

# **Les météorites, ces cailloux tombés du ciel...**

## Table des matières

- I. Introduction
- II. Où peut-on les trouver ?
- III. Chute en Belgique ?
- IV. D'où viennent-elles ?
  - a. Les comètes
  - b. Les astéroïdes
  - c. Les planètes et satellites artificiels
- V. Comment les reconnaître ?
- VI. Classification
  - a. Chondrites
    - i. Les chondrites à enstatites
    - ii. Les brachinites
    - iii. Les acapulcoïtes
    - iv. Les chondrites ordinaires
    - v. Les chondrites du groupe R
    - vi. Les chondrites carbonées
      - 1. Type CH
      - 2. Type CI
      - 3. Type CK
      - 4. Type CM
      - 5. Type CO
      - 6. Type CR
      - 7. Type CV
  - b. Différentiées
    - i. Pierreuses achondrites
      - 1. Angrites
      - 2. Aubrites
      - 3. Diogénites
      - 4. Eucrites
      - 5. Howardites
      - 6. Urélites
    - ii. Métallo-pierreuses
      - 1. Pallasites
      - 2. Mésosidérites
    - iii. Métalliques
      - 1. Ataxites
      - 2. Hexaèdrites
      - 3. Octahédrites
  - c. Importance des chondrites
  - d. Métamorphisme dans les chondrites
  - e. Choc et formation de brèches
  - f. Quelques exemples
- VII. Théories scientifiques
  - a. Entrée dans l'atmosphère
  - b. Cratère (astroblème) : Meteor Crater
    - i. Les cratères simples
    - ii. Les cratères complexes
    - iii. Les impactites et les tectites
    - iv. Le cratère de Chixculub
  - c. La panspermie
- VIII. Qualifier un risque : échelle de Turin
- IX. Conclusion
- X. Bibliographie
- XI. Vocabulaire

## I. Introduction

Avant de commencer à rentrer dans le vif du sujet, il est important d'asseoir quelques définitions qui se veulent être la base de ce travail. En effet, un même corps céleste possède plusieurs nominatifs suivant l'état dans lequel il se trouve lors de son évolution dans l'espace :

1. **Météoroïde** : objet céleste se mouvant librement dans l'espace « interplanétaire »
2. **Météore** (n.m.) : phénomène lumineux provoqué par le passage dans l'atmosphère d'un corps solide venant de l'espace.
3. **Météorite** (n.m. ou n.f.) : objet naturel d'origine extra-terrestre, ayant survécu au passage dans l'atmosphère.

La chute des météorites est en général accompagnée de phénomènes lumineux impressionnants qui ont attiré l'attention des hommes depuis leur origine, quand ils en furent témoins.

La plus ancienne météorite est conservée actuellement dans le temple shintoïste de Nogata au Japon. Elle est tombée il y a plus de mille ans. En Europe, c'est la météorite d'Ensisheim qui est exposée au palais de la Régence, à quelques pas de son point de chute.

Malgré le nombre relativement élevé des chutes et leur aspect phénoménal, il faudra attendre le début du XIXe siècle pour que les scientifiques admettent enfin la réalité : des objets pouvaient arriver sur Terre depuis l'espace.

De nombreuses chutes de météorites sont rapportées par les auteurs grecs (Diogène d'Appollonia, Diana d'Ephèse) et romains (Tite-Live, Plutarque, ...) qui citent la Crète, le Mont-Alba, Egos Potamos. Près du temple de Delphes on conservait même une pierre qui serait « venue de Saturne » disait Pausanias. Pline l'Ancien, lui, parle d'une pierre gardée à Abidos dans un gymnase en Asie Mineure dont la chute est renseignée au VIe siècle avant Jésus-Christ, mais le lieu de la chute n'est pas indiqué.

Il existe une pierre noire, recouverte d'un tissu noir, conservée à la Mecque qui pourrait être d'origine météoritique mais aucun prélèvement ne peut avoir lieu. Elle était adorée bien avant Mahomet et la légende raconte qu'elle aurait été offerte à Abraham par l'archange Gabriel.

Nous pouvons également interpréter certains textes bibliques qui semblent faire allusion à des phénomènes de ce genre. En effet, dans l'Apocalypse selon Saint Jean, nous pouvons lire : « ... il tomba dans la mer comme une grande montagne embrasée : le tiers de la mer devint du sang, il mourut le tiers des êtres qui étaient dans la mer et le tiers des navires périt... » [VIII,8]

Mais si les hommes de l'Antiquité avaient soupçonné une origine céleste pour les météorites, les occidentaux du Moyen Age croyaient que celles-ci étaient issues de la foudre, c'est ainsi qu'il est fréquent de trouver dans ces écrits : « pierres de foudre » ou « pierre de tonnerre ».

C'est en 1775 que le naturaliste allemand Pallas décrivit une météorite de 524 kg, trouvée en Sibérie par un autochtone. C'est presque vingt ans plus tard que le physicien allemand Chladni assura qu'il s'agissait bien d'un corps céleste et s'opposa en cela à la science officielle.

C'est aussi au français Jean-Baptiste Biot (astronome et physicien) que nous devons le premier document scientifiquement correct de l'origine des météorites. Il étudia une pluie de météorites de plus de deux milles fragments qui s'abattu sur une ville de France, nommée Aigle, le 26 avril 1803.

Depuis quelques années, de grands dispositifs photographiques fixent le ciel, chaque soir, afin de garder la trace d'un passage d'une météorite, ou du moins, d'un météore afin que les scientifiques puissent, par triangulation, déterminer l'orbite du bolide.

Mais le hasard fait parfois bien les choses, et c'est ainsi que certaines météorite ont eu l'honneur d'être filmée durant leur chute. C'est le cas, de la météorite de Peekskill qui est sans aucun doute la plus connue de son espèce.

Le 9 octobre 1992 vers 23h48 TU, des dizaines de personnes ont observé la chute d'une météorite au-dessus de l'Est des Etats-Unis alors qu'ils assistaient à un match de football.

L'événement fera date car non seulement il se manifesta bruyamment en tombant sur une voiture qui, depuis, et malgré son triste état a pris de la valeur, mais il sera filmé par de nombreux témoins oculaires.

L'objet pénétra dans l'atmosphère terrestre à une vitesse relativement lente estimée à 14.7 km/s. Il fut repéré par les observateurs alors qu'il se trouvait à environ 41.5 km d'altitude. Les premiers observateurs virent l'objet se fragmenter à l'Ouest de la Virginie. L'événement sera filmé par 16 observateurs. Ces films seront collectés par Peter Brown pour analyse.

L'objet qui suivait une direction Nord-Est vers New York brillait à son maximum à la magnitude -13, soit presque aussi fort que la pleine Lune.

Le freinage aérodynamique différentiel provoqua une dispersion longitudinale des fragments sur plus de 20 km, certains des plus petits s'éloignant même jusqu'à 1 km environ.

Le détail le plus spectaculaire est le bruit. Ce bruit persista environ 10 secondes et fut audible plusieurs secondes après la première fragmentation.

Après un vol qui dura quelque 40 secondes l'objet avait parcourut une distance au sol de 700 à 800 km et s'écrasa sur une voiture en stationnement à Peekskill dans l'Etat de New-York (41.28°N, 81.92°O). On récupéra alors une achondrite de 12.4 kg. Aujourd'hui cette voiture est exhibée comme un objet d'attraction.

Notons que certains termes plus spécifiques, employés dans cette introduction, seront définis dans les pages suivantes.

## II. Où peut-on les trouver ?

La surface de la Terre étant recouverte à 75 % d'océans et de mers, il est évident, que les météorites ont davantage de « chance » d'échouer dans les eaux profondes. Ceci ne permet donc pas la récupération de ces météorites qui sont vite altérées par le milieu.

Par contre, sur les 25 % restant, en principe, il est plus facile de récupérer une météorite, puisqu'elle est tombée sur le sol. Mais l'humidité de l'endroit tend à oxyder l'objet extra-terrestre et sa détection devient plus compliquée si le sol présente une diversité de formes et de couleurs (comme dans nos contrées par exemple).

C'est ainsi qu'il est plus aisé de les repérer sur les étendues de couleur uniforme. Nous pensons évidemment aux déserts qu'ils soient composés de sable ou de glace. Certains endroits sont donc privilégiés des « chasseurs de météorites ». Il s'agit du désert du Sahara, du désert australien, du Groenland, de l'Arctique, de l'Antarctique, ... pour ne citer que ceux-là.

En règle générale, les météorites qui tombent sur la glace y sont progressivement intégrées et entraînées par elle vers le rivage, elles s'éloignent, flottant dans des icebergs, pour venir s'échouer au fond de la mer. Mais si un morceau de glace se trouve piégé derrière une montagne, il peut être peu à peu usé par les vents violents qui courent le long des falaises, exposant ainsi les météorites qu'il contenait.

Vous trouverez une cartographie de ces lieux et une explication graphique à la figure 1.

### III. Chutes en Belgique

Nous sommes en droit de nous demander si des météorites sont déjà tombées en Europe, et plus particulièrement en Belgique. Ce pays n'occupant qu'une faible superficie sur le globe terrestre, nos chances sont donc faibles de voir un jour tomber une météorite ....

Mais il est vrai que plusieurs bolides ont bel et bien « atterri » sur le sol belge. Voici une liste de lieux qui seraient sièges d'un tel phénomène :

**Bruxelles :** chute douteuse, tombée vers 1500, météorite pierreuse conservée puis perdue.

**Charleroi :** chute douteuse du 27 octobre 1634 à 8 heures. Plusieurs pierres d'un poids total de 4 kg se seraient abattues.

**Lesve :** tombée le 13 avril 1896 vers 8 heures. C'est une chondrite d'environ 2 kg classée (L6).

**Mons :** chute douteuse du 30 juin 1186 ou 1187. Plusieurs pierres de plus d'une livre seraient, paraît-il, tombées.

**Sint-Denijs-Westrem (Gent) :** Tombée le 7 juin 1855 à 19h45. C'est une chondrite à hyperstène et bronzite (L6) d'un poids de 700g.

**Tourinnes-la-Grosse (Louvain-Tirlemont) :** tombée le 7 décembre 1863 à 11h30. C'est une chondrite classée (L6). Après détonations, deux pierres de 7 à 7.5 kg ont été retrouvées, dont l'une s'est brisée sur les pavés de la route.

Et un peu plus près de nous, nous pouvons retenir :

**vendredi 4 février 2005 à 21h49:** bolide verdâtre, très brillant (-9 à -10), en chute verticale, observé sur une très large région de la Belgique et du nord de la France. (plus de 25 témoins connus, éparpillés entre Namur et le nord de Paris)

La trajectoire de ce bolide semble avoir été exceptionnellement verticale, comme le montre les témoignages belges et français. Selon la luminosité et la couleur observée, il s'agit d'un corps d'origine météoritique, pierreuse (probablement de type chondrite). cependant, à ce jour, rien ne montre que quelque chose aurait pu atteindre le sol. Seuls d'autres témoignages devraient permettre de trancher.

**Samedi 5 février 2005 à 02h04m58sec:** bolide extrêmement lumineux vert intense(-10 à -12), légèrement incliné, qui a explosé en une multitude de fragments, explosion audible. Il existe un enregistrement automatique infrason de l'explosion, qui a permis de déterminer le point d'explosion réel.. La trajectoire se termine au dessus de la Mer du Nord. Les témoignages issus de l'est de la Belgique et du centre du pays permettront de reconsidérer la trajectoire réelle du bolide.

**Dimanche 6 février 2005 à 07h43:** bolide quasi diurne (-7 ou +), orangé se déplaçant lentement, trajectoire horizontale, nombreuses particules orangées s'échappant de la boule de feu. (1 témoin) Pas d'infos suffisamment récente pour discriminer ce bolide en objet artificiel ou en objet météoritique.

Mais jusqu'à présent, aucune météorite n'a été retrouvée à la frontière franco-belge où il aurait probablement terminé sa chute.

Donc avec l'appui de ces témoignages, nous pouvons conclure qu'il nous est donc tout à fait possible d'observer ce genre de phénomène, et même d'observer

la chute d'un corps d'origine extra-terrestre près de chez soi. Il faut donc lever les yeux de temps en temps, ou alors s'armer de patience et scruter le ciel chaque soir à la recherche des ces cailloux venus du ciel.

Lieux de chute en Belgique :



Bruxelles (~1500) : ?  
Charleroi (1934) : 4 kg, perdue...  
Gent (1855) : 700 g  
Mons (1987) : ?  
Tourinne-la-Grosse (1863) : 7.5 kg  
Frontière franco-belge (mai 2005) : ?

**Remarque :** Le nom donné aux météorites provient de celui du village le plus proche de leur lieu de chute. Pour les météorites qui tombent dans le désert, on leur donne un nom semblable à NWA (North West Africa) ou SAH pour le désert du Sahara par exemple.

## IV. D'où viennent-elles ?

### a. Les comètes

De tous les corps qui se meuvent dans le système solaire, nous pouvons affirmer que 25 % de ceux-ci font partie de la famille des comètes (du grec κομητα : chevelure). Elles furent souvent considérées comme mauvais présage lorsqu'elle apparaissait dans le ciel, et ce fut même la cause de nombreux suicides au début du XXe siècle. On sait aujourd'hui qu'elles sont constituées de « neige sale » (le noyau est constitué principalement de glace et de macromolécules de carbone) dont le diamètre varie de la centaine de mètres à quelques kilomètres. Le carbone présent dans les comètes pourrait être très anciens et semble être contemporain du nuage présolaire.



