

Bulletin

de

L'AM.S.

A.M.S.

7 rue de Valenciennes - 75011 Paris

de la Commission de l'Environnement de la Région

XXVI (1980) n° 1 - 1980

4 place Joffre

75201 PARIS Cedex 08

VIE DE LA COLLECTION

Depuis l'ouverture quotidienne de la Collection le public est fidèle au rendez-vous, nous avons le plaisir de constater que la recette d'un mois actuel correspond à un an des années précédentes.

La Bourse de SAINTE MARIE AUX MINES s'est tenue les 25, 26 et 27 juin ; dans l'ensemble pas de nouveautés en minéraux, malgré la présence de nombreux pays de l'Est. De Russie quelques beaux échantillons de sulfures de la région de Dalnegorsk, quelques rares beryls héliodores d'Ukraine, dont le prix a considérablement baissé, près de 50 % en deux ans. Deux beaux spécimens d'aragonite de Podrečany (Tchécoslovaquie). Malgré quelques azurites de Touissit, les minéraux marocains étaient médiocres et rares. Des stands de bonnes qualités présentaient de beaux cristaux du Pakistan: beryls, topazes, épidotes, kunzites, tourmalines, grenats, etc... Une grande abondance de minéraux sans intérêt, mais qui bizarrement trouvent preneurs. Une prolifération de lampes de mines, là encore les pays de l'Est inondent le marché.

Nous avons pu acquérir quelques beaux échantillons:

- Un remarquable groupe d'étoiles d'astrophyllite de la péninsule de Kola, échantillon remarquable de fraîcheur et d'éclat.
- Un énorme bloc de getchellite, rare sulfure d'arsenic et d'antimoine venant de Kaidarkan dans la vallée de Ferghana en Kirghizie. Sans doute le meilleur échantillon connu d'un minéral que nous avons découvert en 1964 au Kurdistan iranien, dont l'étude assez lente laissa la priorité du nom, au même minéral découvert dans la mine d'or de Getchell au Nevada.
- Un très beau cristal de cassiterite (10 cm), de la mine de Iultin dans l'état de Tchoukotka, Russie.
- Un groupe de cristaux de quartz du Brésil, d'un faciès inhabituel.

Peu de temps auparavant, la Collection s'est enrichie d'une remarquable feuille d'or de la mine de Jamestown dans le célèbre Comté de Tuolumne en Californie, découvertes le 25 décembre 1992, l'or est riche en argent et nous avons à faire à un électum associé à de petits cristaux de hessite, rare tellurure d'argent.

Les météorites, témoins de la formation du système solaire.

Conférence de Edmond Diemer du 15 mai 1993

I - Connaissances générales

1.1 - Introduction

Nous avons célébré en 1992, le 500ème anniversaire de la découverte de l'Amérique par Christophe Colomb. Mais bien d'autres événements importants ont caractérisé cette année ; ainsi les spécialistes des météorites se sont souvenus qu'une petite ville alsacienne, Ensisheim, est célèbre dans le monde entier pour avoir été le témoin de la première chute reconnue d'une météorite en Occident. Une exposition temporaire remarquable organisée par Monsieur Georges Mathieu au Musée de la Régence avec la collaboration du Muséum National d'Histoire Naturelle et d'Alain Carion, grand collectionneur parisien, a mis en honneur, non seulement la météorite d'Ensisheim, mais également la science des météorites en général. Nous avons profité de ce 500ème anniversaire pour parler de ces cailloux venus d'ailleurs que sont les météorites : messagers de l'espace, elles nous apportent non seulement les matériaux les plus primitifs du système solaire mais également quelques poussières de matières provenant des étoiles antérieures au système solaire. On comprend dès lors la passion qui anime tous les savants qui, au travers de l'étude de ces morceaux d'univers, essaient de déchiffrer l'origine de notre monde.

1.2 - Un peu d'histoire.

Revenons aux faits de l'époque tels qu'ils sont rappelés par Ursula Marvin dans la revue "Meteoritics" : "Le 7 novembre 1492, à 11h30, une formidable explosion résonna tel un coup de tonnerre sur le haut pays rhénan, tandis qu'une boule de feu incandescente sillonnait le ciel des cantons suisses en direction du nord-ouest, c'est à dire de l'Alsace . Tout au long de sa trajectoire, les gens terrifiés crurent que leurs maisons étaient en train de s'écrouler. A quelque distance à l'extérieur des remparts de la ville d'Ensisheim, un jeune garçon, pétrifié de stupeur, vit une pierre se précipiter depuis le ciel dans un champ de blé où elle s'enfonça d'un mètre".

Cet événement fut considéré comme un présage divin dont Maximilien tira parti pour régler ses affaires politiques avec le roi de France, Charles VIII. Maximilien, après en avoir prélevé deux morceaux (après sa chute, de nombreux morceaux avaient déjà été prélevés, mais dès lors il interdit cette pratique ; au départ, elle pesait 127 kg), demanda aux habitants d'Ensisheim de la suspendre dans le chœur de l'église. De nombreux documents de l'époque relatent les événements historiques, politiques ou scientifiques auxquels cette météorite a été associée. Bien que cela n'enlève rien à la valeur symbolique d'Ensisheim, on sait, depuis 1980 seulement, que la météorite la plus anciennement reconnue est tombée le 19 mai 861 à Nogata (île japonaise de Kyushu) sur le temple shintoïste Suga Jinja où elle conservée et vénérée ; son existence n'est connue en Occident que depuis le congrès annuel de la société internationale météoritique qui s'est tenu à San Diego en 1980. C'est une chondrite ordinaire, de forme arrondie et pesant 472g.

En fait il y a eu des chutes antérieures aux deux dates citées ; le fer météoritique était utilisé dès 3000 ans avant J.C. pour faire des armes, des outils, des colliers de perles (Egypte, 3200 ans avant J.C.). De nombreux auteurs grecs ont décrit des chutes. La pierre noire de la Kaaba à la Mecque serait une météorite (La légende veut qu'elle aurait été apportée à Abraham par l'archange Gabriel, mais l'interdiction d'en prélever un morceau pour en faire l'analyse ne permet pas la confirmation).

Phénomène inexplicable à ces époques, les hommes de l'antiquité avaient soupçonné l'origine extra-terrestre des météorites. Mais en Europe occidentale, et en particulier au "Siècle des Lumières", faute de pouvoir envisager une telle origine, on l'attribuait à des phénomènes terrestres tels que la foudre (Donnerstein d'Ensisheim). Ainsi l'origine extra-terrestre fut contestée malgré des rapports de témoins dignes de foi : pour Lavoisier et certains de ses collègues, la météorite de Lucé, tombée dans la Sarthe le 13 septembre 1768, fut attribuée à un grès pyriteux frappé par la foudre. Chladni, physicien russe d'origine allemande, fut le premier à conclure, en 1794, de la compilation de nombreux rapports, à l'origine extra-terrestre des météorites. Mais il a fallu attendre l'étude, en 1803, de Jean Baptiste Biot sur la météorite de L'Aigle (Orne, 26/4/1803) pour que la communauté scientifique admette enfin cette hypothèse. Il s'agissait d'une "averse" de 3000 morceaux, le plus gros pesant 9 kg et l'ensemble avoisinant 37 kg était réparti sur une surface elliptique de 11 km².

