

N° d'ordre :



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

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master en Sciences de la Terre

Spécialité : **Géodynamique de la Lithosphère**

Thème :

L'histoire géologique de l'astéroïde 4Vesta

Présenté par :

Mlle. **Ikram DEKIOUS**

Mlle. **Asma HADDAR**

Soutenu le : 29/06/2021

Devant la commission d'examen :

Mr. Abdelmadjid SEDDIKI	Professeur	Université d'Oran 2	Président
Mlle. Ratiba KARED	MCB	Université d'Oran 2	Encadreur
Mr. Mohamed MAHMOUDI	MAA	Université d'Oran 2	Examineur

Oran 2020/2021

Remerciements

D'abord Merci à Dieu, qui nous a permis d'apprécier cette étape de notre parcours d'étude avec ce mémoire de fin d'étude. En fait ce mémoire représente bien plus qu'une simple affaire, c'est le but de cinq longues années d'étude. C'est pourquoi nous aimerions d'abord exprimer nos remerciements ici.

C'est avec un énorme plaisir que nous voulons chaleureusement réserver cette page à exprimer nos vifs remerciements et toute notre reconnaissance à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Nous adressons nos meilleures remerciements et gratitude à notre encadrante de mémoire Mlle Ratiba KARED de nous avoir apportées toutes les informations nécessaires pour ce travail dès le premier voyage. Nous la remercions aussi pour son soutien et tous ses mots d'encouragements. Un Grand Merci également à Monsieur Abdelmadjid SEDDIKI pour avoir accepté de présider le jury de ce mémoire et qui nous a fait de plus l'honneur de présider et d'évaluer notre travail. Nous adressons aussi nos vifs remerciements à Monsieur Mohamed MAHMOUDI d'avoir accepté d'examiner ce mémoire et pour ses remarques et observations.

Nos remerciements les plus particuliers et les plus chaleureux vont à nos chers parents qui nous ont apportées beaucoup de soutien psychologique et financier pour leur patience et leur persévérance dans notre réussite scolaire, universitaire et personnelle...Merci beaucoup

Nous tenons à remercier tout(es) nos enseignant(es) du département des sciences de la Terre de l'université d'Oran 2 pour toutes les informations qui nous ont transmises durant notre parcours universitaire pour contribuer nos connaissances en Géologie.

En fin, Nous remercions toute nos généreuses familles qui nous ont soutenues, ainsi que tous nos frères, sœurs et accompagnons qui ont contribué à notre épanouissement personnel.

Thanks ...

Ikram & Asma

Résumé

Le travail que nous avons effectué se concentre sur l'un des astéroïdes les plus importants de l'univers, il s'agit de 4Vesta. Cet astéroïde a été pris en charge par la NASA qui a lancé une sonde spatiale visant à l'étudier en détail. Il est le seul astéroïde différencié constituée d'un noyau métallique, d'un manteau ultramafique et d'une croûte basaltique. Cependant, cet astéroïde semble avoir été témoin des impacts énormes et surtout sur son pôle sud, ces impacts ont excavé une énorme quantité de roches ce qui pourraient bien être le corps parent des météorites HEDDO. Ces météorites représentent 60 % de toutes les achondrites de la littérature trouvées sur terre. Elles se composent de l'eucrite qui est une lave solide provenant du manteau pour s'écouler sur la surface de Vesta, de diogénites et de diogénite à olivine qui provient de roches enfouies à une plus grande profondeur et les howardites qui sont bien sûr une combinaison des deux autres types précédents (c'est-à-dire eucrite + diogénite créées par effet de mélange). Les HEDDO fournissent des indices sur l'évolution géochimique et l'histoire géologique de Vesta, une histoire qui a été testée et améliorée par les informations fournies par Dawn sur la surface et l'intérieur de cet astéroïde. La relation entre les HEDDO et l'astéroïde Vesta est donc basé sur des simulations entre les compositions des HEDDO et la minéralogie de la surface de Vesta déterminé par spectroscopie. Pour comprendre l'histoire géologique de Vesta plusieurs modèles ont été proposés, et c'est la raison pour laquelle ce sujet est toujours un terrain de débat entre les scientifiques. Le modèle le plus accepté c'est le modèle de Mandler et Elkinis-Tanton (2013). Ces auteurs ont utilisé la gamme de types et de compositions des HEDDO pour tester une série de modèles chimiques pour les processus de solidification suivant les conditions de fusion maximale (océan magmatique) sur Vesta. Ces modèles invoquent une cristallisation à l'équilibre de 60 à 70 % d'un océan magmatique, suivie d'une extraction continue du liquide magmatique résiduelle dans des chambres magmatiques peu profondes.

Les mots clés :

Vesta, Howardite, Eucrite, Diogénite, Diogénite à olivine, différenciation et Océan magmatique.

Abstract

This work focuses on one of the most important asteroids in the universe, which is 4Vesta. This asteroid has been taken over by NASA, which has launched a space probe to study it in detail. It is the only differentiated asteroid consisting of a metallic core, an ultramafic mantle and a basaltic crust. However, this asteroid seems to have witnessed large impacts and especially on its south pole, these impacts have excavated a vast amount of rocks which could well be the parent body of the HEDDO meteorites. These meteorites represent 60% of all achondrites in the literature found on earth. They are composed of eucrite which is a solid lava coming from the mantle to flow on the surface of Vesta, diogenites and olivine diogenite which come from rocks buried at a greater depth and howardites which are of course a combination of the other two previous types (i.e. eucrite + diogenite created by mixing effect). The HEDDOs provide clues to the geochemical evolution and geological history of Vesta, a history that has been tested and enhanced by the information provided by Dawn on the surface and interior of this asteroid. The relationship between HEDDOs and the asteroid Vesta is thus based on simulations between the compositions of HEDDOs and the mineralogy of the surface of Vesta determined by spectroscopy. To understand the geological history of Vesta several models have been proposed, and this is the reason why this subject is still an area of debate among scientists. The most accepted model is the model of Mandler and Elkinis-Tanton (2013). These authors used the range of HEDDO types and compositions to test a series of chemical models for solidification processes following maximum melting conditions (magma ocean) on Vesta. These models invoke equilibrium crystallization of 60-70% of a magma ocean, followed by continuous extraction of residual magma fluid into shallow magma chambers.

Keywords :

Vesta, Howardite, Eucrite, Diogenite, Olivine Diogenite, differentiation, and Magmatic Ocean.

Tables des matières

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur l'astéroïde 4Vesta	
I.1. Généralités : Histoire de 4 Vesta	2
I.2. Découverte et Exploration de 4 Vesta	3
I.3. La mission Dawn autour de 4Vesta :	4
I.4. Propriétés physiques et spectrales de 4 Vesta :	5
I.5. Structure et morphologie de 4 Vesta	7
I.6. Les deux grands cratères au pôle sud de 4Vesta	9
I.7. Les astéroïdes de type V (Les Vestoides) :	10
Chapitre II : Les météorites HEDDO	
II.1. Introduction :	11
II.2. La suite de météorites HEDDO : Howardite-Eucrite-Diogénite et Diogénite à olivine :	12
II.2.1. Les Howardites :	12
II.2.2. Les Eucrites :	14
II.2.2.1.Les Eucrites cumulatives :	16
II.2.2.2.Les Eucrites basaltiques :	17
II.2.3. Les Diogénites :	17
II.2.4. Les Diogénites a olivine :	18
Chapitre III : Formation de l'astéroïde 4Vesta	
III.1.Introduction :	20
III.2.La relation entre les météorites HEDDO et l'astéroïde 4Vesta :	20
III.3. Différenciation de Vesta, le modèle de Mandler & Elkins-Tanton (2013)	23
III.3.1.Chronologie sur Vesta :	24
III.3.2.L'histoire thermique de Vesta :	24
III.3.3.Modèles pétrogénétiques existants pour les HEDDOs :	24
Conclusion	32
Références bibliographiques	33

Listes des figures

- Fig. 01 :** (A) Localisation de l'astéroïde 4 Vesta dans la ceinture principale d'astéroïdes. (B) Une vue de Vesta à partir de la caméra de cadrage de Dawn (Crédit d'image : NASA/JPL-Caltech/UCLA /MPS/DLR/IDA).....3
- Fig.02 :** Représentation du vaisseau spatial Dawn entre Cérés (à gauche) et Vesta (à droite) (non représentée à l'échelle). (Crédit d'image : NASA / JPL-Caltech).....5
- Fig. 03 :** Image montre la structure interne de 4 Vesta, en haut : la structure interne de 4 Vesta (Barraud Emmanuel). **A :** Fragments de diogénite à olivine. **B :** Image électronique rétrodiffusée de diogénite à olivine. **C :** Fragment d'eucrite. **D :** Image électronique rétrodiffusée de l'eucrite (C). **E :** Fragment d'howardite. **F :** Image électronique rétrodiffusée de l'howardite (E). Les images A, B, E et F sont de (Kared, 2019), les images C et D sont de (Seddiki ,2011).....8
- Fig. 04 :** Image montrant les deux grands cratères de l'astéroïde 4Vesta (Image prise par la sonde Dawn : NASA/Johns Hopkins University Applied Physics laboratory/Carnegie Institution of Washington).....10
- Fig. 05 :** Classification des météorites HEDDO..... 11
- Fig. 06 :** Images microscopiques (en L.N. et en L.P.A.) d'une howardite (EET 87509) (Images in curator.jsc.nasa.gov/antmet/hed/hed_what.cfm).....14
- Fig. 07 :** Images microscopiques d'une eucrite non bréchique LEW 85305 (à gauche) et d'une eucrite bréchique, MIL 07004 (à droite) (Kevin Righter et Joshua).(Images in; curator.jsc.nasa.gov/antmet/hed/hed_what.cfm)..... 15
- Fig. 08 :** Image en lumière polarisée analysée d'une eucrite cumulative (Seddiki, 2011).....17
- Fig. 09 :** Images microscopiques en (L.N. et en L.P.A.) d'une diogénite bréchique EETA79002 (à gauche) et d'une diogénite non bréchique, GRO 95555 (à droite).(Images in ; curator.jsc.nasa.gov/antmet/hed/hed_what.cfm)..... 19
- Fig.10 :** Spectres comparés des HED (traits pleins) et de Vesta (carrés) (D'après Binzel et Xu, 1993).....22
- Fig. 11 :** Données télescopiques reliant Vesta et les achondrites basaltiques. (D'après McCord et al. 1970). La caractéristique d'absorption près de 0,92 μm pour Vesta (points) est une

<i>indication de d'orthopyroxène et est comparable à celle observée dans les spectres de laboratoire des achondrites basaltiques</i>	23
Fig. 12 : <i>Accrétion et réchauffement sur Vesta</i> (Mandler et Elkins-tanton, 2013).....	25
Fig. 13 : <i>Refroidissement rapide et la cristallisation à l'équilibre de l'océan magmatique de Vesta</i> (Mandler et Elkins-tanton, 2013).....	27
Fig. 14 : <i>Verrouillage convectif et extraction du liquide fondu.</i> (Mandler et Elkins-tanton, 2013).	29
Fig. 15 : <i>Cristallisation fractionnée dans des chambres magmatiques et éruption des eucrites</i> (Mandler et Elkins-tanton, 2013).....	30
Fig. 16 : <i>Histoire géologique de l'astéroïde 4Vesta</i> (Hublet et al., 2017).....	31

I.1. Introduction générale

Notre système solaire est l'un des systèmes les plus importants qui attirent l'attention humaine en raison de sa particularité et du fait qu'il contient une étoile solaire et tous les corps qui tournent autour de lui, y compris la Terre ainsi que d'autres planètes. Par ailleurs, il comprend également d'autres objets plus petits appelés astéroïdes, qui sont des petits corps qui tournent également autour du soleil entre les deux planètes Mars et Jupiter dans la ceinture principale d'astéroïdes. Ces astéroïdes sont composés de roches, de minéraux et de glace, et ses dimensions varient d'un mètre à plusieurs centaines de kilomètres. Parmi ces astéroïdes on cite 4Vesta. Ce dernier est l'un des premiers astéroïdes que la sonde spatiale a visés, d'ailleurs il est exceptionnel dans la mesure où parfois il est visible à l'œil nu à certaines occasions.

Généralement, Vesta est connu des astronomes comme le quatrième astéroïde découvert et le deuxième plus grand objet de la ceinture d'astéroïdes principale, quant à la géologie, elle l'a décrit comme un petit corps planétaire différencié à cause de sa ressemblance globale avec les planètes terrestres (**Jaumann et al., 2012 ; Keil, 2002 ; Russell et al., 2013**). Vesta peut donc être considérée comme la plus petite des planètes terrestres. Heureusement, nous ne sommes pas limités aux données de télédétection pour comprendre l'histoire géologique de Vesta. Les météorites howardite-eucrite-diogénite-diogénite à olivine, une grande suite de basaltes différenciés (eucrites), pyroxénites (diogénites), et mélanges de brèche principalement de ces deux types de roche (howardites). Ces deux types de roches (howardites) (**Mason, 1962 ; Takeda et al., 1976 ; Mittlefehldt et al., 1998**) sont des fragments de Vesta produits par impact (**McCord et al., 1970 ; Drake, 2001 ; Binzel et Xu, 1993 ; Gaffey, 1997**).

Dans le présent mémoire, nous nous concentrons sur la connaissance de l'astéroïde 4Vesta ainsi que son histoire géologique à travers trois chapitres principaux. Le premier chapitre se focalise sur des généralités sur cet astéroïde en mettant l'accent sur sa découverte, le rôle de la sonde spatiale Dawn, connaissance de ses composants internes et externes, et les deux géants cratères qui l'affectent. Ensuite dans le deuxième chapitre, nous nous concentrons sur les météorites différenciées qu'on appelle le groupe de météorites HEDDO. En fin le dernier chapitre traite dans un premier temps la relation entre les météorites HEDDO et l'astéroïde 4Vesta et dans un deuxième temps la formation de l'astéroïde 4 Vesta.

I.2. Généralités : Histoire de 4 Vesta

Vesta est un astéroïde de la ceinture principale qu'est une région du Système solaire située entre les orbites de Mars et Jupiter et contient un grand nombre d'astéroïdes (**Fig. 01**). Cet astéroïde fut découvert le 29 Mars 1807 par Heinrich Olbers, et porte le nom de la déesse romaine Vesta. On lui attribue le préfixe 4 (4Vesta), car c'est le quatrième astéroïde découvert après Cérès, Pallas et Junon. Il est considéré comme l'astéroïde le plus brillant du ciel, il est même parfois visible à l'œil nu. Cet astéroïde fut observé comme le deuxième objet le plus massif de la ceinture principale d'astéroïdes (après Cérès et avant Pallas), c'est un corps assez grand pour avoir une forme pratiquement sphérique.

L'astéroïde 4 Vesta a longtemps été une cible d'intérêt scientifique en raison de sa diversité géologique, il est unique parmi tous les grands astéroïdes en étant le seul connu à avoir une surface basaltique et une histoire géologique différente (**Binzel et al. 1997**). Par ailleurs, cet astéroïde est un objet d'une attention très particulière, il s'est formé il y a environ 4.56 milliards d'années, il a été considéré comme une grande protoplanète parce qu'il n'a pas eu la masse suffisante pour devenir une planète durant la formation du système solaire (**in Kared, 2019**). De plus, il est décrit comme un petit corps planétaire différencié à cause de sa ressemblance globale avec les planètes terrestres (**Jaumann et al. 2012 ; Keil, 2002 ; Russell et al. 2013**). Il est à noter que 4 Vesta est un astéroïde unique, non seulement à cause de sa grande taille et sa nature différenciée, mais surtout nous avons des météorites dont on pense fortement qu'elles proviennent de cet astéroïde, les HED (howardite, eucrite et diogenite), d'ailleurs la majorité de ces vestoïdes sont essentiellement des howardites (**Mayne, 2008**).

