



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université d'Oran 2

Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers

Département des Sciences de la Terre

MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Option : Géodynamique de la Lithosphère

Les Météorites Ferro-Pierreuses ; les Pallasites et les Mésosidérites

Présenté par :

Mlle. Fatima Zahra SERRADJ

Devant le jury composé de :

M. A. SEDDIKI	Professeur	Université d'Oran 2	Président
Mlle. R. KARED	M.C.B	Université d'Oran 2	Encadrante
M. A. BAAOUAGUE	M.A.A	Université d'Oran 2	Examineur

Remerciements

« Avant tout, Je remercie ALLAH, de nous avoir donné la santé, l'esprit, et le savoir, et les opportunités dont il nous a bénis avec »

Après ALLAH, je remercie mon encadrante, Mlle. Ratiba Kared, pour avoir accepté de m'encadrer, c'est un honneur pour moi de travailler avec elle. Merci de m'avoir aidé dans cette épreuve, et de m'avoir accompagné étape par étape. Merci pour vos recommandations, vos encouragements et aussi votre patience avec moi, que ALLAH vous récompense infiniment.

Je remercie aussi Mr. Abdelmadjid Seddiki, d'avoir accepté de présider le jury, et de son support entier au niveau scientifique, et psychologique, merci beaucoup.

J'aimerais remercier Mr. Baaouague Abdelbaki d'être là parmi le juré, votre présence est un honneur. Merci aussi d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail.

Je remercie aussi, tous mes enseignants de Master, les enseignants de spécialité Géodynamique de la lithosphère, du département de Géologie, Université d'Oran2, et surtout Mme. N. Remaci et aussi Mr. M. Tabeliouna.

J'aimerais remercier Aami Omar pour son sourire chaque matin et sa bonne humeur.

Je remercie infiniment mes parents, de leurs supports dans ma vie, et de leur confiance en moi, j'espère qu'ils sont assez fiers de ce que je suis.

Je remercie, celui qui le mérite plus, mon réconfort, mon aide, et celui qui m'a supporté durant cette étape, et toute l'étape du Master, Snow-Flake, tu es ma bonne chance.

Et je suis reconnaissante à tout qui ont aidé, que ça soit de loin ou de prêt.

Finalement, je termine en me remerciant moi-même, je me remercie d'être arrivée à ce statut.

Merci à tous ...

S. ZAHRA

Dédicace

À une partie de mon cœur qui m'a quitté,

À quelqu'un qui ressemble au paradis,

À toi qui te réjouis de mon succès et t'en es fière, je dédie cette réussite qui n'aurait pu se réaliser sans toi. Tu es mon pilier, celui qui m'a soutenu psychiquement, moralement et financièrement, et a consacré sa vie à mon bien-être. Félicitations pour notre succès !

Tu es éternelle dans mon cœur, morceau de paradis.

ALLAH yerahmek, maman

Résumé :

Le travail qu'on a accompli est basé sur un groupe de météorites achondritiques (météorites ferro-pierreuses). Ce groupe est subdivisé en deux sous-groupes : les pallasites, et les mésosidérites. Une synthèse approfondie a été réalisée sur ces météorites. Une étude pétrographique sur l'un de ces groupes a été également réalisée.

L'étude pétrographique des mésosidérites nous montre qu'elle s'est formée par plusieurs phases minérales, comme le pyroxène le plagioclase et le fer métal, les sulfures, l'olivine, les phosphates avec des phases accessoires, comme le spinelle chromifère. Les mésosidérites sont classés en sous-groupes texturaux 1-4, et des sous-groupes minéralogique, A-C. Cependant l'étude approfondie des pallasites montre que le minérale le plus abondant est l'olivine, ce dernier est très important pour le déchiffrement de l'histoire de formation des pallasites, la taille et la forme d'olivine varie d'un pallasite à un autre, comme dans les pallasites seymchan, les agrégats d'olivine, sont de forme arrondie et angulaires, les phases accessoires (chromites, sulfures, spinelle) font partie des composants des météorites mixtes, mais avec des proportions mineures. Les pallasites sont regroupées en 4 groupes, le groupe plus abondants est celui de groupe principal.

En ce qui concerne l'origine, l'évolution et la formation de ces deux types de météorites plusieurs modèles et hypothèses ont été proposées. Certaines hypothèses supportent l'idée de la formation par l'impact entre deux astéroïdes, d'autres suggèrent qu'elles sont issues de la limite entre un noyau métallique et un manteau silicaté d'un astéroïde différencié qui pourrait être 4Vesta. Il y a aussi celles qui suggèrent la fusion fractionnée comme un processus de formation.

Mots clés : Sidérolithes, Pallasites, Mésosidérites, astéroïde, Fer-métal et silicates.

Abstract:

The work that has been done is based on a group of differentier meteorites (iron meteorites). This group is subdivided into two subgroups: pallasites and mesosiderites. An in-depth synthesis was carried out on these meteorites. A petrographic study on one of these groups was also conducted.

The petrographic study of mesosiederites shows that it was formed by several mineral phases, such as pyroxene plagioclase and iron metal, sulphides, olivine, phosphates with accessory phases, such as chromium spinel. Mesosiderites are classified into textural subgroups 1-4, and mineralogical subgroups, A-C. However, extensive study of pallasites shows that the most abundant mineral is olivine, the latter is very important for deciphering the formation history of pallasites, the size and shape of olivine varies from one pallasite to another, as in pallasites seymchan, olivine aggregates, are rounded and angular, the accessory phases (chromites, sulphides, spinel) are part of the components of mixed meteorites, but with minor proportions. Pallasites are grouped into 4 groups, the most abundant group is the main group.

Regarding the origin, evolution and formation of these two types of meteorites several models and hypotheses have been proposed. Some hypotheses support the idea of impact formation between two asteroids, others suggest that they arise from the boundary between a metal core and a silicate mantle of a differentiated asteroid that could be 4Vesta. There are also those that suggest fractional fusion as a process of formation.

Keywords: Sideroliths, Pallasites, Mesosiderites, asteroid, Iron-metal and silicates

ملخص:

يعتمد العمل الذي تم إنجازه على مجموعة من النيازك المختلفة (النيازك الصخر-حديدية). تنقسم هذه المجموعة إلى مجموعتين فرعيتين: البالاسيت والميزوسيدريت. تم إجراء دراسة معمقة حول هذه النيازك. كما أجريت دراسة بتروغرافية على إحدى هذه المجموعات.

تظهر الدراسة البتروغرافية للميزوسيدريت أنها تشكلت من عدة مراحل معدنية، مثل البيروكسين بلاجيوكلاز ومعدن الحديد والكبريتيدات والزبرجد الزيتوني والفوسفات مع مراحل ملحقة، مثل الكروم سبيل. يتم تصنيف الميزوسيدريت إلى مجموعات فرعية نسيجية 4-1، ومجموعات فرعية معدنية A-C، تظهر دراسة مكثفة عن البالاسيت أن المعدن الأكثر وفرة هو الزبرجد الزيتوني، والأخير مهم جداً لفك رموز تاريخ تكوين البالاسيت، ويختلف حجم وشكل الأوليفين من بالاسيت إلى الآخر، كما هو الحال في البالاسيت سيمنتشان، مجمعات الزبرجد الزيتوني، مستديرة، المراحل الإضافية (الكروميت، الكبريتيدات، السبيل) هي جزء من مكونات النيازك المختلطة، ولكن بنسب طفيفة. ينقسم البالاسيت إلى 4 مجموعات، المجموعة الأكثر وفرة هي المجموعة الرئيسية.

فيما يتعلق بأصل وتطور وتشكيل هذين النوعين من النيازك، تم اقتراح العديد من النماذج والفرضيات. تدعم بعض الفرضيات فكرة تكوين الصدمة بين كويكبين، بينما يقترح البعض الآخر أنها تنشأ من الحدود بين قلب معدني ووشاح سيليكات لكويكب متمايز يمكن Vesta4 هناك أيضاً تلك التي تشير إلى الاندماج الجزئي كعملية تشكيل.

الكلمات المفتاحية: نيازك مختلطة، بالاسيت، ميزوسيدريت، كويكب، معدن حديدي وسيليكات.

Listes des figures

Fig. I.1 : Localisation de la ceinture d'astéroïdes dans le système solaire (https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/astronomie-ceinture-asteroides-6358/)	02
Fig. I.2. Image d'astéroïdes et météoroïdes dans le système solaire (https://topfacts.org/15-facts-about-the-asteroid-belt/)	04
Fig. I.3. Schéma représentatif du passage de météoroïde a météorite (https://www.fas37.org/wp/meteors-meteoroids-and-meteorites/)	05
Fig. I.4. Schéma décrivant la formation des mésosidérites (in Zachén, 2020)	08
Fig. I.5. Photo d'un échantillon de pallasite type Seymchan (https://scitechdaily.com/saphir-multi-anvil-press-solves-mystery-of-the-solar-system-how-stony-iron-meteorites-form/)	09
Fig. I.6. Classification des météorites différenciés	10
Fig. I.7. Vue de l'astéroïde 4Vesta prit par la caméra du vaisseau spatial DAWN (NASA) (https://solarsystem.nasa.gov/resources/2055/a-full-frame-view-of-vesta/)	15
Fig. I.8. Image de l'astéroïde 4Vesta prise par la sonde Dawn, montrant les deux grands cratères dans son pôle sud. (in Kared, 2019)	16
Fig II. 01. Vue microscopique (en lumière réfléchie) des pyroxènes zonés dans la mésosidérite de cette étude.	18
Fig II.02. Vue microscopique (en lumière réfléchie) des plagioclases présentent dans la mésosidérite de cette étude	19
Fig. II.03. Vue microscopique (en lumière réfléchie) des Fer-Métal présentent dans la mésosidérite de cette étude	20
Fig II.04. Vue microscopique (en lumière réfléchie) des olivines présentent dans la mésosidérite de cette étude.	21
Fig II.05 : Vue microscopique (en lumière réfléchie) des phosphates présentent dans la mésosidérite de cette étude.	22

Fig II.06 : Formation de mésosidérite sur 4 Vesta. a) Cristallisation initiale des silicates de la mésosidérite. b) Le premier événement de réchauffement dû à l'impact a provoqué une perturbation à grande échelle de la croûte supérieure et inférieure. c) Le deuxième événement de réchauffement dû à l'impact a provoqué le mélange métal-silicate et la formation de la mésosidérite. On ne sait pas si la collision a perturbé le noyau de l'astéroïde ou non, c'est-à-dire si l'origine du métal provient de 4 Vesta ou de l'impacteur exogène (Wang & Tian, 2023)	26
Fig III.01 : Photographie de la tranche Seymchan #SEY-18-01 avec interprétations texturales. (Walte et al., 2020).	29
Fig III.02 Micrographies en lumière réfléchie de microstructures après 89,5 h de recuit statique. (Walte et al., 2020).	30
Fig III.03 : Image binoculaire de poches métalliques Fe-Ni équilibrées dans Seymchan # SEY-18-01 indiquant l'équilibre textural. (Walte et al., 2020)	30
Fig III.04 : Veinules intergranulaires provenant de poches de fusion après un raccourcissement vertical de 7% et 11% (images de rétrodiffusion SEM). (Walte et al., 2020).	31
Fig III.05 : Veinules interconnectant des poches métalliques équilibrées (micrographies optiques). (Walte et al., 2020).	31
Fig III.06 : Une faille (ligne orange pointillée) recoupe un agrégat d'olivine (micrographies optiques). (Walte et al., 2020).	32
Fig III.07 : Microstructure cataclastique omniprésente après un raccourcissement de 20% créant principalement des fragments d'olivine. (Images de rétrodiffusion SEM). (Walte et al., 2020).	32
Fig III.08 : Olivine - bouillie métallique dans expériences montrant des olivines rondes adjacentes (flèches rouges) et des fragments d'olivine plus petits. (Micrographies optiques). (Walte et al., 2020).	33
Fig III.09 : Olivine - bouillie métallique dans Seymchan montrant des olivines rondes adjacentes (flèches rouges) et des fragments d'olivine plus petits. (Micrographies optiques) (Walte et al., 2020).	33
Fig III.10 : La déformation oblate (extension dans le plan image) forme des olivines angulaires par fracturation inter cristalline. (Walte et al., 2020).	34

Fig III.11: La déformation par cisaillement pur crée des fragments d'olivine par fracturation principalement intra cristalline. (Walte et al., 2020).	34
Fig III.12 : Micrographies optiques des microstructures fondues Au – FeS dans des échantillons déformés comparées aux textures Fe-Ni – troïlite dans la pallasite de Seymchan (Walte et al., 2020).	35
Fig III.13-a : Micrographies optiques des microstructures fondues Au – FeS dans des échantillons déformés comparées aux avec Fig III.13-b : textures Fe-Ni – troïlite dans la pallasite de Seymchan (Walte et al., 2020).	35
Fig III.14-a : Micrographies optiques de textures Seymchan, certaines fractures intra granulaires étroites ont été pincées. (Walte et al., 2020).	36
Fig III.14-b : Micrographies optiques de Les plus petits grains d'olivine de Seymchan présentent généralement une forme arrondie. (Walte et al., 2020)	37
Fig III.15 : Fig montrant la formation des pallasites typiques du groupe principal (Yang et al., 2010).	39
Fig III.16 : L'évolution du corps parent des pallasites (Walte et al., 2020)	41

Liste des tableaux

Tableau I.01: Echelle d'altération terrestre « Weathering » (Wlotzka, 1993)	12
Tableau II.1. Critères de classification texturale des mésosidérites (Hewins, 1984). Modifié de (Mittlefehldt et al., 1998).	24
Tableau II.2. Critères de classification minéralogique des mésosidérites (Hutchison, 2004).	24
Tableau III.01: Concepts et modèles répandus concernant la formation des pallasites. (Boesenberg et al., 2012). (Modifié)	38

Liste des abréviations

Au : L'Or

Ec : Extension-Compression

Fe-Ni : Fer-Nickel

FeS : Troïlite

Fer-mét : Fer-Métal

HED : Howardite-eucrite-diogénite

HEDDO : Howardite-eucrite-diogénite-diogénite à olivine

Ir-Ni : Iridium -Nickel

Ol : Olivine

Opx : Orthopyroxène

Os : Champ de déformation aplati

PES : Pallasite Eagle Station

Phos : Phosphates

Pl : Plagioclase

PMG : Pallasite de Groupe Principal

PPX : Pallasite a pyroxène

Px : Pyroxène

Re : Rhénium

SEY : Seymchan

Sp : Spinelle

Tables des matières

Résumé	I
Abstract	II
ملخص	III
Tableau des Figures	IV
Liste des Tableaux	VI
Liste des abreviations	VII
Introduction générale	01
Chapitre I: Généralités	
I.1. Introduction	02
I.2. D'astéroïdes à météorites...un peu d'histoire	03
I.3. Classification des météorites	06
I.3.1. Les météorites pierreuses	06
I.3.1.1. Les chondrites	06
I.3.1.2. Les achondrites	07
I.3.2. Les météorites métalliques	07
I.3.3. Les météorites mixtes	07
I.3.3.1. Les Mésosidérites	07
I.3.3.2. Les pallasites	09
I.3.4. Classification des météorites différenciés	10
I.4. Les degrés d'altération d'une météorite	11
I.5. Le métamorphisme dans les achondrites.....	13
I.5.1. Le métamorphisme d'impact	13
I.5.2. Le métamorphisme thermique	13
I.6. Le corps parent des météorites différenciées	14

I.6.1. L'astéroïde 4Vesta	14
---------------------------------	----

Chapitre II: Etude pétrographique des Mésosidérîtes

II. 1. Introduction	17
II. 2. La mésosidérîte	17
II. 2.1. Description macroscopique	17
II. 2.2. Description microscopique	17
II.3. Classification de mésosidérîtes	23
II.4. L'origine et formation des mésosidérîtes	25

Chapitre III: Les Pallasites

III. 1. Introduction	27
III. 2. Les Pallasites	27
III. 2.1. Méthodes et matériels	27
III. 2.2. Descriptions des pallasites	28
III. 2.2.1 Description macroscopique	28
III. 2.2.2 Description microscopique	30
III.2.3. Discussion	37
III. 3. Formation et corps parent des pallasites	38
III. 4. L'évolution du corps parent des pallasites	40
Conclusion générale	42
Référence bibliographiques	44

Introduction

Introduction générale

Introduction générale :

Depuis l'aube des temps, l'univers a toujours été considéré comme un domaine très diversifié et très fascinant pour l'homme, à tel point que chaque aspect de celui-ci peut être un domaine de recherche en lui-même, il est aussi très riche en objets célestes et en matériaux comme les galaxies, et les systèmes solaires. Et parmi les matériaux, on peut citer les météorites, qui sont des messagers du système solaire, car ils contiennent plusieurs informations, et ils nous guident à mieux comprendre les formations et les mécanismes extraterrestres. Ces météorites ont été subdivisé selon leurs structures en plusieurs classes ; qu'elles sont métalliques, rocheuses ou mixtes.

Les météorites mixtes (connue les sidérolithes) ont fait l'objet d'études à plusieurs reprises jusqu'à présent, mais les études focalisent sur les deux sous-classes ferro-pierreuses ; les Pallasites et les Mésosidérites, comme celle de (**Yang et al., 2010**) et (**Wang & Tian, 2023**). L'origine et la formation de ces deux types de météorites a été une cible d'intérêt scientifique et au même temps un sujet de débat depuis plusieurs années entre les scientifiques, cela est causer par le fait que chaque étude effectuer ramène son propre résultat, dont on déduit une nouvelle hypothèse sur la formation de ces objets célestes, et c'est ce que nous allons chercher à clarifier et de comprendre en effectuant une étude globale pour chaque sous-classe.

Les résultats de cette étude vont permettre de valider l'hypothèse de la formation des Pallasites et de Mésosidérites. Car, plusieurs hypothèses ont été proposées pour la formation et l'origine des météorites mixtes. Cependant aucune hypothèse sur l'origine des deux météorites, n'a réussi à convaincre tous les scientifiques, et cela est dû aux énigmes laissait sans réponses et irrésolues. Cette étude va donc traiter une problématique assez importante sur des telles météorites qui sont considérées comme des morceaux du cœur d'une planète.

Le manuscrit de ce mémoire est découpé en trois chapitres : **Le premier chapitre** représente une synthèse exhaustive sur les météorites, dans lequel on s'est focalisé sur des généralités sur la formation des météorites, leurs classifications, et d'autres spécifiés. Cependant, **le deuxième chapitre** est axé sur une étude pétrographique sur une mésosidérite, en faisant la description pétrographique des différentes phases présentes dans les mésosidérite ainsi que leurs pourcentages et leurs associations texturales. Enfin, **le troisième chapitre** est réservé pour les pallasites, qui représente une synthèse exhaustive sur des travaux expérimentaux qui ont été effectué récemment et qui ont mis en évidence de nouvelles perspectives sur la formation et l'origine des pallasites.