1.3 - Corps parents des météorites.

Rappelons quelques éléments d'astronomie : nous savons que la terre ainsi que huit autres planètes tournent autour du soleil, certaines de ces planètes ayant des satellites, quelquefois fort nombreux. Mais il se trouve qu'entre les planètes Mars et Jupiter, où la loi d'éloignement des planètes par rapport au soleil, dite de "Titius-Bode", prédisait l'existence d'une planète, il n'y en a pas ; on y trouve par-contre plusieurs milliers d'astéroïdes dont le plus grand, Cérés a 1003 km de diamètre ; la plupart de ces objets sont beaucoup plus petits: ils n'ont jamais pu "s'accréter", c.à d. se souder ensemble, pour former une planète à cause de la perturbation gravitationnelle de Jupiter, la plus grande planète du système solaire (son diamètre vaut 11,2 fois celui de la Terre, tandis que celui du Soleil vaut 109 fois celui de la Terre).

Depuis que l'on a pu enregistrer par des caméras, et ce pour la première fois en 1959, à Příbram en Tchécoslovaquie, les trajectoires de quelques météorites, on considère que la plupart d'entre-elles proviennent de la **Ceinture d'Astéroïdes**, mais pas nécessairement directement de cette ceinture : à la suite de chocs entre eux, les blocs rocheux peuvent se trouver dans des positions "interdites" par Jupiter et être alors éjectés de la ceinture, se transformant en objets Amor et Apollo dont les orbites, très allongées, peuvent rencontrer la terre. Enfin, 20% des météorites auraient pour corps parents des noyaux cométaires. La plupart des météorites circulent dans le système solaire à une vitesse de 42 km/s et impactent la terre à 12 à 15 km/s. Une vitesse supérieure à 42 km/s signifierait une origine extérieure au système solaire mais pour le moment l'existence de tels objets n'a pas encore été confirmée.

1.4 - Composition et classification des météorites.

Comme minéralogiste nous voulons connaître la composition des météorites : il existe des météorites pierreuses, métalliques, mixtes. Mais pour expliquer cette diversité, il nous faut revenir à la formation des planètes, le scénario le plus universellement admis étant l'accrétion, c'est à dire l'agglomération sous le choc de poussières en grains puis en cailloux de plus en plus gros. Prenons comme exemple une grande planète, la Terre.

Du fait de sa température interne, de sa masse et du champ gravitationnel qui en résulte, elle a subi une "différenciation", c.à d. une ségrégation en fonction de la densité des roches, ce qui a conduit à la formation:

au centre, d'un noyau métallique

à la surface, de croûtes océanique et continentale

entre les deux d'un manteau.

Quelle a été la source de chaleur qui a permis la fusion ? Les chocs des particules lors de l'accrétion génèrent de la chaleur mais les simulations montrent que, si leur contribution n'est pas négligeable, la chaleur dégagée est insuffisante pour provoquer la fusion. On sait maintenant que le phénomène initiateur de la condensation du gaz présolaire est l'explosion d'une ou plusieurs supernovae lesquelles ont "craché" dans le gaz interstellaire les produits de leur nucléosynthèse: des métaux lourds et, entre autres, des **éléments radioactifs** : Les quatre premiers éléments du tableau ci-dessous ont des **périodes**¹ longues : ils peuvent être la source d'énergie qui a provoqué la différenciation des planètes :

tableau I

Chaînes de désintégration	Périodes en années
$^{238}\text{U} \text{ ---> } ^{206}\text{Pb}$	$4,55 \times 10^9$
$^{235}\text{U} \text{ ---> } ^{207}\text{Pb}$	$0,7 \times 10^9$
$^{232}\text{Th} \text{ ---> } ^{208}\text{Pb}$	14×10^9
$^{40}\text{K} \text{ ---> } ^{40}\text{Ar}$	$1,27 \times 10^9$
$^{26}\text{Al} \text{ ---> } ^{26}\text{Mg}$	$7,4 \times 10^5$

mais pour des astéroïdes dont le diamètre ne dépasse pas quelques centaines de kilomètres, la chaleur est évacuée par rayonnement au fur et à mesure de sa production mais est insuffisante pour atteindre le point de fusion. Cependant, la découverte d'**éléments à période courte** (Al --> Mg) permet d'expliquer la différenciation des petits astéroïdes.

Selon que les météorites proviendront d'astéroïdes de grandes dimensions ou non (mettons la limite vers 200/300 km de diamètre) ils auront ou non subi une différenciation. Ainsi, l'éclatement d'un petit astéroïde produira des météorites non différenciées et on conçoit très bien qu'elles auront la composition la plus proche de la matière la plus primitive.

¹ On appelle période d'un élément radioactif, le temps au bout duquel la moitié de la masse, initialement présente, a disparu par désintégration.

Le tableau ci-dessous présente les météorites selon cette classification.

tableau II

	Lieux de récupération des météorites	Nombre et %	
		Déserts et lieux habités *	Antarctique **
Densités	Total des météorites	2611 dont 905 chutes	environ 15000
	Météorites non différenciées		
	Chondrites	1681 64,4	85,4
3,5	Chondrites ordinaires		
3,55	Chondrites à enstatite		
2,55-3,6	Chondrites carbonées		
	Météorites différenciées	930 35,6	14,6
3,5	Achondrites	132 5,1	7,6
	Riches en calcium (CaO > 5%)		
	Angrites, eucrites, howardites		
	Pauvres en calcium (CaO < 3%)		
	Diogénites, urérites, aubrites		
7,8-8	Météorites de fer	725 27,8	6,1
	Hexaédrites	50 1,9	
	Octaédrites	427 16,4	
	Ataxites	33 1,3	
	Non classées	215 8,2	
	Lithosidérites	73 2,8	0,9
	Pallasites	39 1,5	
	Mésosidérites	32 1,2	
	Lodranites	2 0,1	

* Chiffres extraits du "Catalogue of meteorites" du British Museum, édition 1985.

** Chiffres extraits de: Alain Carion, Météorites, mai 1992. Beaucoup de ces météorites sont de petites dimensions : elles sont plus facilement repérables sur la glace que dans des lieux habités ou dans les déserts.