<http://www.wallpaper.net.au>

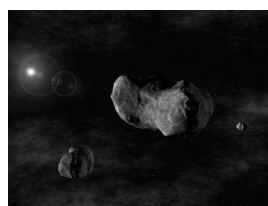
On leur attribue deux « réservoirs » : le nuage de Oort situé au confins du système solaire, et plus proche, la ceinture de Kuiper (semblable à la ceinture d'astéroïde, mais formé de bolides glacés).

Les comètes suivent des trajectoires elliptiques, et lorsqu'elle s'approchent à moins d'une unité astronomique du Soleil ( $1 \text{ ua} = 150 \cdot 10^6 \text{ km}$ ), celui-ci fait fondre la glace et sublime les autres composants qui se trouvent alors soufflés par le vent solaire. C'est ainsi que nous observons souvent une jolie chevelure (souvent de couleur bleue ou verte) qu'arborent ces « boules de neige sale ». Veuillez noter que la queue de celles-ci se trouve toujours opposée à la direction du Soleil et avoisine plusieurs millions de kilomètres de long.

C'est donc lorsque la Terre rencontre un nuage cométaire que les petites particules le composant « tombent » dans l'atmosphère sous l'influence de la gravité terrestre et se transforment en effets lumineux (appelés communément « étoiles filantes ») et certains arrivent au sol et sont alors appelés « micrométéorites » (météorites dont le diamètre oscille entre 200 mm et  $1 \mu\text{m}$ ).

### b. Les astéroïdes

Une grande partie des météorites qui tombent sur la Terre proviennent d'astéroïdes. Du grec αστηρ (astre, étoile) et οιδιος (la forme), ces gros bolides pouvant mesurer de quelques centimètres à plusieurs dizaines ou même centaines de kilomètres, évoluent principalement entre les planètes Mars et Jupiter.



<http://www.eso.org>

Ceux-ci, atteignant des vitesses importantes, peuvent se percuter et de ce choc, des éclats sont projetés dans diverses directions. Ces fragments possèdent les mêmes caractéristiques chimique et géologique de leurs « corps parents ». Il se peut que l'un deux rencontre l'orbite de notre planète et soit attiré par gravitation et finissent par être nommé « météorite »...

### **c. Les planètes et satellites artificiels**

Bien entendu, les comètes ou (morceaux) astéroïdes peuvent rencontrer d'autres planètes. De cet impact des projectiles, issus de la masse planétaire, peuvent être projetés hors du champ de gravitation de celle-ci et deviennent, si l'on peut dire, de petits astéroïdes. Ces corps peuvent alors, de la même manière que leurs « confrères », rencontrer la Terre et devenir météorites...

C'est ainsi que certaines météorites peuvent prétendre venir de la planète Mars, de notre satellite naturel (la Lune) ou encore Vénus et peut-être encore Mercure. En effet, nous comprenons qu'il est plus probable de recevoir un éclat de planètes voisines (planètes telluriques) que des planètes plus lointaines et, de plus est, sont énormes et sont constituées principalement de gaz (planètes gazeuses) comme Jupiter, Saturne, etc...

## V. Comment les reconnaître ?

Une météorite qui entre dans l'atmosphère terrestre chauffe à cause des frottements avec les molécules d'air. C'est alors que certaines parties de la surface se subliment et s'ionisent pour donner les belles couleurs observables (vert, bleu, rouge, ...) lors d'une chute. La roche lorsqu'elle atteint le sol est donc, si on peut dire, « cuite ». Elle présente alors une **croûte de fusion** noire ou brunâtre. Celle-ci a, en général, une épaisseur inférieure au millimètre. Elle peut être soit unie, soit craquelée. Les craquelures proviennent de la brusque différence de température entre cet échauffement et la température initiale du bolide, en effet, celui-ci évolue à travers le système solaire sous une température très faible (quelques kelvin). Lorsque l'objet céleste atteint le sol celui-ci n'est pas chaud, comme beaucoup de détracteurs osent l'affirmer (pour prouver une pseudo-chute), mais bien froid.

En plus de la croûte de fusion, il est possible, dans certains cas, d'apercevoir des « cicatrices » due à la traversée de l'atmosphère. En effet, la météorite chauffe énormément lors de cette phase. De la matière va alors se sublimer laissant derrière elle des « trous » à la surface. Ces « trous » forment alors des **lignes de fuite** lorsqu'une météorite est orientée (quand le bolide ne tourne pas lors de la chute) ou sous forme de **regmaglyptes** (« trace de pouce ») dans le cas contraire.

Les météorites, comme nous le verrons dans les chapitres suivants, contiennent des inclusions métalliques. Ceux-ci, même en petit nombre, suffisent à donner des **propriétés magnétiques** à la roche. C'est donc en approchant un aimant que nous pouvons dire si celui-ci est peut-être d'origine extra-terrestre ou non. Il est très rare de trouver des roches terrestres magnétiques. Il en existe quelques-unes, mais elles sont tellement rares que nous pouvons considérer (en première approche), que la probabilité d'en trouver est nulle. Il faut bien entendu faire attention aux déchets industriels qui pourraient également présenter cette propriété.

S'il s'agit d'une météorite métallique, en tout cas pour une catégorie de cette espèce, après avoir tranché la météorite et traité sa surface avec de l'acide nitrique et après avoir poli le tout, il est possible d'observer des réseaux métalliques appelés « **figures de Widmannstätten** ». Ces figures sont une preuve de l'origine extra-terrestre étant donné qu'elles ne se forment que si l'objet subit une différence de 1°C par cent millions d'années. Cette caractéristique n'est pas envisageable sur Terre étant donné les vastes écarts de température entre le matin et le midi par exemple.

Vous trouverez davantage d'informations visuelles aux figures 2,3 et 4. Si ces preuves ne suffisent pas, alors il faut se rapporter à des études chimiques et minéralogiques ce qui seront expliquées au paragraphe suivant.

## VI. Classification

Deux grands groupes se distinguent : les météorites chondritiques et les météorites différenciées.

### a. Chondrites (essentiellement pierreuses)

Elles proviennent de « corps parents » qui n'ont pas subi la différenciation (voir paragraphe suivant). Ce sont les objets les plus primitifs du système solaire. Leur nombre provient de ces fameuses petites boules, très caractéristiques, appelées chondres (du grec *χονδριον* : granule) qui les constituent. Elles sont composées essentiellement de roches silicatées, parfois de roches carbonées et de quelques petits inclusions de fer et de nickel.

Aujourd'hui, il nous est impossible de déterminer exactement la cause de la formation de ces chondres. On sait qu'ils se sont formés au tout début du système solaire mais il nous est difficile de comprendre comment ils ont pu se former. Cependant, une théorie semble séduire un grand nombre de scientifiques. Selon celle-ci, la nébuleuse présolaire aurait donné naissance à un disque de gaz-poussières qui tournait sur lui-même. Le Soleil, se trouvant déjà en son centre, chauffait déjà l'ensemble. Les poussières alors présentes dans ce disque de poussières se mirent à fondre et acquièrent une forme sphérique. Ensuite, un refroidissement suffisamment rapide cristallisa les cristaux sous cette forme sans qu'ils puissent prendre un état cristallin comme nous avons l'habitude d'en observer sur Terre. Ces chondres sont donc une preuve formelle de l'origine extra-terrestre de ces roches.

Les chondres ont un diamètre allant de 1 à 8 mm au maximum. Ils ne sont pas les seuls composants des météorites chondritiques, c'est ainsi que nous rencontrons des inclusions métalliques qui permettent une classification encore plus précise :

**Type L** : low iron (faible teneur en fer), 7-12%

**Type H** : high iron (haute teneur en fer), 12-21%

Un autre type baptisé « LL » a également été défini afin de caractériser les météorites à très faible teneur en fer. En 1967, des scientifiques se basent sur le degré d'homogénéité et de cristallisation. C'est ainsi qu'ils dotèrent du **type 1** les météorites sans chondres apparents, en passant par le **type 3** les météorites présentant des chondres isolés, au **type 6** où les chondres sont difficilement différenciables.

Nous pouvons encore aller plus loin dans la classification en mettant en considération l'état d'oxydo-réduction de ces objets. On peut donc les classer de la façon suivante, de la plus réduite à la plus oxydée :

i. **Les chondrites à enstatites (type E)** : constituée principalement de pyroxène et de plagioclase. Elle contiennent également du soufre, de la cristobalite, de la troïllite, ... Elle sont subdivisées selon leur teneur en fer sous les types **EL** et **EH** suivant les caractéristiques développées plus haut.

ii. **Les brachinites** : représentées par la météorite de Brachina

iii. **Les acapulcoïtes (AL)** : représentées par les météorites Acapulco et Lodran.

**iv. Les chondrites ordinaires (H,L et LL) :** contiennent en grande partie de l'olivine, de la bronzite et du clinopyroxène, du pladioclase, de la kamacite, de la troïlite,...

**v. Les chondrites du groupe R :** représentées par la météorites de Rumuruti.

**vi. Les chondrites carbonées (C) :** ce sont les météorites les plus primitives, très voisines de l'abondance en élément de la nébuleuse présolaire. Elles contiennent environ 40% d'olivine, 30% de pyroxène et 10% de plagioclase, mais aussi du carbone qu'on retrouve parfois sous forme organique. Elles ne possèdent pratiquement pas assez de fer. Elles se subdivisent en quatre groupes de références :

1. **Les chondrites du type CH :** dont fait partie ALH 85 085.
2. **Les chondrites d'Ivuna (CI) :** 3 à 5 % de carbone, 10% d'eau. On y retrouve également des composés organiques à poids moléculaires élevé ainsi que des acides aminés. Elles n'ont pas de chondre visible.
3. **Les chondrites de Karounda (CK)**
4. **Les chondrite de Migheï (CM) :** 0.6 à 2.9 % de carbone, 13 % d'eau. Elles contiennent des chondres visibles ainsi que des éclats cristallisés d'olivine et de pyroxène.
5. **Les chondrites d'Ornans (CO) :** 1 à 0.2 %de carbone,1 % d'eau.
6. **Les chondrites de Renazzo (CR)**
7. **Les chondrites de Vigarano (CV) :** très faible pourcentage en eau et en carbone. Ces dans ce groupe que nous rencontrons des inclusions de calcium-aluminium source d'information concernant l'origine du système solaire. Ceci fera l'objet d'un paragraphe ultérieur.

## **b. Différentiées**

La différenciation est le nom que l'on donne au processus par lequel un mélange de composition initiale homogène se sépare en plusieurs phases de compositions chimiques différentes. Dans le cas des planètes, un matériau de départ de composition solaire va être fractionné et séparé en couches distinctes : noyau (métallique), manteau (riche en olivine) et croûte (basaltique).

Avant la différenciation :

Formation par agglomération d'un mélange en proportions chondritiques de silicates de fer et magnésium à température de fusion élevée, de minéraux fondant à plus basse température, et de grains de métal et de sulfure. Les chondrites sont issues de tels corps, peu ou pas transformés.

Après la différenciation :

Si les sources de chaleur interne sont suffisantes pour induire une fusion partielle, une différenciation se produit : les grains de métal et de sulfure fondus migrent vers le centre (qui semble-t-il donne naissance aux météorites métalliques). Les silicates fondant à basse température produisent un magma de faible densité qui migre vers la surface où il fera éruption (d'où émergent les météorites riches en calcium).

#### i. **Pierreuses Achondrites**

Elles sont pauvres en métal mais plutôt riche en oxyde de Calcium (CaO). Il semble que, d'après leur composition minéralogique, qu'elles ont été formées à partir d'un magma semblable aux roches ignées terrestres. On y distingue également plusieurs groupes :

1. **Les angrites (ANG)** : riches en calcium et en pyroxène calcique titanifère.
2. **Les aubrites (AUB)** : pauvres en calcium, elle contiennent du silice et de la magnésie à part égale.
3. **Les diogénites (DIO)** : pauvres en calcium, pyroxène orthorombique moyennement riche en fer.
4. **Les eucrites (EUC)** : riches en calcium, contiennent de la pigeonite et de feldspath calcique. Ressemble à des morceaux de Lune.
5. **Les howardites (HOW)** : riches en calcium, contenant des débris rocheux.
6. **Les urélites (URE)** : pauvres en calcium, peuvent contenir du diamant et surtout du ferro-nickel, de l'olivine et du clinopyroxène, de la pigeonite le tout enduit de noir carboné.

#### ii. **Métallo pierreuse, mixtes ou sidérolithes.**

Composées d'un mélange de métal et de roche, elles sont réparties en deux groupes :

1. **Les pallasites** : des grains cristallisés d'olivines (ou de gemme) allant du jaune-brun au vert clair, inclus dans une matrice de ferro-nickel.
2. **Les mésosidérites** : elles présentes du métal et de silicates à parts égales. Le métal est, contrairement aux pallasites, discontinu. Leur origine doit être due à la collision entre une grosse masse de métal et un astéroïde d'origine volcanique.