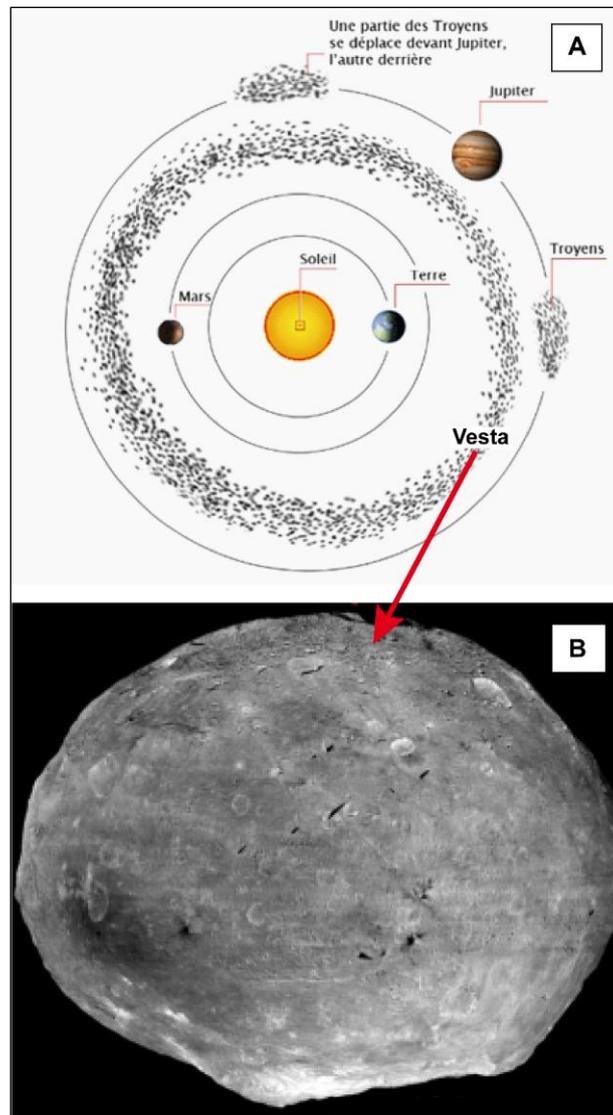


Fig. 01 : (A) Localisation de l'astéroïde 4 Vesta dans la ceinture principale d'astéroïdes. (B) Une vue de Vesta à partir de la caméra de cadrage de Dawn (Crédit d'image : NASA/JPL-Caltech/UCLA /MPS/DLR/IDA).

1.3. Découverte et Exploration de 4 Vesta

Après que Heinrich Olbers a découvert un deuxième astéroïde connu sous le nom de Pallas, et il a annoncé une théorie dans laquelle il a remis en question de la possibilité que les astéroïdes Cérès et Pallas ne soient que des paires de fragments d'une planète plus grande qui à un moment donné occupait sa place légitime entre Mars et Jupiter. Cependant, Olbers a précisé que des fragments d'une telle planète se croiseraient au point de l'explosion, et à nouveau dans

l'orbite directement opposée, remarquez ces deux zones la nuit, en 29 mars 1807, il découvre Vesta, et devenant la première personne à découvrir deux astéroïdes. Après avoir mesuré plusieurs observations pendant plusieurs nuits, Olbers a envoyé ses calculs au mathématicien Carl Friedrich Gauss, qui a calculé l'orbite de Pallas d'une manière étonnante en seulement 10 heures. Il a également reçu l'honneur de nommer le nouveau corps, il a donc choisi le nom Vesta la déesse du foyer du peuple romain.

I.4. La mission Dawn autour de 4Vesta :

La mission spatiale Dawn de la NASA a été lancée dans le but d'élucider les conditions et les processus des débuts du système solaire en étudiant deux des plus gros astéroïdes restés intacts depuis leur formation, Cérès et Vesta. En septembre 2007, la NASA a lancé la mission Dawn, qui est unique car elle a été la première sonde à entrer en orbite autour d'un objet du système solaire. Cette sonde spatiale était en orbite autour de l'astéroïde 4Vesta de juillet 2011 jusqu'à Septembre 2012 (environ 14 mois) (**Schäfer et al., 2014**). L'une des raisons pour lesquelles Vesta a été choisi comme cible de la mission Dawn était d'évaluer le lien entre l'astéroïde et les météorites HED (**Barrett, 2018**). Par ailleurs, cette mission spatiale a réalisé une étude les propriétés du premier système solaire en analysant les deux astéroïdes très différents (Cérès et Vesta), comme on peut le voir sur la **Figure 2**. Elle a représenté une étude détaillée de la surface basaltique de Vesta, et a confirmé que Vesta a connu une différenciation planétaire qui a produit une croûte, un manteau et un noyau (**Russell et al., 2012**), et qu'en étudiant les signatures spectrales uniques dans la croûte rocheuse, notre connaissance de notre planète s'élargira.

La caméra de cadrage fonctionne dans la gamme spectrale du visible au proche infrarouge et les spectres d'absorption entre 0,4 et 1 micron qui peuvent être utilisés pour déterminer la composition du pyroxène et évaluer le degré de vieillissement spatial (**Buratti et al., 2013**). Cette caméra a pris des images stéréoscopiques de la topographie de l'astéroïde, en plus elle a enregistré les spectres des variations de couleurs globales dans l'orbite de cartographie à haute altitude.

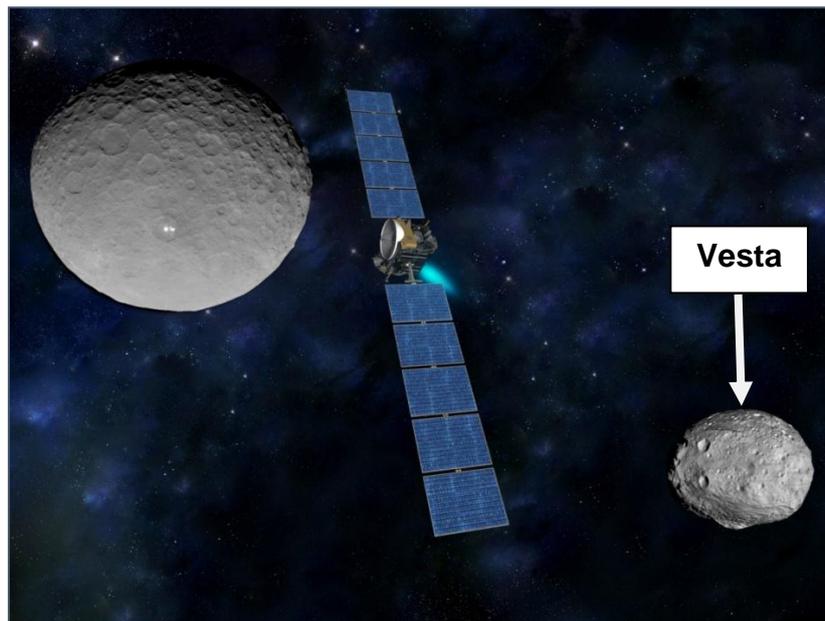


Fig.02 : Représentation du vaisseau spatial Dawn entre Cérés (à gauche) et Vesta (à droite) (non représentée à l'échelle). (Crédit d'image : NASA / JPL-Caltech).

I.5. Propriétés physiques et spectrales de 4 Vesta :

Afin de mieux étudier les astéroïdes, les paramètres suivants appelés « propriétés physiques et spectrales » sont combinés : masse, taille, Forme, rotation (période)...etc.

Avec un diamètre moyen d'environ 530 km, Vesta est le deuxième plus gros astéroïde de la ceinture d'astéroïdes et contribue pour 9 % de la masse totale de celle-ci, sa masse est 2.7×10^{20} kg (Pitjeva, 2004 ; Michalak, 2000), il est aussi considéré comme le troisième en volume dans le système solaire. Son volume semble similaire à celui de Pallas, mais sa masse volumique est plus importante qui est estimée à 3456 kg/m^3 (Michalak, 2000 ; Russell et al., 2012), son volume est $74,970 \times 10^6 \text{ km}^3$ (Russell et al., 2012). De plus, sa période de rotation est estimée à 0.2226 J (5.342 heures). Par ailleurs, les images du télescope spatial Hubble ont été utilisées pour estimer la taille de Vesta et sous forme d'ellipsoïde de $280 \times 272 \times 227 \text{ km}$, avec une densité moyenne de Vesta de $3,8 \pm 0,6 \text{ g.cm}^{-3}$ (Ashcroft, 2016). Cette densité est plus élevée que celle mesurée pour les HED, ce qui suggère que Vesta contient un noyau métallique en plus de sa croûte basaltique (Thomas et al., 1997). La forme de Vesta est proche d'une ellipse rectangulaire en équilibre de gravité, sachant que sa gravité équatoriale à la surface après avoir été calculé est $0,22 \text{ m/s}^2$, Mais la grande concavité à ses pôles Veneneia et Rheasilvia, ainsi que son sommet central, et sa froideur visqueuse ment inconfortable ne pouvaient

Chapitre I : Généralités sur l'astéroïde 4Vesta

déterminer si elle était en équilibre hydrostatique, condition nécessaire pour être considérée comme une planète naine. L'astéroïde 4Vesta se trouve à l'intérieur ceinture d'astéroïdes à une distance moyenne de 2,35 UA du soleil (Ashcroft, 2016). Il est unique en ce sens qu'il a été identifié comme la seule grand astéroïde différencié restant avec une surface basaltique (Ashcroft, 2016). L'albédo géométrique de Vesta révélé par la mission Dawn est compris entre 0,10 et 0,67 (Reddy et al, 2012).

DeMeo et al., (2009) ont confirmé que les astéroïdes sont classés grâce aux observations du télescope terrestre en raison de leur réflexion spectrale à différentes longueurs d'onde électromagnétiques. Ces spectres sont en fonction de la taille des particules, du minéral la structure et la composition de l'astéroïde. Cependant, McCord et al., (1970) ont observé que les spectres infrarouges (IR) des météorites HED correspondaient aux spectres IR de l'astéroïde Vesta, c'est l'un des rares matchs entre les groupes de météorites et les astéroïdes qui ont été faites à ce jour, et a été le premier lien entre des groupes de météorites et un corps parent potentiel (Ashcroft, 2016). Basé sur les spectres IR de Vesta, Gaffey (1997) a présenté une carte géologique de Vesta détaillant l'hétérogénéité de la composition à travers la surface, il a même identifié une région riche en diogénite dans l'hémisphère sud, et certains potentiels eucritiques ou des régions riches en olivine autour de l'équateur, mais avec la majorité de la surface comprenant un spectre mélange de matériau eucrite et diogénite.

Le tableau suivant (Tab. 01) résume les caractéristiques physiques de l'astéroïde 4 Vesta ([https://fr.wikipedia.org/wiki/\(4\)_Vesta#cite_note-jpl_sbdb-1](https://fr.wikipedia.org/wiki/(4)_Vesta#cite_note-jpl_sbdb-1))

Caractéristiques physiques	
Dimensions	$(560 \times 544 \times 454) \pm 24$ km
Masse (m)	$2,7 \times 10^{20}$ kg
Masse volumique (ρ)	$(3\ 700 \pm 300)$ kg/m ³
Gravité équatoriale à la surface (g)	0,22 m/s ²
Vitesse de libération (v_{lib})	0,35 km/s
Période de rotation (P_{rot})	0,2226 j & 5,342 h

Classification spectrale	Astéroïde de type V
Magnitude absolue (<i>H</i>)	3,20
Albédo (<i>A</i>)	0,4228

I.6. Structure et morphologie de 4 Vesta

Grâce aux recherches de la mission Dawn, il a été confirmé que Vesta avait des propriétés similaires à celles de planètes terrestres Mercure, Vénus, Terre et Mars. Il possède une structure interne différenciée, une croûte de lave refroidie recouvre un manteau rocheux d'olivine et un noyau métallique en fer et le nickel dont le diamètre serait compris entre 214 et 226 km. Selon **Keil (2002)**, Vesta est le seul astéroïde différencié connu avec une structure interne conservée, probablement constituée d'un noyau métallique, d'un manteau ultramafique et d'une croûte basaltique (**Fig. 03**). Cette composition de cet astéroïde a été confirmée par des études géochimiques des météorites qui ont établi qu'un épisode de fusion précoce, qui a conduit à la différenciation de Vesta (**Weisfeiler et al., 2017**). Cependant, il a été observé à sa surface de la croûte des taches sombres et claires, un peu comme la lune et aussi présente les caractéristiques typiques d'absorption pour le Calcium et le pyroxène qu'elle est semblable dans la composition de certaines achondrites basaltiques (eucrites) (**McCord et al., 1970**). Les observations au sol ont déterminé que l'astéroïde contient des régions basaltiques, ce qui signifie que la lave n'a coulé qu'une seule fois à sa surface.

La spectrophotométrie de haute précision de 4 Vesta, le troisième plus grand astéroïde, a été utilisée pour établir la composition de surface de ce corps et pour étudier les variations minéralogiques sur sa surface. D'après **Gaffey (1997)**, la surface moyenne de Vesta est analogue aux assemblages d'howardite et / ou d'eucrite polymictes, des membres dérivés de régolithes de la série de météorites HED qui consistent en une matrice d'eucrite contenant différentes quantités d'un composant de diogénite. Il est à noter qu'à l'aide du télescope spatial Hubble et de certains télescopes terrestres, comme les télescopes Keck, certaines caractéristiques de Vesta ont été identifiées sur la surface. Vesta semble avoir été témoin des impacts énormes, ce qui a conduit à la formation des cratères comme le « bonhomme de neige » qui est un ensemble de 3 cratères tangents par ordre de taille, il y a aussi certains cratères avec

Chapitre I : Généralités sur l'astéroïde 4Vesta

des couches d'éjection préservées et de grands bassins situés autour de la région équatoriale (Jaumann et al., 2012).

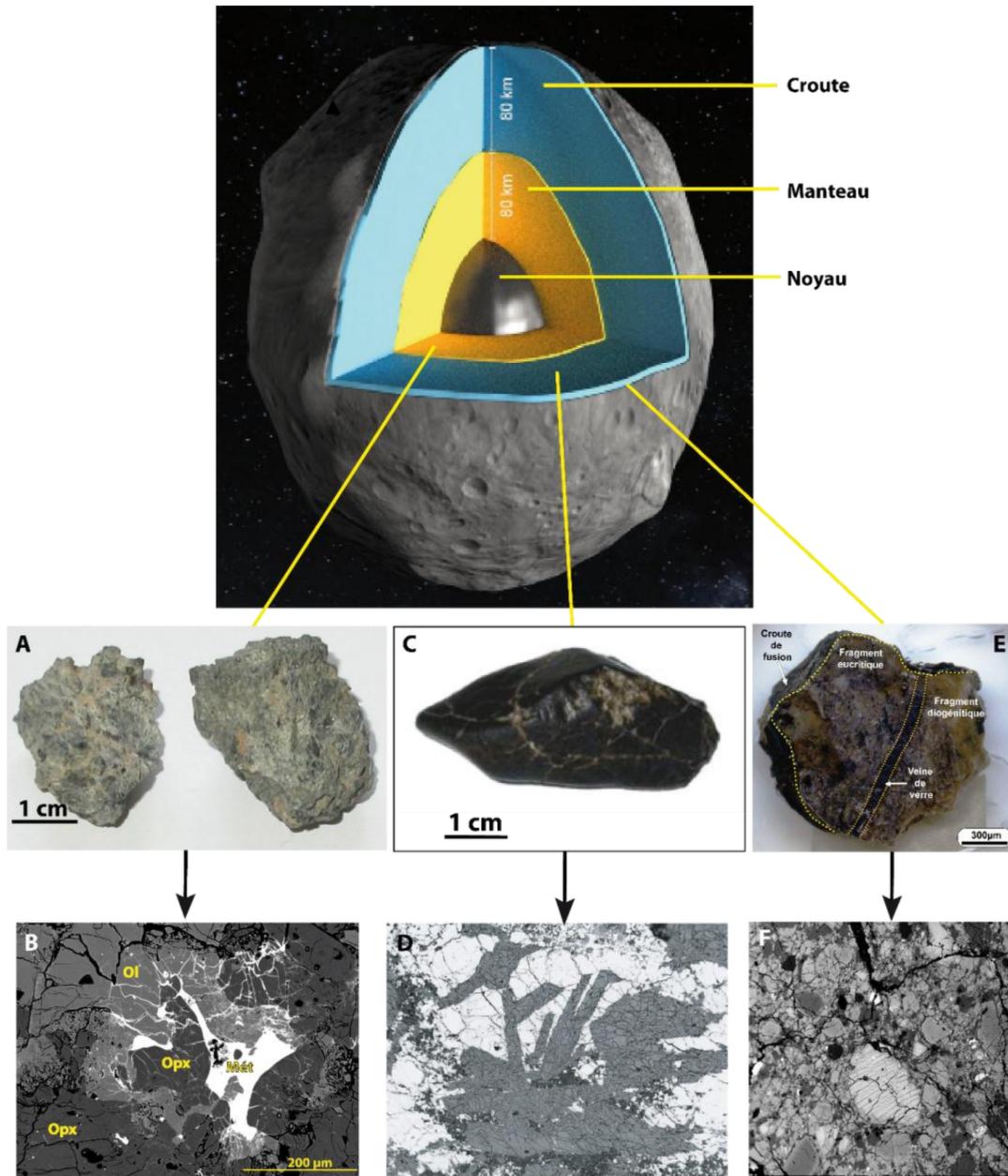


Fig. 03 : Image montre la structure interne de 4 Vesta, en haut : la structure interne de 4 Vesta (Barraud Emmanuel). **A :** Fragments de diogénite à olivine. **B :** Image électronique rétrodiffusée de diogénite à olivine. **C :** Fragment d'eucrite. **D :** Image électronique rétrodiffusée de l'eucrite (C). **E :** Fragment d'howardite. **F :** Image électronique rétrodiffusée de l'howardite (E). Les images A, B, E et F sont de (Kared, 2019), les images C et D sont de (Seddiki, 2011).