Examinons maintenant les différentes catégories de météorites:

Les **météorites non différenciées** comprennent exclusivement les **chondrites**. Formées essentiellement de silicates, elles tirent leur nom des **chondres**, gouttelettes plus ou moins vitreuses, résultant de la fusion partielle de matière solide préexistante et de leur refroidissement rapide (en env. 1h). Ces chondres sont formées essentiellement d'olivine, de pyroxènes et de feldspaths et constituent 30 à 90% des chondrites. Celles-ci contiennent en plus de 0 à 10% d'inclusions réfractaires, formées à

partir du calcium, de l'aluminium ou du titane ; le reste de la chondrite est formé d'une matrice de grains très fins - < 10 µm - et dont la composition générale correspond à celle des matériaux ci-dessus.

Mais nous avons vu que les astéroïdes subissent un échauffement du fait de la présence de composés radioactifs. Si la chaleur dégagée n'est pas suffisamment intense pour provoquer la fusion et donc la différenciation, elle produira néanmoins une transformation de la matière à l'état solide - appelée métamorphisme - et cela se traduira par une disparition des chondres d'autant plus prononcée que l'on est plus proche du centre de l'astéroïde : celui-ci acquerra donc une structure en "pelure d'oignon". On affectera les chondrites d'un chiffre allant de 3 à 6 : plus le chiffre est grand, plus le métamorphisme a été intense. Dans le cas des chondrites carbonées, dont l'origine est probablement cométaire, on observera une altération hydrothermale et on associera ces chondrites d'un chiffre allant de 3 à 1 mais ici, c'est la valeur 1 qui indique la plus grande transformation. Les flèches dans le tableau ci-dessous indiquent le sens dans lequel les intensités des altérations augmentent.

tableau III

1	2	3	4	5	6
←		Pas d'altération	→		
Altération hydrothermale		Chondres bien	Métamorphisme (anhydre) 700 - 1200°		
Concerne les ch. carbonées		visibles	Disparition progressive des chondres		

On associe de plus aux chondrites ordinaires qui sont les plus nombreuses (90% des chondrites), une lettre fonction de leur teneur en fer (on considère essentiellement le fer métal): H, L, LL, ces dernières étant les moins riches et que le tableau ci-dessous résume également.

tableau IV

Dénomination des chondrites en fonction de leur teneur en métal					
Composition en %		Fe total	Fe métal	Ni	Silicates
H	Forte teneur en fer total, Faible	25-31	14-19	1,9	Ol. Br.
L	teneur en fer total	20-23,5	4-11	2	Ol. Hyp.
LL	Faible teneur en fer total et en métal	18,5-21,5	0,5-4	0,9	Ol. OPX. Pl.

Ol. = olivine Hyp. = hypersthène OPX. = orthopyroxène Pl. = plagioclase
Ol. et Hyp. sont des OPX

Ainsi la météorite d'Ensisheim, qui est une chondrite ordinaire très pauvre en fer et très altérée, sera une LL6.

Les chondrites à enstatite (E) doivent leur nom à un pyroxène riche en magnésium ; elles se classent aussi selon leur teneur en fer, H ou L. Ex: **St Sauveur** (Hte Garonne, 10/7/1914) est une EH.

Les chondrites carbonées (C) sont les plus rares mais aussi les plus intéressantes car les plus primitives. On leur affecte des lettres correspondant à des météorites prises comme référence:

I : Ivona, M : Mighéi, O : Ornans, V : Vigarano. Leurs corps parents pourraient être des noyaux cométaires.

Ex: Orgueil et Murchison déjà citées. Mais il faut aussi mentionner celle d'**Allende** (Mexique, 8/2/1969) qui a fait l'objet de très nombreux travaux. C'est la plus ancienne météorite connue, vieille de 200 millions d'années de plus que les autres. Nous vous en parlerons plus loin.

Le tableau ci-dessous quelques-unes de leurs caractéristiques .

Tableau V

Type	Carbone en %	Eau en %	Masse spécifique
CI Ivona	5-3	20	2,5-2,9
CM Mighéi	2,9-0,6	13	2,4-3,8
CO Ornans	1-0,2	<1	3,4-3,8
CV Vigarano	<0,2	<0,03	3,4-3,8

Les météorites différenciées, provenant donc d'astéroïdes de grandes dimensions se répartissent en trois classes:

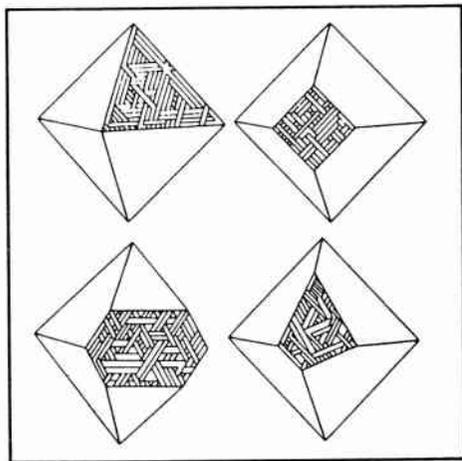
a - Les achondrites : elles ont l'aspect pierreux comme les chondrites mais, comme leur nom l'indique, elles n'ont pas et jamais eu de chondres. On les classe selon leur richesse en calcium comme indiqué dans le tableau II.

Ex: **Juvinas** (Ardèche, 15/6/1821).

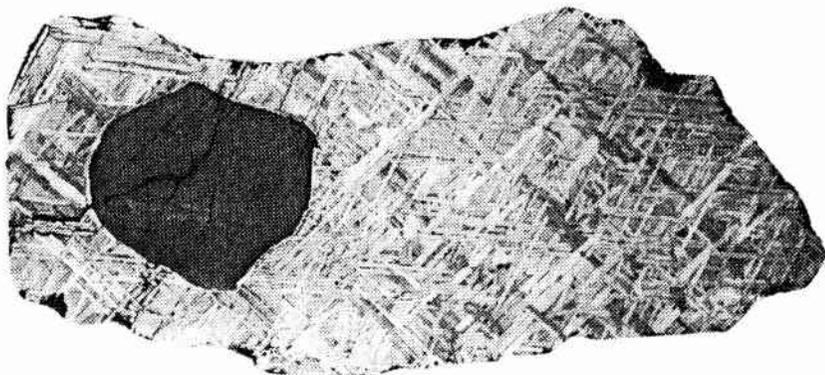
b - Les météorites de fer : formées à 90% de ferro-nickels, on trouve dans ce groupe les plus grosses météorites (**Hoba**, Namibie, 1920, 60 à 70 T selon les auteurs). Leur structure est fonction de la teneur en nickel: les hexaédrites contiennent de 5 à 6% de Ni et sont constituées de kamacite. Elles montrent quelquefois des lignes parallèles, les figures de Neumann qui apparaissent lors des impacts à des températures de 300 à 600 °C. Les octaédrites (6-18% de Ni), sont un mélange de kamacite et de taenite, la structure octaédrique de cette dernière donnant naissance aux **figures de Widmanstätten** dont les bandes (**Balken**, en allemand) diminuent de

largeur lorsque la teneur en Ni augmente. Lorsque la teneur en nickel est encore plus élevée (18-30%), on passe à un autre minéral, la plessite, et on a les ataxites.

