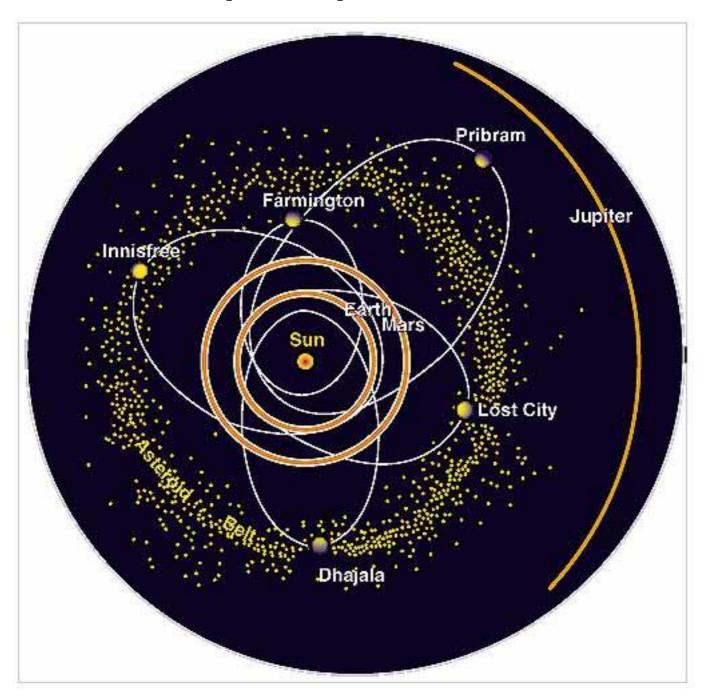
# II. L'origine des météorites : les petits corps du système solaire

#### Origine du système solaire



**HL** Tau

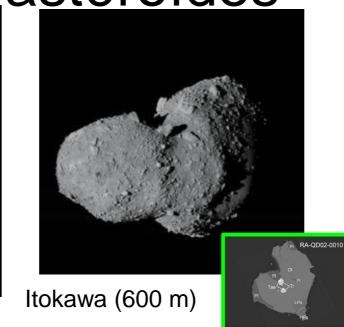
#### Orbites de quelques météoroïdes



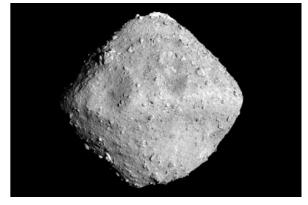


Quelques

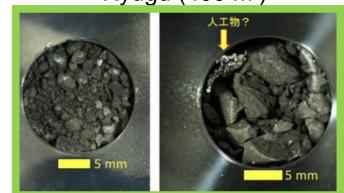
a<u>stéroïdes</u>



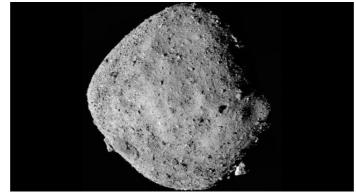
Cérès (950 km)



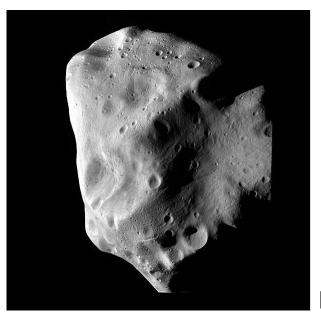
Ryugu (400 m)



Eros (33 km)



Bennu (200 m)



Lutèce (120 km)

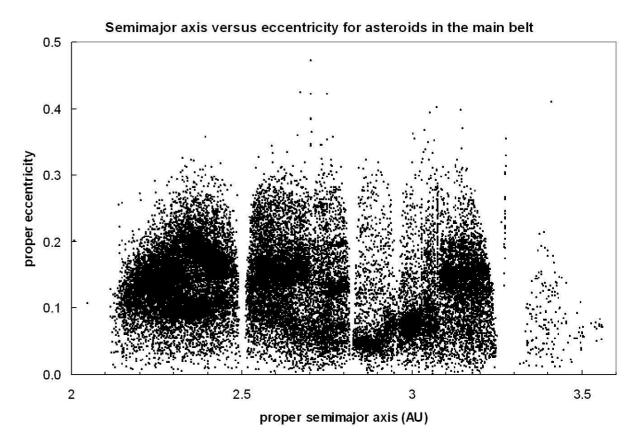
#### De la Ceinture principale à la Terre...



Fig. 5.— Trailing structures in P/2010 A2 observed UT 2010 January 29. The full image width is ~1' while the inset width is ~12". From *Jewitt et al.*, (2010). Diameter: 120 m

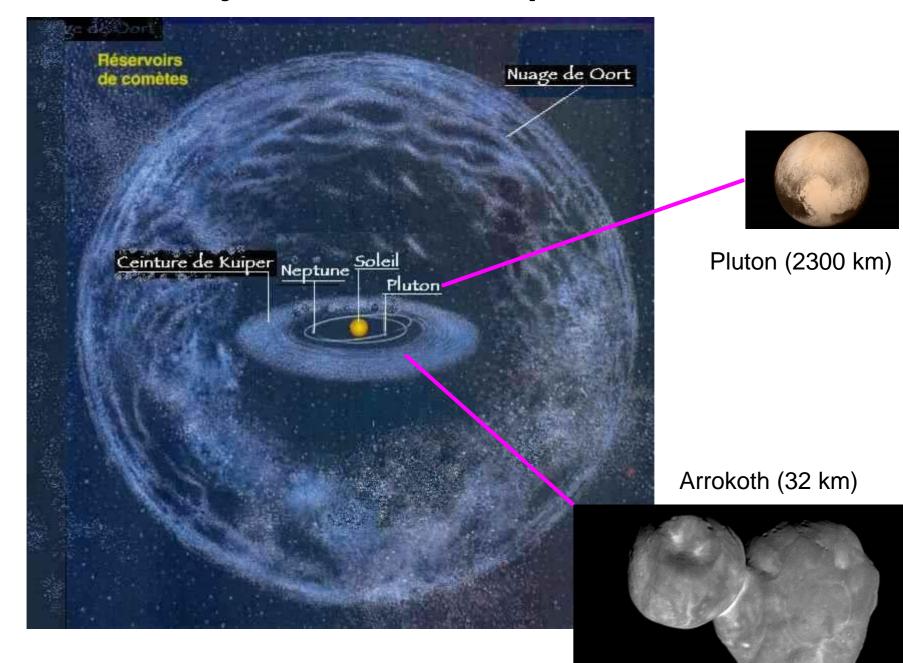


Cumberland Falls (AUB/F)



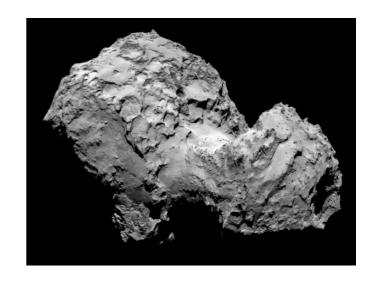
Lacunes de Kirkwood

#### Les objets transneptuniens



## Visiteuses du système solaire externe : les comètes

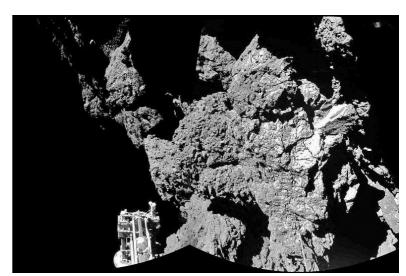




Churyumov-Gerasimenko



Léonides vues de l'espace (1997, NASA)

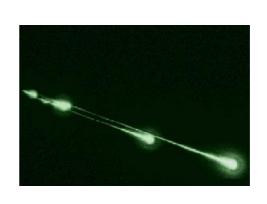


#### III. Les âges des météorites

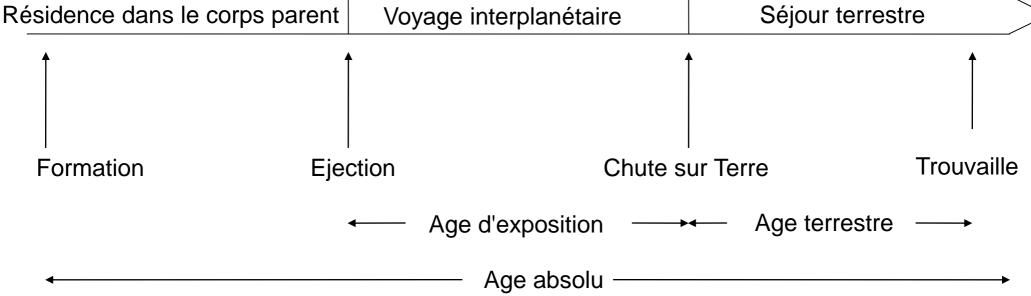
## 4,6 milliards d'années de la vie d'une météorite





