

N° 160

FEVRIER
2024

LE CIEL DE RHUYS



Objectif la Lune : la mission japonaise « Moon Sniper » a réussi un alunissage précis historique

Un module spatial japonais a réussi, dans la nuit de vendredi 19 à samedi 20/1/2024, à se poser sur la Lune avec une précision inégalée, une prouesse technologique qui est une grande première pour le pays rêvant de devenir le cinquième à réussir cet exploit.



Voici le robot transformable de surface lunaire « SORA-Q » installé sur le module lunaire de l'entreprise privée japonaise pour la mission Smart Lander for Investigating Moon (Slim). (Handout/various sources/AFP))

La descente vers la Lune du module japonais Slim (Smart Lander for Investigating Moon) doit commencer vers minuit ce samedi heure japonaise (vendredi 19, 15 h GMT) et doit durer environ 20 minutes, selon l'agence spatiale nippone Jaxa.

Cet engin non habité de petite taille (2,4 m de long pour 1,7 m de large et 2,7 m de haut) doit non seulement alunir, mais aussi se poser dans un rayon de 100 mètres par rapport à sa cible, rayon considéré comme un haut degré de précision. D'où son surnom de « Moon Sniper ».

« Un énorme progrès technologique »

Il est courant que les engins lunaires se posent à plusieurs kilomètres de leur cible, ce qui peut compliquer leurs missions d'exploration. Et l'alunissage est plus difficile que de se poser sur des astéroïdes - une performance déjà réalisée, y compris par la Jaxa - car la gravité sur la Lune est plus forte que sur de petits corps célestes.

Se poser avec précision sur la Lune est « un énorme enjeu » pour Slim, a expliqué à l'AFP Emily Brunsden, directrice de l'Astrocampus de l'université de York. La précision du « Sniper » constitue « un énorme progrès technologique qui permettra de concevoir des missions visant à répondre à des questions de recherche beaucoup plus spécifiques ».

Mais réussir cet exploit est « exceptionnellement difficile sur le plan technologique ». « Il n'y a généralement qu'une seule chance, de sorte que la moindre erreur peut entraîner l'échec d'une mission », prévient-elle.

Slim doit se poser dans un petit cratère de moins de 300 mètres de diamètre appelé Shioli, d'où l'engin devrait pouvoir mener au sol des analyses de roches censées provenir du manteau lunaire, la structure interne du satellite naturel de la Terre, qui est encore très mal connue.

Un industriel du jouet partenaire

Ces roches « sont cruciales pour la recherche sur l'origine de la Lune et de la Terre », souligne auprès de l'AFP Tomokatsu Morota, un maître de conférences de l'Université de Tokyo spécialiste de l'exploration spatiale.

Slim emporte une sonde sphérique à peine plus grande qu'une balle de tennis, et capable de modifier sa forme pour se déplacer sur le sol lunaire. Elle a été développée par la Jaxa, en partenariat avec le géant japonais du jouet Takara Tomy.

Cette mission japonaise ambitionne également de faire avancer la recherche sur les ressources en eau sur la Lune, une question clé alors que les États-Unis et la Chine comptent à terme y installer des bases habitées.

La présence de glace d'eau a été démontrée au fond de cratères dans les régions polaires de la Lune, lesquelles par conséquent attirent désormais toutes les attentions.

Un défi permanent

Le succès de la mission Slim permettrait au Japon « d'afficher sa présence » dans le domaine spatial, rappelle aussi Morota. Plus de 50 ans après les premiers pas de l'homme sur la Lune, par les Américains en 1969, celle-ci est redevenue l'objet d'une course mondiale, dans laquelle la rivalité entre les États-Unis et la Chine occupe un rôle central.

Mais de nombreux autres pays et sociétés privées s'y intéressent également, comme la Russie, qui rêve de renouer avec la gloire spatiale de l'URSS, en s'associant notamment avec la Chine ou l'Inde, qui a réussi, l'été dernier, son premier alunissage.

Les deux premières tentatives d'alunissage du Japon ont, elles, mal tourné. En 2022, une mini-sonde de la Jaxa, Omotenashi (« hospitalité » en japonais), qui était embarquée à bord de la mission américaine Artémis 1, a connu une défaillance fatale de ses batteries peu après son éjection dans l'espace. Et en avril 2023, un alunisseur de la jeune entreprise privée japonaise

Ispace s'est écrasé à la surface de la Lune, ayant échoué l'étape de la descente en douceur.

LE CIEL DU MOIS DE FEVRIER

Sommaire:
Edito

Le ciel du mois de

février

Essaims, étoiles filantes,

- Planètes
- La Lune
- Carte du ciel
- Les météorites
- **Biographie de : Jules Janssen**

• Constellation : Orion

• Légendes : Orion

Le saviez-vous ?

Enigmes

La Voie Lactée

- Lire, voir, sortir

2024 02 02 05:00 Mercure à son aphélie (distance au Soleil = 0,46670 UA)

2024 02 02 11:18 DERNIER QUARTIER DE LA LUNE

2024 02 05 02:04 Rapprochement entre Mercure et Pluton (dist. topocentrique centre à centre = 1,3°)

2024 02 07 08:52 Rapprochement entre la Lune et Vénus (dist. topocentrique centre à centre = 4,9°)

2024 02 07 17:46 Rapprochement entre la Lune et Mars (dist. topocentrique centre à centre = 4,5°)

2024 02 07 23:38 Pluie d'étoiles filantes : Alpha Centaurides (6 météores/heure au zénith; durée = 25,0 jours)

2024 02 08 05:06 Rapprochement entre la Lune et Pluton (dist. topocentrique centre à centre = 1,9°)

2024 02 08 11:08 Rapprochement entre la Lune et Mercure (dist. topocentrique centre à centre = 2,7°)

2024 02 09 10:59 NOUVELLE LUNE

2024 02 10 06:49 Lune au périgée (distance géoc. = 358088 km)

2024 02 10 13:26 Rapprochement entre la Lune et Saturne (dist. topocentrique centre à centre = 1,5°)

2024 02 11 17:55 Rapprochement entre la Lune et Neptune (dist. topocentrique centre à centre = 1,0°)

2024 02 13 18:37 Rapprochement entre Mars et Pluton (dist. topocentrique centre à centre = 1,9°)

2024 02 14 18:08 Rapprochement entre la Lune et Jupiter (dist. topocentrique centre à centre = 2,5°)

2024 02 15 14:17 Rapprochement entre la Lune et Uranus (dist. topocentrique centre à centre = $3,1^\circ$)

2024 02 16 03:01 PREMIER QUARTIER DE LA LUNE

20

2024 02 16 22:39 Rapprochement entre Vénus et Pluton (dist. topocentrique centre à centre = $2,7^\circ$)

2024 02 20 13:43 Rapprochement entre la Lune et Pollux (dist. topocentrique centre à centre = $1,6^\circ$)

2024 02 21 21:45 Rapprochement entre Vénus et Mars (dist. topocentrique centre à centre = $0,6^\circ$)

2024 02 23 17:01 Rapprochement entre la Lune et Régulus (dist. topocentrique centre à centre = $3,0^\circ$)

2024 02 24 00:30 PLEINE LUNE

2024 02 25 03:00 Lune à l'apogée (distance géoc. = 406312 km)

2024 02 27 10:04 Opposition de l'astéroïde 349 Dembowska avec le Soleil (dist. au Soleil = 3,120 UA; magn. = 10,3)

2024 02 27 20:42 CONJONCTION SUPÉRIEURE de Mercure avec le Soleil (dist. géoc. centre à centre = $1,8^\circ$)

2024 02 28 09:27 CONJONCTION entre Saturne et le Soleil (dist. géoc. centre à centre = $1,6^\circ$)

Etoiles filantes, essaims et comètes.

Alpha-Centaurides - ACE

Le radiant des alpha-Centaurides (ACE) est situé approximativement à 50 degrés au sud de Spica. Aussi, c'est un essaim visible dans l'hémisphère sud. Le taux horaire moyen (ZHR) est d'environ 5 météores par heure. De nombreux autres radiants sont actifs simultanément dans la constellation du Centaure, comme les beta-Centaurides ou les theta-Centaurides, mais l'essaim des alpha-Centaurides est de loin le plus actif. L'essaim est connu pour produire de nombreux bolides très brillants et colorés. Les météores sont très rapides, environ 56 km par seconde.

Bien qu'il soit possible que C. Hoffmeister ait observé cet essaim en 1938 en Afrique du Sud, l'histoire observationnelle de cet essaim commence essentiellement en 1969, si bien que les caractéristiques de l'essaim des alpha-Centaurides est difficile à séparer de celui des beta-Centaurides.

La découverte de cet essaim pourrait être attribuée à M. Buhagiar, qui a obtenu des observations des deux radiants des Centaurides au cours de la période 1969-1980.

Période d'activité : du 28 Janvier au 21 Février

Maximum : 08 Février

Longitude solaire (λ) : 319.2°

position du radiant au moment du maximum

ascension droite (alpha) : 211° déclinaison (delta) : -59°

Vitesse (en km/s) : 56 r : 2.0 ZHR : 5

delta-Léonides - DLE

Le radiant des delta-Léonides (DLE) est très proche de l'étoile *theta Leonis* (Chertan). Le taux horaire moyen (ZHR) est de 2 au moment du maximum. La magnitude moyenne des météores est proche de 2.86.

La première observation d'un essaim en provenance de ce radiant apparaît dans les enregistrements de Denning pour l'année 1911. Des observations supplémentaires relatives à cet essaim météoritique ont été obtenues en 1924 et 1930. Les plus forts arguments en faveur de l'existence de l'essaim ont été la détection par photographie et par les méthodes d'écho-radio au cours des années 1950 et 1960.

Période d'activité : du 15 Février au 10 Mars
Maximum : 25 Février
Longitude solaire (λ) : 336°
position du radiant au moment du maximum
ascension droite (α) : 168°
déclinaison (δ) : $+16^\circ$
Vitesse (en km/s) : 23 r : 3.0 ZHR : 2

Visibilité des planètes

Mercure : pas visible (Sagittaire, Capricorne)

Vénus : se noie dans les lueurs de l'aube (Sagittaire, Capricorne)

Mars : pas visible (Sagittaire, Capricorne)

Jupiter : encore bien placé en début de nuit (Bélier)

Saturne : observable en début de nuit mais basse (Verseau)

Uranus : observable en première partie de nuit (Bélier)

Neptune : difficile à distinguer (Poissons).

Les planètes à l'échelle en février 2024

Nord céleste vers le haut.

Échelle 0" 10" 20" 30" 40" 50" 60"

Mercure

1^{er} février 14 février 29 février

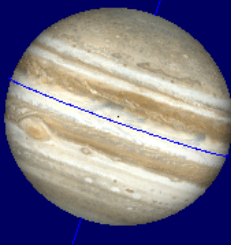
Mars

1^{er} février 14 février 29 février

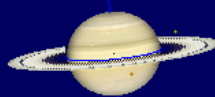
Vénus

1^{er} février 14 février 29 février

14 février



Jupiter



Saturne



Uranus

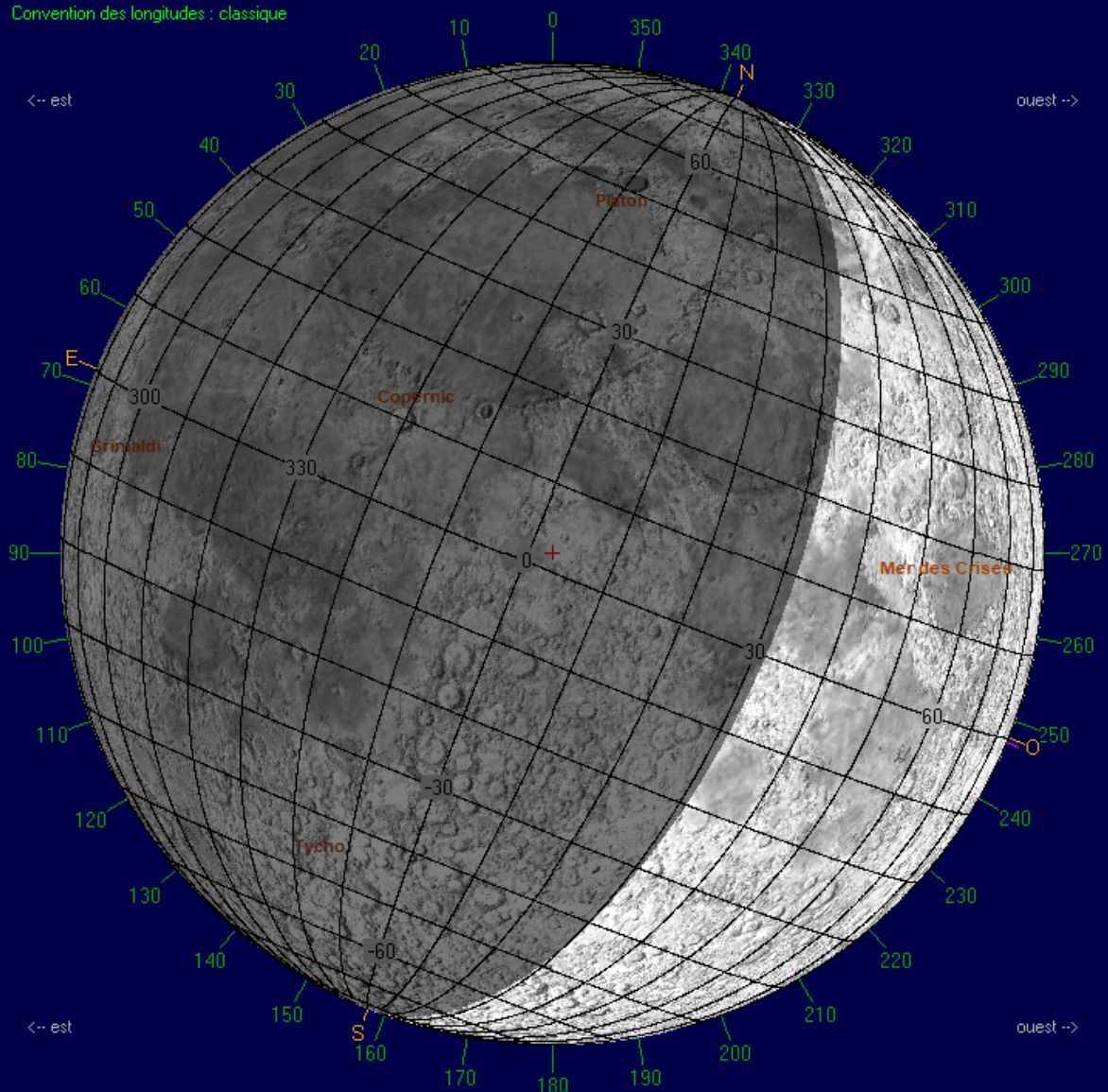


Neptune

Carte de la Lune (vue topocentrique)

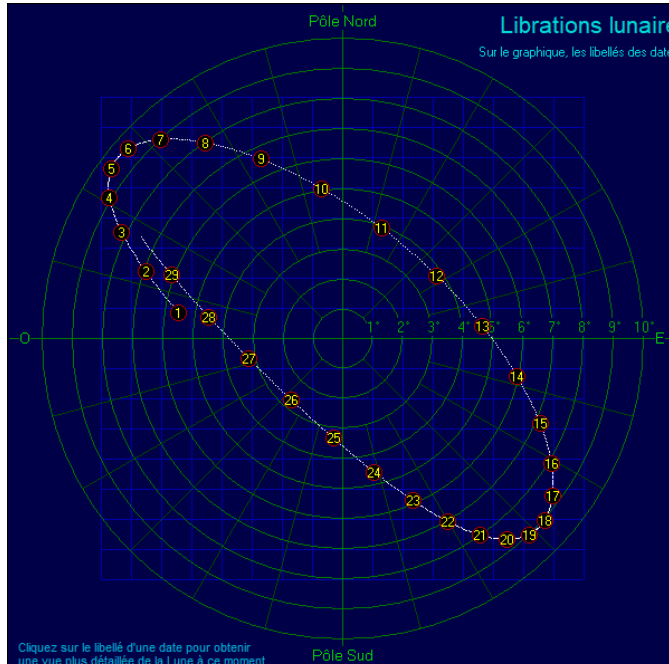
Angle de position du pôle Nord = 337,98°
 Angle de position du limbe éclairé = 247,43°
 Pourcentage d'illumination = 26,01%
 Convention des longitudes : classique

Longitude sélénographique du centre du disque = 2,74°
 Latitude sélénographique du centre du disque = 2,18°
 Longitude du terminateur du soleil levant = 31,37°

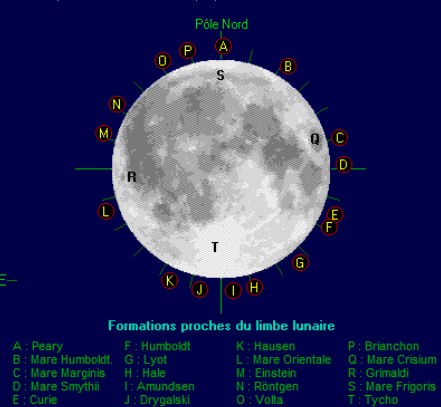


Librations lunaires géocentriques en février 2024

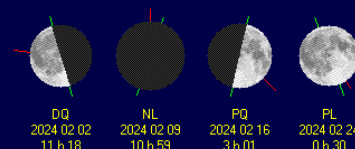
Sur le graphique, les libellés des dates correspondent au début de chaque jour, à 0 heure, heure normale.