La figure ci-dessous montre de quelle manière peuvent apparaître les figures de Widmanstätten..

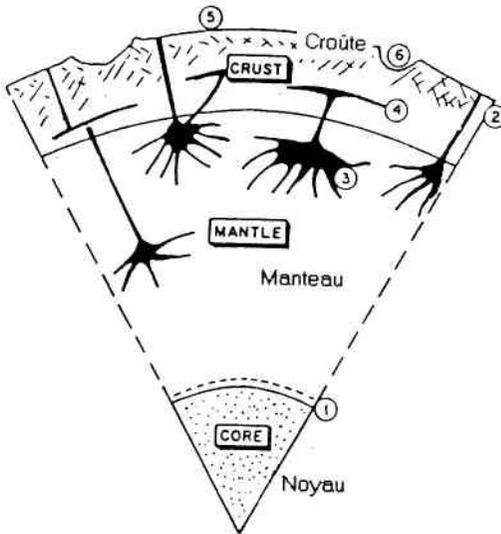


Nous donnons plus loin une reproduction de ces figures telles qu'on les voit dans la météorite "Augusta County" tombée aux USA (figure extraite du livre de Bühler). On y découvre aussi, sur la gauche, une grosse inclusion de troilite. La plaque de métal représentée a 21 cm de largeur.



c - Les lithosidérites sont formées en parties égales de ferro-nickels et de silicates. C'est dans ce groupe que l'on trouve les plus belles météorites, les pallasites : découvertes par le naturaliste Pallas, en 1775, elles sont formées de gros cristaux d'olivines, parfois gemmes, enchassés dans le ferro-nickel. Mais nous y trouvons aussi les mésosidérites, formées de ferro-nickels, de pyroxènes et de feldspaths et les lodranites, très rares, qui contiennent des ferro-nickels, des olivines et des pyroxènes.

En partant de cette classification, nous pouvons essayer de replacer certaines de ces météorites dans leur corps parent (Schéma de synthèse donné par Dodds)



- 1 - pallasites
- 2 - brèches d'impact: howardites, mésosidérites
- 3 - poche magmatique
- 4 - intrusions magmatiques peu profondes: eucrites, shergottites, achondrites
- 5 - coulées de surface: eucrites à grains fins, shergottites
- 6 - cratères d'impact: à l'origine de brèches

Mais en tant que minéralogistes, nous nous intéressons particulièrement aux minéraux que comportent les météorites et que nous avons regroupés dans le tableau ci-dessous.

tableau VI

Principaux minéraux des météorites								
Nom	Formule	Sp	Ch	CCh	Ach	Pal	Més	Fe
Apatite	$Ca_4[(F,OH)(PO_4)_3]$		x				x	(x)
Chromite	$FeMg Cr_2O_4$		x		x	x	x	x
Clinopyroxènes	$AB[Si_2O_6]$		x		x		x	(x)
Cohénite	Fe_3C		x					x
Daubréelite	$FeCr_2S_4$	x			x			x
Farringtonite	$Mg_2(PO_4)_2$	x				x		
Feldspaths	$Na[AlSi_3O_8]-Ca[Al_2Si_2O_8]$		x		x		x	(x)
Ferro-nickels	Kamacite, Taenite	x	x			x	x	x
Ilménite	$FeTiO_3$		x		x		x	
Lawrencite	$FeCl_2$	x						x
Magnétite	$(Fe^{3+}, Fe^{2+})Fe^{3+}O_4$		3	x				
Minéraux argileux								
Ninengérite	$(Mg, Fe, Mn)S$	x	E					
Oldhamite	CaS	(x)			x			x
Olivines	$(Mg, Fe)_2[SiO_4]$		x		x	x	x	(x)
Orthopyroxènes	$AB[Si_2O_6]$		x		x	x	x	(x)
Osbornite	TiN	x						
Pentlandite	$(Ni, Fe)_9S_8$			x		x		
Perryite	Ni_3Si	x						x
Schreibersite	$(Fe, Ni, Co)_3P$	x						x
Sinoïte	Si_2N_2O	x						
Spinelle	$MgAl_2O_4$		3	x				
Troïlite	FeS	x	x		(x)	x	x	x
Whitlockite	$Ca_3(PO_4)_2$		x		x	x	x	(x)

Sp:spécifique aux météorites Ch:chondrites 3:type 3 Ach:achondrites
CCh:chondrites carbonées Pal:pallasites Més:mésosidérites Fe:ferro-nickels
E: ch. à enstatite

Tableau complété à partir de B. Pejovic, Man and Meteorites, 1982

Ce tableau appelle les remarques suivantes:

- 1 - Aucun élément nouveau n'a été trouvé dans les météorites.
- 2 - Du fait des conditions particulières de formation, on trouve des composés inconnus sur terre et souvent en très grande quantité, tels les ferro-nickels. Pour les autres composés la spécificité est moins évidente: on a trouvé sur terre, de très faibles quantités de troïlite dans les serpentines de Del Norte County en Californie et de la Schreibersite dans les produits de combustion du charbon de Commeny et Cranzac.

1.5 - Nombre de chutes et trouvailles.

Chaque année, chaque jour, notre terre s'alourdit du poids des météorites qu'elle reçoit. Les savants ont essayé de quantifier le phénomène et, d'après les estimations de la NASA, 90000 t de matière arrivent tous les ans sur notre planète, soit environ 20 g/km²/an ou 250 t/jour. Beaucoup disparaissent dans les océans qui recouvrent les 2/3 de la surface de notre planète. Leur nombre est d'autant plus grand que leur taille est plus petite mais l'essentiel de ces objets est constitué de grains minuscules à l'origine des "étoiles filantes". D'après le professeur Bühler de Zurich, la terre reçoit tous les ans 19000 objets extra-terrestres dont la masse est supérieure à 100 g. On pense qu'il tombe une météorite de 4 t tous les 10 ans.

1.6 - Phénomènes liés aux impacts.

Mais quelles sont les conséquences de la rencontre de ces météorites avec notre terre?

Il est probable que l'inclinaison de l'axe de certaines planètes résulte de chocs avec une météorite de grande masse : ainsi la Terre aurait subi un choc avec une météorite dont la masse serait le millième de sa propre masse; pour Uranus la météorite devait avoir le 1/10 de son poids.

