



N° d'ordre

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique Université d'Oran 2
Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers
Département de Sciences de la Terre

Mémoire

Présenté pour l'obtention du grade Master en Géologie
Option : Magmatisme, Géodynamique et Transferts Lithosphériques
(MGTL)

Thème

**Les Achondrites "HED" de l'Astéroïde
4Vesta.**

Présenté Par :

M^{me} BELOUFA Dounia

Encadré Par :

Mr SEDDIKI A.

Année 2016-2017

SOMMAIRE

Chapitre I. le système solaire

Résumée.....	1
Chapitre I : Généralités.....	2
I.1. Introduction	2
I.2. Naissance du système solaire	3
I.3. Composants du système solaire	4
I.3.1. Le soleil	4
I.3.2. Les planètes telluriques.....	4
I.3.3. Les planètes joviennes (géantes).....	6
I.3.4. La ceinture d'astéroïdes.....	6
I.3.5. Les planètes naines.....	7
I.3.6. Les comètes.....	8
I.3.7. La Ceinture de Kuiper.....	8
I.3.8. Les météoroïdes.....	8

Chapitre II. L'astéroïde 4 Vesta

Chapitre II : L'astéroïde 4 Vesta.....	9
II.1.Introduction.....	9
II.2- Histoire de 4 Vesta.....	9
II. 3. Structure de 4Vesta.....	11
II. 3.1.Dimensions	11
II3.2. Composants.....	12

Chapitre III. Les HED (Howardites ; Eucrites et diogénites)

Chapitre III : Les HED (Howardites ; Eucrites et diogénites).....	14
III.1. Introduction.....	14
III.2. Les constituants de 4Vesta (Howardites ; Eucrites et Diogénites).....	14
III.2.1. Les eucrites	14
III.2.1.1. Pétrographie	14
III.2.1.2. Composition minéralogique.....	15
III.2.3. Les Diogénites.....	15
III.2.3.1. Pétrographie.....	15
III.2.3.2. Composition minéralogique.....	15
III.2.2. Les Howardites	17
III.2.2.1. Pétrographie.....	18
III.2.2.2. Composition minéralogique.....	18
III.2.4. Le métamorphisme dans les HED.....	18
III.2.5. Age des HED.....	19
III.2.6. Formation des HED.....	19

IV. Conclusion

V. Conclusion générale.....	23
Liste des figures.....	25
Références bibliographiques.....	26

Résumé

Nous proposons dans cette étude, la composition de surface de Vesta, l'objet basaltique intact le plus massif de la ceinture d'astéroïdes, est intéressante car elle nous donne un aperçu de la différenciation magmatique des planètes. La répartition des unités lithologiques et compositionnelles à la surface de Vesta fournit des contraintes importantes sur son évolution pétrologiques, son événement d'impact et sa relation avec les Vestoids et les Météorites-howardite-eucrite-diogenite (HED). Dans le groupe des achondrites, le groupe des HED comprend 60% d'abondance.

L'astéroïde 4 Vesta est le seul astéroïde différencié avec une structure interne, probablement composé d'un noyau métallique, un manteau de roches ultramafiques, et une croûte basaltique. L'hémisphère Sud a un âge de 1 à 2 milliards d'années, tandis que l'hémisphère Nord est plus vieux (4 milliards d'années), il est très cratérisée. L'immense cratère qui défigure le pôle Sud, Rhéasilvia, témoigne des chocs reçus par Vesta. Les eucrites, les diogénites et les howardites (groupe HED), sont probablement excavées du pôle sud par l'impact qui a creusé Rhéasilvia. Les eucrites sont des roches basaltiques formant la croûte de Vesta. Ils sont soit volcaniques (eucrites non cumulatives) ou plutoniques (eucrites cumulatives). Les Diogénites sont des roches formées de cumulats d'orthopyroxènes. Elles se sont cristallisées dans les plutons profonds au sein de Vesta. Les Howardites sont des brèches d'impact constituées de fragments d'eucrites et de diogénites et formées au cours d'impact successives sur l'astéroïde Vesta.

I.1. Introduction :

Depuis des millénaires, les hommes tentent de percer les mystères de ce qui se trouve au-dessus de leurs têtes, découvrant peu à peu planètes et satellites, système solaire et étoiles. Aujourd'hui, la science propose un grand nombre d'hypothèses et de théories pour expliquer nos observations. Le début de l'Univers et le Big-Bang, la naissance, vie et mort d'une étoile, la formation des planètes, leur évolution, notre place dans la galaxie, dans l'univers... Tant de découvertes restent à réaliser sur ces thématiques vertigineuses, qui nous permettront chacune d'apporter un élément de réponse aux questions « D'où venons-nous ? » et « Quelle est notre place dans l'univers ? ». Dans ce contexte de la recherche de nos origines, nous nous sommes intéressés aux toutes premières étapes de l'histoire de notre système solaire.

Dans l'univers, notre système solaire est une petite entité dans plusieurs milliards d'autres. Notre système solaire contient une étoile, le Soleil, autour duquel tournent huit Planètes (Fig.1) et leurs satellites, au moins trois planètes naines, ainsi qu'une multitude d'astéroïdes, de comètes, de roches et de poussières de toutes tailles reconnus collectivement, comme les petits corps du système solaire (Levy, 1996).

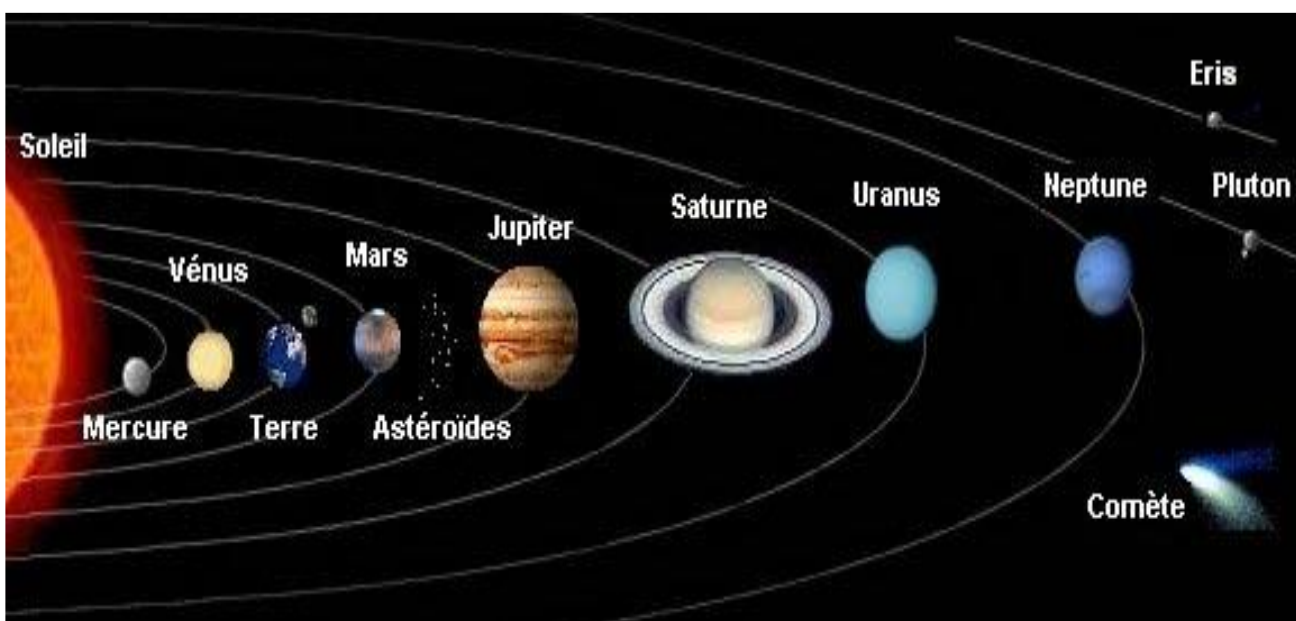


Fig. 1 : le Système solaire.

I.2. Naissance du système solaire :

Le concept de nébuleuse solaire primitive a été introduit d'abord par Kant (1755) puis par Laplace (1796) (Willemez et Salès, 2010). Selon cette théorie, le système solaire s'est formé il y a 4,6 milliards d'années par effondrement gravitationnel d'un nuage moléculaire géant qui était large de plusieurs années-lumière et a probablement donné naissance à plusieurs étoiles.

La région qui deviendra par la suite le système solaire, connue sous le nom de nébuleuse pré-solaire, avait un diamètre entre 7000 et 20 000 UA (Brahic et Levasseur-Regourd, 2009). Après 100 millions d'années, la pression et la densité de l'hydrogène au centre de la nébuleuse devinrent élevées pour que la proto-étoile initie la fusion nucléaire, accroissant sa taille jusqu'à ce qu'un équilibre hydrostatique soit atteint, l'énergie thermique contrebalançant la contraction gravitationnelle. À ce niveau, le Soleil devint une véritable étoile.

Les autres corps du système solaire se formèrent du reste du nuage de gaz et de poussière. Le système solaire interne était trop chaud pour que les molécules volatiles telles que l'eau ou le méthane se condensent : les planétésimaux qui s'y sont formés étaient relativement petits et principalement formés de composés à point de fusion élevé, tels les silicates et les métaux. Ces corps rocheux devinrent à terme les planètes telluriques. Plus loin, les effets gravitationnels de Jupiter empêchèrent l'accrétion des planétésimaux, formant la ceinture d'astéroïdes (Kohler, 2012).

Encore plus loin, là où les composés glacés volatiles pouvaient rester solides, Jupiter et Saturne devinrent des géantes gazeuses. Uranus et Neptune capturèrent moins de matière.