Chapitre I

- Généralités -

Chapitre I : Généralités

I.1. Introduction :

Notre système solaire est un système planétaire qui est composé de plusieurs corps spatiales, comme le soleil, les huit planètes principales, les planètes naines et d'autres corps célestes (Crovisier & Fulchignoni, 2021). On y trouve la ceinture d'astéroïdes, qui est un disque plat d'objet rocheux, située entre Mars et Jupiter (Fig. I.1). Cette ceinture est composée de milliers d'astéroïdes de tailles différentes, allant de quelques mètres à plusieurs centaines de kilomètres en diamètres. Cette région a été découverte au début de XIXe siècle (Heudier, 2020).

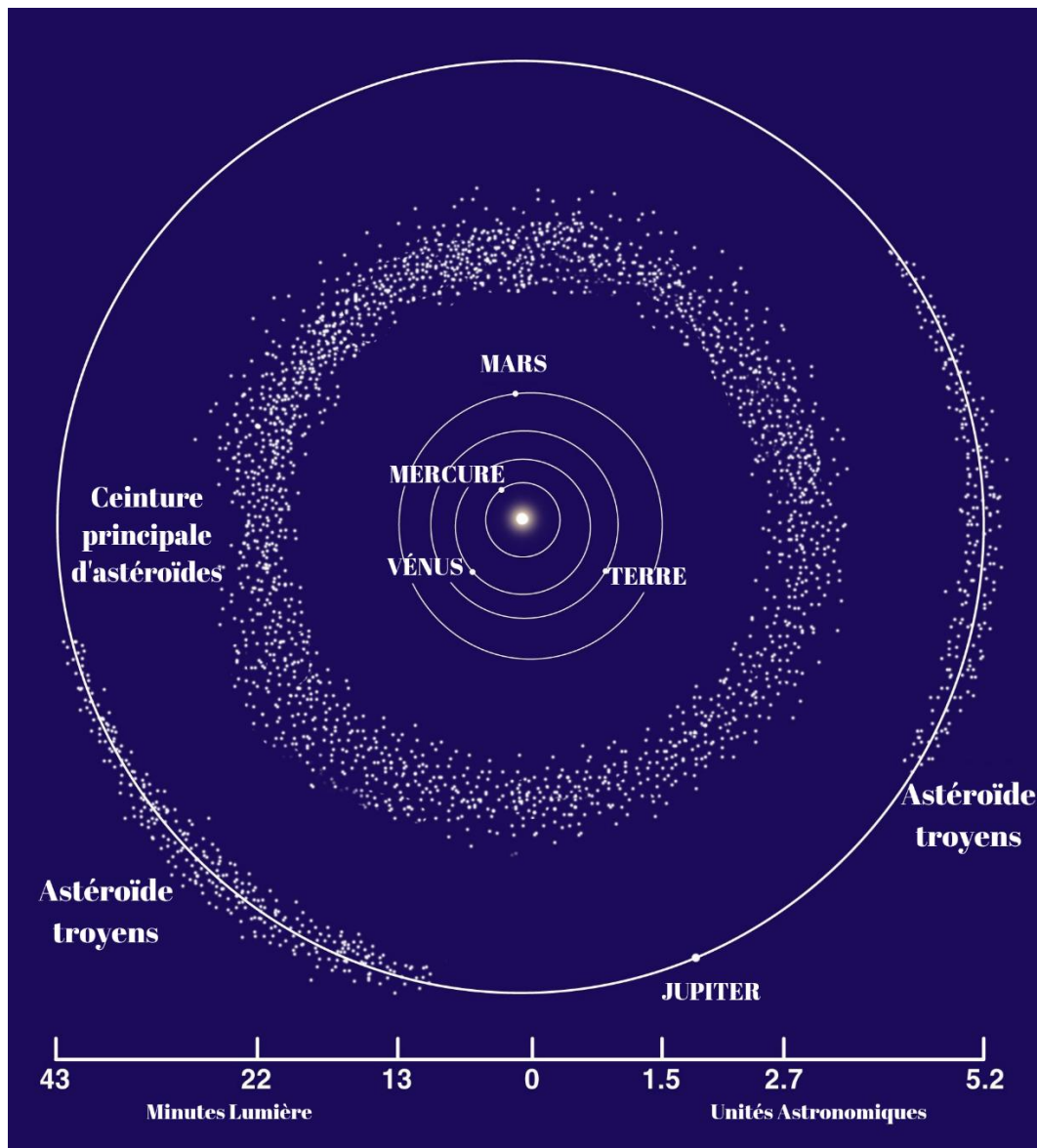


Figure. I.1 : Localisation de la ceinture d'astéroïdes dans le système solaire

(<https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/astronomie-ceinture-asteroides-6358/>)

Chapitre I : Généralités

La ceinture d'astéroïdes est considérée comme l'un des vestiges de la formation du système solaire, elle peut nous donner beaucoup d'informations sur les conditions qui ont prévalu lors de sa naissance il y a 4,56 milliards d'années et aussi de son évolution au cours de cette période. Certains astéroïdes sont riches en métaux rares et en eau, substances qui pourraient être utiles dans l'exploration de l'espace.

Enfin, la ceinture d'astéroïdes est une zone où des collisions entre astéroïdes peuvent se produire (**Blitz, 2009**). Ces impacts peuvent être violents et entraîner la formation de nouveaux corps cosmique. Mais ils peuvent aussi être l'origine de la chute de météorites sur la terre.

I.2. D'astéroïdes à météorites...un peu d'histoire :

Autour de notre soleil tournent plusieurs objets de nature métallique, rocheux, et aussi de glace, ces objets sont intitulés astéroïdes (**Bond, 2014**), leur plus important critère est leurs tailles, Leurs dimensions varient du cm à près de 1000 km de diamètre pour le plus grand astéroïde du nom de Cérès (**Berthet, 2009**), ce qui ne leurs permet pas d'être des planètes entières mais plutôt des "protoplanète" , On remarque également que plus un astéroïde est gros, plus il est sphérique. En dessous de 160 km de diamètre, leur forme devient franchement allongée et irrégulière : cette forme est due à la gravité (**Bertholon & Potot, 2001**).

Les astéroïdes sont des corps rocheux qui se sont formés à partir des restes de la nébuleuse solaire primitive, un nuage de gaz et de poussière qui entourait notre jeune système solaire il y a environ 4,56 milliards d'années, (**Asphaus, 2000**). Les forces gravitationnelles ont provoqué l'agrégation de ces matériaux en de plus gros corps (**Fig. I.2**), formant ainsi les astéroïdes (**Crovisier & Fulchignoni, 2021**).

Chapitre I : Généralités



Figure. I.2. Image d'astéroïdes et météoroïdes dans le système solaire

(<https://topfacts.org/15-facts-about-the-asteroid-belt/>)

A travers le temps, les astéroïdes peuvent subir des perturbations gravitationnelles dues à l'influence d'autres astéroïdes ou de planètes (**Bond, 2014**). Ces interactions peuvent entraîner des collisions entre les astéroïdes, brisant certains d'entre eux en morceaux plus petits (**Crovisier & Fulchignoni, 2021**). Quand les trajectoires de deux astéroïdes ou plus s'interjecte et entre en collision ils résultent de petits fragments d'astéroïdes appelés météoroïdes (**Fig. I.3**) (**Heudier, 2020**). Ces derniers continuent de se déplacer dans l'espace. Les météoroïdes peuvent être déviés de leur orbite initiale par des interactions gravitationnelles avec des planètes ou d'autres objets célestes (**Manfroid, 2021**). Certains météoroïdes peuvent alors acquérir une trajectoire les amenant à se rapprocher de la Terre.

Lorsqu'un météoroïde rentre dans l'atmosphère terrestre, il subit une forte friction avec l'air, ce qui génère une intense chaleur (**Litowski, 2013**). Cela provoque la vaporisation et la fusion de la surface du météoroïde, créant ainsi une croûte noire de la surface de météoroïde, croûte de fusion (**Heudier, 2020**).

Chapitre I : Généralités

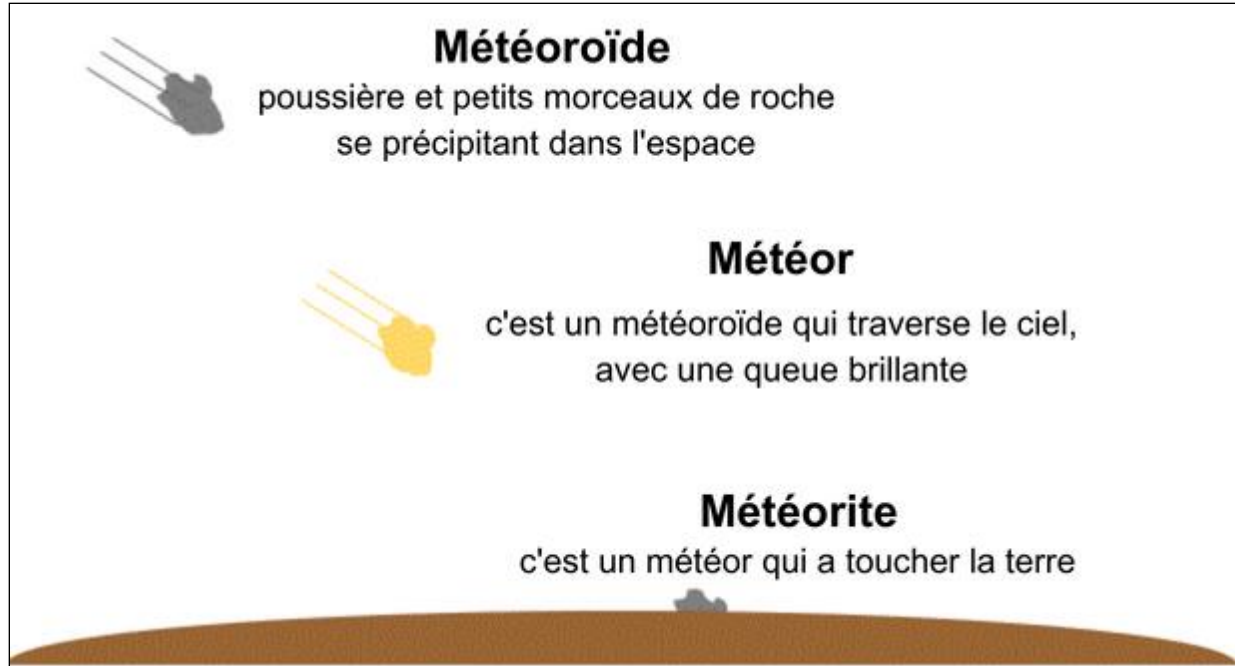


Figure. 1.3. Schéma représentatif du passage de météoroïde à météorite

(<https://www.fas37.org/wp/meteors-meteoroids-and-meteorites/>)

Si un météoroïde survit à son passage à travers l'atmosphère terrestre et atteint la surface de la Terre, il est alors appelé météorite, qui est un fragment de roche ou de métal provenant de l'espace qui survit à son passage à travers l'atmosphère terrestre et atteint la surface de la Terre (**Sagan, 1980**). Lorsqu'une météorite franchit notre atmosphère, elle entre en collision avec notre monde, apportant avec elle des fragments d'autres mondes (**Sagan, 1980**). Les météorites peuvent être composées de différentes matières, telles que des roches, des métaux ou des minéraux. Lorsqu'une météorite atteint la surface terrestre, elle peut créer un cratère d'impact si elle est suffisamment grande et si les conditions sont favorables (**Amarni, 2013; Heudier, 2020**). Les météorites peuvent tomber n'importe où sur Terre, mais elles sont souvent plus fréquentes dans les zones désertiques ou sur les surfaces gelées, où leur préservation est meilleure.

Bien que la plupart des météorites soient de petite taille et ne représentent pas de danger significatif, certaines peuvent causer des dégâts considérables lorsqu'elles frappent la Terre (**P. Thomas, 2002**). Les impacts de météorites peuvent créer des cratères d'impact massifs, provoquer des ondes de choc destructrices et déclencher des incendies.

Chapitre I : Généralités

En résumé, toutes les météorites connues aujourd'hui sur Terre proviennent principalement de la ceinture d'astéroïdes. La plupart des météorites sont des fragments d'astéroïdes et de planètes.

I.3. Classification des météorites :

Les météorites sont divisées selon leur composition, structure, minéralogie et selon leurs proportions de métal. Selon (Seddiki, 2011) Suivant leurs compositions, il existe trois grandes familles de météorites :

- Les météorites pierreuses : chondrites et achondrites ;
- Les météorites métalliques : hexaédrites, octaédrites et ataxites ;
- Les météorites mixtes : mésosidérites et pallasites.

I.3.1. Les météorites pierreuses : Cette famille contient peu de fer (environ moins de 20%) (Seddiki, 2011) , et cette dernière est subdivisée en deux groupes qui sont les chondrites et les achondrites.

I.3.1.1. Les chondrites : Ce sont des roches extra-terrestres chimiquement plus primitive. Elle proviennent généralement de corps de petite taille n'ayant pas encore amorcé les processus de différenciations (Seddiki, 2011). Les chondrites sont constituées principalement de petits granules composés surtout de pyroxène et d'olivine (des minéraux silicatés). Les chondrites peuvent être divisé en plusieurs groupes en fonction de leurs tendances chimiques :

- **Les chondrites carbonées :** ce sont des météorites rocheuses primitive et indifférenciées. Elles résultent d'un environnement riche en oxygène, où la majorité du métal se combinait dans les silicates, les sulfures, ou les oxydes. Et sont catégorisé chimiquement en groupes : CI, CM, CR, CO, CK, CB, CV et CH. (Berthet, 2009).

- **Les chondrites ordinaires :** ils sont définis par des ratios variables d'olivine et de pyroxène avec des chondres sphéroïdaux. Ce groupe se divise en H, L et LL.

- **Les chondrites à enstatite :** Ce sont des chondrites dont il y a presque la totalité du fer dans des métaux ou des sulfures tels que la troïlite (FeS), ils sont subdivisés en deux groupes, Le groupe EH contient du fer total à ~ 30 %, alors que le groupe EL contient seulement ~ 25 % (Keil, 1989).

Chapitre I : Généralités

- *Les chondrites de type R* : Ces chondrites sont énormément oxydées, et ils contiennent une quantité considérable d'olivine, mais au même temps, ils sont déficients en métaux.

I.3.1.2. Les achondrites : Météorite différenciée composée essentiellement de silicates. Ce groupe est subdivisé en 8 sous-groupes qui sont : Les achondrites primitives, les météorites martiennes, les Aubrites, les Ureilites, les HEDDO, les Angrites, les Brachinites et les météorites lunaires.

I.3.2. Les météorites métalliques :

Les météorites métalliques sont les plus riches en fer métal dont la quantité peut atteindre 98 % du volume total de la météorite (**McSween, 1987**). Les météorites métalliques proviennent de noyaux métalliques d'astéroïdes différenciés (**Asphaus, 2000**). Ces astéroïdes ont subi une différenciation.

I.3.3. Les météorites mixtes :

Les sidérolithes sont des météorites ferro-pierreuses composé principalement par une phase silicatée et une phase métallique de proportions différent et parfois similaires avec des phases mineures, est sont devisé en deux météorites connue :

I.3.3.1. Les Mésosidérites :

Ces météorites représentent des mélanges de matériaux provenant de croûte ou du noyau d'un astéroïde différencié et contiennent des faibles quantités de matériaux de manteau riches en olivine, Ces deux phases sont bien mélangées (**Kong et al., 2008; Wadhwa et al., 2003**).

- *L'histoire de l'évolution des mésosidérites* : On peut résumer l'histoire de l'évolution des mésosidérites dans la figure ci-dessous (**Fig. I.4**).

Chapitre I : Généralités

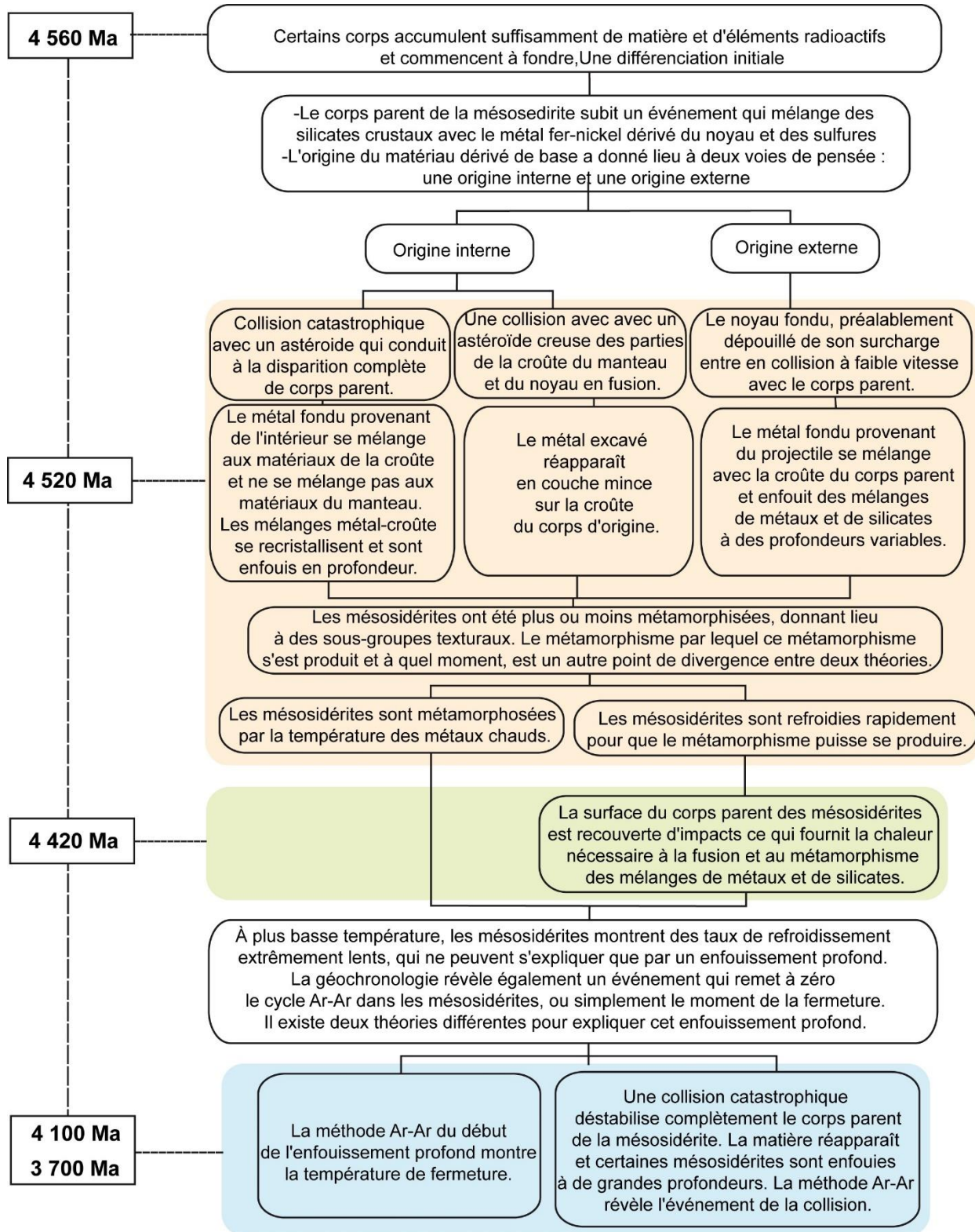


Figure. I.4. Schéma décrivant la formation des mésosidérites (in Zachén, 2020).