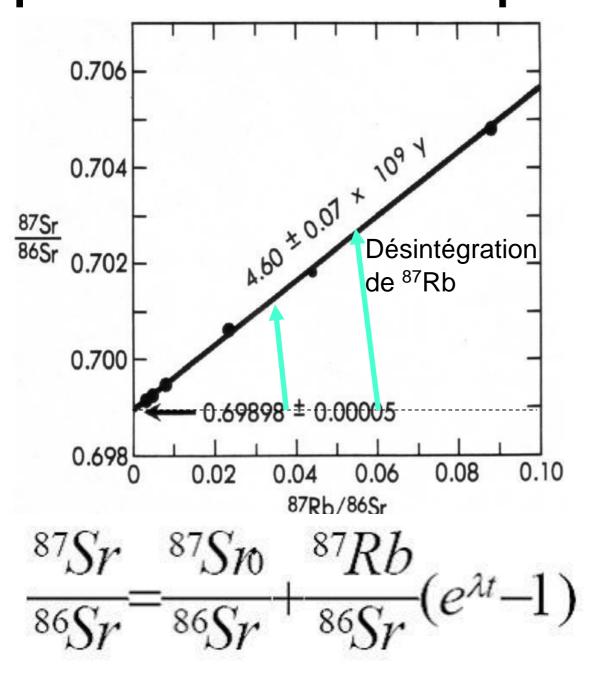






Ma (« Méga an ») : million d'années ; Ga (« Giga an ») : milliard d'années

### Age absolu : radioactivités à longues périodes avec l'exemple de la méthode Rb-Sr

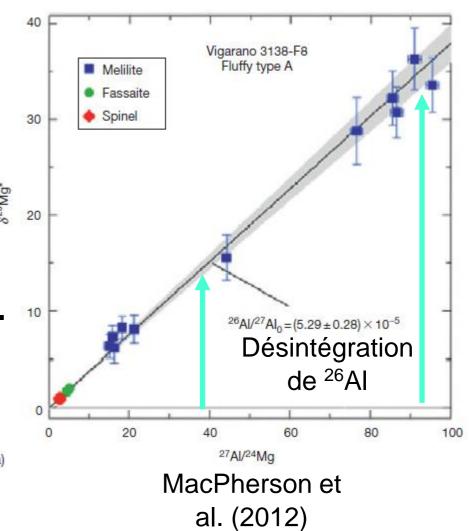


- On mesure <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr et <sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr de différents minéraux
- Les mesures sont sur une droite (isochrone) de pente e<sup>λt</sup> 1 et d'ordonnée à l'origine (87Sr/86Sr)<sub>0</sub>: à l'instant initial, (87Sr/86Sr)<sub>0</sub> était le même dans toute la roche.

Résultats : 4,5-4,6 Ga
 (CAI : 4567 Ma)

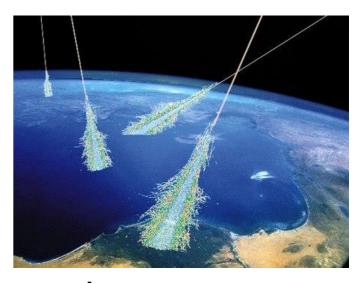
## Datations relatives : l'exemple de l'aluminium 26

- <sup>26</sup>Al se désintègre en <sup>26</sup>Mg avec T = 0,72 Ma.
   Radioactivité éteinte!
- Excès en <sup>26</sup>Mg corrélés avec Al/Mg => preuve d'existence d'<sup>26</sup>Al à leur formation (étoile massive?).
- On peut déduire le rapport <sup>26</sup>Al/<sup>27</sup>Al initial => chronologie relative si homogénéité spatiale

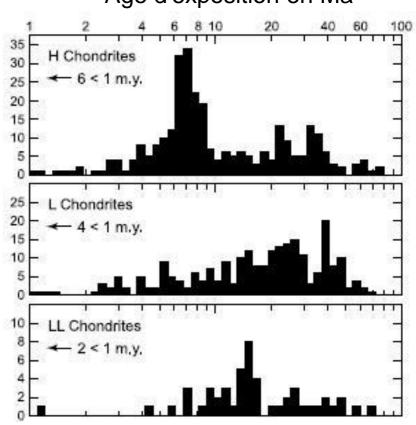


#### Ages d'exposition

- Après éjection, météoroïde exposé au Rayonnement Cosmique Galactique (protons, noyaux atomiques etc.) (RCG)
- Induit des réactions nucléaires
   : création d'isotopes
   (cosmogéniques). (ex : <sup>21</sup>Ne)
- Connaissant taux de production, on déduit la durée d'exposition (et éventuellement l'âge terrestre pour les cosmogéniques radioactifs)



Âge d'exposition en Ma



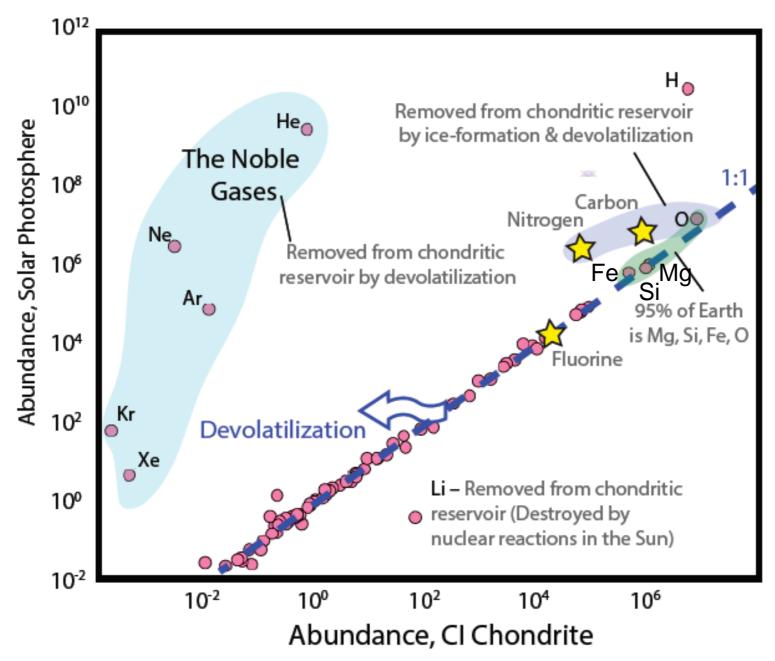
#### IV. Les chondrites

#### Chondrites

#### a. Composition globale

- b. Pétrographie : les composants des chondrites
  - c. Genèse des différents composants
  - d. Classification chimique des chondrites
- e. Processus secondaires et types pétrologiques

#### Abondance solaire





Orgueil (CI1)

(pour 1 million d'atomes de Si; Mikhail & Füri 2019)

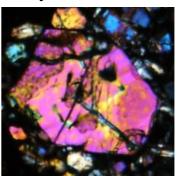
#### Minéralogie des chondrites (1/2)

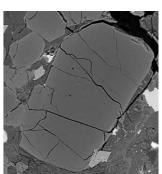
Lumière polarisée analysée

Electrons rétrodiffusés

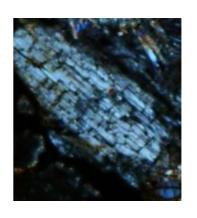


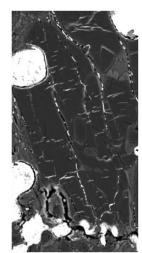
orthorhombique (forstérite-fayalite)



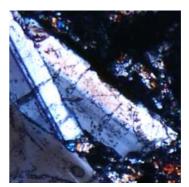


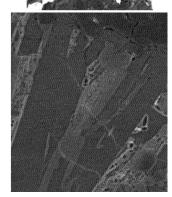
**Pyroxène**: (Mg,Fe,Ca)SiO<sub>3</sub>, orthorhombique/monoclinique (*enstatite, ferrosilite, wollastonite*)





**Plagioclase**: (NaSi, CaAl)AlSi<sub>2</sub>O<sub>8</sub>, triclinique (*albite-anorthite*)

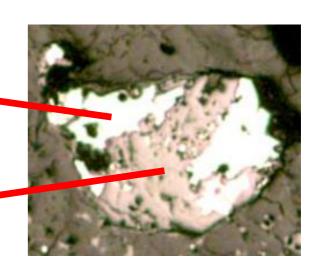




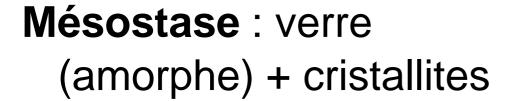
#### Minéralogie des chondrites (2/2)

