Une météorite « anticonformiste » : levons le voile sur les aubrites

Richard Tremblier, président de la SAGA et Nicole Préaux, membre de la SAGA.

I. Les circonstances

La météorite d'Ensisheim

En juin 2023, je suis allé me promener à Ensisheim, en Alsace, pour voir le lieu probable de la chute de la célèbre météorite qui est exposée dans le centre-ville, au musée municipal situé au Palais de la Régence. Elle est tombée, en 1492, à 3 km du centre-ville, sur la route de Battenheim. Le poids estimé de la météorite au moment de la chute est de 130 kg.



Figure 1. Météorite d'Ensisheim, datée de 4,7 milliards d'années, dont la chute a été observée et qui a été recueillie et conservée. Photo R. Tremblier, juin 2019.

Cette météorite tomba au lieu-dit des Octrois, au sud d'Ensisheim. Le 7 novembre 1492, à 11 h, on entendit un violent coup de tonnerre suivi d'un bruit éclatant et prolongé qui, de nos jours, s'identifierait au bang supersonique d'un avion. Le plus gros morceau d'environ 53,5 kg est conservé à Ensisheim (figure 1). Divers autres fragments sont conservés aujourd'hui dans des musées, à Vienne, Saint-Pétersbourg, New York et Londres. Le 2^e morceau le plus important, de 8,5 kg, est conservé au Muséum national d'Histoire naturelle, à Paris.

Je suis donc allé voir le lieu probable de la chute, sur une petite route de campagne. Rien de palpitant. Juste une petite stèle commémorative (figure 2).



Figure 2. Lieu probable de la chute de la météorite d'Ensisheim. Photo R. Tremblier, juin 2023.

Le salon aux météorites

Ma curiosité satisfaite, j'ai profité de ma présence à Ensisheim pour aller flâner au salon aux météorites qui se tenait à ce moment-là. Des exposants du monde entier viennent présenter leurs trouvailles, leurs recherches et le résultat de leurs travaux. Il y a donc là d'innombrables météorites entières, fragmentées, en lames minces, des brèches d'impact, des tectites, etc., provenant de multiples chutes.

À la SAGA, nous avons eu de nombreux exposés sur les météorites, où on nous a expliqué comment les reconnaître. Pour l'essentiel, on distingue deux grands types de météorites.

Il y a tout d'abord les *météorites métalliques* qui ne ressemblent à rien d'autre qu'à un bout de métal, hormis les cupules à l'extérieur (figure 3).





Figure 3. Fragment de la célèbre chute de Sikhote-Aline (sidérite), tombée en Sibérie orientale, en 1947.

Photo Internet libre de droits.

On les connaît aussi sous la forme de tranches de pallasite, montrant les inclusions d'olivine dans le mélange fer/nickel (figure 4), parfois sciée et polie pour en faire un bibelot. L'une des plus célèbres pour donner de beaux objets est celle d'Esquel, en Argentine. C'est une pallasite trouvée en 1951 dans la province de Chubut.

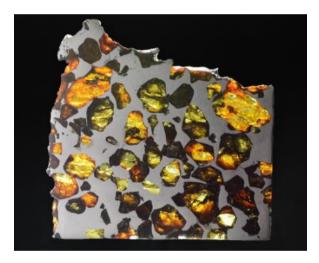


Figure 4. Fragment de la météorite pallasite d'Esquel, en Argentine. Dim : 9 x 8,6 cm. Poids : 93 g. Échantillon et photo Alain Carion.

Une autre image familière est celle des météorites métalliques sciées qui, après attaque à l'acide, montrent les célèbres figures de Widmanstätten, si caractéristiques des météorites (figure 5).

Il y a enfin *les météorites pierreuses*, ou chondrites, ainsi dénommées car elles résultent de l'accumulation de chondres, petites sphères minérales agglomérées les unes aux autres. On les reconnaît bien avec leur belle croûte de fusion, toute noire, résultant du frottement intense dû à leur entrée dans l'atmosphère terrestre, et à leur cassure beaucoup plus claire mettant les chondres en évidence (figure 6). Avec même parfois, des traces de leur orientation pendant cette traversée.



Figure 5. Figures de Widmanstätten dans une météorite métallique. Collection privée. Photo R. Tremblier 2023.



Figure 6. Météorite pierreuse ou chondrite. Photo R. Tremblier, 2023.