#### iii. **Métalliques**

Elles contiennent principalement du fer, une faible proportion de nickel et d'autres éléments (notamment du carbone) sous forme de traces, d'inclusions. Nous pouvons les distinguer en trois groupes :

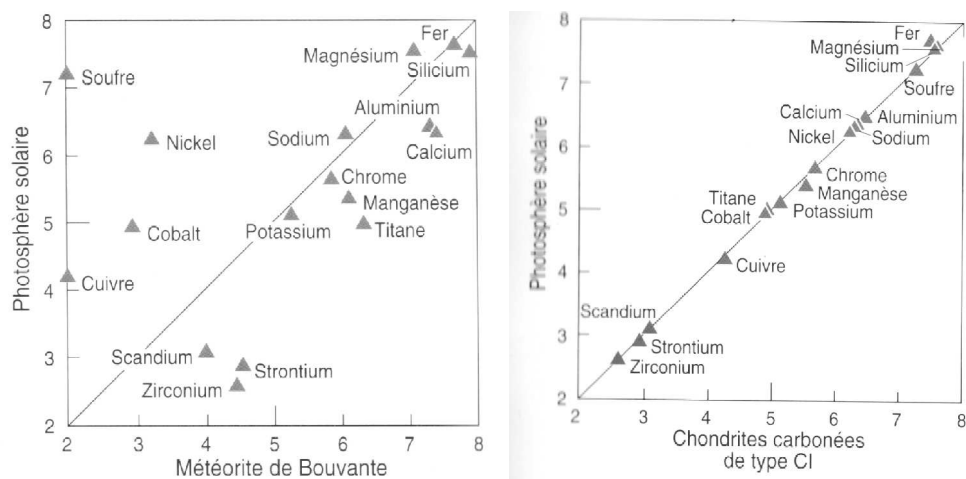
1. **Ataxites** : contenant plus de 16 % de nickel (jusqu'à 60% !). Polies, elles ressemblent à un miroir.
2. **Hexaédrites** : assemblage de gros hexaèdres (cubes), contenant 5 à 6 % de nickel. Si une tranche de cette météorite est attaquée à l'acide nitrique, seules certaines lignes peuvent apparaître dans certains cas, elles sont appelées « lignes de Neumann ».
3. **Octahédrites** : 7 à 15 % de nickel, en l'attaquant avec de l'acide, il est possible de voir apparaître une sorte de grillage appelé « Figures de Widmannstätten ». Ces figures sont des bandes qui se croisent selon deux, trois ou plusieurs directions. Leur réseau apparaît différent suivant la section considérée. On les classe suivant leur largeur de bandes allant de « très grosses » à « très fines » (**Ogg, Og, Om, Of, Off, Opl**).

Vous trouverez à la figure 5 une classification simple et claire établie en 2001 par Bernard Sougnez, professeur en géographie et passionné de météorites, et l'auteur de ce document. De même vous trouverez des exemples de météorites aux figures 6, 7, 8, 9 et 10.

### c. Importance des chondrites

Si nous nous penchons davantage sur l'analyse chimique, nous pouvons comparer l'abondance des éléments chimiques présents dans celles-ci avec celle du Soleil (donc du nuage présolaire).

Nous observons ainsi pour les météorites différenciées :



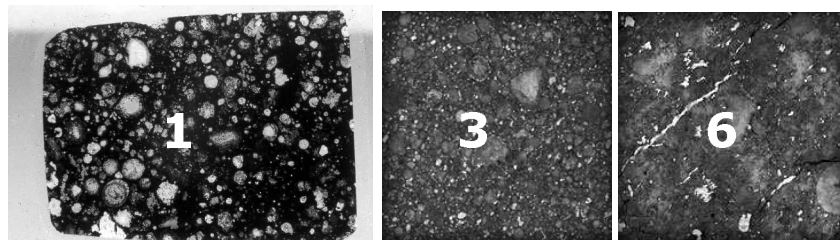
Dans le cas d'une roche différenciée, nous ne voyons pas de lien direct entre les abondances chimiques des différenciées et la nébuleuse solaire primitive. Ceci montre bien que les éléments ont subi des transformations au cours de leur « vie interplanétaire ».

Dans le cas d'une chondrite carbonée, nous remarquons tout de suite la correspondance entre les deux milieux. Les chondrites carbonées, les plus primitives des météorites de ce groupe, ont donc une composition représentative du système solaire dans son ensemble. Ce sont donc des éléments précieux dans l'étude de la genèse du système solaire et de son évolution.

#### d. Métamorphisme dans les chondrites

Les corps différenciés non pas été les seuls à subir une fusion partielle. En effet, les météorites chondritiques montrent également des preuves d'un réchauffement interne. Ce réchauffement (seul) conduisit à une recristallisation des minéraux, modifia donc les textures et certains chondres. Ces transformations sont appelées « métamorphisme ».

La classification du métamorphisme s'inscrit sur une échelle allant de **1** (très faible métamorphisme) à **6** (très fort métamorphisme). Ceci se comprend mieux visuellement :



source : saharamet

Il est évident que ces bouleversements minéralogiques peuvent perturber grandement la « lecture » que nous en faisons afin de déterminer les conditions initiales de formation et de l'évolution du système solaire. Cependant, les météorites chondritiques carbonées sont généralement peu métamorphisées ce qui corrobore les analyses réalisées au paragraphe précédent. Malheureusement, à la surface de certains « corps parents » évoluait une circulation de fluides qui altéra tout de même les « données ».

#### e. Choc et formation de brèches.

Les astéroïdes, ces gros cailloux qui se baladent en général entre les planètes Mars et Jupiter, sont les berceaux des météorites comme nous l'avons déjà évoqué plus haut. Nous l'avons déjà mentionné également, il arrive que ces corps rentrent en collision. Les stigmates de ces chocs sont visibles sur les météorites de **type bréchiques**, c'est-à-dire qu'elles sont le résultat de fragments d'une ou plusieurs roches qui se sont agglomérés à la suite d'un impact. C'est ainsi que l'on retrouve des météorites qui sont le fruit d'un compactage de plusieurs météorites à l'origine. Elles sont communément appelées « salades de météorites » ou encore « meteorites mixed ».

On retrouve également sur ces météorites, de temps à autre, des **veines de chocs**, qui renforcent l'idée d'un choc étant donné que celles-ci sont le résultat d'un « glissement » des plan cristallines les uns sur les autres.

A l'intérieur des météorites métalliques, il est possible d'observer des **bandes de Neumann** qui sont le signe d'un choc qui se produit à une pression inférieure à 130 Kbar.

#### f. Quelques exemples

**Allende (Mexique)**  
Chondrite Ordinaire CV 3.2  
Masse totale : 2000 kg  
Tombée le 08.02.1969

Contient des inclusions réfractaires de Ca-Al (4.6 milliards d'années) provenant de la supernovae qui donna naissance ensuite au système solaire.

**Esquel (Argentine)**

Sidérolithe Pallasite

Trouvée en 1951

Sans doute la plus esthétique des météorites connues jusqu'à présent.

**Gao Guenie (Burkina Fasso)**

Chondrite ordinaire H5 brèche S1 WO

Masse totale 200 kg

Tombée le 05.03.1960

**Gibeon (Namibie)**

Sidérite Octaédrique

Masse totale 26 000 kg

Trouvée en 1836

Tombée probablement durant la préhistoire

**Sikhote Alin (Russie)**

Sidérite Octaédrite

Masse totale 100 000 kg

Tombée le 12.02.1947

## VII. Théories scientifiques

### a. Entrée dans l'atmosphère

Nous le savons, tout corps animé d'un mouvement possède une énergie cinétique dont l'équation est donnée par :

$$E = \frac{1}{2} m v^2$$

Où  $m$  est la masse et  $v$  la vitesse

De plus nous savons que :

$$m = \rho V$$

Où  $\rho$  est la densité, et  $V$  le volume

Nous pouvons considérer que le volume moyen d'une météorite est une sphère, nous pouvons alors écrire :

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3$$

Où  $r$  est le rayon du corps

Donc, l'énergie cinétique devient :

$$E = \frac{2}{3} \pi \rho r^3 v^2$$

L'énergie (en négligeant l'énergie potentielle) que possède alors une météorite lors de son entrée dans l'atmosphère dépend de sa masse (densité et volume) et de sa vitesse initiale.

Nous savons que la vitesse moyenne d'un bolide interplanétaire voyage à une vitesse approchant les 40 km/s. La Terre, quant à elle, dans son mouvement de révolution autour du Soleil, possède une vitesse de 30 km/s. Nous trouvons, par la loi d'addition des vitesses, que la vitesse à l'entrée de l'atmosphère d'un météoroïde est comprise entre 10 et 70 km/s. Pour des météorites moyennes (ni trop grosses, ni trop petites), la vitesse de l'objet diminue progressivement suite aux frottements. C'est ainsi qu'un corps dont le rayon ne dépasse pas le mètre, ayant une vitesse initiale de 20 km/s à 140 km d'altitude se retrouvera avec une vitesse de 3 km/s à 20 km d'altitude mais plus qu'à 85 m/s en atteignant le sol. Vous trouverez un graphe illustrant le freinage des météorites en fonction de leur masse à la figure 11.

Lors de la pénétration dans l'atmosphère, nous l'avons vu, les météorites chauffent à cause des frictions avec l'air. Ce réchauffement atteint les 1500 à 1800 °C ! On estime, en moyenne, qu'entre 60 et 90 % de la masse initiale est ainsi perdue pendant la chute. De ce fait, les petites météorites sont ainsi quasiment détruites. Toutefois, pour les météorites qui atteignent le sol, même si la surface est brûlée, le cœur reste intact ! Les plus petites ne possédant pas une masse trop importante, ne ont donc pas très « énergétiques » et arrivent presque intactes au sol. Par contre pour les plus grosses météorites, celles-ci perdent effectivement environ 75 % de leur masse étant donné que celles-ci ne sont pas freinées par l'air en général. Les très grosses, quant à elle, explosent juste avant l'impact et nous ne pouvons dès lors retrouver de fragments.

L'énergie libérée lors de la collision est souvent comparée avec l'énergie libérée par la bombe d'Hiroshima.

$$1 \times \text{Hiroshima} = 1.8 \cdot 10^{13} \text{ Joules}$$

Nous pouvons dire en conclusion, afin que les météorites arrivent jusqu'à nous, qu'elles ne doivent être ni trop grosses, ni trop petites, et donc doit avoir une taille « idéale ».

### b. Cratère (astroblèmes) : Meteor Crater

Les météorites ont pu, durant leur chute, blesser ou même tuer des animaux. Ce fut le cas d'une vache en Argentine et également le triste sort d'un chien. Aucun dommage physique ne fut déploré du côté humain, sauf une météorite qui tomba sur la tête d'un enfant, heureusement, que celle-ci ne pesait que quelques grammes...

Les cratères laissés par des chutes anciennes de météorites sont appelés astroblèmes (du grec  $\alpha\sigma\tau\rho\nu$  : astre et  $\beta\lambda\epsilon\mu\alpha$  : coup). Le plus célèbre est sans doute Meteor Crater (Arizona, USA) qui mesure 1200 mètres de diamètre et plus de 180 mètres de profondeur. Sa formation date de plus de 50 000 ans.

Le météorite était composé de fer presque pur, et contenait aussi du nickel. Bien sur, on a creusé, tant pour satisfaire la curiosité scientifique que pour l'intérêt économique de minerais aussi concentrés. Ne trouvant rien de significatif, on a fini par comprendre que l'énergie du choc avait sublimé l'astéroïde au moment de l'impact.

Meteor Crater a une autre raison d'être célèbre : avant le vol sur la lune, c'est là que sont venus s'entraîner les astronautes, pour travailler dans une ambiance la plus proche possible de l'isolement et du paysage sélénite.

Nous pouvons trouver des astroblèmes un peu partout sur notre planète : en France (Rochechouart), en Australie, etc...

Des études menées au CNES (Centre National d'Etude Spatiale) ont déterminé que le diamètre d'un cratère est égal à vingt fois celui du bolide qui vient percuter la Terre. Ainsi, nous pouvons estimer que la météorite qui crée le Meteor Crater devait avoir un diamètre de l'ordre de 50 mètres.

$$diamètre_{cratère} \approx 20 \cdot diamètre_{météorite}$$

Les conséquences de l'impact dépendent de la masse et de la vitesse de la météorite incidente, mais aussi de la nature des roches qu'elle rencontre lors de l'impact. Nous devons alors utiliser une autre formule :

$$diamètre_{cratère} = 2 \cdot \sqrt[3]{M_{météorite} \cdot vitesse_{météorite}^2}$$

Il y a différents types de cratère :

- i. **Les cratères simples** : causés par les météorites de 10 à 200 mètres de diamètre. Ceux-ci s'enfoncent dans le sol, comprimant toutes roches situées devant elle et les fondant
- ii. **Les cratères complexes** : ce sont des cratères ayant un diamètre supérieur à 4 km, leur formation commence comme celle des cratères simples, mais lorsque le cratère transitoire apparaît, les roches situées au centre rebondissent, se

redressent pour créer une structure centrale qui peut atteindre un dixième de la profondeur totale du cratère.

Vous trouverez une explication graphique de la formation des différents cratères à la figure 12.

### iii. Les impactites et les tectites

Les **tectites** (du grec *τεκτοσ* : fondu) sont des petites pierres vitreuses qui ressemblent aux obsidiennes (verres naturels formés lors de certaines éruptions volcaniques), mais qui diffèrent de toutes les laves terrestres par leur composition chimique.

Certains spécialistes modernes ont tendance à associer dans un groupe unique les **impactites** et les **tectites**. C'est une erreur et il est nécessaire d'examiner ce qui les différencie.

Sous l'action de la violente onde de choc provoquée par l'impact, les roches du substrat choqué subissent diverses transformations. Un certain volume de roches est vaporisé, un autre fondu (à plus de 2500 °C), un autre pulvérisé, un autre enfin seulement brisé et concassé.

Tout ce matériel est projeté dans l'atmosphère à des altitudes différentes, de quelques centaines de mètres à plusieurs centaines de kilomètres. Le matériel solide et une partie du matériel fondu retombent dans le cratère ou à sa proximité immédiate, pour former les **impactites** qui ont souvent des formes tourmentées et très irrégulières. Ces impactites sont donc des fragments minuscules (quelques grammes ou dizaines de grammes) des roches préexistantes du substrat choqué, mais transformées physiquement et chimiquement par le métamorphisme de choc. Ces transformations sont maximales là où les pressions et les températures sont les plus élevées. Les transformations sont moins sensibles pour les zones périphériques du substrat choqué, là où les pressions et les températures sont inférieures.