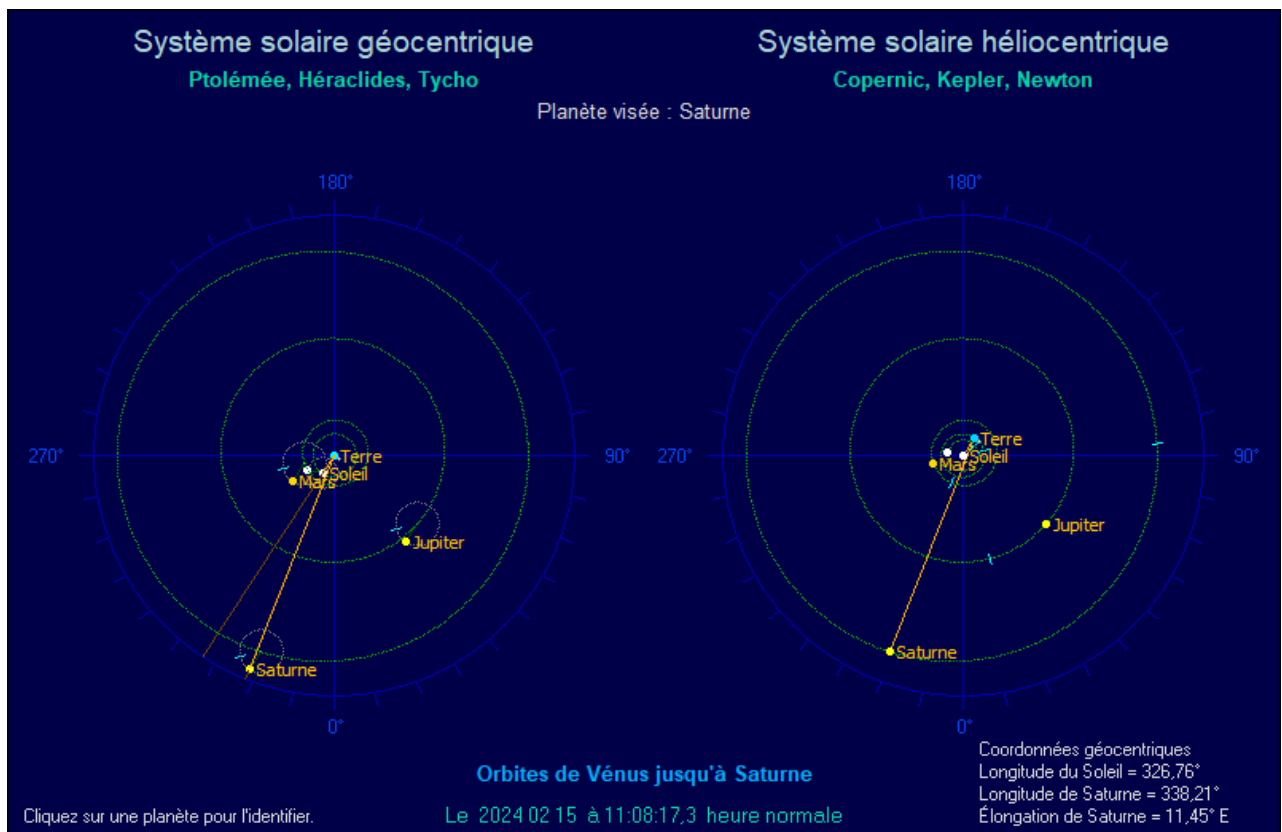
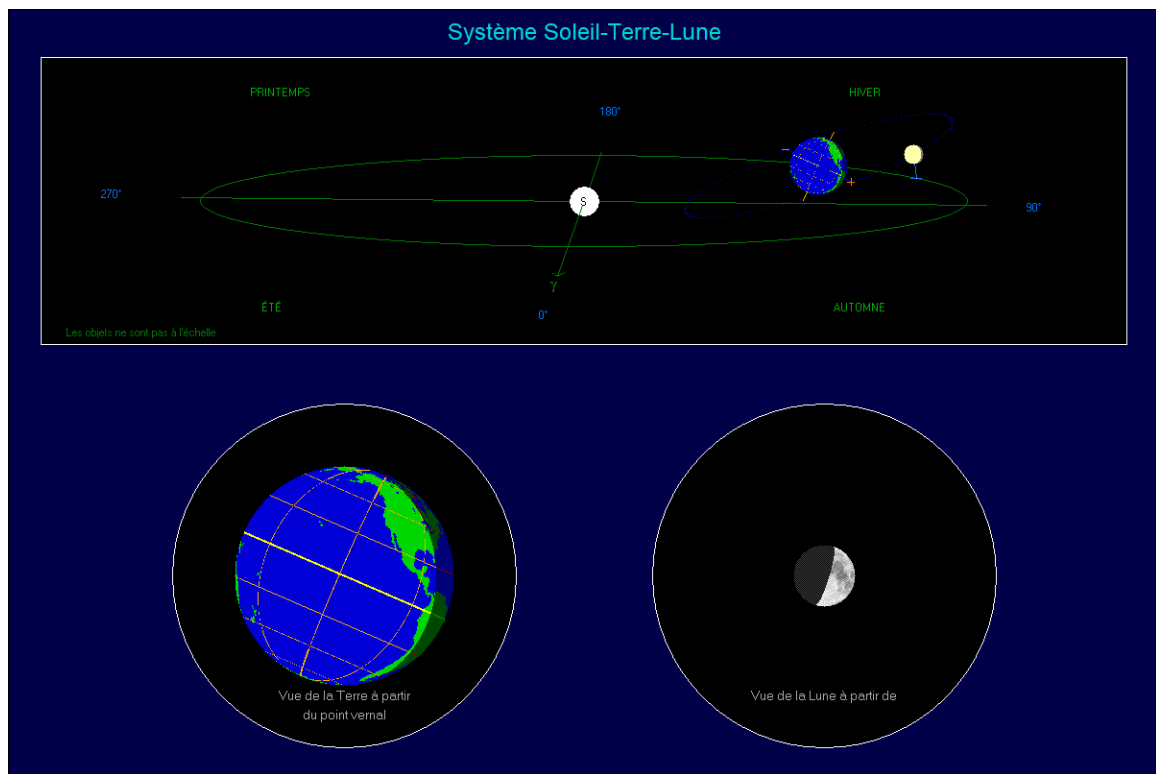


Cliquez sur le libellé d'une date pour obtenir une vue plus détaillée de la Lune à ce moment.

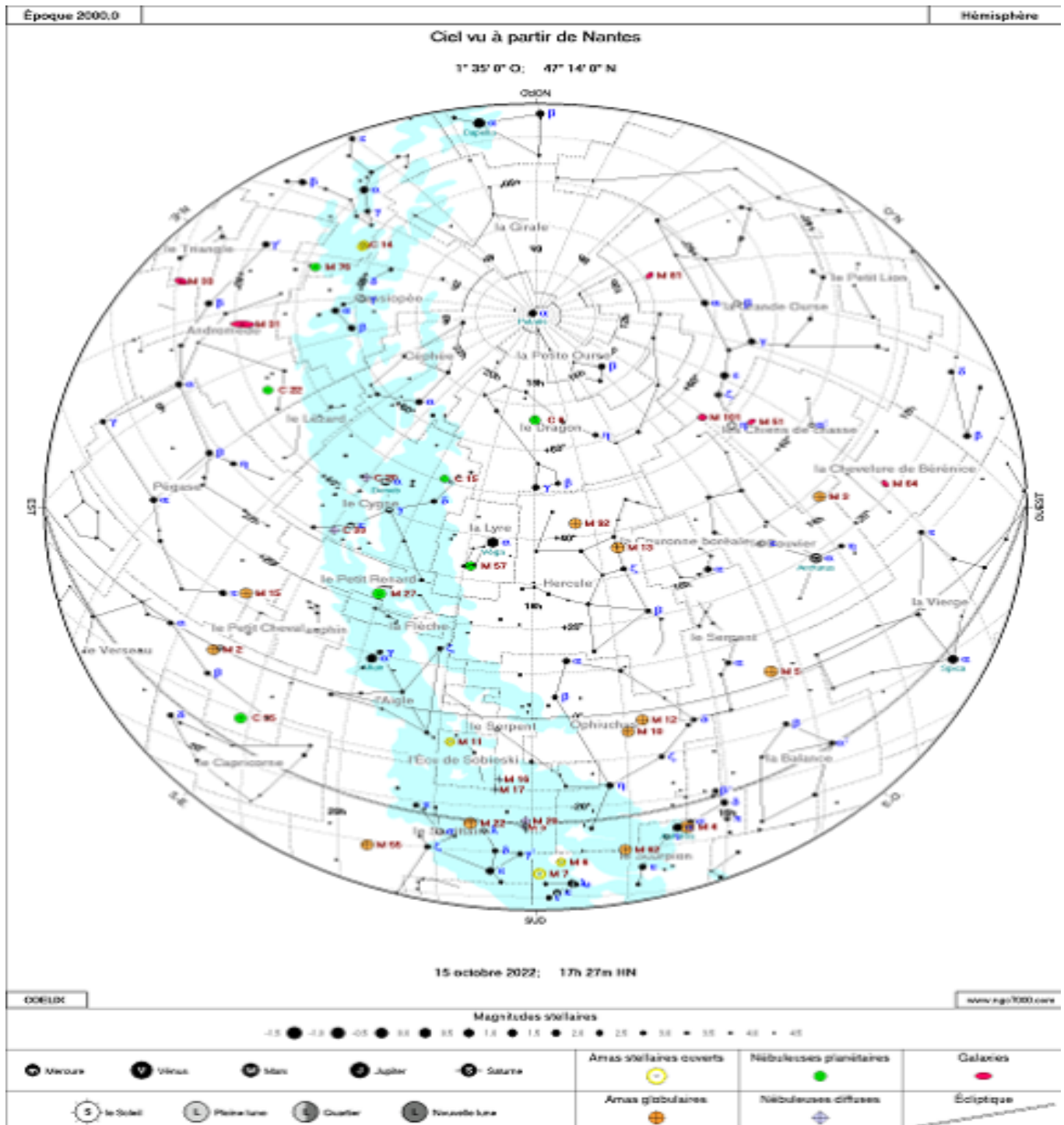


Phases lunaires durant le mois en heure normale





CARTE DU CIEL



Comment utiliser la carte du ciel : si par exemple vous observez vers l'ouest, tenez la carte devant vous en plaçant représentée à mi-distance du centre et du bord de la carte est donc à égale distance de l'horizon et du zénith.

Les Météorites

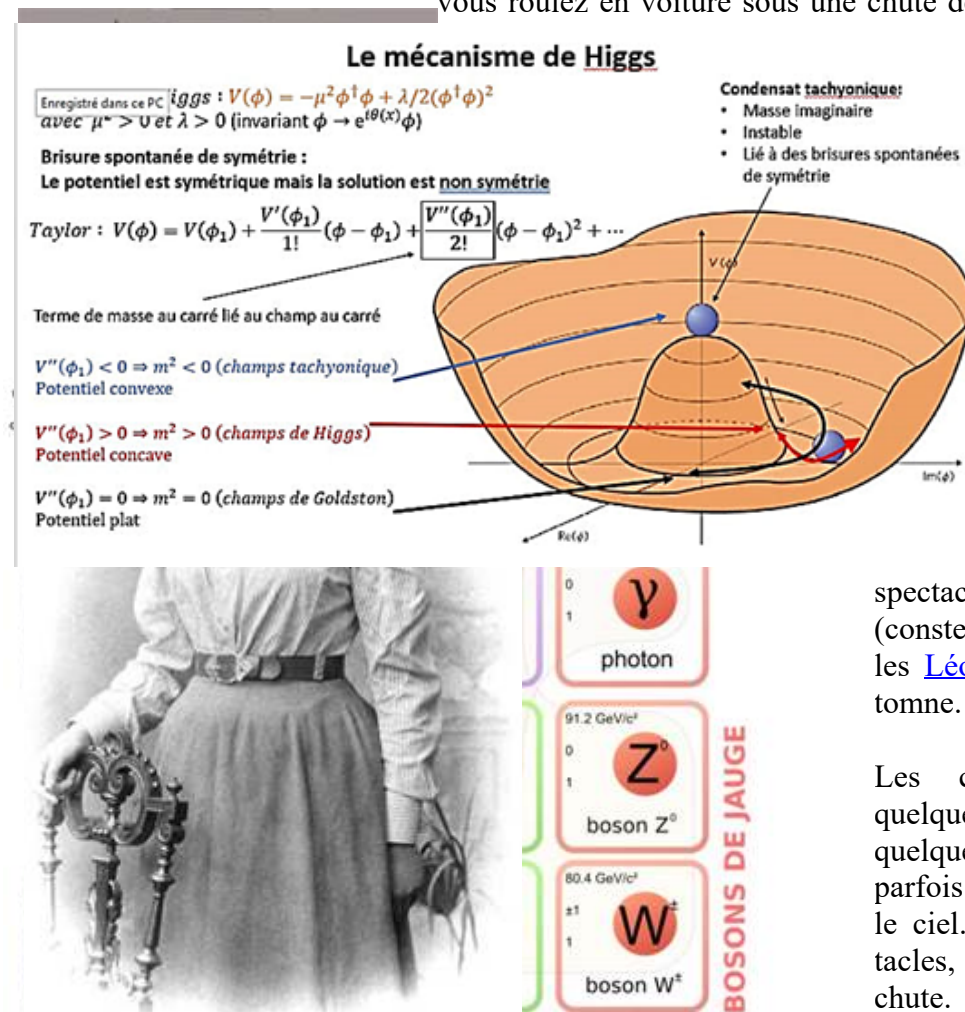
Tout d'abord, ce que l'on observe...

1.1 Les étoiles filantes

Les étoiles filantes ne sont pas des étoiles ! Ce sont de minuscules grains de poussières cosmiques, parfois de moins d'un gramme, qui tournent autour du Soleil sur des orbites semblables à celles des planètes, souvent orientées différemment. Alors, il arrive que la Terre rencontre une de ces poussières, qui tombe dans son atmosphère en produisant le phénomène lumineux que nous observons. La brièveté du phénomène est déterminée par la très grande vitesse à laquelle la météorite se précipite dans notre atmosphère.

Les poussières sont souvent groupées en essaims, et lorsque la Terre rencontre un tel essaim, on assiste à la chute d'un grand nombre d'étoiles filantes en peu de temps ; c'est ce qu'on appelle une *pluie d'étoiles filantes*. Ces pluies se reproduisent chaque année à date fixe, lorsque l'orbite de la Terre croise l'essaim.

Quand on observe une pluie, on a l'impression que toutes les étoiles filantes viennent de la même région du ciel. Ceci est un effet de perspective, exactement comme les deux rails d'une voie de chemin de fer semblent se rapprocher au loin, et provenir d'un même point. Vous avez aussi cette impression lorsque vous roulez en voiture sous une chute de neige : les flocons semblent venir du centre du pare-brise.



Le point du ciel d'où semblent provenir les étoiles filantes se nomme le *radian*, et il se trouve forcément dans une constellation (puisque celles-ci couvrent tout le ciel). On donne alors un nom à la pluie d'après la constellation dans laquelle se trouve le radian. Les plus spectaculaires sont les [Perséides](#) (constellation de Persée) en été, et les [Léonides](#) (dans le Lion) à l'automne.

Les corps plus gros, jusqu'à quelques centaines de grammes ou quelques kilogrammes, produisent parfois une traînée persistante dans le ciel. Ils donnent de beaux spectacles, mais sont détruits dans leur chute.

Les corps de taille supérieure parviennent jusqu'au sol, plus ou moins transformés. On les retrouve parfois : ce sont les *météorites*.

Dans l'imaginaire ancien, la Terre était le seul corps solide, de nature fondamentalement différente des objets célestes. Il ne pouvait pas y avoir de pierres dans le ciel, aussi toute observation de chute était forcément une erreur ! La première chute **reconnue** s'est produite à Ensisheim, en Alsace, le 7 novembre 1492, quelques semaines après la découverte de l'Amérique par Christophe Colomb. Elle a été observée par un trop grand nombre de personnes pour la nier.

1.2 Vocabulaire

Étoile filante : phénomène lumineux, produit par une poussière céleste qui tombe. Ce n'est pas l'incandescence de la poussière que l'on voit, mais **l'ionisation de l'air induite par la chute**. L'énergie dégagée par l'impact sur la haute atmosphère arrache des électrons aux atomes rencontrés, et les ionise ; lorsqu'un atome ionisé rencontre un électron libre (ce qui se produit très vite) ils se recombinent en produisant une raie d'émission particulière.

Météoride : petit corps du système solaire entre astéroïdes, plus grands, et la poussière interplanétaire.

Météore : un météore est un **phénomène atmosphérique quelconque** : la pluie, le vent, sont des météores. Il ne faut donc pas confondre météorite et météore ! La lumière émise par la chute d'une météorite est un météore, puisque c'est un phénomène lumineux atmosphérique

Météorite : les météorites sont les objets tombés au sol. Ils sont forcément assez gros pour ne pas se détruire lors de la traversée de l'atmosphère. Pendant sa chute, la météorite se manifeste comme un bolide.

Micrométéorite : à l'opposé des météorites de taille suffisante pour franchir l'atmosphère, les micrométéorites sont des poussières trop petites pour se consumer. Leur légèreté leur confère une énergie très faible, même si leur vitesse est grande. Elles arrivent à ralentir sur les hautes couches de l'atmosphère, puis tombent très lentement jusqu'au sol. Il en tombe en permanence partout sur Terre, mais la difficulté de distinguer ces poussières extraterrestres des autres est très grande. Il existe une source importante de micrométéorites dans les lacs de l'Arctique (Groënland) ou dans l'Antarctique. Les micrométéorites tombent sur la neige, sont entraînées vers le bas par la fusion, et finissent dans les creux où l'on peut les recueillir.

Bolide : objet plus gros, qui se brise dans son choc sur l'atmosphère. Il laisse une traînée persistante parce que l'énergie dégagée est bien plus importante.

.Chute On parle de chute lorsqu'on observe l'arrivée de la météorite. On en connaît donc la date.

Trouvaille La traversée de l'atmosphère par le météoroïde est si rapide, que la probabilité de l'observer est très faible. Pour la plupart des météorites, la chute n'est donc pas observée, et on s'en remet au hasard pour faire des découvertes. Lorsqu'on trouve une météorite par hasard, on parle de **trouvaille**.

Les trouvailles se font aisément dans le cas où le terrain est dénudé, car une météorite se voit aisément. C'est le cas des déserts chauds (Sahara ou autre), ou froid comme l'Antarctique. Dans ce dernier cas, on profite d'une situation exceptionnelle. Les météorites tombent sur la glace qui, comme les glaciers des Alpes, coule dans le sens de la pente. La météorite est donc entraînée dans ce mouvement, qui va s'arrêter parfois contre un *nunatak* (on nomme ainsi un sommet de montagne qui émerge seul de la glace). Les météorites se concentrent dans ces lieux, et il ne reste vraiment qu'à les ramasser... Il existe ainsi une ligne de collines dans l'Antarctique, nommée *Allan Hills*, où l'on a trouvé de nombreuses météorites (dont le nom est 'ALH', suivi de deux chiffres pour indiquer l'année de la découverte, et de trois chiffres pour le numéro de la découverte).

Si vous n'êtes pas convaincu qu'un météore n'est qu'un simple phénomène atmosphérique, pensez à la météorologie ! Comme son nom l'indique, c'est bien l'étude du vent, de la pluie, de la neige, des météores...

1.3 Les météorites

Les objets dont la taille est comprise entre quelques mètres et quelques dizaines de kilomètres apportent une énergie cinétique considérable (proportionnelle à la masse, et au carré de la vitesse). En percutant une planète (la Terre, la Lune ou autre), ils y creusent des cratères parfois immenses. Tous les cratères que l'on voit sur la Lune, même avec de simples jumelles, ont été produits par de tels impacts. Même les mers lunaires, ces bassins atteignant les 300 km de diamètre, ont été produites par des impacts ; l'énergie colossale mise en jeu a complètement fondu la croûte lunaire dans la zone du choc, et les roches fondues se sont répandues comme une véritable mer. Ensuite, rapidement, elles se sont refroidies et donc durcies. Ces chocs s'étant produits après l'intense bombardement météoritique des débuts du système solaire, il n'y avait plus beaucoup de météorites pour creuser de nouveaux cratères. C'est pourquoi le fond des mers lunaires apparaît relativement lisse.

1.4 Conditions de chute

La rentrée dans l'atmosphère est très rapide, car les météorites arrivent à une vitesse de l'ordre de 15 km/s, et n'ont que 100 km à parcourir depuis l'espace jusqu'au sol (voir [plus loin](#)). L'angle d'arrivée est aussi important. On a noté le cas d'une météorite qui est arrivée dans l'atmosphère sous un angle bien trop faible, et qui a ricoché : elle est repartie dans l'espace. Elle a eu chaud, mais elle ne perdait rien pour attendre. Après un petit tour autour du Soleil, elle a été attirée par la Terre, sur laquelle elle est retombée après un peu moins d'une orbite autour du Soleil ! Au cours de la chute, elle subit :

- **Freinage aérodynamique** - La pression de l'air exercée sur la météorite, produit une force de freinage, suffisante pour arrêter les micrométéorites, qui tombent ensuite en vol plané. Pour les objets assez gros, cette pression peut devenir supérieure à la force de cohésion de la météorite, qui éclate. Ceci se produit bien plus facilement pour les météorites pierreuses (chondrites et achondrites), que pour les ferreuses (sidérites) dont la cohésion est plus importante.
- **Echauffement** - Dans l'espace, la température du cœur d'une météorite avoisine 30 K (-243° C). Au moment de son entrée dans l'atmosphère, elle est fortement chauffée : sa température de surface atteint très brutalement plusieurs milliers de degrés. Deux cas se présentent :
 - si la météorite est pierreuse, la conductibilité thermique est faible, et la chaleur n'aura pas le temps de gagner le cœur. Les silicates constitutifs sont réfractaires, et résistent à la chaleur.
 - si elle est métallique, le métal fond en surface, et s'évapore. L'évaporation produit un refroidissement, qui compense le chauffage de friction. Ainsi, la température s'élève moins que celle d'une météorite pierreuse.

La chaleur n'ayant pas le temps de se répartir, le gradient de température produit des tensions mécaniques énormes, qui amènent souvent l'éclatement de la météorite (en plus de la pression). Mais elles ne sont pas toutes égales devant ce phénomène : les pierres conduisent moins bien la chaleur que les objets métalliques, et leur cohésion est plus faible. Aussi, les pierres explosent entre 30 km et 10 km d'altitude, alors que la fragmentation des météorites métalliques est plus rare, et si elle se produit, ce sera en général à basse altitude.

Les pierres peuvent arriver au sol, froides et lentement. On a noté l'exemple de la météorite de Pultusk en Pologne, qui est tombée sur la surface gelée d'un lac, sans casser ni fondre la glace !