Mais la trace la plus évidente est la formation de cratères, dont à ce jour, 130 ont été identifiés avec certitude. Les dégâts d'impacts sont fonction de la taille de la météorite. Pour un objet de 10 m on pourrait avoir une explosion dans la haute atmosphère, sans risque au sol. Un objet de 100 m provoquerait une catastrophe du type Toungouska (30/6/1908 : il s'agirait d'un noyau cométaire de quelques centaines de m de diamètre et qui aurait explosé à 5 ou 10 km d'altitude) et pourrait détruire une grande capitale et sa banlieue. Quant à un objet de 1 km, il provoquerait un cataclysme à l'échelle du globe. Avec 10 km, ce serait l'apocalypse : disparition des espèces, fin du monde.

Le cratère le plus connu est le Meteor Crater (Arizona, USA), reconnu comme tel par Barringer en 1953 ; il daterait de 50000 ans, a un diamètre de 1400 m et une profondeur de 185 m. L'estimation de la taille de la météorite responsable, dite Canyon Diablo, est délicate : on trouve des valeurs allant de 9000 à 10 millions de tonnes. Mais plus récemment (1987) une corrélation faite à partir de l'énergie dégagée - 15 mégatonnes - a conduit à opter pour une météorite de 300 000 t. Avec une masse spécifique de 7,8 on arrive à un diamètre de 42 m. Malgré de très

nombreux forages, on n'a pas retrouvé la totalité de cette masse, le morceau le plus important se trouve sur le site et pèse 640 kg.

Le cratère le plus grand, **Pucezh-Katunki**, 80 km de diamètre, 180 millions d'années, se trouve en CEI. Le cratère le plus récemment identifié (1991) est au Yucatan (Mexique); il est mi-terrestre/mi-marin et a un diamètre de 170 km.

En plus de la formation des cratères, la pression et la chaleur dégagée par la rencontre avec le sol peut provoquer la transformation de celui-ci en **impactites** souvent projetées dans l'espace et retombant à quelques centaines de km du point d'impact sous la forme de **tectites**. C'est le cas des **moldavites** associées au Ries de Nördlingen (diamètre 24 km, 15 millions d'années) et que l'on trouve à plusieurs centaines de km du point supposé de l'impact. On trouve des tectites en Thaïlande, en Australie et en Côte d'Ivoire ; ces dernières seraient associées au cratère de Bosuntwi (Ghana). Il s'agit de verres dont certains posent encore de gros problèmes quant à la manière dont ils se sont formés ; c'est ainsi le cas du verre libyque que l'on trouve dans les couloirs inter-dunaires de la "Grande mer de sable", en Egypte. On a trouvé dans ces impactites des minéraux peu courants ou inconnus ailleurs, résultant souvent de la température et (ou) de la pression élevée développée au point d'impact lors du choc de la météorite : Lechatéliérite, Stishovite, etc.

II - Les météorites et la formation du système solaire.

2.1 - Les âges des météorites.

Lorsque l'on parle de l'âge des météorites, il convient de préciser de quel âge il s'agit car on leur associe plusieurs âges que nous définissons dans le tableau VI.

tableau VII

Âge absolu	temps écoulé depuis la solidification du corps parent ou de la dernière différenciation
Âge d'exposition au rayonnement cosmique	il mesure, par convention, l'intervalle de temps qui sépare l'instant où une météorite est expulsée du corps parent jusqu'à sa chute sur la terre
Âge terrestre	Durée du séjour au sol

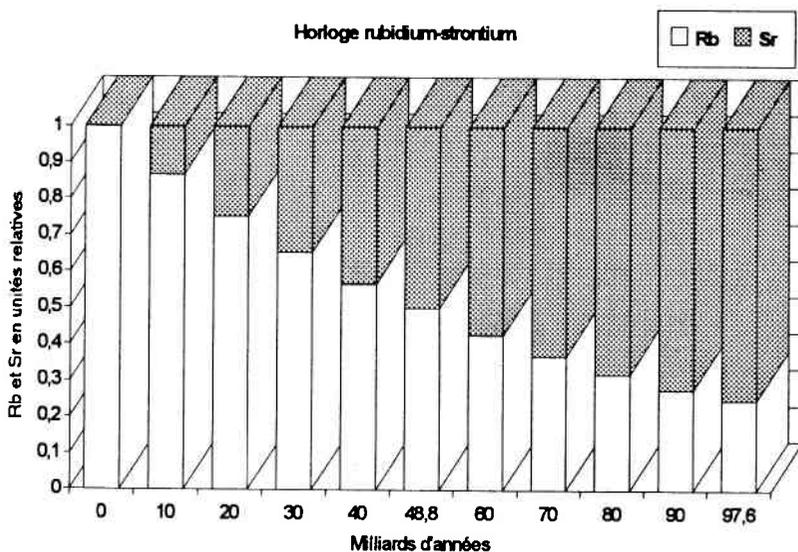
Mais nous nous intéresserons ici qu'à l'âge absolu. C'est grâce aux progrès de la géochronologie que de grands pas en avant ont pu être faits dans sa détermination. On utilise couramment les couples radioactifs suivants:

tableau VIII

Chaînes de désintégration	Périodes en années
$^{87}\text{Rb} \text{ ---} \rightarrow \text{}^{87}\text{Sr}$	$48,8 \times 10^9$
$^{232}\text{Th} \text{ ---} \rightarrow \text{}^{208}\text{Pb}$	14×10^9
$^{238}\text{U} \text{ ---} \rightarrow \text{}^{206}\text{Pb}$	$4,55 \times 10^9$
$^{40}\text{K} \text{ ---} \rightarrow \text{}^{40}\text{Ar}$	$1,27 \times 10^9$
$^{235}\text{U} \text{ ---} \rightarrow \text{}^{207}\text{Pb}$	$0,7 \times 10^9$

Nous essayerons d'expliquer la technique utilisée en prenant comme exemple le couple rubidium/strontium.

Le rubidium radioactif, ^{87}Rb , se transforme en strontium ^{87}Sr avec une période de 48,8 milliards d'années. En admettant, pour simplifier, qu'au départ il n'y avait pas du tout de strontium et que nous partions d'une masse unité de rubidium, la décroissance se fait suivant le schéma ci-dessous. On voit bien que le Rb a perdu 50 % de sa masse en 48,8 milliards d'années.



Mais pour déterminer l'âge, nous allons utiliser la technique des isochrones.