Mais durant la projection des roches du cratère, tout le matériel ne retombe pas à proximité immédiate de ce cratère. Les gaz et la matière vaporisée montent davantage dans l'atmosphère, jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres, en compagnie d'une partie du matériel fondu. Celui-ci retombe sur Terre dans des sites plus ou moins éloignés selon la violence de l'éjection, mais toujours de quelques centaines de kilomètres au moins de leur point de départ, c'est-à-dire du cratère parent, pour former ce que l'on appelle les tectites au sens strict. Les tectites sont donc toujours séparées du cratère dont elles sont issues, et elles ont subi ce que l'on appelle l'ablation aérodynamique durant leur traversée de l'atmosphère. Le résultat est que les vraies tectites sont toutes des objets de forme régulière : disques, objets en forme de poires, de larmes et d'haltères, évoquant les gouttes d'un liquide visqueux figées brutalement.

En conclusion, nous devons retenir de ce fait très important : l'existence même des tectites est **la preuve de la réalité de l'impactisme terrestre**. Pour chaque famille de tectites, il y a (ou il y a eu) obligatoirement un cratère parent. La formation de tectites nécessite un cratère parent d'au moins 10 km de diamètre, alors que la formation d'impactites ne nécessite qu'un cratère et une énergie libérée beaucoup plus modestes.

Par contre, il faut signaler que plusieurs grands cratères d'impact récents n'ont apparemment pas engendré de tectites. Il y a là un problème non résolu.

Au point même que certains spécialistes croient qu'une grosse partie de ceux-ci ont été provisoirement satellisés ou ont même échappés à l'attraction terrestre. C'est ainsi que des météorites terrestres existent peut-être sur Mars, Vénus ou Mercure.

#### **iv. Cratère de Chixculub**

Il y a soixante-cinq millions d'années, là où se rencontrent les ères secondaire et tertiaire (Crétacé-Tertiaire ou KT), une grande catastrophe planétaire se produisit. Plus de 60 % des espèces vivantes disparurent dont les dinosaures qui sont, sans aucun doute, les plus connus du public.

Près de quatre-vingts hypothèses furent proposées pour expliquer cette crise. L'une d'elle propose la chute d'une ou plusieurs météorites simultanément.

En effet, les géologues du monde entier connaissent très bien ce passage entre ces deux ères, en effet, à cette limite, une fine couche d'argile centimétrique rougeâtre se distingue dans les plans calcaires. De nombreuses analyses ont été effectuées. Ils se penchèrent notamment sur la quantité d'iridium présente. En effet, ils y trouvèrent une concentration anormalement élevée. On sait que la Terre est très pauvre en ce matériau et donc, ceci serait la preuve d'un bombardement météorite intense durant cette période.

Un autre preuve se constitue elle de l'ensemble des quartz choqués trouvés dans cette couche. Il fut démontré à l'université de Lille, que ces quartz possèdent les caractéristiques d'une pression élevée (onde de choc) et que nous ne connaissons pas, à ce jour, un mécanisme terrestre capable de les engendrer.

Une troisième preuve est la présence de magnétites nickélicifères, inexistante sur Terre, qui sont également présentes dans la croûte de fusion des micrométéorites et dans les sphérules cosmiques que l'on retrouve au fond des océans. Ceci est dû à leur pénétration dans l'atmosphère, lorsque la pression en oxygène est maximale.

Toutes ces preuves tentent à conclure que la disparition des dinosaures serait bien due à un impactisme. Mais, jusqu'à peu, aucune trace d'un cratère ne pouvait laisser entendre qu'un gros bolide s'était écrasé sur Terre à cette époque. Cependant, suite à des analyses gravimétriques, un cratère de 200 km de diamètre a été découvert dans la péninsule du Yucatan au Mexique. Une météorite d'environ 10 km de diamètre se serait donc abattue à cet endroit et l'énergie de l'impact (plusieurs millions de bombes à hydrogène), aurait provoqué d'énormes raz-de-marée, la poussière émergente de la collision se serait élevée dans l'atmosphère et aurait assombri le ciel, ne laissant plus les rayons du Soleil atteindre le sol. Cet « hiver nucléaire » prohiba la photosynthèse des végétaux, et donc peu à peu ceux-ci périrent, laissant sur leur faim, les plus gros animaux qui se nourrissaient de plantes, dont les dinosaures. Sans oublier que l'énergie calorifique libérée enflamma une partie considérable des continents. La fumée issue de ce grand incendie associée aux vapeurs d'eau et à l'azote formèrent des pluies acides qui mirent fin à l'existence des espèces marines. C'est ainsi que l'on retrouve également des traces de suies dans la couche argileuse.

De cette fin tragique, nous devons remercier ce bolide. En effet, les niches écologiques laissées vides par l'impact ont été comblées par les mammifères (qui ont survécu) pour aboutir enfin à l'homo sapiens... Donc si cette catastrophe n'eut pas lieu, peut-être que nous n'aurions jamais été là pour en parler aujourd'hui...

Finalement, certains scientifiques exposent que les ondes de choc résultantes auraient provoqué de fortes éruptions volcaniques de l'autre côté du globe, et auraient participé ainsi à la formation de l'Himalaya. Ces fortes éruptions auraient aussi été fatales pour les espèces vivantes.

Vous trouverez une explication imagées du cratères de Chixculub à la figure 13 ainsi qu'une description des conséquences à un impact avec un gros météorite à la figure 14.

### **c. La panspermie**

Un autre domaine passionnant de la recherche scientifique actuelle est, bien sur, de connaître quelle est l'origine de la vie. Le problème est loin d'être résolu, mais parmi les hypothèses en vogue, nous pouvons parler de la panspermie. C'est en 1821, que le comte de Montlivaut suggéra que la vie fut amenée sur Terre via des météorites avançant qu'elles provenaient des déjections du volcanisme lunaire. C'est aussi Camille Flammarion qui eut l'idée, en voyant le carbone contenu dans les météorites, que celles-ci étaient la preuve d'une vie organique dans un autre monde de l'univers.

D'autres scientifiques prétendent avoir découverts des fossiles dans les météorites. Mais nous savons aujourd'hui que cela est faux. Pourtant en 1999, des scientifiques italiens pensaient avoir trouvé des cellules organiques vivantes dans une de ces roches venues du ciel. Le plus belle exemple reste néanmoins la météorite nommée ALH 84001 qui semblaient présentés des traces de vie venues de la planète Mars.

Malgré ces désenchantements, la probabilité que la vie existe en dehors de notre planète est tout à fait acceptable, mais la communication avec d'autres civilisations semble quasi impossible. La vie aurait pu néanmoins se développer sous forme bactérienne ; donc, notre seul espoir (étant limités dans le temps) serait de découvrir une météorite qui nous donnerait la chance de confirmer nos espérances...

## VIII. Qualifier un risque : échelle de Turin

Dans les années 1990, les scientifiques de la NASA (National Aeronautical and Space Association) se sont demandés comment il sera possible de rendre évident au grand public (via la presse) un danger imminent du à l'impact d'un astéroïde avec notre belle planète bleue sans créer la panique générale inutilement. C'est ainsi qu'ils édifièrent l'échelle de Turin.

Cette échelle sert à quantifier les risques posés par les impacts d'objets géocroiseurs, tel les astéroïdes, comètes, etc. Elle varie de 0 - aucune chance de collision à 10 - risque certain de destruction de la planète.

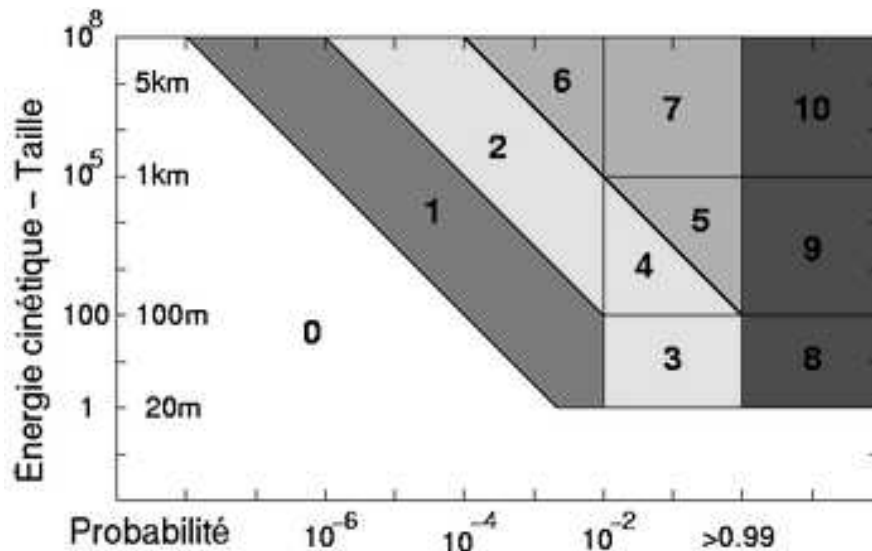
Elle a été adoptée par l'Union Astronomique Internationale (UAI) en juin 1999 car il n'existait jusqu'ici aucune manière simple d'expliquer le risque de collision avec la Terre que pose vraiment un astéroïde donné. Son nom a été donné en l'honneur de la ville italienne où elle a été adoptée, elle permettra aux chercheurs, aux médias et au public de mieux exprimer les risques que représente réellement tel ou tel corps céleste. Cette échelle permettra aussi d'éviter d'alarmer inutilement le public, comme cela s'est produit dans le passé (notamment en 1999, où la presse scandait qu'une énorme météorite s'écrasera sur la Terre en 2019... risque rapidement écarté). Elle a été inspirée de l'échelle de Richter dans un souci de compréhension pour le grand public.

L'échelle de Turin a été imaginée par Richard Binzel, un chercheur du Massachusetts Institute of Technology, qui a travaillé sur le projet pendant cinq ans. Elle tient compte de plusieurs facteurs : la taille et la vitesse de l'objet (de son énergie cinétique), ainsi que sa trajectoire (probabilité de collision). Les valeurs vont de 0 à 10 sans utilisation des décimales. Cette « note » est attribué avant chaque passage de l'objet céleste près de la terre. Elle n'est pas figée car elle est attribuée au moment des connaissances et des observations en cours.

L'énergie est donnée en mégatonne de trinitrotoluène (MT TNT), nous connaissons la relation entre cette unité et l'unité internationale énergétique (le Joule). Nous pensons qu'il est utile de la rappeler tout de même :

$$1 \text{ MT TNT} = 4.2 \cdot 10^{15} \text{ J}$$

Le principe d'utilisation de cette échelle est très simple. Il suffit de choisir, en ordonnée, l'énergie cinétique du bolide, en fonction de la probabilité qu'on lui accorde de tomber sur la Terre, en abscisse. Une valeur cotée de 0 à 10 nous est alors communiqué et celle-ci correspond à un été d'alerte dont vous trouverez un résumé à la page suivante.



<b>Echelle de Turin</b>	
<b>EVENEMENTS SANS CONSEQUENCES (blanc)</b>	
0.	Le risque de collision est nul ou bien en deçà de la chance d'avoir un objet aléatoire de la même taille qui va heurter la terre au cours de ces prochaines décennies. Cette catégorie est attribuée à tout objet qui, dans le cadre d'une collision éventuelle, n'a aucune chance d'atteindre la surface de la terre intacte.
<b>EVENEMENTS QUI MERITENT ATTENTION (vert)</b>	
1.	Les chances de collision sont extrêmement improbables dans les décennies à venir.
<b>EVENEMENTS QUI MERITENT L'ATTENTION DES ASTRONOMES (jaune)</b>	
2.	Collision très improbable, mais trajectoire proche de la Terre. Demande l'attention des astronomes mais il n'y a pas de raison de prévenir le public. Des réobservations ultérieures doivent permettre de requalifier le risque au niveau 0.
3.	Trajectoire rapprochée, 1% de possibilités de collision au maximum avec dégâts localisés. Des réobservations ultérieures doivent permettre de requalifier le risque au niveau 0. L'attention du public et des autorités est nécessaire, surtout si le risque de collision est inférieur à 10 ans.
4.	Trajectoire rapprochée, plus de 1% de possibilités de collision capable de dévastation régionale. Des réobservations ultérieures doivent permettre de requalifier le risque au niveau 0. L'attention du public et des autorités est nécessaire, surtout si le risque de collision est inférieur à 10 ans.
<b>EVENEMENTS A RISQUES (orange)</b>	
5.	Trajectoire rapprochée, menace considérable de collision entraînant la dévastation d'une région. Si la collision est prévue pour moins de 10 ans, des mesures gouvernementales doivent être envisagées.
6.	Trajectoire rapprochée, menace considérable de collision entraînant une destruction globale. Si la collision est prévue pour moins de 10 ans, des mesures gouvernementales doivent être envisagées.
7.	Trajectoire rapprochée, menace extrêmement considérable de collision entraînant une destruction globale. Pour un tel événement prévisible à moins de 100 ans, des mesures internationales doivent être planifiées, et notamment l'impérieuse nécessité de déterminer rapidement et avec certitude si oui ou non la collision aura lieu.
<b>COLLISIONS CERTAINES (rouge)</b>	
8.	Collision probable capable de provoquer une destruction localisée. Cet événement se produit tous les 50 à 1000 ans en moyenne.
9.	Collision certaine avec destruction d'une région. Cet événement se produit tous les 1000 à 100 000 ans en moyenne.
10.	Collision certaine entraînant une catastrophe climatique globale. Cet événement se produit tous les 100 000 ans ou plus.

## IX. Conclusion

Nous espérons que ces quelques pages vous aideront à mieux comprendre pourquoi l'étude des météorites est si importante.