II. La surprise

Et là, au détour d'une allée, au milieu de tous ces objets « familiers », mon regard est attiré par un caillou, qui, pour un ignorant comme moi, ressemblait à tout sauf à l'image stéréotypée que je me faisais des météorites. Elle est d'aspect blanc crème, à l'éclat vitreux, qui me faisait penser à de l'écume de mer (sépiolite), avec de gros cristaux prismatiques, et, pourtant cataloguée comme une météorite, elle me faisait perdre tous mes repères. Bien entendu, tomber sur cette roche blanche montrant de tels gros cristaux (figures 7 et 8), au vu de ce que j'ai appris, m'a fait penser que ce n'était pas une météorite. Erreur!

Ma curiosité a été piquée au vif par cet échantillon minéralogique qui détonnait dans mon esprit.







Figure 7, à gauche. Aubrite à enstatite trouvée, en 2022, à Sebkha el Melah au Mali. Photo R. Tremblier, 2023. Figure 8, à droite. Des cristaux d'enstatite extraterrestres. Photo R. Tremblier, 2023.

Cette envie d'en savoir plus m'a conduit à faire appel à notre amie Nicole Préaux, membre de la SAGA, qui ne manquerait ce rendez-vous pour rien au monde. C'est elle qui m'a fait découvrir cette manifestation. Je lui ai demandé d'éclairer ma lanterne sur ce sujet.

III. L'explication

Effectivement, chez un exposant, une surprise nous attendait : de beaux cristaux clairs, de plusieurs centimètres, soit individuels, soit imbriqués en un ensemble très clair, avec quelques traces gris pâle en surface, très loin de l'image classique d'une météorite (figure 9).



Figure 9. Sebkha el Melah 001 : quatre cristaux non choqués d'enstatite (de 2,5 g et 3 cristaux ~ 0,6 g).

Photo N. Préaux. Collection privée.

Et pourtant...

« Sebkha el Melah 001 » (figures 7 et 9) a été trouvée en mars 2022 dans une région du nord-ouest du Mali par des touaregs (coordonnées : 21.63885°, -1.82974°) (Agee *et al.*, 2023) : 17 kg de gros agrégats de cristaux pegmatitiques clairs, présentant un contraste optique faible avec le paysage, n'attirant pas l'aimant. 12,5 kg, dont une masse principale de 3,55 kg, furent vendus à M. Bachir Salek, négociant habitué aux achondrites atypiques sahariennes, telles que des météorites lunaires ou des diogénites venant de Vesta. L'analyse pétrographique, citée dans le *Meteoritical Bulletin* n°111 (1) et dans *Mindat* (2), fut effectuée par A. Ross et C. Agee, un échantillon de 216 g ayant été déposé à l'UNM (University of New Mexico).

Pétrographie (A. Ross et C. Agee, UNM - University of New Mexico)

Les analyses par microsonde électronique et la microscopie à lumière réfléchie montrent que l'enstatite représente environ 98 % de cette météorite. De petits grains de diopside épars ont été détectés. Un seul grain d'olivine (Mg₂SiO₄) a été trouvé dans la section analysée à la microsonde (l'analyse montre que ces différents silicates sont complètement dépourvus de fer). De petits grains d'alliages de fer et nickel [kamacite et taénite (plus riche en Ni)], de phosphure [schreibersite (Fe,Ni)₃P], de sulfures [troïlite titanifère, troïlite (FeS)] et de daubréelite (Fe₂Cr₂S₄) étaient les seuls minéraux opaques accessoires observés. Aucun autre sulfure n'a été détecté, ni aucun feldspath n'a été trouvé dans le support de la microsonde.



Les cristaux, formés d'enstatite, sont blancs, parfois translucides ; ils mesurent de 0,5 à 5 cm. Cette taille imposante indique qu'ils ont cristallisé (ou recristallisé à partir d'un milieu enrichi en enstatite) très lentement ; ils sont intacts, cette météorite n'a donc pas subi de choc important.