Chapitre I : Généralités

I.3.3.2. Les pallasites :

Les pallasites sont des météorites pierreuses à fer constituées d'olivine et de métal (principalement du fer et du nickel) (**Fig. I.5**), avec des phases mineures, telles que la troïlite, la chromite, le pyroxène, les phosphates et l'olivine, dans une matrice métallique Fe-Ni (**Buseck, 1977; Norton & Richard, 2002**).

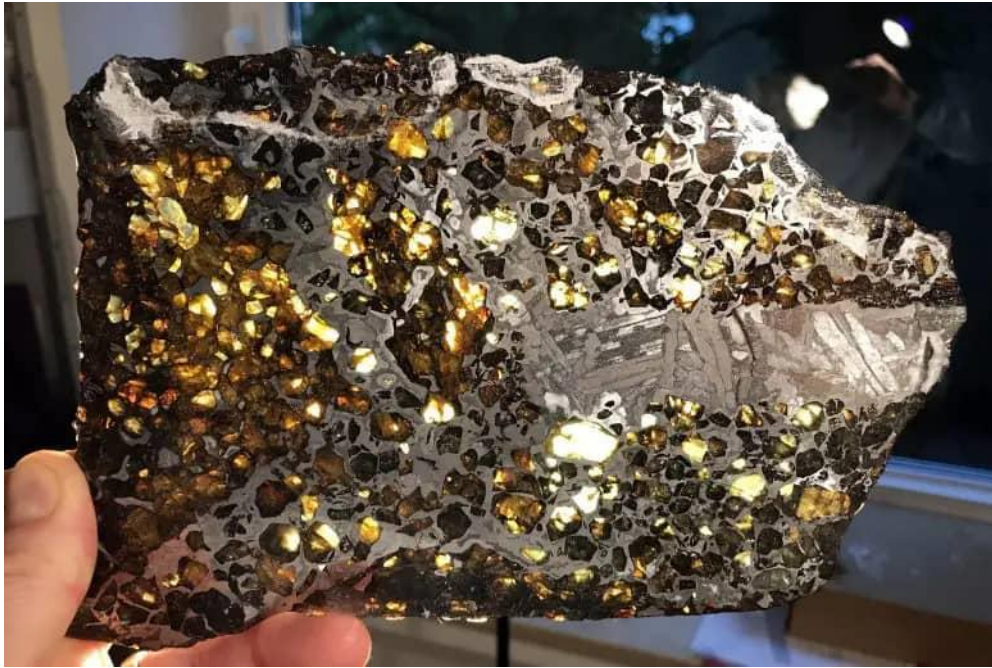


Figure. I.5. Photo d'un échantillon de pallasite type Seymchan

(<https://scitechdaily.com/saphir-multi-anvil-press-solves-mystery-of-the-solar-system-how-stony-iron-meteorites-form/>)

Les pallasites sont regroupées et subdivisées en fonction de leurs compositions de nickel, leurs pourcentage en éléments en trace, leurs compositions en forstérite et leurs signatures isotopiques d'oxygène contenu dans l'olivine (**Norton & Richard, 2002; Scott, 1977**). Ils sont subdivisés en quatre groupes :

- **Le groupe principal (PMG)** : c'est le groupe le plus abondant, avec une olivine plus riche en magnésium « forstérite ». Certain météorites PMG comme seymchan présente dans leurs matrices des motifs de Widmanstätten.

Chapitre I : Généralités

- *Le groupe Eagle Station (PES)* : C'est le moins abondant, avec une olivine plus riche en fer « fayalite ».
- *Le groupe pallasite a pyroxène (PPX)* : Il présente un groupe qui contient des inclusions à forte teneur en orthopyroxène, et se caractérisent par une matrice métallique présentant un fin motif de Widmanstätten octaédrite.
- *Les pallasites non-groupées* : Ce dernier ne rentre dans aucun group.

I.3.4. Classification des météorites différenciés :

La figure (**Fig. I.6**) ci-dessous est un schéma descriptif qui représente et résume de la classification des météorites différencié :

Météorites Différenciés

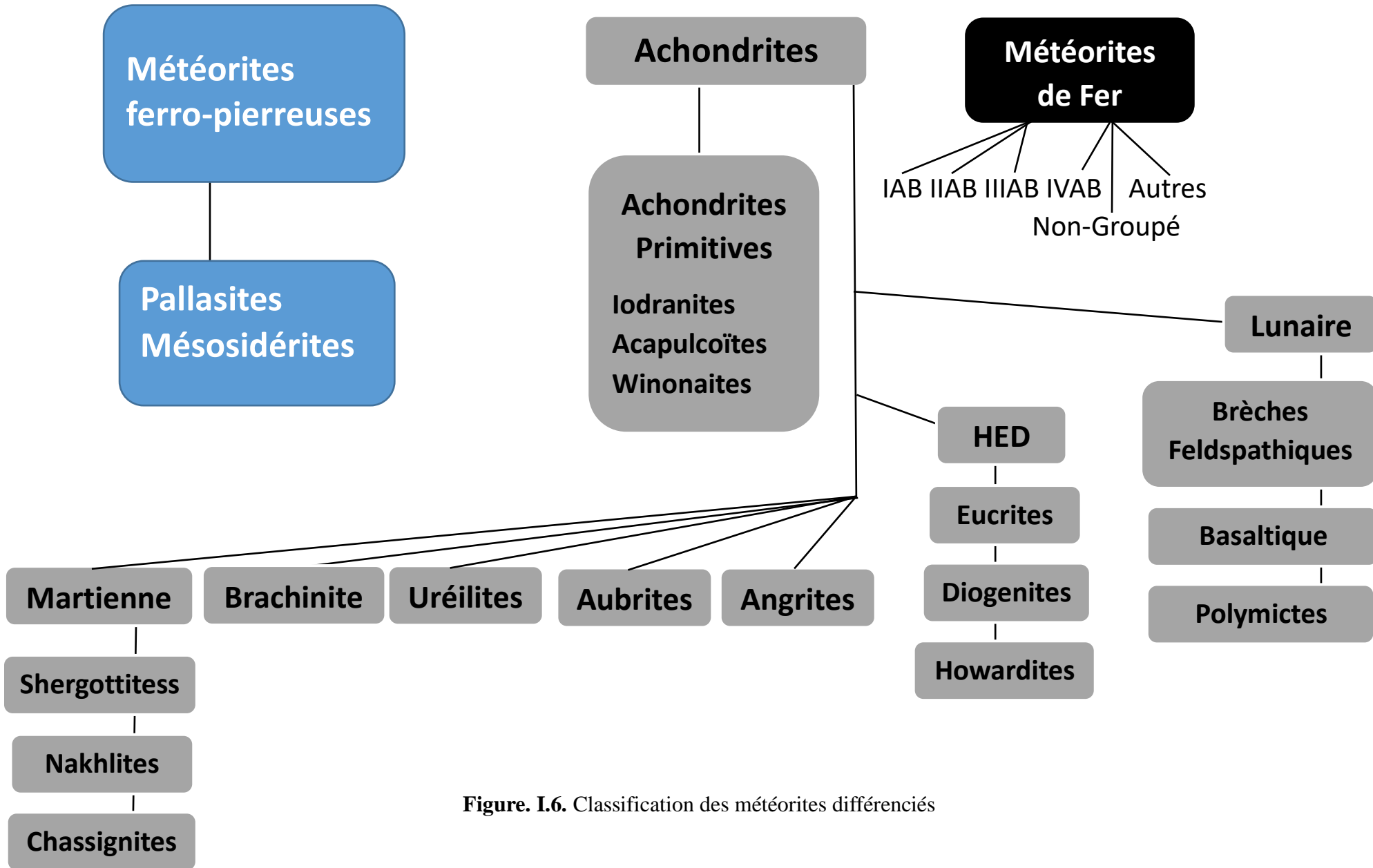


Figure. I.6. Classification des météorites différenciés

Chapitre I : Généralités

I.4. Les degrés d'altération d'une météorite :

Différents agents atmosphériques comme (l'eau de pluie, la température, l'oxygène atmosphérique et le vent) et d'autres facteurs chimiques (sels de sols) affectent l'altération des météorites résidant à la surface de la terre selon le passage de temps. Le degré d'altération indique la modification des propriétés physico-chimiques subies par les météorites et causée par les agents atmosphériques (**Wlotzka, 1993**). Cette modification est exprimée par la lettre W (Weathering) de 0 qui indique une faible altération, à 6 qui indique la plus forte altération (**Tableau I.01**). L'altération affecte en premier les grains de métal, et après la troïlite puis à la fin les Silicates (**Amarni, 2013**).

Tableau I.01: Echelle d'altération terrestre « Weathering » (**Wlotzka, 1993**).

Degré d'altération	Description de la modification apparente
W0	Une faible présence d'altération limonitiques mais une absence totale d'oxydation métallique et de sulfure.
W1	Apparition des veines mineures d'oxydes autour du métal.
W2	Oxydation modérée des grains de métal (entre 20 et 60 %) ; veines étant affecté (indépendamment de l'altération se développe l'oxyde de fer).
W3	Forte oxydation forte du métal, de troïlite et des sulfures (entre 60 et 95 % du métal).
W4	Oxydation totale du métal et de la troïlite (> 95 %), mais aucune altération des silicates.
W5	Commencement d'oxydation des silicates mafique, principalement le long des Coupures
W6	Remplacement important des silicates des minéraux argileux, des Oxydes et par la serpentine.

Chapitre I : Généralités

I.5. Le métamorphisme dans les achondrites :

Parmi les processus secondaires dans les achondrites, on a le métamorphisme, qui modifie leurs structures et leurs compositions d'origine. Le métamorphisme dans les achondrites peut être causé par plusieurs mécanismes, tels que l'impact météoritique, l'échauffement thermique et la différenciation planétaire (**Fontaine, 2014**). On a deux types de métamorphisme, le métamorphisme d'impact et le métamorphisme thermique.

I.5.1. Le métamorphisme d'impact :

L'impact météoritique est l'un des principaux facteurs contribuant au métamorphisme des achondrites (**Berthet, 2009**). Lorsqu'un astéroïde ou un autre corps parent entre en collision avec la surface d'une planète ou d'un astéroïde, l'énergie de l'impact génère une chaleur intense qui peut fondre partiellement ou complètement la roche cible (**Blitz, 2009**). Ce processus est connu sous le nom de fusion choc (**Salomon & Auly, 2010**). Lorsque la roche fond, les minéraux se réorganisent et se cristallisent à nouveau, formant de nouvelles textures et structures. Ces changements métamorphiques sont appelés métamorphisme d'impact et sont souvent observés dans les achondrites qui ont été exposées à des événements d'impact violents (**Crovisier & Fulchignoni, 2021**).

I.5.2. Le métamorphisme thermique :

Le métamorphisme thermique dans les achondrites est expliqué par l'échelle de (**Takeda & Graham, 1991**). Ils ont donc mis un degré de métamorphisme croissant dans les eucrites basaltiques utilisant la texture de la roche et la composition des pyroxènes comme des critères. Les eucrites ont été pétrographiquement subdivisées en séquences métamorphiques comportant six types distincts (**Seddiki, 2011**). Le métamorphisme thermique est un autre mécanisme de métamorphisme qui peut affecter les achondrites. Lorsque les astéroïdes ou les planètes se forment, ils sont soumis à des processus de chauffage interne et externe (**Crovisier & Fulchignoni, 2021**). L'échauffement interne est causé par la désintégration radioactive des éléments présents dans la roche, tandis que l'échauffement externe peut résulter de l'énergie libérée lors de la formation planétaire (**Fontaine, 2014**). Ces sources de chaleur peuvent provoquer des changements métamorphiques dans les achondrites, tels que la recristallisation des minéraux et la formation de nouvelles phases minérales.

Chapitre I : Généralités

I.6. Le corps parent des météorites différenciées :

Les processus de collision et de perturbation des corps protoplanétaires primitifs sont essentiels à la compréhension de la genèse de divers types d'astéroïdes de la ceinture principale (**Haba et al., 2019**). Un corps parent est l'astéroïde ou la protoplanète qui représente l'origine d'un météorite ou des fragments d'astéroïde qui ont subi une collision, plusieurs météorites n'ont pas d'origine connue, contrairement à d'autres comme les météorites HED, qu'on pense qu'elles proviennent d'un astéroïde 4Vesta (**Wang & Tian, 2023**).

I.6.1. L'astéroïde 4Vesta :

L'astéroïde 4 Vesta est l'un des plus grands et des plus brillants astéroïdes basaltiques de la ceinture principale située entre les orbites de Mars et de Jupiter. Découvert en 1807, c'est le quatrième astéroïde découvert après Cérès, Pallas et Junon. C'est le troisième plus grand astéroïde (**Thomas et al., 1997**), il a perdu environ 1 % de sa masse lors d'un impact avec un autre astéroïde, 4Vesta a fourni ainsi l'immense majorité des météorites basaltiques (**Seddiki, 2011**). Cet astéroïde ressemble globalement aux planètes terrestres, car il est différencié, et géologiquement diversifié. (**Jaumann et al., 2012; Keil, 2002; Russell et al., 2013**).

Chapitre I : Généralités

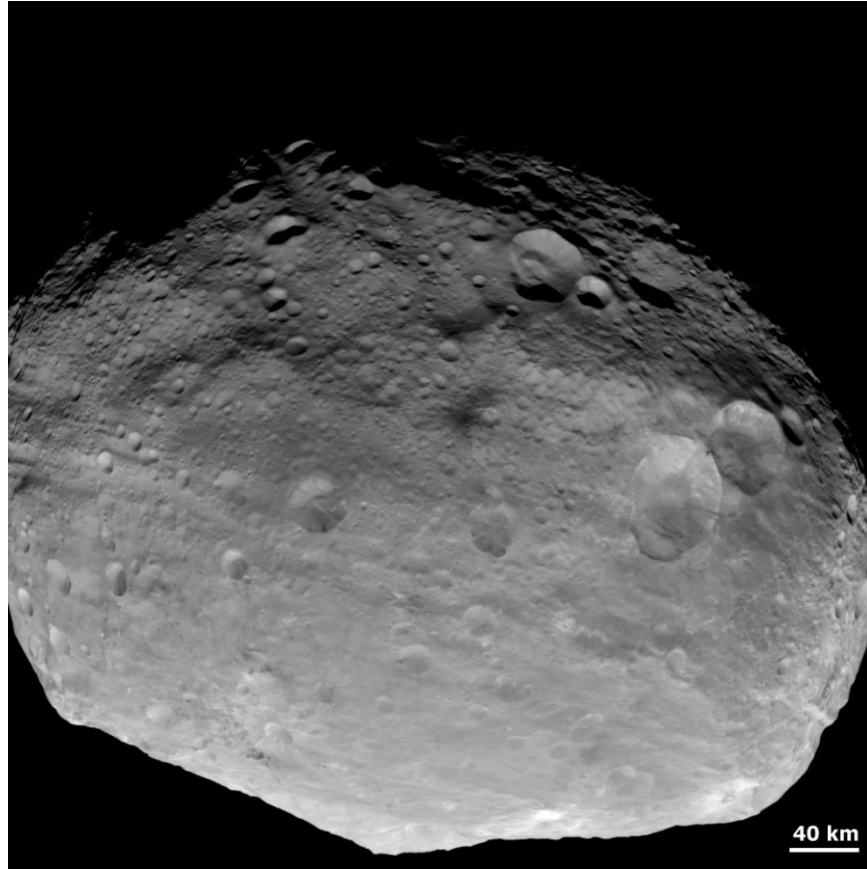


Figure. I.7. Vue de l'astéroïde 4Vesta prit par la caméra du vaisseau spatial DAWN (NASA)

(<https://solarsystem.nasa.gov/resources/2055/a-full-frame-view-of-vesta/>)

4Vesta est considéré comme la source de plusieurs astéroïdes, plus notamment les HEDs (howardite, eucrite et diogénite) (**Mayne, 2008**). Doté d'une structure interne constitué d'un noyau métallique, un manteau ultramafique, et une croûte basaltique, Il est considéré aussi comme le seul astéroïde différencié, et cela par (**Keil, 2002**).

Plusieurs cratères caractérisent la surface de Vesta avec des zones d'impact évidentes, et dans la région équatoriale (**Fig. I.7**), ils existent de grands bassins causés par ces impact (**Jaumann et al., 2012**). De ces cratères il y a deux qui sont les plus grand, le premier nommé Rheasilvia, s'étend sur 500 ± 25 km de diamètre et 19 ± 6 km de profondeur, et le deuxième, avec 400 ± 25 km de diamètre et 12 ± 2 km de profondeur, il est nommé Veneneia, et c'est un bassin sous-jacent, en forme de cuvette (**Fig. I.8**) (**Jaumann et al., 2012; Kared, 2019; Russell et al., 2012; Schenk et al., 2012**).

Chapitre I : Généralités

Des études précédentes ont suggéré que les silicates de mésosidérites sont génétiquement liés aux HEDs, et cela est confirmé par les similitudes entre leur minéralogie, textures, compositions, âges de formation, et études isotopiques de l'oxygène (Floran, 1978; Mittlefehldt et al., 1998), ces similitudes, proposent que l'origine des mésosidérites, et les HEDs des astéroïdes 4Vesta ont les mêmes origines (Haba et al., 2019; Sugiura et al., 2022). Cependant, il existe des différences entre la composition des HEDs, et les silicates de mésosidérites, comme le pyroxène, et la présence énorme de silicates, phosphate, et de chromite (Mittlefehldt et al., 1998), tandis que la formation de mésosidérites reste une énigme en elle-même (Wang & Tian, 2023).