Après la chute, la météorite est toujours aussi froide à l'intérieur, et se refroidit très vite en surface. Il peut arriver que de la glace se forme dessus, par condensation de la vapeur d'eau atmosphérique. Même si ceci n'est pas le cas, il faut prendre des précautions avant de toucher une météorite qui vient de tomber : on risque de se geler les doigts. Si une météorite tombe à vos pieds, ne vous précipitez pas pour la ramasser...

Dans leur traversée de l'atmosphère, les météorites perdent des plumes : on nomme *ablation* la perte de masse par la surface. On l'estime à 1 à 4 mm d'épaisseur par seconde de chute.

1.5 Origine des poussières et météorites

Les étoiles filantes, en particulier les pluies d'étoiles filantes (les poussières qui les produisent) proviennent en général des comètes (qui mélangent glaces et silicates). En se sublimant, la glace des comètes libère les poussières qu'elle contient, et ces poussières s'échappent car les comètes sont incapables de les retenir gravitationnellement. Elles constituent la queue de poussières. Elles continuent de tourner autour du Soleil, sur des orbites proches de celle de la comète. Lorsque la Terre vient traverser cette orbite, elle reçoit ces poussières sous la forme d'une pluie d'étoiles filantes.

Les météorites ne sont pas en général des débris de comètes. Pour comprendre d'où elles viennent, il faut considérer la formation du système solaire, il y a 5 milliards d'années. Un [chapitre](#) lui est consacré, auquel vous pouvez vous référer pour de plus amples détails.

Le processus d'accrétion, qui a formé les planètes à partir des poussières et des gaz du nuage primordial, n'a pas épuisé tous les petits corps qui circulaient autour du Soleil. En particulier, au-delà de l'orbite de Mars, l'attraction de Jupiter était trop forte pour permettre à une grosse planète de se former, mais pas assez pour attirer à elle tous les blocs qui y circulaient. Il est alors resté, entre Mars et Jupiter, des millions si ce n'est des milliards de blocs de tailles diverses, et dont les orbites étaient de même nature que celle des planètes : toutes à peu près dans le plan de l'écliptique, proches d'un cercle, et tournant dans le même sens que toutes les planètes. Ce sont les *astéroïdes* (du grec *aster*, astre, et *eidos*, forme). On les a parfois nommés *petites planètes*. L'ensemble de ces objets situés entre Mars et Jupiter est nommé *Ceinture des astéroïdes*, ou *Ceinture principale*.

Au fil des milliards d'années, les astéroïdes subissent des collisions, qui les fragmentent parfois. Les météorites sont, en général, soit des débris d'astéroïdes, soit de petits objets qui n'ont jamais atteint une taille importante. Quelques-unes, en particulier les micrométéorites, pourraient provenir de comètes. D'autres, nous le verrons plus loin, proviennent d'objets plus importants.

1.6 Chute d'une météorite

Pourquoi un caillou circulant entre Mars et Jupiter aurait-il la fantaisie soudaine de venir faire un tour sur Terre ?

On peut faire des calculs de mécanique céleste pour déterminer au bout de combien de temps les perturbations vont décrocher l'objet de son orbite calme, pour l'expédier chez nous. Le résultat est sans appel : bien plus longtemps que l'âge du système solaire. Conclusion : à part une ou deux exceptions, il est impossible de recevoir des cailloux de l'espace. Et pourtant...

La solution réside là encore dans le jeu des résonnances : on ne peut rien construire si on n'agit jamais deux fois de la même manière. Mais si un petit corps se retrouve toujours à peu près dans la même position lorsque Jupiter arrive dans les parages, la grosse planète le poussera toujours dans le même sens. Et l'accumulation des poussées au fil des orbites peut déformer la trajectoire au point d'expédier l'objet sous d'autres cieux.

C'est le principe de Quasimodo qui pousse la cloche lorsque celle-ci s'apprête à repartir dans l'autre

sens. C'est ainsi également que l'on pousse une balançoire... La poussée est en résonance avec la fréquence propre de la cloche, ou de la balançoire.

On a montré que le temps caractéristique pour une telle perturbation est de l'ordre de 10 millions d'années, ce qui est tout à fait compatible avec le taux de chute observé.

Pour résumer, on pense aujourd'hui que les météorites proviennent des comètes (micrométéorites essentiellement), des astéroïdes pour la plupart, de la Lune, Mars, ou Vesta pour un petit nombre d'entre elles.

Nous verrons plus loin qu'elles nous renseignent très probablement sur la constitution interne d'une planète.

1.7 Recensement

On recense quelques 40.000 météorites connues, comprenant seulement 1 085 chutes ! Et 27 000 parmi les trouvailles proviennent de l'Antarctique, soit 70 %. Ceci se justifie par les conditions de recherche sur la glace. Deux ont été trouvées sur la Lune par les équipages des missions Apollo : cratère Bench (Apollo 12, 1969) et Hadley Rille (Apollo 15, 1971).

Sur Mars, les rovers qui parcourent le sol ont trouvé plusieurs météorites :

- Opportunity sur Meridiani Planum
 - *Heat Shield Rock* en 2005
 - *Block Island, Shelter Island et Mackinac Island* en 2009
 - *Oileán Ruaidh* en 2010
- Spirit dans le cratère Gusev en 2006
 - *Allan Hills et Zhong Shan*
- Curiosity en 2014
 - *Lebanon*

Enfin, trois ont été trouvées au fond de l'océan Pacifique...

2 Formation des météorites

Les météorites sont donc des cailloux (mot que nous préciserons plus loin) qui viennent d'une région du système solaire où une planète n'a pas pu se former. Mais cependant, des astéroïdes de toutes tailles se sont constitués, par accréation de plus petits, pour former finalement les planètes. Certains ne sont pas parvenus à ce stade. Les moins importants, de petite masse, n'ont pu accumuler beaucoup de chaleur, et ont conservé leur structure originelle. Directement pour les plus petits, après fragmentation due à un choc pour les autres, ils ont produit des météorites qui viennent tomber sur la Terre.

Certaines de ces météorites sont des pierres (au sens usuel du terme), simplement recouvertes d'une couche noirâtre et vitreuse produite par la fusion superficielle en traversant l'atmosphère de la Terre. Elles ont été nommées *aérolithes* (nom masculin, du grec *aero* air, et *lithos* pierre), mais ce terme est peu usité aujourd'hui.

Dans les objets plus massifs, il y a eu *différenciation* par chauffage. La différenciation est la séparation gravitationnelle des matériaux dans un liquide, les plus lourds tombant au fond (vers le centre de la planète), les plus légers surnageant à la surface. C'est ainsi que les gaz, et plus généralement tous les volatils, s'échappent de la surface de la planète et ont produit dans le passé les atmosphères. Aujourd'hui encore, ce dégazage se manifeste dans les volcans et les zones alentours.

On distingue donc tout d'abord les météorites différenciées et les météorites non différenciées.

2.1 Météorites non différenciées : chondrites

Certaines météorites sont **les objets les plus primitifs que l'on connaisse**. A l'examen, ils montrent de petits globules millimétriques clairs, nommés *chondres* (nom masculin, du grec *chondrion*, qui signifie grain). On les appelle donc *chondrites* (nom féminin). On pense que ces globules se trouvaient dans le nuage au moment de la formation du système solaire, et qu'ils viennent de très loin : ils auraient été produits par l'explosion d'une supernova.

Les chondrites se sont agglomérées à basse température, assez loin du Soleil, dans un corps parent trop peu massif pour s'échauffer et se transformer. La chimie est peu active à cause du froid qui règne dans ces régions, et ils n'ont donc pas évolué depuis leur formation. Leur composition est très proche de celle de l'atmosphère du Soleil (donc de la nébuleuse primitive), sauf pour les éléments les plus volatils qui y sont moins abondants. Ce sont des témoins de la naissance du système solaire.

Leur constitution se présente ainsi :

- *Chondres* : globules millimétriques (0,1 à 2 mm, rarement plus gros), grossièrement sphériques, d'aspect vitreux, probablement formés par des gouttelettes refroidies. On n'en trouve dans aucun des matériaux terrestres, et ils sont une signature pour certaines météorites. Ce sont des minéraux ignés, qui ont subi une forte élévation de température (paradoxe, on les trouve dans des objets qui n'ont pas été chauffés...). Leurs propriétés minéralogiques impliquent qu'ils se sont refroidis très rapidement, passant de 1.500 ou même 1.900 K à la température de l'espace en une dizaine de minutes, au plus quelques heures (ceci est confirmé par des expériences de laboratoire). Les chondres constituent jusqu'à 80 % d'une chondrite.
- *Matrice* : les chondres sont agglutinés par un ciment sombre à grain fin, la matrice, constituée de minuscules grains d'olivine, de pyroxène, de sulfures, d'oxydes, de feldspathoïdes et de graphite. On y trouve des poussières interstellaires. Après formation, la matrice a été légèrement refondue, probablement par chauffage lié à la désintégration de l'aluminium 26. Ceci a produit une sorte de métamorphisme des chondrites.
- *Inclusions réfractaires* : ce sont d'autres inclusions figurant dans la matrice des chondrites. On les nomme poétiquement CAI (Ca Al Inclusions), car elles sont constituées de grains clairs très riches en calcium et aluminium. On les trouve presque exclusivement dans la sous-classe de chondrites que l'on appelle chondrites carbonées.

Les chondrites carbonées sont des chondrites contenant 5 % de matière organique riche en carbone. Certains minéraux des chondrites carbonées sont anormaux (par rapport aux minéraux semblables sur Terre) : leurs cristaux ont des atomes de magnésium 26 à la place de l'aluminium. Or l'aluminium 26 est radioactif, et décroît en magnésium 26 avec une période de 720.000 ans. Si on considère que ces minéraux se sont formés normalement, avec Al et non Mg, il faut envisager qu'il y avait à l'époque de leur formation assez de ^{26}Al présent. Puisque sa période est très courte, il venait de se former (bien moins que 5 millions d'années, puisqu'après 5 millions d'années il n'en reste pratiquement plus).

Comment l'aluminium 26 se forme-t-il ? Bien sûr par des réactions nucléaires, soit à l'intérieur des étoiles, soit dans l'explosion d'une supernova. S'il s'est formé dans une étoile, il y est resté assez longtemps pour se transformer en ^{26}Mg . Il ne reste donc que l'hypothèse de la supernova qui aurait explosé non loin du nuage d'hydrogène et d'hélium protosolaire. Elle a rejeté dans l'espace de l'aluminium ^{26}Al , qui a constitué des minéraux puis des grains. L'enveloppe de la supernova est venue à grande vitesse percuter le nuage protosolaire, en le contaminant et en produisant une onde de choc. Il est probable que cette onde de choc ait amorcé l'effondrement gravitationnel du nuage à l'origine du système solaire.

2.2 Différenciation

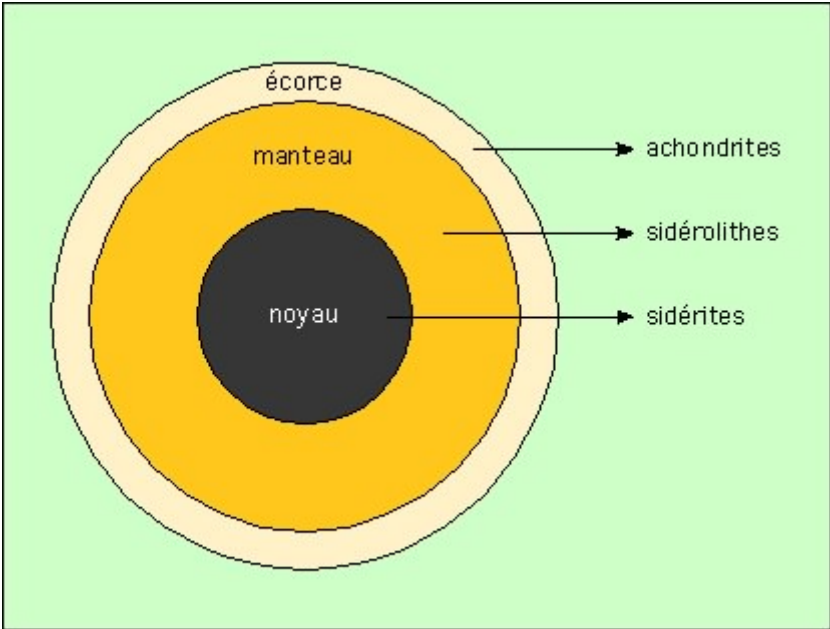
Les éléments lourds synthétisés dans l'explosion de cette supernova (par des réactions nucléaires différentes de celles qui se produisent dans les étoiles), sont projetés au loin. A une distance suffisante de

l'explosion, la température est assez basse pour que les atomes puissent se combiner en molécules, puis ces molécules en grains. Ces grains, après un voyage spatial assez long, sont arrivés dans le nuage qui allait se contracter pour former notre système solaire. Lorsque les planétésimaux se sont formés, ils ont aggloméré ces grains. Ce sont les chondres qu'on trouve dans certaines météorites.

Les plus gros astéroïdes ont été suffisamment massifs pour atteindre la température de fusion (par accré- tion et radioactivité). Le processus de différenciation s'est alors déroulé, amenant les éléments lourds, fer et nickel, au centre, les silicates légers en surface. Dans la zone intermédiaire, un mélange des deux a subsisté. Puis, l'objet s'est refroidi et solidifié. Si un objet de cette taille est tombé sur la Terre, il a dû produire un cataclysme extraordinaire. Mais la Terre n'en a pas gardé la trace, à cause de l'érosion sous toutes ses formes (la Lune provient probablement d'un tel impact gigantesque). Certains de ces asté- roïdes ont dû, eux aussi, subir des chocs. Supposons que deux astéroïdes de quelques centaines de kilo- mètres de diamètre (donc différenciés) se soient heurtés, assez violemment pour les briser. Des fragments provenant de chaque partie ont été projetés dans l'espace, sur de nouvelles orbites. Les morceaux prove- nant du noyau sont constitués d'un alliage de fer et de nickel pratiquement pur. Ceux provenant de la zone intermédiaire contiennent à la fois du fer-nickel et des silicates (mélange dans la zone la plus pro- fonde, silicates purs plus haut). Enfin, ceux provenant de la croûte de l'astéroïde ne contiennent que des silicates.

On trouve effectivement toutes ces sortes de météorites :

- celles qui ne contiennent pas de silicates (fer-nickel pur) provenant du noyau sont nommées *sidérites* (nom féminin, du grec *sideros* = fer) ;
- les mixtes provenant du manteau sont appelées *sidérolithes* (nom féminin, du grec *sideros* = fer + *li- thos* = pierre).
- celles provenant de la surface ressemblent un peu aux chondrites, mais ne contiennent pas de chondres : s'il y en avait, ils ont été détruits par la chaleur. Ces météorites sont nommées *achon- drites* (nom féminin, grec *a* = privatif).



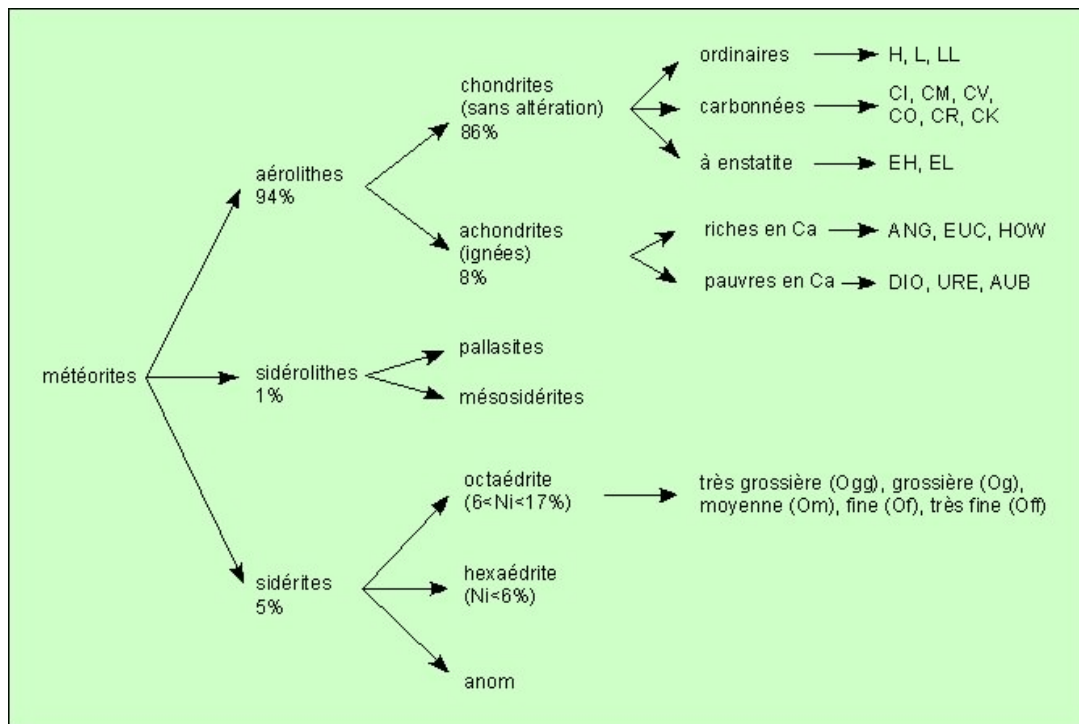
météorite	type	composition	provenance
différenciées	sidérites	métalliques	noyau
	sidérolithes	mixtes	manteau profond
	achondrites	pierreuses	manteau sup. et écorce
non différenciées	chondrites	pierreuses	petits corps

Les météorites sont donc une source de renseignements irremplaçable pour la connaissance des conditions qui prévalaient dans notre système lors de sa formation, et même sur la physique des explosions d'étoiles (par les matériaux radioactifs désintégrés).

Après cette description globale, nous allons examiner en détail chaque type de météorites, et ses caractéristiques.

2.3 Classement

Le graphe ci-dessous donne un classement simplifié des météorites. Les termes qui y apparaissent seront définis plus bas.



Ici, aérolithe est synonyme de météorite pierreuse.

3 Catalogue

3.1 Chondrites

Les chondrites sont classées selon des critères minéralogiques. On distingue tout d'abord les *clans*, qui regroupent les objets ayant des compositions minéralogiques proches, donc probablement issus de la même zone dans le système solaire. Ensuite, dans chaque clan, on distingue les objets ayant des propriétés vraiment semblables, à tel point que les membres d'un groupe doivent provenir d'un même corps parent. Les clans n'ont pas tous la même importance, celui des chondrites ordinaires est de loin le plus nombreux, et son nom vient de là. La liste ci-dessous donne les clans, et les groupes à l'intérieur de chaque clan :

- *chondrite ordinaire* : le clan des plus courantes. On les subdivise selon leur teneur en fer par rapport à leur teneur en silicium, et on les désigne à l'aide d'une lettre :
 - **H** : (High) contenant beaucoup de fer oxydé ;
 - **L** : (Low) contenant peu de fer oxydé ;
 - **LL** : (Low Low) très peu de fer oxydé.
- *chondrite carbonnée* : le clan des plus riches en éléments volatils, et contenant quelques pour cent de carbone. Leur composition est la plus proche de celle du Soleil ;

- **CI** : ne contiennent pas de chondres ! Le 'I' signifie Ivuna en Tanzanie, où a eu lieu la chute représentative du groupe ;
- **CM** : pour Mighei, Ukraine ;
- **CO** : pour Ornans, France ;
- **CR** : pour Renazzo, en Italie ;
- **CK** : pour Karoonda en Australie ;
- **CV** : pour Vigarano en Italie, celles contenant le plus de CAIs.
- *chondrite à enstatite* : clan des météorites contenant ce minéral (MgSiO_3) :
 - **EH** : (High) chondrite à enstatite, à fort taux de fer ;
 - **EL** : (Low) idem, contenant peu de fer ;
- *chondrite Rumuruti* : clan ne comprenant qu'un seul groupe R, car toutes les météorites lui appartenant ont la même composition ; elles proviennent de Rumuruti ;
- *chondrite Kakangari*, un seul groupe K, la provenance étant Kakangari, en Inde.

