



HAL
open science

Succès et échecs de l'étude des inclusions fluides dans les roches extra-terrestres

Jacques Touret, Nicole Guilhaumou

► To cite this version:

Jacques Touret, Nicole Guilhaumou. Succès et échecs de l'étude des inclusions fluides dans les roches extra-terrestres. Travaux du Comité français d'Histoire de la Géologie, 2019, 3ème série, tome 33, pp.5-14. hal-04149797

HAL Id: hal-04149797

<https://hal.science/hal-04149797>

Submitted on 6 Jul 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Succès et échecs de l'étude des inclusions fluides dans les roches extra-terrestres

Jacques TOURET

COFRHIGEO - Auteur correspondant, 121 Rue de la Réunion,
75020 Paris (ljtouret@orange.fr)

Nicole GUILHAUMOU[†]

Équipe Météorites - MNHN

Résumé: Le retour sur Terre des premiers échantillons lunaires en 1969 fut le signal d'une recherche coopérative sans précédent dans les sciences de la Terre, à laquelle participèrent la plupart des pétrographes du monde entier. Il eût été essentiel de trouver des traces de fluides terrestres, H₂O et CO₂, mais quelques résultats apparemment positifs se révélèrent être des artefacts de résines epoxy. Restaient les inclusions vitreuses qui, en revanche, ont révolutionné les théories pétrogénétiques, en montrant notamment l'importance des phénomènes d'immiscibilité magmatique. L'histoire se répéta quelques années plus tard avec la « découverte » d'inclusions aqueuses dans des météorites, causées par une contamination terrestre au moment de la préparation des échantillons. Il en a résulté une grande méfiance pour l'intérêt d'études d'inclusions fluides dans les roches extra-terrestres. Les travaux se sont alors concentrés sur les inclusions vitreuses, devenues une voie de recherche très féconde. Mais l'intérêt pour les inclusions fluides a été subitement relancé par l'arrivée sur Terre en 1998 de deux météorites contenant des cristaux de halite (NaCl), d'origine certainement extraterrestre. Provenant sans doute de l'astéroïde Vesta ces cristaux ont démontré l'existence d'eau libre au sein de la ceinture des météorites. Ils ont renouvelé l'intérêt des recherches sur les inclusions fluides dans les roches extra-terrestres.

Mots clés : météorites – inclusions (fluides et vitreuses) – artefacts.

Abstract. The return to Earth of the first lunar samples in 1969 was the signal for an unprecedented cooperative research, in which most petrographers from all over the world participated. It would have been essential to find traces of terrestrial fluids, H₂O and CO₂, but some apparently positive results turned out to be epoxy-resins artifacts. What remained were the glassy inclusions, which on the other hand revolutionized petrogenetic theories, showing in particular the importance of magma-immiscibility phenomena. History repeated itself a few years later with the "discovery" of aqueous inclusions in meteorites, caused by terrestrial contamination at the time of sample preparation. This led to a great mistrust regarding fluid-inclusion studies on extraterrestrial rocks. Work then focused on glassy inclusions, which became a very fertile avenue of research. But interest in fluid inclusions was suddenly revived by the arrival on Earth in 1998 of two meteorites containing halite crystals (NaCl), certainly of extraterrestrial origin. Probably coming from the asteroid Vesta, these crystals demonstrated the existence of free water in the meteorite belt. They have rekindled interest in research on fluid inclusions in extraterrestrial rocks.

Keywords : meteorites – inclusions (fluid and glassy) – artifacts.

En Juillet 1969, la mission Apollo XI rapporta sur Terre les premiers échantillons de roches lunaires, suivie par d'autres missions jusqu'en 1972, pour un total d'environ 380 kg. Meticuleusement conservés par la Nasa, ces premiers échantillons de roches extra-terrestres suscitérent une recherche collective sans précédent,

dans laquelle furent impliqués de nombreux laboratoires du monde entier. La philosophie de cette recherche fut assez particulière : on disposait de peu d'échantillons, délivrés par la Nasa au gramme près, avec la demande expresse de justifier toute perte d'échantillon et de retourner à la Nasa le reliquat au terme de l'étude. Les

études devaient faire appel aux techniques les plus avancées, concernant en particulier la géochimie isotopique. On découvrit vite que ces roches étaient pour l'essentiel des basaltes, assez comparables aux roches terrestres dont elles différaient par certains aspects minéralogiques (par exemple l'abondance du fer natif) ou la composition isotopique. Beaucoup de ces différences s'expliquent par l'absence d'eau libre à la surface de la Lune. Mais il n'est pas exclu qu'une certaine quantité de glace puisse se trouver en profondeur, comme l'ont montré les projections créées par la chute (volontaire) de la sonde LCROSS sur la surface lunaire en novembre 2009, qui ont permis d'en récupérer près d'une vingtaine de kilogrammes

(https://www.nasa.gov/mission_pages/LCROSS/overview/index.html).

La recherche de traces de fluides, en particulier d'eau, devint ainsi rapidement un axe privilégié. Après un demi-siècle, cette voie de recherches continue de faire l'objet de nombreux travaux. Sur Terre, l'action de fluides sur des roches comme le basalte se marque soit par des phénomènes d'altération superficielle, soit par de minuscules témoins préservés dans certains minéraux sous forme d'inclusions. Les roches lunaires ne comportent aucune trace d'altération. En revanche, les inclusions y sont relativement abondantes, bien identifiables sous forme de cavités grossièrement sphériques de la taille de quelques microns, apparemment vides (inclusions gazeuses), ou contenant une phase vitreuse, renfermant elle-même souvent une « bulle (ou vide) de retrait » (Inclusion vitreuse).