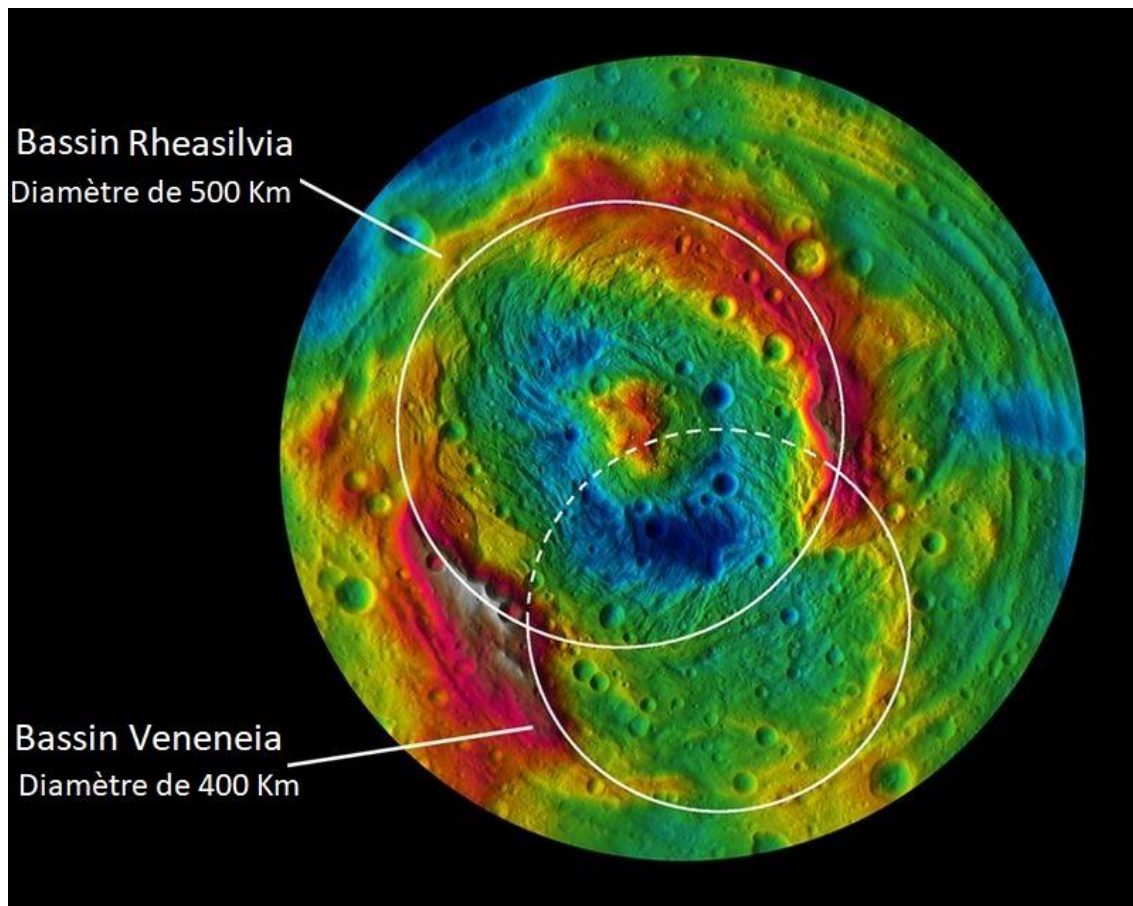


Figure. I.8. Image de l'astéroïde 4Vesta prise par la sonde Dawn, montrant les deux grands cratères dans son pôle sud. (in Kared, 2019).

Chapitre II

**- Etude pétrographique des
Mésosidérites -**

Chapitre II : Etude pétrographique des Mésosidérites

II. 1. Introduction

Les mésosidérites sont des météorites qui font partie de la famille des achondrites et qui sont très probablement originaires de la ceinture principale d'astéroïdes. Ce sont des météorites très rares qui ont été formées il y a 4.56 Milliard d'année, lors de son détachement du corps parent. Elles ont une texture distinguée (généralement grenue et granulaire très fine), qui se forme lors du refroidissement des minéraux, les minéraux se refroidissent et se solidifient rapidement après la fusion partielle. Elles ont une composition chimique et minéralogique diversifiée, composée principalement de pyroxène riches en fer et en magnésium, de plagioclases, d'olivine, de métaux en quantités variables.

L'étude pétrographique de mésosidérites permet de déterminer la nature des minéraux et des inclusions présentes ainsi que les processus géologiques qui ont formés ce type de météorites. Grâce à cette étude, il est possible d'obtenir des informations sur l'origine de mésosidérites, ce qui va donc contribuer à mieux comprendre la formation et les évènements géologiques des corps parents de mésosidérites.

II. 2. La mésosidérite

II. 2.1. Description macroscopique

L'étude macroscopique de cet échantillon de mésosidérite montre qu'elle est sans croute de fusion. Elle mesure 4 cm de longueur par 3 cm de largeur. La surface polie révèle une texture bréchique de couleurs variées (gris clair à foncé et blanche), formé essentiellement par des clastes silicatés et de fer-métal.

II. 2.2. Description microscopique

L'étude microscopique de cette météorite nous montre la présence des fragments lithiques et une association fer-métal silicate formant une texture bréchique qui contient les minéraux suivants : le pyroxène (en gris moins foncé), le plagioclase (en gris plus foncé), le fer-métal (en blanc), olivine (en gris claire) et de phosphate (en gris plus claire que l'olivine). Les pourcentages des différentes phases minérales de cette météorite ont été estimé à partir des abaques de pourcentages.

❖ Le pyroxène :

Le pyroxène est le minéral le plus abondant dans cette météorite (environ 40 % du volume total de la roche). Il représente la matrice de cette mésosidérite dans laquelle on a

Chapitre II : Etude pétrographique des Mésosidérites

observé les différentes phases minérales. On le trouve sous forme de phénocristaux qui peuvent atteindre 800 μm . On peut aussi observer des cristaux zonés marqués par la couleur foncée au cœur et moins foncé aux bordures dans les mêmes grains. Il est à noter que certains grains contiennent des inclusions de fer-métal. On remarque que certains cristaux montrent des fractures comme le montre la (Fig. II.01).

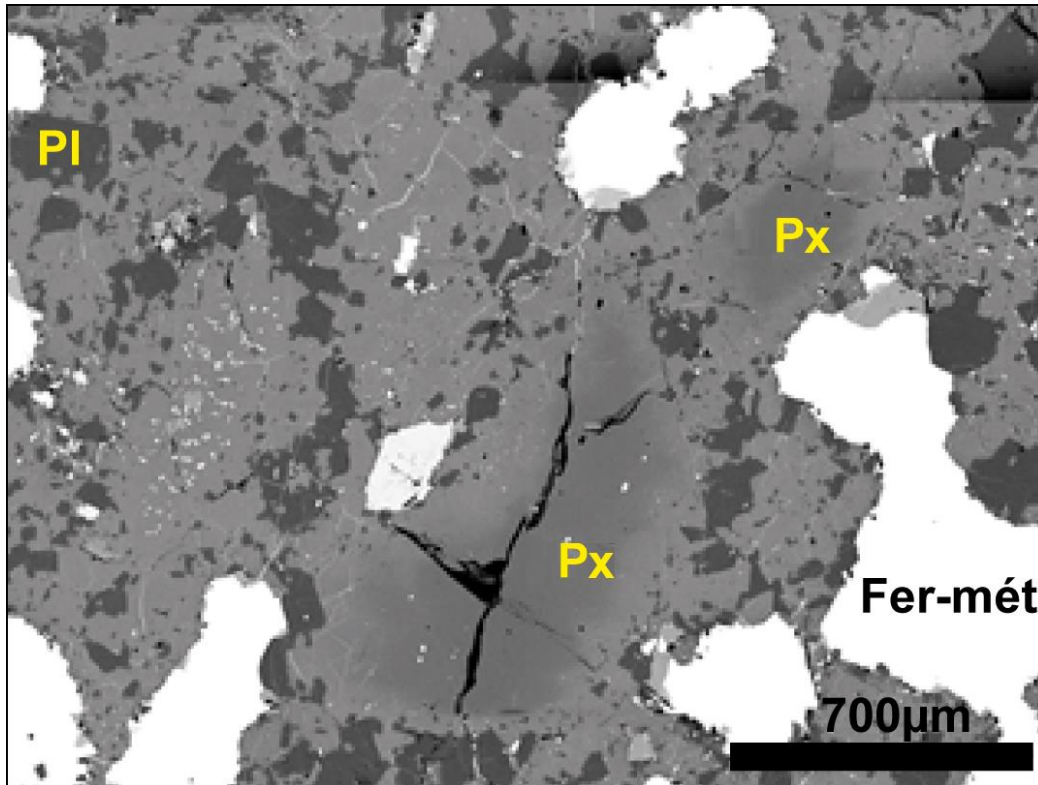


Figure II. 01 : Vue microscopique (en lumière réfléchie) des pyroxènes zonés dans la mésosidérite de cette étude.

❖ Le plagioclase :

Le plagioclase est moins abondant que le pyroxène et forme (environ 28 % du volume total de la roche). Il se présente souvent sous forme de cristaux sub-automorphes qui peuvent atteindre jusqu'à 1.5 mm pour la dimension la plus longue. Cependant, on observe qu'il y a aussi de petits cristaux de plagioclase qui ont des tailles variables (entre 50 μm et 500 μm) et de formes irrégulières avec des bords anguleux (Fig. II.02). Il se présente de couleurs gris foncé. Par ailleurs il y a certains grains qui ont une taille inférieure à 50 μm qui sont en inclusion dans les pyroxènes. De plus, les plagioclases renferment de nombreuses inclusions de pyroxènes et parfois de fer-métal. Il est important de noter qu'il n'y a aucune zonation observée dans les plagioclases. Les macles polysynthétiques ne sont pas visibles dans ces

Chapitre II : Etude pétrographique des Mésosidérites

plagioclases car cette météorite a été observé en lumière réfléchié et pas en lumière polarisée analysée.

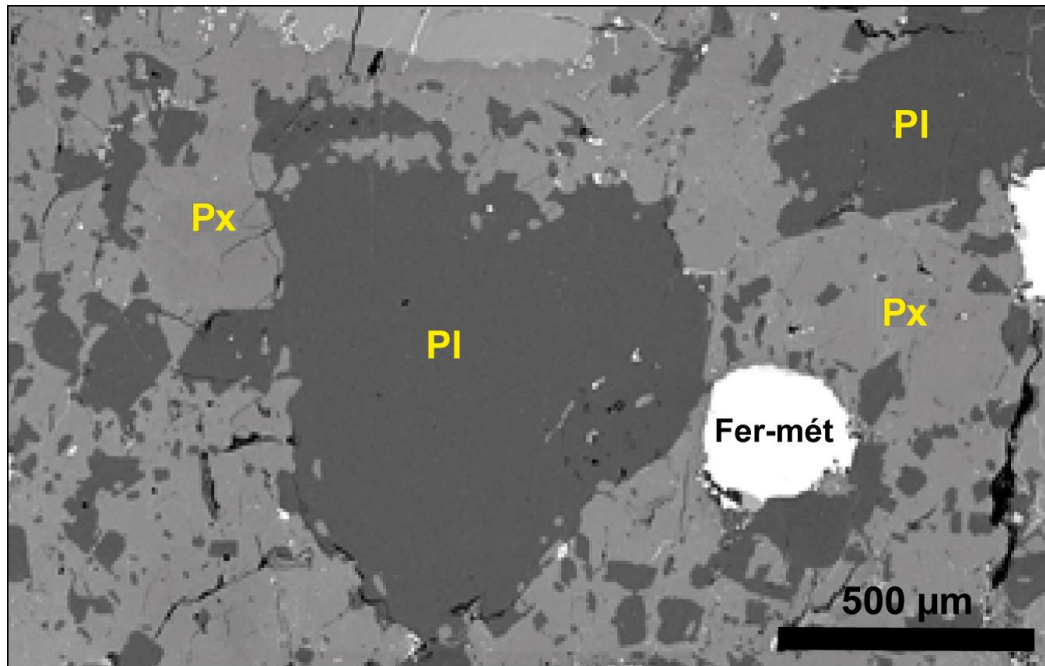


Figure II.02 : Vue microscopique (en lumière réfléchié) des plagioclases présent dans la mésosidérite de cette étude.

❖ Le fer- Métal et les sulfures :

Sa proportion est moins importante que celle de pyroxène et de plagioclase. Il forme environ 20 % du volume total de la roche. Il se présente sous forme de gros grains avec des cristaux corrodés plus ou moins lobés. Leurs tailles varient (de quelques micromètres jusqu'à 3.5 mm de diamètre pour la dimension la plus longue). Il se présente le plus souvent des contacts avec des phosphates avec ses bordures. Il contient aussi des inclusions de plagioclase (**Fig. II. 03**), chromites et sulfures. Cependant, les sulfures sont observés comme phase accessoire. Il se présente sous forme de petits grains (environ 50 μm). On les observe souvent en inclusions dans les pyroxènes et les plagioclases.

Chapitre II : Etude pétrographique des Mésosidérites

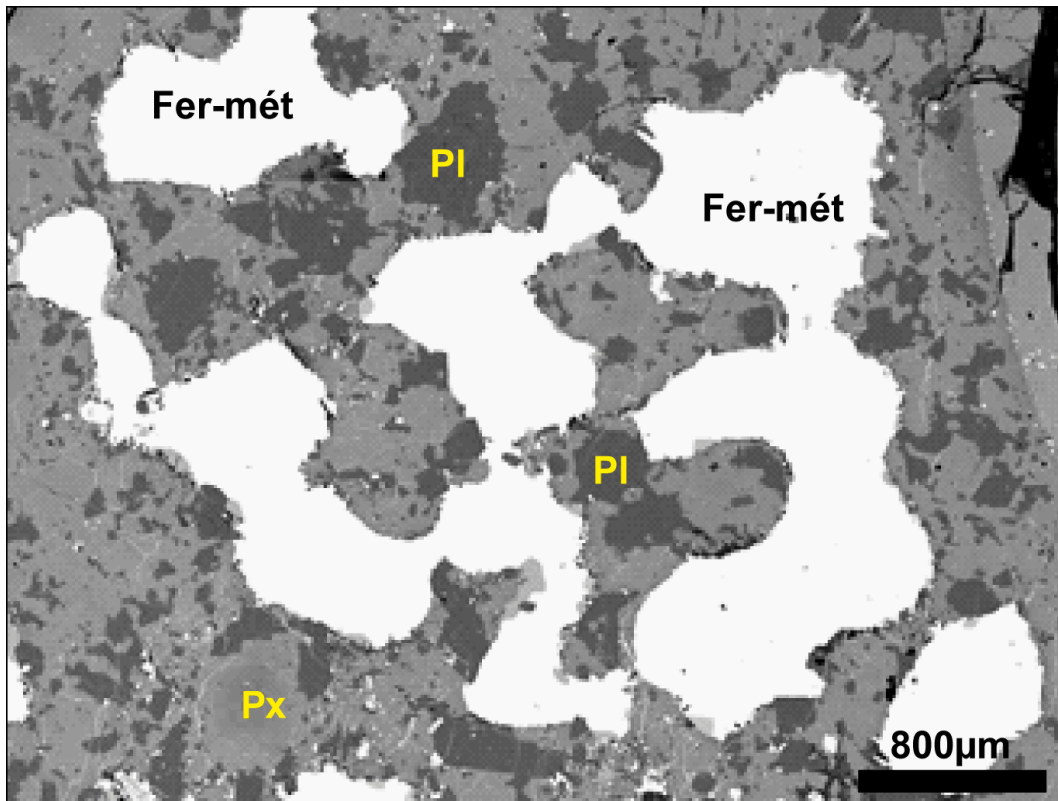


Figure. II.03 : Vue microscopique (en lumière réfléchie) des Fer-Métal présentent dans la mésosidérite de cette étude.

❖ L'olivine :

L'olivine est peu abondante (elle forme environ 11% du volume total de la roche), elle se présente sous forme de phénocristaux xénomorphes plus ou moins arrondis. Avec des grains de tailles variables, les gros grains peuvent atteindre jusqu'à 4 mm pour la dimension la plus longue. En revanche, les petits grains mesurent entre 10-500 μm de diamètre. Certaines sections sont en voie de déstabilisation en pyroxène et chromite, traduisant la couronne réactionnelle observée dans l'association olivine-chromite (**voir Fig. II.04**). Quelques sections d'olivine sont fissurées et sont remplies par le fer-métal

Chapitre II : Etude pétrographique des Mésosidérîtes

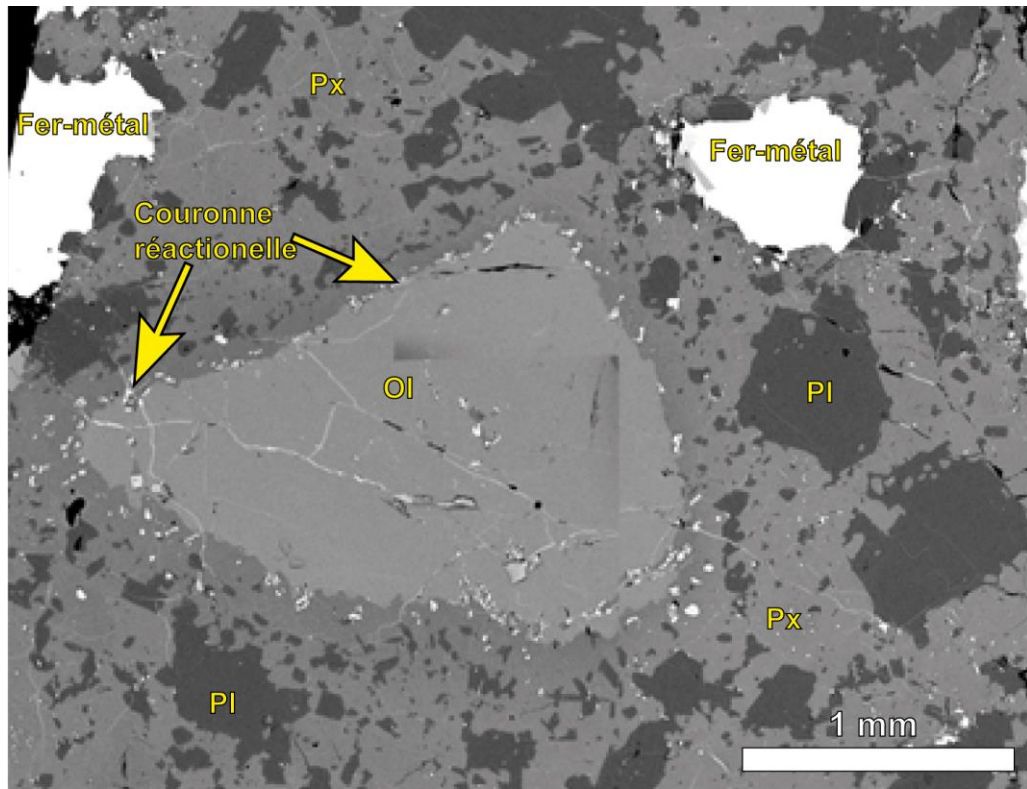


Figure II.04 : Vue microscopique (en lumière réfléchi) des olivines présentent dans la mésosidérîte de cette étude.

