

À la croisée des chemins entre astronomie et géologie : rendez-vous avec l'astéroïde (4)Vesta

Autor(en): **Ruesch, Ottaviano / Amalberti, Julien / Andjic, Goran**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft**

Band (Jahr): **71 (2013)**

Heft 374

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-897615>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

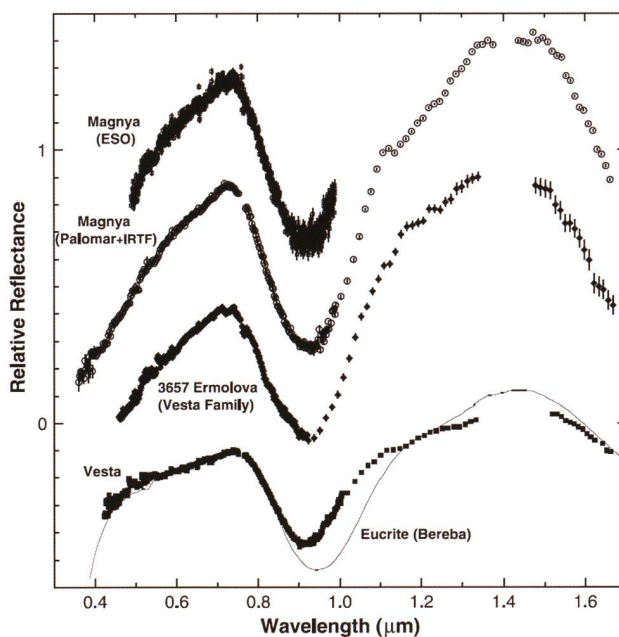
A la croisée des chemins entre astronomie et géologie

Rendez-vous avec l'astéroïde (4)Vesta

■ D' Ottaviano Ruesch, Julien Amalberti & Goran Andjic

Pendant presque un an, de juillet 2011 à août 2012, la sonde Dawn, envoyée par la NASA a survolé l'astéroïde (4)Vesta, en orbite à moins de 50 kilomètres du corps planétaire. Les trois instruments scientifiques embarqués à bord, dont notamment deux européens, ont observé la surface avec une résolution sans précédent. Actuellement la sonde a quitté Vesta pour poursuivre son voyage dans la ceinture principale d'astéroïdes : elle rejoindra son 2^{ème} objectif, l'astéroïde (1)Cérès, dans 3 ans.

Figure 1: Spectres en réflectance de Vesta (points), de deux astéroïdes basaltiques (points) et d'un météorite HED « Bereba » (ligne continue). Deux larges bandes d'absorption sont visibles vers 0.95 et après 1.5 micromètres (figure issue de Lazzaro et al., Science 288 (2000), 2033, American Association for the Advancement of Science (AAAS)).



Depuis les premiers pas du projet visant l'exploration de ces deux importants astéroïdes, il aura fallu près de 25 ans de planification, de développement technologique et de réalisation, ainsi que 6 ans de voyage interplanétaire pour aboutir à cet unique rendez-vous. Afin d'expliquer l'enjeu de cette mission, un résumé des connaissances actuelles de l'astéroïde Vesta depuis sa découverte en 1807 sera exposé. Les motivations qui ont justifié une mission spatiale d'une telle envergure et les questions scientifiques aux-

quelles les scientifiques tentent de répondre vont être discutées.

La particularité de Vesta, outre le fait qu'il s'agisse d'un objet d'étude majeur, est que nous avons des échantillons liés à cet astéroïde directement à portée de main. En effet, une partie importante de nos connaissances sur Vesta est due aux études des météorites « HED » (Howardites, Eucrites, Diogenites), directement prélevées sur Terre, qui sont vraisemblablement génétiquement liées à l'astéroïde Vesta. Aussi, les caractéristiques géologiques des

météorites HED vont faire l'objet d'une attention particulière dans cet exposé.