I.3. Composants du système solaire :

I.3.1. Le soleil :

Le Soleil est l'étoile du système solaire. Dans la classification astronomique, c'est une étoile de type naine jaune, composée d'hydrogène (74 % de la masse ou 92,1 % du volume) et d'hélium (24 % de la masse ou 7,8 % du volume). Autour de lui gravitent la Terre, et sept autres planètes non lumineuses, au moins cinq planètes naines, astéroïdes et comètes et une bande de poussière. Le Soleil représente à lui seul 99,86 % de la masse du Système solaire.

I.3.2. Les planètes telluriques :

Les planètes les plus proches du soleil, Mercure, Vénus, la Terre et Mars (Fig.2), ont un sol, et des dimensions et des densités comparables : la plus petite est Mercure et la plus grande la Terre, avec des rayons respectifs de 2400 et 6400 km. La Terre et Vénus possèdent une atmosphère importante, Mars a une atmosphère très ténue, et Mercure en est totalement dépourvue.

La Terre a un satellite naturel, la Lune ; Mars en a deux, Mercure et Vénus n'en ont pas. Tout de suite après leur formation, il y a environ 4,5 milliards d'années, ces planètes ont subi un important bombardement par les météorites, ce qui a modifié leurs surfaces, créant des cratères d'impact et des bassins. Ce sont ensuite des phénomènes géologiques, volcanisme et tectonique, qui ont provoqué leur évolution ultérieure ; dans certains cas, comme celui de la Terre, les phénomènes atmosphériques et hydrophériques ont modifié l'état de la surface, par érosion et sédimentation (Sotin et al., 2009).

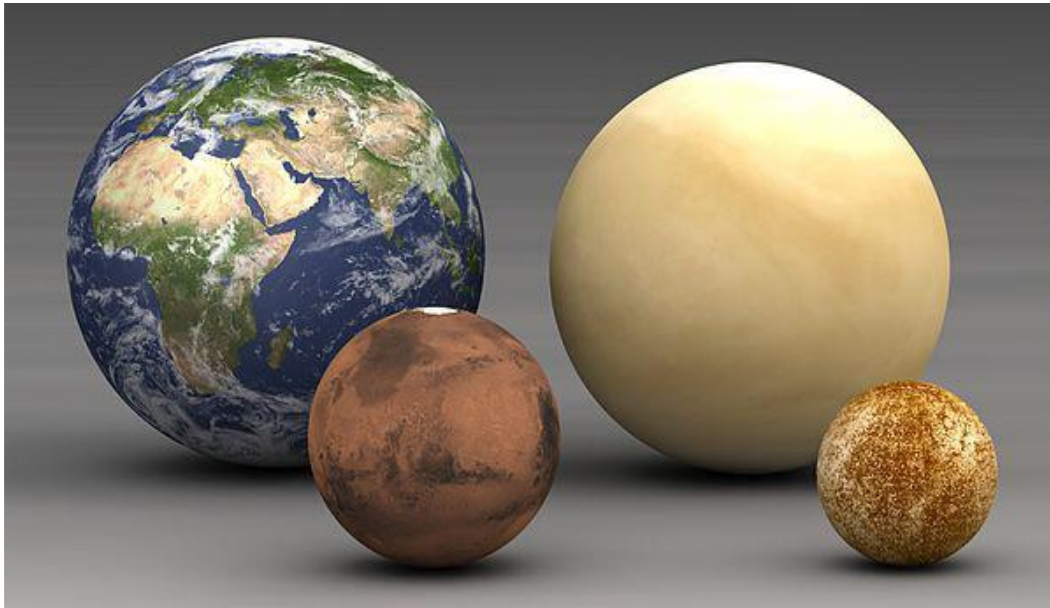


Fig. 02 : Les 04 planètes telluriques : système solaire interne.

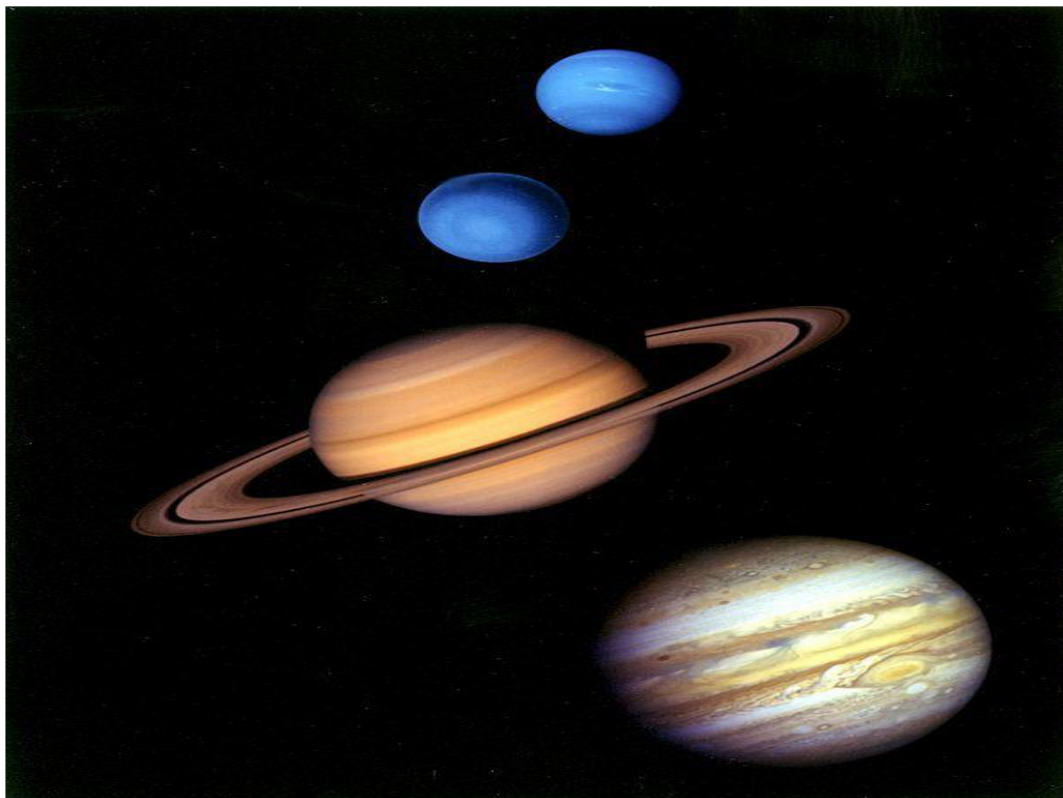


Fig. 03 : Les 04 planètes géantes : système solaire externe.

I.3.3. Les planètes joviennes (géantes) :

Jupiter et Saturne sont les deux plus grosses planètes du système solaire, avec des diamètres de l'ordre de 10 fois celui de la Terre, suivies par Uranus et Neptune, qui sont 4 à 5 fois plus grosses que la Terre (Fig.3). Elles sont constituées essentiellement d'hydrogène, généralement sous forme moléculaire, et d'hélium. Elles ne possèdent pas de véritable sol, mais un noyau central de roches et de glaces, plus important chez Uranus et Neptune (Sotin et al., 2009). Ces planètes ont toutes les quatre un grand nombre de satellites : 16 pour Jupiter, 17 pour Saturne.

I.3.4. La ceinture d'astéroïdes :

Entre les orbites de Mars et Jupiter gravite des milliards de petits cailloux gelés dans un anneau large de 220 millions de km (Ceinture d'astéroïdes) (Fig.4). Il s'agit d'astéroïdes, le plus gros d'entre eux est Cérès qui mesure 950 km de diamètre. Il appartient également à la famille des planètes naines (Kohler, 2012).

La plupart des astéroïdes ne mesurent que quelques dizaines ou centaines de kilomètres de diamètre et ont une forme particulière, jamais sphérique, aplatie pour les uns, elliptique pour la plupart, dont la surface est couverte de cratères et de rochers suite aux nombreuses collisions qu'ils ont subies. Les astronomes pensent qu'ils ne sont que le reste d'une planète avortée ou en cours de formation ou encore une planète qui aurait éclaté et dont les fragments se seraient dispersés dans le cosmos.

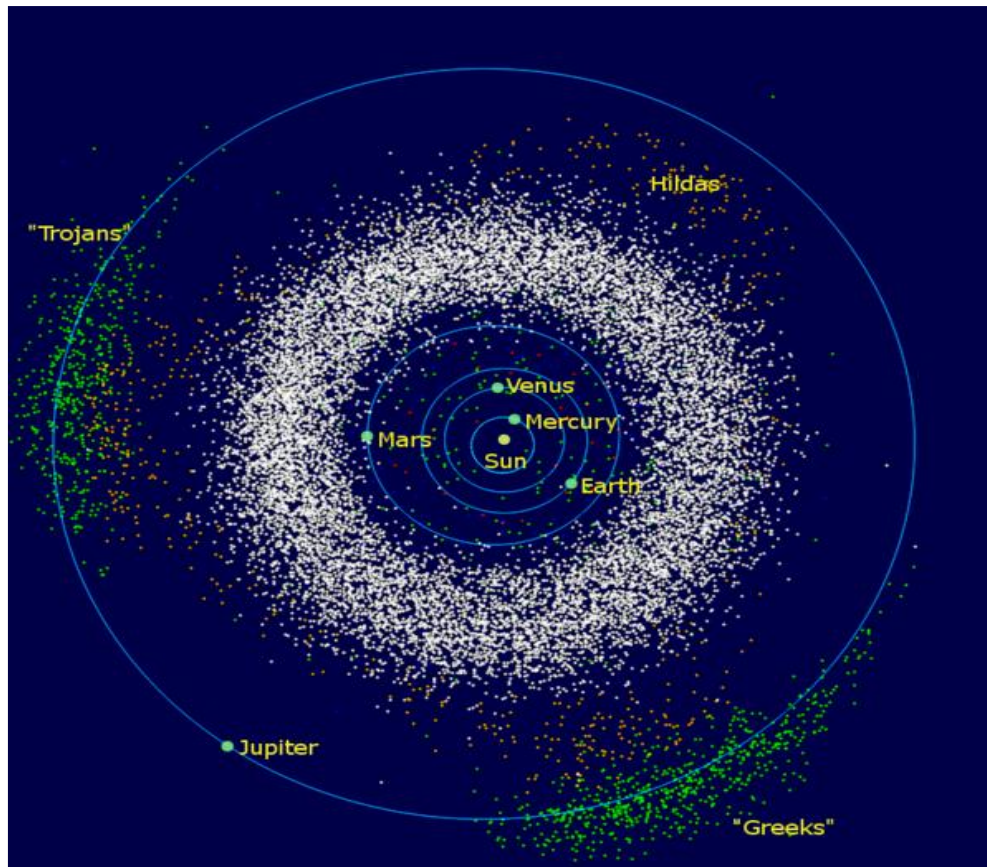


Fig. 4 : Schéma de la ceinture d'astéroïdes.