❖ Phosphate :

Les phosphates présentes dans cette mésosidérîte comme phase accessoire. Ils forment uniquement 1 % du volume total de la roche. Ils se présentent sous forme de petits grains xénomorphes associés aux bordures de fer-métal (**Fig.II.05**). Ces grains ont des tailles de l'ordre de centaine de micromètre. Ils sont souvent associés avec des petits grains noirs de silice.

Chapitre II : Etude pétrographique des Mésosidérites

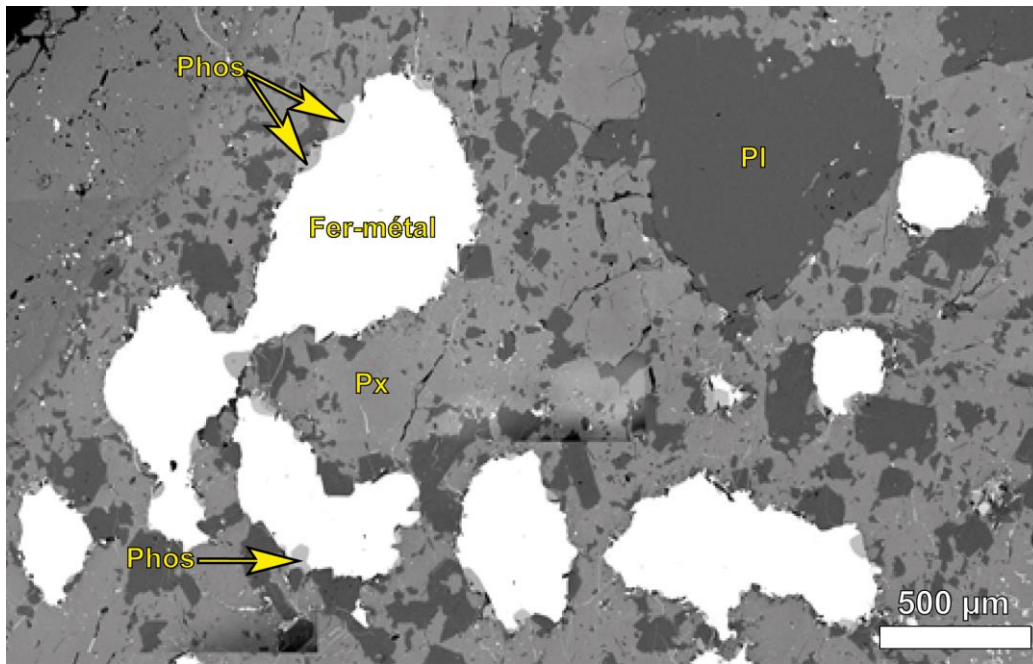
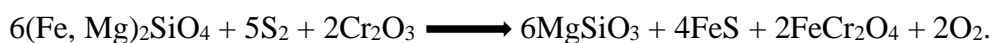


Figure II.05 : Vue microscopique (en lumière réfléchie) des phosphates présentés dans la mésosidérite de cette étude.

❖ Le spinelle chromifère :

Le spinelle chromifère (chromite) constitue une des phases minérales accessoires. Il est souvent observé sous forme de petits cristaux xénomorphes (de quelques micromètres jusqu'à 200 µm pour la dimension la plus longue) aux bordures de l'olivine (**Figure II.05**). Ces grains peuvent être le résultat de transformation de l'olivine en orthopyroxène et chromites par les réactions péritectiques selon l'équation suivante :



Olivine

Orthopyroxène + Sulfures + Chromite.

Il est à noter qu'on a observé la présence de petits grains de quartz interstitiels entre les différentes phases silicatées et/ou associées avec les grains de plagioclases et de métal.

Chapitre II : Etude pétrographique des Mésosidérites

II.3. Classification de mésosidérites :

Le système de classification de mésosidérites a été créé au début par **Powell** en **1971** et révisé plus tard par (**Floran, 1978**) et (**Hewins, 1984**).

Les mésosidérites sont regroupées en deux groupes textural et minéralogique. La classification texturale des mésosidérites est relativement simple. Et la classification minéralogique est encore plus simple. Selon (**Zachén, 2020**), le schéma de classification original comportait trois groupes basés sur le degré de métamorphisme. (**Floran, 1978**) a ajouté des sous-groupes minéralogiques et un quatrième groupe textural pour les mésosidérites qui présentent une matrice à texture ignée.

Les mésosidérites sont donc classées en quatre sous-groupes texturaux, 1-4, et trois sous-groupes minéralogiques A-C (**Tableau II.1**), ce qui donne 12 combinaisons possibles. Plus le nombre de sous-groupes texturaux est élevé, plus la cataclase diminue. Sont caractérisés par une diminution de la cataclase, une augmentation de la taille des grains, une recristallisation, une inversion de l'orthopyroxène en pigeonite et un remplacement plus important de l'olivine.

Les sous-groupes 1 à 3 sont classés comme groupes métamorphiques, tandis que le sous-groupe 4 est igné. Les sous-groupes minéralogiques sont regroupés en fonction de la teneur modale en plagioclase/orthopyroxène, où la teneur en plagioclase diminue, et la teneur en orthopyroxène, de A à C. La subdivision texturale des mésosidérites donne potentiellement des informations sur la profondeur d'enfouissement et/ou l'ampleur du métamorphisme thermique subi. La subdivision minéralogique fournit des indices sur les matériaux qui ont été mélangés (**Zachén, 2020**).

Par conséquent, on peut classer la mésosidérite de cette étude comme une mésosidérite de type B3.

Chapitre II : Etude pétrographique des Mésosidérites

Tableau II.1. Critères de classification texturale des mésosidérites (Hewins, 1984). Modifié de (Mittlefehldt et al., 1998).

Métamorphique			Igné
Sous-Groupe 1	Sous-Groupe 2	Sous-Groupe 3	Sous-Groupe 4
Silicates à grains fins abondants ; plupart < 10µm	La plupart des grains > 10 µm	La plupart des grains > 100 µm	
Texture cataclastique prononcée ; angularité en petits et grands fragments	Angularité limitée aux gros fragments, texture cataclastique en lames minces	Pas d'angularité cataclastique ; bréchification uniquement reconnaissable macroscopiquement	Pas de texture cataclastique
Pas d'intercroissance de silicate entre les fragments	Une intercroissance visible entre les petits grains de matrice et les gros fragments	Silicates imbriqués de toutes tailles	Texture sub-ophitique / poïkilitique
Peu ou pas d'inversion de la pigeonite en opx	Pigeonite mineure montrant une inversion partielle de l'opx	Plusieurs preuves d'inversion en Opx dans la pigeonite	
Remplacement partiel de l'olivine		Remplacement extensif ou complet de l'olivine	Marges encadrées dans l'olivine

Tableau II.2. Critères de classification minéralogique des mésosidérites (Hutchison, 2004).

	Sous-Groupe A	Sous-Groupe B	Sous-Groupe C
Plagioclase (vol.%)	> 25	5 - 25	< 5
Orthopyroxène (vol.%)	< 65	65 - 85	> 85

La classification est importante pour donner un aperçu rapide de l'histoire et de l'environnement des mésosidérites.

Chapitre II : Etude pétrographique des Mésosidérites

II.4. L'origine et formation des mésosidérites :

Il existe plusieurs hypothèses concernant la formation des mésosidérites, mais aucune d'entre elles ne peut être considérée comme définitive. Dans cette étude on va citer quelques-unes des hypothèses les plus couramment discutées dans les études précédentes :

La première hypothèse est basée sur une collision et fragmentation entre deux corps parents (**RUBIN, 1997**) : Selon cette hypothèse, les mésosidérites se formeraient à la suite de collisions entre astéroïdes ou de l'impact d'une météorite plus grande sur un astéroïde différencié. Ces événements provoqueraient la fragmentation de l'astéroïde, éjectant ainsi des fragments de roche dans l'espace. Ces fragments se refroidiraient rapidement et se solidifieraient pour former les mésosidérites telles que nous les observons aujourd'hui.

La deuxième hypothèse propose qu'il s'agit de désintégration thermique (**Monteux, 2009**) : Cette hypothèse suggère que les mésosidérites pourraient se former à la suite d'une désintégration thermique d'astéroïdes métalliques plus grands. Selon cette théorie, la chaleur générée par la désintégration radioactive de certains isotopes présents dans l'astéroïde pourrait provoquer la fusion partielle du matériau, entraînant la séparation des phases métalliques et rocheuses. Les mésosidérites seraient alors formées à partir de ces matériaux différenciés.

La troisième hypothèse suggère qu'elles sont issues de différents processus magmatiques (**Faure, 2019**): cela suggère que les mésosidérites pourraient résulter de processus magmatiques au sein des astéroïdes différenciés. Ces processus pourraient inclure des intrusions de magma provenant du noyau de l'astéroïde dans la croûte, ou encore la fusion partielle de la croûte elle-même. Ces processus magmatiques pourraient entraîner la formation de roches mésosidéritiques avec leur composition et leur structure caractéristiques.

En se basant sur les évidences pétrographiques de notre échantillon de mésosidérite, une nouvelle hypothèse de formation est suggérée. Selon cette hypothèse, la mésosidérite pourrait être le résultat d'une collision entre un corps métallique et un astéroïde différencié, tel que l'astéroïde 4vesta. Lors de cette collision, le corps métallique aurait provoqué une fusion d'impact, formant ainsi un liquide magmatique qui se serait infiltré dans le manteau de l'astéroïde, l'assimilant partiellement. La présence d'olivine dans notre échantillon suggère que la partie silicatée de cette mésosidérite provient du manteau de Vesta, car l'olivine est très rare dans les mésosidérites. De plus, la forte proportion de fer-métal et d'olivine dans notre échantillon indique une composition diogénétique. Cela suggère que les processus géologiques, tels que le métamorphisme et la différenciation ont joué un rôle primordial dans

Chapitre II : Etude pétrographique des Mésosidérites

la formation de cette mésosidérite. Cette hypothèse met en évidence l'importance des collisions et des événements d'impact dans la formation des mésosidérites. Les conséquences de ces événements violents peuvent entraîner des processus de fusion et de mélange des matériaux, ce qui contribue à la diversité des compositions observées dans les mésosidérites.

Il est important de noter que ces hypothèses ne sont pas exclusives, et qu'il est possible que plusieurs mécanismes aient contribué à la formation des mésosidérites. La recherche continue dans ce domaine, y compris l'analyse approfondie des échantillons de météorites, ainsi que les missions d'exploration spatiale, nous aideront à mieux comprendre l'origine et la formation de ce type de roches extraterrestres. L'étude approfondie des échantillons de mésosidérites, ainsi que la comparaison avec d'autres corps parent tels que l'astéroïde Vesta, permettent d'affiner nos connaissances sur l'origine et la formation de ces roches météoritiques uniques.

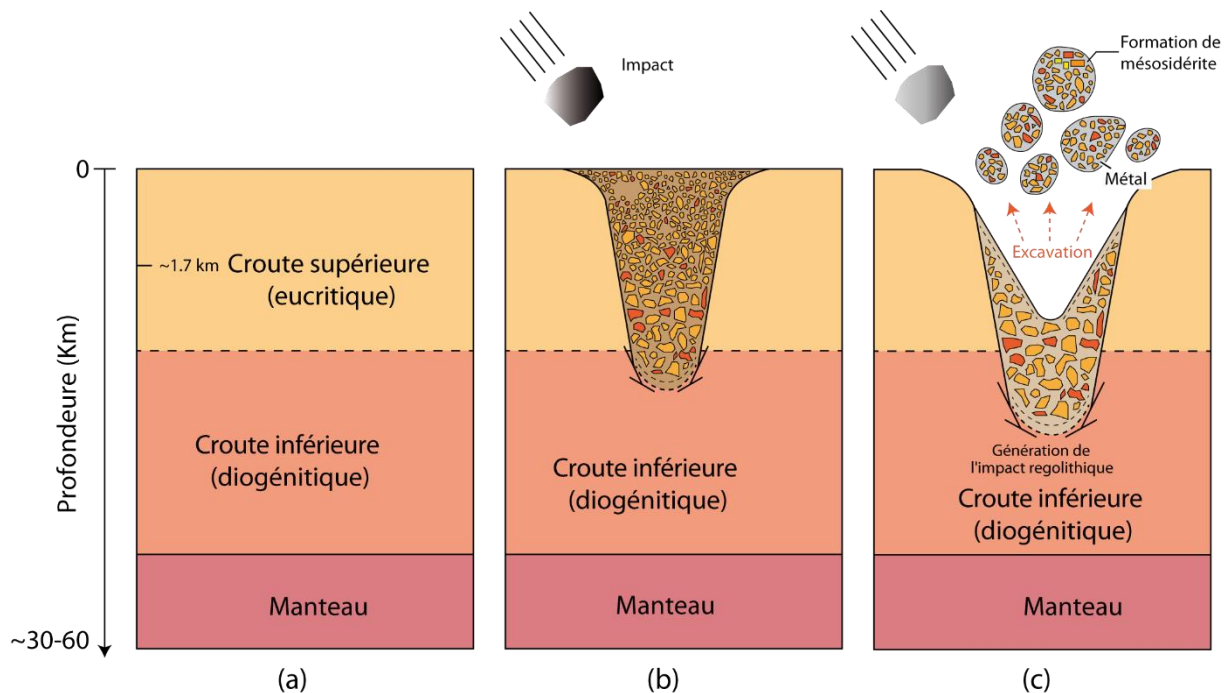


Figure II.06 : Formation de mésosidérite sur 4 Vesta. a) Cristallisation initiale des silicates de la mésosidérite. b) Le premier événement de réchauffement dû à l'impact a provoqué une perturbation à grande échelle de la croûte supérieure et inférieure. c) Le deuxième événement de réchauffement dû à l'impact a provoqué le mélange métal-silicate et la formation de la mésosidérite. On ne sait pas si la collision a perturbé le noyau de l'astéroïde ou non, c'est-à-dire si l'origine du métal provient de 4 Vesta ou de l'impacteur exogène (Wang & Tian, 2023).

Chapitre III
- Les Pallasites -

Chapitre III : Les Pallasites

III. 1. Introduction :

Les pallasites sont des météorites ferro-pierreuses qui sont essentiellement composées de gros cristaux d'olivine intégrés dans une matrice de fer-nickel et de quantités mineures de sulfures. La majorité des pallasites contenant 65% d'olivine, 30 % de métal Fe-Ni et 5 % de chromite, et peu de phosphate et de sulfure (troïlite) (**Buseck, 1977; ULFF-MØLLER et al., 1998**). Ce type de météorite est très rare. Cependant, l'origine de pallasite est controversée et plusieurs hypothèses ont été proposées à propos de son origine. Il a été proposé qu'elle provient de la limite noyau manteau, ou de le manteau moins profond des planétésimaux qui ont subi un impact (**Walte et al., 2020**). Néanmoins les pallasites étant des témoins de l'histoire de la différenciation des corps du système solaire ancien est toujours limitée (**Boesenberg et al., 2012**).

Dans ce chapitre, on va étudier ces météorites, de quoi elles sont composés (leurs composition minéralogique), et on discutera leurs modes de formation, et on va aussi décrire leurs différentes phases minérales suivant des travaux expérimentales (expériences de laboratoire) réalisés par (**Walte et al., 2020**). Il faut aussi noter qu'on va baser sur les travaux de recherches effectués par (**Walte et al., 2020**) et (**Boesenberg et al., 2012**).

III. 2. Les Pallasites :

Dans cette première partie on va décrire les résultats des travaux expérimentales de (**Walte et al., 2020**), plus précisément l'expérience de déformation à vitesse élevée avec le système olivine + fusion FeS ± fusion d'or, pour étudier la formation de pallasite et l'évolution de leurs corps parents, des résultats dont ils ont comparé avec celle d'expériences antérieurs. Ils ont offert à travers ces expérimentations de nouvelles perspectives sur les origines des pallasites, et ils ont aussi reproduit les principales caractéristiques texturales des pallasites, notamment les différentes formes d'olivine, les agrégats d'olivine et la distribution des phases métalliques et sulfurées.

III. 2.1. Méthodes et matériels :

1- Des expériences ont été réalisées à l'aide de la presse multi-enclumes du nouvel instrument à neutrons SAPHiR.

2- L'olivine de San Carlos, après avoir été broyée mécaniquement, a été utilisée pour préparer l'échantillon qui est constitué de ladite olivine mélangée à 20% de poudre synthétique FeS, et a été placée dans des capsules cylindriques en rhénium (Re).

Chapitre III : Les Pallasites

3- Pour simuler l'introduction de fonte supplémentaire lors de la déformation, ils ont mis des échantillons pleins de FeS en poudre, Poudre d'Au, et des morceaux d'Au dans des conditions expérimentales, l'Au et le FeS forment deux phases fondues non miscibles, et la tension de la fonte d'Au en contact avec l'olivine assure la séparation de l'Au et l'agrégat olivine-FeS pendant l'étape de recuit et que la pénétration n'occure que pendant la déformation

4- Les échantillons cylindriques ont été placés dans des cubes de 12 mm sous forme d'assemblages avec un milieu de pression pyrophyllite et des joints externes. Un four à résistance Re-foil a été utilisé pour le chauffage ; la température a été contrôlée par la puissance de chauffe suite à un étalonnage empirique.

5- Après avoir atteint la pression cible de 1 Gpa, le chauffage a commencé, et quand ce dernier a atteint la température cible, les échantillons ont été recuits avant d'effectuer la partie déformation de l'expérience, et après les échantillons ont été déformés soit par cisaillement pur, ou extension suivie de compression (EC), soit par champ de déformation aplati (OS)

6- Les textures de déformation fragiles des pallasites suggèrent un taux de déformation élevé, qui peut se produire lors d'un impact sur un corps parent de la pallasite

7- Les échantillons récupérés ont été coupés à la scie à fil diamanté, et après, enrobés d'époxy, et après on les a sectionnés dans le plan XZ de l'ellipsoïde de déformation (la section contenant les axes de compression et d'extension)

8- Les échantillons dont la déformation aplatie, ont été sectionnés dans le plan xy, contenant aussi les deux axes

9- Pour comparer les résultats expérimentaux avec les textures de pallasite naturelle, une tranche fraîchement préparée de Seymchan (#SEY-18-01) a été étudiée au TUM à l'aide de jumelles Zeiss, d'une microscopie à lumière réfléchie Zeiss et d'une caméra CCD.