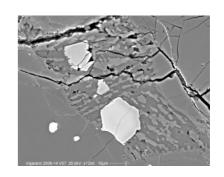
Métal: (Fe, Ni), cubique

Troilite: FeS, hexagonal

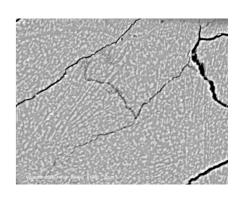


**Spinelle**: (MgAl<sub>2</sub>, FeCr<sub>2</sub>)O<sub>4</sub>, cubique (*spinelle* (*stricto sensu*)-chromite)







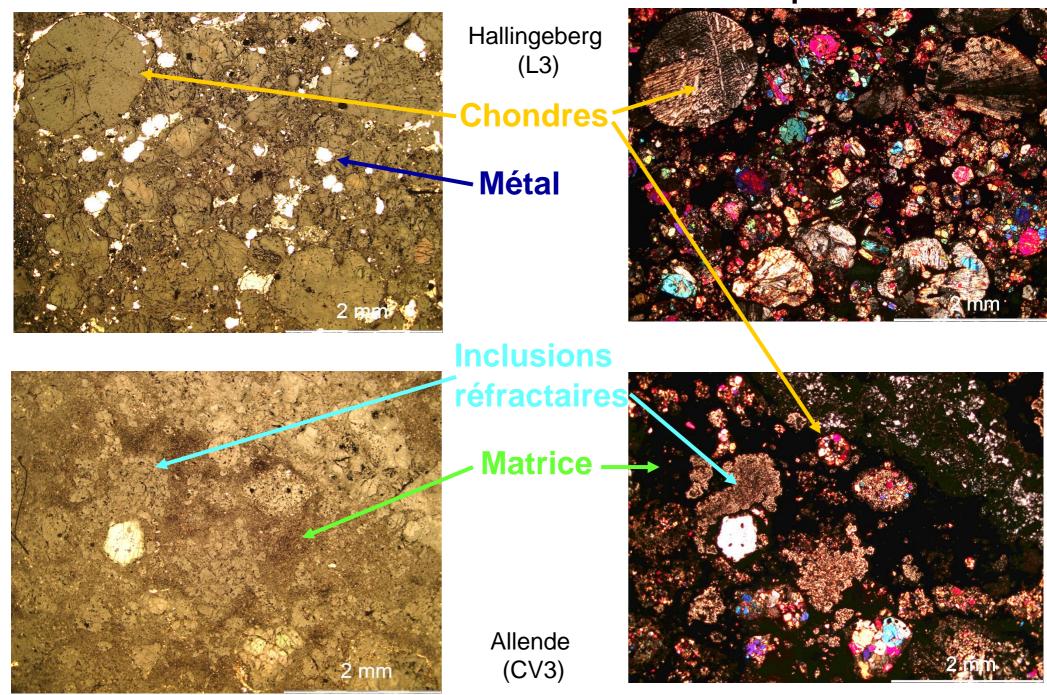


#### Chondrites

#### a. Composition globale

- b. Pétrographie : les composants des chondrites
  - c. Genèse des différents composants
- d. Classification chimique des chondrites
- e. Processus secondaires et types pétrologiques

#### Chondrites: sédiments cosmiques...



Lumière réfléchie

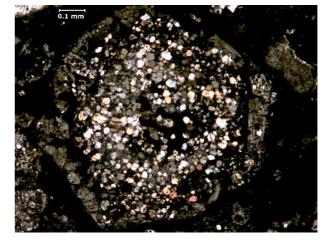
Lumière transmise, polarisée et analysée

#### Chondres: classification pétrographique

#### **Porphyrique**

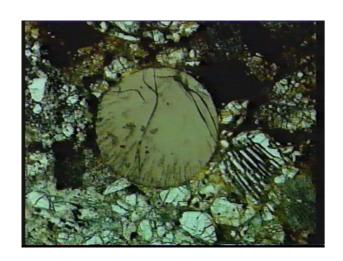


Porphyrique (POP)

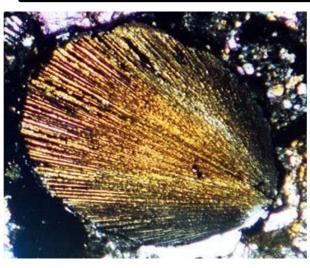


Granulaire (GOP)

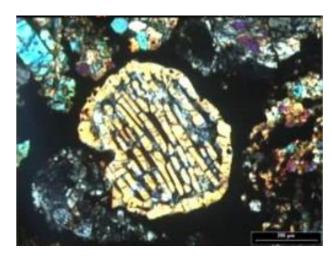
#### Non-porphyrique



Cryptocristallin (C)



Radial (RP)



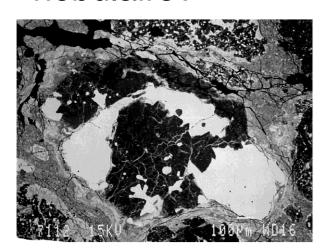
Barré (BO)

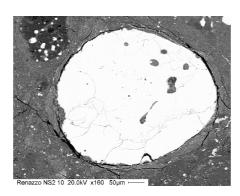
#### Métal/sulfures

Semarkona (Hewins & Zanda 2012)

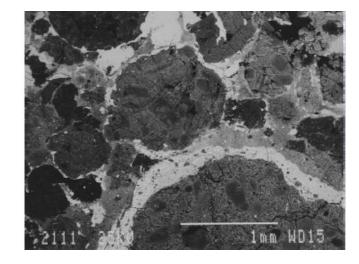
Grains de métal (Fe-Ni) ou sulfure dans les chondres ou à l'extérieur des chondres

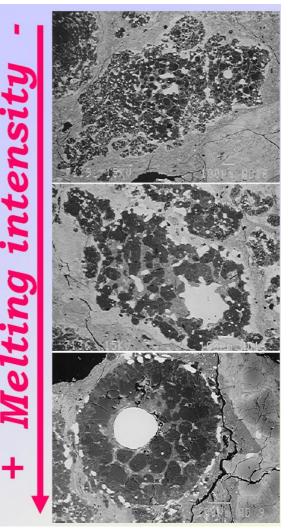
Sous-produits de la formation des chondres/héritage nébulaire?





Chondres dans Renazzo (CR2; Zanda et al 2002; Campbell et al 2005)





# Matrice (1/2) Ricogn into heteroatonic and structures (pyroles) OL Simula aromatic chaine Simula aromatic units highly substituted Simula aromatic chaine Simula aromatic chaine Simula aromatic structures (pyroles) And Simula aromati

SOM (© Remusat)

 Mélange de silicates cristallins et de matériel amorphe

Matrice de Acfer 094

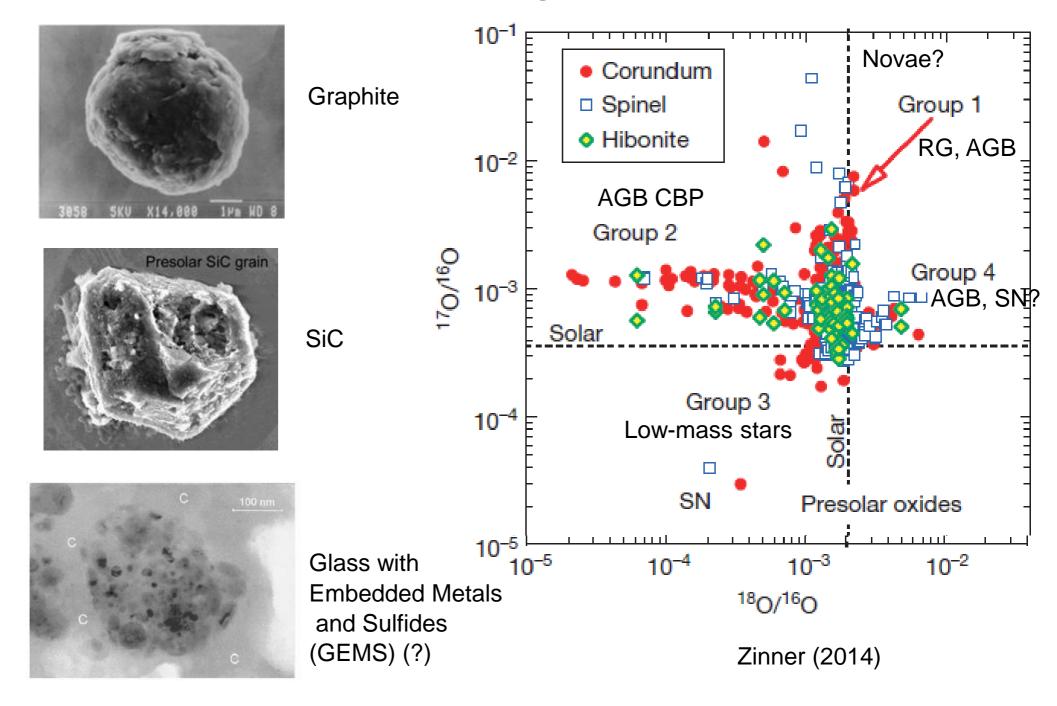
(C3-ung)

**IOM** 

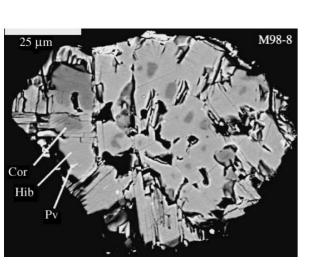
(Derenne & Robert 2010)

- Présence de matière organique : aromatique insoluble + aminoacides...
- Eau (<10 wt% de la matrice): désormais sous forme de silicates hydratés (argiles; cf section e)

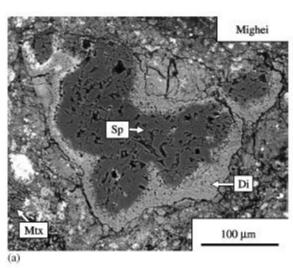
#### Matrice (2/2): Les grains présolaires



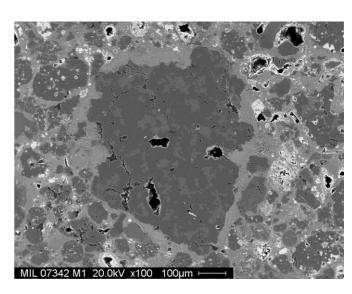
## Les inclusions réfractaires : classification