Il se trouve qu'à la fin des années 1960, les techniques d'étude des inclusions fluides venaient de faire de grands progrès grâce à la mise au point de platines spécifiques (microthermométriques) permettant de mesurer sous le microscope les températures des changements d'état (solide, liquide, vapeur, supercritique) de la phase fluide. L'idée initiale était partie de Russie dans les années 1940 (Georg Lemlein à Moscou, en pleine guerre russo-allemande), puis introduite à l'Ouest après la fin de la guerre, simultanément aux USA (Edwin Roedder, US Geological Survey) et en France par Georges Deicha (qui par ses origines russes avait connaissance de la littérature soviétique) à Paris, ou Bernard Poty à Nancy, lui-même initié aux techniques

d'études des inclusions fluides par Nicolaï P. Ermakov à Moscou. Après une dizaine d'années de recherches sur les inclusions fluides des quartz des Alpes, Bernard Poty mettait au point le premier modèle de platine microthermométrique intégrée, comportant porte-échantillon, dispositif de refroidissement-chauffage et instruments de mesure. Commercialisé sous le nom de Chaixmeca, cet appareil permet de multiplier les mesures, : plusieurs dizaines par heure, alors qu'il fallait auparavant plusieurs journées, voire des semaines, pour en effectuer une seule. Le premier exemplaire, mis en œuvre au CRPG de Nancy au cours de l'été 1970, marque le véritable début de l'étude moderne des inclusions fluides en pétrographie et géochimie.

Au début des années 1970, le groupe nancéien compte trois personnes qui, tout en restant très proches, se spécialiseront progressivement dans des domaines différents : Bernard Poty en métallogénie, Alain Weisbrod dans l'application de la thermodynamique aux roches métamorphiques et le premier auteur de cet article (J.T.) dans l'étude des roches de la croûte continentale profonde et du manteau supérieur. Deux chercheurs américains de renom sont venus nous rejoindre ce groupe, Lincoln Hollister (université de Princeton) et Maria Luisa Crawford (Bryn Mawr College), pour se familiariser avec ses techniques d'étude des inclusions. Lincoln Hollister était « Principal Investigator » de la Nasa et, à ce titre, recherchait (sans succès) des inclusions fluides dans un certain nombre d'échantillons lunaires. À Paris, Georges Deicha faisait de même, dans des lames minces confiées à Mireille Christophe-Michel Lévy, grande spécialiste française de l'étude des météorites. Au cours de l'été 1972, une rumeur venue de Paris nous informe à Nancy que les chercheurs parisiens auraient découvert « une bulle qui bouge » dans une inclusion d'un feldspath d'un basalte lunaire. La bulle persiste au-delà d'une température de 31°C, point critique du CO₂, éliminant la possibilité de ce gaz. Il s'agirait donc d'eau (liquide et vapeur), ce qui constituerait effectivement une découverte de première importance. Lincoln Hollister me demande alors de l'accompagner à Houston pour que nous puissions étudier systématiquement toutes les lames minces (plusieurs centaines) des réserves de la NASA. Indépendamment Edwin Roedder fait de même. Après quelques jours de travail acharné, nous nous

rendons tous à l'évidence : aucune inclusion fluide, mais simplement de nombreuses inclusions vitreuses, contenant un verre en général très peu altéré et, assez souvent, une « bulle de retrait » vide.

Edwin Roedder est alors le seul à détecter des traces de liquides mobiles dans certaines lames minces, causées par une immiscibilité entre résines et durcisseur dans les produits epoxy utilisés pour la préparation des lames minces. C'est probablement ce phénomène qui a été observé par les chercheurs parisiens, à moins que, comme pour les météorites (voir *infra*), il ne s'agisse d'une contamination terrestre au moment du sciage des échantillons. Mais, dans ce dernier cas, toutes les lames ayant été préparées à la Nasa suivant le même protocole, on peut se demander pourquoi les lames parisiennes auraient été les seules à présenter ce phénomène.

Après des années de recherches, aucune inclusion fluide n'a jamais été découverte dans les roches lunaires, « *the driest rocks known to man* » (Roedder, 1984, p. 535). Le problème a toutefois été relancé par la découverte de possibles traces de glace dans le sous-sol lunaire (sonde LCROSS, voir *supra*) et, surtout, par les analyses par sonde ionique de l'eau contenue dans les magmas parents des basaltes lunaires. Prématurément disparu, Erik Hauri (1966-2018) démontra en 2013 que ces magmas ainsi que le manteau dont ils proviennent contiennent autant d'eau que leurs équivalents terrestres (jusqu'à plusieurs milliers de ppm), eau qui a, de plus, la même signature isotopique que l'eau terrestre (Hauri *et al.*, 2013). Une découverte de première importance, qui confirme le modèle d'un origine de la Lune par collision de la Terre avec un astéroïde de la taille de Mars (Albarède *et al.*, 2013), mais qui pose le problème de l'absence totale d'inclusions dans les roches lunaires, alors qu'elles sont fréquentes dans les roches terrestres. Ce problème, pas encore complètement résolu, est sans doute lié à la faible gravité et à l'absence d'atmosphère de notre satellite.