Vous avez appris à reconnaître d'un coup d'œil les météorites parmi un tas d'autres matériaux issues des roches terrestres ou de l'industries métallurgiques. Encore mieux, en apprenant la classification minéralogique, il nous est alors permis de connaître encore un peu plus la nature des « corps parents » de l'objet extra-terrestre, et elle-même peut nous faire comprendre la genèse et l'évolution de système solaire, et donc, de nos propres origines. Car, ne l'oublions pas : nous sommes tous poussières d'étoiles.

Nous avons aperçu les cicatrices laissées par de gros bolide sur Terre. L'un d'entre-eux semble même donner la preuve que l'extinction des « lézards géants », il y a 65 millions d'année, soit d'origine météoritique. Cela nous glace le sang...

En effet, l'idée d'un impact important avec un énorme objet spatial qui anéantirait la vie sur Terre, nous laisse craintifs. Nous savons pertinemment bien que, si nous sommes informés qu'un tel phénomène se produira dans les dizaines d'années à venir, nous ne serions pas en mesure d'éviter le choc. L'échelle de Turin n'est pas une solution à ce problème, elle permet juste de donner un avis concernant l'impact qui arrivera ou non. C'est maintenant, qu'il faut réfléchir à ce que nous pourrions développer pour contrer une collision avec un gros cailloux « flottant » innocemment dans l'immensité interplanétaire. Les hypothèses ne manquent pas, mais les réalisations technique et la technologique ne suivent pas...

Mais une mauvaise nouvelle, s'accompagne d'une bonne nouvelle : l'hypothèse de la vie apportée par un objet venu d'ailleurs de l'espace nous porte à réfléchir sur notre vision de voir l'Univers. Selon cette hypothèse, nous pouvons espérer pouvoir trouver de la vie autre part que sur notre planète bleue. Peut-être quelque part, à des distances astronomiques (c'est le cas de le dire) se trouvent une forme de vie, peut-être même intelligente qui, alors peut-être, réfléchit elle aussi à la nature de « leurs météorites ». Mais ceci ne reste qu'une élucubration et laisse le lecteur à sa propre imagination...

N'hésitez plus désormais à scruter le ciel à la recherche de « votre » étoile filante, qui peut-être, se transformera en cailloux tombés du ciel... Même si m'approche géologique vous horripile, il suffit de rêver et de se laisser séduire par le ballet d'étoiles filantes et par le spectacle haut en couleur qu'accompagne la chute d'une météorite.

## X. Bibliographie

« **Ces Pierres qui Nous Tombent du Ciel** », exposition (14.10.2002 au 17.11.2002, Paris) et livret, Michel Champenois.

« **Les météorites** », Museum d'histoire naturelle, Ed . Bordas, 128 pages, ISBN2-04-027195-3.

« **Les météorites et leurs impacts** », Alain Carion, Ed. Masson, 1997, 215 pages, ISBN 2-225-82845-8

« **Météorites en France** », Alain Carion, Joan Deville et Patrice Lebrun, Ed. Minéraux et Fossiles, Hors Série N°17, octobre 2003

### Sites Internet

Alain Carion : <http://www.carionmineraux.com>

Bruno Fectay : <http://www.meteorites.com>

CNES : <http://www.cnes.fr>

Flosat : <http://www.flosat.be>

Michel Franco : <http://www.caillou-noir.com>

Marc Labenne : <http://www.labenne-meteorites.com>

Museum d'histoire naturelle (Paris) : <http://www.mhn.fr/base/index.html>

NASA : <http://www.nasa.gov>

Saharamet : <http://www.saharamet.com>

**Note : toutes les images présentées dans ce dossier sont la propriété de l'auteur (sauf mention contraire).**

## XI. Vocabulaire

**Accrétion** : processus de croissance par accumulation de matériel externe. Les planètes se sont ainsi formées au sein de la nébuleuse solaire par l'accumulation de petits corps.

**Achondrite** : météorite différenciée constituée de silicates. Elle provient de la surface ou du manteau de son astéroïde parent.

**Altération** : transformation des minéraux d'une roche par réactions avec un fluide. Dans le cas des météorites, l'altération est dite hydrothermale si le fluide est de l'eau circulant à l'intérieur du corps-parent de la roche, par opposition à l'altération terrestre, où la transformation a lieu sur Terre après la chute.

**Astéroïdes** : petites planètes rocheuses de taille très variable (env. 930km pour Cérés, la plus grosse) et de forme irrégulière gravitant entre Mars et Jupiter dans une zone appelée ceinture des astéroïdes. La plupart des météorites en sont issues.

**Basalte** : roche magmatique effusive résultant de la cristallisation d'une lave. Elle est composée en majeure partie de feldspaths plagioclases et de clinopyroxènes.

**Big-Bang** : gigantesque explosion qui aurait été à l'origine de l'Univers.

**Brèche** : roche formée par l'accumulation de fragments anguleux de tailles et natures différentes.

**Chondre** : assemblage de cristaux de forme sphérique cristallisée à partir de liquides silicatés, et dont l'accumulation au sein d'une matrice forme les météorites primitives que l'on qualifie de chondrites.

**Chondrite** : météorite non-différenciée, en grande partie formée par l'accumulation de chondres au sein d'une matrice.

**Chondrite carbonée** : la plus primitive des chondrites. Leur matrice renferme du carbone, essentiellement sous forme organique.

**Chute** : désigne à la fois le fait de tomber pour une météorite et, par extension, une météorite que l'on a vu tomber. De telles météorites sont plus précieuses, car elles échappent à la contamination et à l'altération terrestres.

**Claste** : fragment de minéral ou de roche inclus dans une roche.

**Comète** : petit corps du système solaire, composé d'un noyau solide assez petit qui, au voisinage du soleil, éjecte une atmosphère passagère de gaz et poussières à l'aspect d'une chevelure diffuse qui s'étire dans la direction opposée au soleil en une double queue parfois spectaculaire.

**Condensation** : formation d'un solide ou d'un liquide à partir d'un gaz.

**Corps parent** : corps d'où est issue une météorite.

**Cratère** : dépression circulaire creusée par l'impact d'une météorite à la surface d'un corps.

**Cristal** : forme organisée de la matière solide, au sein de laquelle les différents atomes occupent des places précises dans une unité de base (la maille) qui est répétée indéfiniment.

**Cristallisation** : formation d'un cristal généralement à partir d'un liquide.

**Croûte** : couche superficielle d'une planète, et en particulier de la Terre, pour une large part de nature basaltique. La croûte terrestre a une épaisseur variant de 10 à 70km.

**Croûte de fusion** : fine pellicule vitrifiée et le plus souvent noire, en surface des météorites.

**Différenciation** : séparation en plusieurs phases physiquement et chimiquement distinctes d'un composé initialement homogène.

**Diogénite** : météorite différenciée formée essentiellement de pyroxène magnésien. Il s'agit vraisemblablement d'un cumulat.

**Enstatite** : Pôle magnésien de la série isomorphe des orthopyroxènes.

**Etoile** : sphère de gaz à très haute température, au cœur de laquelle se produit des réactions de fusion nucléaire, qui en font une source de lumière et de chaleur.

**Etoiles filantes** : phénomène lumineux provoqué par le passage dans l'atmosphère d'un grain de poussière cosmique.

**Eucrite** : météorite différenciée de nature basaltique.

**Evaporation** : processus physique entraînant la formation d'un gaz à partir d'un liquide

**Feldspath** : minéral silicaté appartenant à la famille des tectosilicates et cristallisant dans les systèmes monoclinique ou triclinique. Les feldspaths sont des minéraux essentiels de la plupart des roches magmatiques. Ils sont répartis en trois grandes familles : les potassiques, les sodi-potassiques et les sodi-calciques.

**Fusion** : processus physique entraînant la formation d'un liquide à partir d'un solide

**Gaz rares** : éléments chimiques gazeux inertes et non réactifs présents en très petite quantité dans l'atmosphère (Hélium, Néon, Argon, Krypton, Xénon).

**Gemme** : minéral, assemblage de minéraux ou concrétion dont la beauté et la rareté peuvent en faire des objets de bijouterie.

**Grains présolaires** : grains formés au voisinage d'une étoile avant la formation du système solaire.

**Gravitation** : phénomène consistant en l'attraction des corps entre eux proportionnellement au produit de leurs masses et à l'inverse de leur leur distance.

**Gravité** : attraction exercée par un corps du fait de sa masse, conformément à la loi de la gravitation.

**Inclusion réfractaire** : agrégat de minéraux réfractaires ayant existé en tant que tel avant incorporation dans la météorite.

**Isotope** : noyau atomique considéré en fonction de son nombre de protons et de neutrons. Par exemple, l'oxygène a trois isotopes ayant mêmes propriétés chimiques mais des masses différentes (16, 17 et 18). La masse augmente par rapport à l'atome  $^{16}\text{O}$ , par l'ajout d'un neutron dans le noyau de l'atome  $^{17}\text{O}$  et de deux neutrons dans celui de l'atome  $^{18}\text{O}$ .

**Isotopique** : ayant trait aux isotopes. Abondance isotopique : abondance d'un isotope donné (exemple  $^{18}\text{O}=0.2\%$  de l'oxygène total). Anomalie isotopique : variations des abondances relatives de différents isotopes, non liée à un fractionnement de masse. Composition isotopique : abondance relative des différents isotopes. Rapport isotopique : pour pouvoir comparer les compositions isotopiques d'un échantillon à l'autre, on les exprime sous forme de rapport à un isotope de référence. Signature isotopique : composition isotopique caractéristique.

**Lave** : roche émise en fusion (T de 700 à 1200°C) à l'état liquide ou pâteux par les volcans

**Manteau** : couche intermédiaire d'une planète, et en particulier de la Terre, constituée de roches riches en olivine.

**Magma** : mélange visqueux à haute température contenant des phases solides (cristaux), une phase liquide et une phase gazeuse. Le magma donne des roches plutoniques par refroidissement lent et donc cristallisation complète ou des roches effusives (laves) par refroidissement rapide et un taux de cristallisation moins élevé que pour les précédentes.

**Matrice** : matériau à grain fin et partiellement amorphe occupant, dans une chondrite, l'espace entre les chondres, les inclusions réfractaires et les autres entités.

**Métamorphisme** : transformation à l'état solide d'une roche, résultant d'une élévation de température et/ou de pression.

**Météorite** : objet naturel d'origine extraterrestre, ayant survécu au passage dans l'atmosphère.

**Météore** : phénomène lumineux provoqué par le passage dans l'atmosphère d'un corps solide venant de l'espace.

**Minéral** : substance dont la formule chimique est donnée et dont les atomes sont organisés selon un réseau cristallin. Les minéraux sont les entités constitutives des roches.

**Nébuleuse** : nuage de gaz et de poussières pouvant avoir des origines variées.

**Noyau** : partie la plus interne d'une planète, constituée essentiellement de ferro-nickel (au moins dans le cas de la Terre).

**Nucléosynthèse** : ensemble des processus conduisant à l'apparition des éléments chimiques constituant la matière de l'Univers. Pour une large part, il s'agit de réactions nucléaires se déroulant dans les étoiles.

**Olivine** : minéral silicaté appartenant à la famille des nésosilicates et cristallisant dans le système orthorhombique. Sa formule générale est  $(\text{Fe}, \text{Mg})_2\text{SiO}_4$ . Ce silicate de fer et de magnésium est en fait une série continue entre un pôle magnésien  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  la forstérite et un pôle ferrifère  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ , la fayalite.

**Orbite** : à l'intérieur du système solaire, trajectoire décrite autour du soleil par tous corps (planète, comètes,...).

**Pallasite** : météorite différenciée formée d'un réseau continu de ferro-nickel contenant de nombreux cristaux d'olivine.

**Période (ou demie-vie)** : temps au bout duquel la moitié des isotopes radioactifs "pères" initialement présents dans un réservoir sont désintégrés en isotopes "fils". La période est caractéristique de chaque couple père/fils.

**Pétrologie** : science des roches, comprenant leur description, leur classification et l'interprétation de leur genèse.

**Plagioclase** : famille sodi-calcique des feldspaths cristallisant dans le système triclinique et de formule générale

$(\text{Na,Ca})\text{Si}_3\text{-2Al}_1\text{-2O}_8$ . Les plagioclases forment une série continue entre le pôle sodique  $\text{NaSi}_3\text{AlO}_8$ , l'albite et un pôle calcique  $\text{CaSi}_2\text{Al}_2\text{O}_8$ , l'anorthite.

**Planète** : corps céleste non lumineux gravitant autour d'une étoile, et en particulier autour du soleil. Dans le système solaire, outre les planètes principales, ce terme regroupe des objets de toutes tailles tels que les astéroïdes. Par planètes internes, on entend les planètes les plus proches du soleil, dont la nature est rocheuse (Mercure, Vénus, Terre et Mars auxquelles on peut adjoindre la Lune). Petites mais denses, elle sont dotée d'une croûte solide.

**Réduction (réduit)** : en général, signifie qu'un atome est sous forme métallique ou neutre et qu'il s'est formé ou transformé dans un milieu sans oxygène.

**Réfractaire (élément)** : stable à haute température dans les conditions nébulaires de basse pression. Les éléments réfractaires (Ca, Ti, Al...) sont les premiers à se condenser à partir d'un gaz se refroidissant (ou les derniers à s'évaporer à partir d'un solide chauffé).

**Réglithe** : couche de débris rocheux produite par les impacts à la surface d'un objet planétaire.

**Silicate** : minéral à base de Silicium et d'Oxygène caractérisé par le motif élémentaire tétraédrique  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  comportant un atome Si au centre et des atomes O aux quatre sommets.

**Spectromètre de masse** : appareil utilisé pour mesurer les compositions isotopiques, dont le principe est de séparer des ions de masse différente en les accélérant par un champ électrique et en les déviant par un champ magnétique.