La relation complète qui relie le rubidium au strontium est donnée par l'équation ci-dessous:

$$\left(\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}}\right)_m = \left(\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}}\right)_o + \left(\frac{{}^{87}\text{Rb}}{{}^{86}\text{Sr}}\right)_m (e^{\lambda t} - 1) \quad (1)$$

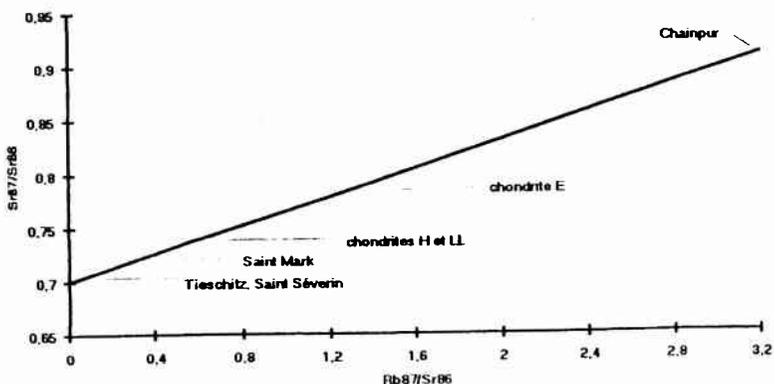
où λ est la constante de désintégration, d'où l'on tire d'ailleurs la période et où les indices o et m réfèrent respectivement aux conditions initiales et aux valeurs mesurées. Mais la relation (1) peut s'écrire:

$$\left(\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}}\right)_m = (e^{\lambda t} - 1) \left(\frac{{}^{87}\text{Rb}}{{}^{86}\text{Sr}}\right)_m + \left(\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}}\right)_o \quad (2)$$

ou encore $Y = a * X + b$

Le terme $a = (e^{\lambda t} - 1)$ nous montre que si t est constant, nous avons l'équation d'une droite dont la pente est a .

La mesure de la pente permettra le calcul de t c.à d. de l'âge des météorites dont les points représentatifs se trouvent sur la droite, c'est ce que représente la figure ci-dessous.



Les météorites sont les matériaux les plus anciens du système solaire et, lorsqu'elles n'ont pas subi d'altérations ultérieures, les âges absolus sont de 4,55 à 4,56 milliards d'années c'est à dire, l'âge du système solaire.

2.2 - Donnes-moi ton nom, je te dirai qui est ton père.

Nous connaissons maintenant l'âge des météorites, et, de par leur nature, nous savons si elles proviennent d'un noyau cométaire ou d'un astéroïde, et même, de quelle profondeur de l'astéroïde. Mais peut-on aller plus loin, c'est à dire, nommer l'astéroïde. Cela est effectivement possible pour quelques météorites.

On pense ainsi actuellement que toutes les pallasites proviennent de deux astéroïdes, que les chondrites H proviennent toutes d'un même astéroïde mais l'histoire la plus étonnante est celle que je vais vous raconter maintenant:

En 1983, au cours d'une conférence tenue à Houston, deux chercheurs américains annoncèrent qu'ils travaillaient sur deux achondrites, riches en calcium et qui se caractérisaient par un âge de 1,3 milliards d'années. Mais ils firent aussi une autre découverte étonnante lors de l'analyse des gaz obtenus par la méthode des paliers successifs : une anomalie du rapport $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$; ils eurent l'idée de le comparer aux résultats obtenus par les sondes Viking dans l'atmosphère de mars et trouvèrent une concordance. Celle-ci fut également confirmée par la comparaison avec la composition du sol martien. Il devenait donc fort probable que ces météorites provenaient de Mars ; on reprit alors les analyses d'autres météorites qui figuraient dans les collections et dont l'âge surprenait les spécialistes ; devant les concordances qui apparurent, on en fit un groupe particulier dit "SNC" - il tire son nom des initiales de 3 chutes S=Schergotty, N=Nakhla, C=Chassigny (Hte-Marne, 3/10/1815). Mais on pouvait se demander la raison de cet âge discordant, la planète Mars ayant le même âge que le système solaire. On pense que ces météorites proviennent d'une lave qui s'est épanchée il y a 1,3 milliards d'années sur la planète Mars. Mais on y a également remarqué des vacuoles tapissées de maskélynite, genre de verre amorphe qui ne se forme qu'à haute pression à partir des plagioclases. Ces vacuoles étaient remplis de gaz, en particulier d'argon 40 dont l'âge est de 180 millions d'années. Sans doute à cette date, une météorite a frappé la planète d'une façon rasante et a éjecté un morceau de sol martien ; mais l'histoire n'est pas finie! Car l'analyse des isotopes spallogéniques - c'est à dire générés par l'action des rayons cosmiques - montre qu'un nouveau choc s'est produit par suite d'une collision avec un

astéroïde vagabond et qu'alors seulement ce morceau de sol martien a été piégé par l'attraction de la terre pour finalement aller s'écraser sur notre sol.

Et il y a l'histoire de l'échantillon ALHA 81005 de 38 g, trouvé en Antarctique et sélectionné pour son aspect physique : une brèche formée de grains blancs d'anorthosite et de grains noirs basaltiques, le tout noyé dans un gel siliceux brunâtre . Fin 1982, 22 équipes étaient occupées à décrypter ce singulier cailloux dont les rapports isotopiques révélèrent une parfaite concordance avec les roches rapportées de la Lune.

2.3 - Chondrites carbonées et formation du système solaire.

Nous allons maintenant nous intéresser aux chondrites carbonées, car un peu plus anciennes que toutes les autres météorites, elles sont susceptibles de nous apporter des informations supplémentaires. Pendant très longtemps elles ne représentaient, dans les collections, qu'un très faible pourcentage de matière. Mais une importante chute, celle de la météorite **Allende** tombée au Mexique le 8 février 1969 à 1h05, a permis de multiplier par près de 100 la masse de météorites carbonées dont nous disposons maintenant, car avec l'ensemble de ses fragments, on estime sa masse à plus de 2 t. Elle a permis de telles découvertes qu'on l'appelle la "Pierre de Rosette de la planétologie". Il s'agit d'une CV3 (carbonée, type Vigarano, pétrologiquement 3, c. à d. que les chondres sont bien visibles.

La première surprise qu'a révélé son étude est la présence de nombreuses inclusions blanches faites d'oxydes et de silicates de calcium, de titane et d'aluminium de compositions inconnues sur terre. La datation par la méthode iode/xénon montre qu'elles sont de 200 millions d'années antérieures aux météorites les plus primitives.