En raison de l'absence d'inclusions fluides, les travaux sur les roches lunaires se concentrent ensuite sur les inclusions vitreuses qui, par suite de l'absence totale d'altération secondaire, sont plus abondantes et spectaculaires que dans les

roches terrestres. Parmi quelques résultats, en grande partie réalisés par l'infatigable Edwin Roedder et son collègue Paul. W. Weiblen de l'US Geological Survey, on peut citer la mise en évidence dans les verres basaltiques de cristallisation épitaxiale d'ilménite et autres minéraux sur les parois du minéral-hôte (olivine ou feldspath). Ces structures particulières ont permis de déterminer les séquences magmatiques et les taux de refroidissement des basaltes lunaires (Roedder, 1984, p. 536-544). S'y ajoute une grande variété de phénomènes magmatiques d'immiscibilité (e.g., silicate-silicate, silicate-sulfures, silicate-fer natif). Tous ces phénomènes de cristallisation épitaxiale ont été retrouvés dans les basaltes terrestres après leur observation dans les roches lunaires.

Parmi tous ces résultats, les immiscibilités magmatiques sont particulièrement importantes. Ce phénomène avait été étudié par John W. Greig dans un certain nombre de systèmes (CaO-SiO_2 , MgO-SiO_2 , FeO-SiO_2) qui présentaient de vastes champs d'immiscibilité à haute température. Mais Greig avait aussi établi en 1927 que l'addition d'une faible quantité d'alcalins faisait disparaître ces champs d'immiscibilité, ce qui conduisit Norman L. Bowen l'année suivante à affirmer leur inexistence dans les magmas naturels. L'immiscibilité fut alors abandonnée pour expliquer la variété des divers types pétrographiques, du basalte au granite. Bowen proposa un autre mécanisme, celui de la cristallisation fractionnée, d'abord violemment combattu par les « solidistes », puis universellement accepté après la fin de la seconde guerre mondiale (Bowen, 1928). Les inclusions des roches lunaires ont montré que, contrairement à ce que pensait Bowen, l'immiscibilité magmatique peut se produire dans des roches de composition courante (basalte), à des températures de l'ordre de 1000°C auxquelles fondent les basaltes terrestres (Roedder, 1984, p. 546 sq). Facile à observer dans les roches lunaires en raison de l'absence d'altération secondaire, ce phénomène est plus difficile à détecter dans les roches terrestres. Mais l'expérience des roches lunaires a conduit à porter plus d'attention à leurs équivalents terrestres. On a alors recherché avec succès les traces d'immiscibilité magmatique dans les roches terrestres. Au cours des vingt dernières années, de nombreux exemples ont été décrits, dans des basaltes, intrusions alca-

lines, ou carbonatites (e.g. Ilia V. Veksler *et al.*, 2007). Au même titre que la cristallisation fractionnée, ce mécanisme est maintenant reconnu comme étant de première importance, expliquant par exemple la formation de roches particulières comme certaines syénites néphéliniques (Markl, 2001) ou carbonatites (Panina, 2005). Au total, l'étude des inclusions dans les roches lunaires a apporté une impulsion décisive à l'étude des inclusions en général, aussi bien fluides (*a contrario!*) que vitreuses. Ces deux thèmes sont devenus l'un des champs de recherche les plus actifs en pétrographie et géochimie.

Inclusions dans les météorites

Comme pour les roches lunaires, les travaux concernant les inclusions dans les météorites jusqu'en 1984 sont rapportés dans l'ouvrage d'Edwin Roedder, 1984 (p. 558-570). Pour les travaux plus récents, il n'existe guère qu'une brève mise au point (Guilhaumou, 2006), développée ci-dessous.

Les travaux sur les roches lunaires ont donné une impulsion décisive aux études sur les météorites. Auparavant, il n'existait alors que de rares travaux en ex-Union Soviétique ou dans ses pays satellites, soit Novosibirsk (Yuri A. Dolgov) (e.g. Dolgov *et al.*, 1969), L'vov (maintenant Lviv en Ukraine) ou Pologne, avec l'annonce alléchante de la présence de CO₂ liquide (ou supercritique) dans des échantillons très divers, Pultusk H5 chondrite (Walenczak, 1977) ou Yustuk howardite, Chervony Kut eucrite, Saratov L4 chondrite ou Ochansk H4 chondrite (Yasinskaya, 1969). Ces résultats étaient d'autant plus intéressants que les roches (par exemple eucrite, de même composition que les gabbros terrestres) ou minéraux-hôtes (pyroxènes ou surtout olivines) contiennent fréquemment de telles inclusions sur Terre. Ces résultats furent obtenus par des chercheurs expérimentés : le groupe de L'vov (Viktor A. Kalyuzhnyi), où se trouvait Alexandra Yasinskaya, était avec ceux de Novosibirsk (Yuri A. Dolgov) et Moscou (Nikolaï P. Ermakov) le meilleur de l'ex-Union Soviétique pour les recherches sur les inclusions aussi bien fluides que vitreuses. Toutefois, ces résultats n'ont pas franchi la barrière idéologique du rideau de fer. Sans donner de détails, Edwin Roedder (p. 566) men-

tionna que des lames minces de Saratov, Ochansk et Chervony Kut (3 au total) ont été étudiées dans les laboratoires de l'USGS (Warner *et al.*, 1983), sans retrouver les inclusions décrites par Alexandre Yasinskaya ou Zygmunt Walenczak. Il conclut en disant que ces résultats ne sont pas acceptés (« *have not been generally accepted* ») et, de fait, toute recherche à l'Ouest sera pratiquement stoppée. La plupart des travaux récents ont privilégié l'imagerie de surface (microscopes ou microsondes électroniques ou ionique), sur des préparations en lame mince ou ultra-mince, dans lesquelles il n'y a aucune chance de retrouver la moindre trace d'inclusion.