L'ensemble des connaissances astronomiques et géologiques acquises grâce à une palette d'outils mis à disposition des chercheurs pour un même objet du système solaire constitue un savoir unique et particulier dans les sciences planétaires.

Les premières observations astronomiques

Vers la fin du XVIII siècle, la loi de Titius-Bode, qui semble régir les intervalles séparant les planètes, met en évidence une lacune entre Mars et Jupiter qui intrigue alors les astronomes de l'époque. Le mystère ne sera levé que le 1^{er} Janvier 1801, par l'astronome italien GIUSEPPE PIAZZI qui découvre à l'observatoire de Palerme le premier astéroïde à circuler dans cet espace « vide ». On lui donne le nom de Cérès. Depuis lors, les astronomes commencent à observer cette zone du ciel à la recherche d'autres objets similaires. Ainsi, en mars 1807 HEINRICH OLBERS de Breme découvre un autre astéroïde dans la même zone : Vesta. Pendant toute la moitié du XIX siècle, la qualité limitée des instruments permet aux astronomes d'observer uniquement les objets les plus brillants de la ceinture d'astéroïdes. Les premiers astéroïdes à être découverts sont donc les corps les plus grands qui peuplent l'espace entre Mars et Jupiter. La luminosité de Vesta est suffisamment importante pour la capacité des instruments de l'époque pour estimer son diamètre avec une méthode assez rudimentaire, celle dite du micromètre à fils. En 1895, on estime alors un diamètre autour des 500 km, ce qui est comparable avec la valeur reconnue actuellement de 285 x 229 km. Vers la fin du XIX siècle, des méthodes astronomiques quantitatives sont développées, comme celle de la photométrie, c'est-à-dire de la mesure de l'éclat des astres. On commence dès lors à évaluer l'éclat des astéroïdes. Avec la connaissance du diamètre et de la luminosité absolue de Vesta, on a pu estimer son albédo (c.-à-d. sa capacité à réfléchir la lumière) et c'est à partir de ce moment que la particularité de Vesta commence à émerger. On constate à l'époque que Vesta réfléchit beau-

coup plus de lumière que les autres astéroïdes, soit que sa grande luminosité apparente n'est pas seulement liée à sa grande taille mais aussi à sa grande valeur d'albédo.

L'évolution des techniques astronomiques qui suivirent permit d'obtenir une courbe de lumière, qui est une mesure de la luminosité absolue de l'astéroïde en fonction de sa rotation sur lui-même. Les variations de cette courbe peuvent être créées par la forme de l'astéroïde et/ou par des variations d'albédo à la surface, ainsi que par des éclipses et des occultations entre deux objets proches. Les variations de luminosité de Vesta sont relativement faibles et caractérisé par un seul pic de luminosité : par conséquence les variations ne sont pas due à une forme irrégulière (Vesta doit être donc sphéroïdale), mais associées seulement à des variations d'albédo. Par ces observations on a pu établir le temps de révolution de Vesta à environ 5 heures, valeur concordante avec celle mesurée de nos jours. En 1929, DOBROVNIKOFF réussit le premier une mesure de courbe de lumière de Vesta à différentes longueurs d'ondes. Il montre ainsi que Vesta présente non seulement des variations d'albédo à sa surface, mais aussi des variations de couleurs. Ces variations de couleurs peuvent être liées en premier ordre à des changements de composition, donc à des variations de la nature géologique du terrain. Une des hypothèses avancées pour expliquer la présence de zones géologiques différentes en surface a été de contraindre cette zonation par l'effet de processus géologiques particuliers qui avaient eu lieu sur l'astéroïde au cours de son histoire. Ces observations montraient déjà que l'astéroïde avait traversé une phase de formation particulière, différente des autres astéroïdes.

