

ÉTUDE DE QUELQUES ACHONDRITES BASALTIQUES DÉCOUVERTES AU SAHARA DU SUD-OUEST ALGÉRIEN.

Abdelmadjid SEDDIKI*, Jean Yves COTTIN, Bertrand MOINE**, Nacera REMACI-BENAOUDA*,
Jerôme BASCOU**, Christophe RENAC**, Marguerite GODARD***, Violaine SAUTTER****,
Michèle BOUROT-DENISE****, Jean Pierre LORAND**** et Djelloul BELHAÏ*****.**

RÉSUMÉ

Quelques météorites ont été découvertes dans le Sahara du Sud-Ouest algérien, près de la région de Tindouf. Elles sont de plusieurs types, allant des achondrites à des chondrites ordinaires. Nous développons dans cet article l'étude de quelques achondrites HED (Howardite-Eucrite-Diogenite) d'origine présumée de l'astéroïde 4Vesta. Parmi ces HED, ont été décrites : (i) une eucrite polymictique NWA2268 finement bréchique, constituée essentiellement de fragments de roches basaltiques et de minéraux (plagioclase, pyroxène, spinelle, silice et fer métal), (ii) une eucrite monomictique NWA4269 bréchique finement grenue avec des plages millimétriques de métal. La roche présente deux zones distinctes, une grossière, à reliques de texture ophitique formée de plagioclases et de pigeonite démixée et l'autre plus fine à texture granoblastique fine à plagioclases, pigeonite, augite, orthopyroxène, silice (quartz α), fer métal ($Ni\% < 0.1$), troïlite, spinelle et phosphates, (iii) une howardite NWA2251 constituée par une matrice bréchique contenant des fragments de basalte eucritique et des fragments diogénitiques ; ces derniers représentent plus de 30% du volume total de la roche, (iv) une diogénite NWA4255, constituée essentiellement de cristaux centimétriques d'orthopyroxène. C'est une orthopyroxénite, composée en phase mineure par du spinelle chromifère et de la troïlite. Ces quatre types de météorites présentent des affinités minéralogiques et géochimiques, mais aussi des rapports isotopiques d'oxygène similaires. Ces roches nouvelles sont donc interprétées comme appartenant au groupe des HED attribué à l'astéroïde 4VESTA. L'eucrite monomictique NWA4269 fait exception par son rapport isotopique d'oxygène différent de celui du groupe des HED, cette différence peut s'expliquer soit par son appartenance à un corps parent différent de 4Vesta, soit par des compositions hétérogènes au sein même de cet astéroïde.

Mots clés - Sahara - Météorites - Achondrites basaltiques - Eucrite polymictique - Eucrite monomictique - Diogénite - Howardite - 4Vesta - NWA2268 - NWA4269 - NWA2251 - NWA4255.

STUDY OF SOME BASALTIC ACHONDRITES DISCOVERED IN SAHARA OF SOUTH WEST OF ALGERIA

ABSTRACT

Some meteorites were discovered in the Sahara, at southwest of Algeria, close to the region of Tindouf. These are several types from achondrites to ordinary chondrites. We develop in this work a study of some HED achondrites (Howardite-Eucrite-Diogenite) presumably originated from 4Vesta

*Laboratoire de Magmatisme et Synthèse Géodynamique des Bassins Algériens, Université d'Oran Es-senia, BP. 1524, Oran 31000. Algérie. *abdelmadjid_seddiki@yahoo.fr

**Laboratoire de Pétrologie-Géochimie, Université Jean Monnet, 23 Rue Paul Michelon, Saint-Etienne 42023 cedex2. France.

***Université Montpellier II, Place Eugène Bataillon. 34095 Montpellier cedex5. France.

****Laboratoire de Minéralogie, Muséum National d'Histoire Naturelle, 61 Rue Buffon ; Paris 75005. France.

*****Université des Sciences et de Technologie Houari Boumediene, BP. 32 El Alia, Bab Ezzouar. Alger 16111. Algérie.

- Manuscrit déposé le 09 Septembre 2006, accepté après révision le 03 Mars 2007.

asteroïd. Among these HED, were described: (i) a polymict eucrite NWA2268 finely brecciated constituted by clasts of basaltic rocks and minerals (plagioclase, pyroxene, spinel, silica and iron metal); (ii) a monomict eucrite NWA4269 finely brecciated with millimetric metal grains. This meteorite presents two distinct zones, a coarse-grained with relict ophitic texture formed by plagioclase and exolved pigeonite. The second zone is fine-grained with granoblastic texture constituted by plagioclase, pigeonite, augite, orthopyroxene, silica (quartz α), iron metal ($\text{Ni}\% < 0.1$), troïlite, spinel and phosphates; (iii) a howardite NWA2251 constituted by a brecciated matrix containing basaltic clasts and diogenitic clasts; this latter represent more than 30% of the whole rock; (iv) a diogenite NWA4255, constituted predominantly by centimetric crystals of orthopyroxene. This is an orthopyroxenite that contains in minor phase, spinel and troïlite. These four types of meteorites have mineralogical and geochemical affinities, but also similar oxygen isotopic compositions. These meteorites are interpreted as belonging to the HED group attributed to the 4Vesta asteroid. The monomict eucrite NWA4269 does exception by its different oxygen isotopic ratio. This difference can be explained either by an other origin than 4VESTA or by a heterogenous isotopic composition of this asteroid.