Le danger des artefacts

Au cours de l'été 1977, Christine Fiéni et Michèle Bourot-Denise (deux chercheuses de l'équipe de Paul Pellas au Museum national d'histoire naturelle de Paris), travaillant sur les traces de fission des phosphates dans les chondrites, découvrent des « bulles qui bougent » dans des feldspaths, apatite et witlockite de Peetz (L6) et dans des witlockites de Saint Séverin (LL6). Analysées par microthermométrie, ces inclusions contiennent une solution aqueuse de très faible salinité, comparable en fait à l'eau du robinet. Une contamination est naturellement évoquée, mais a priori écartée en raison des précautions prises pendant la préparation des échantillons (préparation des lames minces sans eau, au pétrole). Présentée lors d'un congrès sur les météorites (Fiéni *et al.*, 1978), ces résultats suscitent un grand intérêt. De nombreux pétrographes, surtout aux USA, recherchent des inclusions fluides dans un grand nombre de météorites, avec des résultats spectaculaires. Dans l'achondrite ALPHA 77256 (diogénite), trouvée en Antarctique, Warner *et al.* (1983) découvrent des inclusions dont le comportement semble différent de celui des fluides terrestres. Ces inclusions contiennent une phase liquide et une bulle sphérique de vapeur, dont le volume est très variable (1 à > 90% du volume total). En conséquence, les températures d'homogénéisation varient de façon continue entre + 25 et 225°C, température maximale à laquelle pouvait être portée la préparation. Par refroidissement, le comportement à la fusion semble anormal : en général, pas de solidification jusqu'à une température de -180°C, mais certaines inclusions

montrent une déformation visible de la bulle de vapeur en dessous de -50°C , atteignant un maximum en dessous de -100°C . La bulle reprend son volume initial lors de la remontée des températures, entre -20 et -25°C . Dans certains cas, quelques minuscules fragments de solide apparaissent entre -80 et -90°C . Ces caractères semblent indiquer la formation d'un solide invisible mais qui, suivant les auteurs, ne peut être de la glace : lors de sa déformation, la bulle de vapeur diminue de volume alors que celui-ci devrait augmenter si le fluide était de l'eau. Les spectres Raman qui, à l'époque, commençaient à pouvoir être obtenus dans de minuscules inclusions, n'indiquent aucune trace des fluides habituels dans les roches terrestres (CO_2 , CH_4 , H_2 , O_2 , N_2 , composés soufrés), mais une bande large vers 2900 cm^{-1} pourrait indiquer la présence d'hydrocarbures aliphatiques d'un poids moléculaire supérieur à celui du méthane (Ashwal *et al.*, 1982). Ce fluide mystérieux, qui ressemble à de l'eau tout en n'en ayant pas tous les caractères, est suffisamment énigmatique pour que Roedder en fasse la conclusion de son ouvrage, tout en ajoutant quelques mots qui devaient bientôt se révéler prémonitoires: « *Although some of the inclusions may actually be artifacts from sample preparation, others seem valid; if so, they represent an appropriate enigma with which to end both this chapter and this book* » (Roedder, 1984, p. 584).

Comme on peut s'en douter, ce fluide mystérieux suscita immédiatement une foule de spéculations : la présence d'hydrocarbures aliphatiques pouvait être la trace d'une forme de vie extra-terrestre, les propriétés mystérieuses du liquide l'indice d'un fluide inconnu sur Terre, etc. Cette activité intense fut brutalement stoppée par les progrès de la microspectrométrie Raman et par une note de mise en garde (cautionary note) qui éclata comme un coup de tonnerre dans le petit monde des inclusionnistes (Rudnick *et al.*, 1985) : les bulles de vapeur dans les inclusions étaient tout simplement de l'air atmosphérique, en quantité tellement faible que les composants (N_2 et O_2) n'avaient pu être décelés en 1983, et les traces d'hydrocarbures correspondaient précisément aux huiles ajoutées aux liquides de refroidissement lors du sciage des échantillons (Rudnick *et al.*, 1985). Il y avait donc bien eu contamination, non pas au moment de la préparation des lames minces, mais lors du sciage des

météorites, bien que les distances impliquées (en général plusieurs centimètres) aient paru suffisantes pour éliminer tout risque d'infiltration.

On peut tirer un enseignement de ces péripéties, que l'on peut trouver amères, mais qui ont eu des retombées positives sur les études ultérieures : les roches lunaires et météorites sont des roches tellement sèches que, sur Terre, elles se comportent comme de véritables aspirateurs pour l'eau, avec, à pression et température ordinaires, des distances d'infiltration bien supérieures à ce que l'on pourrait supposer. Par ailleurs, ces résultats ont confirmé un fait bien connu des spécialistes, à savoir que l'interprétation des changements de phase (liquide-solide) par microthermométrie est très difficile, voire impossible pour les fluides aqueux de faible salinité quand ils contiennent des traces d'hydrocarbures. Toute estimation de composition basée sur ces données doit être complétée par des analyses directes, notamment par microspectrométrie Raman.