Les études spectroscopiques

Il a fallu néanmoins attendre la moitié du XX siècle et le début des études spectrales des astéroïdes pour avoir des renseignements plus précis sur la composition des astéroïdes. Ces études furent rendues possibles grâce au développement du photomètre photoélectrique. Ce détecteur permet d'augmenter la sensibilité d'un facteur 10 par rapport aux plaques argentiques utilisées auparavant. Le sondage du spectre électro-

magnétique fut premièrement effectué avec l'utilisation de filtres et la mesure des couleurs, par exemple avec trois filtres pour les longueurs d'ondes de l'ultraviolet, dans le visible et dans le bleu (UVB). Par la suite, on utilisa un plus large nombre de filtres pour obtenir un spectre dans le visible et proche de l'infrarouge (entre 0.4 et 1.1µm).

Le rayonnement d'un astéroïde dans ces longueurs d'ondes correspond à la lumière du soleil réfléchi par la surface. Si de la mesure du rayonnement on soustrait la signature spectrale du soleil, on retient alors du spectre seulement la partie de lumière affectée par la surface et par ces propriétés physico-chimiques. Entre 0.4 et 2 µm, le spectre présente des bandes d'absorptions, qui sont associées à la composition de surface (par exemple caractéristique de certains minéraux). Ces attributions spectrales sont permises grâce à un long travail de reconnaissance des bandes d'absorptions pour différentes compositions chimiques.

Dans les années soixante-dix, avec la mise en place d'études systématiques des caractéristiques spectrales des astéroïdes, on a constaté que les bandes d'absorptions de ces corps sont très peu marquées, et ceci en raison du fait que les propriétés physico-chimiques sont directement affectées par les conditions dans l'espace interplanétaire, comme par exemple les radiations solaires. Toutefois, les observations spectrales n'ont pas permis une caractérisation directe de la composition, et il a fallu attendre que les scientifiques comprennent la nature exacte du phénomène « d'altération » par l'environnement spatial, pour que l'on ait enfin une idée de la composition principale que l'on trouve sur les astéroïdes. Le matériel de ces corps est de nature primitive, constitué pour la majeure partie de minéraux silicatés et carbonés. Ces matériaux sont dès lors associés aux météorites, et cette association se base sur la possibilité que les météorites puissent être du matériel arrachés des astéroïdes par collision.

En ce qui concerne Vesta, ce dernier ne montre pas de matériaux altérés commun aux autres astéroïdes. Au contraire, les observations démontrent que la surface est spectralement « fraîche », avec de fortes bandes d'absorptions. Le caractère non

altéré explique ainsi son fort albedo par rapport aux astéroïdes « altérés » plus sombres. C'est par ce caractère spectral particulier, qu'il fut possible d'établir une relation entre Vesta, et une classe spécifique de météorites, les HED. Cette classe de météorite présente des particularités, dont notamment une géologie plus « évoluée ». En détail, les spectres de Vesta tout comme ceux d'échantillons HED montrent des bandes d'absorptions spécifiques: ces bandes sont dues aux transitions électroniques du fer dans la maille cristalline du pyroxène (Figure 1). D'une part, on a pu établir que la surface de Vesta est dominée par des pyroxènes, minéraux caractéristiques des roches ignées (basaltes par exemple), issues de la cristallisation de lave. Ce type de roche n'est pas observé sur les autres astéroïdes, mais est commun sur les planètes terrestres où l'activité magmatique est possible. D'autre part, on a pu établir une filiation entre Vesta et le groupe des HED. Il en découle que les météorites HED sont potentiellement des échantillons de Vesta, qui ont été éjectés dans l'espace lors d'un impact météoritique avec l'astéroïde, puis retombés accidentellement sur Terre. Si un tel lien génétique peut être prouvé, cela signifie alors que l'on posséderait directement sur Terre des échantillons d'un des plus grands astéroïdes de la ceinture principale. Ceci est d'une importance remarquable puisque les analyses pétrologiques et géochimiques des échantillons peuvent relever la nature et l'histoire de formation de ces roches, ainsi que celle du corps parent depuis lequel elles sont issues.