I.7. Les deux grands cratères au pôle sud de 4Vesta

Les cratères sont très importants pour l'étude géologique de Vesta, non seulement parce que le cratère lui-même peut contribuer à l'étude des propriétés des matériaux de surface ou souterrains, mais aussi parce que les populations de cratères peuvent fournir des informations très précieuses pour les études géologiques régionales ou globales (**Lefeuvre & Wieczorek, 2008**). La région équatoriale sud de Vesta est caractérisée par une série de sillons concentriques. L'hémisphère sud de cet astéroïde est très accidenté et contient plusieurs cratères (**Fig. 04**). Ces derniers sont des structures assez importantes traduisant des grands événements sur Vesta. Par ailleurs, les grands cratères observés sur sa surface pourraient bien être la source des petits objets avec des spectres de réflectance identiques trouvés dans la ceinture d'astéroïdes appelée « Vestoïdes » qui pourraient également être la source de la météorite HED trouvée sur la Terre (**Binzel et Xu, 1993**).

Parmi les grands cratères d'impact on a le cratère de Rheasilvia, ce cratère s'étend sur environ 500 ± 25 km de diamètre (**Jaumann et al., 2012 ; Russell et al., 2012**), atteignant 90 % du diamètre de Vesta. Ainsi, sur une partie de son périmètre, il a un escarpement de 4 à 12 kilomètres. Le fond du cratère se trouve à environ 13 kilomètres en dessous de la surface environnante. Ce cratère se compose de terrains vallonnés et d'un monticule central de près de 200 kilomètres de diamètre culminant à 22 km de hauteur. Il s'agit donc de la plus haute montagne connue dans le système solaire. De plus, Rheasilvia n'est pas la seule structure aussi étendue. La sonde Dawn a permis de découvrir l'existence d'un second cratère dans la même région (**Lindsay et al., 2015**), qui trahit un autre impact d'un astéroïde de grande taille, mais antérieur. Ce deuxième bassin, de 450 kilomètres appelé Veneneia (c'est 70% du diamètre équatorial de l'astéroïde et l'un des plus grands cratères du système solaire), formé il y a 2 milliards d'années (**McSween et al., 2013**). Veneneia consiste en une dépression semi-circulaire en forme de cuvette $\sim 400 \pm 25$ km de diamètre et 12 ± 2 km de profondeur dont la moitié a été détruite par le bassin de Rheasilvia (**Jaumann et al., 2012 ; Russell et al., 2012 ; Schenk et al., 2012**). Les deux grands impacts au pôle sud de Vesta (**Fig. 04**) ont également excavé de grandes quantités de roches qui pourraient bien être l'origine des Vestoïdes et des météorites de type HED (**Drake, 2001 ; Thomas et al., 1997**).

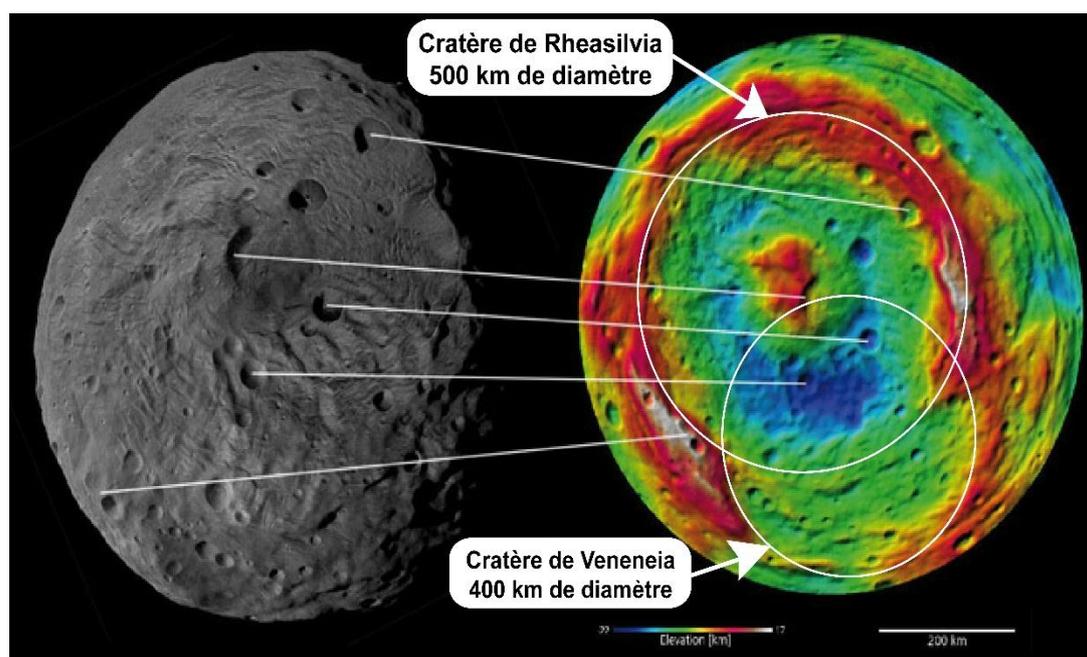


Fig. 04 : Image montrant les deux grands cratères de l'astéroïde 4Vesta (Image prise par la sonde Dawn : NASA/Johns Hopkins University Applied Physics laboratory/Carnegie Institution of Washington).

I.8. Les astéroïdes de type V (Les Vestoïdes) :

La famille d'astéroïdes de type V est un groupe d'astéroïdes appelés "Vestoïdes" dans la ceinture intérieure d'astéroïdes, près de Vesta. Ce nom était initialement utilisé par **(Binzel & Xu, 1993)** pour désigner tous les astéroïdes de la région proche de Vesta et qui ont le même spectre de type « V ». Il semblerait alors que divers objets du Système solaire soient des fragments de Vesta arrachés lors de collisions, comme les astéroïdes de la famille de Vesta de type V ou les météorites HED. Par ailleurs, environ 6 % des astéroïdes de la ceinture principale sont des Vestoïdes. Les Vestoïdes sont des astéroïdes basaltiques, essentiellement des astéroïdes de type V mais également quelques astéroïdes de type J (voisin du type V). Ils proviendraient de la croûte de Vesta, les premiers d'une zone relativement superficielle et les seconds d'une couche plus profonde. Les astéroïdes de type V seraient la source des eucrites et ceux de type J des diogénites (deux des trois groupes de météorites HED). En revanche, le grand cratère près du pôle sud de Vesta est probablement la source proximale de la plupart de ces Vestoïdes actuels **(Drake, 2001)**

II.1. Introduction :

Les météorites sont regroupées en deux différents groupes en fonction de la nature du corps parent dont elles sont issues : nous avons les météorites primitives (appelées aussi météorites non différenciées) et les météorites différenciées. Dans ce chapitre nous nous focalisons sur les météorites HEDDO qui font partie de ce dernier groupe. Les météorites HEDDO sont donc dérivées des noms de quatre types d'achondrites qui distinguent et forment le groupe ; howardite, eucrite, diogénite et diogénite à olivine (**Fig. 05**). Elles représentent un groupe de météorites associées à la différenciation, ou ce que l'on appelle les achondrites, qui proviennent d'un astéroïde dans l'espace. Par conséquent, la plupart des chercheurs pensent qu'ils proviennent de la petite planète 4Vesta. Ce groupe de météorites représente le groupe le plus courant qui représente entre 2 et 3% de toutes les météorites collectées dans le monde (**Janots et al., 2012**), dont environ 5% de toutes les chutes de météores représentent 60% de toutes les achondrites. Un total de 1450 météorites HED a été rapporté à ce jour (**Mittlefehldt, 2015**). De plus, les météorites HED comprenaient la plus grande suite de roches crustales et sous-crustales disponibles pour l'étude de n'importe quel corps du système solaire, à l'exception de la Terre et de la Lune (**Barrett, 2018**).

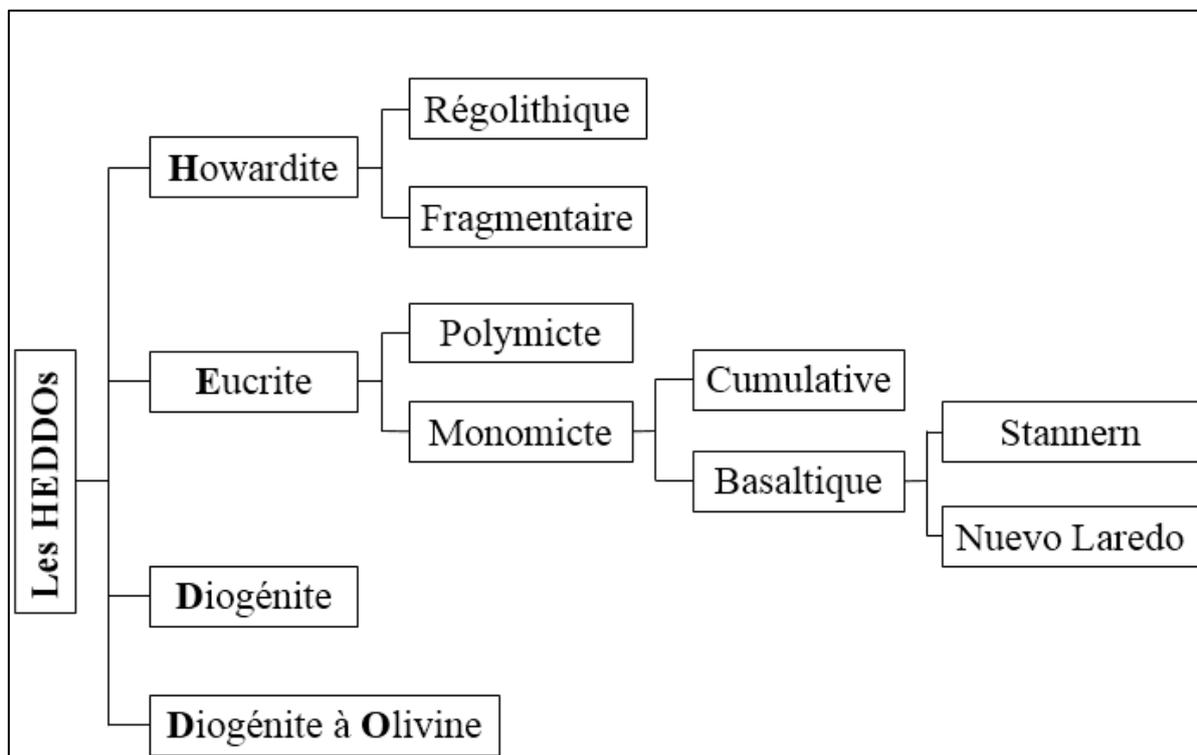


Fig. 05 : Classification des météorites HEDDO.

II.2. La suite de météorites HEDDO : Howardite-Eucrite-Diogénite et

Diogénite à olivine :

Les météorites HEDDOs (Howardites, Eucrite, Diogénite et Diogénite à olivine) sont des roches ignées ultramafiques et mafiques et des débris fragmentaires issus d'impacts provenant d'un astéroïde bien différencié (**Mittlefehldt, 2015**). Elles constituent également le plus grand groupe de roches disponibles pour étudier tous les corps du système solaire, à l'exception de la Terre et de la Lune. En effet, l'ensemble des HEDDO se compose de l'eucrite qui est une lave solide provenant du manteau pour s'écouler sur la surface de Vesta, de diogénites qui provient de roches enfouies à une plus grande profondeur et les howardites qui sont bien sûr une combinaison des deux autres types précédents (c'est-à-dire eucrite + diogénite créées par effet de mélange).

II.2.1. Les Howardites :

Les howardites sont des brèches polymictes formées par des fragments d'eucrites basaltiques et/ou cumulatives et de matériel diogénique (**Kennedy, 2014**). Ces fragments sont de nature variable et comprennent des fragments lithiques poly-minéraux, des fragments monominéraux, des verres d'impact, des brèches de fusion et d'autres fragments de brèches (**Gregory et al., 2017**). Ainsi, elles sont identifiées comme des fragments d'eucrite et de diogénite et également des restes de pierre de la couche de débris de Vesta formant principalement des débris formatifs et végétatifs (**Duke et Silver, 1967 ; Mazor et Anders, 1967**). On peut en distinguer deux sous-types qui sont : les howardites régolithiques et les howardites fragmentaires (**Warren et al., 2009 ; Cartwright et al., 2013, Cartwright et al., 2014**). Les howardites régolithiques représentent des échantillons anciens et bien mélangés du régolithe actif proche de la surface qui ont subi un jardinage important (remaniement) par des impacts de micrométéorites et qui ont une signature isotopique de gaz noble du vent solaire, du vent solaire fractionné ou planétaire (par la présence de matière carbonée exogène) (**Cartwright et al., 2013**). Cependant, les howardites fragmentaires représentent des howardites moins bien mélangées qui ne proviennent pas de la partie active supérieure du régolithe (**Cartwright et al., 2013**). D'ailleurs, les Howardites sont scientifiquement importantes car elles peuvent fournir des informations sur l'évolution magmatique et l'histoire des impacts de leur corps parent. (**Gregory et al., 2017**).

McCarthy et al., (1972) ont suggérés que les howardites sont des Mélanges mécaniques de diogénites et d'eucrites et représentent séquence essentiellement continue de brèches polymictes (**Takeda et al., 1976 ; Delaney et al., 1983 ; Mittlefehldt et al., 1998**). Ces brèches sont composées de clastes lithiques dans une matrice de cristaux fragmentaires à grain fin (**Fig. 06**), de fusion d'impact et de verres, qui peuvent être dévitrifiés et qui peuvent contenir de la troilite (**Bunch, 1975**), et contenant parfois des clastes chondritiques (**Duke and Silver, 1967 ; Delaney et al., 1984b ; Mittlefehldt et al., 1998 ; McSween, 2000**). Cependant, les howardites se sont vraisemblablement formées à la surface d'un astéroïde sous forme de régolithe, où le bombardement constant des collisions astéroïdales a provoqué le mélange des roches de surface par un jardinage (**Kennedy, 2014**). Selon la mission DAWN (**Jaumann et al., 2012**), la couche de howardite est la couche de régolithe qui forme un kilomètre plus haut qu'un kilomètre de la surface de la Vesta.

D'après **Wahl (1952)**, il a été suggéré que la différence entre les eucrites et les howardites c'est que les eucrites sont des brèches non arriérées ou monomictes, tandis que les howardites sont des brèches Polymictes. De plus, selon les travaux de **Moore (1962)**, il a observé une composition semi-continue entre les diogénites et les eucrites comme les howardites occupent la Terre du Milieu ; cela était dû, à l'époque, à la différenciation volcanique. Bien que les howardites contiennent principalement des eucrites et de diogénites, on trouve quelques clastes inhabituels de plagioclase, d'olivine ferrifère et de silice qui proviendraient d'une source plus évoluée que la source d'eucrite (**Barrat et al., 2012**) et sont interprétés texturalement comme des débris de dykes ou de coulées de lave.