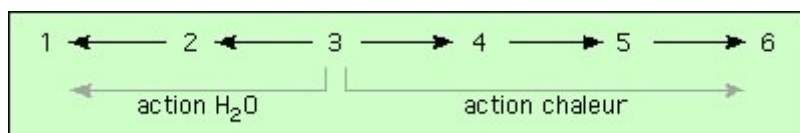
Les chondrites ont parfois été transformées dans un corps parent trop petit pour être différencié (sinon ce ne seraient plus des chondrites). Les modifications peuvent venir de divers mécanismes :

- **métamorphisme**, si la chaleur a été suffisante (la masse du corps parent assez élevée, mais pas pour le fondre totalement) ;
- **choc** entre des planétésimaux ;
- **formation de brèches** (brisure de l'objet par choc, puis réassemblage gravitationnel de l'objet et solidification) ;
- **réactions chimiques**, le plus souvent en présence d'eau.

Les chondrites forment une famille dans laquelle la taille du corps parent a décidé de la constitution. Les plus petits donnent les météorites les plus primitives, car ils ont évacué très vite toute chaleur, et la température n'a pas pu monter. Leur composition est restée quasi-solaire (très proche de celle de la chromosphère).

La composition des chondrites montre par rapport à celle de la photosphère, un déficit en éléments volatils (H, He, N, C), et au contraire un enrichissement en Li et Be. Le déficit de volatils s'explique parce qu'ils sont gazeux (le carbone également dans les conditions qui régnaient alors). Et la surabondance en Li et Be se conçoit car ces éléments, très fragiles, sont détruits par les réactions nucléaires dans le soleil. Les autres éléments sont dans la même proportion, autant qu'on puisse en juger car les proportions dans le soleil sont déduites des raies spectrales, guère mieux que 40 % près. Dans ces conditions, on considère que la composition des chondrites est plus proche de la composition initiale du soleil, que ne l'est sa composition actuelle. Elle représente donc mieux les **abondances cosmiques**.

Les chondrites sont aussi numérotées, de 1 (beaucoup de volatils) à 6 (bien mélangées). Les chondrites 3 sont les mieux conservées et les plus représentatives de l'état de nébuleuse primitive. De 3 à 1, elles sont de plus en plus transformées par l'eau. Les types 1 ne présentent pas de chondres : soit il n'y en avait pas à la formation, soit ils ont été détruits par l'eau. De 3 à 6, les chondrites sont de plus en plus métamorphosées (elles ont subi une élévation de température de plus en plus forte).





Fragment d'une chondrite du Maroc, montrant sa croûte de fusion photo J. Gispert



La même chondrite, vue de la face coupée et polie, laissant apparaître les chondres photo J. Gispert

Le fragment de cette météorite a été coupé, de manière à mettre en évidence sa constitution interne. Sur cette photo, on voit les chondres, qui sont les petits globules ronds de couleur claire. D'autres inclusions claires, mais de forme irrégulière, sont les CAI (Calcium Aluminium Inclusions). Quelques petites zones grises sont des inclusions de fer-nickel, qui seront bien plus apparentes sur la photo ci-dessous, faite avec un éclairage différent :



Inclusions de Ni-Fe dans la même chondrite photo J. Gispert

3.2 Sidérites

Les météorites décrites à partir de là sont différenciées, contrairement aux chondrites qui sont primitives. Les sidérites participent pour 6 % de la totalité des chutes. Elles sont constituée majoritairement de fer, avec un petit pourcentage de nickel, et des traces d'autres éléments (iridium, chrome, gallium, germanium, carbone, phosphore...). Elles sont subdivisées en treize groupes, qui représentent 75 % d'entre elles. Mais il en reste 25 % qui ne peuvent être classées dans ces groupes, et qui sont joliment nommées *iranom*, pour *iron anomalous*.

Le pourcentage de nickel est supérieur à 5 % dans toutes les sidérites. Dans la majorité d'entre elles, il est compris entre 6 et 10 %. Les sidérites contenant davantage de nickel sont très rares.

Selon le pourcentage de nickel, on distingue trois alliages différents des deux métaux, qui présentent des structures cristallines différentes :

- la *kamacite*, à structure cristalline cubique centrée, contenant de 4 à 7,5 % de nickel ;
- la *taénite*, à structure cristalline cubique à faces centrées ;
- la *tétraénite*, à structure tétraédrique, qui contient plus de 50 % de nickel.

La tétraénite est rare, et les sidérites normales sont des mélanges de kamacite et de taénite. La cristallisation de ces deux alliages étant différente, et se produisant à des températures différentes, il existe dans la sidérite un entrelac de cristaux de chaque espèce. Pour les mettre en évidence, on pratique de la manière suivante :

on coupe une tranche de la sidérite ; on la polit ; on l'attaque par un mélange acide (opération dangereuse sans grandes précautions, surtout à cause des projections possibles dans les yeux) qui attaque plus fortement l'une des deux formes cristallines. Cette opération met en évidence les deux sortes de cristallisations, en produisant un dessin caractéristique nommé *figures de Widmanstätten*, du nom de la personne qui les a découvertes :

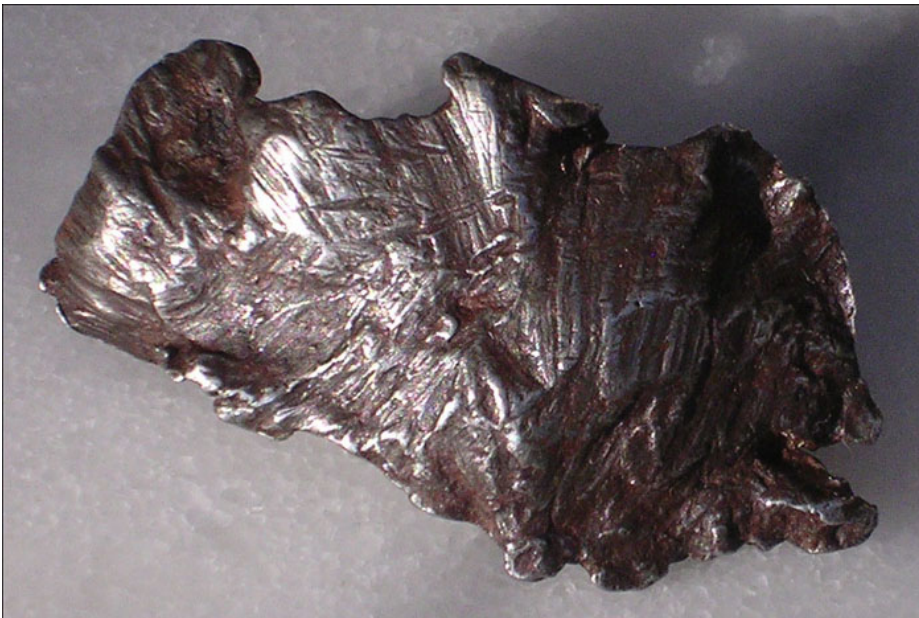


Sidérite de Gibéon (octaédrite IV A), montrant les figures de Widmanstätten photo J. Gispert

Les bandes sont formées de taénite, et elles englobent des plages de kamacite.

Cette météorite fait partie de la plus importante chute connue, découverte en 1836 en Namibie. Les objets recouvrent une surface elliptique de 275×100 km, centrée sur Brukkaros, et la plus grande densité de météorites se trouve à Gibéon. Elle provient très probablement d'un objet de $4 \times 4 \times 1,5$ mètres, arrivant très incliné par rapport au sol, et qui s'est fragmenté à haute altitude. Les fragments ont ainsi eu le temps de fondre en surface par frottement sur l'air, et de se recouvrir eux-mêmes d'une croûte de fusion.

Cette météorite est constituée presque exclusivement de taénite et de kamacite. Outre le fer qui est de loin le constituant principal, elle contient 8 % de nickel, 0,5 % de cobalt, 0,04 % de phosphore, et des traces de quelques autres éléments.



Sidérite de Sikhote-Alin (Sibérie) tombée le 12/02/1947 photo J. Gispert

Cet échantillon de Sikhote-Alin montre la surface d'abrasion. La traînée laissée par la chute de cette météorite a été plus brillante que le Soleil pendant plusieurs minutes. Le plus gros fragment est exposé à Moscou, il pèse 1.745 kg, et a creusé un cratère de 26 m de diamètre. La météorite s'est fragmentée à 10.000 m d'altitude. La masse totale récupérée dépasse les vingt tonnes.

Les sidérites sont classées selon :

- **les hexaédrites** : leur teneur en nickel est comprise entre 5 et 6 %. La maille cristalline élémentaire est cubique (hexaèdre).
- **les octaédrites** : les plus nombreuses, elles sont caractérisées par une faible teneur en nickel, de 7 à 15 %.
- **les ataxites** : leur teneur en nickel est très forte, dépassant les 16 %, et allant exceptionnellement jusqu'à 60 %. Les cristaux sont beaucoup plus petits, et les figures de Widmanstätten ne sont plus visibles qu'au microscope.

3.3 Sidérolithes

Les sidérolithes contribuent pour 1 % de toutes les chutes de météorites. Elles sont donc relativement rares. Leur nom (grec *sidéros* = fer, *lithos* = pierre) donne une très bonne indication sur leur composition.

On les subdivise en deux sous-classes bien distinctes :

- les *pallasites* (proches des sidérites) : matrice de ferro-nickel enchassant de beaux cristaux d'olivine, millimétriques à centimétriques, jaunes à verts. Elles sont nommées d'après Pallas, naturaliste allemand, qui a étudié en 1775 une météorite tombée à Krasnojarsk en Russie.
- les *mésosidérites* (proches des achondrites) : mélanges de ferro-nickel et de silicates en parties égales, semblables aux eucrites. Les silicates se partagent en *pyroxène* (silicates contenant le radical SiO_3) et *plagioclase* (mélange de minéraux en proportions variables d'*albite* $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ et d'*anorthite* $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$). Les proportions de fer-nickel et de silicates font qu'ici le métal constitue des inclusions dans les silicates, à l'inverse des pallasites.

Leur formation nécessite la présence d'un alliage de ferro-nickel, et d'olivine, les deux fondus. Ceci se trouve réalisé à l'interface entre le noyau et le manteau d'un corps différencié. La proportion de métaux et de silicates varie avec la profondeur, les pallasites s'étant formées plus profondément que les mésosidérites.



Tranche de la pallasite *Brahin*, près de Gomel, Biélorussie trouvée en 1810 photo J. Gispert

Cette météorite est une sidérolithe, variété pallasite. Elle montre des cristaux d'olivine jaune-verte, pris dans une matrice métallique constituée de fer et de nickel. Elle provient du manteau inférieur d'un astéroïde déjà différencié, qui a dû être brisé par un choc très violent, lors de la rencontre avec un autre astéroïde.



La même tranche vue en transparence photo J. Gispert



Fragment de la météorite Imilac photo J. Gispert

La météorite Imilac est une autre pallasite, provenant du désert d'Atacama au Chili. Le fragment présenté ici n'est pas coupé, et montre sa croûte. Il faut toutefois remarquer que la chute est ancienne, et la surface bien érodée.

Les fragments de cette météorite ont été trouvés en 1822, et le poids total est évalué à 920 kg. Elle a creusé un petit cratère.

3.4 Achondrites

Achondrite est formé à partir du préfixe grec *a* privatif, et sa signification est "sans chondres". Ce sont donc des météorites pierreuses, essentiellement constituées de silicates, et ne montrant pas de chondres. Ceux-ci étant relativement sensibles à la chaleur, on en déduit que ces roches ont été chauffées, ce qui explique leur disparition. Ceci est attesté aussi par la texture de la météorite, et pas sa composition minéralogique qui sont proches de celles des magmas terrestres.

Les chondrites apparaissent comme des météorites primitives, non altérées, alors que les achondrites ont subi des transformations physico-chimiques. Ce nom a été donné par Brezina à Vienne en 1895.

Les achondrites sont pauvres en métal, fer et nickel, et plus riches en éléments volatils. Or elles ont été constituées à partir des mêmes matériaux que les chondrites. Pour expliquer ces caractéristiques -chauffage, élimination des éléments lourds-, on invoque la différenciation qui se produit dans une planète en formation, chauffée par énergie gravitationnelle et radioactivité. Les achondrites sont donc les fragments de l'écorce, ne contenant guère que des silicates, d'une petite planète déjà différenciée. Les sidérolithes et les sidérites leurs sont associées pour la formation : elles proviennent des autres parties d'une planète différenciée et brisée.

On distingue les :

- *achondrites riches en calcium*, qui contiennent plus de 5 % de calcium sous forme d'oxyde. Le minéral dominant est le plagioclase calcique. Elles comprennent trois clans :
 - les *angrites* ANG riches en pyroxène calcique ;
 - les *eucrites* EUC ;
 - les *howardites* HOW ;
- *achondrites pauvres en calcium*, contenant moins de 3 % de calcium :
 - les *diogénites* DIO ;
 - les *ureilites* URE ;
 - les *aubrites* AUB.

Certaines achondrites montrent une provenance particulière, hors de la ceinture des astéroïdes et des comètes :

- les météorites lunaires ;
- les météorites martiennes (groupe *SNC*) ;
- les météorites de Vesta (groupe *HED* pour Howardites, Eucrites, Diogénites).

Les eucrites sont nommées à partir du grec *eukritos*, signifiant *facile à distinguer*. Ce sont des basaltes provenant de la croûte de leur corps-parent Vesta. Certaines sont des brèches, c'est-à-dire des fragments ressoudés. La fragmentation est due à de nombreux impacts relativement doux, alors que le collage s'est produit à la suite d'un impact plus violent qui a fondu partiellement ces roches.

Les diogénites tirent leur nom de Diogène (5^e siècle avant JC, celui du tonneau...), qui a été le premier, dans l'Antiquité, à comprendre que les météorites sont des pierres tombées du ciel. Dommage qu'on ait colporté le contraire pendant deux mille ans après lui ! Les diogénites sont, comme les eucrites, des roches magmatiques, mais le grain grossier (gros cristaux) qu'elles présentent montre un temps de refroidissement bien plus long. Elles se sont donc formées dans les chambres magmatiques, sous la croûte de Vesta. La plus représentative est la météorite de Tataouine.

Les howardites enfin, sont un peu le mélange des deux précédents groupes. Ce sont des brèches *polymictes* (plusieurs origines). Elles se sont formées à la suite d'un impact assez violent pour mélanger des fragments de la croûte à des morceaux provenant d'une chambre magmatique profonde. La chaleur dégagée par l'impact a ensuite produit de la lave qui a ressoudé ces morceaux. Ces météorites sont rares.

Ces achondrites ont été arrachées par un impact violent à la croûte d'une planète déjà différenciée. La

faible vitesse de libération des planètes concernées, et la vitesse à laquelle un astéroïde a pu les heurter, permettent tout à fait d'expédier dans l'espace proche des cailloux arrachés à la croûte. Le scénario est le suivant : la petite planète s'est différenciée après sa formation, constituant un noyau, un manteau et une croûte. Puis un impact violent a arraché une partie de la croûte, qui a atteint la vitesse de libération de la petite planète, et s'est donc mis en orbite autour du Soleil. Par la suite, les perturbations planétaires ont modifié l'orbite de ces fragments, les amenant finalement à rencontrer la Terre.

Les météorites lunaires ont été trouvées dans l'Antarctique (faciles à voir sur la glace, et profitant des mouvements de cette glace pour se concentrer contre des collines). On en possède une trentaine. Pour celles-là, nous avons la possibilité de comparer avec les roches lunaires ramenées par les missions Apollo, et de vérifier une proximité minéralogique très serrée. Certaines sont constituées de brèches basaltiques. En particulier, la météorite Dhofar 461 est une brèche d'impact formée à la suite d'un impact violent sur la Lune, dont les débris se sont consolidés au fil du temps. Plus tard, un second impact l'a projetée dans l'espace, avant qu'elle finisse par tomber sur la Terre. Son origine se trouve très probablement dans les terres hautes de la Lune, qui sont très anciennes et ont donc subi de très nombreux impacts. D'autres météorites lunaires ont une composition basaltique, et proviennent des mers.

Les météorites martiennes proviennent essentiellement de trois chutes, Shergotty (Inde), Nakhla (Égypte), et Chassigny (France). Pour cette raison, on les désigne par le sigle SNC. Ce sont des pierres, mais par rapport aux météorites banales (!), elles sont plus jeunes, n'ayant que 1,3 milliards d'années (âge déterminé par l'analyse des cristaux). On a déterminé par ailleurs qu'elles ont subi un choc violent il y a 200 millions d'années.

Il n'est pas possible de déterminer d'où elles viennent par la balistique. Aussi, c'est l'analyse de ce qu'elles contiennent qui permet de trancher. Dans leurs cristaux, on trouve de minuscules bulles de gaz, dont l'analyse montre une très grande ressemblance chimique et isotopique avec l'atmosphère de Mars, qui a été analysée par des sondes sur place. En particulier, le point essentiel concerne les gaz rares, qui sont dans les mêmes proportions sur Mars et dans les SNC.

Signalons la SNC nommée ALH84001, qui a défrayé la chronique il y a quelques années. Elle a été trouvée en Antarctique, où elle a séjourné pendant quelques milliers d'années. Des examens microscopiques ont montré à l'intérieur des structures allongées, qui ressemblent à des bactéries terrestres, mais de petite taille (dix fois plus petites). Ces structures pourraient être minérales, ou bien biologiques. Dans le second cas, les bactéries pourraient être terrestres, ayant contaminé la roche pendant son séjour depuis la chute. La preuve d'une vie martienne reste à faire...

Les diogénites enfin, sont supposées provenir de la petite planète Vesta. Pour s'en convaincre, on a étudié en détail le spectre de cette petite planète, et celui des météorites. La ressemblance frappante entre les deux ne laisse guère de doutes sur l'origine. Des études fines ont même déterminé un emplacement probable, à la surface de Vesta, pour l'origine de ces météorites.

	Fragment de la météorite Tataouine (Tunisie) ; achondrite, variété diogénite, constituée principalement d'orthopyroxène. Elle provient probablement de l'astéroïde 4 Vesta. photo J. Gispert
---	--

Ces météorites sont évidemment très rares...

4 Caractérisation

4.1 Répartition et biais observationnel

On peut donner une répartition des météorites connues, mais elle ne reflète pas la réalité des objets dont l'orbite croise celle de la Terre. Si on considère les chutes (météorites que l'on a récoltées après les avoir vu tomber), alors les chondrites sont les plus abondantes.

Si on recherche les météorites en Antarctique, il est facile de les distinguer sur la glace, car toute pierre qu'on y trouve ne peut provenir que du ciel ! Là, les sidérites plus denses s'enfoncent plus facilement dans la glace que les météorites pierreuses...

Si on recherche ailleurs, il est évident qu'il sera très difficile de distinguer une chondrite ou une achondrite d'un vulgaire caillou bien terrestre... Aussi, les sidérites seront bien plus facilement reconnues, et donc leur abondance apparente sera fortement augmentée.

4.2 Âges et durée de formation

Les âges des météorites sont déterminés par des analyses isotopiques portant sur des éléments à très longue période, car elles sont toutes très anciennes, et contemporaines de la formation du système solaire. Ces longues périodes permettent d'atteindre les âges nécessaires, mais en contrepartie, ne donnent qu'une faible précision. On a montré ainsi que toutes les météorites se sont formées aux alentours de 4,3 à 4,7 milliards d'années.

La précision des éléments à longue période est insuffisante pour différencier les âges de deux météorites particulières. On se tourne alors vers des éléments à bien plus courte période. La période étant courte, les isotopes radioactifs qui étaient présents lors de la formation des météorites se sont totalement désintégrés. Un exemple important est le suivant :

L'isotope 129 de l'iode (élément 53), présent en faibles quantités lors de la formation du système solaire, se désintègre en xénon 129 (élément 54) par radioactivité β . La période est de 17 millions d'années. Par contre, l'isotope 127 est stable. On mesure la quantité de ^{129}Xe dans une météorite. On lui retranche la quantité de ^{129}Xe qui se trouvait dans l'échantillon lors de la formation du système solaire. L'excès observé indique combien d'iode radioactif (129) il y avait dans l'échantillon. Le rapport $^{129}\text{Xe} / ^{127}\text{I}$ ne varie que du simple au double dans toutes les météorites primitives analysées (les chondrites, non différenciées). Ceci implique qu'elles se sont toutes formées dans un intervalle de temps d'une seule période de l'iode, donc de l'ordre de 17 millions d'années.