Jusque dans les années 1990, le lien génétique entre Vesta et HED restait très hypothétique, puisque aucune théorie ne pouvait physiquement expliquer l'arrivée sur Terre de roches éjectées de Vesta, situé à 2.36 UA. C'est grâce au développement depuis les années 1969 d'un nouvel instrument de mesure, le charged coupled device (CCD), que l'on a pu apporter une preuve du lien Vesta/HED. La CCD, par rapport aux détecteurs photoélectriques, permet d'augmenter considérablement la sensibilité des observations astronomiques, et grâce à ce nouveau détecteur révolutionnaire pour l'époque, on a pu observer aux environs de Vesta plusieurs petits astéroïdes (~10km de diamètre).

Ces nouveaux corps gravitant en périphérie de Vesta, ont été caractérisés par des études spectroscopiques et ont montré des signatures spectrales très semblables à celle de Vesta. Dès lors, ces astéroïdes nommés de type V, sont reconnus comme étant des morceaux rocheux de Vesta, arrachés à l'astéroïde lors d'un impact majeur. De plus, les observations des ces petits astéroïdes ont montré une particularité étonnante. En effet, les dizaines de ces petits corps semblent se localiser entre Vesta elle-même, et une résonance de Kirkwood : soit un espace dans la ceinture vidé d'objets puisqu'il se situe sous l'influence gravitationnelle de Jupiter (Figure 2, région nommée 3 :1). Si un objet s'approche de cet espace, son orbite est alors modifiée, soit vers l'extérieur de la ceinture, soit vers l'intérieur du système solaire, et donc en direction de l'orbite de la Terre. Suivant les lois de la mécanique céleste, il est alors tout à fait possible que des morceaux rocheux éjectés de Vesta, et proche de l'espace de Kirkwood, puissent être envoyés en direction du système solaire interne. Des phénomènes de collision vont ensuite venir morceler les éjectas et ainsi produire des météoroïdes qui à leur tour entrent en collision avec la Terre. Une deuxième découverte fut effectuée en 1994, quand le Hubble Space Telescope observa Vesta lors de son opposition. A cette occasion, on a identifié au pôle Sud de l'astéroïde un grand cratère d'impact, couvrant presque tout l'hémisphère Sud, qui fut interprété comme source potentielle des astéroïdes de type V.

Toutes ces observations ont permis aux scientifiques et aux astronomes, d'établir un scénario expliquant l'origine des HED, leurs liens génétiques avec Vesta et une explication de leur présence sur Terre. Cependant, au cours de la dernière décennie, la relation entre Vesta et les HED a été sujet à débat.

Des nouvelles observations astronomiques effectuées principalement à l'European Southern Observatory (ESO) ont identifié un nouvel astéroïde (1459 Magnya) ayant un spectre de type V mais non lié à la famille de Vesta, situé à 3.14 UA (Figure 2). En effet, il s'est avéré que Vesta et les membres de sa famille ne sont pas les seuls corps dans la ceinture d'astéroïdes caractérisés par une surface d'origine ignée qui