Inclusions vitreuses

Les nouvelles circulent rapidement au sein des inclusionnistes. La « note de mise en garde » entraîna alors une grande méfiance et plus personne n'osa aborder ce domaine. Comme pour les roches lunaires, les travaux se concentrèrent sur les inclusions vitreuses, qui n'existent pas dans tous les météorites mais qui, lorsqu'elles sont présentes, sont bien reconnaissables et faciles à étudier en raison de l'absence d'altération superficielle (Fig. 1).

La grande majorité des météorites sont des chondrites, caractérisées par la présence de chondres, sphérules silicatés d'un diamètre de 0,1 à quelques millimètres, composés principalement d'olivine, pyroxène et parfois de fer natif. La forme sphérique et la texture squelettique de nombreux minéraux indiquent la cristallisation rapide (quelques minutes) d'un matériel fondu en état d'apesanteur. Si l'origine des chondres est assez claire (cristallisation rapide de gouttes liquides silicatées), leur origine est controversée. Les chondres se formeraient dans la nébuleuse pré-solaire pendant la phase de condensation, au cours de laquelle des poussières ferro-silicatées se forment à partir du gaz de la nébuleuse. Pen-

dant cette période, un (ou des) bref(s) épisode(s) de haute température refond(ent) tout ou partie des poussières existantes. (Site Internet Planet-Terre, ENS-Lyon).



Fig. 1 : Inclusion vitreuse dans une olivine de Semarkona (L6 chondrite). (Tronche et al., 2007)

Les inclusions vitreuses, étudiées notamment par Edwin Roedder dans la chondrite carbonée Murchison (Roedder, 1984, p. 562 sq.), ne permettent pas de répondre à toutes les questions, mais apportent certains éléments de réponse. Depuis les années 1970, on évoquait une séquence « primitive » de condensation à haute température dans un gaz (principalement H₂), qui aurait d'abord formé les « inclusions réfractaires » (riches en Ca et Al), puis l'olivine, à plus basse température, environ 1170°C, et une pression < 10⁻³ atmosphère (Grossman et Olsen, 1974). Au contraire, les inclusions vitreuses étudiées par Roedder indiquent que olivine et inclusions réfractaires se forment à la même température, non pas par condensation, mais, comme sur la Terre, par cristallisation à partir d'un bain fondu (magma) riche en gaz. Les inclusions vitreuses sont des reliquats de ce magma. Mais elles contenaient à l'origine une quantité considérable d'olivine virtuelle qui, en se déposant sur les parois de l'olive-hôte, laisse un reliquat enrichi en Ca-Al. Les inclusions réfractaires ne sont donc pas précoces, mais tardives. L'importance des réactions entre verre et minéral-hôte a été précisée par l'équipe du Museum au moyen de profils à la microsonde ionique (Semarkona, Tronche et

al., 2007, Fig. 1). À Amsterdam, Jagoda Makjanic a montré que les olivines de la plus grosse météorite carbonée tombée sur Terre, Allende (que les cosmochimistes considèrent comme leur « Pierre de Rosette » tant elle a fourni d'information sur le Système solaire) avaient cristallisé à partir de deux magmas différents, dont un seul contenait le carbone caractéristique de cette classe de météorites (Makjanic et al., 1989). Les éléments volatils, cruciaux pour retracer l'évolution du système solaire, se retrouvent dans les vides de retrait, mais en quantité tellement faible qu'ils ne sont en général pas décelables. Toutefois, en combinant analyse infrarouge (Synchrotron FTIR) et microspectrométrie Raman, l'équipe du Museum a pu mettre en évidence des traces d'eau et d'azote dans les vides de retrait des inclusions vitreuses d'une autre météorite carbonée (Bencubbin), première preuve indubitable de trace d'eau extra-terrestre dans les météorites (Guilhaumou et al., 2003, Perron et al., 2008) (Fig. 2). Des analyses plus récentes par spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) ont montré que cette eau, précoce dans le Système solaire, proviendrait de clastes argileux au sein du nuage gazeux, déstabilisés par des impacts. L'azote trouvé précédemment au sein des bulles gazeuses dans les verres pourrait dériver de la déstabilisation de composés organiques lors de ces impacts (Guilhaumou, 2012). Après plus de cinquante ans, l'étude des inclusions vitreuses dans les minéraux des météorites reste une voie de recherches très active, faisant appel aux techniques d'analyse les plus modernes (Florentin et al., 2018).

Un cadeau tombé du ciel

La nature est imprévisible. Alors que tout espoir de trouver des fluides non contaminés était perdu, deux chutes observées en 1998 (Août: Zag, Maroc et Mars: Monahans, Texas) relancent complètement le problème. Bien que tombées à quelques mois d'intervalle et à plusieurs milliers de kilomètres de distance, ces deux météorites sont tellement semblables qu'elles ne peuvent provenir que du même corps parent, que l'on a déterminé comme étant Cérés, une planète naine située entre Mars et Jupiter (Zolenski, 2017). Toutes deux contiennent de grands cristaux de halite (sel gemme), d'un bleu

profond causé par irradiation dans l'espace. La chute de Monahans a été observée par le shérif local, qui a immédiatement recueilli les échantil

lons et les a préservés dans un sac étanche. Tout risque de contamination terrestre est ainsi écarté.