Il s'agit d'inclusions réfractaires, dont les séquences de condensation sont les suivantes:

oxydes d'Al et de Ca	à 1700°K
Fe métallique	vers 1500°K
Olivines	vers 950°K
Silicates hydratées, serpentine, magnétites	vers 450°K

De nombreux laboratoires se sont dès lors lancés dans l'étude de cette météorite d'Allende, de celle d'Orgueil, tombée en France et dans laquelle

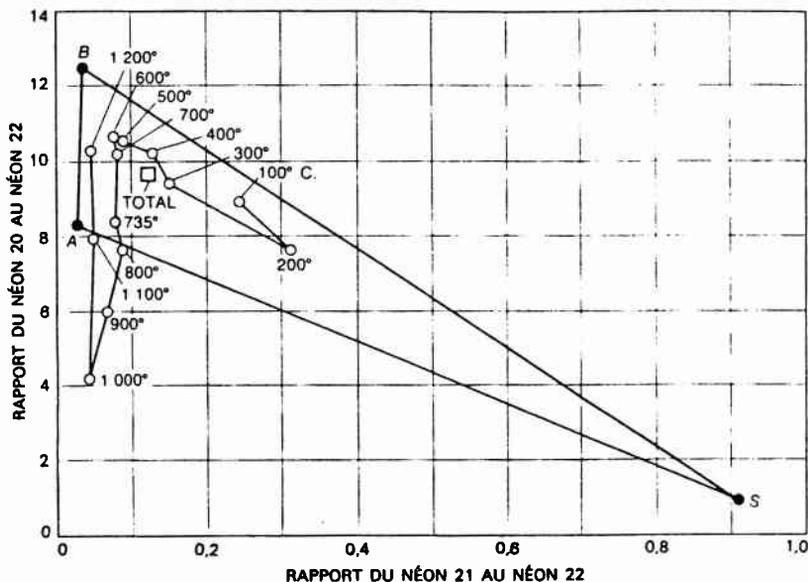
on a pour la première fois trouvé des acides aminés, ainsi que d'autres météorites carbonées; ces travaux étaient facilités grâce aux crédits débloqués dans le sillage de l'étude des pierres lunaires.

La deuxième surprise vint de la découverte d'anomalies isotopiques concernant les gaz rares, Ne, Kr, Xe. Chimiquement inactifs et volatils, ces gaz s'incorporent difficilement dans les solides, on ne les trouve donc qu'à l'état de traces. Tout phénomène qui conduit à la variation de leur teneur ou de leurs rapports isotopiques sera facile à déceler.

Ainsi le dégazage par paliers de températures successifs de la météorite d'Orgueil, révéla des anomalies isotopiques du néon. On s'attendait à trouver le mélange des 3 isotopes habituels:

- NeA, primordial, piégé dans la nébuleuse solaire
- NeB, solaire, formés par les ions Ne du vent solaire
- NeS, cosmogénique, résultant de la réactions des atomes des météorites aux rayons cosmiques.

Au lieu que le point représentatif du gaz se trouve, comme on devait s'y attendre, à l'intérieur du triangle formé par les néons A,B,S, (voir figure ci-dessous), il se situa, pour certains paliers de températures, en dehors de ce triangle. Seul un néon "exotique" pouvait expliquer cela.



On remarqua qu'il s'agissait de ^{22}Ne presque pur et on le baptisa néon E ; or celui-ci est un produit "fils", le trait marquant de son "père", le ^{22}Na , étant d'avoir une période très courte : 2,6 ans. Ces météorites ont donc dû incorporer des grains qui se sont formés tout de suite après l'explosion d'étoiles massives qui ont fabriqué les matériaux et en particulier les métaux lourds qui formeront le système solaire. On trouva de même en analysant les 9 isotopes du xénon, une surabondance de certains d'entre-eux. Pour que ces anomalies existent dans les météorites, il fallait absolument qu'elles contiennent des grains de matières présolaires qui auraient piégé le ^{22}Na et dont la désintégration in situ aura donné le ^{22}Ne . Pendant une vingtaine d'années de nombreuses équipes ont essayé d'isoler ces grains : toutes ont abandonné sauf celle de l'Institut Enrico Fermi de Chicago, animée par Edward Anders.

Ils traitèrent la météorite progressivement avec plusieurs acides et remarquèrent que les résidus conservaient ces Ne et Xe anormaux. A la fin des attaques, il ne restait plus que quelques ppm (parties par million) d'une matière blanche : vu qu'il s'agissait d'une chondrite carbonée on s'attendait plutôt à un résidu noir : l'analyse aux rayons X montrait qu'il s'agissait bien de carbone mais sous forme de micro-diamants de quelques nanomètres (50 Å); c'était la troisième surprise! il y avait aussi des cristaux un peu plus gros - une dizaine de μm - de CSi dont le silicium révéla également une anomalie isotopique.

Ces cristaux rejetés par les étoiles au moment de leur mort, piègèrent les gaz rares qui, dans leur écrin de luxe, arrivent jusqu'à nous dans l'état dans lequel les étoiles les ont produits. Les météoritologues sont ainsi capables de faire de la cristallographie sur des poussières d'étoiles et obtenir, dans ce domaine, des résultats mille fois plus précis que les astronomes. Mais à l'heure actuelle la manière dont ces diamants ont été produits reste un mystère ; il existe 3 hypothèses:

- 1 - minéraux de haute pression, résulteraient t-ils de chocs produits par l'explosion des super-novae
- 2 - on sait synthétiser, à partir de méthane et d'autres composés carbonés, très chauds, des films de diamant, mais ils sont métastables.
- 3 - des études théoriques semblent montrer que, pour des cristaux formés de quelques atomes seulement, la structure "diamant" serait plus stable que la structure "graphite".

Parallèlement à cela, d'autres anomalies ont été découvertes concernant l'oxygène, la répartition des magnésiums 24/25/26 etc...Les études dans ce

domaine se poursuivent en particulier au Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris et à l'Institut de Physique du Globe de Paris et portent sur l'analyse des grains interstellaires des chondrites : anomalies des gaz rares tels que le xénon, présence dans les grains de métal provenant de la nébuleuse pré-solaire et contenant en solution solide du silicium, du chrome et du phosphore et qui sont autant de témoins du caractère primitif de ces chondrites.

2.4 - Chondrites carbonées et composés organiques.

Un autre événement important et que nous avons déjà évoqué est la présence d'acides aminés. Trouvés pour la première fois dans la météorite d'Orgueil (Tarn et Garonne, 14/5/1864), leur présence a été confirmée dans la chondrite Murchison (Australie, 9/1969) où le rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, plus élevé que sur la terre, atteste de leur origine extra-terrestre. Elle contient par ailleurs, (comme également la météorite d'Allende) une quinzaine d'autres composés organiques.

tableau IX

Composés carbonés de la météorite de Murchison	
Phase carbonée ins. en milieu acide	1,45%
Carbonates	0,1-0,2%
Hydrates de carbone	30-60 ppm
Acides carboxyliques	#300 ppm
Acides aminés	10-22 ppm
Alcool primaires	11 ppm
Aldéhydes	11 ppm
Cétones	16 ppm
Amines	11 ppm
Acide urique	25 ppm
Purine	1,2 ppm
Carbone total	2-2,5%

De grands débats ont eu lieu pour savoir si ces acides aminés sont d'origine biologique ou proviennent de synthèses organiques. On constate qu'ils sont optiquement non actifs, c'est à dire que les formes L et D sont équilibrées alors que la vie montre une préférence pour l'une et l'autre forme (ainsi les protéines sont toutes L). Mais de très nombreuses molécules continuent à être découvertes dans le milieu interstellaire

2.5 - Conclusions

On est loin de l'état où était la science au moment où la météorite d'Ensisheim est tombée ; il a fallu attendre la mise au point de nouvelles méthodes de mesure : un grand bond en avant a pu être fait dans le sillon de l'exploration de la lune, aventure qui a permis le déblocage de beaucoup de crédits. Mais c'est sans doute en ce moment que nous vivons l'épopée la plus passionnante : comment pouvait-on imaginer que l'on serait capable un jour d'analyser une inclusion de un micromètre de diamètre : et pourtant cela se fait couramment : éclairée par un faisceau laser, elle livrera son secret grâce à la spectrométrie Raman. Mais, malgré la finesse des analyses et l'assistance de puissants ordinateurs pour simuler les phénomènes, on est loin d'avoir résolu tous les problèmes. Jamais non plus on aurait pu penser que de ces informes cailloux que sont les météorites et en particulier les chondrites on pourrait remonter le temps et se rapprocher de notre origine.