Les météorites différenciées s'étant formées à partir des mêmes éléments, leur durée de formation doit être la même. Tous ces corps se sont donc formés en une vingtaine de millions d'années, ce qui est une durée astronomiquement courte.

D'autres méthodes voisines montrent de plus que la différenciation a été également très rapide.

4.3 Âge d'exposition

Une météorite s'est d'abord formée dans la ceinture des astéroïdes (pour la plupart). Ensuite, il a fallu qu'elle change d'orbite pour arriver chez nous. Pour cela, on doit considérer deux possibilités : soit le corps parent était petit, et un choc léger a suffi pour le briser (c'est le cas des chondrites), soit il était gros (objets différenciés) et un choc très violent a été nécessaire pour produire des éclats. Dans ce dernier cas, on doit retrouver des traces de choc. Ces traces sont effectivement trouvées dans certains cristaux faisant partie des météorites.

A partir du moment où l'objet a été brisé, les débris qui constitueront nos météorites se trouvent exposés à l'espace, et surtout aux rayons cosmiques qui le traversent. Lorsqu'une particule du rayonnement cosmique, de haute énergie, heurte un débris, elle y pénètre plus ou moins profondément selon la résistance du corps et l'énergie de la particule. Les cristaux qui composent la future météorite enregistrent ces chocs, sous la forme de traces que l'on peut déceler assez aisément. La densité de traces donne une me-

sure du temps que le débris a passé dans l'espace après le choc qui l'a produit, puisqu'avant il était protégé par les couches qui le recouvraient. Ainsi, on peut déterminer combien de temps une météorite a passé dans l'espace, avant d'atterrir chez nous. On nomme ce temps « *temps d'exposition* », ou *temps de vol*.

Les particules énergétiques du rayonnement cosmique, en heurtant les atomes de la météorite, provoquent des réactions de spallation : des protons, des neutrons, sont arrachés, conduisant à la formation de nouveaux atomes. Plus longue est l'exposition, plus nombreux sont ces atomes, si l'on ignore que certains sont radioactifs...

4.4 Âge terrestre

Enfin, lorsqu'on observe une chute, on sait exactement la date d'arrivée sur Terre. Mais pour les trouvailles, il est plus difficile de savoir à quel moment elles sont arrivées. On peut pourtant y parvenir.

Certains atomes créés par les réactions de spallation sont radioactifs, avec des périodes diverses. Si on trouve une météorite tombée dont on n'a pas observé la chute, on peut analyser les éléments radioactifs qui s'y trouvent, et les doser. Les éléments formés par spallation, à longue période, n'ont pas eu beaucoup de temps pour se désintégrer. Ils restent donc dans les proportions pratiquement initiales. Par contre, les éléments à courte période se sont en grande partie désintégrés. Si on établit des rapports entre divers éléments en fonction de leurs périodes, on peut ainsi déterminer depuis combien de temps les réactions de spallation ont cessé, c'est-à-dire depuis combien de temps la météorite est protégée du rayonnement cosmique par l'atmosphère terrestre.

Ainsi, une météorite passe successivement par trois états :

- lorsqu'elle est à l'intérieur de son corps parent, elle est protégée des rayons cosmiques par la croûte de l'objet ;
- après fragmentation, elle est exposée au rayonnement cosmique spatial ;
- lorsqu'elle arrive sur Terre, elle se trouve protégée par l'atmosphère.

4.5 Quantité

La Terre reçoit chaque année de 10.000 à 100.000 tonnes de matériel météoritique, principalement sous forme de micrométéorites de 100 micromètres de diamètre. Mais les gros objets, heureusement rares, amènent une masse individuelle très importante, et donc la masse moyennée sur une grande durée est bien plus élevée.

4.6 Origine

Les météorites sont des débris de la formation du système solaire, primordiaux ou évolués. Les objets plus primitifs que les planètes sont les comètes et les astéroïdes. Les chondrites pourraient être des fragments de comètes, ayant perdu leurs éléments volatils. Mais les autres ont subi une fusion qui exclut les comètes. De ce fait, les météorites nous renseignent sur les astéroïdes.

4.7 Cratères observables à la surface de la Terre

La Terre, peu après sa formation, a subi le bombardement météoritique comme les autres corps du système solaire. Mais son atmosphère, qui produit l'érosion, et la tectonique des plaques, qui renouvelle l'écorce terrestre à une échelle de temps de l'ordre de la centaine de millions d'années, ont effacé les traces de ce bombardement. On trouve toutefois quelques cratères d'impact, mais qui sont forcément assez récents. Même parmi les cratères récents, ceux de moins de 100 m de diamètre sont totalement effacés en un million d'années par l'érosion. Les traces de ces cratères visibles sur la Terre sont nommées *astroblèmes*, du grec *aster*, astre et *blema*, blessure.

Voici une liste de quelques cratères météoritiques visibles aujourd'hui sur la Terre :

cratère	localisation	diamètre actuel	prof	âge	diamètre de la météorite	angle de chute	vitesse
Chicxulub	Yucatan	200 km			10 km		
Sudbury	Canada	200 km (50 × 20 actuellement)		2.000 MA	50 km		
Vredefort	Afrique Sud	200 km					
Popigai	Yakoutie	100 km		30 MA			
structure gnais	Monta-large de la Nouvelle Ecosse	60 km		50 MA			
Ries	Stuttgart	24 km		14,7 MA			20 km/s
Clearwater Lakes, kimî	Wiyâshâ-Québec	27 et 32 km		300 MA			
Rochechouart	France	10 km		214 MA			20 km/s
Meteor Crater	Arizona	1,4 km	190 m	50 MA		45°	15 km/s
Cubrerolles	Hérault	220 m	50 m				
Toungouska	Sibérie	pas de cratère		1908			30 km/s
Manicouagan	Canada	65 km		214 MA			
Lac Saint-Martin	Manitoba, Canada	40 km		219 MA			

Le premier de la liste, celui de Chicxulub, est accusé aujourd'hui de la disparition des [dinosaures](#) (mais celle-ci nous a bien profité...).

Les cratères de Rochechouart, Manicouagan et lac Saint Martin ont le même âge, aux incertitudes de détermination près. Sur une carte, on peut constater qu'ils se trouvent sur un même grand cercle de la Terre. L'hypothèse la plus vraisemblable est qu'ils ont été creusés en même temps, par des fragments d'un objet percutant la Terre. D'autres cratères plus petits pourraient appartenir à la même chute. Si c'est exact, leur ensemble forme une *catena*, chaîne de cratères comme on en observe sur la Lune ou sur Mars.

4.8 Vitesse des météorites

Un corps qui tourne autour du soleil ne peut pas se déplacer, au voisinage de la Terre, à plus de 42 km/s, sans quoi la gravité du Soleil ne pourrait plus le retenir, et il le quitterait définitivement (c'est la vitesse de libération du Soleil à la distance de la Terre). Par conséquent, ces objets viennent frapper la Terre avec une vitesse propre inférieure à 42 km/s. Mais la Terre elle-même se déplace sur son orbite à 30 km/s. Si la particule lui vient en face, elles se heurteront donc avec une vitesse de $42 + 30 = 72$ km/s ; si au contraire elle vont dans le même sens que la Terre, la vitesse relative maximum n'est que de $42 - 30 = 12$ km/s, ce qui n'est déjà pas si mal !

La vitesse caractéristique d'une météorite est de l'ordre de 15 km/s si elle provient de la ceinture des as-

téroïdes, et de l'ordre de 30 km/s si elle provient d'une comète. Cette vitesse plus élevée est due à l'excentricité plus forte de l'ellipse.

A ces vitesses-là, lorsque la particule frappe les hautes couches de l'atmosphère, elle est instantanément freinée, et son énergie cinétique est transformée en chaleur. Les atomes de la haute atmosphère sont ionisés sur la trajectoire (ils perdent un électron) ; les ions formés vont très rapidement rencontrer un électron libre et le capturer. Cette capture s'accompagne de l'émission d'un photon (voir le paragraphe sur la spectroscopie). Ce qu'on voit briller, ce n'est donc pas la poussière, bien trop petite pour être visible à des distances de quelques dizaines de kilomètres, mais l'air qu'elle a ionisé sur son passage. La lumière émise par les étoiles filantes est ainsi expliquée.

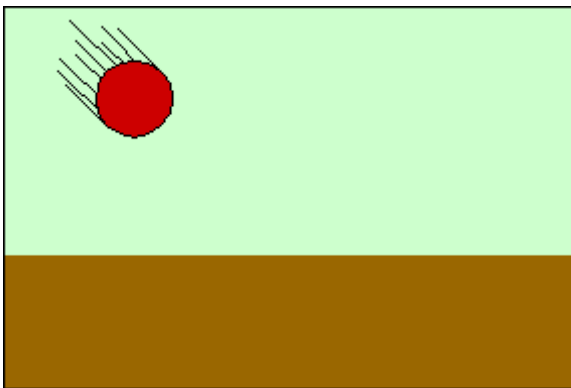
5 Les astroblèmes

On appelle *astroblème* les traces laissées au sol par des impacts. Le nom vient du latin *aster* astre, et *blema* blessure. Ce sont les cratères d'impact que l'on voit en abondance sur la lune ou Mercure, et quelques rares exemplaires sur la Terre.

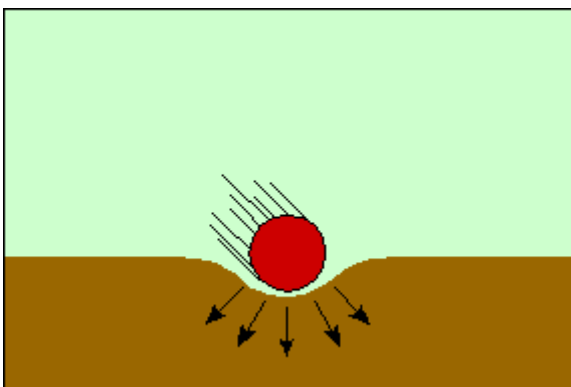
5.1 Comment se forme un cratère ?

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, ce n'est pas l'objet impacteur lui-même qui creuse le cratère, mais un phénomène complexe de rebond.

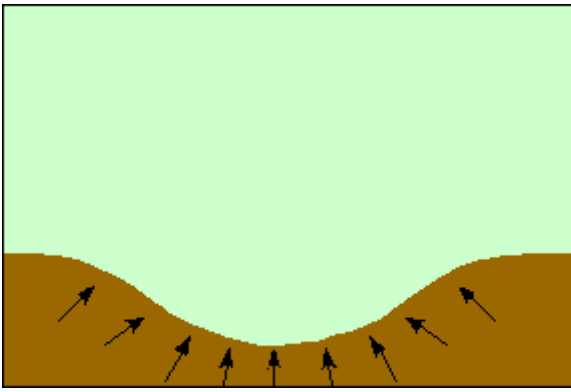
Lorsque un objet massif arrive au sol à très grande vitesse (de plus de 10 km/s), son énergie cinétique est énorme ($E = \frac{1}{2} m v^2$, où m est la masse et v la vitesse).



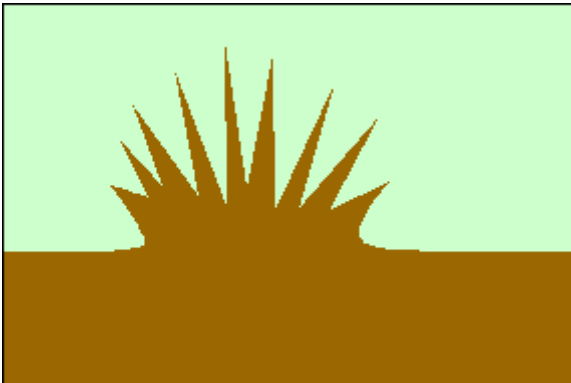
Cette énergie est dissipée instantanément dans le sol, qui est chauffé à très haute température et fond. De plus, une onde de compression se propage en profondeur à partir du point d'impact :



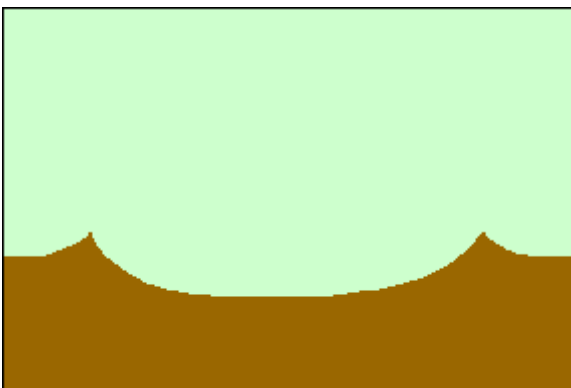
Les qualités élastiques du sol amortissent cette onde progressivement. Au bout de quelques secondes, les terrains extrêmement comprimés, n'ayant plus rien pour les retenir, vont se détendre très violemment, en expulsant les matériaux superficiels :



C'est cette décompression qui creuse le cratère, et non le choc initial. Une grande partie des matériaux est projetée au loin :



Le cratère est produit par la décompression.



C'est pour cette raison que le cratère est bien plus grand que l'objet qui l'a produit.

Une règle simple, approximative bien entendu, nous donne le diamètre du cratère en fonction de celui de la météorite :

le diamètre du cratère est de l'ordre de 20 fois le diamètre de la météorite

Pour les très grand cratères, il y a un rebond au centre, qui construit un piton central (comme la goutte d'eau qui tombe dans un bol, vue au ralenti).

5.2 Types de cratères

Les météorites qui arrivent sur terre, à cause de leur grande vitesse, s'enfoncent dans le sol et produisent un cratère dont l'importance dépend de la masse et de la vitesse de l'impacteur. Les météorites de diamètre compris entre 10 m et 200 m produisent un cratère simple, sans structure centrale. Les plus

grosses construisent un cratère plus compliqué.

La taille du cratère est bien sûr d'autant plus grande que l'objet qui le creuse est plus gros, plus massif. Lorsque le diamètre du cratère est supérieur à 2.000 mètres, l'énergie est telle que la météorite est complètement vaporisée. Il n'en reste aucune trace, si ce n'est des métaux (Ir, Fe...) mélangés à la brèche.

Le Meteor Crater se trouve en Arizona, aux Etats Unis, dans une plaine triasique de 200 MA. Le plus gros bloc trouvé au fond est la Holsinger-météorite. Il pèse 700 kg, et sa composition est de 92 % Fe, 7 % Ni, Co, Pt, Ir... L'objet qui a creusé ce cratère a été évalué à 1 million de tonnes. Dans les débris, on a mis en évidence deux nouveaux minéraux : des quartz nommés *Coésite* et *Stishovite* formés à la pression de 20.000 atmosphères (quartz choqués). Les droits d'exploitation minière ont été achetés par Baringer, qui était persuadé que le cratère cachait une énorme météorite de fer, exploitable. Après avoir fait des forages profonds, il n'a rien trouvé de commercialisable, mais il a pu démontrer pour la première fois qu'un tel cratère avait été creusé par un objet extraterrestre.

Le cratère de Rochechouart en France a été creusé par un objet de 6 milliards de tonnes.

Un événement extraordinaire s'est produit en Sibérie le 30 juin 1908 à 7 h 17 près de la rivière Toun-gouska (à 800 km au nord du lac Baïkal). Une explosion très puissante a été entendue à 1.000 km ! Un objet est tombé dans cette région, en se signalant par un phénomène lumineux, aussi brillant que le Soleil.

Les conséquences de cette explosion ont été très importantes :

- les nuits qui ont suivi ont été claires et lumineuses ;
- les arbres ont été couchés et brûlés dans un rayon de 30 km, la cime à l'opposé du point de chute.

Malheureusement, du fait des conditions politiques, et de la difficulté d'accès dans cette partie de la Sibérie, il n'a pas été possible d'organiser une expédition rapidement pour voir sur place les résultats de la chute. La première expédition scientifique n'a pu se rendre sur le site qu'en 1921, treize ans plus tard, et bien sûr l'érosion avait déjà fait son œuvre. On n'a rien retrouvé de la météorite qui a produit l'explosion. Elle s'est donc totalement détruite dans l'atmosphère lors de la chute. L'explosion qui a été entendue a dû se produire entre 5 et 10 km d'altitude.

La vitesse d'impact de l'objet a été évaluée à 30 km/s. Cette vitesse est sans doute trop élevée pour que l'objet soit un des cailloux qui orbitent entre Mars et Jupiter. Son orbite probable fait donc penser à un objet circulant sur une orbite beaucoup plus excentrique, et sans doute inclinée sur l'écliptique. Ce sont les caractéristiques des orbites cométaires.

On a donc pensé que la Terre avait été percutée par un noyau cométaire, constitué de glace d'eau et de glace carbonique. Un tel objet, volatil, pouvait parfaitement se désintégrer totalement dans l'atmosphère bien avant de toucher le sol, et donc sans creuser de cratère.

Toutefois, certains astronomes pensent qu'une comète est tellement volatile, qu'elle se serait détruite à plus haute altitude, vers 30 km. Si c'était le cas, il s'agirait alors d'une chondrite carbonée de faible cohésion, et de faible densité, d'une soixantaine de mètres de diamètre. La région, couverte de pergélisol, est très peu propice à la récupération de matériel.

6 Ce qu'elles nous apprennent

6.1 Abondance des éléments

Le cratère de Sudbury au Canada constitue aujourd'hui un gisement de nickel constituant les 2/3 des ressources mondiales ! Il contient aussi du platine, du cobalt et de l'or... Le cratère Vredefort contient du

chrome en abondance, et constitue la plus grande réserve de platine au monde ! Le cratère Popigai en Yakoutie contient pour sa part des métaux stratégiques, donc sa composition reste inconnue... Le cratère de Ries contient de la coésite.

6.2 Les tectites

Les *tectites* (du grec *têktos*, fondu) sont de petits globules de verre naturel, souvent en forme de coupe ou de goutte, de quelques millimètres à quelques centimètres. Elles contiennent de 70 à 80 % de silice, 3 à 16 % d'alumine.

On les a longtemps considérées comme des météorites, et on s'est interrogé sur leur origine. Ce problème a été résolu récemment, en partie grâce à leur répartition géographique : elles se répartissent à la surface de la Terre dans des zones de forme elliptique. Ces zones sont associées à des cratères d'impact, et leur âge est le même que celui du cratère.

Ce ne sont donc pas des météorites, mais des matériaux terrestres fondus. Lors de l'impact d'une météorite assez importante, la chaleur produite par le choc a fondu le sol terrestre, qui s'est vitrifié et a été projeté sous forme de gouttes. Ces gouttes sont retombées plus loin sur une surface elliptique à l'opposé de la direction d'arrivée de la météorite. Certaines sont projetées tellement fort, qu'elle sortent de l'atmosphère, pour aller retomber des milliers de kilomètres plus loin. En retombant dans l'atmosphère, ces tectites fondent à nouveau, et garderont les traces de cette double fusion.

On connaît 4 champs de tectites dans le monde :

nom	localisation	âge	cratère associé
<i>moldavites</i>	Bohème, Moravie	15 MA	Ries Krater, 30 km, Bavière
<i>ivoirites</i>	Côte d'Ivoire	1,3 MA	Bosmtwi, Ghana
-	Georgie, Texas	35 MA	golfe du Saint Laurent ?
<i>australites</i>	Australie, Indochine, Malaisie, Océan Indien	700 000 ans	Antarctique ?



Tectite de Thaïlande photo J. Gispert

6.3 Les impactites

Longtemps confondues avec les météorites, les impactites sont constituées de matériaux terrestres, mais arrachés à la croûte par un impact, et projetés à distance parfois importante. Elles sont associées à des cratères d'impact.

6.4 Verre lybique

Le *verre lybique* a été décrit pour la première fois en 1933, mais il était connu bien avant. Il s'agit d'un verre naturel de couleur jaune à vert clair, en général transparent et de bel aspect. On le trouve dans la *Grande Mer de Sable*, en bordure d'un plateau gréseux. On trouve des fragments de diverses tailles : les plus petits sont centimétriques, et sont posés sur le sol entre les dunes. Les plus gros fragments sont en partie ou totalement enterrés. Le plus gros trouvé

pesait 26 kg, mais il s'est cassé en deux parties.
Verre lybique photo J. Gispert

Les parties exposées à l'air sont brillantes et polies par le sable transporté par le vent. Les formes arrondies indiquent un transport par l'eau. Les parties enterrées sont plus anguleuses, ayant été bien plus protégées.