L'enstatite (Mg₂Si₂O₆) est un orthopyroxène magnésien ; c'est un minéral souvent rencontré dans les chondrites et les achondrites, particulièrement abondant dans les chondrites à enstatite, les aubrites, et les autres achondrites à enstatite. La fine croûte de fusion, due à l'entrée atmosphérique, présente un aspect inhabituel avec sa couleur blanc ou jaune crème, avec quelques patchs grisâtres chez Sebkha el Melah 001; en effet, la plupart des météorites comportent au moins un peu de fer qui confère une couleur noire à leur croûte de fusion. Un œil exercé était nécessaire pour reconnaître cette aubrite particulièrement riche en enstatite et pauvre en fer.

D'autres aubrites, souvent des chutes observées, sont connues depuis longtemps (figures 10 à 13). Cependant, les aubrites sont très rares : 83 aubrites et 6 aubrites anormales, sur plus de 70 000 météorites certifiées, ont été répertoriées par la Meteoritical Society. La plupart des aubrites sont des brèches plus ou moins fines; quelques-unes, comme Pena Blanca Spring (figure 11) et Norton County (figures 12 et 13), contiennent de grands clastes et des cristaux pluri-centimétriques d'enstatite. Il y a quelques rares aubrites qui ne sont pas des brèches, telles Mount Egerton, qui est exceptionnellement riche en fer et est donc classée parmi les aubrites anormales et Shallowater qui viendrait d'un autre corps parent (qu'on pourrait dès lors exclure des aubrites et reclasser dans les achondrites à enstatite anormales).



Figure 10. Quelques fragments d'aubrites. Au centre, Sebkha el Melah 001 ; autour, dans le sens des aiguilles d'une montre, à partir du coin supérieur gauche : Sebkha el Melah 001 (encore une fois), Pena Blanca Spring, Mount Egerton (AUB an), Norton County. Photo N. Préaux, collection privée.

Parmi les 83 aubrites, c'est Sebkha el Melah 001 qui présente les cristaux les plus grands et les plus purs, dans une texture nettement pegmatitique. Ce n'est pas une brèche; c'est l'aubrite la plus riche en enstatite (98 %) dans sa composition modale et c'est celle qui contient le moins de diopside et de forstérite.

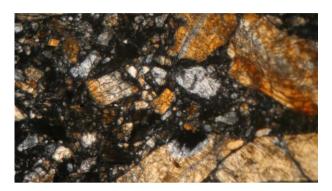


Figure 11. Pena Blanca Spring en lame mince. AUB, brèche de texture porphyrique. En haut: exsolution de clinopyroxène dans un cristal d'enstatite (Bystricky et al., 2016). LPA. Longueur du champ: 37 mm. Photo N. Préaux, collection privée.



Figure 12. Lame mince dans la météorite Norton County (AUB), en LPA. Photo N. Préaux, collection privée.



Figure 13. Cristaux d'enstatite dans cette lame mince de Norton County. Noter les clivages et les fractures du cristal beige d'enstatite, qui mesure 0,4 x 0,15 mm. LPA. Longueur du champ: 0,31 mm. Photo N. Préaux.



Les aubrites sont des pyroxénites, formées principalement d'enstatite; elles présentent des proportions variables de pigeonite inversée, de forstérite, de plagioclase albitique, ainsi que de faibles quantités d'alliages fer-nickel, de troïlite et d'autres sulfures accessoires. Certains sulfures, tel l'oldhamite (CaS), la daubréélite (FeCr₂S₄), et la caswellsilverite (NaCrS₂) ne peuvent s'être formés que sous des fugacités extrêmement basses d'oxygène.

Les sulfures sont les principaux porteurs des terres rares dans les aubrites. Les aubrites normales présentent généralement un appauvrissement en terres rares légères et une anomalie négative de l'europium. Ces données minéralogiques ne seraient pas compatibles avec la formation du corps parent des aubrites (APB = aubrite parent body) par simple condensation de la nébuleuse primitive. Les pyroxénites aubritiques sont plutôt des roches magmatiques qui ont cristallisé sous les conditions extrêmement réductrices. Dans ce cas, certains éléments volatils et modérément volatils sidérophiles deviennent plus chalcophiles (Barrat *et al.*, 2016, Ray *et al.*, 2021).