La plus part des astéroïdes appartiennent également à l'un des six types suivants qui les classent en fonction de leur composition chimique : C, S, M, R, E ou Vesta.

- C signifie carboné : 75% des astéroïdes connus, ils sont très sombre et similaires aux météorites chondrites carbonées.

- S signifie silice : 17% des astéroïdes connus ils sont assez brillants et riche (Fe, Ni, Mg).

- M signifie métal : la plupart du reste des astéroïdes ils sont faits d'alliage (Fer-Nickel) et brillants.

- E signifie enstatite : une vingtaine de ce type ont été répertoriés 2008.

- R signifie rouge (ou red).

- V signifie vesta : environ 6% des astéroïdes de la ceinture principale sont des vésitoïdes et la plupart de ceux ce font partie de la famille vesta.

Ces petits corps nous permettent de connaître les origines du système solaire.

En effet, en-dehors de toute influence physico-chimique, située dans une région glacée de l'espace, ils ont préservé leurs constituants originels intacts.

I.3.5. Les planètes naines :

L'Union Astronomique Internationale (UAI) a créé une nouvelle classe d'objets « **les planètes naines** » dont les premiers membres sont Pluton, Charon, Cérès, Sedna et Eris.

I.3.6. Les comètes :

Les comètes sont des petits corps de quelques kilomètres de diamètre de formes irrégulières, composés pour les trois quarts de glaces, principalement de la glace d'eau, et pour le reste de poussières riches en carbone (Sotin et al., 2009).

I.3.7. La Ceinture de Kuiper :

La Ceinture de Kuiper est une population de petits corps glacés, de tailles similaires à celle des astéroïdes, occupant une région en forme d'anneau dans le plan du Système solaire et s'étendant de l'orbite de Neptune (30 UA du Soleil) jusqu'à environ 100 ou 150 UA (Kohler, 2012).

I.3.8. Les météoroïdes :

En plus des astéroïdes, le système solaire est peuplé d'innombrables corps de dimension plus réduite, de moins d'un mètre de diamètre, appelés météoroïdes. Leur existence n'est mise en évidence que lorsque l'un d'eux pénètre dans l'atmosphère terrestre, s'échauffe du fait de la friction avec celle-ci, à une altitude d'une centaine de kilomètres, et finit par se consumer. Ce phénomène donne lieu à une traînée lumineuse appelée météore ou étoile filante, l'une des attractions du ciel nocturne. Lorsque le météoroïde n'est pas complètement consumé par son passage dans l'atmosphère, un résidu appelé météorite peut atteindre la surface terrestre. Lorsque ce résidu est de taille conséquente, l'impact sur la surface est très violent et donne lieu à un cratère.

II.1. Introduction :

L'astéroïde (4) Vesta est l'un des plus petits corps intéressants dans la ceinture d'astéroïdes principale du point de vue géologique qui porte des caractéristiques similaires aux planètes terrestres. Géologiquement est un corps chondritique différencié le plus varié qui est resté intact au cours des événements collisionnels catastrophiques dans le système solaire précoce (Keil 2002). L'exploration d'un tel organe planétaire enrichit la compréhension des conditions géologiques répandues dans le système solaire précoce. Les preuves pétro-géochimiques et spectrales, suggèrent jusqu'à présent que Vesta est le corps parent de nombreuses météorites Howardite-Eucrite-Diogenite (HED) (McCord et al., 1970; McSween et al, 2011). Les modèles basés sur la pétrogenèse des HED (Ruzicka et al., 1997) favorisent l'évolution de Vesta par une fusion extensive (océan magmatique).

Avant de discuter de la minéralogie de la surface et des aspects évolutifs, il convient de bien comprendre la suite des météorites Howardite, Eucrite et Diogenite (HED) puisqu'elles servent d'analogues à la composition de Vesta. Dans le groupe des achondrites, le groupe des HED comprend 60% d'abondance (McSween et al., 2013). Au total, 1450 météorites HED ont été signalées à ce jour (Mittlefehldt, 2015).

L'astéroïde 4Vesta est considéré comme la plus petite planète terrestre (525 km diamètre) en raison de son intérieur intact et de la croûte basaltique différenciés. L'astéroïde 4 Vesta est le seul astéroïde différencié avec une structure interne, probablement composé d'un noyau métallique, un manteau de roches ultramafiques, et une croûte basaltique (McSween et al., 2011).

De nombreuses preuves indiquent que les météorites sont des fragments d'impact sur Vesta, et des études détaillées de ces météorites dans les laboratoires, combiné avec des études de télédétection sur l'astéroïde, ont abouti à une bonne compréhension de l'évolution géologique de ce fascinant objet. Les études minéralogiques, pétrologiques, géochimiques et

isotopiques suggèrent que le réchauffement, la fusion, et la formation d'un noyau métallique, d'un manteau, et d'une croûte basaltique a eu lieu dans les premiers millions d'années d'histoire du système solaire (McCord et al., 1970). Il est probable que plusieurs corps comme Vesta se sont formés dans le système solaire mais ont été détruits par des impacts, et les météorites de fer étant les restes de leurs noyaux (McSween, 1987).

I1.2- Histoire de 4 Vesta :

Vesta est le quatrième astéroïde découvert (par Olbers le 29 mars 1807). Par la taille, il est le second, surpassé seulement par Cérés. C'est un corps assez grand pour avoir une forme pratiquement sphérique. Mais vu depuis la Terre, c'est un tout petit corps non résolu par les télescopes traditionnels. Seul le télescope spatial a permis d'en avoir une image floue, mettant en évidence quelques taches, et une dépression dans la région sud (McCord et al., 1970). Mais il fallait une sonde à proximité pour en obtenir des renseignements scientifiquement exploitables. C'est chose faite depuis le mois de juillet 2011, lorsque la sonde américaine Dawn s'est placée en orbite autour de Vesta. On dispose maintenant d'images à haute résolution.

Le 24 août 2006, l'Union Astronomique Internationale a décidé de modifier la définition d'une planète, à la suite de la découverte de nombreux corps de taille semblable ou supérieure à celle de Pluton, et circulant sur des orbites comparables. Avec cette nouvelle définition, les plus gros astéroïdes sont maintenant nommés *planètes naines*. Pour avoir ce titre, un corps doit être sphérique. Or il est difficile de vérifier cette propriété, et c'est pourquoi Cérés est le seul astéroïde de la ceinture principale à avoir déjà reçu ce titre. Pour les autres, dont Vesta, la décision est suspendue. Mais on sait déjà que Vesta n'est pas vraiment sphérique (Fig.5) ; cependant, il a reçu un fort impact qui l'a évidemment déformé.

II. 3. Structure de 4Vesta :

II. 3.1. Dimensions :

Vesta n'étant pas parfaitement sphérique, ses dimensions sont : $578 \times 560 \times 458$ km (Coradini et al., 2011). La surface est constituée de basalte, probablement épanché par volcanisme peu après la formation de Vesta (Wilson and Keil, 1996). Cet astéroïde est en effet assez gros pour avoir contenu, lors de sa formation, assez de matériaux radioactifs pour que son intérieur fonde, et produise du volcanisme.