CAI d'hibonite dans Murchison (CM2)



CAI à spinelle et diopside dans Mighei (CM2)



AOA dans MIL 07342 (CO3)

- Inclusions riches en calcium et en aluminium (CAI) : -grossièrement grenues
   -finement grenues
- Agrégats amiboïdes à olivine (AOA)

#### Chondrites

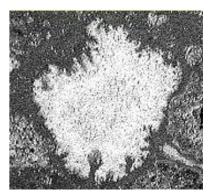
- a. Composition globale
- b. Pétrographie : les composants des chondrites
  - c. Genèse des différents composants
  - d. Classification chimique des chondrites
- e. Processus secondaires et types pétrologiques

#### 2,000 Corundum Al- 0, Hibonite Perovskite Melilite CaAl<sub>12</sub>O<sub>19</sub> CaTiO, Ca(Al.Mg)(Si,Al), O-Spinel MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 1,500 Diopside Metallic Fe Forsterite CaMg(SiO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> Mg,SiO, Enstatite Anorthite MgSiO<sub>g</sub> CaAl, Si, O, famperature (°K) Plagioclase (CaAl, NaSi)AlSi, O. Olivine, pyroxene of intermediate Trollite Fe content Fe5 (Mg,Fe),SiO, (Mg.Fe) SiO<sub>2</sub> 500 Magnetite Ma Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> **Phyllosilicates** (Mg, Al, Fe) 17 (Si, Al) 0 000 (OH) 1 Carbonaceous Sulfates. compounds carbonates ices of H.O. NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>

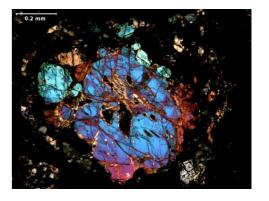
FIG. 7-4 The sequence of condensation of minerals (simplified) from a nebula of solar composition. Arrows denote continued reaction with the nebular gases, transforming the mineral in the upper box into those in lower boxes. If the minerals remain dispersed in the nebular until very low temperatures are reached and complete equilibrium is maintained, only the materials in the lower boxes should be available for ecoretion (C1 carbonaceous chondrites). The presence of higher-temperature minerals in other chondrite types raffects incomplete equilibration during cooling, and/or accretion at temperatures greater their 500°K. Temperatures at which the terrestrial planets, asteroids, and satellites of Jupiter (J) are held to have accreted, according to the Equilibrium Condensation Model, are indicated on the right edge of the diagram.

## La séquence de condensation à l'équilibre

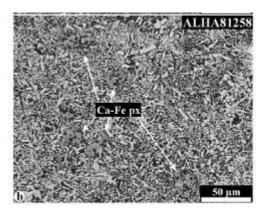
Minéraux de CAI



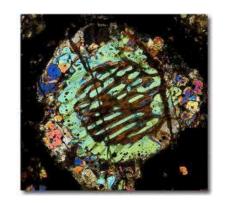
Minéraux de précurseurs de chondres



Composants de la matrice (ou plutôt altération sur le corps parent)

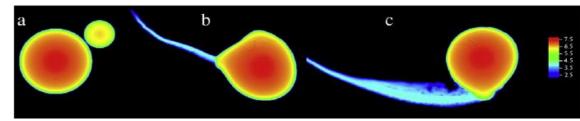


#### L'énigme des chondres



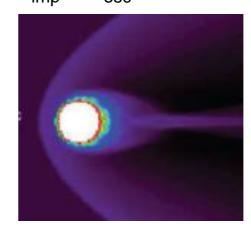
Scénarios planétaires : collisions entre

planétésimaux fondus, fusion d'impact etc.

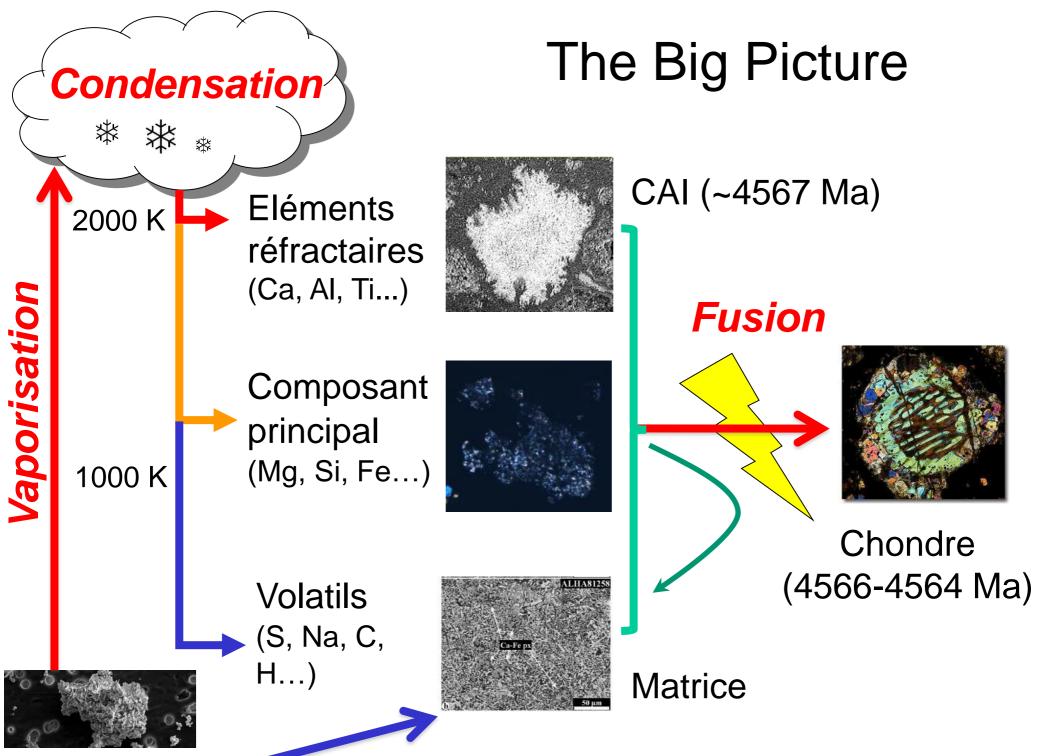


Asphaug et al. (2011):  $v_{imp} = v_{esc} = 36 \text{ m/s}.$ 

Scénarios nébulaires: modèles d'onde de choc, turbulence magnétohydrodynamique, vent X etc.



Ciesla et al. (2004)

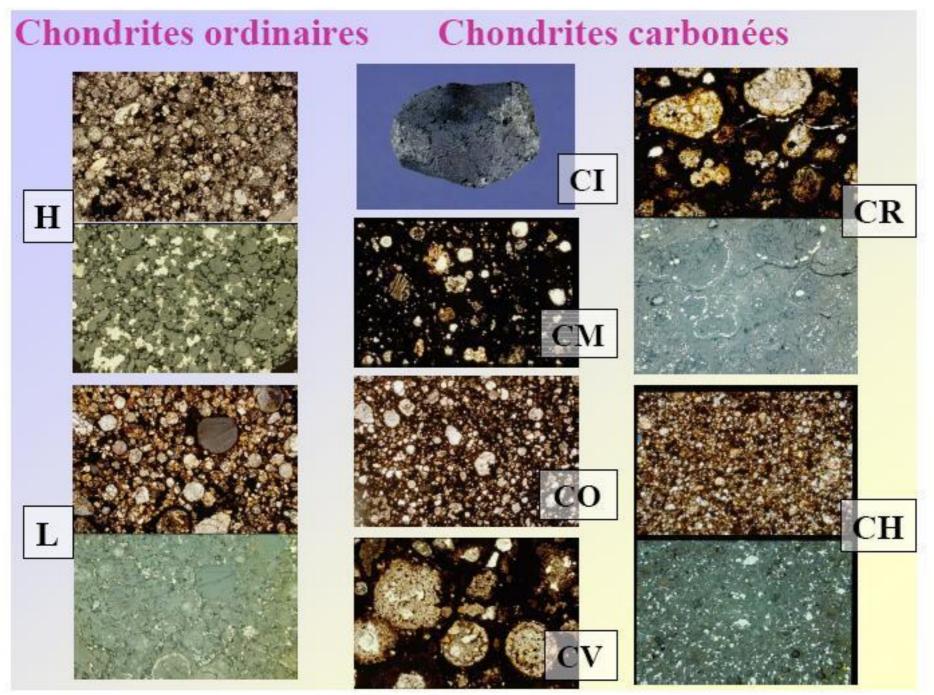


Poussière interstellaire

#### Chondrites

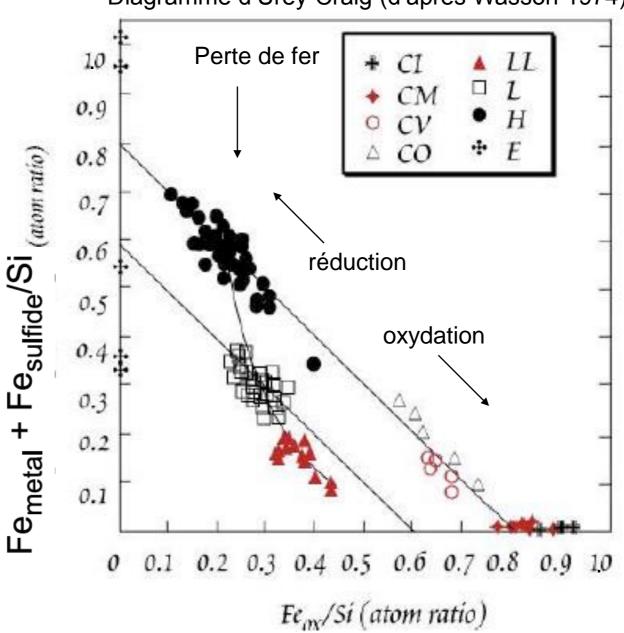
- a. Composition globale
- b. Pétrographie : les composants des chondrites
  - c. Genèse des différents composants
  - d. Classification chimique des chondrites
- e. Processus secondaires et types pétrologiques