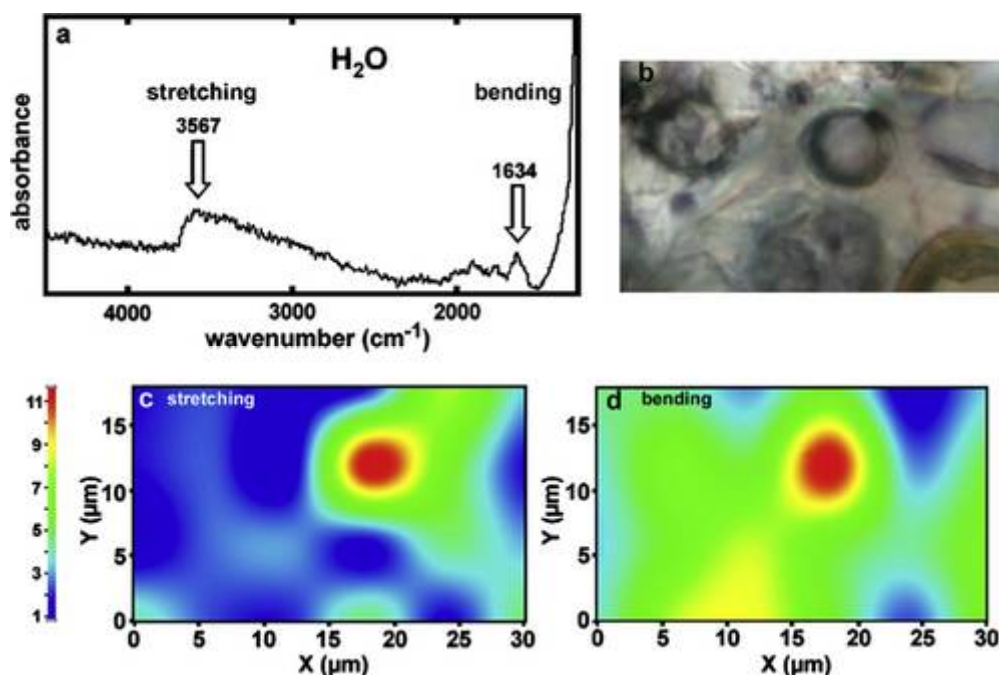


Fig. 2: Traces d'eau dans une bulle « vide » de la mésostase de la brèche Bencubbin. a : Spectre Infra-Rouge, indiquant les deux bandes (Stretching et bending) de l'eau. b : Microphotographie en lumière transmise de deux bulles (diamètre : environ 10µm) c et d : Carte d'absorption du spectre infrarouge pour la bulle de droite (l'autre bulle, recoupée par la surface polie de la préparation, n'est pas visible en IR). (Fig. 12 in Perron et al., 2008)

Les cristaux bleus de halite des deux météorites contiennent de nombreuses inclusions aqueuses (liquide/vapeur) de grande taille (10 à 20 µm), primaires et secondaires. Alan E. Rubin *et al.* (2010) ont pu reconstituer leur histoire complexe. Les deux météorites sont des brèches chondritiques de type H (chondrite ordinaire), composées de clastes plus ou moins colorés, au sein d'une matrice finement grenue contenant la halite. Les clastes de couleur claire ont subi un métamorphisme thermique, alors que la couleur sombre est due à des phénomènes de chocs qui ont partiellement fondu les clastes et entraîné une redistribution des éléments métalliques (Fe et Ni). La matrice, riche en vents solaires, a été altérée par des fluides hydrothermaux en surface du corps parent qui se sont progressivement enrichis en éléments divers (Na, K, Cl, Br, Al, Ca, Mg et Fe) par lessivage des minéraux chondritiques. On obtient ainsi à basse température (≤ 100 °C) des saumures saturées, qui déposent

des cristaux de halite (et, dans le cas de Monahans, halite et sylvite) dans le régolithe poreux. Ces fluides exceptionnels continuent de faire l'objet de nombreuses recherches. Renouvelant l'expérience des premières études mais, cette fois, sans risque de contamination, Quennie Chan, du NASA Johnson Space Center, Houston (présentement à l'Open University, UK) – en tête d'une cohorte impressionnante de treize co-auteurs) – a ainsi récemment (2018) découvert dans les deux météorites une combinaison complexe de molécules biologiques et pré-biologiques qui portent la trace de l'isotope 15 de l'azote interstellaire. Si elles ne sont pas encore la preuve d'une trace de vie aux confins du Système solaire, ces données sont actuellement celles qui s'en approchent le plus.

Par un singulier retour des choses, cette découverte d'eau extra-terrestre dans les météorites a correspondu à un regain d'intérêt pour

l'eau dans les roches lunaires. Mettant à profit les grands progrès réalisés dans les microsondes ioniques, un brillant chercheur de la Carnegie Institution de Washington, D. C. prématurément disparu, Erik Hauri (1966-2018) a montré en 2011 que certains échantillons lunaires rapportés par la mission Apollo 17 contenaient environ 100 fois plus d'eau que précédemment estimée. Cette eau ne se retrouve pas dans des inclusions fluides, en raison de la faible gravité et des basses pressions à l'intérieur de notre satellite, mais elle reste présente dans les verres. Au total, les magmas primaires des basaltes lunaires contiendraient autant d'eau que leurs équivalents terrestres (MORB) (Hauri *et al.*, 2011). Les données isotopiques suggèrent que cette eau, dont il n'est pas exclu que des quantités significatives puissent subsister sous forme de glace dans les profondeurs du sol lunaire, est d'origine terrestre. Des résultats extrêmement importants, qui confirment que la Lune aurait été créée par collision de la Terre avec un astéroïde de la taille de Mars au terme du « grand bombardement » hadéen. L'idée qui vient alors à l'esprit est que, s'il y a de l'eau dans certains météorites et roches lunaires, il pourrait aussi y avoir le second fluide le plus commun sur Terre, le CO₂, abondant sur Terre dans les roches (basaltes et roches ultrabasiqes) dont la composition se rapproche le plus de celle des échantillons extra-terrestres. Les résultats anciens des chercheurs de l'ex-bloc soviétique, discrédités de façon peut-être hâtive, mériteraient d'être repris avec des techniques modernes.