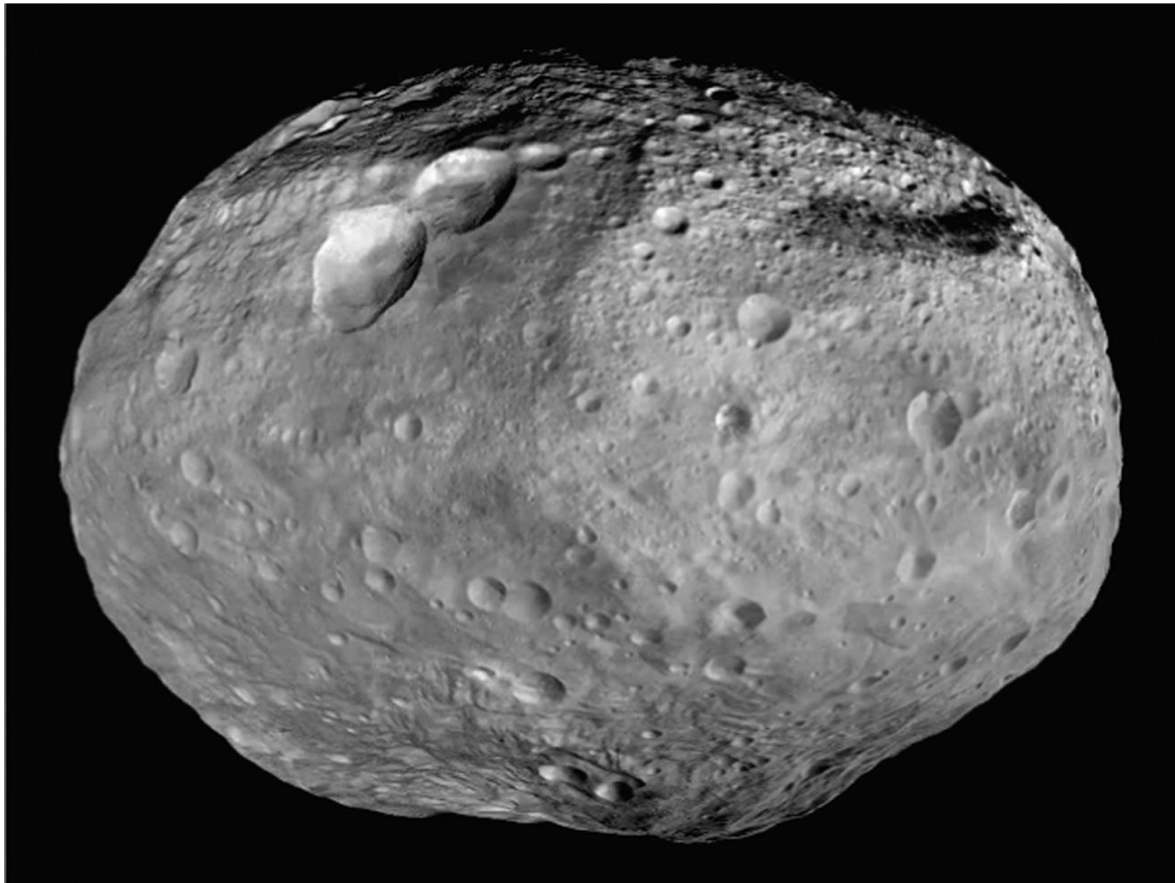


Fig. 5 : Astéroïde Vesta. Image crédit : NASA/JPL-Caltech/UCLA/

II. 3.2. Composants :

L'imagerie en différentes longueurs d'onde met en évidence une grande diversité de compositions minéralogiques (De Sanctis et al., 2013). La surface de l'astéroïde Vesta, comme celle de tous les petits corps n'ayant pas d'atmosphère, semble très cratérisé. Les comptages de cratères, qui permettent d'avoir une idée de l'âge des terrains, indiquent que l'hémisphère Sud a un âge de 1 à 2 milliards d'années, tandis que l'hémisphère Nord (Fig.6) est plus vieux (4 milliards d'années),

il est très cratérisée (Marchi et al., 2012). L'immense cratère qui défigure le pôle Sud (Fig.7), **Rhéasilvia**, témoigne des chocs reçus par Vesta. La sonde Dawn a permis de découvrir l'existence d'un second cratère dans la même région (Lindsay et al., 2015). Ses données révèlent également que ces deux cratères, que l'on pensait âgés de 3,5 à 4 milliards d'années, sont finalement beaucoup plus jeunes, Rhéasilvia, dont le cratère d'impact mesure 500 km de diamètre et 19 km de profondeur, se serait formé il y a un milliard d'années. Ce cratère cache en partie un autre cratère, de 400 km de large, appelé **Veneneia**, formé il y a 2 milliards d'années (McSween et al., 2013).

Rhéasilvia est le plus grand cratère de Vesta –sa largeur représente 90% du diamètre de Vesta- et les matières éjectées recouvrent le pôle Sud. Au centre du bassin d'impact se dresse un sommet plus haut que l'Everest (Fig.7), comparable au Mont Olympus sur Mars (Marchi et al., 2012).

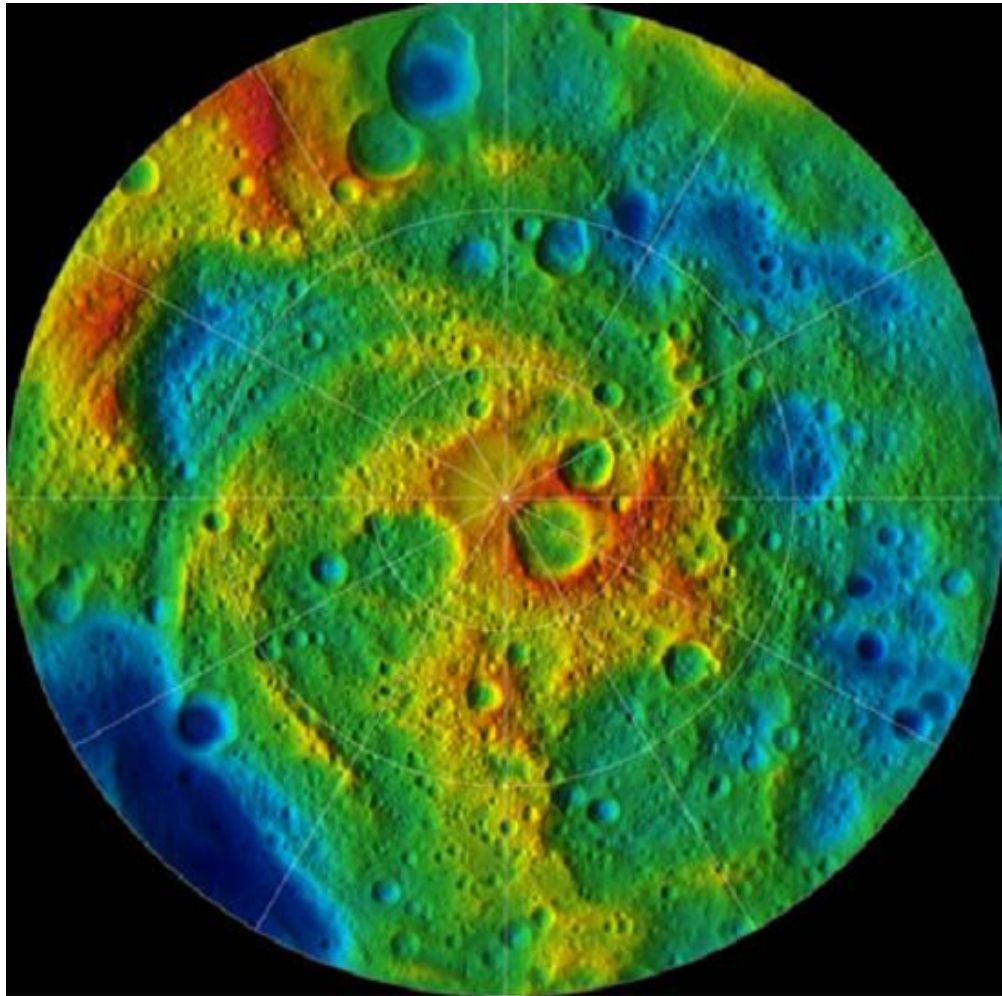


Fig. 6 : Hémisphère Nord de Vesta. . Image crédit : NASA/JPL-Caltech/UCLA/

L'impact a éjecté une partie de la masse de l'astéroïde. Ces matériaux ont été placés sur des orbites autour du Soleil, sur lesquelles on les retrouve aujourd'hui sur Terre : ils forment la famille (HED) de Vesta. Ce sont alors des météorites, et elles sont de trois types différents : les eucrites, les diogénites et les howardites (groupe HED). Les diogénites sont des roches plutoniques, profondes. Excavées probablement du pôle sud par l'impact qui a

creusé Rhéasilvia (Lindsay et al., 2015). La mission Dawn confirme en effet qu'une famille de météorites récoltées sur Terre provient bien de Vesta, plus précisément de ces deux cratères d'impacts qui ont creusé la surface de Vesta au pôle Sud. La sonde a retrouvé dans les cratères d'impacts de Rheasilvia et de Veneneia, les signatures des mêmes minéraux que ceux qui sont présents dans les météorites HED (De Sanctis et al., 2013).

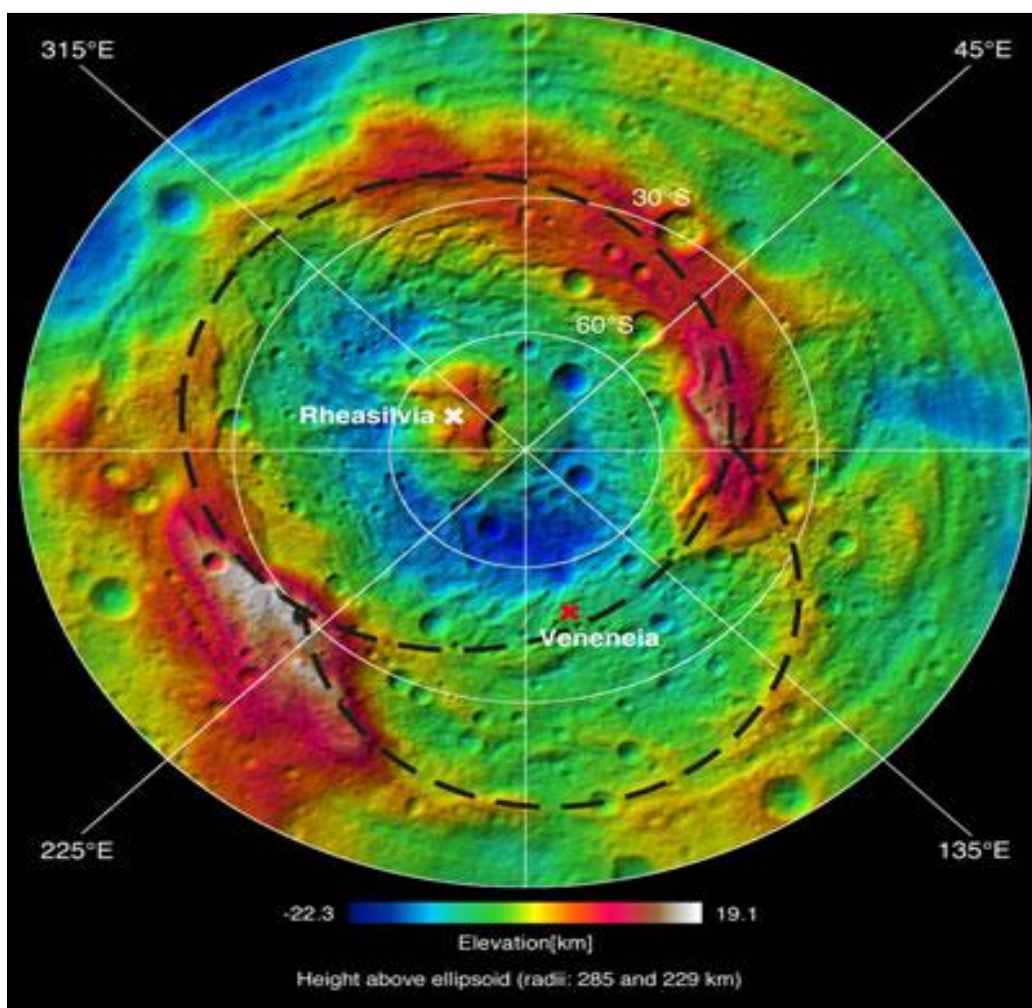


Fig. 7 : Hémisphère Sud de Vesta. Le bleu est assigné aux zones les plus basses, et le rouge et le blanc aux plus élevées.
Image crédit : NASA/JPL-Caltech/UCLA/

III.1. Introduction :

Le clan météorite HED représente un groupe de météorites lié par la différenciation et des phénomènes magmatiques au début des événements dans le système solaire (Hewins and Newsom, 1988).