### Diversité des chondrites : texture

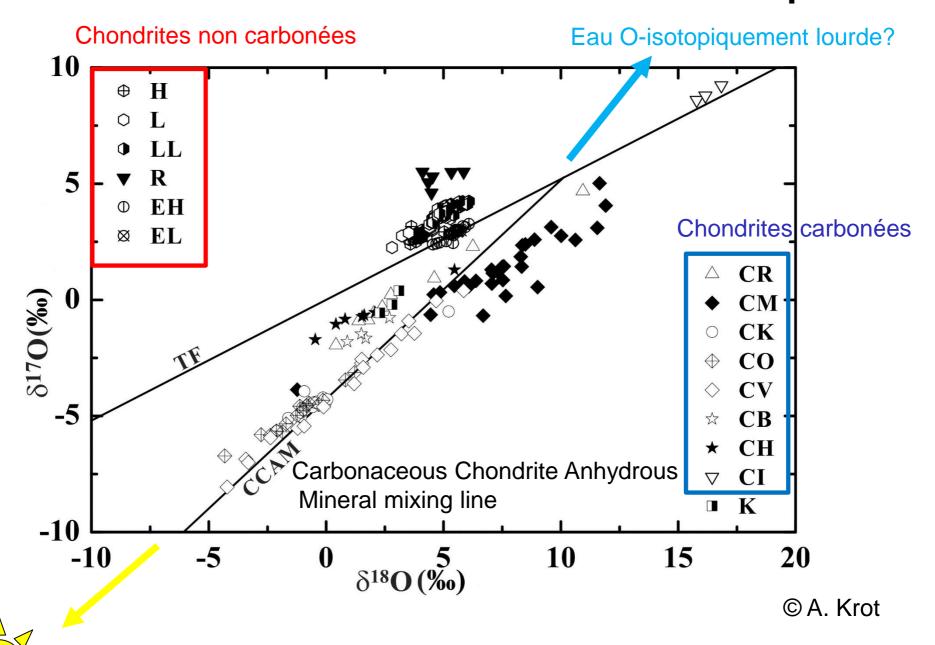


### Diversité des chondrites : chimie

Diagramme d'Urey-Craig (d'après Wasson 1974)

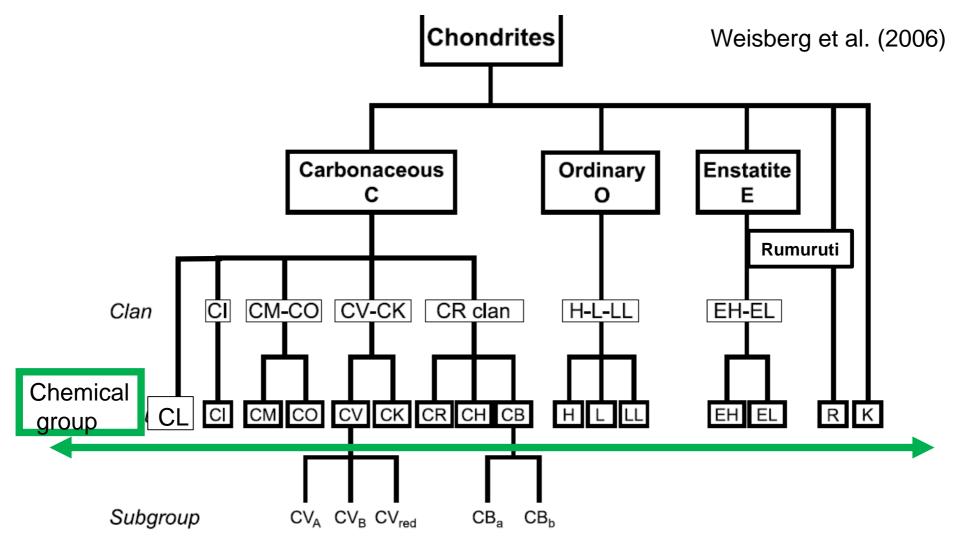


### Diversité des chondrites : isotopie





# Classification chimique des chondrites



Un groupe chimique = un corps parent (?)

### Chondrites ordinaires



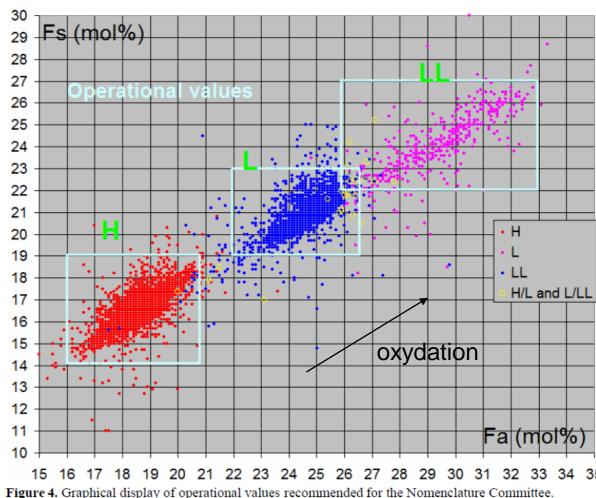
NWA 2710 (H5)



NWA 7187 (L3.6)



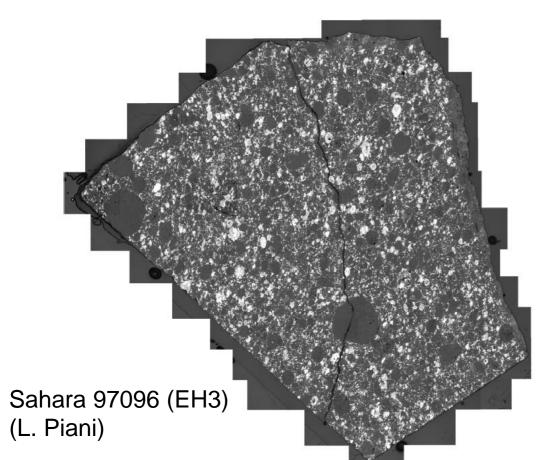
NWA 7676 (LL3.5)

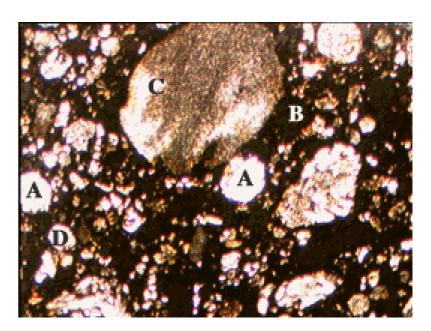


#### 80 % des chutes observées

Divisées en groupes H, L, LL selon teneurs en fer et en FeO des silicates (anticorrélées)

### Chondrites à enstatite





Sahara 97096 (EH3)

Conditions de formation très réductrices

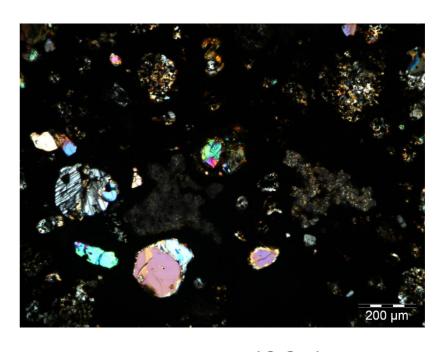
Peu d'olivine, pyroxène magnésien, silice, sulfures inhabituels (CaS, MgS, MnS, etc.)

Isotopiquement similaires à la Terre

### Chondrites carbonées



Allende (CV3)

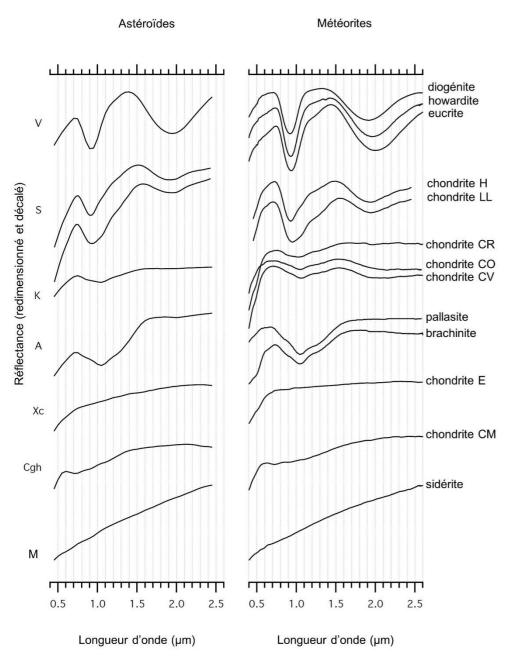


Kainsaz (CO3)

Les plus « primitives » (surtout CI), représentatives du système solaire externe?