Conclusion

Les inclusions fluides et vitreuses dans les minéraux des roches sont des objets très petits,

facilement modifiés et perturbés, dont l'étude est difficile et parsemée d'embûches. Plus encore que les roches terrestres, les roches lunaires et les météorites ont multiplié les déconvenues, suscitant des espoirs rapidement déçus. Mais cette phase de découverte est maintenant terminée. Grâce à la puissance analytique des instruments modernes, les techniques d'étude sont maintenant bien maîtrisées. Les inclusions sont les seuls objets où l'on trouve des traces de fluides et de magmas qui, pour les roches extra-terrestres, existaient il y a des milliards d'années, qui ont joué un rôle essentiel pour la formation de ces roches, mais qui se sont ensuite évanouies dans l'espace intersidéral. Elles ont commencé de raconter leur histoire, inaugurant un long cheminement qui n'en est encore qu'à ses débuts.

Remerciements: Notre travail au Muséum, dont les résultats forment la base de cet article, a été possible grâce aux encouragements et soutien des grands directeurs de l'époque, Jacques Fabriès (Minéralogie) et Paul Pellas (Météorites). Nous leur dédions ce travail et saluons leur mémoire.

(†) Après des années de lutte acharnée contre une cruelle maladie, Nicole Guilhaumou est décédée le 16 octobre 2019, en ayant pu jusqu'au dernier moment connaître et vérifier les détails de ce travail quelques jours avant la présentation de ce travail à la journée COFRHIGEO, Ainsi prenait fin une amitié et une collaboration scientifique de plus de trente ans. Que ce travail soit aussi dédié à sa mémoire. J.T.

Bibliographie

- AILBARÈDE, F., BALLHAUS, C., BLICHERTOFT, J., LEE, C. N.-T., MARTY, B., MOYNIER, F., YIN, Q. Z. (2013). Asteroïdal impacts and the origin of terrestrial and lunar volatiles. *Icarus* **222**, p. 44-52.
- ASHWAL, L. D., COLUCCI, M. T., LAMBERT, P., HENRY, D. J. et GIBSON, E. K., Jr. (1982). Fluid inclusions in meteorites: Direct samples of extraterrestrial volatiles. *Abstracts of Papers presented to the conference on Planetary Volatiles*, held in Alexandria, Minnesota, October 9-12, 1982. LPI Contribution 488, 4 p.
- BOWEN, N. L. (1928) *The evolution of igneous rocks*. Princeton University press, Princeton, N.J.
- CHAN, QUENNIE H. S., ZOLENSZI, M. E. + 11