III.2. Les constituants de 4Vesta (Howardites ; Eucrites et Diogénites) :

III.2.1. Les eucrites :

Les eucrites sont des roches basaltiques formant la croûte de Vesta. Ils sont soit volcaniques (eucrites non cumulatives) ou plutoniques (eucrites cumulatives), roches intrusives, cristallisée dans les plutons peu profondes au sein de la croûte de Vesta.

III.2.1.1. Pétrographie :

Les eucrites présentent différents types de textures (Fig.8). Les eucrites non cumulatives présentent des textures basaltiques à grain grossier ophitiques et sub-ophitiques. En second lieu, les eucrites cumulatives à pigeonite et plagioclases plus grossiers qui représentent des cumulats dans des plutons peu profonds. Les eucrites peuvent être le plus souvent bréchifiées avec une seule lithologie (monomict) ou à plusieurs lithologies différentes (polymict).

III.2.1.2. Composition minéralogique :

Ils sont composés principalement de pigeonite et de plagioclase, associés accessoirement à des phosphates et la silice, des minéraux opaques comme le fer métal, la troilite (sulfure de fer), et l'ilménite.

III.2.3. Les Diogénites :

Les Diogénites sont des roches formées de cumulats d'orthopyroxènes. Elles se sont cristallisées dans les plutons profonds au sein de Vesta (Mittlefehldt, 1994).

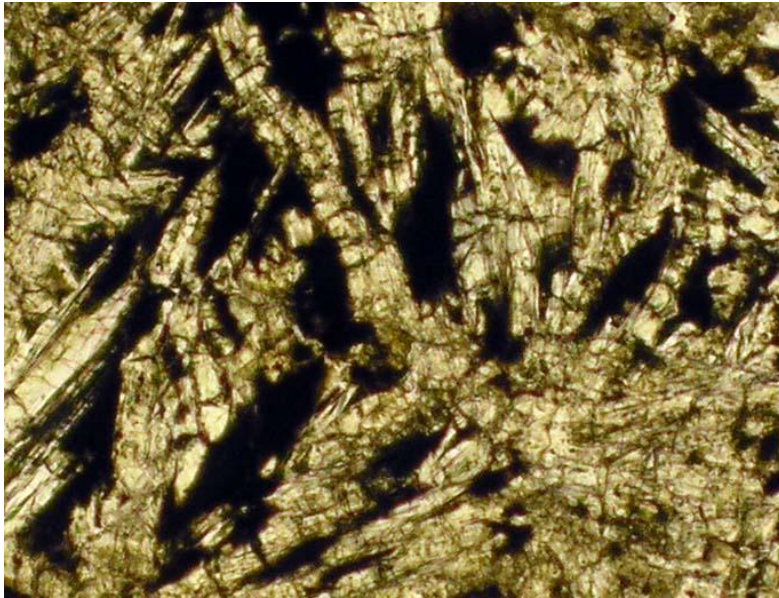
III.2.3.1. Pétrographie :

Les Diogénites sont à gros grains ont une texture plus grossière que les eucrites, quelque fois, très bréchiques (Fig.9).

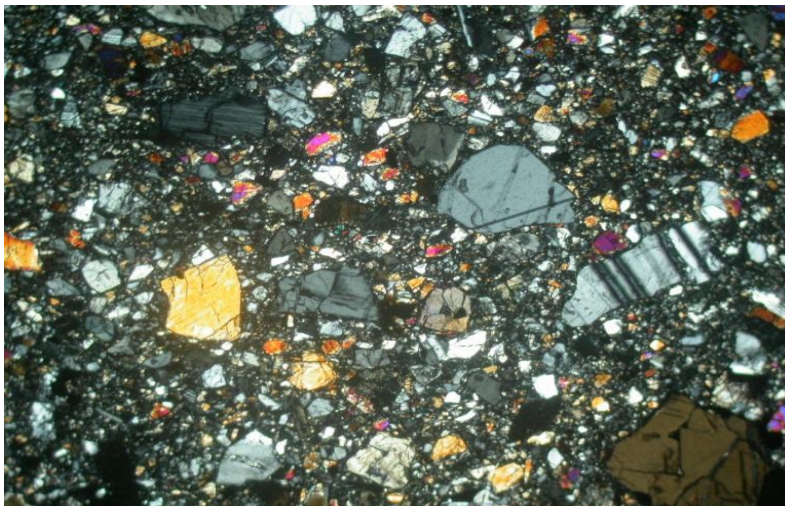
III.2.3.2. Composition minéralogique :

Les Diogénites sont principalement composées de plus de 90% de l'orthopyroxène riches en magnésium. En proportions mineures, de plagioclase, d'olivine, de clinopyroxène, et des minéraux opaques comme la chromite, la troilite et le fer métal.

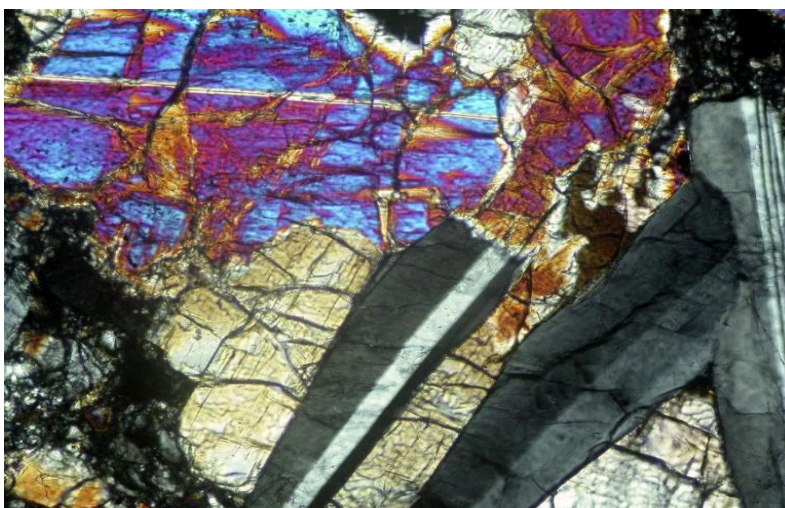
Bien que l'olivine soit typiquement < 10 %, il y a un groupe de diogénites à olivine qui contiennent jusqu'à 50% d'olivine. Il s'agit d'un grand intérêt pour les spécialistes de météorite HED parce qu'ils peuvent offrir un aperçu sur le manteau de l'astéroïde Vesta, et les processus de fusion partielle.



A



B



C

Fig. 8 : images en lumière transmise d'une eucrite non bréchique et non cumulative (A) et une eucrite bréchique (B) et une eucrite cumulative (C) (in Seddiki et al.2013).

III.2.2. Les Howardites :

Les Howardites sont des brèches d'impact constituées de fragments d'eucrites et de diogénites. Ce sont des brèches de surface formées au cours d'impact successives et consolidées ultérieurement (McSween et al., 2011).