III. 2.2. Descriptions des pallasites :

Depuis leur première description par Peter Simon Pallas à la fin du XVIIIe siècle (Walte et al., 2020), les scientifiques ont constaté la composition et la texture inhabituelles des pallasites.

2.2.1 Description macroscopique :

Les textures de pallasite indiquent la distribution spatiale et la forme de l'olivine, du métal Fe-Ni et de la troïlite (Fig. III.01) (Walte et al., 2020).

Chapitre III : Les Pallasites

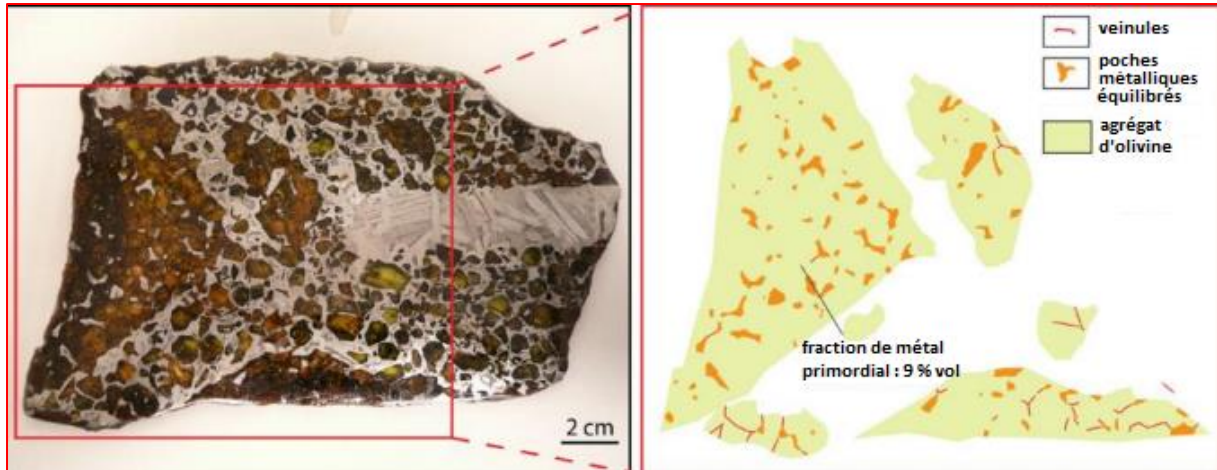


Figure III.01 : Photographie de la tranche Seymchan #SEY-18-01 avec interprétations texturales. (Walte et al., 2020).

L'échantillon montre des zones contenant des olivines angulaires et fragmentaires et des agrégats d'olivine de différentes tailles. Les poches de métal dans les agrégats sont interprétées comme étant antérieures aux zones environnantes de bouillie de métal et d'olivine, donc appelées « primitifs ».

Les olivines sont très variables entre les différentes pallasites (Boesenberg et al., 2012; Buseck, 1977; Scott, 1977; Solferino et al., 2015; Yang et al., 2010). Les pallasites Seymchan contiennent des cristaux polygonaux (appelés olivine angulaire ; Scott, 1977) et des fragments d'olivine plus petits qui sont généralement entourés de métal (Scott, 1977).

La variation texturale suggère donc que les olivines angulaires et fragmentaires sont produites par fracturation inter et intra granulaire des agrégats de ces dernières, respectivement, causées par un événement de déformation également responsable du mélange avec des composants métalliques (Scott, 1977).

En ce qui concerne les textures métal Fe-Ni et troïlite, dans le modèle de (Scott, 1977), le métal agit comme le remplissage passif des fractures intra granulaire créant les différentes formes d'olivine, par rapport à la phase Fe-Ni dominante, la troïlite (FeS) a une importance volumétrique mineure dans les pallasites (environ 0,5 vol% à Esquel (ULFF-MØLLER et al., 1998) et 4–5 vol% à Brenham). Cependant, la texture associée à la troïlite est fréquemment localisée dans des fractures liées à l'histoire de la déformation de pallasite.

Chapitre III : Les Pallasites

Afin de déduire les taux de refroidissement, l'inter croissance des lamelles de kamacite, et de taenite sous forme de motif de Widmanstätten (Yang et al., 2010), a été largement utilisé,

2.2.2 Description microscopique :

A- Expériences de recuit statique et de déformation par cisaillement pur

Une gamme de poches de fusion de différentes tailles caractérise la distribution de fusion FeS, et elles affichent des angles dièdres supérieurs à 60° (Minarik et al., 1996; Walte et al., 2007). Les poches de matière fondue sont en jonctions des grains, et elles sont aussi plus petites que les grains d'olivine, avec une forme équatée, et des limites avec les olivines (Fig. III.02)

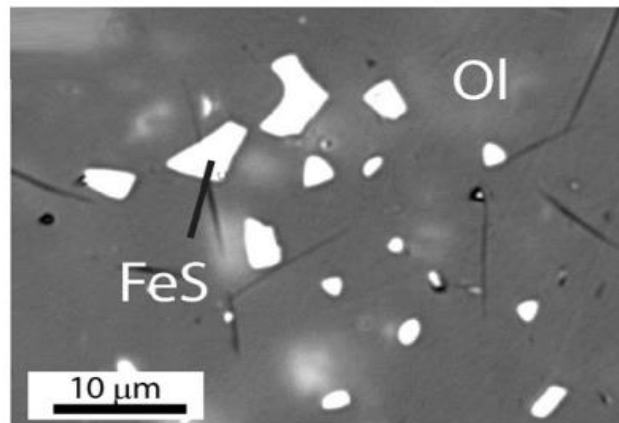


Figure III.02 Micrographies en lumière réfléchie de microstructures après 89,5 h de recuit statique. (Walte et al., 2020).

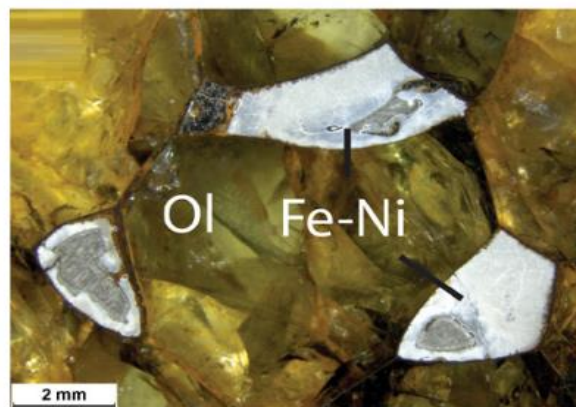


Figure III.03 : Image binoculaire de poches métalliques Fe-Ni équilibrées dans Seymchan # SEY-18-01 indiquant l'équilibre textural. (Walte et al., 2020).

Chapitre III : Les Pallasites

La figure (**Fig. III.03**) montre l'intérieur des agrégats d'olivine de Seymchan, avec des similarités entre leurs textures et ceux des résultats produit par le recuit statique ; les angles dièdres élevés, les limites métallique courbes, et les formes de poches métalliques petites et grandes qui diffèrent. Dans le cas de raccourcissement de 7%, de petites veinules pénètrent les limites des grains d'olivine par fracturation intergranulaire, et dans celui de 11%, elles interconnectent les poches de fusion adjacentes et forment un réseau des cristaux d'olivine isolés (**Fig. III.04**)

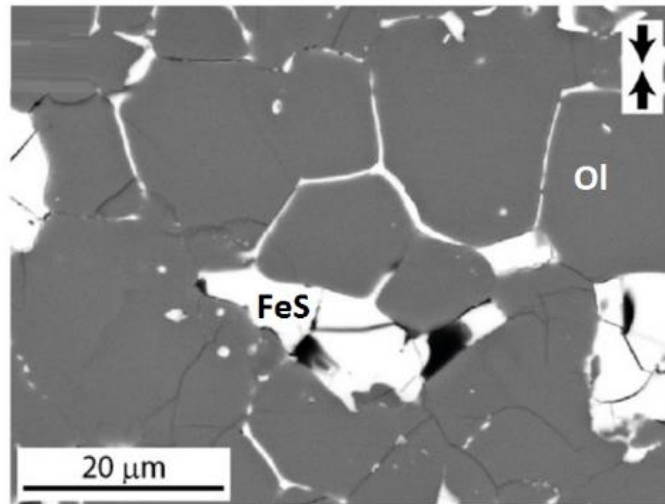


Figure III.04 : Veinules intergranulaires provenant de poches de fusion après un raccourcissement vertical de 7% et 11% (images de rétrodiffusion SEM). (Walte et al., 2020).

La troilite (FeS) et des veinules intergranulaires similaires contenant du métal Fe-Ni se trouvent souvent à l'intérieur des agrégats d'olivine de Seymchan, soit isolés, soit formant un réseau interconnecté entre des poches métalliques (**Fig. III.05**; localement, les agrégats d'olivine sont également recoupés par des failles transgranulaires (**Fig. III.06**).

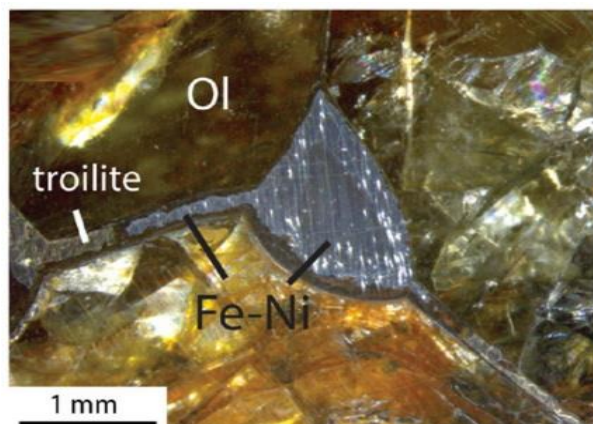


Figure III.05: Veinules interconnectant des poches métalliques équilibrées (micrographies optiques). (Walte et al., 2020).

Chapitre III : Les Pallasites

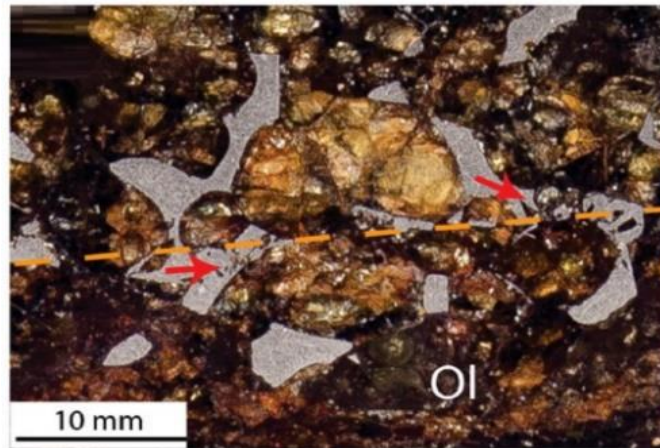


Figure III.06: Une faille (ligne orange pointillée) recoupe un agrégat d'olivine (micrographies optiques). (Walte et al., 2020).

La déformation par cisaillement pur à une déformation plus élevée (raccourcissement de 13 à 24%) provoque une déformation fragile généralisée de la matrice fondue olivine - FeS, qui a créé des fragments d'olivine de différentes tailles par fracturation intra granulaire (Fig.III.07)

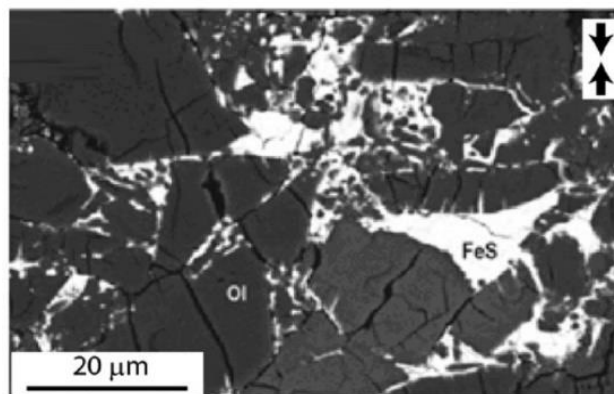


Figure III.07: Microstructure cataclastique omniprésente après un raccourcissement de 20% créant principalement des fragments d'olivine. (Images de rétrodiffusion SEM). (Walte et al., 2020).

La déformation des olivines est présentée par des caractéristiques interne comme la flexion du réseau, et les sous-grains formés, et elle est localiser dans les zones de cisaillement riches en FeS, qui s'anatomisent autour des grandes olivines. Des grains d'olivine arrondis sont dans les zones fortes en déformation, ils sont de la taille d'un micron, et se forment en arrondissant de petits fragments lors de déformation longues. Ils sont absents dans les pallasites (Walte et al., 2011), par contre les structure fragiles dans les pallasites, suggèrent une déformation par impact .

Chapitre III : Les Pallasites

B- Expériences d'extension-compression et de déformation oblate

Certaines expériences de compression par cisaillement pur contenaient une cavité centrale remplie d'Au ou de FeS, la masse fondue est restée largement séparée de l'agrégat olivine-FeS jusqu'au raccourcissement maximal atteint (24 %).

Au cours de l'extension-compression, le réservoir central d'Au s'est partiellement effondré, formant des fractures remplies par la fonte qui ont pénétré et se sont mélangées avec des parties de l'agrégat d'olivine adjacent. Cela a créé localement des bouillies de fonte d'olivine avec des cristaux d'olivine isolés et des agrégats d'olivine cohérents délogés qui ressemblent aux agrégats d'olivine observés dans les pallasites (**Fig. III.08**).

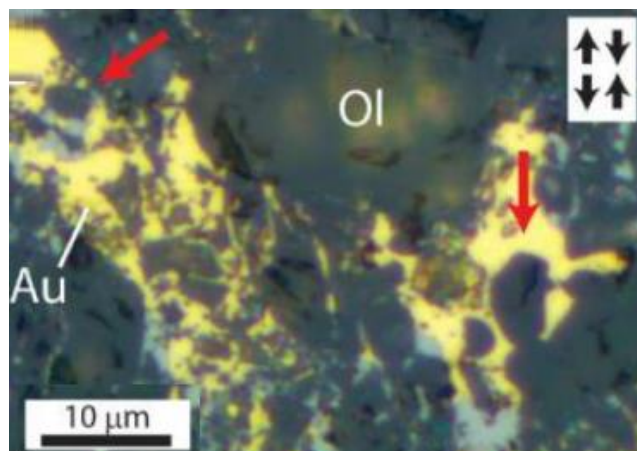


Figure III.08 : Olivine - bouillie métallique dans expériences montrant des olivines rondes adjacentes (flèches rouges) et des fragments d'olivine plus petits. (Micrographies optiques).

(Walte et al., 2020).

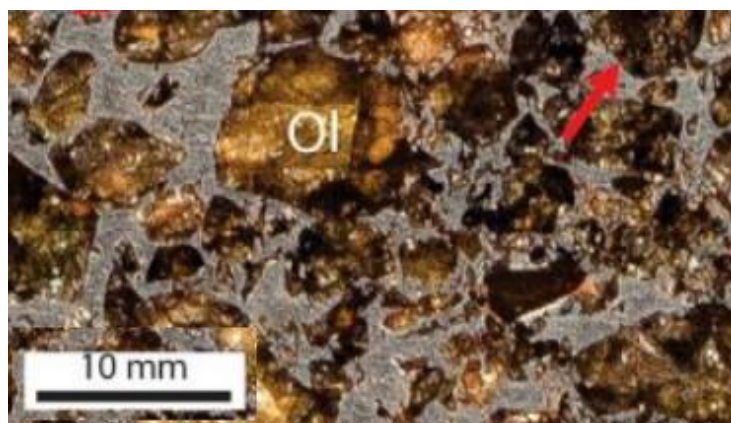


Figure III.09 : Olivine - bouillie métallique dans Seymchan montrant des olivines rondes adjacentes (flèches rouges) et des fragments d'olivine plus petits. (Micrographies optiques).

(Walte et al., 2020).

Chapitre III : Les Pallasites

Les échantillons déformés par la déformation aplatie ont répondu à l'extension par le mélange le plus efficace de la fonte d'au avec la matrice d'olivine.). Cependant, de nombreuses olivines incrustées dans la matrice au présentent une forme angulaire (**Fig. III.10**).

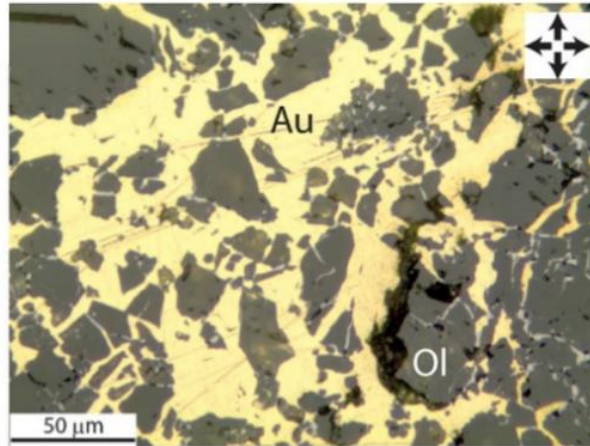


Figure III.10 : La déformation oblate (extension dans le plan image) forme des olivines angulaires par fracturation inter cristalline. (Walte et al., 2020).

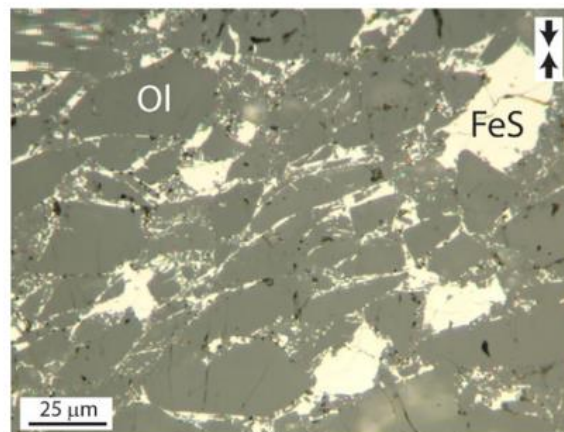


Figure III.11: La déformation par cisaillement pur crée des fragments d'olivine par fracturation principalement intra cristalline. (Walte et al., 2020).

Il est suggéré que la fonte préexistante dans la matrice d'olivine est importante pour faciliter la désintégration de cette dernière dans les cas où la déformation à résulter dans la formation de de grande fractures remplies de fonte qui viens de la cavité centrale.