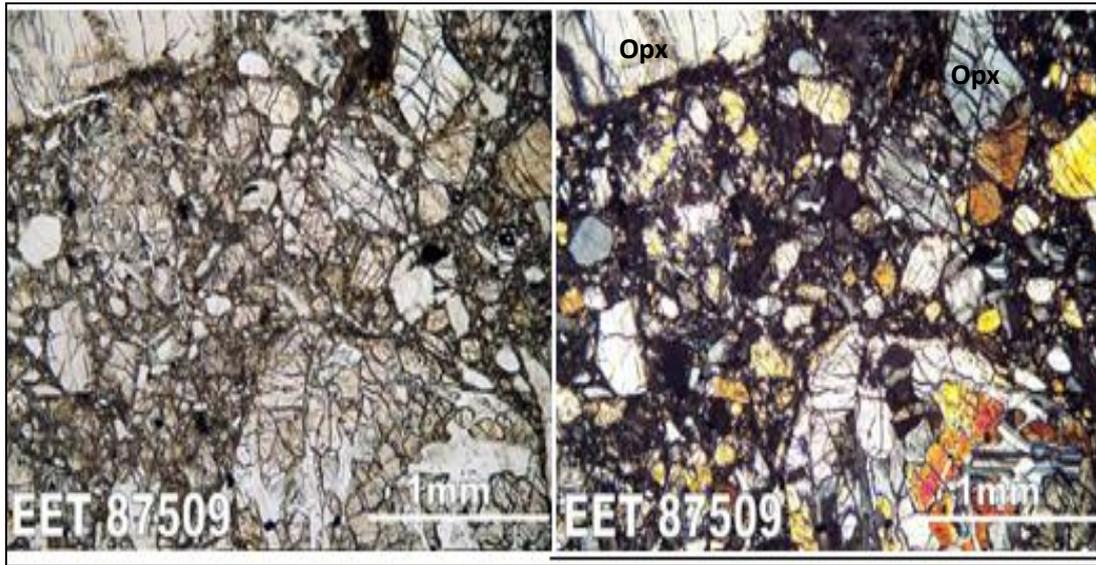


Fig. 06 : Images microscopiques (en L.N. et en L.P.A.) d'une howardite (EET 87509)
(Images in curator.jsc.nasa.gov/antmet/hed/hed_what.cfm).

II.2.2. Les Eucrites :

Les eucrites sont des achondrites basaltiques à plagioclase, porteuses de pigeonites (**Duke et Silver, 1967**) et elles constituent une grande partie des HED (**Barrett, 2018**). Ce type de météorite offre l'opportunité d'étudier des générations de basaltes sur un corps planétaire très tôt dans l'histoire du système solaire, une période pendant laquelle les basaltes de la Terre et de la Lune n'étaient pas disponibles (**Yamaguchi et al., 2001**). De plus, les eucrites représentent la croûte de Vesta, ou des équivalents des basaltes et gabbros sur Terre (**Smith, 2009**). Par ailleurs, elles contiennent des structures chimiques qui indiquent la formation ou les intrusions de laves basaltiques, par conséquent elles sont considérées comme des échantillons qui proviennent de la couche externe de son corps parent (**Barrat et al., 2007 ; De Sanctis et al., 2012 ; De Sanctis, 2013**). Les eucrites peuvent être non bréchiques, mais le plus souvent elles sont bréchifiées (**Fig. 07**). De nombreux eucrites ont subi une bréchification générale avec environ 85% des brèches qui sont polymictes (constituées de fragments de différentes roches) ou monomictes (Il se compose de fragments d'un seul type de roche), bien que certains soient intacts (**Delaney et al., 1984a; Warren et Jerde, 1987 ; Mayne et al., 2009**). Les eucrites peuvent être non bréchiques, mais le plus souvent elles sont bréchifiées. De nombreux eucrites ont subi une bréchification généralisée avec ~ 85% des brèches sont polymictes (constituées de

Chapitre II : Les météorites HEDDO

blocs de différentes roches) ou monomictes (Il se compose de blocs d'un seul rocher), bien que certains soient intacts (**Delaney et al., 1984 ; Warren et Jerde, 1987 ; Mayne et al., 2009**).

En comparaison avec les roches terrestres, on peut distinguer que les eucrites contiennent des plagioclases riches en Ca avec peu de Na, ainsi que de la pigeonite pyroxène à faible teneur en Ca, et n'ont aucune trace de minéraux hydratés (**McSween, 1999**).

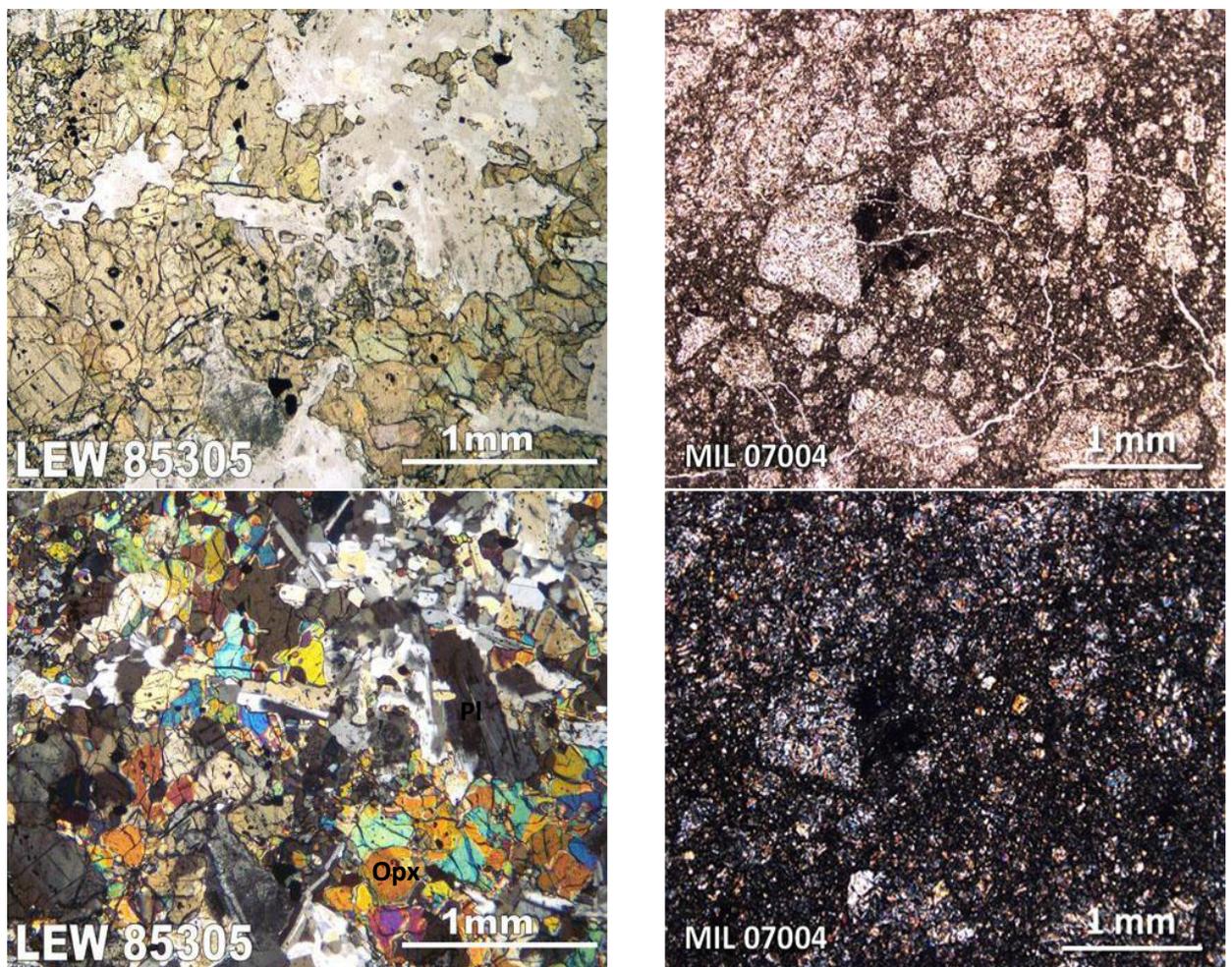


Fig. 07 : Images microscopiques d'une eucrite non bréchiq. LEW 85305 (à gauche) et d'une eucrite bréchiq., MIL 07004 (à droite) (Kevin Righter et Joshua). Opx : Orthopyroxène. Pl : Plagioclase.

(Images in; curator.jsc.nasa.gov/antmet/hed/hed_what.cfm)

Les eucrites peuvent être divisées en deux sous-groupes eucrite cumulative et eucrite basaltique (**Mayne, 2008**). Selon leurs caractéristiques pétrographiques et chimiques, on

distingue les eucrites bréchifiées sont monomictes si leurs clastes sont cohérents du point de vue compositionnelle (c-à-dire un seul type d'eucrite) ou polymictes si plus d'un type d'eucrite est présent. (Stolper, 1977 ; Mayne et al., 2009).

II.2.2.1. Les Eucrites cumulatives :

Les eucrites cumulatives sont des gabbros à grains moyens à grossiers composés principalement de clino-pyroxène et de plagioclase avec un peu de chromite et de silice accessoire, de phosphate, d'ilménite, de métal, de troïlite et de zircon (Fig. 08) (Delaney et al., 1984a, b; Gomes et Keil, 1980). Ce sont de taille typique des grains ~ 0,5 - 5 mm dans la direction la plus longue (Mittlefehldt, 2015). Ce type d'eucrite est formé dans des chambres magmatiques peu profondes, en complément du magma qui a donné naissance aux eucrites basaltiques (Barrett, 2018). Par ailleurs, les eucrites cumulatives sont moins abondantes que les eucrites basaltiques, représentant environ 3,7 % du nombre total des eucrites (Barrett, 2018). Elles sont pour la plupart non bréchiques et présentent des caractéristiques chimiques distinctes (Bogard et Garrison, 1995 ; Takeda, 1997 ; Scott et al., 2009). Cependant, certaines eucrites et howardites polymictes contiennent des matériaux abondants d'eucrites cumulatives (Gardner et Mittlefehldt, 2004 ; Mittlefehldt et Lindstrom, 1993 ; Saiki et al., 2001 ; Takeda, 1986, 1991). Les eucrites cumulatives ont été subdivisées en eucrites cumulées feldspathiques et ortho-pyroxéniques sur la base des abondances modales (Delaney et al., 1984a, b), mais cette terminologie n'est pas largement utilisée.

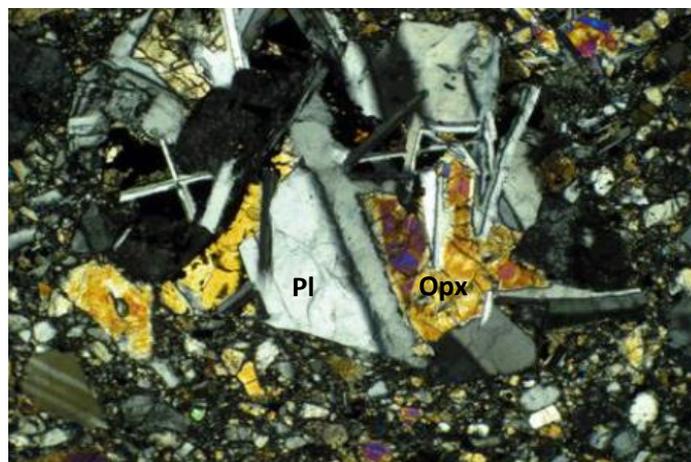


Fig. 08 : Image en lumière polarisée analysée d'une eucrite cumulative (Seddiki, 2011).

II.2.2.2. Les Eucrites basaltiques :

Les eucrites basaltiques sont des roches ignées à grain fin ou moyen, composées principalement de pigeonite et de plagioclase allant de bytownite à l'anorthite (**Mittlefehldt, 2015**). Elles sont les plus fréquentes dans la littérature que toutes les eucrites, représentant environ 90 % du total de 1138 (**Barrett, 2018**). Elles sont composées de fragments minéraux lithiques enchâssés dans une matrice à grain fin, généralement fragmentaire (**Mittlefehldt, 2015**). De plus, les textures ignées originales (magmatiques) sont préservées dans les clastes lithiques des eucrites bréchiques et sont généralement sub-ophitiques à ophitiques (**Duke et Silver, 1967**). D'après **Mayne et al., (2009)** les eucrites basaltiques sont divisés en fonction de leur géochimie en deux groupes : le groupe principal Nuevo Laredo et le groupe Stannern. Le groupe principal Nuevo Laredo montre une tendance de variation qui est caractérisée par la diminution du Mg avec l'augmentation de la teneur en éléments incompatibles, alors que la tendance Stannern a un Mg presque constant et des teneurs plus élevées en éléments incompatibles (**Stolper, 1977**).

Bien que la plupart des eucrites basaltiques soient bréchiques, quelques-unes sont non bréchiques, mais certaines d'entre elles ont été fortement métamorphosées, ce qui a donné lieu à des textures recristallisées et grano-blastiques (**Mayne et al., 2009**). Comme par exemple NWA 5073 qui est une eucrite basaltique rare, non bréchique et presque non métamorphique composée de pyroxènes zonés à gros grains, de grains de plagioclase squelettiques, de grains de chromite dendritiques et d'une mésostase à grain fin. (**Roszjar et al., 2011**).

II.2.3. Les Diogénites :

Les diogénites font partie de la suite de météorites (howardites, eucrites et diogénites) que l'on croit être des vestiges de systèmes magmatiques basaltiques sur les astéroïdes 4 Vesta (**Consolmagno et Drake, 1977 ; Binzel, 1996 ; Wiechert et al., 2004 ; Pieters et al., 2005 ; Scott et al., 2009**) qui reflètent certaines des premières étapes du magmatisme basaltique dans le système solaire (**Nyquist et al., 2007 ; Wadhwa et al., 2007**). La plupart des diogénites sont des ortho-pyroxénites ultramafiques à gros grains (**Fig. 09**) avec 85-100 % en volume d'ortho-pyroxène (**Beck et McSween, 2010 ; Mittlefehldt, 2015**), composées principalement de quantités accessoires d'olivine, de chromite et de plagioclase (**Beck et McSween, 2010**). Par ailleurs, certaines diogénites sont des dunites, des harzburgites ou des norites (**Wittke et al.,**

2011), classés en fonction de leur minéralogie modale en ortho-pyroxène, olivine et plagioclase (Beck et McSween, 2010 ; Beck et al., 2012 ; Beck et al., 2013).

Les diogénites sont des ortho-pyroxénites et des harzburgites qui sont pétro-génétiquement associées à un magmatisme basaltique lié aux premiers stades de la fusion astéroïdale sur le corps parent pour les météorites howardite-eucrite-diogénite (HED) (Shearer et al., 2010). La plupart des diogénites sont relativement à gros grains, ont des textures (par exemple, brèche, recristallisation) qui indiquent une exposition à des processus d'impact (Mason, 1962 ; Takeda et al., 1981), et semblent être des brèches monomictes contenant uniquement du matériel diogénique avec une variabilité limitée de la chimie des minéraux (Shearer et al., 2010). Cependant, les deux principaux modèles décrivant leur pétrogenèse sont que les diogénites sont des cumulats qui se sont formés au fond d'un océan magmatique (Ikeda et Takeda 1985 ; Mittlefehldt 1994 ; Righter et Drake 1997 ; Barrat et al., 2008), ou alternativement qu'ils sont des intrusions moins profondes dans une croûte eucritique préexistante (Yamaguchi et al. 2011).

II.2.4. Les Diogénites à olivine :

Bien que la grande majorité des diogénites soient dominées par l'ortho-pyroxène, il existe quelques diogénites exceptionnellement riches en olivine (jusqu'à 68% en volume) (Bowman et al., 1997 ; Irving et al. 2009). La classification des diogénites à olivine exige uniquement qu'elles contiennent plus de 10% d'olivine (Sack et al., 1991 ; Beck et McSween, 2010) proposons que les diogénites avec de l'olivine sont des brèches polymictes échantillonnant à la fois une lithologie d'ortho-pyroxène olivine+magnésien et une lithologie d'ortho-pyroxène ferrifère uniquement, la première est représentée par les diogénites riches en olivine, et la seconde représente les diogénites ortho-pyroxénitiques " diogénites classiques ". D'autre part, Sack et al., (1991) ont été suggéré que ces échantillons, surnommés " diogénites à olivine ", étaient des morceaux de résidus de péridotite appauvrie du manteau après extraction du liquide magmatique. Les diogénites à olivine sont interprétées par (Irving et al., 2009), comme issues d'une zone de formation plus profonde dans la structure de l'astéroïde 4Vesta que les diogénites classiques.