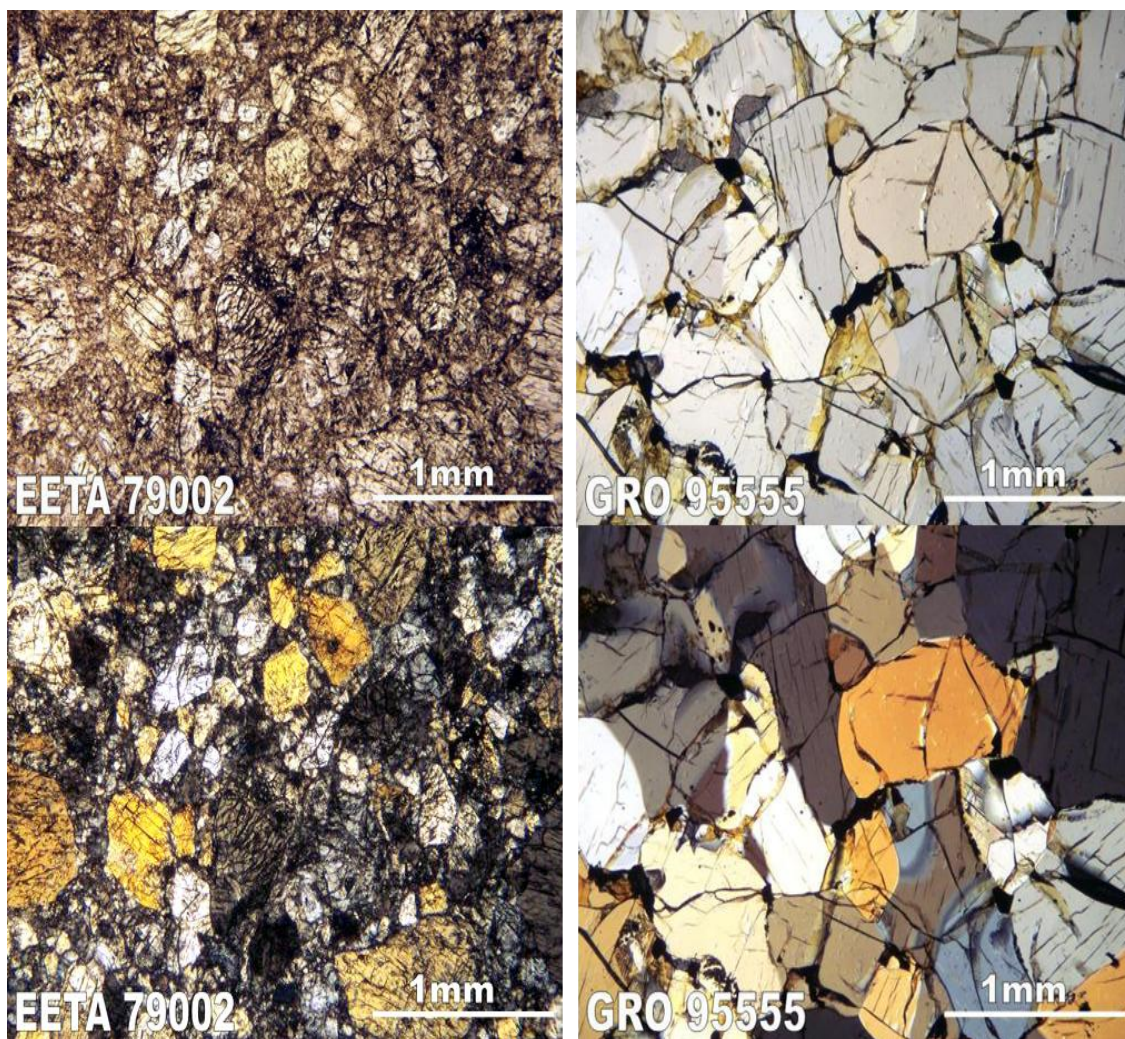


Fig. 9 : images en lumière transmise d'une diogénite bréchifiée (à gauche) et d'une diogénite non bréchifiée (à droite) (Images in : curator.jsc.nasa.gov).

III.2.2.1. Pétrographie :

Les Howardites sont définis comme ayant plus de 10 % de fragments diogenitiques, et ils sont également connus pour contenir des matières étrangères telles que les clastes de chondrite carbonée (Delaney et al, 1983).

III.2.2.2. Composition minéralogique :

Les Howardites sont des mélanges de matériel diogenitique et eucritique. Le matériel eucritique est formé par des plagioclases et des pigeonite et le matériel diogenitique est essentiellement à orthopyroxène.

III.2.4. Le métamorphisme dans les HED :

Beaucoup d'eucrites et de diogénites ont été métamorphosés de telle sorte que leurs pyroxènes et leurs plagioclases ont été équilibrés. Ces roches ont perdu tout enregistrement igné et ont été recristallisées dans des textures granulitiques à grain fin.

Après les processus magmatiques dans les corps différenciés, il y a eu des processus secondaires dus essentiellement aux impacts successifs dans ces corps et aussi à des successions d'épanchements magmatiques qui font subir aux roches anciennes des enfouissements progressifs.

Plusieurs eucrites basaltiques ont été affectées par un métamorphisme thermique. Il s'est bien individualisé par l'équilibration et l'homogénéisation de leurs pyroxènes avec des exsolutions en lamelles d'augite et la disparition progressive de la texture magmatique ophitique (Takeda et Graham, 1991). Car, les basaltes eucritiques sont caractérisés par un large intervalle de composition des pyroxènes au cours de leur cristallisation. Au cours du métamorphisme, la chromite commence à cristalliser et à précipiter dans les pyroxènes leur

donnant un aspect trouble. Ces chromites sont le résultat de la réduction des pyroxènes riches en Cr et en Ti durant le métamorphisme.

La source et la durée du réchauffement secondaire qui a induit au métamorphisme des eucrites ne sont pas définies. Trois hypothèses ont été proposées pour la source de chaleur secondaire. Takeda et Graham (1991) ont proposé un réchauffement par impact comme processus important du métamorphisme thermal. Une autre source de chaleur avait une origine par des successions rapides d'épanchements de coulées basaltiques qui ont contribué à des enfouissements progressifs (Yamaguchi et *al.*, 1996). La majorité des eucrites ont subi ce type de métamorphisme, ce qui suggère aussi que l'astéroïde 4Vesta a subi un métamorphisme crustal global.

III.2.5. Age des HED:

Basé sur l'analyse isotopique de longue durée des systèmes isotopiques, la différenciation du corps parent des HED a eu lieu seulement quelques millions d'années après la formation du système solaire. Bien qu'un grand nombre de chronomètres à longue durée de vie ont donné des âges qui ont moins de 4,4 Ga (Tera et *al.*, 1997). Un isochrone Lu-Hf sur des eucrites a fourni un âge de 4,464 Ga (Blichert-Toft et *al.*, 2002). Ces anciens âges ont été pris en charge par de plus récentes obtenues à l'U-Pb sur zircons, produisant une gamme d'âges de 7 à 20 Ma après la formation du système solaire (McSween et *al.*, 2011).

III.2.6. Formation des HED :

Les eucrites basaltiques sont divisées en deux groupes sur la base de leurs compositions : le groupe principal ou la lignée Nuevo Laredo définit une séquence formée par cristallisation fractionnée d'un liquide magmatique primitif, à pigeonite et plagioclase, et dont

ont été fractionnées précocement des diogénites comme les pyroxénites cumulatives (Ruzicka et al., 1997). La lignée Stannern représente une séquence de fusion partielle (de 5 à plus de 20 %) d'un corps parental à olivine-pyroxène-plagioclase-spinelle-métal (Stolper, 1977) (Fig.10 et 11).

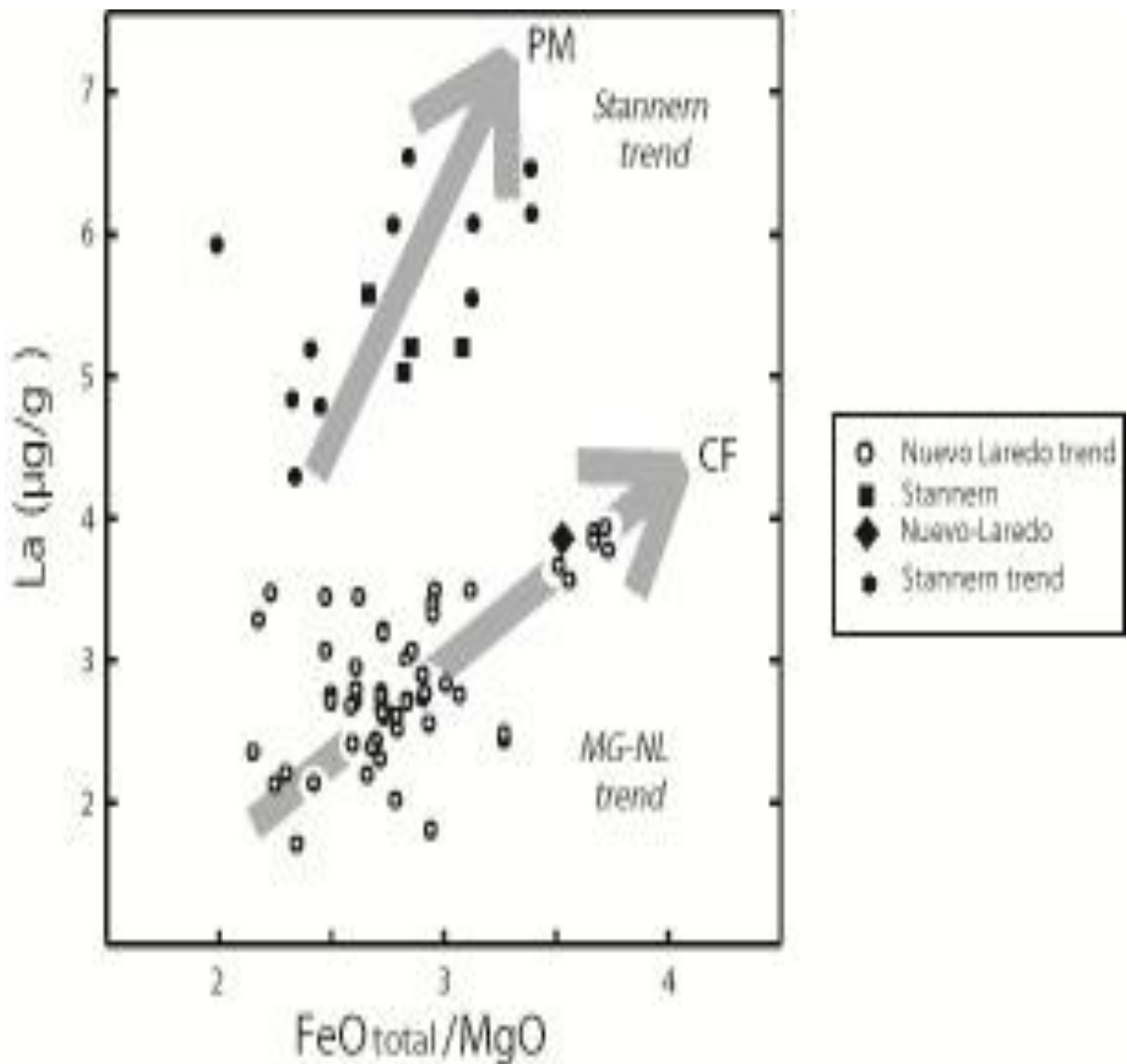


Fig.10 Evolutions Stannern et Nuevo Laredo d'après Mittlefehldt et Lindstrom, 2003. CF

- Cristallisation fractionnée ; FP - Fusion partielle.