L'APB se serait formé, comme Mercure, en milieu réducteur, dans une région du disque proto-solaire plus interne que les chondrites ordinaires, la Terre, Mars, Jupiter, les chondrites carbonées et les comètes. Les rapports isotopiques de l'oxygène (notamment le paramètre indépendant de la masse D¹⁷O) et d'autres éléments semblent indiquer que les corps parents des chondrites à enstatite (qui ont probablement contribué à former la Terre) et des achondrites à enstatite proviennent d'une même région interne, pauvre en oxygène, du disque proto-solaire. La superclasse des météorites à enstatite inclut :

- les chondrites à enstatite EH (les plus réduites) et EL (les moins réduites) ;
- quelques chondrites à enstatite anormales ou non groupées ;
- les aubrites, quelques météorites réduites riches en métal, peut-être dérivées du manteau de l'APB (comme Mount Egerton) et d'autres achondrites contenant de l'enstatite (brèches d'impact fondues par exemple).

Ces météorites dériveraient de corps parents différents, plus ou moins différenciés. On ne sait pas si certains de ceux-ci ont fondu ou pas ; les corps parents différenciés se sont peut-être accrétés très tôt, alors qu'il y avait encore suffisamment d'²⁶Al pour entrainer leur fusion, ou, autre possibilité, se sont formés plus tard et ont subi des événements collisionnels intenses entrainant la fusion et permettant la différentiation (Rubin et Chi Ma, 2021).

Le corps parent des aubrites (APB) se serait formé entre 3 et 5 Ma après la formation des CAI (inclusions minérales riches en calcium et aluminium, en anglais *Ca Al rich inclusions*, vieilles de 4 568 Ma, qui sont les plus anciens solides du système solaire), à partir

d'un corps parent de type chondrite à enstatite. L'APB aurait effectué au moins une ségrégation partielle entre métaux et silicates (Ray et al., 2021; Zhu et al., 2021, Wilbur et al., 2022) et une différenciation silicate-silicate (Zhu et al., 2021), mais ces processus étaient probablement complexes en raison de l'excavation, par impact, du mélange et de la ré-accrétion (Ray et al., 2021).

Le groupe principal des aubrites présente généralement des textures de cumulats. Il existe des preuves pétrologiques et géochimiques d'une redistribution subsolidus des éléments traces, liée peut-être au métamorphisme thermique (Barrat *et al.*, 2016). Celui-ci serait cohérent avec les données sur l'âge des aubrites. Celles-ci indiquent une formation cumulée d'environ 3 à 5 Ma après les premières CAI, un historique de refroidissement potentiellement prolongé ou bien un épisode de métamorphisme qui aurait provoqué une réinitialisation de chronomètres radioactifs vers 13 Ma après les premières CAI (Keil, 2010).

Le 21 janvier 2024, l'astéroïde 2024 BX1, un géocroiseur, a été observé avant de se fragmenter et percuter la Terre à Ribbeck, en Allemagne (Spurny et al., 2024); des morceaux de cette chute d'aspect inhabituel ont pu être rapidement ramassés par des chercheurs de météorites polonais très expérimentés, puis par des scientifiques; d'après les analyses pétrologiques et minéralogiques par microsonde à faisceau d'électrons effectuée au MNB (Museum für Naturkunde Berlin), cette météorite est une aubrite (brèche à gros grains) qui a été référencée au Meteoritical Bulletin n° 113, le 16 février 2024 (3).

Le pourcentage croissant d'aubrites, et en particulier de chutes observées ces dernières années, est surprenant; il correspond peut-être à une meilleure reconnaissance des aubrites et à un intérêt grandissant pour ces pierres formées en milieu très réducteur, comme le fut la planète Mercure.

IV. La météorite d'Aubres

Comme vient de nous le présenter Nicole Préaux, cette météorite est donc une aubrite. Cette classification fait référence à une petite météorite (spécimen type), tombée le 14 septembre 1836 dans le petit village d'Aubres, au nord-est de Nyons, dans la Drôme (figure 14).

Voyons d'ailleurs ce qu'en disait le grand minéralogiste Alfred Lacroix, en 1927 : « Cette chute était restée inaperçue. La chute est estimée à environ 800 grammes. 667 grammes ont été retrouvés dans le pays, en 1845. La plus grande partie se trouve au British Muséum, qui en a cédé un fragment au Muséum (le nôtre), d'un blanc de lait (enstatite), au milieu duquel se trouvent une petite plage de fer nickelé et des grains microscopiques d'oldhamite. La structure grenue a été



déformée par actions mécaniques. Il est à remarquer que, contrairement à la règle qui semble ne pas souffrir d'exception dans les chondrites, le fer métallique des aubrites, qui n'existe d'ailleurs qu'en infime proportion, est pauvre en nickel ».