COMPLEMENTS

I - Et les étoiles filantes ?

Si l'on peut voir des météorides toute l'année, certaines périodes sont plus propices : ainsi, entre le 10 et le 12 août une "pluie d'étoiles filantes" semble provenir de la constellation de "Persée", quant aux "Léonides" (mi-novembre), elles semblent être émises par la constellation du "Lion". Ce phénomène est lié au passage de la terre au milieu de myriades de résidus laissés par le passage de comètes. Dans ces cas précis il s'agit respectivement des comètes "Swift-Tuttle" et "Tempel".

II - Remarques concernant la météorite d'Ensisheim.

I - Répartition des fragments de part le monde.

Pesant 127 kg au moment de sa chute, cette météorite a subi de très nombreuses vicissitudes au cours de son histoire. Le plus gros morceau, conservé à Ensisheim, pèse 55,75 kg, le deuxième en taille - 9,79 kg - également exposé, appartient au Muséum National d'Histoire Naturelle. Nous connaissons par une étude de Mr. J. Schmutzler (Hamburg) que m'a communiquée Mr. Jean Marie Blosser, Président de la "Confrérie St. Georges des Gardiens de la Météorite d'Ensisheim" la localisation dans le monde de 58 autres fragments allant de 1,5 à 905 g. Mais en totalisant le poids des 60 morceaux, on n'atteint pas 72 kg ? Qu'est devenu le reste ?

II - Analyse récente.

Les informations les plus récentes datent de 1985 et sont extraites d'un article paru en mars 1985 dans "Meteoritics" vol.20 n°1. On rappelle qu'il s'agit d'une LL6 et la composition, en % poids est la suivante:

Composition de la météorite d'Ensisheim (% en poids)			
E.Jarosewich, R.Dodd in "Meteoritics", March 31,1985			
SiO₂	40,65	MgO	25,54
TiO₂	0,14	CaO	2,24
Al₂O₃	2,25	Na₂O	0,98
Cr₂O₃	0,53	K₂O	0,05
MnO	0,35	P₂O₅	0,27
FeO	17,26	H₂O	0,39
Fe métal	2,40	Ni	1,05
FeS	5,35	Co	0,03
C	0,09		
Total	99,57	dont 19,22 de Fe total	

Bibliographie.

- 1 - Bari Hubert, La météorite d'Ensisheim, Minéraux & Fossiles, octobre 1984, p.13-19.
- 2 - Brack A., Raulin F, L'évolution chimique et l'origine de la vie, Masson 1991, 181 p.
- 3 - Bühler W. Rolf, Meteorite, Urmaterie aus dem planetaren Raum, Weltbild Verlag, 1992, 192 p.
- 4 - Carion Alain, Météorites, 36 p., mai 1992, édition Carion.
- 5 - Cretu Frédéric, Des météorites venues d'autres systèmes solaire ?, La Recherche, juillet-août 1992
- 6 - Deville Joan, Les météorites, Minéraux & Fossiles, juillet-août 1990, p.7-30.
- 7 - Ensisheim, catalogue du musée édité à l'occasion du 500ème anniversaire de la chute de la météorite.
- 8 - Foster George, The Meteor Crater story, 1987, 44 p.
- 9 - Haag Robert, Field guide of meteorites, Robert Haag collection, 1991
- 10 - Heide Fritz, Kleine Meteoritenkunde, 1988, 188 p., Springer Verlag
- 11 - Hermann Joachim, Atlas zur Astronomie, DTV, 1990, 287 p.
- 12 - Manhes Gérard, Cours de Cosmologie, Maîtrise, Paris VII, 1986/87
- 13 - Moreux (abbé Th.), Le ciel et l'univers, 634p, Doin & Cie, 1928,
- 14 - Perron Claude, Les météorites, dans Textes et Documents pour la classe, 4/4/1990.

15 - Universalis, Encyclopédie, édition 1968 et 1990.

16 - Zanda Brigitte, Cours de Cosmologie, Maîtrise, Paris VII, 1991/92

17 - Wood John, Chondritic meteorites and the solar nebula, dans "Annual Reviews of Earth and planetary systems", 1988.

Météorites

Histoires de chasse

"Entre les articles grand public, bien faits, et les monographies, il n'y avait rien." C'est pour cela que Michel Maurette, "un chasseur de météorites" a publié un ouvrage intitulé Chasseur d'étoiles. Evitant l'écueil des "livres scientifiques souvent fastidieux", il y a mis de la vie : en clair, son expérience d'homme de terrain et de labos. Et surtout, il a réuni sous une même couverture météorites et micrométéorites, un parti pris iconoclaste aux yeux de certains scientifiques, et d'autant plus méritoire qu'il est responsable de la collecte de ces dernières dans le cadre du projet Euromet...

En quelques 170 pages, cet ouvrage explique l'intérêt de cette matière tombée du ciel, archiviste unique de l'histoire la plus reculée du système solaire, et qui aurait ensemencé la Terre de matières organiques. Chapitre après chapitre, on y découvre les fondements scientifiques, les portraits des grands "chasseurs" historiques, les récits d'expéditions, de l'Antarctique aux déserts les plus chauds, quelques règlements de compte avec les contrebandiers des météorites et le trafic international auquel ils se livrent. Mais aussi les dernières théories scientifiques en date-comme l'origine "des météorites martiennes" et l'extinction des dinosaures-, au risque de se faire montrer du doigt par certains collègues ! Le jeu en vaut la chandelle : ces météorites détiennent peut-être le secret de l'origine et de l'évolution de la vie.

Extrait du Journal du CNRS - juin 1993

Pour récolter des météorites en Antarctique, on filtre des tonnes d'eau de fusion de glace sur des tamis.

A.M.I.S

**Association des Amis
de la Collection de Minéraux de la Sorbonne**

Tour 25 - Rez-de-Chaussée

**4, place Jussieu
75252 PARIS Cedex 05**