**Supernovae** : étoile massive ayant atteint un stade avancé de son évolution et qui explose et se manifeste alors temporairement par un éclat considérablement plus élevé.

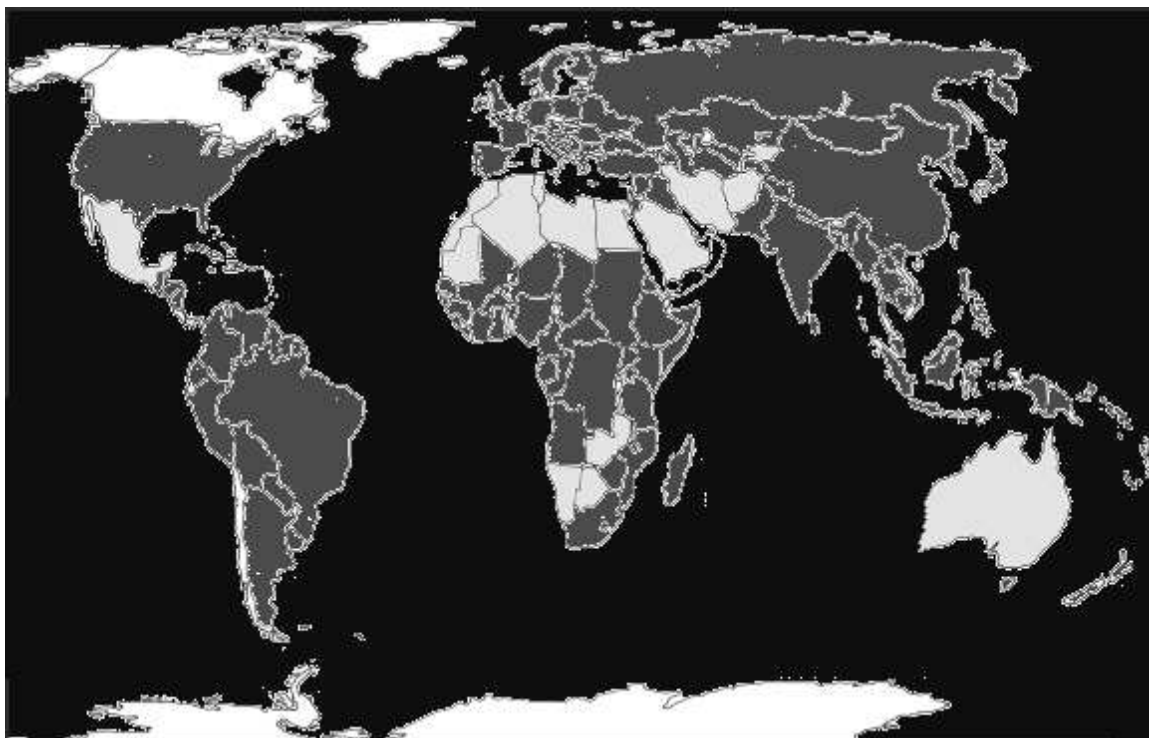
**Veine de choc** : matière fondue emplissant une fracture à l'intérieur d'une roche créée lors d'un choc.

**Vent solaire** : flux continu de particules chargées s'échappant de l'atmosphère du Soleil.

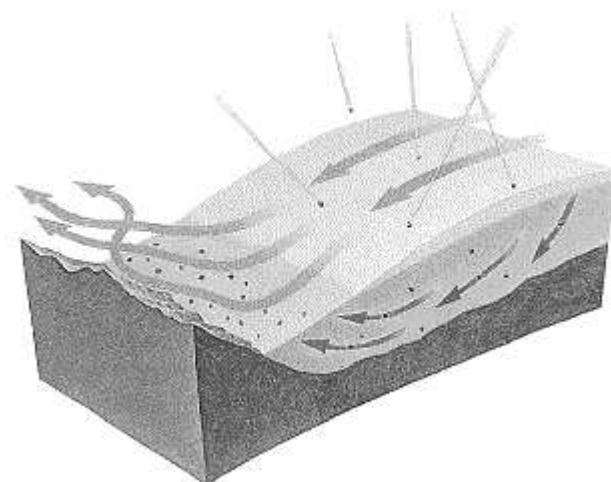
**Widmannstätten (structures de)** : répartition particulière des deux alliages de fer-nickel différents qui constituent les météorites de fer ayant plus de 6% de nickel.

**Zircon** : silicate de zirconium  $\text{ZrSiO}_4$ . En raison de leur haute teneur en uranium, les zircons sont des minéraux très fréquemment utilisés pour la datation en utilisant le couple père=uranium/fils=plomb.

**Figure 1** : où trouver les météorites ?



On retrouve plus facilement les météorites dans les déserts blanc et jaune.



En règle générale, les météorites qui tombent sur la glace y sont progressivement intégrées et entraînées par elle vers le rivage, elles s'éloignent, flottant dans des icebergs, pour venir s'échouer au fond de la mer. Mais si un morceau de glace se trouve piégé derrière une montagne, il peut être peu à peu usé par les vents violents qui courent le long des falaises, exposant ainsi les météorites qu'il contenait.

<http://www.xtec.es/>

Il est aisé de retrouver une pierre noire sur un sol uniforme. De plus l'humidité de l'air quasi absente n'altère en rien la météorite.



<http://www.saharamet.com>

**Figure 2** : comment reconnaître une météorite ? (I)

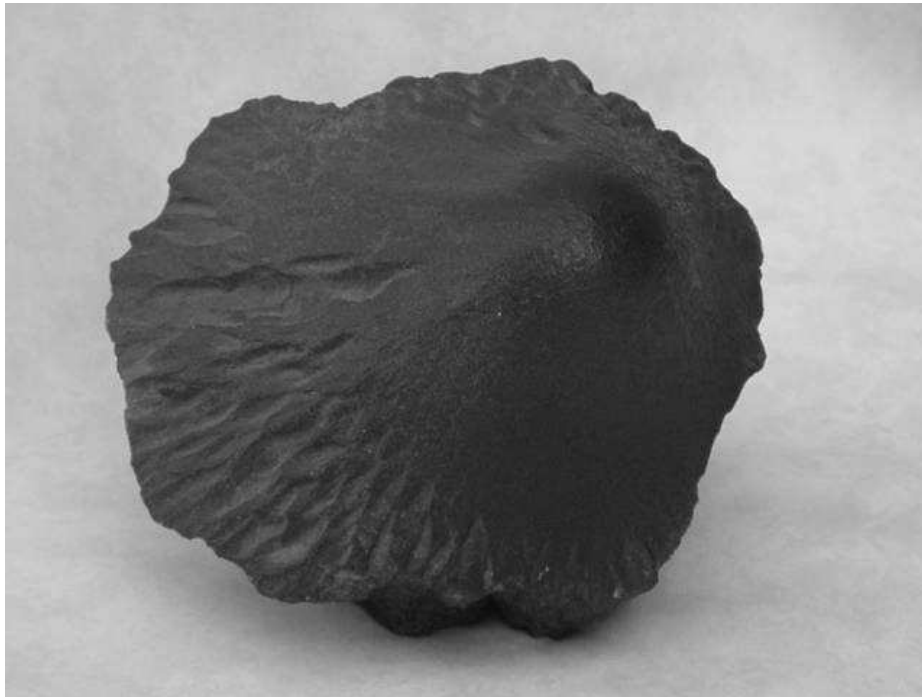


Belle croûte de fusion brune craquelée (sous l'effet des différences thermiques)  
SAH ???

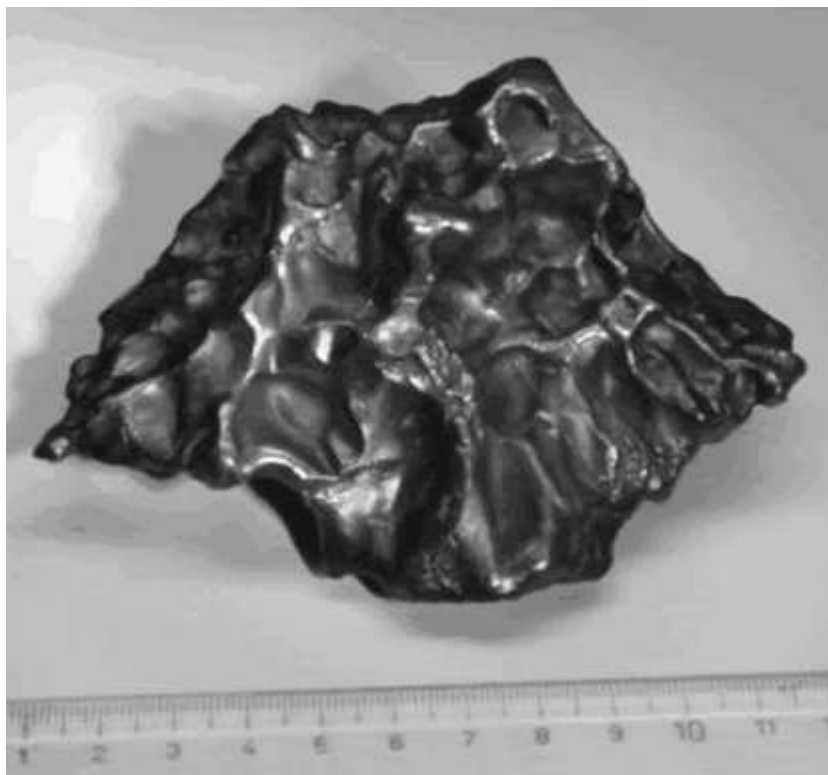


Belle croûte de fusion noire partielle (on aperçoit une partie de l'intérieur de la  
météorite suite à un choc avec le sol terrestre ou par éclatement près de la  
surface de la Terre par effet thermique) – BENGUERIR

**Figure 3** : comment reconnaître une météorite ? (II)



Merveilleuse météorite orientée, on remarque des lignes de fuite de part et d'autre du « cône de pénétration » - ADAMANA



Masse complète métallique présentant des regmaglyptes. – SIKHOTE ALIN

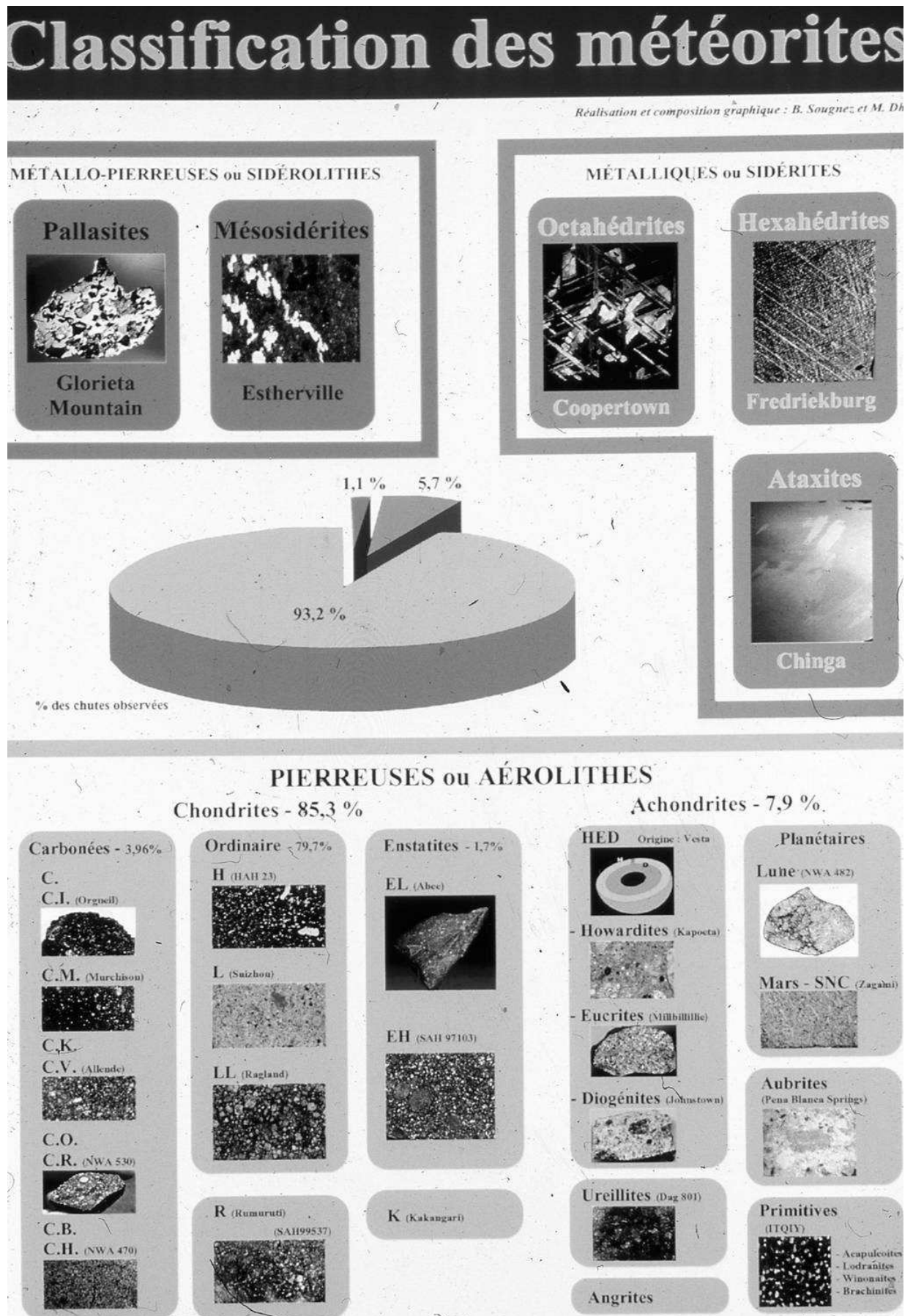
**Figure 4** : comment reconnaître une météorite ? (III)



On remarque bien la croûte de fusion qui enrobe les bords de la météorite. En effet, il s'agit d'une météorite orientée.