Figure 14. Échantillon de la météorite d'Aubres conservé au Muséum. Coll. Muséum, © DR.

Conclusion

Je tenais à vous présenter ce petit caillou dont j'ai croisé le chemin, en juin 2023, au salon d'Ensisheim. Je remercie ma curiosité d'avoir attiré mon attention vers cette pierre très « anticonformiste ». Je remercie le salon d'Ensisheim d'exister et de nous permettre de parfaire nos connaissances dans ce domaine. Je tenais aussi à vous présenter ce genre de météorites dont le type est conservé au Muséum depuis une centaine d'années et qui a servi par son étude à définir un groupe particulier de météorites dont on parle peu. C'est la référence pour les aubrites.

Nicole Préaux et moi-même tenons à remercier François Farges, professeur au Muséum, qui nous a aidés à mettre la main sur le texte d'Alfred Lacroix, Matthieu Gounelle, professeur au Muséum, qui nous a fourni une photo de l'échantillon de la météorite d'Aubres du Muséum et Emmanuel Jacquet, maître de conférences au Muséum, qui a bien voulu relire la partie de notre article concernant les aubrites. Et bien entendu tous nos remerciements à Annie Cornée pour sa relecture et la mise en forme de cet article.

Bibliographie

Agee C. B., Ross, A. J. et Spilde M. N., 2023. Sebkha el Melah 001: unbrecciated pegmatitic aubrite. *LPI*

Contributions, 2023, vol. 2806, p. 2810. (Résumé, 54th Lunar and Planetary Science Conference).

Barrat J.A., Greenwood R.C., Keil K., Rouget M.L., Boesenberg J.S., Zanda B. et Franchi I.A., 2016. The origin of aubrites: evidence from lithophile trace element abundances and oxygen isotope compositions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 192, p. 29-48 et références indiquées.

Bystricky M., Lawlis J., Mackwell S., Heidelbach F. et Raterron P., 2016. High-temperature deformation of enstatite aggregates, *J. Geophys. Res. Solid Earth*,121, p. 6384-6400 et références citées.

Keil K., 2010. Enstatite achondrite meteorites (aubrites) and the histories of their asteroidal parent bodies. *Geochemistry*, 70, p. 295–317.

Lacroix A., 1927. Les météorites tombées en France et dans ses colonies et conservées au Muséum national d'Histoire naturelle, avec remarques sur la classification des météorites. Réunion mensuelle des naturalistes du Muséum. *Bulletin du Muséum national d'histoire naturelle*, vol. 33, n° 5, p. 411-453.

Peterson L. D., Newcombe M. E., et al., 2023. The H content of aubrites: an evaluation of bulk versus in situ methods for quantifying water in meteorites. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 620, p. 118341.

Ray S. et Wadhwa M., 2021. Correlated iron and silicon isotope compositions of aubrites as tracers of differentiation processes. 52nd *Lunar and Planetary Science Conference* (LPI Contrib., n° 2548).

Ray S., Garvie L.A.J., Rai V.K., Wadhwa M., 2021. Correlated iron isotopes and silicon contents in aubrite metals reveal structure of their asteroidal parent body. *Scientific reports*, 11, 22552 (2021).

Spurny P., Borovicka J., Shrbeny L., Hankey M. et Neubert R., 2024. Atmospheric entry and fragmentation of small asteroid 2024 BX1: bolide trajectory, orbit, dynamics, light curve, and spectrum. arXiv preprint. https://arxiv.org/abs/2403.00634.

Wilbur Z.E. *et al.*, 2022. The effects of highly reduced magmatism revealed through aubrites. *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 57, 7, p. 1387-1420.

Zhu K., Moynier F., Schiller M., Becker H, Barrat J.-A. et Bizzarro M., 2021. Tracing the origin and core formation of the enstatite achondrite parent bodies using Cr isotopes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 308, p. 256-272.

Notes

(1) *Meteoritical Bulletin*, n° 111, 7 juin 2023. Sebkha el Melah001.

https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php?code=78420.

(2) Mindat. Sebkha el Melah 001.

https://www.mindat.org/loc-434669.html.

(3) Meteoritical Bulletin, n°113, 16 février 2024. Ribbeck.

https://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php?code=81 447.