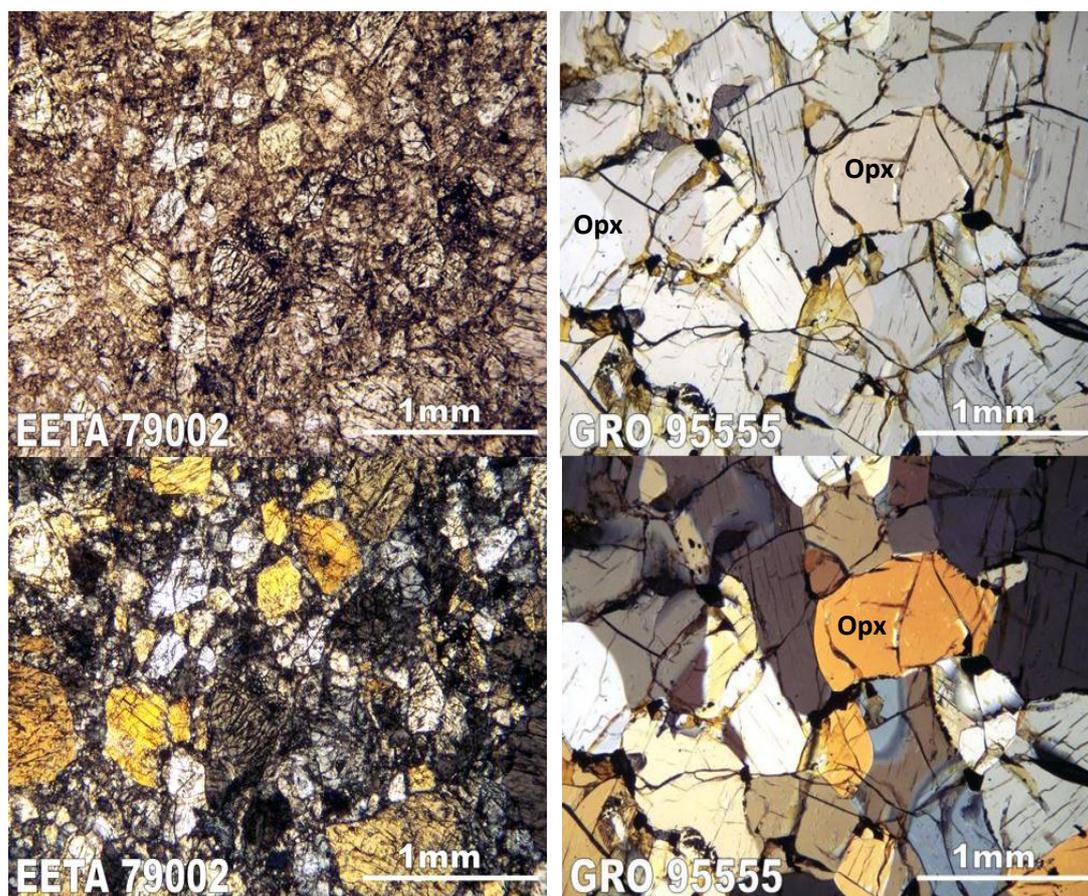


Fig. 09 : Images microscopiques en (L.N. et en L.P.A.) d'une diogénite bréchique EETA79002 (à gauche) et d'une diogénite non bréchique, GRO 95555 (à droite).

(Images in ; curator.jsc.nasa.gov/antmet/hed/hed_what.cfm).

III.1. Introduction :

L'astéroïde 4 Vesta était une cible d'exploration pour la mission Spatial Dawn, car il s'agit du corps parent pour la collection la plus volumineuse d'achondrites. C'est le seul astéroïde différencié connu avec une structure interne constituée d'un noyau métallique, d'un manteau ultramafique et d'une croûte basaltique. Par ailleurs, Vesta est considéré comme la source des météorites HEDDO (Howardite, Eucrite, Diogénite et Diogénite à olivine) trouvés sur Terre (**McSween, 2013**). Ce type de météorites fournissent également des indices sur l'évolution géochimique de Vesta, une histoire qui a été testée et améliorée par les informations fournies par Dawn sur la surface et l'intérieur de cet astéroïde. A cet effet, il a été suggéré que les météorites HEDDO sont des éjections d'impact de Vesta, ainsi les études détaillées de ces météorites dans les laboratoires, combinés à des télécommandes toujours plus détaillées des études de détection de l'astéroïde, ils ont abouti à une bonne compréhension de l'évolution géologique de cet objet fascinant. De nombreuses données minéralogiques, pétrologiques, géochimiques, isotopiques et chronologiques suggèrent que le réchauffement, la fusion et la formation d'un noyau métallique, un manteau et une croûte basaltique a eu lieu au cours des premiers millions d'années de l'histoire du système solaire. Il est probablement que beaucoup d'astéroïdes ressemblant à Vesta se sont formés à l'aube du système solaire mais ils ont été détruits par des impacts, sachant que les météorites de fer étant des restes de leurs noyaux. Ces objets différenciés peuvent jouer un rôle important dans l'accrétion et la formation des planètes terrestres, et c'est donc fortement souhaitable d'explorer par la sonde spatial ce monde qui peut être considéré comme le plus petit des planètes terrestre (**Keil, 2002**).

III.2. La relation entre les météorites HEDDO et l'astéroïde 4Vesta :

La relation entre 4 Vesta, les astéroïdes de type V et globalement les Vestoïdes avec les achondrites basaltiques (HEDDO) est discutée en détail dans (**Keil, 2002 ; Burbine et al., 2002**). Cette dernière a confirmé que le lien entre les météorites HEDDO et Vesta a été originellement basé sur des simulations entre les compositions des HEDDOs et la minéralogie de surface de Vesta déterminé par spectroscopie (**Keil, 2002**). De plus, la majorité des météorites sont dérivées de corps parents dans la ceinture d'astéroïdes, même si peu d'astéroïdes spécifiques sont identifiés comme sources. Une exception principale est l'association de Vesta avec le groupe d'achondrites Howardite, Eucrite, Diogénite (**Pieters et al., 2005**). Vesta est donc largement considéré comme le corps parent de l'howardite-eucrite-diogénite (**McCord et al., 1970 ; Binzel et Xu, 1993 ; McSween et al., 2011**).

Le lien Vesta-HEDDO est directement lié à la minéralogie observée/inférée de l'astéroïde et la minéralogie mesurée des météorites (**Pieters et al., 2005 ; McCord et al., 1970**). Ces auteurs ont été les premiers à déterminer, par spectroscopie dans le visible et le proche infrarouge à l'aide de télescopes terrestres, que la surface de Vesta présente des caractéristiques d'absorption typiques du pyroxène à faible teneur en Ca et que sa composition est similaire à celle de certaines achondrites basaltiques (c'est-à-dire les eucrites). Plus précisément, Vesta semble avoir une surface ancienne, marquée par l'âge, comme les howardites et les eucrites polymictes, avec des roches plus fraîches comme les diogénites et les matériaux porteurs d'olivine exposés dans les cratères d'impact cela a été confirmé par **Gaffey (1997)**. Par ailleurs, **Binzel et al., (1997)** notent que l'hémisphère oriental de Vesta est dominé par ce qui semble être des roches plutoniques excavées par des impacts, composées de pyroxène riche en Mg et pauvre en Ca, apparentées aux diogénites, avec certaines unités contenant une quantité substantielle d'olivine. D'autre part, L'hémisphère occidental, est dominé par des pyroxènes riches en Fe et relativement riches en Ca, correspondant à des eucrites. En revanche, la mission spatiale Dawn a fourni de nombreuses données nouvelles et détaillées sur Vesta qui renforce cette liaison météoritique Vesta-howardite-eucrite-diogénite (HED) et le concept que Vesta est différencié tel que déduit par les observations télescopiques antérieures (**De Sanctis et al., 2013**). Malgré les difficultés en identifiant les mécanismes possibles de transport de 4Vesta, le caractère de ce type de spectre dans le domaine de la ceinture principale d'astéroïdes a conduit à confirmer la liaison entre Vesta et les météorites HED (**Kared, 2019**). D'un autre côté, **Consolmagno et Drake (1977)** avancent certains arguments selon lesquels Vesta semble être le corps parent du HEDDO car c'est le seul grand corps survivant (quelques centaines de kilomètres) avec une croûte « basaltique » intacte. Spectralement, Vesta ressemble le plus à une howardite (**Hiroi et al., 1994**), compatible avec un mélange de matériaux eucritiques et diogénitiques de surface. Des vestoïdes beaucoup plus petits (environ 10 km) (**Binzel et Xu, 1993**) ont été trouvés dans la famille Vesta et entre Vesta et les résonances 3: 1 et v6, conformément à la dérivation de Vesta. Cependant, (**Burbine et al., 2002**) se discutent que Vesta n'est pas la source corps pour les HED et est plutôt juste le corps parent de la « Vestoïdes », qui sont plus proches des résonances et plus faciles pour échantillonner.

Établir la provenance des météorites est toujours un défi pour les scientifiques. Différentes méthodes sont utilisées, dont l'une consiste à comparer les spectres d'astéroïdes avec les spectres de météorites en laboratoire et c'est ce que l'on voit sur la **figure (Fig. 10)**. Les

scientifiques ont mesuré le spectre de réflectance de ces météorites en laboratoire et l'ont comparé au spectre de l'astéroïde 4Vesta. La correspondance entre les bandes d'absorption était très bonne, ils ont supposé que ces météorites proviennent donc de cet astéroïde. De plus, la présence des grands cratères a confirmé l'idée que des météorites HEDDO ont été éjectées lors d'un choc très violent. De plus la figure (**Fig. 11**) montre les données originales utilisées en 1970 pour soutenir que les propriétés minéralogiques des météorites HEDDO (en grande partie d'orthopyroxène + plagioclase) sont les mêmes que celles observées pour l'astéroïde Vesta (**McCord et al., 1970**). À cette époque, et pendant plusieurs décennies par la suite, Vesta était le seul astéroïde identifié comme ayant une surface basaltique. On croyait donc que Vesta était le seul grand astéroïde intact qui avait fondu et s'était différencié pendant les premières phases de l'évolution du système solaire (**Pieters et al., 2005**)

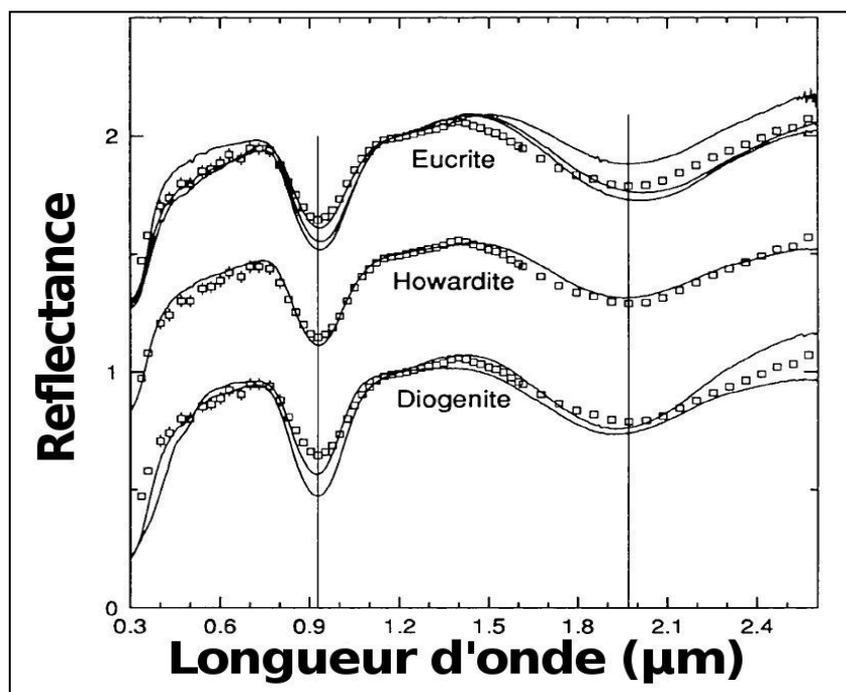


Fig.10 : Spectres comparés des HED (traits pleins) et de Vesta (carrés)

(D'après **Binzel et Xu, 1993**).

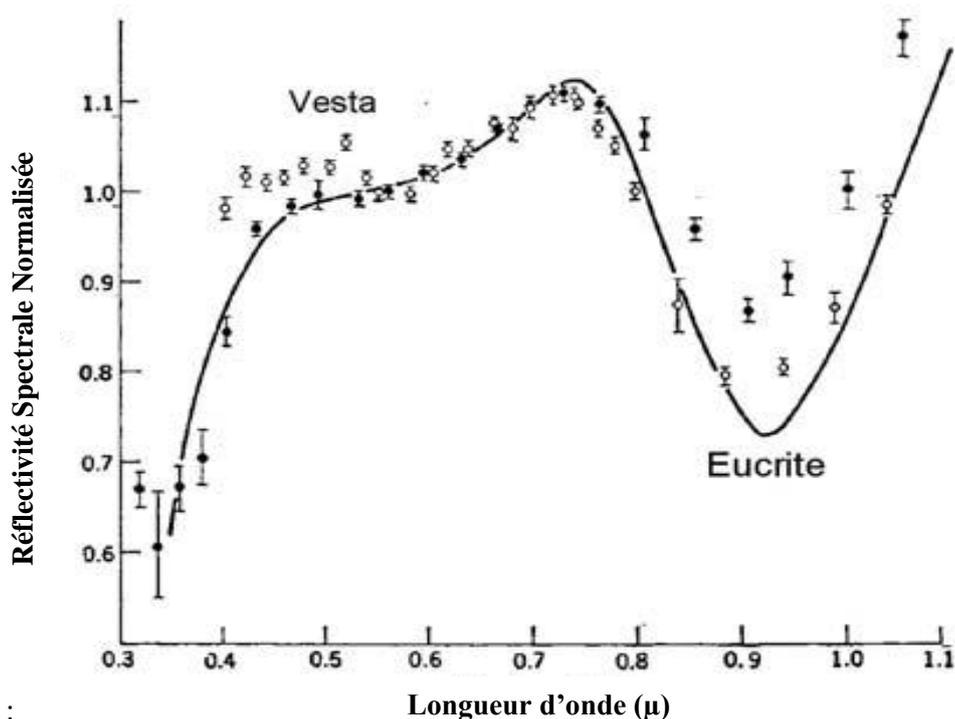


Fig. 11 : Données télescopiques reliant Vesta et les achondrites basaltiques. (D'après McCord et al. 1970). Comparaison des mesurément de la réflectivité spectrale mesurées au laboratoire avec les données du télescope de 4Vesta (cercles vides : Euclite & cercles solides : Vesta)

III.3. Différenciation de Vesta, le modèle de Mandler & Elkins-Tanton (2013)

Le fait que Vesta est le corps parent de HED est généralement bien accepté, surtout depuis la mission Dawn qui a clairement identifié Vesta comme le corps parent des HEDDOs (McSween et al., 2013). Ici, nous présentons l'histoire géologique de l'astéroïde 4Vesta en prenant comme exemple les modèles de Mandler et Elkins-Tanton (2013). Ces auteurs ont utilisé la gamme de types et de compositions de roches ignées de la suite HEDDO pour tester une série de modèles chimiques pour les processus de solidification suivant les conditions de fusion maximale (océan magmatique) sur Vesta. Leurs modèles invoquent une cristallisation à l'équilibre de 60 à 70 % d'un océan magmatique, suivie d'une extraction continue de la matière fondue résiduelle dans des chambres magmatiques peu profondes. Tout modèle de l'évolution

précoce de Vesta est soumis à quatre contraintes majeures : chronologique, thermique, pétrologique et chimique et physique.

III.3.1. Chronologie sur Vesta :

Les âges absolus et relatifs des eucrites indiquent que l'accrétion et le réchauffement de Vesta ont été rapides (**Mandler et Elkins-tanton, 2013**). Les eucrites présentent des appauvrissements sidérophiles qui indiquent la formation d'un noyau riche en fer avant leur cristallisation (**Palme et Rammensee, 1981 ; Righter et Drake, 1997**). L'âge des eucrites fournit donc un point dans le temps par lequel Vesta doit avoir accrété, fondu, ségrégué un noyau métallique, et cristallisé le magma à sa surface. La preuve de la présence des radio-isotopes à courte durée de vie ^{60}Fe ($t_{1/2} = 2,62$ millions d'années) et ^{26}Al ($t_{1/2} = 0,7$ million d'années) dans les eucrites et les diogénites (**Shukolyukov et Lugmair, 1993 ; Quitte et al. 2011 ; Schiller et al. 2011**) montre également que Vesta s'est accrété, a fondu et s'est différencié au cours des premiers millions d'années du système solaire.