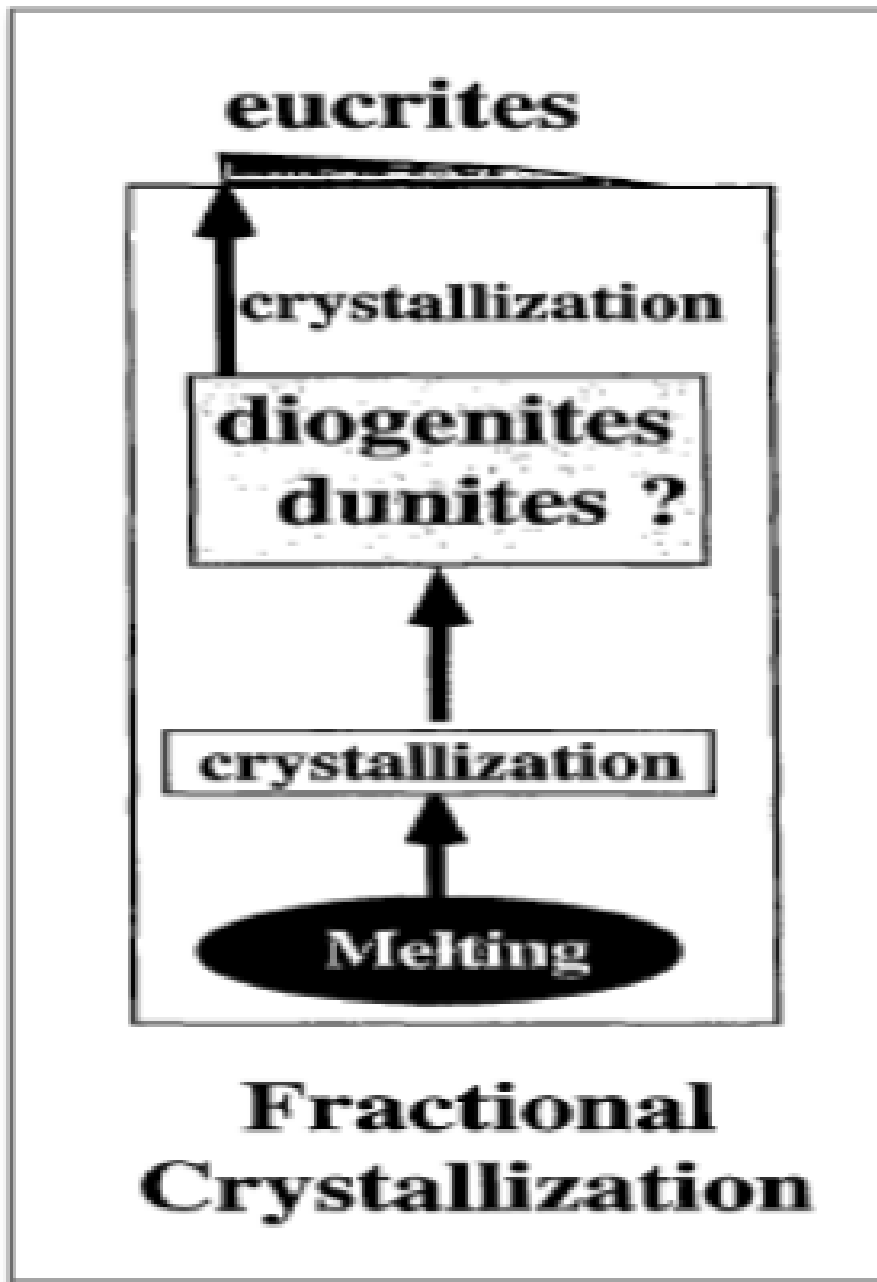


Fig. 11 : schéma illustrant le concept de cristallisation fractionnée pour les diogénites et les eucrites (Shearer et al., 1997).

Conclusion générale

Notre système solaire contient une étoile, le soleil, autour duquel tournent huit planètes et leurs satellites, au moins trois planètes naines, ainsi qu'une multitude d'astéroïdes, de comètes, de roches et de poussières de toutes tailles reconnus collectivement, comme les petits corps du système solaire.

Ce travail s'intéresse à l'un de ces petits corps de notre système solaire, l'astéroïde 4Vesta, et notamment aux informations qui peuvent être obtenues à partir de fragments de ce corps tombés sur Terre, les météorites du groupe «HED». En effet, si nous voulons connaître avec précision l'histoire de notre système solaire, il est nécessaire de pouvoir comprendre et quantifier l'effet des phénomènes géologiques. Pour ce faire, rien de mieux que l'analogie avec des phénomènes observables sur Terre.

Entre les orbites de Mars et Jupiter gravite des milliards de petits corps (ceinture d'astéroïdes). Il s'agit d'astéroïdes, le plus gros d'entre eux est Cérés qui mesure 950 km de diamètre. Le deuxième est l'astéroïde 4Vesta qui mesure près de 500km. La plupart des astéroïdes ne mesurent que quelques dizaines ou centaines de kilomètres de diamètre et ont une forme particulière, jamais sphérique, aplatie pour les uns, elliptique pour la plupart, dont la surface est couverte de cratères et de rochers suite aux nombreuses collisions qu'ils ont subies.

Géologiquement est un corps chondritique différencié le plus varié qui est resté intact au cours des événements catastrophiques dans le système solaire précoce.

Nous proposons dans cette étude, la composition de la surface de Vesta, l'objet basaltique intact le plus massif de la ceinture d'astéroïdes, est intéressante car elle nous donne un aperçu de la différenciation magmatique des planètes maux qui ont finalement fusionné pour former les planètes terrestres. La répartition des unités lithologiques et compositionnelles à la surface de Vesta fournit des contraintes importantes sur son évolution pétrologiques, son impact sur l'histoire et sa relation avec les Vestoids et les Météorites-howardite eucrite-diogenite (HED). L'astéroïde 4 Vesta est le seul astéroïde différencié avec une structure interne, probablement composé d'un noyau métallique, un manteau de roches ultramafiques, et une croûte basaltique. Les études minéralogiques, pétrologiques, géochimiques et isotopiques suggèrent que le réchauffement, la fusion, et la formation d'un noyau métallique, d'un manteau, et d'une croûte basaltique a eu lieu dans les premiers millions d'années d'histoire du système solaire. L'hémisphère Nord est très cratérisée et plus vieux (4 milliards d'années), par rapport à l'hémisphère Sud qui a un âge de 1 à 2 milliards d'années. Ce dernier est caractérisé par un immense cratère (Rhéasilvia), qui témoigne d'une importante collision qui a défiguré la partie Sud de Vesta. L'impact a éjecté une partie de la masse de l'astéroïde. Ces matériaux ont été placés sur des orbites autour du Soleil, sur lesquelles on les retrouve aujourd'hui sur Terre : ils forment la famille (HED) de Vesta.

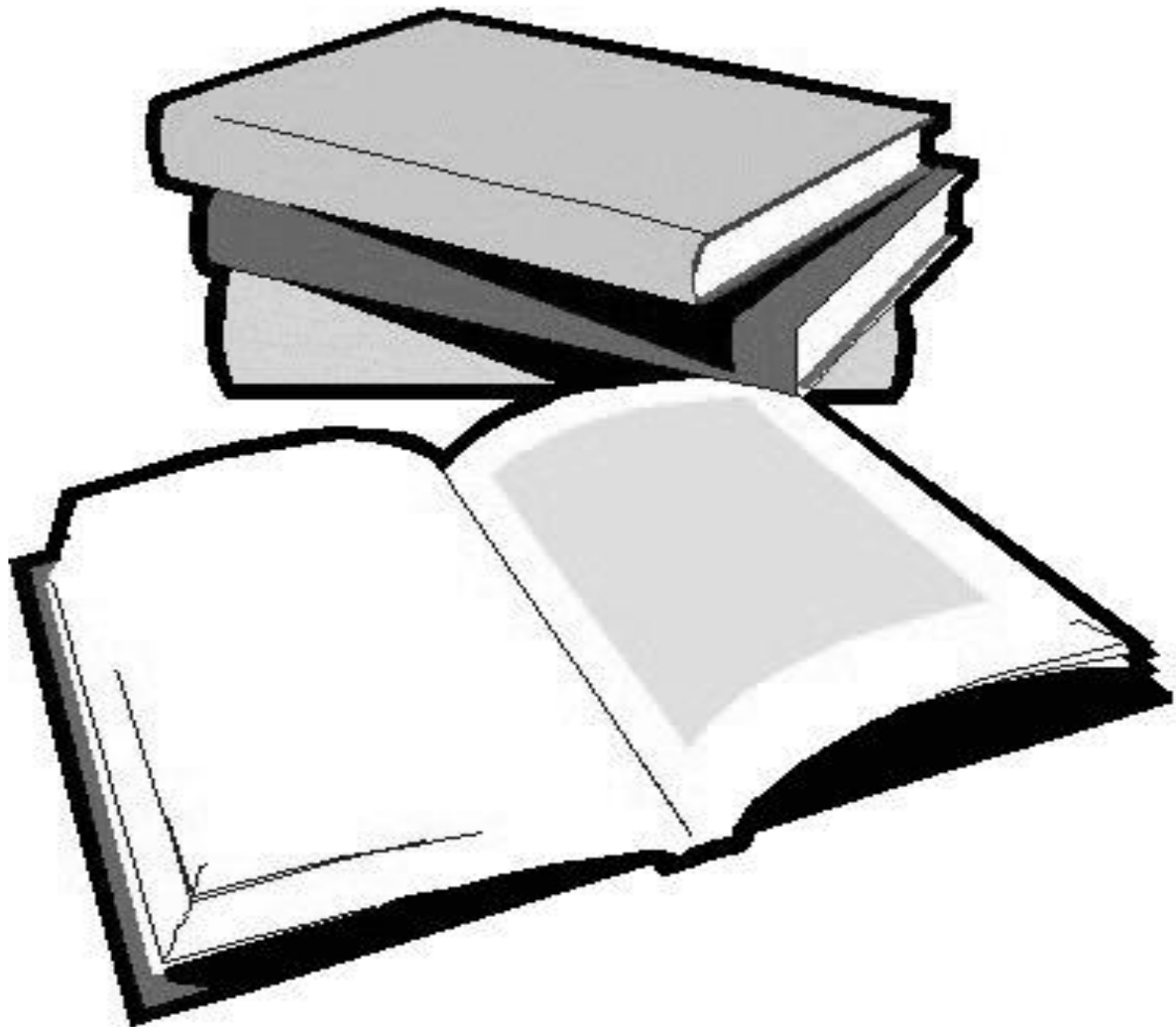
Les météorites «HED» représentent un groupe de roches liées par la différenciation et des phénomènes magmatiques dans l'astéroïde Vesta. Les eucrites sont des roches basaltiques formant la croûte de Vesta. Ils sont soit volcaniques (eucrites non cumulatives) ou plutoniques (eucrites cumulatives), roches intrusives, Cristallisée dans les plutons peu profonds au sein de la croûte de Vesta. Elles sont souvent bréchifiées et constituées essentiellement de pigeonites et de plagioclases. Les Diogénites sont des roches formées de cumulats d'orthopyroxènes. Elles se sont cristallisées dans les plutons profonds au sein de Vesta. Les Howardites sont des brèches d'impact constituées de fragments d'eucrites et de diogénites (plus de 10%). Ce sont des brèches de surface formées au cours d'impact successives dans l'astéroïde Vesta. Les études isotopiques ont fourni un âge aux HED d'environ 4,464 Ga.