L'âge de ces verres est assez difficile à déterminer, et deux mesures différentes ont donné des résultats contradictoires. Il semble qu'ils soient âgés de 29 millions d'années.

Il est tout aussi difficile de déterminer la quantité de verre existant. Certains sondages ont montré sa présence jusqu'à deux mètres de profondeur. La densité de verre en surface, l'extension du gisement, l'estimation des quantités enfouies, la proportion de matériaux détruits par l'érosion, tous ces paramètres assez flous permettent d'arriver à une estimation de 10^7 tonnes.

L'analyse minéralogique des verres montre par ailleurs qu'ils ont été portés à très haute température : plus de mille degrés en tous cas. Il faut donc expliquer la formation d'une masse de cent mille tonnes de verre fondu...

6.5 Comment reconnaître une météorite ?

Tout d'abord, comment reconnaître un cratère produit par une météorite ? Les trous plus ou moins ronds à la surface de la Terre peuvent être des cratères volcaniques, des effondrements du sous-sol miné par les eaux (surtout dans les zones sédimentaires), des plissements naturels, des trous de bombes !

Mais les cratères météoritiques mettent en jeu des énergies énormes qui modifient les roches et sont la signature du choc. Les cristaux de quartz, qui sont présents dans tous les granites, voient leur structure cristalline modifiée par un choc très violent. Ils montrent alors des images microscopiques caractéristiques, qui indiquent avec certitude que le cristal a subi un choc violent. On les appelle *quartz choqués*. Aucun choc naturel à la surface de la Terre ne peut justifier de pressions suffisantes pour provoquer ces images ; donc un quartz choqué a forcément subi le choc d'une météorite (la seule exception, d'origine artificielle, est produite par des explosions nucléaires).

Dans certains cas, il se forme des structures macroscopiques nommées *cônes de dépression* (*shatter cones*) ; ce sont des roches de forme conique particulière, provenant d'une brisure, d'angle au sommet de 75° à 90° , qui se forment sur des roches à grain fin telles les calcaires et les quartzites, à des pressions de 50.000 à 100.000 atmosphères.

En l'absence de quartz choqués, il y a un autre moyen de déterminer qu'une roche est une météorite : c'est que la composition des roches terrestres n'est pas quelconque. La Terre s'est formée à partir de ma-

tériaux de la nébuleuse primitive (qui a donné également le Soleil), qui contenait les divers éléments chimiques dans certaines proportions. Après sa formation, la différenciation a opéré un tri de ces matériaux, les plus lourds tombant au centre de la Terre où ils ont constitué un noyau de fer et de nickel, et les plus légers remontant à la surface pour former une croûte de silice et d'aluminium (essentiellement). La géologie nous indique quelles sont les proportions des différents éléments chimiques que l'on trouve dans l'écorce terrestre. Si une roche présente des proportions très différentes, elle ne peut pas être originaire de la Terre. Ainsi, dans les météorites, le nickel, le platine et l'iridium se trouvent dans des proportions 20 à 100 fois supérieures à celles des roches terrestres. Cette composition est donc une signature attestant de leur origine extraterrestre.



Une fausse météorite ! Il s'agit sans doute d'un résidu de haut fourneau, mais l'aspect extérieur (à gauche) est assez trompeur. Toutefois, la densité de l'objet est plus faible que celle d'une sidérite à laquelle elle ferait penser. Le sciage (à droite) montre que l'objet, bien que constitué de fer, n'est pas compact, mais présente dans toute sa masse des vides que ne montre pas une sidérite (elle a été formée à haute pression). Photo J. Gispert

Enfin, pour les météorites métalliques, il existe une façon spectaculaire de les déterminer. Elles proviennent du manteau d'une petite planète (plus de 100 km de diamètre), qui a plus tard été détruite par un choc. Elles sont constituées essentiellement de fer, avec une proportion assez forte de nickel (de 5 à 15 %, quelquefois plus). Le fer et le nickel donnent des minéraux différents selon leurs proportions, en particulier la *kamacite* (de 4 à 7,5 % de Ni) et la *taénite* (de 7,5 à 15 % de Ni). Leurs cristaux sont différents, et leurs propriétés physiques aussi. Les météorites métalliques sont en général constituées d'un mélange des deux.

Lorsqu'on coupe une météorite métallique, qu'on polit la surface, puis qu'on l'attaque avec de l'acide nitrique, la kamacite est plus facilement attaquée, et en étant détruite par l'acide laisse voir la forme des cristaux de taénite, plus résistants. On appelle l'image obtenue *figure de Widmanstätten*. Aucun échantillon métallique terrestre (provenant de la croûte) ne présente ces figures ; donc elles permettent, lorsqu'elles sont présentes, de déterminer la nature extraterrestre de l'échantillon.

6.6 Quelles météorites arrivent au sol ?

Les météorites de petite taille sont freinées par l'atmosphère, et arrivent au sol intactes ou fragmentées. Les météorites plus grandes, de diamètre supérieur à 10 m, sont peu ralenties, et leur vitesse est de plusieurs dizaines de km par seconde. Trop petites, elles brûlent dans l'atmosphère ; trop grosses, elles se volatilisent complètement. Seules les météorites intermédiaires arrivent au sol.

100.000 tonnes de météorites arrivent chaque année sur la Terre. 90 % sont des poussières de moins d'un gramme ; 70 % sont de moins de 10 grammes ; 500 d'entre elles font plus de 200 grammes. Sur ces dernières, on en retrouve une vingtaine par an, soit 8 %.

La surface des océans étant très supérieure à celle des continents, une part importante des météorites

tombe à la mer. Dans les continents, certaines zones sont très peuplées, mais il y a aussi des déserts. Dans les zones équatoriales et tropicales, la végétation et l'humidité ont vite fait disparaître la météorite. Mais dans les déserts comme le Sahara ou bien l'Antarctique, les météorites, non seulement se conservent bien, mais encore sont facilement visibles sur un sol dénudé. C'est ainsi que l'on recherche volontiers les échantillons dans ces zones. Mieux encore : dans les zones glaciales, la neige qui tombe retient les météorites, se transforme en glace, et coule vers les points bas. Là, la glace fond, et libère les cailloux qu'elle contenait. Des chercheurs se sont rendus dans ces zones et ont récupéré ainsi une belle moisson de météorites au fond des lacs glacières.

6.7 Provenance

Les météorites, avant de tomber sur la Terre, tournent autour du Soleil. Ce sont des cailloux, de tailles diverses et variées, qui circulent comme les planètes dans notre système solaire. Comme les planètes, elles ont été formées il y a plus de 4 milliards d'années à partir des mêmes matériaux. Leur mécanisme de formation est le même, et on peut dire qu'une planète est une très grosse météorite.

Lors de la formation du système solaire, de petits matériaux se sont agglomérés pour former des cailloux, puis de gros blocs, et quelquefois donner une planète. Autour du Soleil circulaient donc des milliards d'objets de toutes tailles. Par le jeu des perturbations, les gros (les planètes) ont modifié les orbites des petits, les ont attirés. Les petits, très nombreux alors, sont massivement tombés sur les planètes. On appelle cela le bombardement météoritique. Il a été très intense au tout début du système solaire. Mais à force de tomber sur les planètes, les cailloux ont fini par disparaître, ou presque. Et donc, les chutes de météorites ont très vite diminué.

Actuellement, les chutes de météorites sont rares, puisqu'il ne reste plus guère de matériaux dans l'espace. Cependant, la Terre reçoit toujours quelques tonnes de météorites, presque toutes des poussières, chaque jour. Le gros objets se font très rares, ce qui est plutôt rassurant pour la vie de tous les jours (c'est pas demain la veille que nous recevrons le ciel sur la tête).

probabilités de chute en fonction de la taille.

6.8 Quelques chutes importantes

Sikhote-Alin - (Sibérie) le 12/02/47. Traînée lumineuse qui a parut plus brillante que le soleil. Explosion à 10 km, pluie de fer sur presque 10 km². 20 tonnes récupérées, le plus gros bloc de 1,7 tonne, cratère de 26 m.

Rochechouart - Difficile de ne pas voir un signe dans le nom de cette localité !

Toungouska - Cette chute est importante parce qu'elle a permis d'analyser les dégâts produits par un impact récent. Mais comme nous l'avons vu plus haut, elle n'a laissé aucune trace.

Allende - C'est une chondrite carbonée, la plus grosse connue.

6.9 Que nous apportent les météorites ?

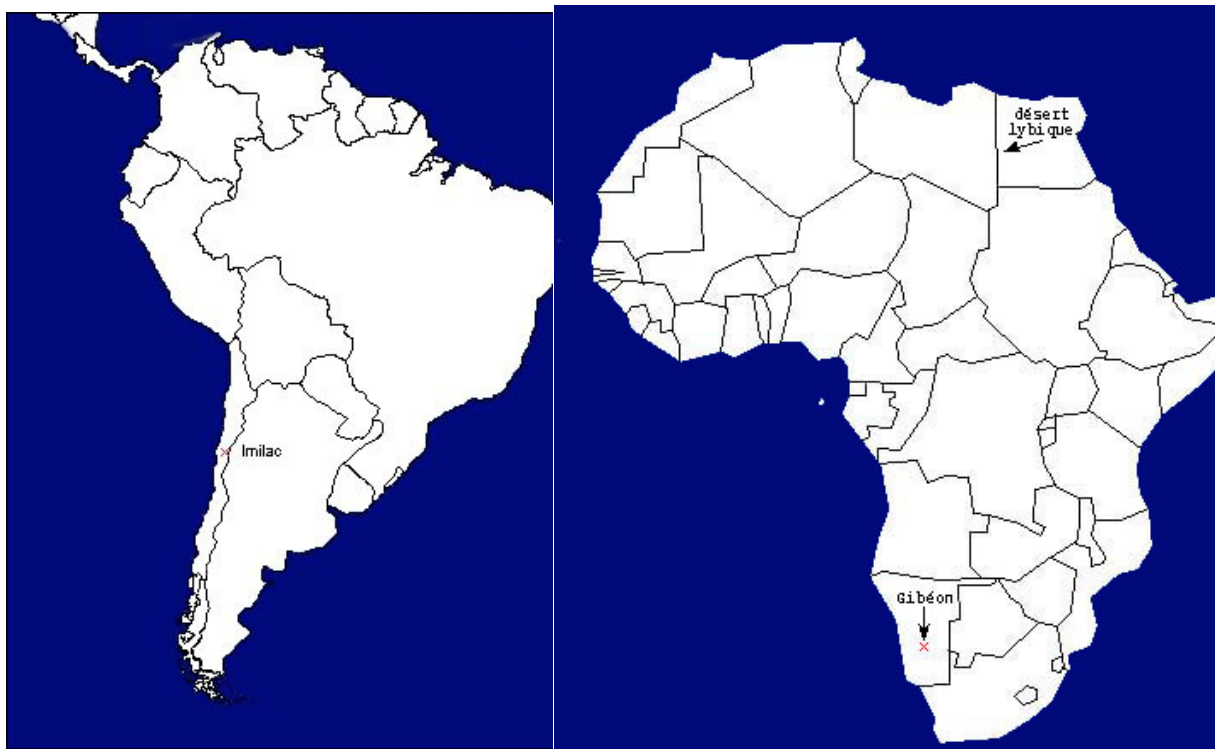
L'analyse des météorites dans toute leur diversité nous donne des indications extrêmement précieuses sur la composition, l'âge, la durée de formation, les conditions de température etc. des matériaux qui ont constitué les planètes. Elles montrent en particulier que ces matériaux proviennent pour partie de nuages moléculaires proches, mais différents de celui qui a directement donné naissance au Soleil et ses planètes.

Les météorites nous indiquent que :

- la formation du système solaire s'est faite en une vingtaine de millions d'années ;
- l'âge du système solaire est de 4,563 milliards d'années (à 4 millions d'années près) ;
- les météorites différenciées sont légèrement plus jeunes ;
- presque toutes les météorites sont plus vieilles que les roches lunaires (3 à 4,45 milliards d'années) ;
- les grains contenus dans les chondrites proviennent de nuages moléculaires (rapport D/H et $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) ;
- certains de leurs éléments chimiques ont été formés par le processus r de nucléosynthèse, produit par une supernova ;

Elles nous apportent des renseignements précieux sur l'intérieur d'une planète, inaccessible autrement !

Localisation des météorites



Imilac se trouve au Chili, non loin d'Antofagasta, en direction de la frontière Argentine.

Le désert libyque se trouve à la frontière entre l'Égypte et la Lybie, à une latitude intermédiaire entre Karnak et Assouan.

Gibéon est en Namibie, anciennement Afrique du Sud-Ouest.

6.10 Hoba

La météorite de Hoba est tombée en Namibie, près de la ville de ce nom et découverte en 1920. C'est la plus grosse météorite connue sur Terre. Elle a été évaluée à près de 70 tonnes à son arrivée sur Terre. Mais depuis, l'érosion l'a attaquée, elle a été victime des scientifiques, qui en ont prélevé des morceaux pour étude (pour la bonne cause) ; mais elle a subi aussi les assauts des vandales, qui en ont prélevé des fragments. Aujourd'hui, elle ne doit plus faire que 60 tonnes...

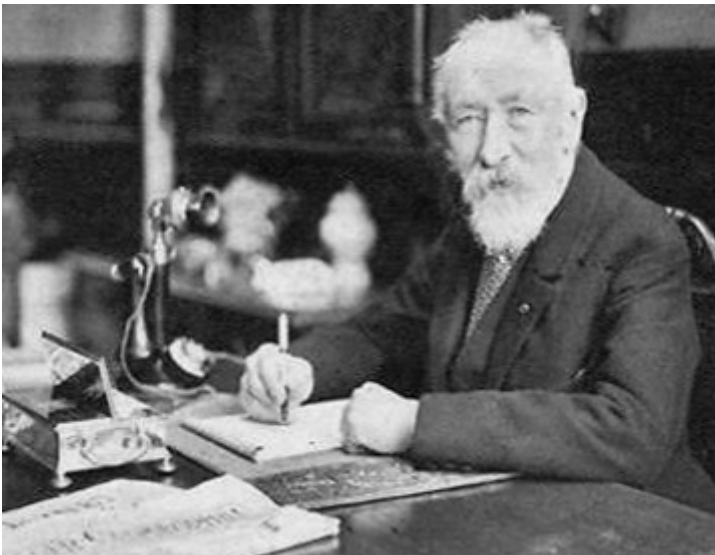


Météorite Hoba, Namibie, [Photo Patrick GIRAUD](#)

Elle reste cependant la plus grosse météorite jamais trouvée sur Terre. Elle est composée à 84% de fer et 16% de nickel

Jules Janssen (1824-1907)

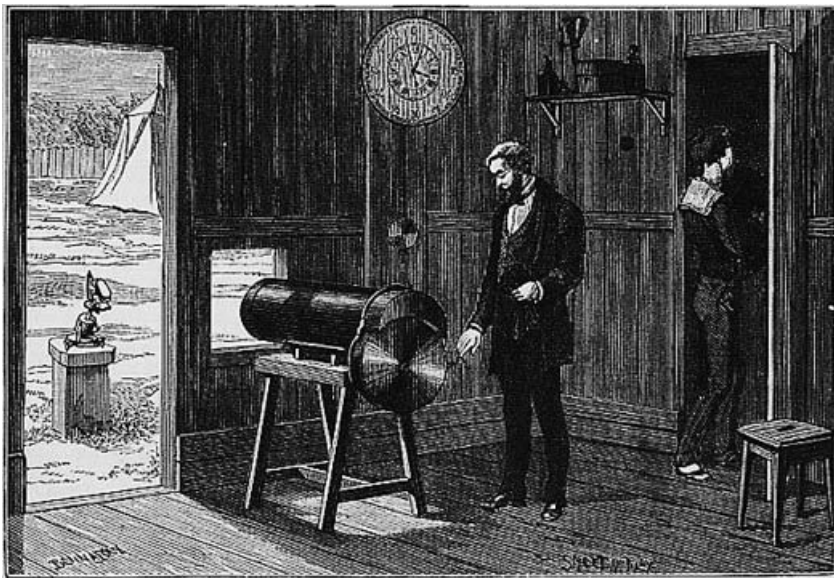
Auteur : [Philippe Garcelon](#)



Pierre Jules César Janssen (1824-1907) est né à Paris. Enfant, il est victime d'un accident qui perturbe sa scolarité et le fera claudiquer toute sa vie. A seize ans, il est employé de banque et profite de son temps libre pour rattraper son retard scolaire. Il étudie les matières scientifiques et cultive son intérêt pour la peinture. En 1852 et 1855, il obtient ses licences de mathématique et de physique puis enseigne au lycée Charlemagne. Deux ans plus tard, le ministère de l'Instruction Publique l'envoie au Pérou, où il se rend accompagné par les naturalistes Ernest et Al-

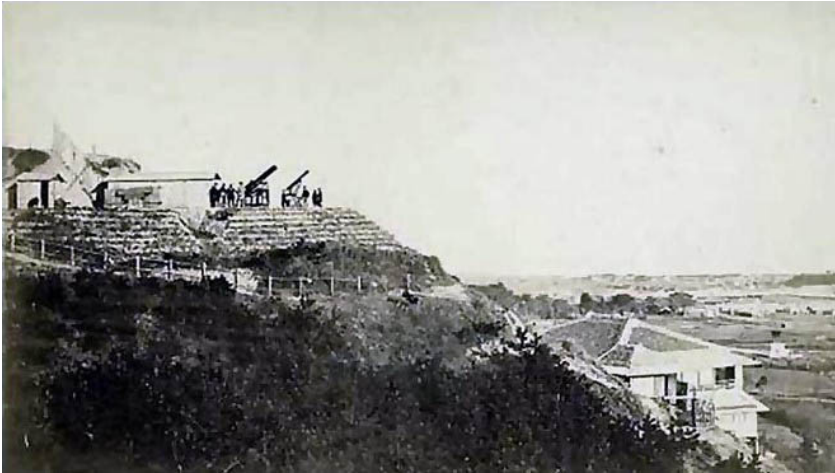
fred Grandidier, chargés de l'aider pour des mesures visant à localiser l'équateur magnétique. Malheureusement la mission tourne court, lorsqu'au bout de cinq mois, Janssen contracte une dysenterie qui l'oblige à regagner la France. Il continue ses études et obtient un doctorat ès-sciences physiques, appuyé par une thèse sur l'absorption des rayonnements de la chaleur dans l'œil. Il y explique comment cet organe parvient à absorber la chaleur rayonnante obscure pour ne laisser arriver vers la rétine que les rayons lumineux visibles. Il travaille alors à la faculté de médecine où il conçoit des instruments médicaux destinés à l'ophtalmologie. Il est ensuite nommé professeur de physique générale à l'École Spéciale d'Architecture de Paris.

En 1862, il découvre les travaux de Kirchhoff et Bunsen et entreprend ses propres expériences spectrographiques. Il se rend dans les Alpes pour effectuer des relevés sur les raies telluriques du spectre solaire et s'aperçoit que certaines raies sombres sont causées par la vapeur d'eau contenue dans notre atmosphère. Dès lors, il voyage sans relâche en dépit de son infirmité. Il revient dans les Alpes en 1864, en 1867 il se rend à Trani dans le sud de l'Italie pour observer une éclipse. La même année, il est sur l'île grecque de Santorin, où il assiste à une éruption volcanique, puis aux Açores où il effectue des relevés topographiques et magnétiques. L'année suivante, on le retrouve à Guntûr dans le golfe du Bengale. Avec d'autres chercheurs, il observe une éclipse solaire d'une durée inhabituelle de près de dix minutes, qui lui permet de relever la présence, dans le spectre de la chromosphère, d'une raie jaune lumineuse jamais détectée auparavant. Il pense qu'elle révèle la présence d'un élément inconnu sur Terre. Dans un premier temps il n'est pas pris au sérieux car, jusqu'alors, tous les éléments découverts sur des spectres stellaires ont été identifiés à partir d'éléments présents sur notre planète. Janssen attend plusieurs mois avant que **Sir Joseph Norman Lockyer, astronome et fondateur de la revue Nature**, observe à son tour la même raie spectrale et en tire des conclusions similaires.