III.3.2. L'histoire thermique de Vesta :

Pour expliquer l'âge et la profondeur de l'activité ignée sur Vesta, le réchauffement devait être rapide et relativement court (**Mandler et Elkins-tanton, 2013**). Les dernières collisions planétésimales de construction de Vesta (projectiles potentiellement de 10s de km de diamètre) peuvent avoir été suffisamment énergiques pour causer une fusion locale significative (**Davison et al., 2012**). La libération de l'énergie potentielle gravitationnelle pendant la formation du noyau aurait également fourni un peu de chaleur supplémentaire. Cependant, les impacts et la formation du noyau étaient probablement des sources de chaleur mineures par rapport à la désintégration du ^{26}Al ($t_{1/2} = 0,7$ millions d'années), qui aurait été une source de chaleur majeure sur Vesta en raison de son accrétion précoce rapide alors que le ^{26}Al était encore abondant (**Mandler et Elkins-tanton, 2013**).

III.3.3. Modèles pétrogénétiques existants pour les HEDDOs :

Les modèles pétrogénétiques existants pour les lithologies ignées HEDDO (eucrites, diogénites et diogénites à olivine) peuvent être divisés en deux groupes principaux : fusion partielle contre fusion extensive (océan magmatique) (**Mandler et Elkins-tanton, 2013**). Les Modèles chimiques et les modèles physiques existants pour les océans magmatiques sur Vesta : C'est ce que nous montre les figures (**Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14 et Fig. 15**), qui exprimes un

modèle de réchauffement, de fusion, de refroidissement, et de cristallisation sur Vesta, basé sur les résultats des modèles chimiques et les modèles physiques existants pour les océans magmatiques sur Vesta et d'autres planètes/planétésimaux. L'histoire précoce de Vesta peut être résumée en quatre étapes (Mandler et Elkins-tanton, 2013):

➤ **Etape 01 : Accrétion et réchauffement ; Développement d'un océan magmatique :**

L'astéroïde 4Vesta est assemblée à partir de planétésimaux plus petits. D'ailleurs plusieurs de ces planétésimaux sont déjà chauds ou partiellement fondus (Hevey et Sanders, 2006). Vesta conserve donc un couvercle primitif poreux et isolant, mais cette porosité est rapidement réduite par frittage et auto-compaction (Gupta et Sahijpal, 2010). Le réchauffement par ^{26}Al provoque une fusion importante, permettant un enfoncement efficace du fer dans le noyau en croissance (Mandler et Elkins-tanton, 2013).

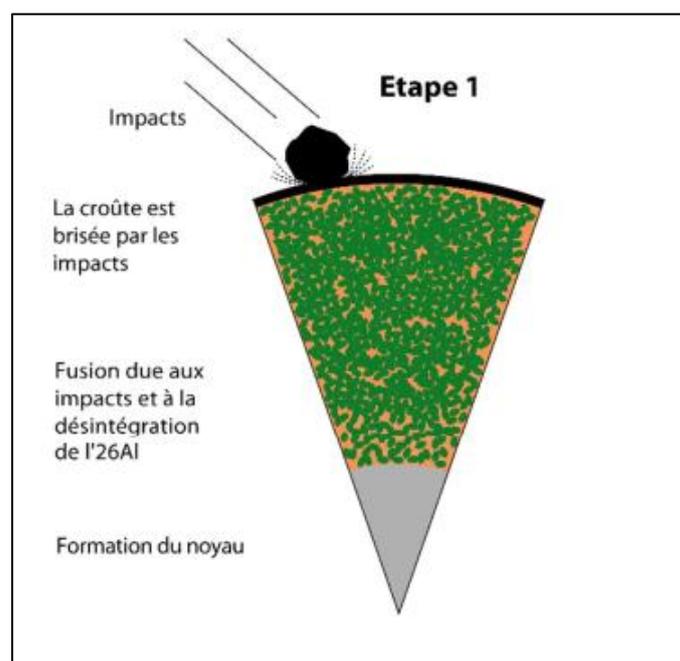


Fig. 12 : Accrétion et réchauffement sur Vesta (Mandler et Elkins-tanton, 2013).

➤ **Etape 2 : Transformation de la surface, déplacement du réservoir primitif, refroidissement rapide et cristallisation à l'équilibre de l'océan magmatique :**

L'épaisseur du réservoir primitif est une considération importante car elle exerce un contrôle de premier ordre sur la vitesse à laquelle Vesta s'est chauffée et refroidie, les

planétésimaux primitifs étaient chauffés par la désintégration du ^{26}Al , mais avaient une surface froide en contact avec le milieu interplanétaire, même lorsque l'intérieur de Vesta avait développé un océan magmatique convectif, il aurait dû conserver un réservoir conducteur (Mandler et Elkins-tanton, 2013).

D'après les travaux pionniers de Ghosh et McSween (1998), les modèles thermiques du réchauffement des planétésimaux ont été largement basés sur la résolution de l'équation de conduction thermique 1-D (Merk et al., 2002 ; Hevey et Sanders, 2006 ; Gupta et Sahijpal, 2010 ; Elkins-Tanton et al., 2011 ; Moskovitz et Gaidos, 2011 ; Neumann et al., 2012 ; Sramek et al. 2012). Tous ces modèles tentent d'incorporer une combinaison d'autres processus qui affectent la distribution de la chaleur et le taux de perte de chaleur, comme l'accrétion continue, la convection, la migration du liquide magmatique et le frittage (Mandler et Elkins-tanton, 2013). Cependant, seuls les modèles de Gupta et Sahijpal (2010) et d'Elkins-Tanton et al., (2011) traitent des planétésimaux dont le rayon est supérieur à 120 km ou inférieur à 500 km (R Vesta est d'environ 270 km).

Il est compréhensible qu'aucun modèle ne traite adéquatement la perte de chaleur d'un océan magmatique en convection sur un embryon planétaire comme Vesta à travers un couvercle mince et dynamique qui est sujet à un réajustement gravitationnel, à la pénétration par des impacts, à l'advection du liquide magmatique vers la surface et à une perte de chaleur radiative rapide périodique. Cependant, le bilan thermique des planétésimaux en croissance est fortement contrôlé par les processus de surface car toutes les pertes de chaleur se produisent à la surface, l'épaisseur et le traitement du couvercle froid sont donc d'une importance vitale pour l'évolution thermochimique de l'astéroïde (Mandler et Elkins-tanton, 2013).

Un réservoir mince (< quelques km) serait facilement brisé par les impacts (Davison et al., 2012) et le réajustement gravitationnel de la surface de Vesta. Il serait enclin à s'effondrer et à se mélanger facilement à l'océan magmatique, ce qui exposerait la matière chaude de l'océan magmatique à l'espace. Cela entraînerait un refroidissement radiatif rapide, ainsi que la formation d'une croûte de trempe qui, étant plus dense que l'océan magmatique, s'enfoncerait elle-même à l'intérieur (Walker et al., 1980), exposant davantage de magma et formant davantage de croûte de trempe. Ce cycle, assisté par de grands impacts, conduirait à un refroidissement rapide de l'océan magmatique et à une très faible préservation de l'hétérogénéité de composition.

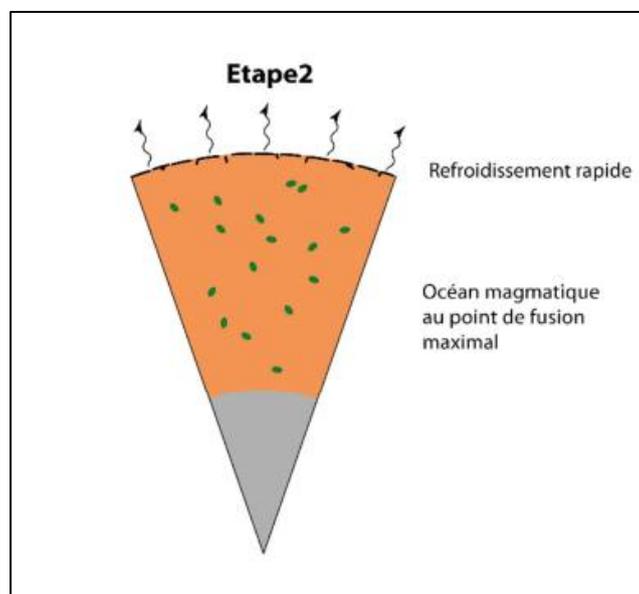


Fig. 13 : Refroidissement rapide et la cristallisation à l'équilibre de l'océan magmatique de Vesta (Mandler et Elkins-tanton, 2013).

➤ Etape 3 : Fermeture par convection et extraction du liquide magmatique:

Selon **Mandler et Elkins-tanton (2013)**, leurs modèles les mieux ajustés requièrent une extraction à grande échelle du liquide magmatique de l'océan magmatique après une cristallisation à l'équilibre de 60 à 70 %. C'est ce que nous fait savoir la chimie, mais la justification physique de ce processus nécessite un bref examen des mélanges cristal-liquide. Le liquide magmatique est plus flottant que les cristaux (d'environ 450 kg m^{-3} dans ces modèles), de sorte qu'une bouillie de cristaux + liquide ne peut être maintenue (c'est-à-dire que l'extraction du liquide magmatique ne peut être empêchée) que si la convection est suffisamment vigoureuse pour mélanger la bouillie sur une échelle de temps plus rapide que celle de l'extraction du liquide.

La convection ralentit considérablement dans une suspension cristalline une fois que les cristaux commencent à interagir les uns avec les autres. Pour les formes de cristaux les plus pertinentes pour une bouillie de cristaux d'olivine + ortho-pyroxène (rapport d'aspect des

cristaux proche de 1), un cadre initial est généré à une fraction de cristaux de 20-30% (**Saar et al., 2001 ; Baker et al., 2002 ; Walsh et Saar, 2008**). Au-dessus de cette fraction cristalline, la bouillie a une limite d'élasticité qui augmente de façon quasi exponentielle en fonction de la teneur en cristaux jusqu'à ce que des viscosités semblables à celles des solides soient atteintes pour des fractions cristallines élevées (**Walsh et Saar, 2008**). Des études modélisées et expérimentales suggèrent que la rhéologie de la bouillie est contrôlée de manière écrasante par la structure cristalline rigide à des fractions cristallines de 45 à 70 % (**Costa 2005 ; Costa et al., 2009**), ce qui augmente considérablement la viscosité et ralentit la convection.

Une extraction efficace de la matière fondue est possible lorsque la vitesse d'ascension de la matière fondue due à la flottabilité dépasse la vitesse de convection du système, Cela ne nécessite pas l'arrêt de la convection, mais se produit plutôt en dessous d'une vitesse de convection critique (**Mandler et Elkins-tanton, 2013**). **Righter et Drake (1997)** ont estimé que l'extraction du liquide se produirait après 80 % de cristallisation, en se basant sur la condition de Kraichnan (1962) pour la convection turbulente. En utilisant la méthode de **Righter et Drake (1997)** pour ce modèle, ils obtiendraient une fraction critique de cristaux de 74%. Cependant, dans l'analyse de Kraichnan, le régime turbulent ne passe pas soudainement de la domination du système à son arrêt, mais devient au contraire infiniment petit avant de disparaître. Ainsi, la majorité de l'océan magmatique vestan serait dans un régime visqueux permettant une extraction significative de la fonte avant d'atteindre cette fraction cristalline critique, même si une région décroissante au centre de la masse était encore capable de convection turbulente. L'extraction de la matière fondue dans des chambres magmatiques peu profondes augmenterait la fraction cristalline dans la bouillie, favorisant encore l'extraction de la matière fondue et verrouillant complètement le système convectif.

Après le verrouillage convectif, le cycle trempe-fondation ralentit considérablement, épaississant et stabilisant le couvercle, ce qui entraîne un refroidissement plus lent car la limite supérieure du système est désormais purement conductrice. La structure cristalline verrouillée par convection se compacte lentement au fur et à mesure que la fonte monte hors de celle-ci et dans plusieurs chambres magmatiques peu profondes adjacentes (et éventuellement en interaction).

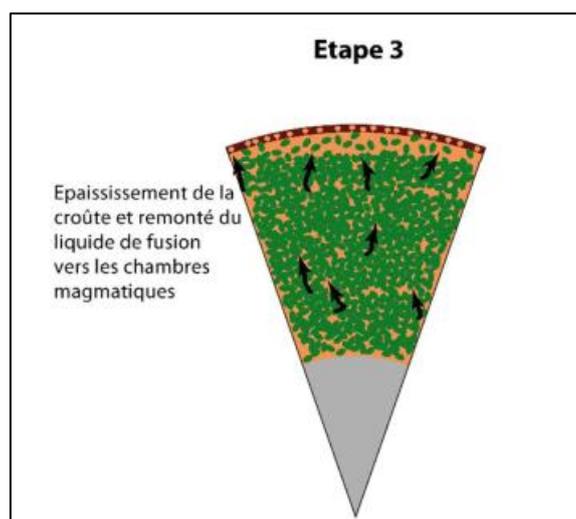


Fig. 14 : Verrouillage convectif et extraction du liquide fondu.

(Mandler et Elkins-tanton, 2013).

➤ **Étape 4 : Cristallisation fractionnée dans des chambres magmatiques peu profondes et éruption d'eucrites.**

Le refroidissement lent permet la cristallisation fractionnée de la masse fondue résiduelle pour produire des diogénites et de rares dunites, des harzburgites, des diogénites à olivine et des eucrites cumulées. La recharge magmatique des chambres magmatiques due à l'apport d'une masse fondue plus mafique à partir de la masse cristalline sous-jacente maintient une gamme étroite de compositions liquides (Mandler et Elkins-tanton, 2013). Ces liquides sont éjectés pour former des eucrites non cumulées. La formation d'eucrites cumulées est moins efficace que la formation de diogénites (Treiman, 1997) en raison de la différence de densité solide-fondue plus basse (environ 200 kg m^{-3} pour les eucrites cumulées contre environ 500 kg m^{-3} pour les diogénites : densité fondue environ 2800 kg m^{-3} , densité de plagioclase environ 2700 kg m^{-3} , densité de pyroxène environ 3300 kg m^{-3}). Au fur et à mesure que l'activité magmatique sur Vesta diminue, toute matière fondue restante dans les chambres magmatiques cristallisera sous forme de gabbros eucritiques (Patzner et McSween, 2012).

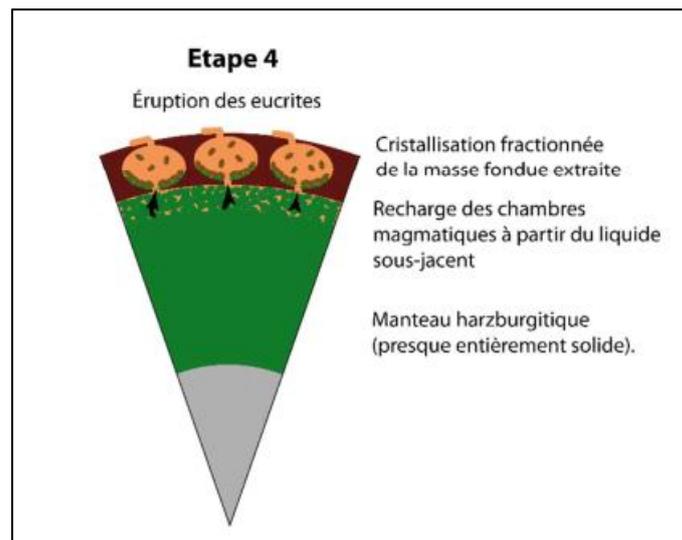


Fig. 15 : Cristallisation fractionnée dans des chambres magmatiques et éruption des eucrites (Mandler et Elkins-tanton, 2013).

En conclusion, la figure (**Fig. 16**) résume l'histoire géologique de Vesta, où (a) représente la différenciation de Vesta et la formation d'un réservoir différencié étant la source de toutes les eucrites à partir d'un précurseur chondritique ; (b) représente la formation de la croûte d'eucrite avec une activité magmatique dans la courte (2 Ma) qui a formé le bassin de Vesta qui a formé les eucrites basaltiques, suivie d'un refroidissement lent des eucrites Cumulatives plus profondément dans la croûte ; (c) Les eucrites témoignent d'un métamorphisme d'impact à la surface de Vesta, ce métamorphisme d'impact à la surface de Vesta pendant la durée de vie de ^{26}Al , suggéré par le jeune âge interne de l'eucrite basaltique Y-792510 ; (d) Représente la formation de diogénites dans des intrusions ou des extrusions pendant une deuxième activité magmatique.