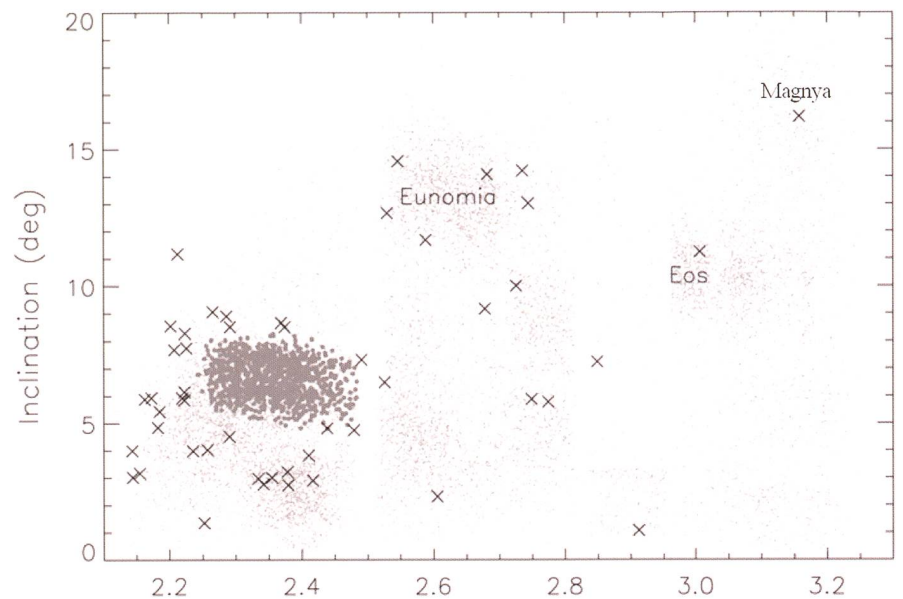


Figure 2: Distribution des astéroïdes basaltiques dans la ceinture d'astéroïdes en fonction du demi-grand axe et de l'inclinaison de l'orbite. Croix : astéroïdes basaltiques. Points : astéroïdes. Points gris : astéroïdes basaltiques appartenant à la famille de Vesta. La résonance 3 :1 de Kirkwood est marquée (figure issue de Moskovitz et al., *Icarus* 198 (2008), 77-99, Elsevier Inc.).

témoigne d'une activité magmatique passée. De plus, le scénario est compliqué par des données acquises sur les données isotopiques de l'oxygène ($\Delta^{17}O$) dans les HED, qui permettent de distinguer le corps parent (planète, satellite ou astéroïde) d'un échantillon ou d'une roche basaltique terrestre, lunaire ou martienne. La plupart des mesures géochimiques effectuées sur les HED montrent qu'elles ont une même valeur en isotopes de l'oxygène mais différente de celle de la Terre, de la Lune ou de Mars. Ceci indique que leur formation a eu lieu sur un autre *corps parent* ayant une composition en $\Delta^{17}O$ homogène, vraisemblablement Vesta. Malgré ce faisceau de preuve, certaines mesures isotopiques s'écartent de la valeur commune (Figure 3), indiquant une origine autre que Vesta, ou alors l'inhomogénéité du *corps parent*. A ces valeurs variables de $\Delta^{17}O$ des HED viennent s'ajouter les mesures d'autres classes de météorites, à savoir celles ferreuses. Ces dernières ont la même composition en $\Delta^{17}O$ que les HED, toutefois leurs compositions minéralogiques sont complètement différentes. Elles sont dominées par du fer et du nickel, éléments qui se concentrent dans les noyaux de corps différenciés. Le *corps parent* de ces météorites a du être détruit lors d'un impact dans la ceinture d'astéroïdes pour que des

échantillons de son noyau nous parviennent, ce qui est contradictoire avec l'état intact de Vesta. Ces météorites peuvent donc provenir d'un autre *corps parent* différencié, formé depuis un réservoir en $\Delta^{17}O$ similaire à celui des HED.

Les météorites «HED»

Pour résumer, la majorité des HED semble provenir d'un seul *corps parent*, mais l'origine de certaines HED reste sujette à discussion. Comme noté auparavant, les analyses pétrologiques et géochimiques de ces météorites révèlent l'histoire du *corps parent*. Il est donc primordial d'avoir leurs caractéristiques pétrologiques pour avoir une idée sur l'histoire géologique du *corps parent*. Les HED sont subdivisées en trois groupes : i) Diogenites, ii) Eucrites et iii) Howardites. i) Les Diogenites sont des roches de type cumulat, caractérisées presque uniquement par des cristaux d'orthopyroxène, souvent fracturés. Ce type de roche se forme en profondeur dans une croûte planétaire, voire dans le manteau. ii) Les Eucrites sont caractérisées principalement par des pyroxènes et des plagioclases. Elles présentent les deux textures suivantes : une texture gabbroïque, indiquant une cristallisation en profondeur ; une texture basaltique, sou-

vent métamorphique, c'est-à-dire de type effusive ayant cristallisé à la surface, subissant par la suite une phase de métamorphisme (thermique). iii) Les Howardites sont des brèches, c'est-à-dire des roches sédimentaires composées de clastes et de morceaux d'autres roches fracturées.