Il nommera « hélium » ce nouvel élément qui fut le premier à être découvert sur un monde extraterrestre. Il tire son nom de Hélios, dieu grec personnifiant le Soleil. En 1868, une éclipse permet à Janssen de prouver la nature gazeuse des protubérances solaires et de mettre au point une méthode permettant de les observer dans des conditions ordinaires ; ce qui dispense les astronomes d'attendre des éclipses, pour pouvoir établir leurs spectres. Pour ces travaux, l'Académie des sciences lui décerne le prix Lalande. En 1870, Janssen est bloqué à Paris, alors assiégée par l'armée de Bismarck et coupée du monde extérieur. Le seul moyen de quitter la ville est de s'enfuir par les airs. Pour se rendre à Oran, afin d'observer une éclipse, Janssen brave les tirs de barrage de l'armée prussienne et sort de Paris en ballon. Durant son bref voyage, il invente un instrument qui permet de situer à tout moment la position d'un aérostat sur une carte. Après l'éclipse d'Oran, Janssen entreprend un voyage en Inde pour y observer l'éclipse solaire de 1871. Quatre ans plus tard, il est à Nagasaki et à Kobe au Japon, où il dirige l'expédition française qui doit observer un transit de Vénus prévu pour le 9 décembre. Il réalisera des photographies de

l'évènement grâce à un instrument de son invention, le pistolet photographique (gravure ci-dessus à droite).

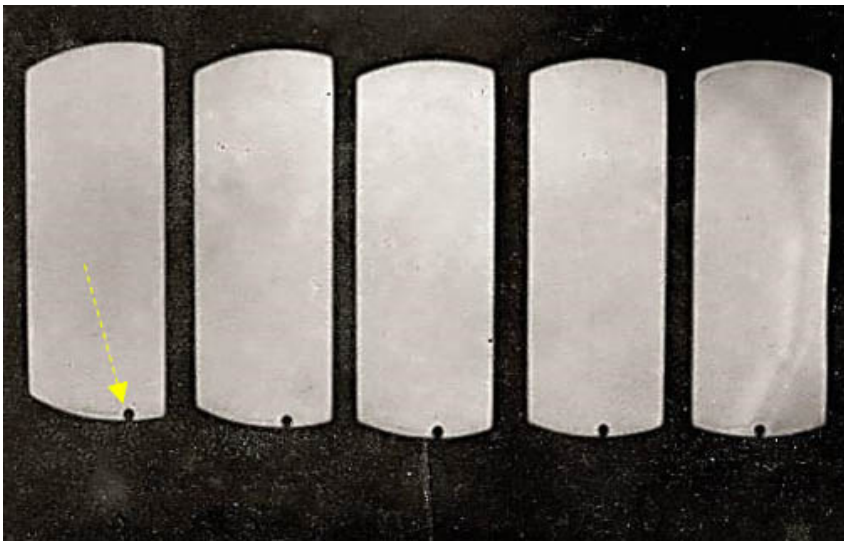


Une véritable compétition internationale fait rage dans les milieux scientifiques concernant la photographie, alors naissante et qui devient un enjeu politique. La qualité des résultats obtenus attesterait de la suprématie d'un des pays en lice. Il se trouve que la France était alors nettement distancée par l'Angleterre pour la photographie astronomique. Ci-après, je donne quelques extraits du rapport que Jules Janssen expédie le 10 décembre 1874 à Monsieur Dumas, président de la commission du passage de Vénus. L'auteur relatera par ailleurs et au jour le jour chaque épisode de l'aventure nippone. *«Vous avez appris, par mes deux télégrammes du 9 et 10 décembre, que nous avons observé le passage. Je vous dirai maintenant, monsieur le Secrétaire perpétuel, que bien que le temps n'ait pas été complètement favorable et que nous n'ayons pas obtenu autant de photographies qu'il eût été désirable, nous devons nous estimer très heureux*

d'avoir pu observer les deux contacts intérieurs, et obtenu en somme le plus important. Cette année a été exceptionnellement pluvieuse au Japon...»

Il poursuit: *«J'ai rassemblé sur les diverses villes pouvant nous offrir les chances les moins défavorables tous les documents météorologiques... Yokohama nous offrait bien peu de chances favorables. Kobe, dans la mer Intérieure et Nagasaki au sud-ouest, nous étaient indiquées comme jouissant en hiver d'un meilleur climat, et, à cet égard, tous les avis compétents étaient unanimes... Nous fîmes le voyage sur l'avis à vapeur le d'Estrées, commandé par M. le capitaine de frégate Joncla... Entre Kobe et Nagasaki, la différence était faible, cependant Nagasaki paraissait préférable, et c'est ainsi qu'en avaient jugé les Américains qui s'y étaient établis. D'un autre côté, les circonstances astronomiques du passage y étaient plus avantageuses (Soleil plus élevé qu'à Kobe et surtout qu'à Yokohama). Je me décidais donc pour Nagasaki; mais le beau temps n'étant nullement assuré, même dans cette dernière ville, je résolus d'avoir aussi un poste d'observation à Kobe. Ce partage, qui était possible en raison de notre personnel et de nombreux instruments, nous assurait toutes les chances possibles de succès. Le 24 octobre 1874, le d'Estrées nous débarquait à Nagasaki... Nous nous occupâmes de l'emplacement de notre observatoire. Nous l'établîmes à Kompira-Yama, sur une haute colline qui domine la rade. Cette situation était convenable sous tous les rapports. Site élevé au-dessus des vapeurs de la ville, route existante, proximité des habitations et ressources en tout genre. La grande difficulté était de transporter à cette hauteur les deux cent cinquante caisses ou colis formant notre bagage. Cinq cent porteurs environ effectuèrent ce travail. En même temps une centaine de charpentiers et de terrassiers préparaient le terrain, y élevaient des cabanes, et notre installation marcha très rapidement. Le temps beau d'abord se gâta ensuite tout à fait. Des orages violents, des rafales venaient contrarier nos travaux et compromettre même notre établissement. Pendant une violente bourrasque, l'équatorial de M. Tisserand fut renversé, sa lunette et son micromètre brisés. Heureusement j'avais sur moi ma lunette de 6 pouces, qui*

me servait dans l'Inde en 1868, lunette que je destinais à des observations spectrales pendant le passage. En sacrifiant ces observations, je fus heureux de pouvoir mettre M. Tisserand en état de réparer ce malheur, qui l'eût mis hors d'état d'observer... Après cette période fâcheuse, le temps se remit... Dès le milieu de novembre je préparais l'expédition de Kobe. Les instruments qui devaient y être envoyés étaient essayés, réglés et les observateurs exercés... Le gouvernement japonais nous donna la franchise télégraphique, et fit construire à ses frais, des bouts de ligne nécessaires pour mettre directement en rapport l'observatoire de Nagasaki et celui de Kobe. Cette facilité nous permit de régler les chronomètres de Kobe sur ceux de Nagasaki où se trouvent nos instruments méridiens. J'arrive maintenant au jour du passage... Dans l'équatorial de 8 pouces, dont la lunette est très bonne, l'image de Vénus se montra très ronde, bien déterminée, et la marche relative du disque de la planète, par rapport au disque solaire, s'exécuta géométriquement sans aucune apparence de ligament ni de goutte. Mais il s'écoula un temps assez long entre le moment où le disque de Vénus paraissait tangent intérieurement au disque du Soleil, et celui de l'apparition du filet lumineux...»



«Il y a là une anomalie apparente qui, pour moi, tient à la présence de l'atmosphère de la planète. J'ai fait prendre une photographie au moment où le contact paraissait géométrique, et sur cette épreuve le contact n'a pas encore lieu... je compte discuter ces résultats qui me paraissent conduire à d'importantes conséquences... Après le premier contact M. Picard et M. Arens prirent chacun à leurs instruments autant de photographies qu'il leur fut possible, mais les nuages y mirent grand obstacle... Pendant le même passage nous recevions des nouvelles de Kobe, nous savions que les deux contacts y avaient été observés, qu'une quinzaine de photographies y avaient été prises... Je ne dois pas terminer sans vous parler... d'une observation qui se rattache à la couronne et à l'atmosphère coronale du Soleil. Avec des verres d'une coloration bleu violet, particulière et très pure, j'ai pu voir Vénus avant qu'elle eût touché le disque solaire. Elle se détachait comme une petite tache ronde très pâle.» (ci-dessus, images réalisées avec le revolver photographique la flèche jaune montre Vénus devant le disque solaire).

«Quand elle commença à mordre le disque solaire, cette tache complétait le segment noir qui se trouvait sur l'astre radieux. C'était une éclipse partielle de l'atmosphère coronale; Cette observation prouve d'une manière toute naturelle et bien concluante l'existence de cette atmosphère lumineuse et l'exactitude de mes observations de 1871. J'ai vu Vénus depuis environ 2 à 3 minutes de distance du bord solaire...» Jansen continue son périple et, à son retour du Japon, il observe une éclipse sur la presqu'île de Malacca en Malaisie. En 1883, il participe à une expédition sur l'île Caroline, dans l'océan Pacifique, d'où il observe une éclipse à l'aide d'un télescope de 50 cm de diamètre. Mais Janssen, infatigable globetrotteur observe aussi depuis la France. Un de ses objectifs est de pouvoir découvrir si le Soleil contient de l'oxygène. Pour cela il lui faut faire disparaître les raies en absorptions, dues à l'oxygène contenu dans l'atmosphère terrestre, en trouvant un lieu suffisamment élevé pour pallier, au moins en partie, à cet

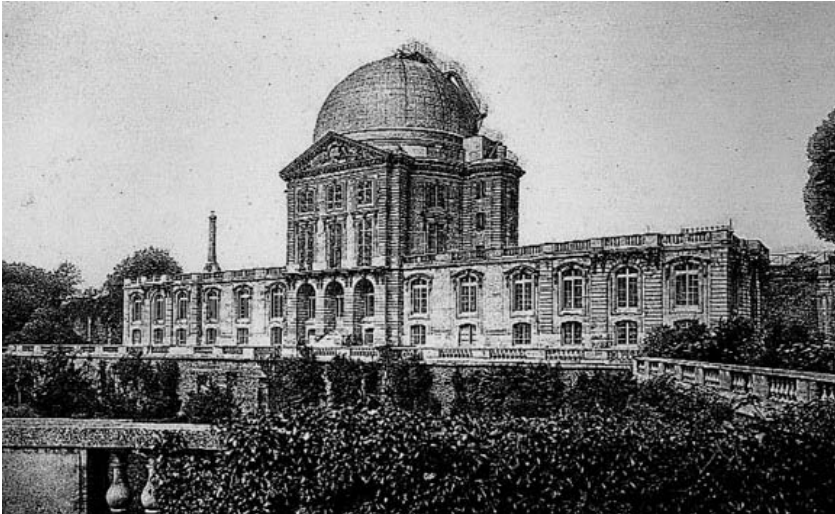
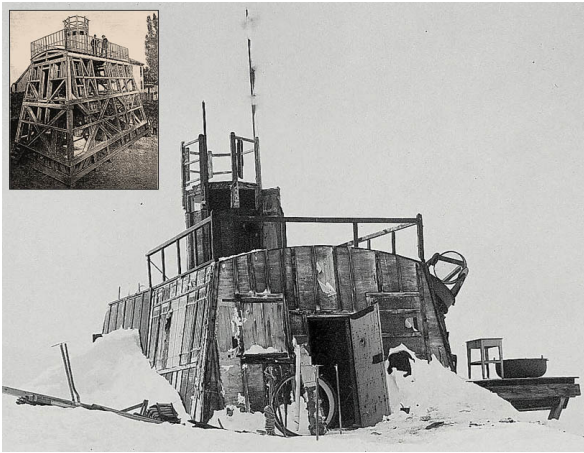
inconvenient. Cette nécessité lui fera concevoir un ambitieux projet qui prend forme en 1888.

Dans le prolongement de travaux effectués au Pic du Midi, Janssen effectue une première ascension aux Grands Mulets (3.050 m) dans le massif du Mont Blanc, afin d'observer le spectre solaire. Il a soixante-six ans et son handicap lui impose de se faire transporter à l'aide d'une « chaise échelle » (ci-dessous à gauche). Deux années plus tard, il réitère l'expérience et monte cette fois jusqu'à l'observatoire « Vallot » situé à 4.350 m et où il séjourne trois nuits. A cette époque, il envisage d'installer un observatoire au sommet du Mont Blanc. L'ingénieur Gustave Eiffel prépare un projet comportant une structure métallique qu'il prévoit de sceller sur la roche, à douze mètres de profondeur sous les glaces du sommet. Ce projet sera abandonné en raison de l'importance des travaux nécessaires. Janssen lui préfère une structure en bois, qu'il fait pré-assembler à Meudon et qui sera acheminée en pièces détachées au camp de base, pour être disposée au sommet, directement sur la glace. L'ensemble est doté d'un système de vérins qui permettent des rattrapages de position en cas de dérive du glacier. En 1892, les premiers éléments sont stockés aux Rochers Rouges (4.500 m). En 1893, à la reprise des travaux, les caisses de matériel seront retrouvées sous huit mètres de neige ce qui n'empêchera pas l'ouverture de l'observatoire la même année.



Dans cet observatoire, qui sera durant des années le plus haut du monde, Janssen met en place un météorographe capable d'enregistrer automatiquement la température, l'hygrométrie, la pression atmosphérique et la vitesse du vent et sur une durée de huit mois. En 1896, il installe une lunette astronomique polaire de 33 cm et un sidérostade de 60 cm. Durant une dizaine d'années, la station permet la conduite de diverses expériences scientifiques. Au total, elle donne lieu à une cinquantaine d'expéditions, mobilisant environ vingt-cinq chercheurs, astronomes mais aussi météorologues et biologistes. En 1904, un spectrographe disposé au foyer de la grande lunette permet d'étudier les spectres des atmosphères planétaires. La même année sont réalisées les premières tentatives de photographie de la couronne solaire sans éclipses.

Mais en 1906, l'observatoire nécessite déjà des manœuvres sur ses vérins, car il commence à basculer et à s'enfoncer dans les glaces. Janssen meurt en 1907, sans avoir le désagrément de voir son observatoire se disloquer sous l'effet d'une crevasse qui vient de s'ouvrir dans le glacier. En 1909, l'observatoire jugé trop dangereux est abandonné; il sera totalement englouti sous les glaces. Seule la tourelle dernier vestige de cette épopée pourra être démontée et conservée dans un musée de Chamonix.



En 1863, Janssen avait confirmé l'absence d'atmosphère sur la Lune et évoqué la possibilité de présence de vapeur d'eau à la surface de Mars. Reconnu par ses pairs et par la nation, il reçoit la Légion d'Honneur. En 1873, il est élu membre de l'Académie des sciences. L'année suivante, il entre au Bureau des Longitudes. En 1875, il entre à la Royal Society et propose la restauration du château de Meudon pour y créer un observatoire d'astronomie physique (ci-contre). L'année suivante, il reçoit la médaille Rumford, décernée tous les deux ans à des scientifiques européens pour leurs travaux ou découvertes exceptionnels, en thermique ou en optique. Pour son projet de Meudon, Il obtient un crédit de plus d'un million de francs qui lui permettra de le mener à son terme. Il devient directeur de cet observatoire à partir duquel il obtient, en 1879, de remarquables clichés du Soleil. Il préside la Société Française de Photographie et l'Union Nationale des Sociétés photographiques de France. Il meurt à l'âge de quatre-vingt-trois ans. En 1960, la Société Astronomique de France crée le prix Jules Janssen.

La constellation du mois de Février

Orion

la vedette des nuits d'hiver (Sources : Astro-Rennes)



A)Sa situation céleste :

Orion est bien visible tout au long de l'hiver d'Est en Ouest. Vers la mi-février regardons vers le sud, sud-ouest aux alentours de 22 heures :

Orion a la forme d'un sablier formé de 7 étoiles brillantes bien visibles à l'œil nu ; 4 d'entre elles « entourent » un alignement de 3 astres immanquables qui matérialisent l'étranglement du sablier, la ceinture autrement nommée « le baudrier » du chasseur Orion.

Au nord on trouve la constellation du [Cocher](#), au nord-est les [Gémeaux](#), à l'ouest [Procyon](#), juste au-dessous [la Licorne](#) assez peu visible, au sud-est [Le grand Chien](#), au sud [Le lièvre](#), au sud-ouest une extrémité d'[Eridan](#) et au nord-ouest [Le Taureau](#) avec toutes proches [l'amas des Hyades](#) et un peu plus loin, toujours au nord-ouest, le magnifique [amas des Pléiades](#).

Toute cette Zone autour d'Orion est bien visible et particulièrement riche en constellations dont la plupart ont une, ou, des étoiles repérables à l'œil nu.

B) Les objets de la constellations d'Orion :

1 – les étoiles

- [Bételgeuse](#) figure l'épaule droite du géant d'où son nom d'origine arabe (ibt al Jauzah). C'est une géante rouge en fin de vie d'une masse équivalente à 30 fois celle du soleil. Son diamètre oscille entre 750 et 1300 millions de KM. Magnitude de 0,45 à 1,3. Elle se trouve à une distance de 400 a.l.

A.D. 5h55mn10.....s ; D : 7°24'25 ''



- L'autre épaule : [Bellatrix](#) (la guerrière) la plus proche de la Terre.

Mag. 1,64. Distant de 240 a.l.. AD 4h19mn47...s ; D 15°37'39..."



« Bellatrix »

- **Rigel** : étoile double, c'est une géante bleue, son diamètre vaut 50 fois celui de notre soleil et sa luminosité 60000 fois. Elle est distante de

800 a.l. Sa magnitude va de 0.18 à 6.8. AD 5h14mn32s ; D -8°12'05...." Son étoile « compagnon » est distante 9'5" trop loin pour être observée facilement du fait de l'éclat de Rigel..

· Système multiple des 3 étoiles du baudrier : **Alnitak**, étoile triple avec **Alnilam** et **Mintaka** la plus haute. Distantes de 800 a.l. Mag de 1,7 à 5,5. AD 5h40m45....s D -1°56'33....".



« grande nébuleuse »

2- les autres objets :

Les nébuleuses : La « Tête de cheval » B33 se trouve au sud de **Alnitak** mais est très peu visible avec un petit télescope. A 1500 a.l.



« tête de cheval »

Ce qu'on aperçoit sur le cliché p.24 au sud du baudrier est « la Grande Nébuleuse » d'ORION, M42 /NGC 1976 de Mag 4 et distante de 1300 a.l. Elle est repérable avec des jumelles. Il

s'agit d'une grande pouponnière d'étoiles qui contient suffisamment de matière pour fabriquer 10 000 soleils.



AD 5h35m17s ; D -5°23'28".

détail de «la grande nébuleuse »

[Nébuleuse de Mairan M43](#) /NGC 1982 ; il s'agit d'une extension de la Grande Nébuleuse. Distante elle aussi de 1300 a.l

[Nébuleuse M 78](#) : NGC 2068 distante de 1600 a.l.

-[Nébuleuse](#) de la « [Tête de Singe](#) » [NGC 2174](#) associée à l'amas ouvert [NGC 2175](#). Elle est située à environ 6400 a.l. de la Terre.

« la tête de singe »



C) Orion et la mythologie :

Ici nous en rappelons les principaux marqueurs célestes.



Orion dans la mythologie grecque est un chasseur orgueilleux qui n'a peur de rien. Dans le ciel il est accompagné par le [Petit Chien](#), le [Grand Chien](#) qui tient dans sa gueule l'étoile la plus brillante du ciel : [Sirius](#) et non loin d'elle un [Lièvre](#) qui gambade....Orion mourut piqué par le dard du [Scorpion](#).

EK

Orion

Orion était un chasseur de Béotie et le plus bel homme vivant doué d'une force prodigieuse.

Naissance

Il était fils de Poséidon (ou d'Hyrié, fils de Poséidon) et d'Euryale.

Mais il existe une autre légende racontée par Ovide et Servius: Hyrié, un homme déjà âgé, reçut la visite de trois dieux, Zeus(Jupiter), Poséidon (Neptune), Hermès (Mercure). Il tua un bœuf pour honorer ses invités et en remerciement, les dieux lui proposèrent une récompense pour son hospitalité, il choisit la possibilité d'engendrer sans avoir à passer par une femme. Les trois visiteurs mirent leur urine dans la peau du bœuf sacrifié, et lui conseillèrent d'enterrer cette peau pendant neuf mois dans la terre: ainsi naquit Orion dont le nom est en rapport avec l'urine céleste.