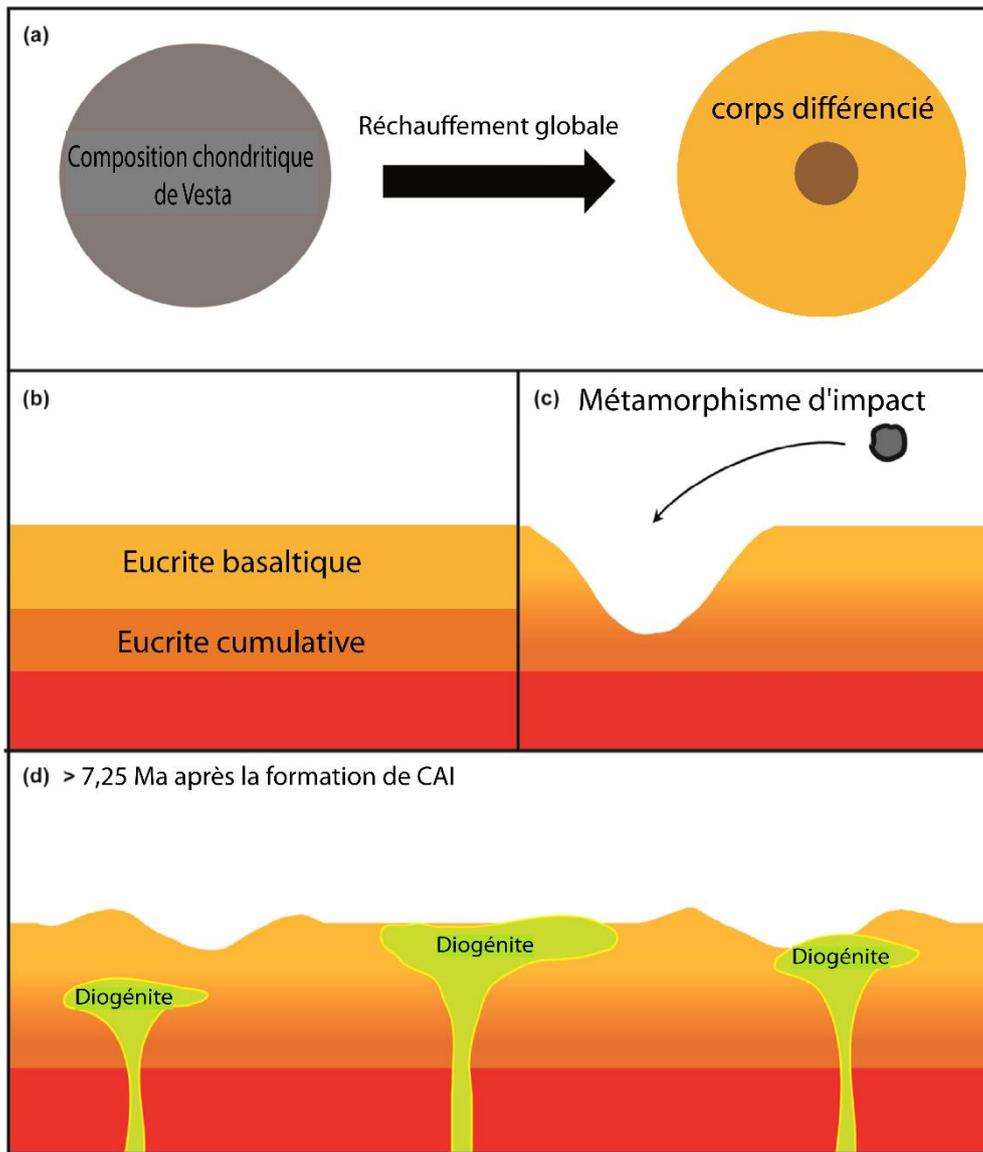


Fig. 16 : Histoire géologique de l'astéroïde 4Vesta (Hublet et al., 2017).

Conclusion

Ce travail que nous avons fait était sur l'un des petits corps dans notre système solaire, qui s'appelle l'astéroïde 4 Vesta, et aussi étudié notamment les informations que l'on peut obtenir à partir des fragments de ce corps, tombés sur Terre. Nous l'avons étudié en le considérant comme l'un des plus grands organismes qui ressemble un peu aux planètes terrestres en raison de sa différenciation et aussi parce qu'il nous donne un aperçu de son impact sur l'histoire et de sa relation avec les météorites de type HEDDOs.

L'étude de l'astéroïde Vesta concerne à la mission menée par la sonde Dawn de la NASA, qui l'a mis en orbite pendant environ 14 mois. Les études détaillées de la surface de Vesta ont permis de découvrir sa différenciation planétaire. Par conséquent, la définition géologique correcte de Vesta c'est qu'il contient une structure interne différenciée, un noyau métallique composé de fer et de nickel, une couverture rocheuse d'un péridot et une croûte de lave basaltique. Nous avons appris certaines caractéristiques de Vesta à la surface à l'aide du télescope spatial Hubble et de certains télescopes terrestres. Il a subi plusieurs collisions violentes (les impacts) qui ont déformé sa surface, notamment celle du pôle Sud, connue sous le nom de Rheasilvia (500 km de diamètre), et un autre cratère appelé Veneneia au pôle Sud, plus petit de diamètre (400 km).

Comme nous l'avons mentionné précédemment, Vesta a été liée aux météorites tombant sur Terre, appelées HED. Cela a été confirmé par l'étude de la spectroscopie visible et proche infrarouge à l'aide de télescopes au sol, et les résultats étaient que l'association entre les météorites HED et Vesta était à l'origine basée sur des similitudes dans les formations des HED et la minéralogie de surface de Vesta. Donc, les météorites HEDDO sont des roches extraterrestres qui appartiennent de l'astéroïde Vesta et en détail, il s'agit des howardites qui sont des brèches polymictes composées par des fragments d'eucrites et de diogénites. Les eucrites qui sont des achondrites basaltiques à plagioclase, qui représentent la croûte de Vesta, et qui sont en deux groupes l'un (basaltiques et cumulatives). En fin les diogénites sont des roches formées d'ortho-pyroxénites ultramafiques à gros grains, cristallisées dans les profondeurs de Vesta. La mission spatiale Dawn a fourni de nombreuses données nouvelles et détaillées sur Vesta qui renforcent cette liaison météoritique Vesta-howardite-eucrite-diogénite (HED) et le concept que Vesta est différencié tel que déduit par les observations télescopiques antérieures.

Conclusion

Quant à la formation de Vesta, les meilleurs modèles qui l'expliquent parfaitement ce sont les modèles de **Mandler et Elkinis-Tanton (2013)**. Ces modèles prédisent une structure crustale qui est cohérente avec les observations de Dawn et la plupart des modèles d'impact du bassin de Rheasilvia. Toutes les lithologies HEDDOs ont pu être excavées au cours de l'impact qui a formé le bassin de Rheasilvia sans qu'il y ait eu d'impact. Pendant l'impact qui a formé le bassin de Rheasilvia sans exposer le manteau riche en olivine, tant que la profondeur d'excavation ne dépassait pas de manière significative 40 km.

Références bibliographiques

- Ashcroft. H. (2016). Differentiation and Magmatism on the HED Parent Body, D.Phil Thesis submitted to the University of Oxford for the degree of Doctor of Philosophy in Experimental Petrology. Department of Earth Sciences, Oxford, UK. th.247.
- Baker. D., Paul. G., Sreenivasan. S. & Stanley. H. (2002). Continuum percolation threshold for interpenetrating squares and cubes. *Physical Review E* 66 (4).
- Barrett. T. (2018). The History of Water and Other Associated Volatiles in Howardite-Eucrite-Diogenite Meteorites. PhD thesis The Open University.p293.
- Barrat. J., Yamaguchi. A., Greenwood. R., Bohn. M., Cotton. J., Benoit. M., & Franchi. I. (2007). The Stannern trend eucrites: Contamination of main group eucritic magmas by crustal partial melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 71(16):4108-4124.
- Barrat. J., Yamaguchi. A., Benoit. M., Cotton. J. & Bohn. M. (2008). Geochemistry of diogenites: Still more diversity in their parental melts. *Meteoritics & Planetary Science* 43:1759–1775.
- Barrat. J., Yamaguchi. A., Jambon. A., Bollinger. C. et Boudouma. O. (2012), Low-Mg rock debris in howardites: Evidence for KREEPy lithologies on Vesta? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 99, 193–205.
- Beck. A. & McSween. H. (2010). Diogenites as polymict breccias composed of orthopyroxenite and harzburgite. *Meteoritics & Planetary Science* 45(5):850-872.
- Beck. A., Welten. K., McSween. H., Viviano. C. & Caffee. M. (2012), Petrologic and textural diversity among the PCA 02 howardite group, one of the largest pieces of the Vestan surface, *Meteoritics and Planetary Science*, 47 (6), 947– 969.
- Beck. A., McSween. H., & Bodnar. R.J. (2013). In situ laser ablation ICP-MS analyses of dimict diogenites: Further evidence for harzburgitic and orthopyroxenitic lithologies, *Meteoritics and Planetary Science*, 48 (6), 1050–1059.
- Binzel. R. & Xu. S. (1993). Chips off of Asteroid 4 Vesta: Evidence for the Parent Body of Basaltic Achondrite meteorites. *Science*, 260, 186–191.

Références bibliographiques

- Binzel. R. (1996). Astronomical evidence linking Vesta to the HED meteorites: a review. In Workshop on the Evolution of Igneous Asteroids: Focus on Vesta and the HED Meteorites (eds. D. W. Mittlefehldt and J. J. Papike). Lunar and Planetary Institute, Houston, Texas, USA, p. 2.
- Binzel. R., Gaffey. M., Thomas. P., Zellner. B., Storrs. A. & Wells. E. (1997). Geologic Mapping of Vesta from 1994 Hubble Space Telescope Images. *Icarus*, 128(1), 95–103.
- Bogard. D. & Garrison. D. (1995). ^{39}Ar ^{40}Ar age of the Ibitira eucrite and constraints on the time of pyroxene equilibration. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59(20):4317-4322.
- Buratti. B., Dalba. P., Hicks. M., Reddy. V., Sykes. M., McCord. T. & Russell. C. (2013). Vesta, vestoids, and the HED meteorites: Interconnections and differences based on Dawn Framing Camera observations: Vesta, vestoids, and the HED meteorites. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118(10), 1991–2003.
- Bunch. T. (1975). Petrography and Petrology of basaltic achondrite polymict breccias (howardites). Lunar Science conference 6th, Lunar and Planetary Institute, Houston, Texas, USA, 469-492.
- Burbine, T., McCoy, T., Meibom, A., Gladman, B., & Keil, K., (2002). Meteoritic parent bodies: Their number and identification. In: Bottke, W.F., Cellino, A., Paolicchi, P., Binzel, R.P. (Eds.), *Asteroids III*. Univ. of Arizona Press, Tucson, pp. 653–667.
- Bowman. L., Spilde. M. & Papike. J. (1997). Automated energy dispersive spectrometer modal analysis applied to the diogenites. *Meteoritics & Planetary Science* 32:869–875.
- Cartwright J., Ott U., Mittlefehldt D., Herrin J., Herrmann S., Mertzman S., Mertzman K., Peng Z., & Quinn J. (2013). The quest for regolithic howardites. Part 1: Two trends uncovered using noble gases. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 105:395–421.
- Cartwright J., Ott U., & Mittlefehldt D. (2014). The quest for howardites. Part 2: Surface origins highlighted by noble gases. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 140:488– 508.
- Consolmagno G. & Drake M. J. (1977) Composition and evolution of the eucrite parent body: evidence from rare earth elements. *Geochim. Cosmochim. Acta* 41, 1271–1282.

Références bibliographiques

- Costa A. (2005). Viscosity of high crystal content melts: Dependence on solid fraction. *Geophysical Research Letters* 32:L22308.
- Costa A., Caricchi L., & Bagdassarov N. (2009). A model for the rheology of particle-bearing suspensions and partially molten rocks. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 10: Q03010.
- Davison T., Ciesla F. & Collins G. (2012). Postimpact thermal evolution of porous planetesimals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 95:252–269.
- Delaney J., Takeda H., Prinz M., Nehru C., & Harlow G. 1983. The nomenclature of polymict basaltic achondrites. *Meteoritics* 18(2):103-111.
- Delenay, J., Prinz, M. & takeda, H. (1984a). The polymicte eucrites. Proceedings of the fifteenth lunar and planetary science conference, part 1, journal of geophysical research, vol. 89, supplement, lunar and planetary institute, Houston, texas;, USA, C251-C288.
- Delaney, J., Prinz, M., Nehru, C., Stokes, C., (1984b). Allan Hills A81001 Cumulate Eucrites and Black Clasts from Polymict Eucrites Fifteenth Lunar and Planetary Science Conference. Lunar and Planetary Institute, Houston, Abstract #1108.
- DeMeo, F., Binzel. R., Slivan. S. & Bus. S. (2009). An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared, *Icarus*, 202 (1), 160–180.
- De Sanctis M., Ammannito. E., Capria M., Tosi F., Capaccioni F., Zambon F., Carraro F., Fonte S., Frigeri A., Jaumann. R., Magni G., Marchi S., McCord T., McFadden L., McSween H., Mittlefehldt D., Nathues A., Palomba E., Pieters C., Raymond C., Russell C., Toplis M., & Turrini D. (2012). Spectroscopic Characterization of Mineralogy and Its Diversity Across Vesta. *Science* 336(6082):697-700.
- De Sanctis M., Ammannito E., Capria M., Capaccioni F., Combe J., Frigeri A., Longobardo A., Magni G., Marchi S., McCord T., Palomba E., Tosi F., Zambon F., Carraro F., Fonte S., Li Y. J., McFadden L., Mittlefehldt D., Pieters C., Jaumann R., Stephan K., Raymond C., & Russell C. (2013). Vesta's mineralogical composition as revealed by the visible and infrared spectrometer on Dawn. *Meteoritics & Planetary Science* 48(11):2166-2184.
- Drake. M. (2001). Presidential Address: Presented 2000 August 28, Chicago, Illinois, USA The eucrite/Vesta story. *Meteoritics & Planetary Science*, 36(4), 501–513.

Références bibliographiques

- Duke M. & Silver L. (1967). Petrology of eucrites, howardites and mesosiderites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 31(10):1637-1665.
- Gaffey, M. (1997), Surface lithologic heterogeneity of asteroid 4 Vesta, *Icarus*, 127 (1), 130–157.
- Gardner. K. & Mittlefehldt, D. (2004). Petrology of New Stannern-trend Eucrites and Eucrite Genesis 35th Lunar and Planetary Science Conference. Lunar and Planetary Institute, Houston, Abstract #1349.
- Ghosh. A. & McSween H. (1998). A thermal model for the differentiation of asteroid 4 Vesta, based on radiogenic heating. *Icarus* 134:187–206.
- Gomes. C. & Keil. K. (1980). *Brazilian Stone Meteorites*. University of New Mexico Press, Albuquerque, NM.
- Gregory. T., Joy, K., Strekopytov, S. & Curran, N. (2017). Geochemistry and petrology of howardite Miller Range 11100: A lithologically diverse piece of the Vestan regolith. *Meteoritics & Planetary Science*, 52(2), 206–224.
- Gupta. G. & Sahijpal. S. (2010). Differentiation of Vesta and the parent bodies of other achondrites. *Journal of Geophysical Research* 115:E08001.
- Hevey P. & Sanders. I. (2006). A model for planetesimal meltdown by ^{26}Al and its implications for meteorite parent bodies. *Meteoritics & Planetary Science* 41:95–106.
- Hiroi T., Pieters C. & Takeda. H. (1994) Grain size of the surface regolith of asteroid 4 Vesta estimated from its reflectance spectrum in comparison with HED meteorites. *Meteoritics*, 29, 394–396.
- Hublet G., Debaille V., Wimpenny J. and Yin Q. Z. (2017). Differentiation and magmatic activity in Vesta evidenced by ^{26}Al - ^{26}Mg dating in eucrites and diogenites. *Geochim. Cosmochim. Acta* 218, 73–97.
- Ikeda. Y. & Takeda. H. (1985). A model for the origin of basaltic achondrites based on the Yamato 7308 howardite. Proceedings, 15th Lunar and Planetary Science Conference, Part 2, *Journal of Geophysical Research* 2 (suppl):C613– C617.