C- Microstructures FeS – Au comme analogues des textures de troïlite

Les zones déformées dans lesquelles la fonte d'au s'est mélangée à la fonte de FeS ont révélé des microstructures qui ressemblent aux textures de troïlite (**Figure III.12**) et décrites précédemment (**Buseck, 1977**) :

Chapitre III : Les Pallasites

- Des contacts métal-sulfure légèrement incurvés et un emplacement privilégié de la troïlite dans les fractures et les veines, et englobant des groupes de petites olivines.
- Le renflement de la troïlite à partir d'une fracture, formant une forme de goutte à l'entrée, ou entraînant le Fe-Ni environnant dans des fractures étroites (**Figure III. 12 a-b**).

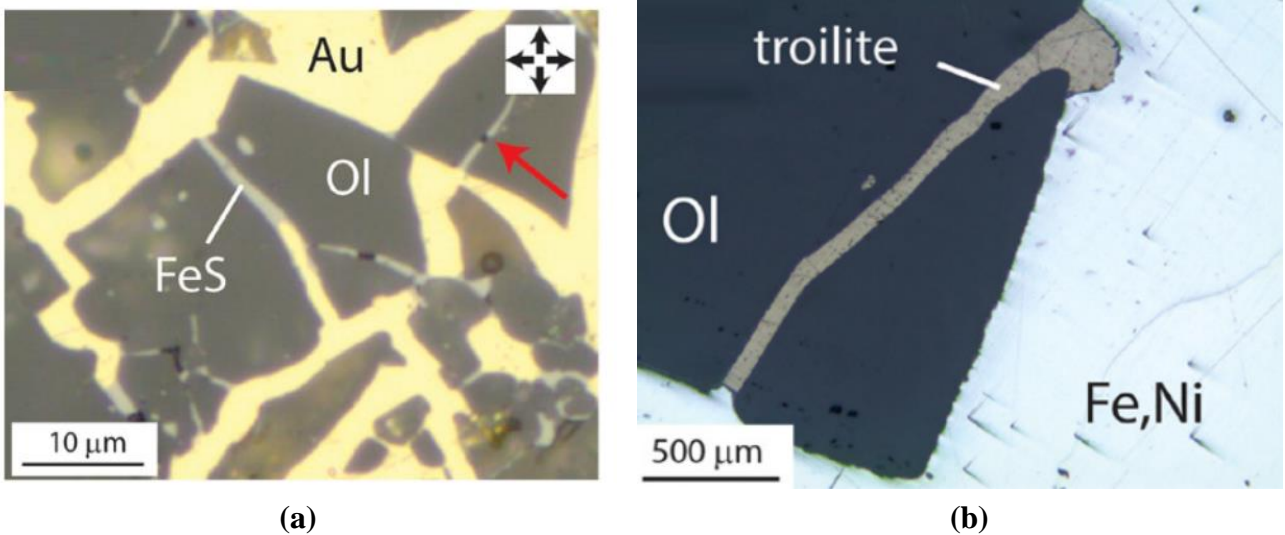
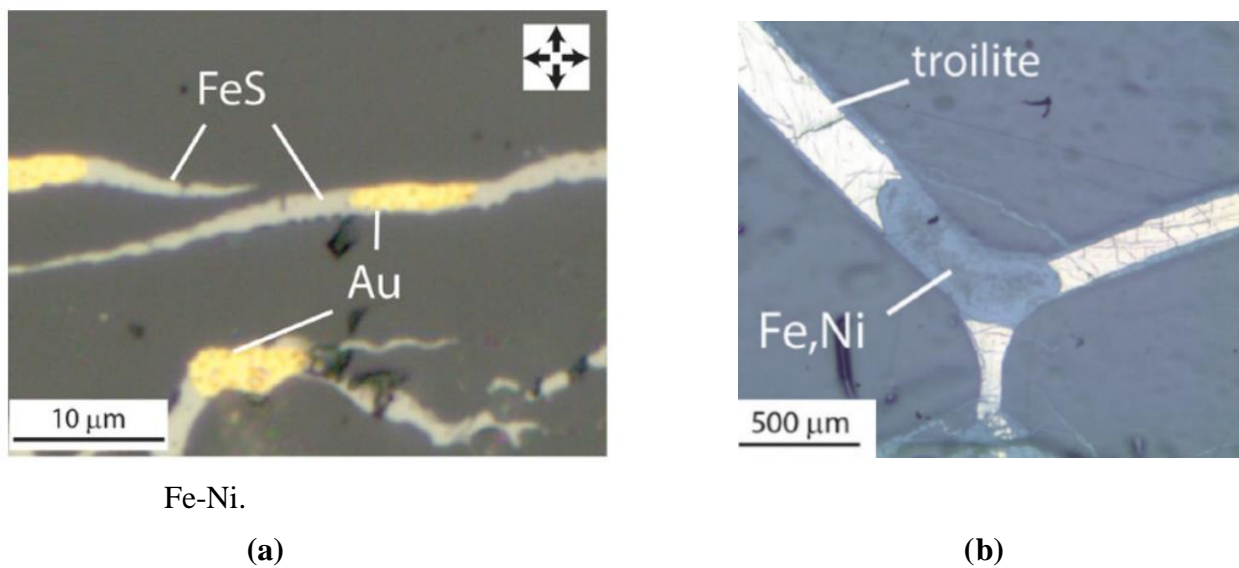


Figure III.12 : Micrographies optiques des microstructures fondues Au – FeS dans des échantillons déformés comparées aux textures Fe-Ni – troïlite dans la pallasite de Seymchan (**Fig.III.12-b**).

- Si les fractures contiennent les deux phases, Fe-Ni occupe la partie la plus large et la limite de phase est convexe vers la troïlite (**Fig. III.13 a- b**), ces textures peuvent s'expliquer par l'énergie de surface plus faible de la troïlite par rapport au



Chapitre III : Les Pallasites

Figure III.13-a : Micrographies optiques des microstructures fondues Au – FeS dans des échantillons déformés comparées aux avec **Figure III.13-b** : textures Fe-Ni – troïlite dans la pallasite de Seymchan (**Walte et al., 2020**).

D- Recuit post-déformation

Deux expériences exploratoires ont été menées pour étudier les processus de recuit :

La première expérience a révélé des joints de grains et des fractures cicatrisées décorées de petites gouttelettes de fusion de FeS et un arrondi d'olivines d'un diamètre inférieur à 10–15 microns (**Fig. III.14**). La microstructure de la deuxième expérience à température plus élevée présente un équilibre textural encore plus grand avec des olivines entièrement arrondies avec des diamètres allant jusqu'à env. 40 microns.

Le pincement des veinules est rare chez Seymchan et n'est observé que dans certaines fractures intra granulaires d'un diamètre inférieur à environ. 10 μm (**Fig. III.14-a**). D'autre part, arrondir est généralement observée dans les petites olivines avec des tailles de grains inférieures à env. 300 μm et se présente à la fois dans des grains entourés de troïlite et de métal Fe Ni (**Fig. III.14-b**).

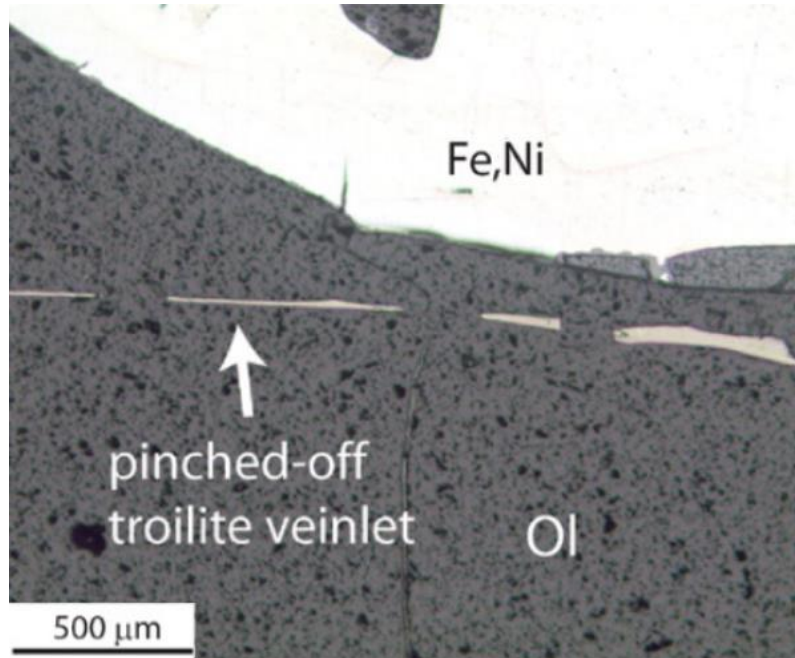


Figure III.14-a : Micrographies optiques de textures Seymchan, certaines fractures intra granulaires étroites ont été pincées. (**Walte et al., 2020**).

Chapitre III : Les Pallasites

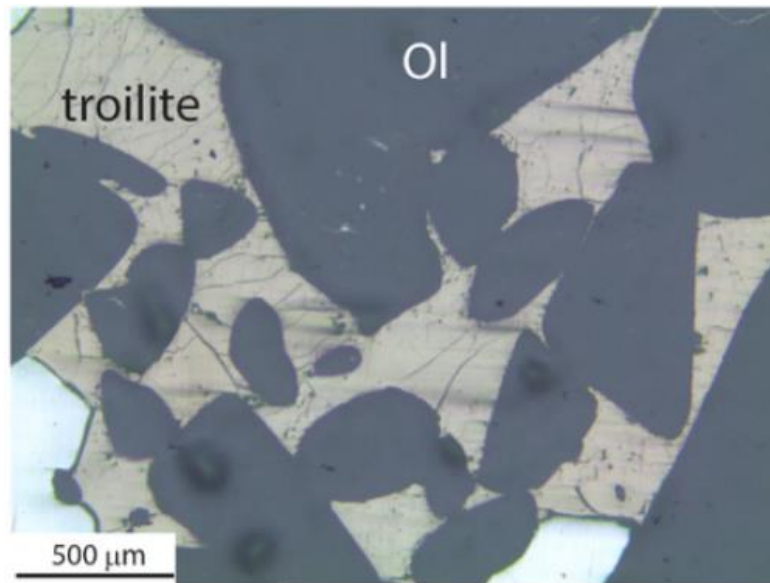


Figure III.14-b : Micrographies optiques de Les plus petits grains d'olivine de Seymchan présentent généralement une forme arrondie. (Walte et al., 2020).

III.2.3. Discussion :

Les mécanismes de formation d'olivine angulaire et fragmentaire par fracturation inter et intra granulaire des agrégats d'olivine suggérés par (Scott, 1977) ont été confirmés par ces expériences. Cela implique un refroidissement géologiquement très rapide des pallasites après leur déformation. Si les températures élevées persistaient pendant de plus longues périodes, l'arrondissement pourrait même être un mécanisme viable pour former les grandes olivines arrondies dans les pallasites de type rond (Scott, 1977; Solferino et al., 2015; Solferino & Golabek, 2018).

La désintégration des agrégats d'olivine et le mélange olivine-métal est le processus de signature préservé dans les pallasites type mixte telles que Seymchan, il est simulé dans ces expériences qui montrent que l'existence de métal en fusion dans les agrégats d'olivine est une source externe supplémentaire de fusion et qui sont des éléments clés de ce processus. Il s'ensuit que les poches métalliques doivent avoir été liquides avant l'inflation globale et l'afflux supplémentaire de métal fondu, ce qui suggère que l'impact n'était pas la source principale de la chaleur.

Les textures de poches métalliques olivine-métal qui sont préservées à l'intérieur des agrégats d'olivine sont caractéristiques des systèmes porteurs de masse fondue à angle dièdre

Chapitre III : Les Pallasites

élevé subissant une recristallisation statique (Walte et al., 2007), et cet angle détermine la forme équante des petites poches de fusion (von Bargaen & Waff, 1986).

Le soufre est très soluble dans la fusion Fe-Ni, il ne rentre pas dans la structure cristalline de la taenite et on pense donc que la troïlite (FeS) s'exsout lors de la cristallisation du liquide Fe Ni-S près de 1000 °C (Goldstein et al., 2009). Ainsi, la troïlite ne serait présente qu'en tant que phase séparée après l'événement de mélange entre le métal et les olivines, ce qui diffère des expériences où FeS et Au sont présents sous forme de liquides non miscibles dès le départ.

III. 3. Formation et corps parent des pallasites :

Les scientifiques ont proposé de nombreuses hypothèses concernant le mode de formation et l'origine des pallasites. Parmi ces hypothèses on cite quelques-unes dans le tableau 04.

Tableau III.01: Concepts et modèles répandus concernant la formation des pallasites. (Boesenberg et al., 2012). (Modifié)

Rayleigh (1942)	Le métal fondu infiltre dans la couche d'olivine. La pression de matériaux préexistant cause un empêchement de séparation de densité entre l'olivine et le liquide métallique.
Urey (1956)	Processus de cristallisation partielle se produit dans le liquide silicate, qui déplace par le métal en fusion a un endroit de gravite réduit.
Ringwood (1961)	Le manteau chondritique de corp parent différencie dégrade en pallasite, en mésosidérites et en fer par une fusion fractionnée.
Urey (1963, 1964)	Les pallasites métalliques sans olivine entraine une zone de contact métal-silicate. Le métal disperse dans la matrice de corp parent.
Scott (1977 a, b, c)	Le métal s'infiltre dans la couche d'olivine provoquant la dispersion des fragments d'olivine à travers le métal est empêchée en raison de la cristallisation de métal, par conséquent la composition et la structure des pallasites métalliques obtenues ressemblent à celles qui seraient obtenues après une cristallisation fractionnée d'environ 80% d'une masse fondue de métal IIIAB.
Mittelfehldt (1980)	La chaleur extérieure fond une partie de la surface du corps parent chondritique. Dans la zone chaude, les dunites se forment tandis que les sources basaltiques se déplacent vers la surface. Lorsque le toit de dunite s'effondre sur des gousses métalliques qui se contractent et se cristallisent, les pallasites se forment.

Chapitre III : Les Pallasites

Takahashi (1983)	Une source chondritique partiellement fondée, la masse de silicate fondée laisse des résidus de sulfure métallique et d'olivine.
Ulf-Møller et al. (1998)	La formation des pallasites est due à l'intrusion de fonte fondue très évoluée (avec un faible Ir, une élevée en Ni, Au et S) dans l'olivine fragmentée.
Scott (2007)	- Les pallasites sont des produits des impacts protoplanètes. Elles sont considérées comme des mélanges cœur-manteau formés sous forme de chaînes de corps différenciés avec différents rapports métal-silicate. Après le réassemblage, la couche de pallasite est placée à faible profondeur.

Toutes ces hypothèses ont été un sujet de débat entre les scientifiques, mais aucune hypothèse n'est prise en considération comme concluant. Dans cette partie on va citer des hypothèses discutées récemment et qui sont les plus fiables et les plus acceptées.

La première est basé sur l'impact entre une protoplanète différenciée avec un manteau riche en olivine et un noyau métallique Fe – Ni solidifié à 80% impacte un corps plus grand sous un angle oblique, le corps différencié se fragmente et créé un nouveau corps pallasitique compose de Fe-Ni fondue, qui possède un faible rapport Ir/Ni ainsi que des fragments de manteau. Le reste de manteau et de noyau ne parviennent pas à se fusionner avec le corps de pallasite, (Yang et al., 2010) (Fig. III.15).

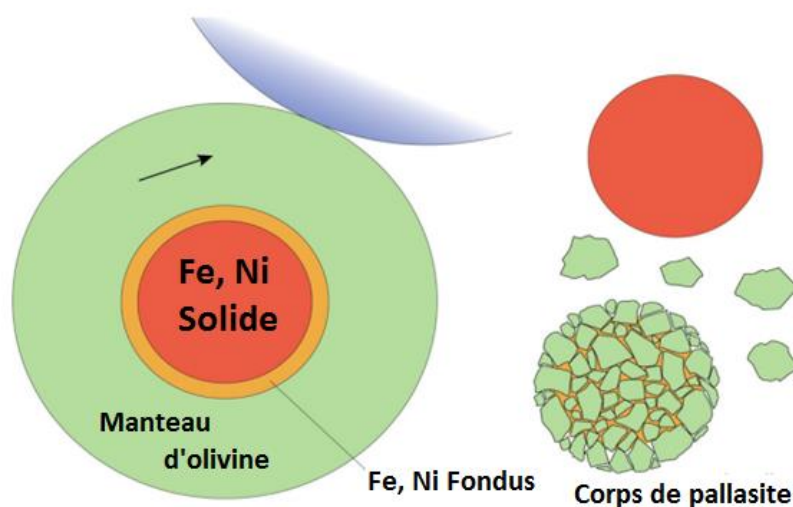


Figure III.15 : Figure montrant la formation des pallasites typiques du groupe principal (Yang et al., 2010).

Chapitre III : Les Pallasites

La deuxième hypothèse de formation de pallasite se concentre sur la Fusion fractionnée du matériau chondritique près de la limite noyau-manteau (**Boesenberg et al., 2012**). Comme alternative au mélange, lors d'une fusion fractionnée extensive, la formation d'un résidu olivine-métal est une étape naturelle et les phases mineures sont principalement produites lors du refroidissement par cristallisation fractionnée. L'astéroïde précurseur chondritique de taille moyenne subit une fusion fractionnée. Les fusions eutectiques FeNi-FeS fusionnent et se déplacent le long des fractures au début de la fusion, finissant par s'accumuler et former un petit noyau riche en sulfure. Des silicates fondus sont créés à mesure que la température augmente, se déplaçant avec flottabilité vers le haut sous la forme d'une série continue de fusions partielles qui éclatent sur la surface ou sous celle-ci (**Boesenberg et al., 2012**).

La troisième hypothèse est basée sur les résultats de les études réalisées par (**Walte et al., 2020**). Ces résultats suggèrent que deux générations de métal sont présentes dans les pallasites du groupe principal, apportant de nouvelles contraintes sur l'évolution des pallasites. La première génération est conservée sous forme de poches métalliques primordiales dans les agrégats d'olivine et caractérisée par un recuit statique pendant une longue période. Et la deuxième génération s'est produite au cours d'un épisode de déformation de courte durée qui a été suivi d'un gel en quelques années.