Plus d'inclusions réfractaires et de matrice que les autres chondrites

### Corps parents des chondrites



PI RA-QD02-0010

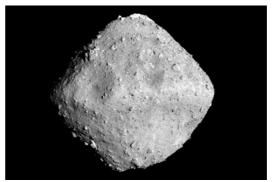
OI PI Tae Tr

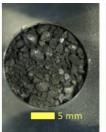
LPX

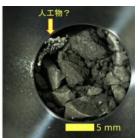
HPX

X 500 15.50Y CORPO ROX TO 13.00M

Itokawa (600 m; S(IV))







Ryugu (400 m; C)

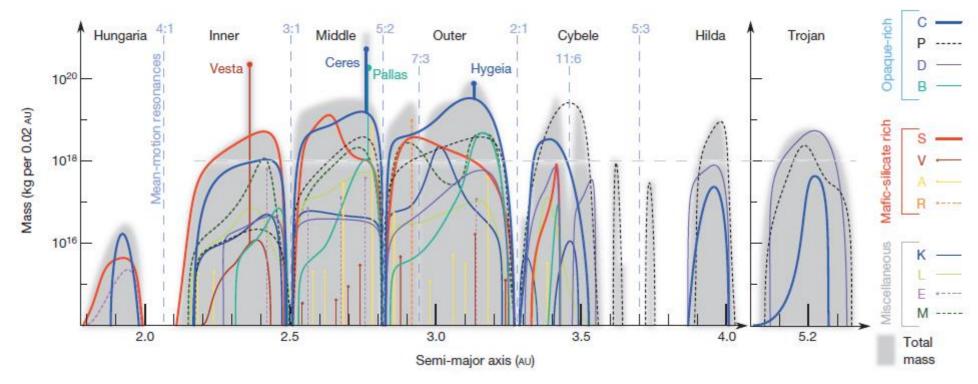


Bennu (200 m; B)

© P. Vernazza

### Signification des groupes de chondrites?

DeMeo & Carry (2014)



Chondrites carbonées apparemment formées les plus loin (astéroïdes C, eau).

Mais : pourquoi davantage enrichies en réfractaires? Pourquoi "plus solaires"? Epoque de formation?

#### Chondrites

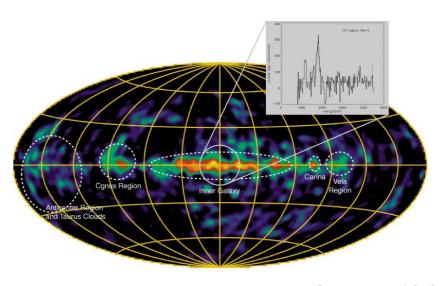
- a. Composition globale
- b. Pétrographie : les composants des chondrites.
  - c. Genèse des différents composants
  - d. Classification chimique des chondrites
    - e. Processus secondaires et types pétrologiques

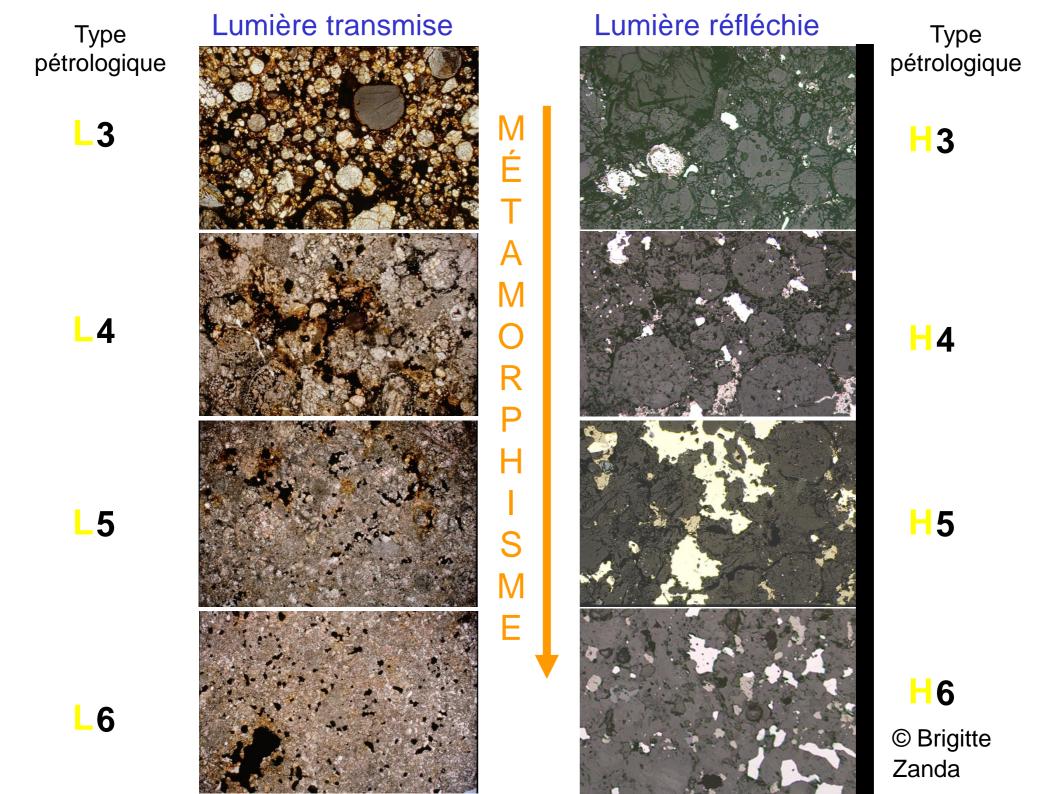
# Sources de chaleur dans les planétésimaux

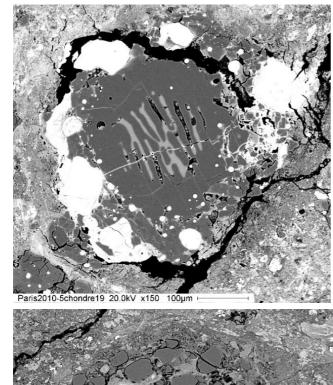
Externes : impacts (énergie gravitationnelle).

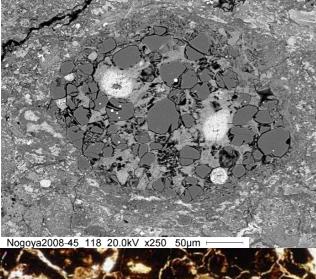
**Internes**: radioactivités à courtes périodes, e.g. **aluminium 26** (T = 0,74 Ma), fer 60 (T = 2,5 Ma).

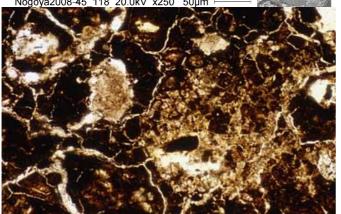




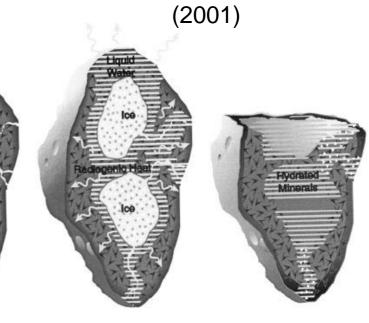








Paris (CM; A. Stephant)



Rosenberg et al.

Nogoya (CM2; M. Denise)

Orgueil (CI1)

#### Echelle de Van Schmus & Wood

#### Altération aqueuse Métamorphisme



Table 3 Summary of criteria for petrologic types.

Criterion	Petrologic type								
	1	2	3	4	5	6			
Homogeneity of olivine and low-Ca pyroxene compositions		>5%	mean deviations ———	<5%		us —			
Structural state of low-Ca pyroxene		Predom	inantly monoclinic ——	>20% monoclinic	<20% monoclinic	Orthorhombic			
Feldspar		Minor primary grains only		Secondary, <2 μm grains	Secondary, 2-50 μm grains	Secondary, >50 μm grains			
Chondrule glass		Altered, mostly Clear, isotropic, absent a variable abundance		1	——————————————————————————————————————				
Maximum Ni in metal		<20 wt.%; taenite —— minor or absent		>20 wt.% Kamacite and taenite in exso	lution relationship —————				
Mean Ni in sulfides		>0.5 wt.%		<0.5 wt.%					
Matrix	All fine-grained, opaque	Mostly fine, opaque	Clastic, minor opaque						
Chondrule-matrix intergration	No chondrules	Chondrules very sharply defined		Chondrules well defined	Chondrules readily delineated	Chondrules poorly defined			
Carbon (wt.%)	3-5	0.8-2.6		<1.5					
Water (wt.%)	18-22	2-16	0.3-3	-	<1.5				

After Van Schmus and Wood (1967), with modifications from Sears and Dodd (1988) and Brearley and Jones (1998).