GAO GUENIE

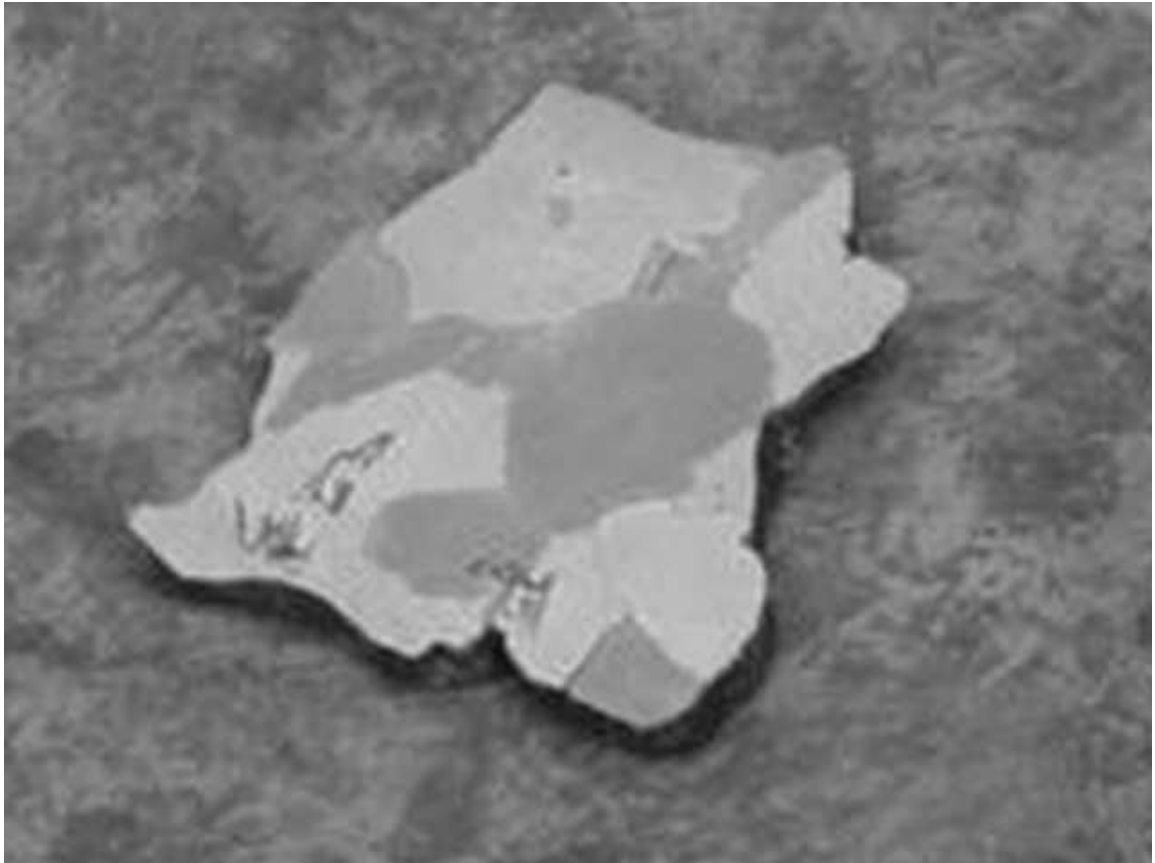
Figure 5 : classification des météorites réalisée par B. Sougnez et l'auteur (2000).



**Figure 6** : exemples de météorites métalliques



Structure de Widmannstätten (GIBEON)

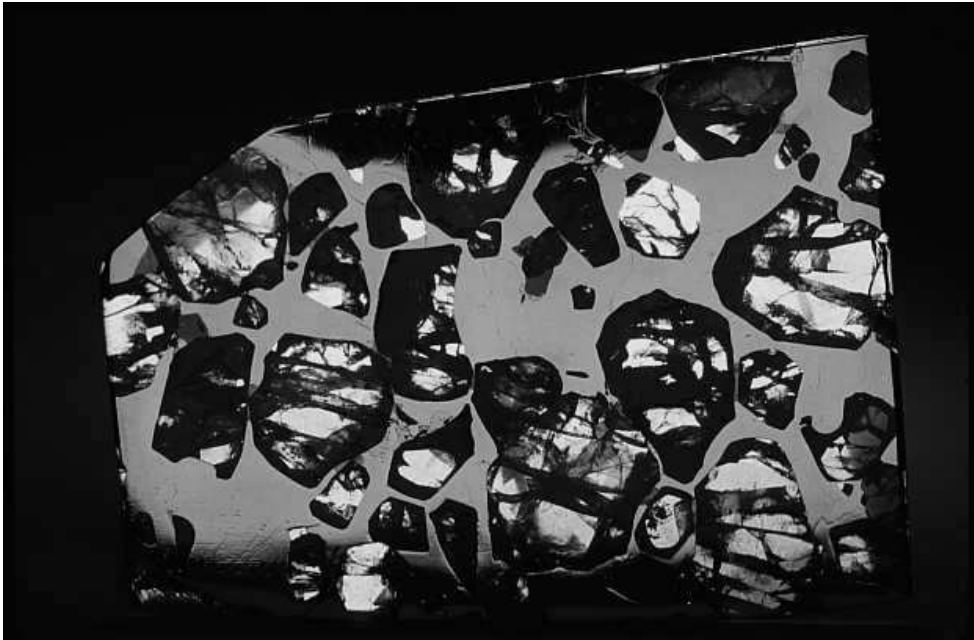


Puzzle de différents métaux, météorite ataxite (SIKHOTE ALIN)

**Figure 7** : exemple de météorites métallo-pierreuses (ESQUEL)

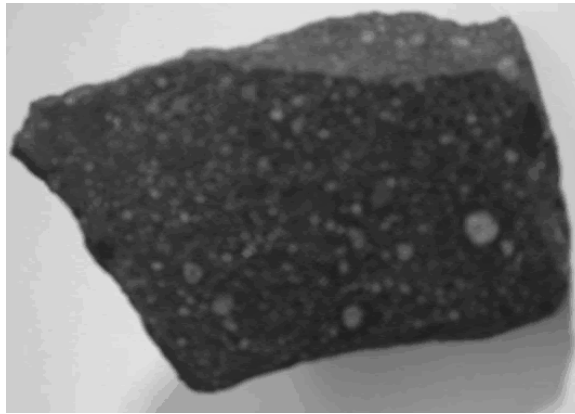


Jaune = olivine      Gris = métal (fer et nickel)

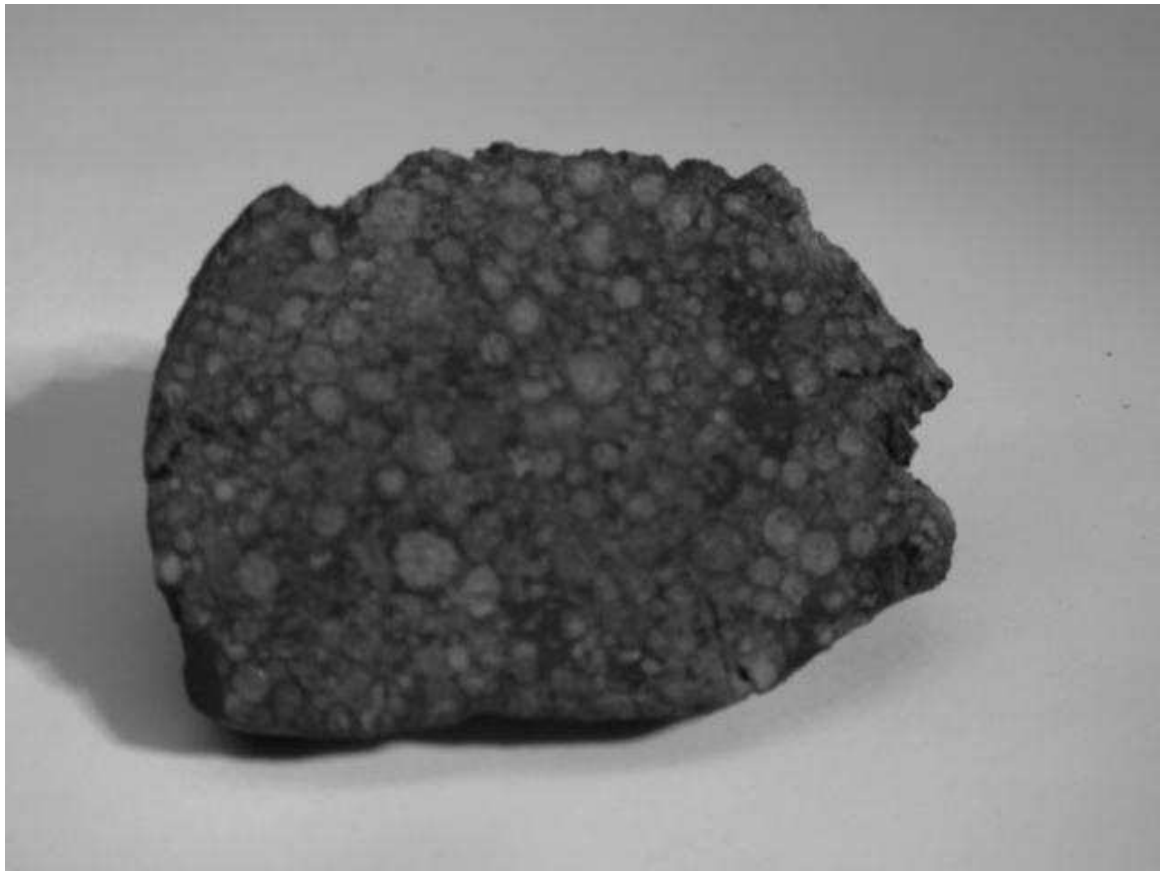


<http://www.astrosurf.org>

**Figure 8** : exemples de météorites chondritiques (carbonées)



MURCHISON (CM)

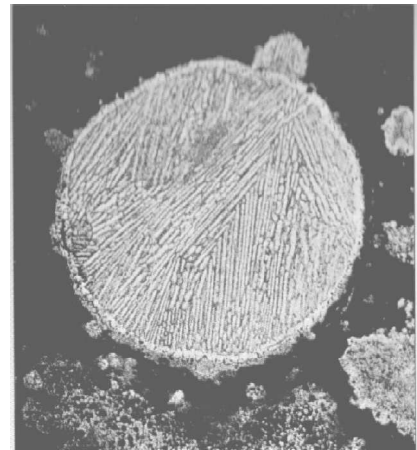


TEMPLE BAR (CR)

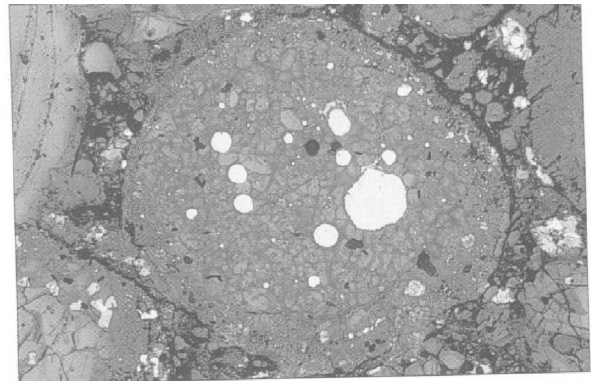
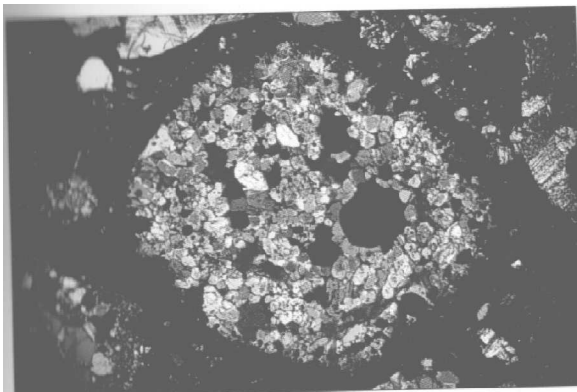
**Figure 9** : les chondres



■ Ci-dessus : photo de la chondrite de Forest Vale, prise au microscope électronique à balayage. Cette photo permet de voir les chondres en relief (taille du plus gros : 200  $\mu\text{m}$ ).