Après les processus magmatiques dans les corps différenciés, il y a eu des processus secondaires dus essentiellement aux impacts successifs dans ces corps et aussi à des successions d'épanchements magmatiques qui font subir aux roches anciennes des enfouissements progressifs. Ces roches ont été transformées de telle sorte que leurs pyroxènes et leurs plagioclases ont été équilibrés. Ces roches ont perdu tout enregistrement igné et ont été recristallisées dans des textures granulitiques à grain fin. La majorité des eucrites ont subi ce type de métamorphisme, ce qui suggère que l'astéroïde 4Vesta a subi un métamorphisme crustal global.

LISTE DES FIGURES

Fig. 1 : le Système solaire.....	1
Fig. 02 : Les 04 planètes telluriques : système solaire interne.....	3
Fig. 03 : Les 04 planètes géantes : système solaire externe.	3
Fig. 4 : Schéma de la ceinture d'astéroïdes.	6
Fig. 5 : Astéroïde Vesta. Image crédit : NASA/JPL-Caltech/UCLA/.....	7
Fig. 6 : Hémisphère Nord de Vesta Image crédit : NASA/JPL-Caltech/UCLA/.....	9
Fig. 7 : Hémisphère Sud de Vesta ((Veneneia et Rhéasilvia). Le bleu est assigné aux zones les plus basses, et le rouge et le blanc aux plus élevées. Image crédit : NASA/JPLCaltech/UCLA.....	10
Fig. 8 : images en lumière transmise d'une eucrite non bréchique et non cumulative (A) et une eucrite bréchique (B) et une eucrite cumulative (C) (in Seddiki et al.2013).....	12
Fig. 9 : images en images en lumière transmise d'une diogénite bréchifiée (à gauche) et d'une diogénite non bréchifiée (à droite) (Images in : curator.jsc.nasa.go.....	13
Fig.10 : Evolutions Stannern et Nuevo Laredo d'après Mittlefehldt et Lundstrom, 2003. CF Cristallisation fractionnée ; FP - Fusion partiel.....	15
Fig. 11 : schéma illustrant le concept de cristallisation fractionnée pour les diogénites et les eucrites (Shearer et al., 1997).....	15

Références bibliographiques



References:

- [1] Blichert-Toft J., Boyet M., Te'louk P., and Albare`de F. (2002) $^{147}\text{Sm}/^{143}\text{Nd}$ and $^{176}\text{Lu}/^{176}\text{Hf}$ in eucrites and the differentiation of the HED parent body. *Earth Planet. Sci. Lett.* 204, 167–181.
- [2] Brahic André, Anny-Chantal Levasseur-Regourd (2009). *Système solaire et planètes*. Volume 1 de *Année mondiale de l'astronomie 2009* ; Éditions Ellipses ; 249 pages.
- [3] Sotin Christophe, Olivier Grasset, Gabriel Tobie (2009). *Planétologie : Géologie des planètes et des satellites*. Éditions Dunod ; 368 pages.
- [4] Coradini A., Turrini D., Federico C., and Magni G. 2011. Vesta and Ceres: Crossing the History of the Solar System. *Space Science Review* 163:25-40.
- [5] Delaney JS, Takeda H, Prinz M, Nehru CE, Harlow GE (1983) the nomenclature of polymict basaltic achondrites. *Meteoritics* 18(2):103–111.
- [6] De Sanctis, M.C. et al., 2013. Vesta's mineralogical composition as revealed by the visible and infrared spectrometer on Dawn. *Meteorit. Planet. Sci.* 48, 2166–2184.
- [7] Hewins R. H. and H. E. Newsom. (1988) igneous activity in the early solar system. In *Meteorites and the Early Solar System* (eds. J. F. Kerridge and M. S. Matthews), pp. 73–101. Univ. of Arizona Press.

- [8] Keil K. 2002. Geological history of asteroid 4 Vesta: The “smallest terrestrial planet.” In *Asteroids III*, edited by Bottke W., Cellino A., Paolicchi P., and Binzel R. P. Tucson, Arizona: The University of Arizona Press. pp. 573–584.
- [9] Levy, David H (1996). *Étoiles et planètes*. Éditions Nathan (coll. Les clés de la connaissance) ; 64 p.
- [10] Lindsay F. N., Delaney J.S., Herzog G. F., Turrin B.D., Park J., Swisher C. C.(2015). Rheasilvia provenance of the Kapoeta howardite inferred from $\sim 1\text{Ga }^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ feldspar ages. *Earth and Planetary Science Letters*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2014.12.049>.
- [11] Marchi S., McSween H. Y., O’Brien D. P., Schenk P., De Sanctis M. C., Gaskell R., Jaumann R., Mottola S., Preusker F., Raymond C. A., and Russell C. T. 2012. The violent collisional history of asteroid 4 Vesta. *Science* 336:690–694, doi:10.1126/science.1218757.
- [12] McCord T. B., Adams J. B., Johnson T. V. (1970). Asteroid Vesta: Spectral reflectivity and compositional implications. *Science* 178:745-747.
- [13] McSween H.Y. (1987). *Meteorites and their Parent Bodies*. *Cambridge University Press*, 233 p.
- [14] McSween H. Y. jr., Mittlefehldt D. W., Beck A. W., Mayne R. G., McCoy T. J. (2011). HED meteorites and their relationship to the geology of Vesta and the Dawn mission. *Space Science Reviews* 163:141-174.

- [15] McSween H. Y., Ammannito E., Reddy V., Prettyman T. H., Beck A. W., De Sanctis M. C., Nathues A., Le Corre L., O'Brien D. P., Yamashita N., McCoy T. J., Mittlefehldt D. W., Toplis M. J., Schenk P., Palomba E., Tosi F., Zambon F., Longobardo A., Capaccioni F., Raymond C. A., and Russell C. T. (2013). Composition of the Rheasilvia basin, a window into Vesta's interior. *Journal of Geophysical Research* 118:1–12, doi:10.1002/jgre.20057.
- [16] Mittlefehldt, D.W. (1994) the genesis of diogenites and HED parent body petrogenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58, 1537–1552.
- [17] Mittlefehldt D.W. and Lindstrom M.M. (2003). Geochemistry of eucrites: Genesis of basaltic eucrites, and Hf and Ta as petrogenetic indicators for altered antarctic eucrites. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, vol.67, n° 10, pp.1911-1935.
- [18] Mittlefehldt David W. (2015). Asteroid (4) Vesta: I. The howardite-eucrite-diogenite (HED) clan of meteorites. *Chemie Erde-Geochem.* 75, 2, 155–183.
- [19] Kohler Pierre (2012). *Système solaire*. Éditions Fleurus ; 47 pages.
- [20] Ruzika A., Snyder G.A. and Taylor L.A. (1997). Vesta as the howardite, eucrite and diogenite parent body: Implications for the size of core and for large-scale differentiation. *Meteoritics and Planetary Science*, vol.32, pp.825-840.
- [21] Seddiki A. ; B. Moine ; J.Y. Cottin ; J. Bascou ; M. Godard ; F. Faure ; M. Bourot-Denise & N. Remaci (2013). A mineralogical and geochemical study of polymict eucrite discovered in Sahara of southwest Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*; 6:3175–3184.

- [22] Shearer C. K., Fowler G. W., and Papike J. J. 1997. Petrogenetic models for magmatism on the eucrite parent body: Evidence from orthopyroxene in diogenites. *Meteoritics & Planetary Science* 32:877–889.
- [23] Stolper E. (1977). Experimental petrology of eucrite meteorites. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, vol. 41, pp.587-611.
- [24] Takeda H, Graham AL (1991) Degree of equilibration of eucritic pyroxenes and thermal metamorphism of the earliest planetary crust. *Meteoritics* 26:129–134.
- [25] Tera, F., Carlson, R. W. & Boctor, N. Z. (1997) Radiometric ages of basaltic achondrites and their relation to the early history of the solar system: *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61(8): 1713-1731.
- [26] Yamaguchi A., Taylor G.J. and Keil K. (1996): Global crustal metamorphism of the eucrite parent body. *Icarus* 124 N° 0192, pp.97-112.
- [27] Willemez Anne, Laure Salès (2010). *Voyages dans le système solaire*. Éditions Fleurus; 79 pages.
- [28] Wilson L. and Keil K. (1996). Volcanic eruptions and intrusions on the asteroid 4 Vesta. *Journal of Geophysics Research*, vol.101, pp.18927-18940.