- co-auteurs (2018). Organic matter in extraterrestrial water-bearing salt crystals. *Science Advances* 4-1, DOI: 10.1126/sciadv.aao3521
- DOLGOV, YU A., POGREBNYAK, F. et SHUGUROVA, N. A. (1969). Composition and pressure of gases in inclusions in tektites. *Geokhimiya* **5**, p. 603-609, traduit (anglais) *Geochemistry International* 6-3, p. 525-531.
- FIENI, C., BOUROT-DENISE, M., PELLAS, P., et TOURET, J. (1978). Aqueous fluid inclusions in feldspar and phosphates from Peetz chondrite (Abstract). *Meteoritics*, **13**, p. 460-461.
- FLOENTIN, L., DELOULE, E., FAURE, F. et MANGIN, D. (2018). Chemical 3D-imaging of glass inclusions from Allende (CV3) olivine via SIMS : A new insight on chondrule formation conditions *Geoch. Cosmoch. Acta*, **230**, p. 83-93.
- GREIG, J. W. (1927). Immiscibility in silicate melts. *American Journ. Sc.*, **13**, p. 1-44.
- GROSSMAN, L. & OLSEN, E. (1974). Origin of the high-temperature fraction of C2 chondrite. *Geoch. Cosmoch. Acta* **39**, p. 173-187.
- GUILHAUMOU, N. (2006). Fluids and melt inclusions in meteorites : clues to the petrology of asteroids and planets in the solar system. *ACROFI I*, Nanjing (China), 2 pages (unpaginated).
- GUILHAUMOU, N. (2012). FTIR quantitative analysis of water in the Bencubbin meteorite. Evidence for shock induced mobilization from pre-existing nontronite in clasts. *Poster, Soleil Users meeting*, Jan. 2012.
- GUILHAUMOU, N., PERRON, C. FIENI, C. et DUMAS, P. (2003). Combined synchrotron FTIR and Raman Microspectrometry of the fluid inclusions in the Bencubbin Meteorite. *Acta Mineralogica-Petrographica*, Abstract Series 2, Szeged, 2 pages (unpaginated).
- HAURI, E. H., WEINREICH, T., SAAL, A. E., RUTHERFORD, M. C. et VAN ORMAN, J. A. (2011). High pre-eruptive water content preserved in lunar melt inclusions. *Science* 333-6039, p. 213-215.
- HAURI, E. H., SAAL, A. E., RUTHERFORD, M. L. et VAN ORMAN, J. A. (2013). Water in the Moon's interior : Truth and consequences. *Earth and Planet. Sc. Lett.* **09**, p. 252-264.
- MAKJANIC, J., TOURET, J. L. R., VIS, R. et VERHEUL, H. (1989). Carbon in glass inclusions in the Allende meteorite. *Meteoritics*, **24**, p. 49-55.
- MARKI, G. (2001). A new type of silicate liquid immiscibility in peralkaline nepheline syenites (lujavrite) of the Ilimaussaq complex, South Greenland. *Contrib. Mineral. Petrol.* **141**, p. 458-472.
- PANINA, L. I. (2005). Multiphase carbonate-salt immiscibility in carbonatite melts : data on melt inclusions from the Krestovskiy massif minerals (Polar Siberia) *Contrib. Mineral. Petrol.* **150**, p. 19-36.
- PERRON, C., FIENI, C. et GUILHAUMOU, N. (2001). Glassy materials in Bencubbin. Clues to its thermal history. *Meteoritics and Planetary Science*, **36**, N° 9, Abstract
- PERRON, C., FIENI, C. et GUILHAUMOU, N. (2008) Nitrogen and water bubbles, oxygen isotopes, shock effects : deciphering the history of Bencubbin meteorite breccia. *Geoch. Cosmoch. Acta* **72**, p. 959-977.
- POTY, B., LEROY, J. et JACHIMOWICZ, L. (1976). Un nouvel appareil pour la mesure des températures sous le microscope : l'installation de microthermométrie Chaixmecca. *Bull. Soc. fr. Mineral. Cristallogr.* **99**, p. 82-186.
- ROEDDER, E. (1984). Fluid Inclusions. Reviews in Mineralogy, *Min. Soc. America*, **12**, 644 p.
- ROEDDER, E. & BELKIN, H. E. (1983). Fluid inclusions in stony meteorites. *Journ. Geophys. Res.* Supplement 90: p 93-100.
- RUBIN, A. E., ZOLENSZY, M. E. et BODNAR, R. J. (2010). The halite-bearing Zag and Monahans (1998) meteorite breccia : Shock metamorphism, thermal metamorphism and aqueous alteration on the H-chondrite parent body. *Meteoritics and Planetary Science* 37-1, p. 125-141.
- RUDNICK, L. R., ASHWAL, D. J., GIBSON, E. K., ROEDDER, E., BELKIN, H. E. et COLUCCI, M. T. (1985). Fluid inclusions in stony meteorites, a cautionary note. *Journ. Geophys. Res.* Supplement 90 C, 669-C675.
- SHIH, C. Y. & WIESMANN, H. (1999). Asteroidal water within fluid inclusions-bearing halite in an H5 Chondrite. *Science* 285-5435, p. 1377-1379.
- TRONCHE, E., REINHARDT, P., MOSTEFAOUI, S. GUILHAUMOU, N. et ROBERT, F. (2007). Melt inclusions in olivine crystals from chondrules. New insights from nanoscales concentration profiles in the Semarkona chondrite. *C.R. Geosciences* 339-10, p. 667-673.

- TRONCHE, E., MOSTEFAOUI, S., MEIBORN, A., ROBERT, F., SAUTTER, V., GUILHAU-MOU, N., LIBOUREL, G., et DUHAMEL, R. (2006). Chondrule thermal history: an approach based on nanoSIMS analysis of short diffusion profiles in melt inclusions. *Meteoritical Society* (Abstract).
- VEKSLER, I. V., DORFMAN, A. M., BORISOV, A. A. et DINGWELL, D. B. (2007). Liquid immiscibility and the evolution of basaltic magmas. *Journ. Petrol.* 48-11, p. 2187-2210.
- WALENCZAK, Z. (1977). Liquid phase vesicles in the Pultusk meteorite. *Bull. Acad. Polon. Sci., Series Sc. Terre* 25, p. 19-22.
- WARNER, J. L., ASHWAL, L. D., BERGMAN, S. C., GIBSON, E. K., HENRY, D. J., LEE-BERMAN, R. L., ROEDDER, E. et BELKIN, H. E. (1983). Fluid inclusions in stony meteorites. *Journ. geophys. Res. Solid Earth.* 88-502, A731-A735.
- YASINSKAYA, A. A. (1967). Inclusions in stony meteorites. *Mineral. Sbornik L'vov Gos. Univ.* 21, p. 278-281, (en Russe), traduit dans *Fluid Inclusion Research* (Proc. COFFI) 2, p. 149-153 (1969)
- ZOLENSKY, M. E., BODNAR, R. J., BOGARD, D. D., GARISON, D. H., GIBSON, E. K., NYQUIST, L. E. et REESE, Y. (1999). Asteroidal water within fluid inclusion-bearing halite in an H5 chondrite, Monahans (1998) *Science* **285**, p. 1377-1379 ?
- ZOLENSKY, M. E. *et al.* (2017). The search for and analysis of direct samples of early Solar System aqueous fluids. *Phil. Trans. Royal Soc. A* 375-2094, 19 p. ID:20150386