*Chondre d'olivine barrée dans la météorite Allende. Il s'agit là, en fait, d'un unique cristal avec des plages de verre ce qui indique que ce chondre a été fondu très efficacement.*

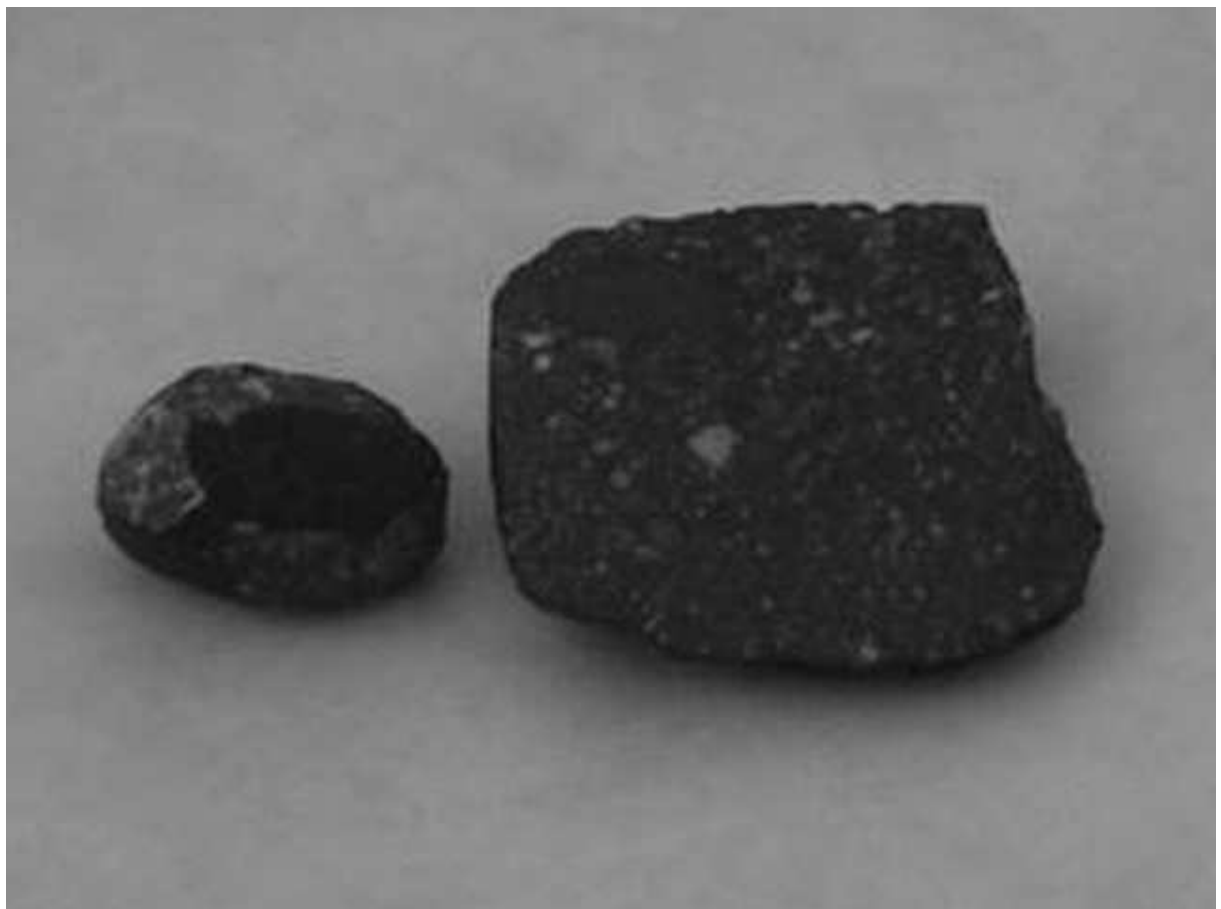


■ Ci-dessus : la météorite Chainpur (X 30). Le centre de la photo est occupé par la section d'un chondre microgrenu à olivine et globules métalliques. En lumière polarisée (à gauche), les petits cristaux d'olivine (un silicate de fer et de magnésium) forment une mosaïque multicolore, alors que les globules métalliques, opaques, sont noirs. En lumière réfléchie (à droite), les silicates sont gris, alors que les globules de ferro-nickel sont blancs. Le bord du chondre est à grain très fin. On y voit des silicates, du métal, et du sulfure de fer jaune pâle.

**Figure 10** : exemples de météorites

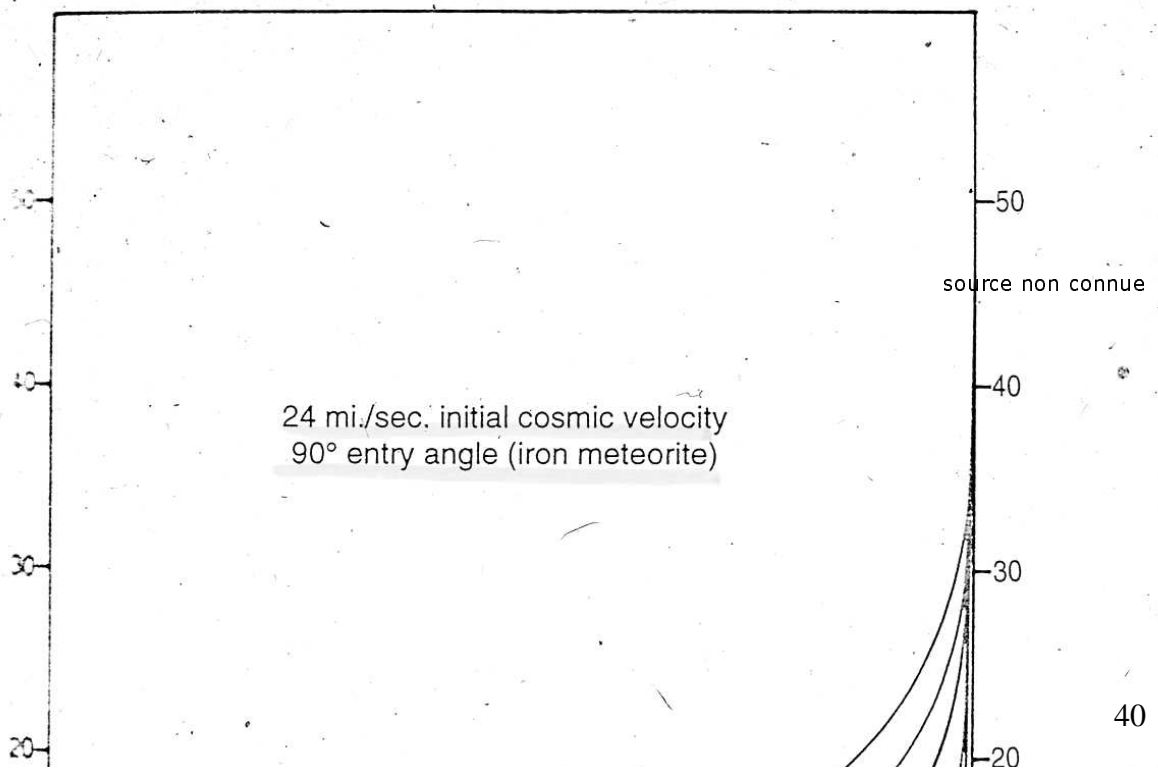


**GIBEON** : tranche (structure de Widmannstätten) et masse complète (croûte de fusion totale)

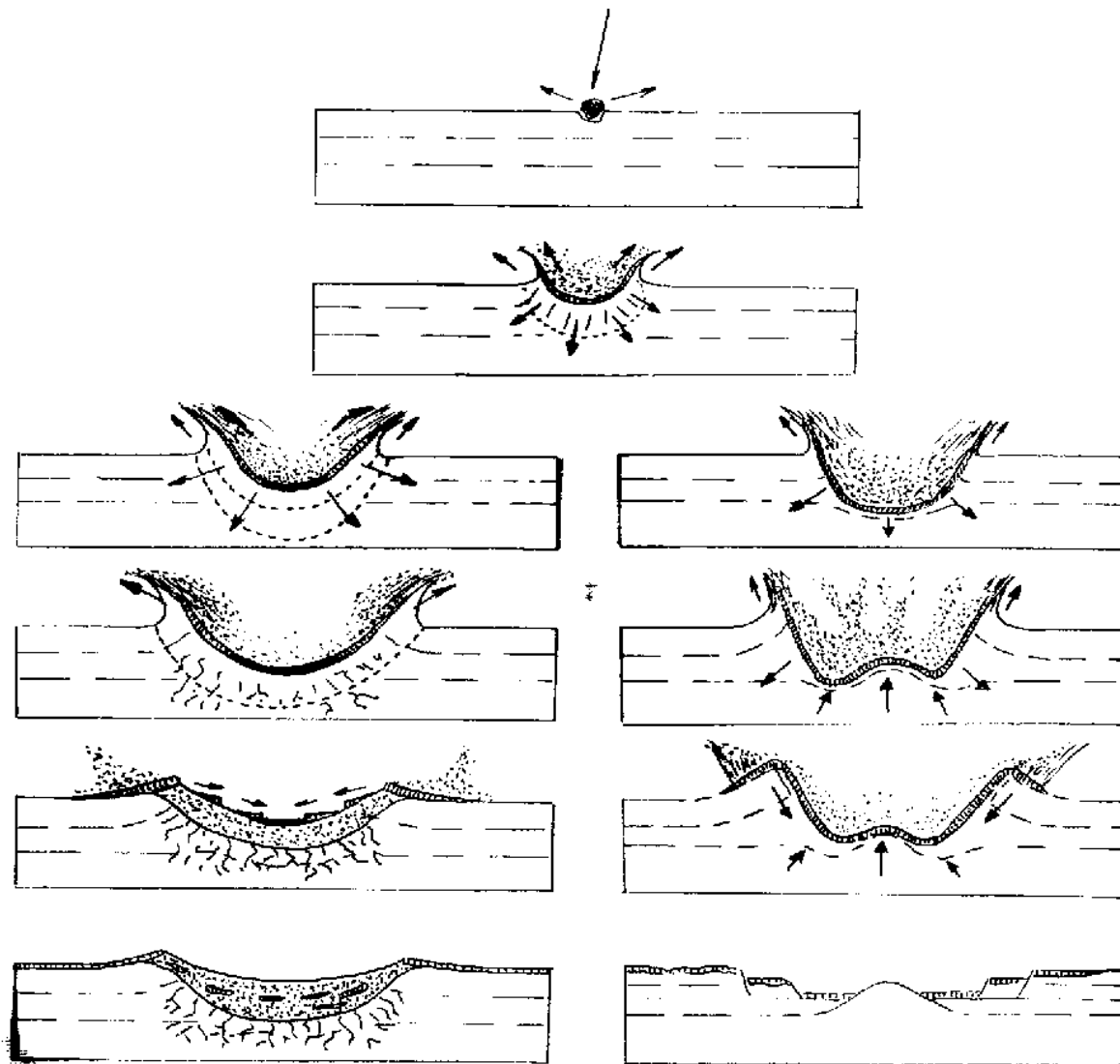


**ALLENDE** : masse complète (croûte de fusion partielle) et tranche (gros chondre au centre parmi de nombreux autres et beaucoup d'inclusions réfractaires).

**Figure 11 :** Vitesse des météorites lors de la pénétration dans l'atmosphère en fonction de leur masse.



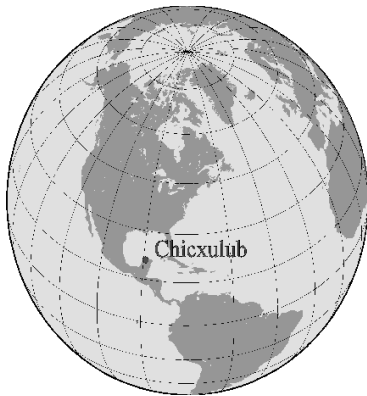
**Figure 12 :** formation des cratères



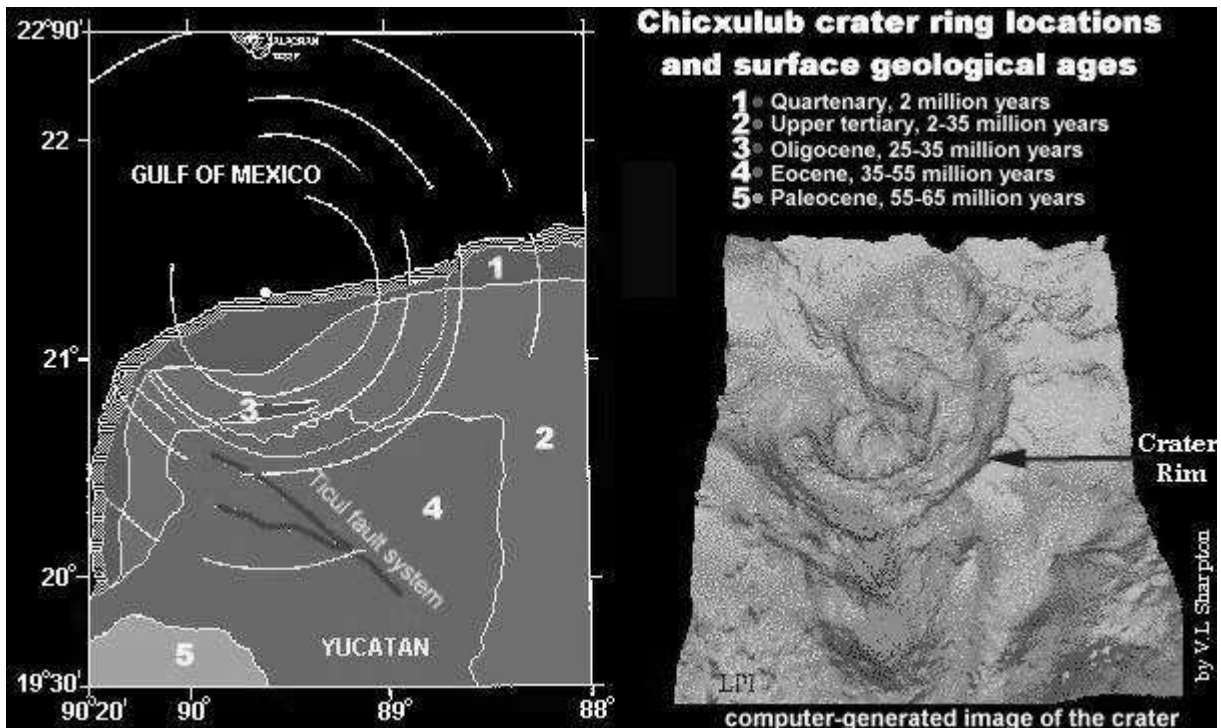
*Formation d'un cratère  
météoritique simple.*

*Formation d'un cratère  
météoritique complexe.*

**Figure 13** : cratère du Yucatan



<http://palaeo.gly.bris.ac.uk>  
<http://evolution.berkeley.edu>



**Figure 14** : scénario catastrophe en cas d'impact avec une énorme météorite.