Les Eucrites et Diogenites nous renseignent sur le mécanisme de construction de la croûte du *corps parent*. Ces deux types de roches peuvent avoir été formés par deux mécanismes magmatiques différents. Le premier modèle envisage la formation de ces roches par cristallisation de liquides issus d'un faible degré de fusion partielle de matériel primitif, de type chondritique. Mais ce modèle n'arrive pas à expliquer toutes les concentrations des éléments dans les HED. Le second scénario envisage un haut degré de fusion partielle et par conséquent suppose qu'une couche recouvrant la plupart du corps parent était liquide très tôt dans son histoire ; on parle alors d'océan magmatique. Les Diogenites se seraient alors formées à partir de cet océan de magma, par cristallisation à l'équilibre, c'est-à-dire par coexistence du matériel cristallisé et du liquide. Par la suite le liquide rémanent aurait été à la source des Eucrites, formées par cristallisation fractionnée, qui correspond à un processus de séparation entre le matériel cristallisé et le liquide. Il y a toutefois des inconsistencies : ce modèle prédit la présence de roches composées d'olivine et d'orthopyroxène, alors que celles-ci ne sont que rarement observées parmi les HED.

Les Howardites nous informent sur l'état du régolite. Le régolite désigne les premiers dizaines de mètres, voir kilomètres de la croûte d'un corps planétaire qui, dépourvu d'une atmosphère, est directement exposé aux impacts météoritiques. Les Howardites sont constituées de débris de roches de type Diogenites et Eucrites. La présence de ces deux types de roches dans les Howardites témoigne d'une origine commune des HED, sur un même corps parent. Les Howardites permettent de reconstruire la suite des événements menant à leur formation : la croûte primaire, formée de roches de type Eucrites et Diogenite, est premièrement fracturée, puis les clastes des deux roches sont distribués de façon hétérogène à la surface. Le réchauffement du régolite

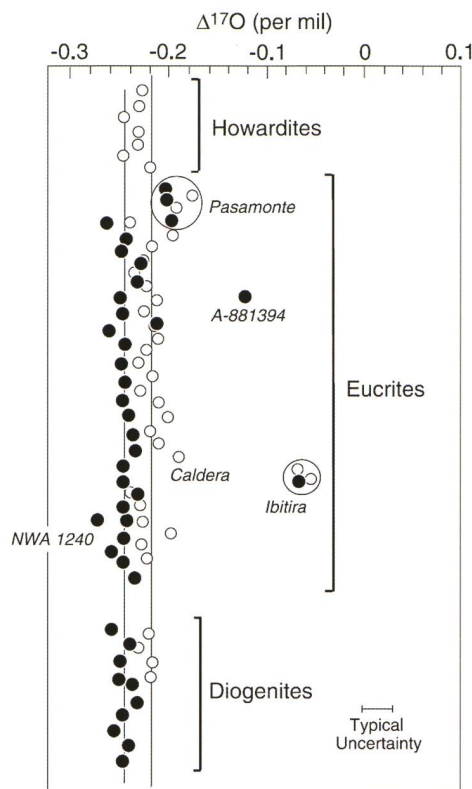


Figure 3. Variabilité des isotopes de l'oxygène dans les météorites HED (données de Wiechert et al. 2004 et Greenwood et al. 2005. Figure issue de McSween et al., *Space Science Review* 163 (2010), 141-174, Springer Science+Business Media B.V.).

suite aux impacts ou à l'intrusion de magma a permis la compaction des clastes et la recristallisation d'une matrice pour former de nouvelles roches : des brèches. Les Howardites indiquent que ces brèches ont subi une fracturation et une redistribution à la surface, ainsi que l'incorporation de leurs clastes dans de nouvelles brèches, avec du matériel exogène et du matériel fondu dû aux impacts. Les Howardites témoignent ainsi de plusieurs cycles de formation de roches bréchiques. La croûte du corps parent des HED c'est donc développée sous l'action contemporaine des processus magmatiques et des processus liés au bombardement météoritique.