III. 4. L'évolution du corps parent des pallasites :

La figure ci-dessous (**Fig. III.16**) présente un modèle de différentes étapes de l'évolution du corps parent des pallasites. Ce modèle est cohérent avec les études précédentes. On peut résumer ces étapes comme suit :

a : Formation de masses fondues riches en soufre dans un corps précurseur chondritique et différenciation partielle du noyau par percolation (flèches ondulées).

b : La fusion partielle des silicates commence à environ 1050–1100 °C (Mare et al., 2014). La traversée du silicate solidus piège le métal fondu restant dans la matrice tandis que la fusion partielle des silicates s'accompagne d'une remontée du silicate fondu (flèches ondulées)

c : Les températures élevées facilitent également la statique du grain d'olivine a croissance (**Solferino et al., 2015; Solferino & Golabek, 2018**) et l'équilibrage textural fusion olivine-métal, créant ainsi les caractéristiques conservées dans les agrégats d'olivine.

Chapitre III : Les Pallasites

d : Un corps parent des pallasites est perturbé par l'impact d'un corps différencié (**Tarduno et al., 2012**), qui provoque une déformation intense suivie de près par l'injection du noyau métallique résiduel de l'impacteur dans le manteau partiellement désintégré.

e : Un refroidissement rapide jusqu'à atteindre le solidus Fe-Ni-S préserve les veinules et empêche l'arrondi des grandes olivines. Une fois le processus arrêté, le matériau pallasite reste immobile et un refroidissement conducteur plus lent reprend, éventuellement ralenti par une couche isolante de régolithe post-collision (**Tarduno et al., 2012**) permettant la formation de motifs de Widmanstätten (**Yang et al., 2010**).

Ce modèle présente une synthèse, comprenant à la fois une différenciation, Une étape d'impact, avec deux générations distinctes de métal en fusion. Par contre les hypothèses antérieures qui concentrent soit sur un processus géologique comme fusion fractionnée, soit sur l'impact entre deux corps parent.

Enfin, ces hypothèses ne sont pas définitives, plusieurs facteurs et processus aient joué un rôle dans la genèse des pallasites. Il est possible aussi que ces hypothèses complètent les unes les autres en tant que sont liées. De plus, les recherches se poursuivent encours ainsi que l'exploration spatiale dans ce domaine, qui permettront une meilleure compréhension de l'origine et de la formation de ce type de météorites.

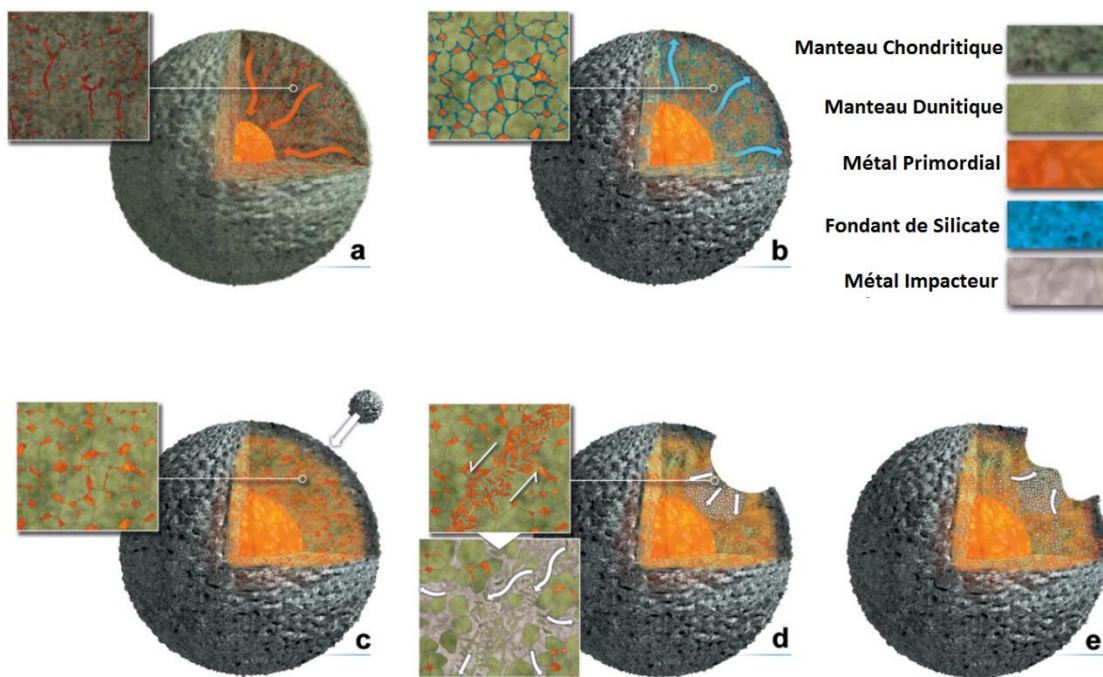


Figure III.16 : L'évolution du corps parent des pallasites (**Walte et al., 2020**).

Conclusion

Conclusion générale

Conclusion générale:

Le travail qu'on a effectué au cours de cette étude nous a permis d'approfondir notre compréhension et nos connaissances sur les météorites mixtes « ferro-pierreuses ». Les mésosidérites et les pallasites sont des météorites différencies qui font partie de météorites mixtes ou ferro-pierreuses. Elles sont composées principalement d'une phase silicatée et d'une phase métallique. L'origine des matériaux de ces deux types de météorites peut être interne "du même corps parent" ou externe "amené par l'impacteur". L'astéroïde 4 Vesta pourrait être l'un des corps parent des mésosidérites et des pallasites.

L'étude pétrographique de mésosidérite nous a révélé qu'elle est constituée de pyroxène, de plagioclase de Fer-métal, de sulfures, d'olivine, de phosphate et de spinelle chromifère, sachant que la phase métallique est plus abondante que l'olivine. Cependant ce fer-métal pourrait venir de l'extérieur du corps parent de cette mésosidérite, c'est-à-dire dans le cas où il y a un impact, l'impacteur peut provenir du noyau d'un astéroïde différencié. Cette mésosidérite pourrait être le résultat d'une collision entre un corps métallique et un astéroïde différencié, tel que l'astéroïde 4vesta.

A l'issus des travaux expérimentaux de **(Walte et al., 2020)**, il a été suggéré que le manteau du corps parent des pallasites est dominé par une composition dunitique avec des quantifiées mineures de pyroxène. Concernant le phénomène responsable de mélanger l'olivine avec le métal, ils ont trouvé que 5-15 % de fer-métal est une origine intérieure, tandis que 20 à 30 % de fer métal fait partie d'un métal extérieur.

Concernant la formation de ces deux types de météorites, plusieurs hypothèses ont été proposées. Une de ces hypothèses suggère que les mésosidérites et les pallasites viennent de la limite entre le noyau métallique et le manteau silicaté d'un corps parent différencié (qui pourrait 4Vesta ou un autre corps parent différencié). En revanche cette hypothèse elle a été écartée. Cependant, les hypothèses retenues et qui sont plus probable et couramment plus acceptée ce sont celles de **(Sugiura et al., 2022)** pour les mésosidérites qui suggère 4vesta comme corp parent, et celle de **(Walte et al., 2020)** qui suggère un origine en deux générations de Fe-métal. Ces deux hypothèses soutiennent l'idée de l'impact, c'est-à-dire les mésosidérites sont issues de deux corps parent ou plus. Les deux météorites, peuvent avoir des origines différentes.

Tenant compte que les pallasites et les mésosidérites sont des météorites très rares et qu'il n'y pas beaucoup d'études qui ont été faite dessus comparé aux autres types de

Conclusion générale

météorites ou des roches terrestres, et pour valider ces hypothèses, la recherche et les études sur les mésosidérites et les pallasites continue toujours, y compris l'analyse approfondie de ces échantillons de météorites, ainsi que les missions d'exploration spatiale. Cela va certainement valider l'hypothèse la plus crédible et ce qui va à mieux comprendre l'origine et la formation de ce type de roches extraterrestres.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

A

Amarni, I. (2013). Analyse statistique des météorites et étude pétrographique, minéralogique et classification de quelques météorites algériennes sahariennes. USTHB, 181.

Asphaus, E. (2000). Astéroïdes et comètes : Des tas de cailloux. pour la science, 273, 42-51.

B

Berthet, S. (2009). Métamorphisme d'une chondrite à enstatite nommée Indarch : Implication sur les phénomènes de différenciation planétaire. Application à la Terre. Université Paris-Est, 207.

Bertholon, J., & Potot, S. (2001). Les astéroïdes : Taille, orbite, composition et formation. <https://www.futura-sciences.com/sciences/dossiers/astronomie-fascinants-asteroides-systeme-solaire-29/page/2/>

Blitz, C. (2009). Modélisation de la propagation des ondes sismiques et des ejecta dans les astéroïdes : Application à l'érosion des cratères de l'astéroïde (433) Eros. Université de Pau et des Pays de l'Adour, 208.

Boesenberg, J. S., Delaney, J. S., & Hewins, R. H. (2012). A petrological and chemical reexamination of Main Group pallasite formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 89, 134-158. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.04.037>.

Bond, M. P. (2014). L'exploration du système solaire (De Boeck Supérieur.), 462.

Buseck, P. R. (1977). Pallasite meteorites—Mineralogy, petrology and geochemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41(6), 711-721, 723-740.

C

Crovisier, J., & Fulchignoni, M. (2021). Le Système solaire 2 : Petits corps, cosmochimie, dynamique, exobiologie. (exobiologie), 67.

F

Références Bibliographiques

- Faure, P. (2019). Comportement des éléments lithophiles lors de la formation du noyau terrestre. Université Clermont Auvergne (2017-2020)), 281.
- Floran, R. J. (1978). Silicate petrography, classification, and origin of the mesosiderites : Review and new observations. 9th Lunar and Planetary Science Conference, 1053-1081.
- Fontaine, A. B. (2014). Etude des équilibres chimiques dans le contexte d'accrétion et de différenciation des planètes telluriques. Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 311.

G

- Goldstein, J. I., Scott, E. R. D., & Chabot, N. L. (2009). Iron meteorites : Crystallization, thermal history, parent bodies, and origin. *Geochemistry*, 69(4), 293-325.

H

- Haba, M. K., Wotzlaw, J.-F., Lai, Y.-J., Yamaguchi, A., & Schönbächler, M. (2019). Mesosiderite formation on asteroid 4 Vesta by a hit-and-run collision. *Nature Geoscience*, 12(7), 510-515. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0377-8>
- Heudier, J. L. (2020). Par Toutatis ! Le ciel va-t-il nous tomber sur la tête? : Météorites et astéroïdes (Vol. 47). (Book e-Book, Vol. 47), 70.
- Hewins, R. H. (1984). The case for a melt matrix in plagioclase-POIK mesosiderites. *Journal of Geophysical Research*, 89(S01), 289. <https://doi.org/10.1029/JB089iS01p0C289>
- Hutchison, R. (2004). Meteorites. A Petrologic, Chemical and Isotopic Synthesis. Cambridge Planetary Science Series, 142(6), 506.

J

- Jaumann, R., Williams, D. A., Buczkowski, D. L., Yingst, R. A., Preusker, F., Hiesinger, H., & Sierk, H. (2012). Vesta's Shape and Morphology. *Science*, 336(6082), 687-690.

Références Bibliographiques

K

- Kared, R. (2019). Etude pétrographique, minéralogique et géochimique des météorites découvertes au Sahara du Sud-Ouest algérien. Université D'Oran2 Mohamed ben Ahmed, 188.
- Keil, K. (1989). Enstatite meteorites and their parent bodies. *Meteoritics*, 24, 195-208.
- Keil, K. (2002). Geological History of Asteroid 4 Vesta : The “Smallest Terrestrial Planet. In *Asteroids III* (y W. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi, R. P. Binzel, p. University of Arizona Press, Tucson, 573-584.).
- Kong, P., Su, W., Li, X., Spettel, B., Palme, H., & Tao, K. (2008). Geochemistry and origin of metal, olivine clasts, and matrix in the Dong Ujimqin Qi mesosiderite. *Meteoritics & Planetary Science*, 43(3), 451-460.
<https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2008.tb00665.x>

L

- Litowski, C. (2013). Modélisation des nuages de dioxyde de carbone (CO₂) sur Mars : Application aux nuages mésosphériques. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI), 205.

M

- Manfroid, J. (2021). L'astronomie dans le monde—04/2021. Société Astronomique de Liège, 83, 226-255.
- Mare, E. R., Tomkins, A. G., & Godel, B. M. (2014). Restriction of parent body heating by metal-troilite melting : Thermal models for the ordinary chondrites. 49(4), 636-651.
- Mayne, R. G. (2008). Investigating the petrogenesis of the basaltic crust of asteroid 4vesta : Acombined petrologic spectral study of the unbrecciated eucrites. The University of Tennessee, Knoxville.

Références Bibliographiques

McSween, H. Y. (1987). Meteorites and their Parent Bodies. (Cambridge University Press), 233.

Minarik, W. G., Ryerson, F. J., & Watson, E. B. (1996). Textural entrapment of core-forming melts. *science*, 272(5261), 530-533.

Mittlefehldt, D. W., McCoy, J. T., Goodrich, C. A., Kracher, A., & Papike, J. J. (1998). Planetary materials (Papike J.J, Vol. 36). Mineralogical Society of America, 1059.

Monteux, J. (2009). Modélisation Numérique de la Formation du Noyau Terrestre : Contribution des Impacts Météoritiques. Université Claude Bernard-Lyon I, 135.

N

Norton, & Richard. (2002). The Cambridge Encyclopedia of Meteorites (Cambridge université press), 306.

R

RUBIN, A. E. (1997). A History of the Mesosiderite Asteroid : Enigmatic meteorites, mixtures of iron and stone, can be understood by unraveling the evolutionary history of their parent asteroid. *American scientist*, 85(1), 26-35.

Russell, C. T., Raymond, C. A., Coradini, A., McSween, H. Y., Zuber, M. T., Nathus, A., & Titus, T. N. (2012). Dawn at Vesta : Testing the Protoplanetary Paradigm. *Science*, 336(6082), 684-686.

Russell, C. T., Raymond, C. A., Jaumann, R., McSween, H. Y., De Sanctis, M. C., Nathus, A., & Joy, S. P. (2013). Dawn completes its mission at 4 Vesta. *Meteoritics & Planetary Science*, 48(11), 2076-2089.

S

Sagan, C. (1980). *Cosmos* (Random House), 211.

Salomon, J. n, & Auly, T. (2010). Impacteurs et astroblèmes : Essai de classification et approche géographique. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 16(1), 3-20.

Références Bibliographiques

- Schenk, P., O'Brien, D. P., Marchi, S., Gaskell, R., Preusker, F., Roatsch, T., & Russell, C. T. (2012). The Geologically Recent Giant Impact Basins at Vesta's South Pole. *Science*, 336(6082), 694-697.
- Scott, E. R. D. (1977). Formation of olivine-metal textures in pallasite meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41(6), 693-710.
- 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). Université D'Oran, 191.
- Solferino, G. F. D., & Golabek, G. J. (2018). Olivine grain growth in partially molten Fe-Ni-S: a proxy for the genesis of pallasite meteorites. *Earth and Planetary Science Letters*, 504, 38-52.
- Solferino, G. F. D., Golabek, G. J., Nimmo, F., & Schmidt, M. W. (2015). Fast grain growth of olivine in liquid Fe-S and the formation of pallasites with rounded olivine grains. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 162, 259-275.
- Sugiura, K., Haba, M. K., & Genda, H. (2022). Giant impact onto a Vesta-like asteroid and formation of mesosiderites through mixing of metallic core and surface crust. *Icarus*, 379, 09. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2022.114949>.

T

- Takeda, H., & Graham, A. L. (1991). Degree of equilibration of eucritic pyroxenes and thermal metamorphism of the earliest planetary crust. *Meteoritics*, 26, 129-134.
- Tarduno, J. A., Cottrell, R. D., Nimmo, F., Hopkins, J., Voronov, j, Erickson, A., & McKinley, R. (2012). Evidence for a dynamo in the main group pallasite parent body. *Science*, 338(6109), 939-942.
- Thomas, P. (2002). La stratigraphie extra-terrestre. *Travaux et Documents des Laboratoires de Géologie de Lyon*, 156(1), 228-229.

Références Bibliographiques

Thomas, P. C., Binzel, R. P., Gaffey, M. J., Stoors, A. D., Wells, E. N., & Zellener, B. H.

(1997). Impact Excavation on Asteroid 4 ; Vesta : Hubble Space Telescope Results. *Science*, 277(5331), 1492-1495.

U

ULFF-MØLLER, F., GAK CHO, B., RUBIN, A. E., TRAN, J., & WASSON, J. T. (1998).

Paucity of sulfide in a large slab of Esquel : New perspectives on pallasite formation. *Meteoritics & Planetary Science*, 33(2), 221-227.

V

von Bargen, N., & Waff, H. S. (1986). Permeabilities, interfacial areas and curvatures of

partially molten systems : Results of numerical computations of equilibrium microstructures. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 91(B9), 9261-9276.

W

Wadhwa, M., Shukolyukov, A., Davis, A. M., Lugmair, G. W., & Mittlefehldt, D. W. (2003).

Differentiation history of the mesosiderite parent body : Constraints from trace elements and manganese-chromium isotope systematics in Vaca Muerta silicate clasts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(24), 5047-5069.

<https://doi.org/10.1016/j.gca.2003.08.005>

Walte, N. P., Becker, J. K., Bons, P. D., Rubie, D. C., & Frost, D. J. (2007). Liquid-

distribution and attainment of textural equilibrium in a partially-molten crystalline system with a high-dihedral-angle liquid phase. *Earth and Planetary Science Letters*, 262, 517-532.

Walte, N. P., Rubie, D. C., Bons, P. D., & Frost, D. J. (2011). Deformation of a crystalline

aggregate with a small percentage of high-dihedral-angle liquid : Implications for core–mantle differentiation during planetary formation. *Earth and Planetary Science Letters*, 305, 124-134.

Références Bibliographiques

Walte, N. P., Solferino, G. F. D., Golabek, G. J., Silva Souza, D., & Bouvier, A. (2020). Two-stage formation of pallasites and the evolution of their parent bodies revealed by deformation experiments. *Earth and Planetary Science Letters*, 546, 116419. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020>.

Wang, Z., & Tian, W. (2023). Petrology and mineralogy of mesosiderite Northwest Africa 12949 : Implications for geological history on its parent body. *Meteoritics & Planetary Science*, 58(3), 341-359. <https://doi.org/10.1111/maps.13957>

Wlotzka, F. (1993). A weathering scale for the ordinary chondrites. *Meteoritics*, 28, 460.

Y

Yang, J., Goldstein, J. I., & Scott, E. R. D. (2010). Main-group pallasites : Thermal history, relationship to IIIAB irons, and origin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(15), 4471-4492. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.04.016>

Z

Zachén, G. (2020). Classification of four mesosiderites and implications for their formation. Lund University, 32.