A Chondrule glass is rare in CM2 chondrites, but is preserved in many CR2 chondrites.

### Bilan: une classification bidimensionnelle

Scott & Krot (2003)

Altération aqueuse Métamorphisme

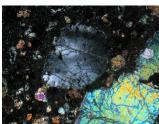
	<b>—</b>					<b>—</b>	
	1	2	3	4	5	6	Total no
Carbonaceous							
CI	5						5
CM	4	44					48
CO			31				31
CV		1	35				36
CR	1	13	1				15
CH			7				7
$CB_a$			3				3
$CB_b$			3 2 2				2
CK			2	13	6	1	2 23
<i>Ordinary</i> <sup>a</sup>							
Н			187	1,371	3,319	1,784	6,661
L			316	415	1,220	4,053	6,004
LL			71	64	419	406	960
Enstatite							
EH			18	9	6	2	35
EL			8	0	2	19	29
Other							
K			2				2
R			2 3	2			14
			9 R3-6				

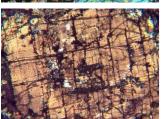
Chocs

effects resulting from equilibration peak shock pressure

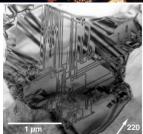
whole-rock effects

shock pressure









	olivine	orthopyroxene	plagioclase		(GPa)
S1	sharp optical ex	tinction; irregular fra	actures	none	
S2			and do no publication		_ <4-5
32	undulose extinction; irregular fractures	undulose extinction; irregular fractures; some planar fractures	undulose extinction; irregular fractures	rare opaque veins	- 1
S3	planar fractures; undulose extinction; irregular fractures	clinoenstatite lamellae on (100); undulose extinction; planar fractures; irregular fractures	undulose extinction	opaque shock veins	5 - 10
S4	weak mosaicism; planar fractures	weak mosaicism; twinning on (100); planar fractures	partially isotropic, undulose extinction	opaque shock veins	25 - 3
S5	strong mosaicism; planar fractures	strong mosaicism; planar fractures	maskelynite	melt pockets; opaque shock veins	45 - 6
	restric		_ 43 - 0		
S6 <sup>*</sup>	solid-state recrystallization; ringwoodite	majorite; melting	shock melted (normal glass)	melt pockets; opaque shock veins	
					75 - 90

shock melted

whole-rock melting (impact melt rocks and melt breccias)





### V. Les achondrites

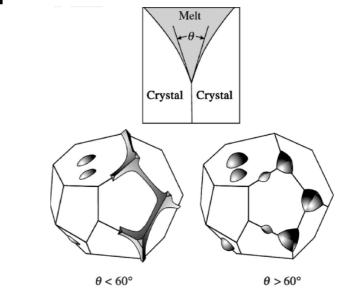
# Le début de la fusion partielle : les achondrites primitives

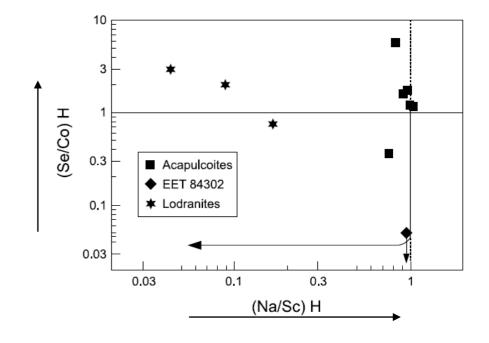


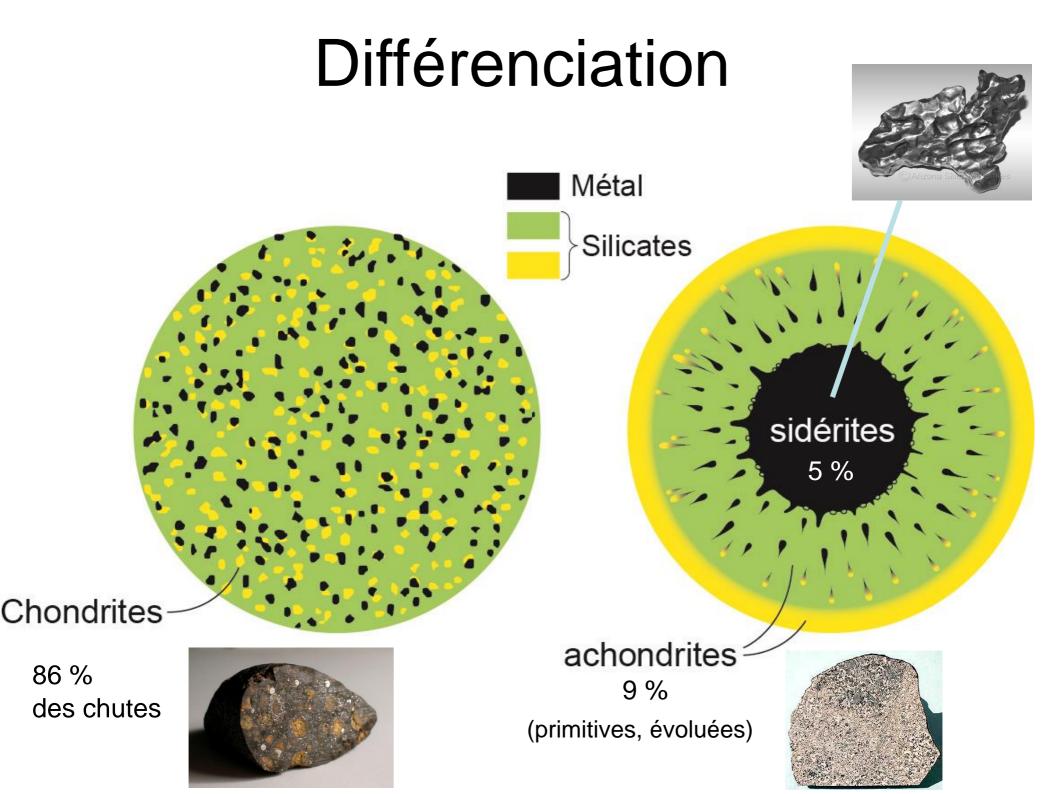
Monument Draw (acapulcoïte)



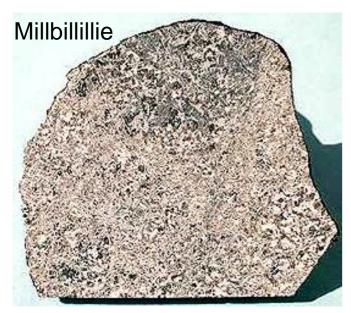
Lodran (lodranite)



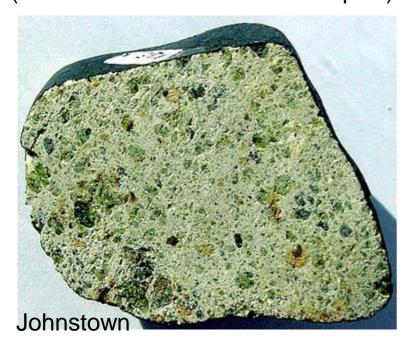




### Howardites, Eucrites, Diogénites (HED)



Eucrite = basalte, gabbro (25 % des achondrites antarctiques)

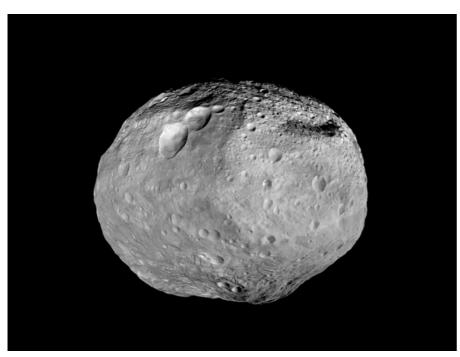


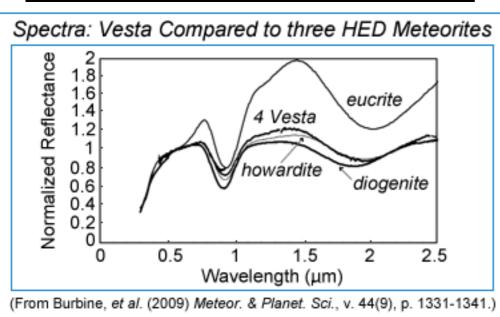
Howardite = brèche eucrite-diogénite (12 %)

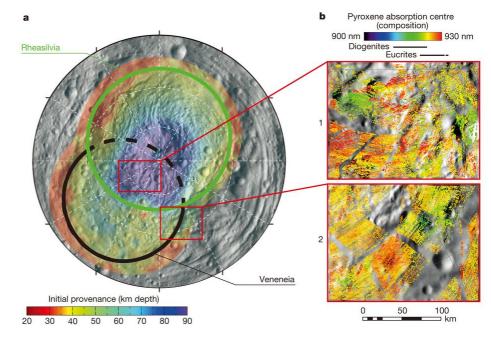


Diogénite = Orthopyroxénite (8 %)

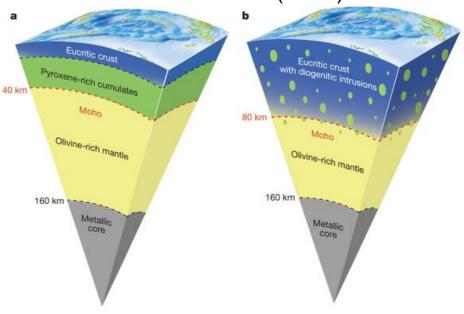
### 4 Vesta : corps parent des HED?