D'autres renseignements nous parviennent par l'étude des analyses géochimiques. La composition des éléments mineurs des Diogenites indique un appauvrissement en éléments sidérophiles. Ceci montre que les liquides magmatiques depuis lesquels les Diogenites se sont formées étaient appauvris en ces éléments. Le corps parent a dû alors

posséder un noyau métallique avant la formation de ces roches, où ces éléments sidérophiles ont pu se concentrer. Cette preuve indirecte d'un noyau indique que le corps parent a subi une différenciation globale, avec la formation d'un noyau métallique et la différenciation d'une croûte et d'un manteau silicaté. La chaleur nécessaire à ces processus vient probablement de l'incorporation de radionucléides de courte vie lors de l'accrétion. Les mesures d'isotopes permettent la datation de ces événements de différenciation dans les 10 premiers millions d'années après la formation du système solaire, soit très tôt dans l'histoire du système solaire, longue de 4,5 milliards d'années. Ces mêmes mesures effectuées sur des échantillons de roches terrestres et martiennes, indiquent un âge d'accrétion et de différenciation de respectivement 15 et 30 millions d'années environ après la formation du système solaire (respectivement pour Mars et la Terre). Ainsi, il a été envisagé que des corps de petites tailles mais déjà différenciés (comme celui des HED) formés relativement tôt se sont accrétés pour former des corps de tailles majeures quelques millions d'années plus tard. Ainsi la Terre et les autres planètes telluriques sont probablement issues de l'accrétion de planétésimaux (petit corps) potentiellement similaires à Vesta. La présence actuelle de Vesta indique que les planétésimaux situés dans la ceinture d'astéroïde n'ont pas pris part à l'accrétion d'une planète tellurique. De plus, l'état intact de Vesta montre qu'il n'a pas été détruit par des collisions au cours des derniers milliards d'années.

Conclusion

En conclusion, Vesta tout comme Cérès, est un corps unique, encore intact dans la ceinture d'astéroïdes et ayant subi des processus planétaires d'évolution thermique. Ces processus se traduisent par des variations minéralogiques résultant de phénomènes de chauffage et de différenciation, s'accompagnant de l'enfouissement des matériaux lourds vers le centre du corps. Ces processus, ainsi que la composition mafique de Vesta, sont similaires aux planètes telluriques. Ceci contraste avec les autres objets de la ceinture d'astéroïdes qui semblent