❖ Amours

Orion eut de nombreuses maitresses plus ou moins consentantes.

- D'abord il épousa Sidé qui était très belle mais aussi très fière. Elle donna le jour à deux filles, Ménippé et Métioché appelées aussi les Coronides. Elle fut précipitée dans le Tartare par Héra à qui elle avait voulu se comparer.

- Un jour, dans l'île de Chios, Orion tomba amoureux de Mérope, fille d'Oenopion le fils de [Dionysos](#). Oenopion avait promis de donner Mérope en mariage à Orion s'il débarrassait l'île des dangereuses bêtes fauves qui l'infestaient.

Mais, lorsqu'ayant enfin terminé la tâche qu'on lui avait assignée il demanda qu'elle devînt sa femme, Oenopion fit courir le bruit qu'il y avait encore des lions, des ours et des loups dissimulés dans les montagnes et il refusa de tenir sa promesse. Une nuit, Orion, découragé, but toute une gourde du vin d'Oenopion qui l'échauffa à tel point qu'il fit irruption dans la chambre à coucher de Mérope et voulut lui faire violence.

Orion guidé par Cédalion par [N. POUSSIN](#)

© Metropolitan Museum of Art, New York

Après avoir été à Délos en compagnie d'[Eos](#), Orion revint pour se venger d'Oenopion qu'il ne parvint pas, cependant, à découvrir à Chios, car il était caché dans une chambre souterraine que lui avait construite Héphestos.

S'étant embarqué pour la Crète où il pensait qu'Oenopion aurait pu s'enfuir pour se mettre sous la protection de Minos son grand-père, Orion rencontra [Artémis](#) qui, comme lui, avait la passion de la chasse. Elle le persuada bientôt d'oublier sa vengeance et de venir plutôt chasser en sa compagnie. Une nuit, Orion, découragé, but toute une gourde du vin d'Oenopion qui l'échauffa à tel point qu'il fit irruption dans la chambre à coucher de Mérope et voulut lui faire violence. Lorsque vint l'aube, Oenopion appela son père qui lui envoya des satyres pour faire boire à Orion encore plus de vin; celui-ci s'endormit enfin profondément; Oenopion lui creva alors les deux yeux et le jeta sur le sable au bord de la mer.



Un oracle annonça que l'aveugle retrouverait la vue s'il se rendait à l'est et tournait ses yeux en direction d'Hélios à l'endroit où il se lève de l'Océan. Orion prit une petite barque, se mit à ramer et, se guidant au son du marteau d'un Cyclope, il atteignit [Lemnos](#). Là, il pénétra dans la forge d'Héphaïstos, saisit un jeune apprenti du nom de Cédalion et le mit sur ses épaules afin qu'il le dirige. Cédalion guida Orion sur mer et sur terre jusqu'à ce qu'il fût parvenu enfin à l'Océan lointain; là, Eos s'éprit de lui et son frère Hélios lui rendit la vue.

❖ La mort d'Orion



Diane devant le cadavre d'Orion

Mais Apollon savait qu'Orion n'avait pas refusé l'invitation d'Eos à partager sa couche dans l'île sacrée de Délos. Craignant donc que sa sœur Artémis ne se montre aussi sensible à son charme qu'Eos, Apollon se rendit auprès de la Terre-Mère et, lui ayant répété avec perfidie ce dont s'était vanté Orion il fit en sorte qu'Orion

fût poursuivi par un monstrueux scorpion.

Orion attaqua le scorpion d'abord avec des flèches, puis avec son épée, mais pensant que la mer était la protection la plus sûre, il plongea dans les flots et marcha sur le fond de la mer en direction de Délos où il espérait qu'Eos le protégerait.

[Apollon](#) appela alors Artémis: « *Tu vois, là-bas très loin, cette chose noire qui émerge de la mer, près d'Ortygie? C'est la tête d'un méchant appelé Candaon qui vient de séduire Opis, une de tes prêtresses.* » or, Candaon était le surnom d'Orion en Béotie mais cela, Artémis l'ignorait. Elle visa attentivement, lâcha sa flèche, et se lança à la nage pour retrouver sa victime. Lorsqu'elle vit que c'était Orion, elle implora [Asclépios](#) de le ressusciter. Celui-ci y consentit mais la foudre de Zeus anéantit Orion avant qu'il puisse intervenir. Artémis plaça alors l'image d'Orion et de son chien Sirios parmi les [étoiles](#) où il est pour la nuit des temps poursuivi par le Scorpion.

Dans une autre version il tenta de faire violence à Artémis elle même ou à une de ses suivantes, Opis.

❖ Filiation

Euryale [Poséidon](#)
ORION
Epouse* / amante Enfants
Sidé* Ménippé
 Métioché
Eos
Mérope*

❖ Bibliographie

Dictionnaires et encyclopédies Britannica, Larousse et Universalis.
Encyclopédie de la mythologie d'Arthur COTTERELL; (plusieurs éditions) Oxford 2000
Encyclopedia of Ancient Deities de Charles RUSSELL COULTER et Patricia Turner
Dictionnaire des mythologies en 2 volumes d'Yves BONNEFOY, Flammarion, Paris, 1999.
L'encyclopédie de la mythologie : Dieux, héros et croyances du monde entier de Neil PHILIP, Editions Rouge et Or, 2010
Mythes et légendes du monde entier; Editions de Lodi, Collectif 2006.
Mythes et mythologie de Félix GUIRAND et Joël SCHMIDT, Larousse, 1996.
Dictionnaire des symboles de Jean CHEVALIER et Alain GHEERBRANT, 1997
Dictionnaire de la fable de François NOEL
Dictionnaire critique de mythologie de Jean-Loïc LE QUELLEC et Bernard SERGENT

Citations :

« les hommes de génie sont des météores destinés à brûler pour éclairer leur siècle » Napoléon Bonaparte

« ...Le cœur battant, je ramassai ma trouvaille et je reçus un coup au cœur, ainsi qu'au seuil d'une grande découverte, quand je découvris sur cette nappe, à quinze ou vingt mètres de moi, un caillou noir...un caillou dur, noir, de la taille du poing, lourd comme du métal et coulé en forme de larme...jamais aucun aérolithe n'avait montré avec une telle évidence son origine. » A. de Saint Exupéry « [Terre des Hommes](#) »

LE SAVIEZ-VOUS?



1) Le 7 février

Le 7 février 1984, Bruce McCandless effectue la première sortie extravéhiculaire sans attache lors de la mission de navette STS-41-B. L'astronaute teste le MMU (Manned Maneuvering Unit), le nouveau système de propulsion conçu par la Nasa. Grâce au MMU, McCandless s'aventure à 98m de la navette Challenger à l'aide des 24 tuyères éjectant de l'azote. Jugé trop dangereux le MMU sera abandonné après deux autres essais

2) Le 13 février

Il y a 50 ans, Bruce Balick et Robert Brown identifient Sagittarius A, la région au centre de notre galaxie qui abrite un trou noir supermassif. La découverte est réalisée à l'observatoire américain de Green Bank. Sgr A émet d'intenses ondes radio qui sont associées à un trou noir de quelques 4 millions de masses solaires. Pour repérer la zone où il se trouve dans le Sagittaire, sachez que le bec de la théière pointe vers celle-ci. La première image de Sgr A a été publiée le 12 mai 2022 par le programme Event Horizon Telescope (EHT) en combinant les mesures de 8 radiotélescopes répartis sur la Terre. Soit près de 50 ans après sa découverte.



3) Le 18 février

Il y a 3 ans, le rover Perseverance atterrissait sur le sol martien avec dans son ventre le petit hélicoptère Ingenuity. Déployé quelques semaines plus tard, le premier engin capable de décoller dans l'atmosphère d'un monde extraterrestre a franchi la barre des 50 vols effectués sur Mars en 2023 alors qu'il en était prévus 5 !!

Mais il faut dire au revoir à Ingenuity après 3 ans de très bons services. Au moins une de ses pales ayant été endommagée.



Ciel et Espace

ENIGME

Pourquoi parle-t-on de la face cachée de la Lune?

Envoyez vos solutions à :

andrebourdet@gmail.com

Solution de l'énigme précédente

Différence entre élongation et conjonction?

Bon à savoir

Élongation et conjonction

La visibilité d'une planète dépend de sa position par rapport au Soleil. Ainsi, plusieurs configurations remarquables se produisent au cours de sa révolution autour de l'étoile. Une planète est dite "en conjonction" quand, vue de la Terre, elle se trouve dans la même direction que le Soleil. Dans le cas de Mercure et de Vénus, dont l'orbite s'inscrit dans celle de la Terre, cette situation se produit même deux fois; on parle alors de conjonctions supérieure et inférieure (voir schéma). À l'inverse, une planète est "à l'opposition" quand elle se trouve à l'opposé du Soleil par rapport à la Terre — concrètement, la planète se lève quand le Soleil se couche, et vice versa. Ce cas concerne Mars et les planètes géantes Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. Leur passage à l'opposition est le meilleur moment pour les observer. Enfin, les deux planètes inférieures, Mercure et Vénus sont "à leur plus grande élongation" quand leur angle apparent avec le Soleil est maximal. Elle est orientale quand la planète s'écarte le plus possible à l'est du Soleil, et donc visible le soir. Quand elle est occidentale (à l'ouest du Soleil), le phénomène s'observe avant l'aube. C'est le cas de Mercure le 12 janvier 2024.

ORBITE INFÉRIEURE

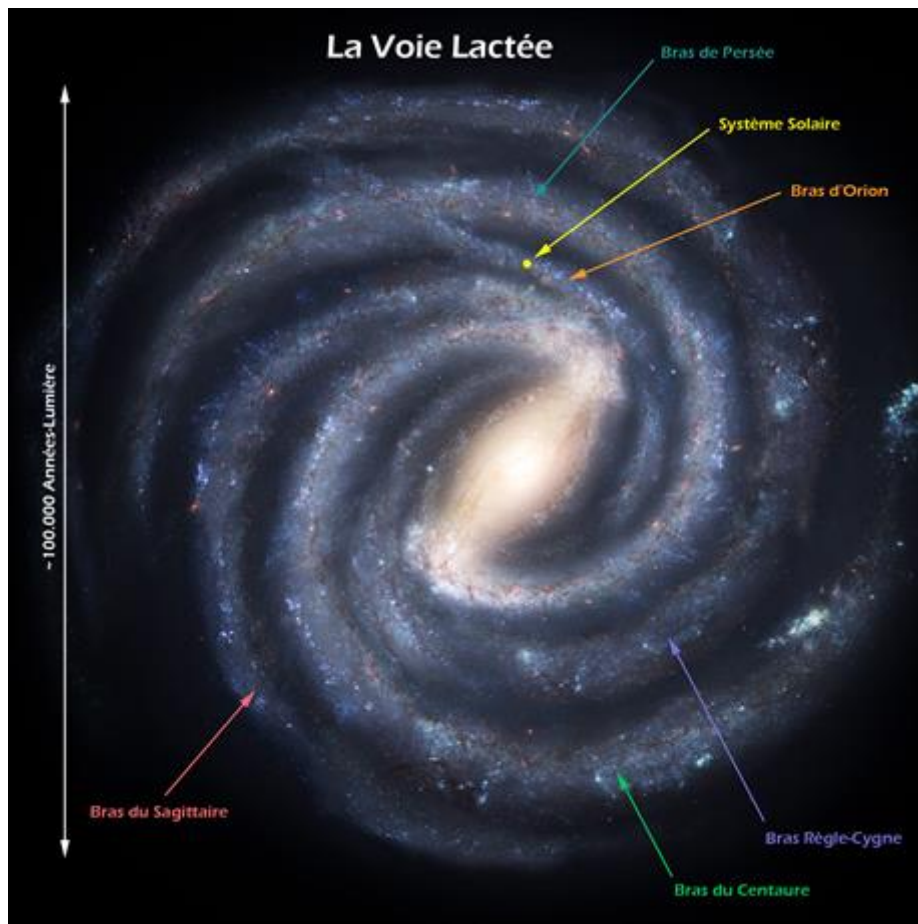
ORBITE SUPÉRIEURE

J'ai reçu 0 bonne réponse.

Voie lactée : qu'est-ce que c'est ?

La Voie lactée est le nom de notre galaxie. Foyer du Système solaire, elle est de type spiral, s'étend sur environ 100.000 années-lumière et contient 100 à 400 milliards d'étoiles. À cela il faut ajouter au moins autant de planètes.

Depuis la Terre, on ne peut observer qu'une coupe transversale de la [Voie lactée](#), épaisse de 1.000 à 3.000 années-lumière. Elle apparaît alors comme une traînée de lumière blanche laiteuse parcourant le ciel, d'où son nom. Observée dès l'Antiquité par les Anciens, elle est ainsi baptisée d'après la mythologie grecque, selon laquelle Héra aurait arraché Héraclès, fils de Zeus, de son sein, faisant ainsi gicler le lait sur la voûte céleste.



Création artistique représentant la Voie Lactée à partir de plusieurs observations. © Akwa/Wikicommons

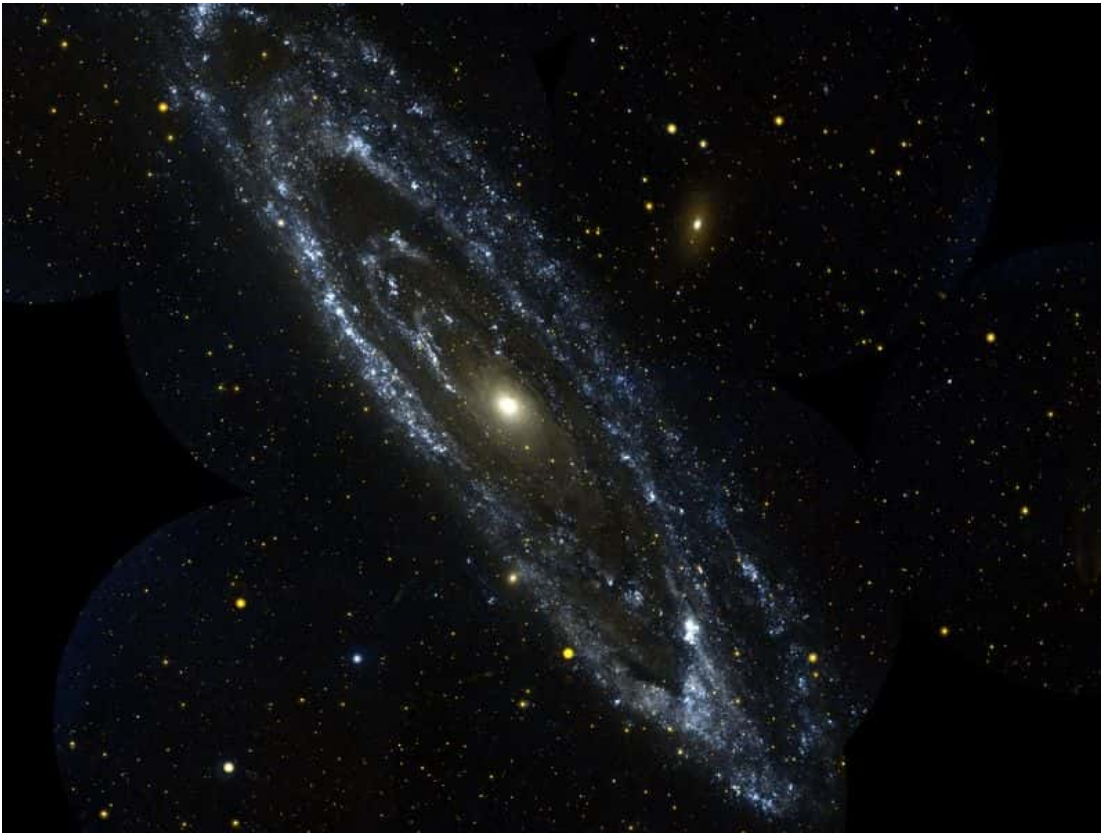
La structure de la Voie lactée

[Galilée](#) observe en 1610, grâce à sa lunette astronomique, que cette traînée blanchâtre est en fait une région dense en [étoiles](#), indiscernables à l'[œil](#) nu. Plus tard, la structure de la galaxie a été progressivement révélée entre 1918 et 1928 par Harlow Shapley, Jan Oort et Bertil Lindbald. Le premier comprend que la Voie lactée est un disque et repère son centre, situé dans la [constellation](#) du Sagittaire. Les deux autres [astronomes](#) montrent que les étoiles tournent autour du [centre galactique](#), rapidement au voisinage du centre, plus lentement en périphérie.

La Voie lactée est plus précisément une [galaxie spirale barrée](#), c'est-à-dire qu'au milieu de la galaxie se trouve une barre d'étoiles de laquelle partent quatre bras majeurs. L'existence de ces bras a été découverte en 1951 par Edward Mills Purcell et Harold Ewen grâce à des mesures en radioastronomie. Le [Système solaire](#) est situé en périphérie de la galaxie, dans l'un des bras spiraux appelé bras de [Orion](#), à envi-

ron 27.000 années-lumière du centre autour duquel il tourne à une [vitesse](#) de 230 km/s.

Le centre, justement, aussi appelé bulbe galactique, est gonflé par une grande densité d'étoiles et mesure 10.000 années-lumière de diamètre. De plus, au cœur de la galaxie se tapit [Sagittarius A*](#), un [trou noir supermassif](#) de plus de quatre millions de [masses](#) solaires. L'ensemble de la galaxie est entouré d'un halo, qui serait constitué d'étoiles, de [gaz](#) et de [matière noire](#).



Grande sœur de notre galaxie, Andromède est également une galaxie spirale. © Nasa, JPL, *California Institute of Technology*

La place de la Voie lactée dans l'univers

En 1924, l'astronome [Edwin Hubble](#) conclut qu'il existe d'autres galaxies dans l'[univers](#). En effet, des objets que l'on prenait pour des [nébuleuses](#) en raison des [téléscopes](#) insuffisamment puissants, tels [NGC 6822](#), [M33](#) et M31, sont en réalité des galaxies : respectivement, la galaxie de Barnard, du Triangle et d'Andromède.

La Voie lactée appartient au [Groupe local](#), un amas d'une soixantaine de galaxies mesurant 10 millions d'années-lumière de diamètre, qui contient également, la galaxie d'[Andromède](#). Le Groupe local fait quant à lui partie du [superamas](#) de la Vierge, lui-même inclus dans une structure encore plus grande, un superamas appelé [Laniakea](#).

En outre, la galaxie n'est pas immobile dans l'espace. Elle se [déplace](#) à 630 km/s, soit 2,3 millions de kilomètres par heure, par rapport au [fond diffus cosmologique](#), probablement attirée par un superamas de galaxies d'un côté et repoussée par un grand vide de l'autre.



Florian Freistetter

Étoiles

Une histoire de l'Univers en cent astres

- Illustrations : Scott Pennor's
- Traduction (Allemand) : Aline Gerstner

Certaines ne sont visibles qu'avec les plus grands télescopes. D'autres brillent si intensément qu'elles peuplent nos mythes depuis l'aube de l'humanité. Elles sont désignées par de mystérieuses références ou portent haut leur nom – Alcyone, Monocerotis, Ras Algethi, Thuban, Zeta Ophiuchi, etc. Les étoiles nous fascinent, mais les connaissons-nous vraiment ? Il y a bien Algol, la « tête de l'ogre » en arabe, dont l'étrange éclat variable a été repéré dès l'Égypte antique ; ou

61 Cygni, la première étoile dont on a pu mesurer l'éloignement, révélant l'immensité de l'Univers ; ou encore 34 Tauri, plus connue sous le nom... d'Uranus. Naines blanches, supernovae, étoiles à neutrons, géantes rouges, pulsars : voici l'histoire de 100 étoiles qui, ensemble, composent une somptueuse symphonie.

La caméra FRIPON



http://www.fripon.org/IMG/jpg/stations/RT_FRBR04.jpg

Château d'eau

De Kersauz

Rue Guillemette le Barbier
56730 Saint Gildas de Rhuys

Renseignements :

Téléphone-répondeur : 09 53 52 85
63

Messagerie :

clubastrorhuys@gmail.com

Le club est ouvert à tous (adultes et enfants).