### Météorites lunaires



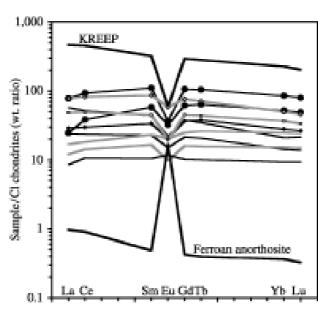
ALHA 81005 (brèche anorthosique)

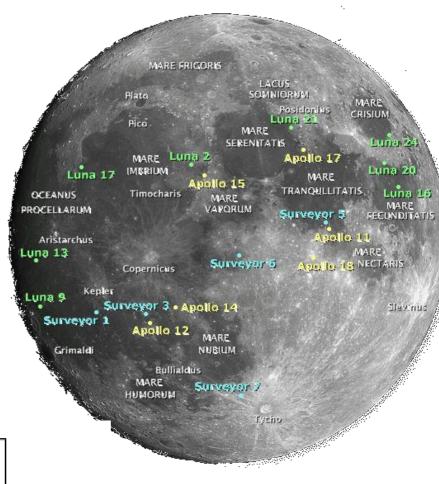


NWA 032 (basalte)



NWA 773 (gabbro)



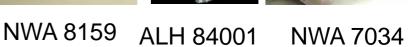


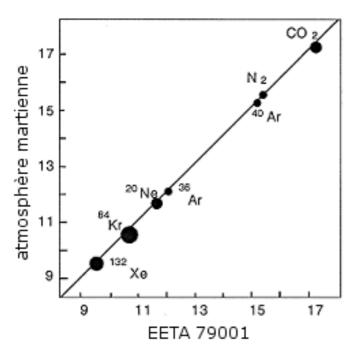
Terres rares des roches lunaires

### Météorites martiennes (SNC)

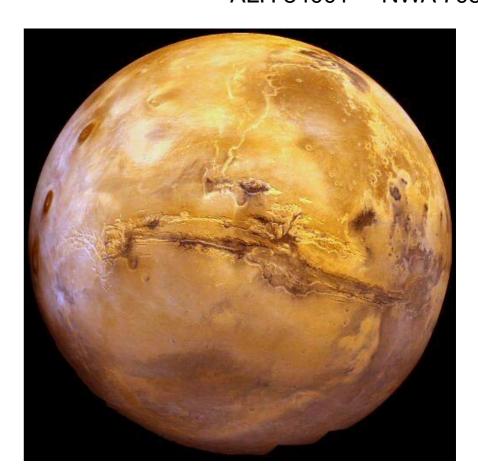






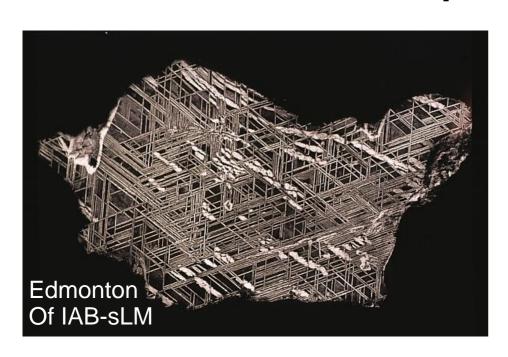


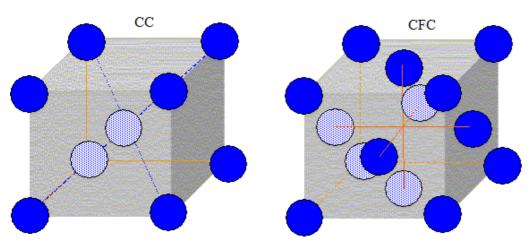
Analyse des gaz dans les vacuoles de verre d'une shergottite



### VI. Les sidérites

# Les figures de Widmannstätten : caractéristiques des sidérites



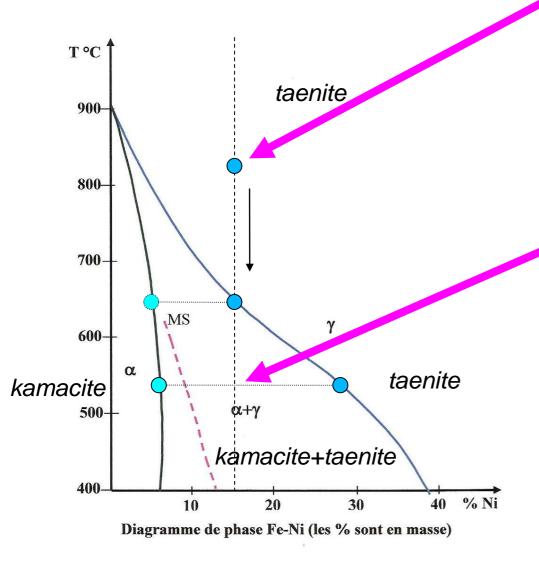


Observées après attaque à l'acide d'une surface polie

Deux minéraux (Fe, Ni) : - **kamacite**, cubique centré, pauvre en Ni  $(fer \ \alpha)$  -

taénite, cubique à faces centrées, riche en Ni (plus résistante à l'acide) (fer γ)

### Formation des figures de Widmanstätten

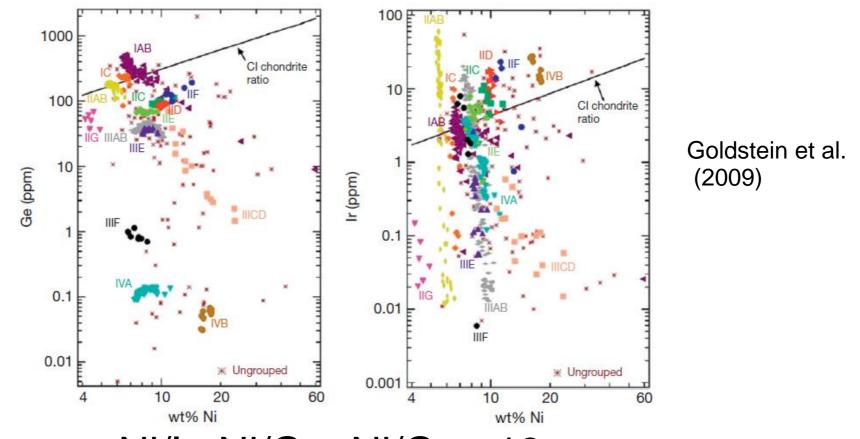


Haute température : métal sous forme de cristaux métriques de taenite

Basse température : exsolution des lamelles de kamacite de référence :

Taux de refroidissement : 1-10 000 K/Ma

### Eléments en trace sidérophiles : classification chimique des sidérites



Diagrammes Ni/Ir, Ni/Ga, Ni/Ge : 13 *groupes* chimiques (IAB, IC, etc.) = 13 sources distinctes

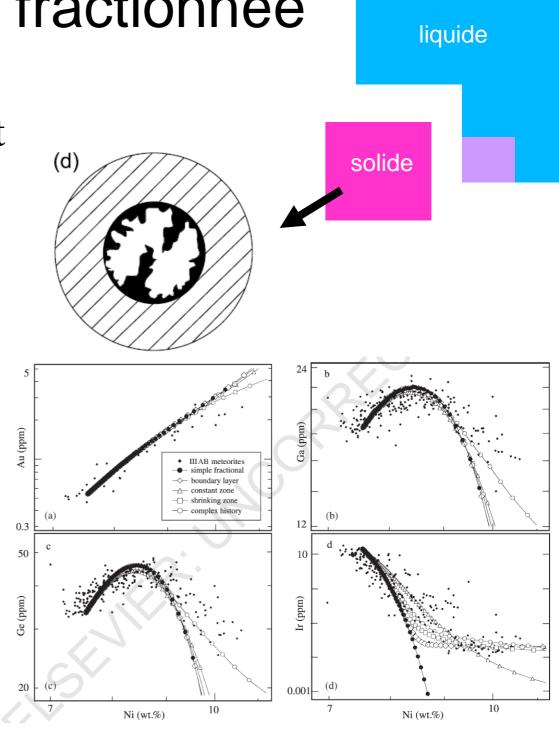
Une sidérite sur 8 non groupée : ~75 corps parents différents représentés.

### Cristallisation fractionnée

 Concentration d'un élément E de coefficient de partage D (constant) dans le solide :

 $C = DC_0(1-g)^{D-1}$ avec g fraction déjà cristallisée => droites en log-log pour deux éléments

#### Coefficient de partage : D = concentration dans solide/concentration dans liquide



### Sidérites silicatées

- Groupes IAB/IIICD et IIE anormaux : sidérites non cristallisées fractionnément
- Inclusions silicatées
- Lien avec des achondrites primitives
- Différenciation incomplète/impact



Miles (IIE)



Portales Valley (H6 IMB)

### **Pallasites**



Esquel PAL-MG

 Trame (Fe, Ni) avec olivine => interface noyaumanteau (?)

### Pour en savoir plus...