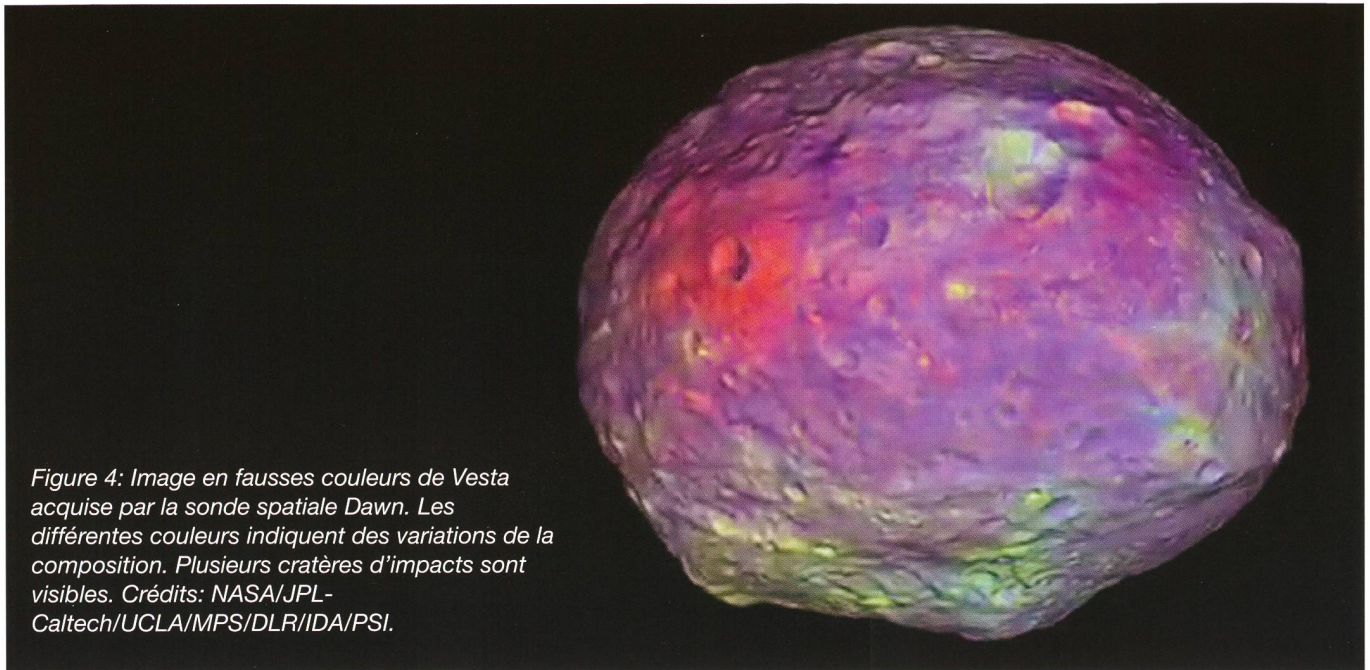


Figure 4: Image en fausses couleurs de Vesta acquise par la sonde spatiale Dawn. Les différentes couleurs indiquent des variations de la composition. Plusieurs cratères d'impacts sont visibles. Crédits: NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA/PSI.

être des débris de corps non différenciés créés lors de collisions. Autre point primordial pour l'intérêt de Vesta : les météorites apparentées à ce planétésimal. Les HED nous renseignent sur le phénomène de différenciation planétaire, sur les processus magmatiques qui ont eu lieu dans le développement de la croûte, ainsi que sur la formation du régolite.

De plus, les HED permettent la datation de ces phénomènes. Si d'une part le lien HED/Vesta s'impose et l'apport de renseignement par les HED est remarquable, d'une autre part ce lien manque d'une preuve incontestable. De là l'importance de la sonde Dawn, qui peu nous révéler la nature de Vesta, et nous amener de nouvelles preuves sur le lien avec les HED. La sonde Dawn dispose de deux caméras pour les études

photo-géologiques, d'un imageur hyperspectral pour l'étude des minéraux, ainsi que d'un détecteur de rayons gamma et de neutrons capable de mesurer la composition élémentaire. Les données issues de ces instruments sont en cours d'analyses et vont permettre des interprétations plus poussées des mo-

dèles actuels sur Vesta et les HED (Figure 4).

■ **Ottaviano Ruesch**

Via San Pietro 8
6612 Ascona
rotta87@hotmail.com

Bibliographie

- «Asteroids», ed. T. GEHRELS, Space Science Series, The University of Arizona Press, Tucson, USA, 1979.
- «Asteroids III», ed. W. F. BOTTKER, A. CELLINO, P. PAOLICCHI, R. P. BINZEL, Space Science Series, The University of Arizona Press, Tucson, USA, 2002.
- «Dawn, mission to 1 Ceres and 4 Vesta», ed. C. RUSSELL, C. RAYMOND, Springer, 2012, previously published in Space Science Reviews, Vol. 163/1-4, 2012.
- «Surface Lithologic heterogeneity of Asteroid 4 Vesta», GAFFEY, M.J., Icarus 127, pp. 130-157, 1997.
- «Meteorites and Asteroids Reflectance spectroscopy: Clues to Early Solar System Processes», PIETERS, C., McFADDEN, L.C., Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 22:457-97, 1994.