Références bibliographiques

- Irving A., Bunch T., Kuehner S., Wittke J., & Rumble. D. (2009). Peridotites related to 4 Vesta: Deep crustal igneous cumulates and mantle samples (abstract). 40th Lunar and Planetary Science Conference. p. 2466.
- Janots, E., Gnos. E., Hofmann. B., Greenwood. R., Franchi. I., Bermingham. K., & Netwing., V. (2012). Jiddat al Harasis 556: A howardite impact melt breccia with an H chondrite component. *Meteoritics & Planetary Science* 47(10):1558-1574.
- Jaumann. R., Williams. D., Buczkowski. R., Yingst. F. Preusker. H. Hiesinger. N. Schmedemann. T. Kneissl. J., Vincent. D., Blewett. B., Buratti. U., Carsenty. B., Denevi. M., De Sanctis. W., Garry. H., Keller. E., Kersten. K., Krohn. J., Li. S., Marchi. K., Matz. T., McCord. H., McSween. S., Mest. D., Mittlefehldt. S., Mottola. A., Nathues. G., Neukum. D., O'Brien. P., Pieters. C., Prettyman. T., Raymond. C., Roatsch. T., Russell. C., Schenk. P., Schmidt. B., Scholten. F., Stephan. K., Sykes. M., Tricarico. P., Wagner. R., Zuber. M. & Sierks. H. (2012), Vesta's shape and morphology, *Science*, 336 (6082), 687–690.
- Kared. R. (2019). Etude pétrographique, minéralogique et géochimique des météorites découvertes au Sahara du Sud-Ouest algérien. *Thèse de doctorat*, Univ. D'Oran 2, 188 p.
- Keil. K. (2002). Geological History of Asteroid 4 Vesta: The "Smallest Terrestrial Planet." In *Asteroids III*, Ed. by W. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi, R. P. Binzel (University of Arizona Press, Tucson, 2002), 573–584.
- Kennedy. T. (2014). A petrological, chemical and isotopic study of some early solar system HED basaltic igneous meteorites: how many parent asteroids?, thesis of doctorat, univ. western Australia.
- Lefevre. M.. & Wieczorek. M. (2008). Nonuniform cratering of the terrestrial planets. *Icarus*, 197(1), 291–306.
- Lindsay. F., Delaney. J., Herzog. G., Turrin. B., Park. J., Swisher. 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*.
- Mandler. B., & Elkins-Tanton, L. T. (2013). The origin of eucrites, diogenites, and olivine diogenites: Magma ocean crystallization and shallow magma chamber processes on Vesta. *Meteoritics & Planetary Science*, 48(11), 2333–2349.

Références bibliographiques

- Mason. B. (1962). *Meteorites*. John Wiley & sons, New York, 274 p.
- Mayne, R. (2008). Investigating the petrogenesis of the basaltic crust of asteroid 4vesta: A combined petrologic spectral study of the unbrecciated eucrites. The University of Tennessee, Knoxville.
- Mayne. R., McSween. H., McCoy. T. & Gale. A. (2009). Petrology of the unbrecciated eucrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73(3):794-819.
- Mazor. E. & Anders. E. (1967). Primordial gases in the Jodzie howardite and the origin of gas-rich meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 31(9):1441-1456.
- McCarthy. T., Ahrens. L., & Erlank A. (1972). Further evidence in support of the mixing model for howardite origin. *Earth and Planetary Science Letters* 15(1):86- 93.
- McCord T., Adams J., & Johnson. T. (1970) Asteroid Vesta: Spectral reflectivity and compositional implications. *Science*, 168, 1445–1447.
- McSween. H. (1999). *Meteorites and their parent planets*. New York: Cambridge University Press.
- McSween. H. (2000). *Meteorites and their parent planets*. 2nd ed. Cambridge university press , new York, 310pp
- McSween. H., Ammannito. E., Reddy. V., Prettyman. T., Beck. A., De Sanctis. M., Nathues. A., Le Corre. L., O'Brien. D., Yamashita. N., McCoy. T., Mittlefehldt. D., Toplis. M., Schenk. P., Palomba. E., Tosi. F., Zambon. F., Longobardo. A., Capaccioni. F., Raymond. C., & Russell, C. T. (2013a). Composition of the Rheasilvia basin, a window into Vesta's interior. *Journal of Geophysical Research* 118:1–12,
- McSween. H., Binzel. R., De Sanctis. M., Ammannito. E., Prettyman, T., Beck. A. (2013b). Dawn; the Vesta-HED connection; and the geologic context for eucrites, diogenites, and howardites. *Meteoritics & Planetary Science*, 48(11), 2090–2104.
- Merk. R., Breuer D. & Spohn. T. (2002). Numerical modeling of ²⁶Al-induced radioactive melting of asteroids considering accretion. *Icarus* 159:183–191.
- Michalak. G. (2000) Determination of asteroid masses I. (1) Ceres, (2) Pallas and (4) Vesta. *Astron. Astrophys.*, 360, 363–374.

Références bibliographiques

- Mittlefehldt. D., Lindstrom. M. (1993). Geochemistry and petrology of a suite of ten Yamato HED meteorites. *Antarctic Meteorite Res.* 6, 268.
- Mittlefehldt. D. (1994). The genesis of diogenites and HED parent body petrogenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58:1537–1552.
- Mittlefehldt. D., McCoy. T., Goodrich. C., & Kracher. A. (1998). Non-chondritic meteorites from asteroidal bodies. In j. j. papike (ed), planetary materials, reviews in mineralogy volume 36 mineralogical society of America, pp 4-2 - 4-195.
- Mittlefehldt, D. (2015). Asteroid (4) Vesta: I. The howardite-eucrite-diogenite (HED) clan of meteorites. *Chemie Erde-Geochem.* 75, 2, 155–183.
- Moore. C. (1962). The petrochemistry of the achondrites. In *Researches on Meteorites* (ed. C. B. Moore) New York: Wiley. pp. 164-178.
- Moskovitz. N. & Gaidos. E. (2011). Differentiation of planetesimals and the thermal consequences of melt migration. *Meteoritics & Planetary Science* 46:903–918.
- Neumann. W., Breuer. D., & Spohn. T. (2012). Differentiation and core formation in accreting planetesimals. *Astronomy & Astrophysics* 543:A141.
- Nyquist. L., Kleine. T., Shih C., Kita. N., Yamaguchi. A. & Reese. Y. (2007) The Chronology of Early Asteroid Processes. In *Workshop on the Chronology of Meteorites*. #4002 (abstr.).
- Palme. H. & Rammensee. W. (1981). The significance of W in planetary differentiation processes: Evidence from new data on eucrites. *Proceedings, 12th Lunar and Planetary Science Conference*. pp. 949–964.
- Patzer. A. & McSween. H. (2012). Gabbroic vs. cumulate eucrites: Extending the diversity of eucritic lithologies (abstract #1227). 43rd Lunar and Planetary Science Conference. CD-ROM.
- Pieters. C., Binzel. R., Bogard. D., Hiroi. T., Mittlefehldt. D., Nyquist. L., Rivkin. A. & Takeda. H. (2005) Asteroidmeteorite links: the Vesta conundrum(s). In *Asteroids, Comets, Meteors*

Références bibliographiques

- Proceedings IAU Symposium No. 229 (eds. D. Lazzaro, S. Ferraz-Mello, and J. A. Fernandez) International Astronomical Union.
- Pitjeva, E. (2004). Estimations of masses of the largest asteroid belt from ranging to planets, Mars orbiters and landers, COSPAR Scientific Assembly, vol. 35, 2004, p.2014.
- Quitt. E, Latkoczy. C., Schonbachler. M., Halliday. A., & Gunther. D. (2011). ^{60}Fe - ^{60}Ni systematics in eucrite parent body: A case study of Bouvante and Juvinas. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75:7698–7706.
- Reddy. V., Sanchez. J., Moskovitz. N., Jian. Y., Cloutis. E., Archer. K., Tucker. R., Gaffey. M., Mann. J., Sierks. H., Schade. U. (2012). Photometric, spectral phase and temperature effects on Vesta and HED meteorites: Implications for Dawn mission. *Icarus* 217, 153-168.
- Righter. K. & Drake. M. (1997). A magma ocean on Vesta: Core formation and petrogenesis of eucrites and diogenites. *Meteoritics & Planetary Science* 32:929–944.
- Roszjar. J., Metzler. K., Bischoff. A., Barrat. J., Geisler. T., Greenwood. R., Franchi. I., Klemme. S. (2011). Thermal history of Northwest Africa 5073—A coarsegrained Stannern-trend eucrite containing cm-sized pyroxenes and large zircon grains. *Meteorit. Planet. Sci.* 46, 1754–1773.
- Russell, C. T., Raymond, C. A., Coradini, A., McSween, H. Y., Zuber, M. T., Nathues, A., Titus, T. N. (2012). Dawn at Vesta: Testing the Protoplanetary Paradigm. *Science*, 336(6082), 684–686.
- Russell. C., Raymond. C., Jaumann. R., McSween. H., De Sanctis. M., Nathues. A., Joy. S. (2013). Dawn completes its mission at 4 Vesta. *Meteoritics & Planetary Science*, 48(11), 2076–2089.
- Saar. M., Manga. M., Cashman. K., & Fremouw. S. (2001). Numerical models of the onset of yield strength in crystal-melt suspensions. *Earth and Planetary Science Letters* 187:367–379.
- Sack. R., Azeredo. W., & Lipschutz. M. (1991). Olivine diogenites: The mantle of the eucrite parent body. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 55:1111–1120.

Références bibliographiques

- Saiki. K., Takeda. H., & Ishii. T. (2001). Mineralogy of Yamato-791192, HED breccia and relationship between cumulate eucrites and ordinary eucrites. *Antarctic Meteorite Res.* 14, 28.
- Schäfer. M., Nathues. A., Williams. D., Mittlefehldt. D., Le Corre. L., Buczkowski. D., & Russell. C. (2014). Imprint of the Rheasilvia impact on Vesta – Geologic mapping of quadrangles Gegania and Lucaria. *Icarus*, 244, 60–73.
- Schenk. P., O'Brien. D., Marchi. S., Gaskell. R., Preusker. F., Roatsch. T., & Russell, C. (2012). The Geologically Recent Giant Impact Basins at Vesta's South Pole. *Science*, 336(6082), 694–697.
- Schiller. M., Baker. J., Creech. J., Paton. C., Millet. M.-A., Irving A., & Bizzarro M. (2011). Rapid timescales for magma ocean crystallization on the howardite-eucrite-diogenite parent body. *The Astrophysical Journal Letters* 740:L22.
- Scott. E., Greenwood. R., Franchi. I., & Sanders. I. (2009). Oxygen isotopic constraints on the origin and parent bodies of eucrites, diogenites, and howardites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73(19):5835-5853
- Seddiki. A. (2011). Inventaire, pétrologie et géochimie du cortège de roches magmatiques (terrestres et extra-terrestres) retrouvées dans les régions de Chegga et d'Aftout (Eglabs, Dorsale Reguibat, Sahara du Sud Ouest algérien). *Thèse de doctorat*, Univ. D'Oran, 190 p.
- Shearer. C., Burger. P., & Papike. J. (2010). Petrogenetic relationships between diogenites and olivine diogenites: Implications for magmatism on the HED parent body. Institute of Meteoritics, Department of Earth & Planetary Sciences, University of New Mexico, Albuquerque, NM 87131, USA. *Geochimica et Cosmochimica. Acta* 74. 4865–4880.
- Shukolyukov. A. & Lugmair. G. (1993). ^{60}Fe in eucrites. *Earth and Planetary Science Letters* 119:159–166.
- Smith. S. (2009). Using petrology and mineralogy to understand the surface of Vesta: A collection of fine-grained eucrites. Master of Science, Bachelor of Science, Texas A&M University-Corpus Christi Corpus Christi, TX.

Références bibliographiques

- Sramek. O., Milelli. L., Ricard. Y. & Labrosse. S. (2012). Thermal evolution and differentiation of planetesimals and planetary embryos. *Icarus* 217:339– 354.
- Stolper. E. (1977). Experimental petrology of eucritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 41(5):587-611.
- Takeda. H., Miyamoto. M., Ishii. T., & Reid. A. (1976). Characterization of crust formation on a parent body of achondrites and the moon by pyroxene crystallography and chemistry. In *Lunar and Planetary Science Conference Proceedings*, pp. 3535- 3548.
- Takeda. H., Mori. H. & Yanai. K. (1981) Mineralogy of the Yamato diogenites as possible pieces of a single fall. *Mem. Natl. Inst. Polar Res. Spec. Issue* 20, 81–99
- Takeda. H. (1986). Mineralogy of Yamato 791073 with reference to crystal fractionation of the Howardite parent body. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*.
- Takeda. H. (1991). Comparisons of Antarctic and non-Antarctic achondrites and possible origin of the differences. *Geochim. Cosmochim. Acta* 55, 35–47.
- Takeda. H. (1997). Mineralogical records of early planetary processes on the howardite, eucrite, diogenite parent body with reference to Vesta. *Meteoritics & Planetary Science* 32(6):841-853.
- Thomas. P., Binzel. R., Gaffey. M., Storrs. A., Wells. E., & Zellner. B. (1997). Impact Excavation on Asteroid 4 & nbsp; Vesta: Hubble Space Telescope Results. *Science*, 277(5331), 1492–1495.
- Treiman A. H. (1997) The parent magmas of the cumulate eucrites: a mass balance approach. *Meteorit. Planet. Sci.* 32, 217–230.
- Trinquier A., Birck J. L., Alle`gre C. J., Go`pel C. and Ulfbeck D.(2008) ⁵³Mn-⁵³Cr systematics of the early Solar System revisited. *Geochim. Cosmochim. Acta* 72, 5146–5163.
- Wadhwa. M., Srinivasan. G. & Carlson. R. (2007) Timescales of planetesimal differentiation in the early solar system. In *Meteorites and the Earth Solar System II* (eds. D. S. Lauretta and H. Y. McSween). Tucson, AZ. pp. 715–731.
- Wahl. W. (1952). The brecciated stony meteorites and meteorites containing foreign fragments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 2(2):91-117.

Références bibliographiques

- Walker D., Hager. B., & Hays. J. (1980). Mass and heat transport in a lunar magma ocean by sinking blobs. Proceedings, 11th Lunar and Planetary Science Conference. pp. 1196–1198.
- Walsh. S. & Saar. M. (2008). Numerical models of stiffness and yield stress growth in crystal-melt suspensions. *Earth and Planetary Science Letters* 267:32– 44.
- Warren. P. & Jerde. E. (1987). Composition and origin of Nuevo Laredo trend eucrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 51(3):713-725.
- Warren. P., Kallemeyn. G., Huber. H., Ulf-Møller. F. & Choe. W. (2009). Siderophile and other geochemical constraints on mixing relationships among HEDmeteoritic breccias. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73:5918–5943.
- Weisfeiler, M., Turcotte, D., & Kellogg, L. (2017). Modeling the early evolution of Vesta. *Meteoritics & Planetary Science*, 52(5), 859–868.
- Wiechert. U., Halliday. A., Palme. H. & Rumble. D. (2004) Oxygen isotope evidence for rapid mixing of the HED meteorite parent body. *Earth Planet. Sci. Lett.* 221, 373–382.
- Wittke. J., Irving. A., Bunch. T. & Kuehner. S. (2011). A nomenclature system for diogenites consistent with the IUGS system for naming terrestrial ultramafic rocks (abstract #5223). 74th Annual Meteoritical Society Meeting. see <http://adsabs.harvard.edu/abs/2011M%26PSA.74.5223W> for reference.
- Yamaguchi, A., Taylor. G., Keil. K., Floss. C., Crozaz. G., Nyquist. L., & Shih. C. (2001). Post-crystallization reheating and partial melting of eucrite EET90020 by impact into the hot crust of asteroid 4Vesta j4.50 Ga ago. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(20), 23.
- Yamaguchi. A., Barrat. J., Ito. M., & Bohn. M. (2011). Posteucritic magmatism on Vesta: Evidence from the A lithologically diverse piece of the Vestan regolith 223petrology and thermal history of diogenites. *Journal of Geophysical Research* 116:E08009.
- NASA/JPL-Caltech/UCLA /MPS/DLR/IDA
- [https://fr.wikipedia.org/wiki/\(4\)_Vesta#cite_note-jpl_sbdb-1](https://fr.wikipedia.org/wiki/(4)_Vesta#cite_note-jpl_sbdb-1)
- curator.jsc.nasa.gov/antmet/hed/hed_what.cfm