Keywords - Sahara - Meteorites - Basaltic achondrites - Polymict eucrite - Monomict eucrite - Diogenite - Howardite - 4Vesta - NWA2268 - NWA4269 - NWA2251 - NWA4255.

INTRODUCTION

Les météorites sont des roches extraterrestres qui traversent l'atmosphère de la terre et tombent à sa surface. L'essentiel des météorites connues sont des fragments d'astéroïdes ou de planétésimaux qui se trouvent dans la ceinture d'astéroïdes entre Mars et Jupiter et qui ont des tailles pour l'essentiel allant du mètre à plusieurs dizaines de km. Ces fragments, qui sont produits lors de collisions entre astéroïdes, sont morcelés et déviés de leur orbite initiale. Certains d'entre eux sont capturés par l'attraction gravitationnelle de la terre et rentrent en collision avec elle, en formant, lors de leur traversée de l'atmosphère terrestre, les météores ou étoiles filantes. Il y a plusieurs milliers de tonnes qui tombent à la surface, la majorité échoue dans les océans. Celles qui tombent sur le continent sont préférentiellement reconnues dans les déserts à regs clairs et dans l'Antarctique. Parmi ces roches extraterrestres, nous notons le groupe de météorites d'origine présumée de l'astéroïde Vesta (Binzel et Xu, 1993; Drake, 2001); ce groupe est constitué de trois types pétrographiques : des basaltes, des cumulates basiques (gabbro-norites) et ultrabasiques à orthopyroxènes (diogénites), le quatrième type est un mélange de ces trois faciès pétrographiques constituant un régolite formé par les impacts successifs à la surface du planétoïde (Warren, 1985). Ces trois types de roches sont aussi

appelés respectivement des eucrites (basaltiques ou cumulatives), des diogénites et des howardites, d'où le nom de groupe «HED». Les eucrites se sont mises en place sous forme de coulées basaltiques de surface ou de dykes intrusifs dans la croûte basaltique de l'astéroïde (Wilson et Keil, 1996). Les impacts successifs sur le corps parent ont produit les howardites et les eucrites polymictes (Warren, 1985; Yamaguchi et al., 1997), 85% des HED sont bréchifiées par impact et leur composition lithologique a été modifiée par un métamorphisme thermique (Metzler et al., 1995). Cela est bien illustré par l'équilibration des compositions des pyroxènes ainsi que la demixion des pigeonites en Opx et Cpx, alors que les textures magmatiques sont partiellement préservées (Takeda et Graham, 1991). Généralement les eucrites sont soumises à une élévation de température supérieure à 800°C (Bogard et Garrison, 2003). D'après Takeda et Graham (1991), la majorité des eucrites monomictes sont de type 5 (séquence métamorphique). La bréchification est formée par impact qui a causé un réchauffement (>800°C) (Palme et al., 1988).

Les compositions isotopiques de l'oxygène de ce groupe « HED » sont homogènes ($\Delta^{17}\text{O} = -0,3 \pm 0,05\text{‰}$) (Clayton et al., 1976; Clayton et Mayeda, 1996) ce qui suggère une origine d'un même corps parent. Par l'intermédiaire du Télescope Spatial Hubble (HST), en utilisant l'analyse spectrométri-

que de la surface de 4Vesta, il a été mis en évidence que les météorites du groupe HED et l'astéroïde présentent également les mêmes caractéristiques spectrométriques (Mc. Cord et *al.*, 1970; Consolmagno et Drake, 1977; Binzel et Xu, 1993; Binzel et *al.*, 1997; Drake, 2001).

CONDITIONS ANALYTIQUES

Les analyses de minéraux ont été faites à la micro-sonde électronique CAMECA (15 kV, 20 nA, diamètre 1mm) à l'UBP de Clermont-Ferrand (France).

L'analyse des éléments majeurs sur roches totales (tableau) a été faite à l'université de Montpellier2 (France), les charges de poudre sont chauffées 5 minutes à 1580° C dans l'air et sur un fil de platine, puis trempées dans l'eau. Les perles obtenues sont trempées dans la résine pour faire des plots. Elles sont ensuite analysées à la microsonde électronique.

L'analyse des éléments en traces sur roches totales (tableau) a été faite à l'université de Montpellier2 (France) par « Quadrupole » VG-PQ2 ICP-MS par la procédure décrite par Ionov et *al.* (1992) et Godard et *al.* (2000).

Les analyses isotopiques d'oxygène ont été réalisées dans le laboratoire de K. Kyser (Queen University, Ontario, Canada). Les valeurs de delta sont représentées en $\delta^{17}\text{O}$ et $\delta^{18}\text{O}$ par rapport au standard Vienna Standard Mean Ocean Water (V-SMOW).

HED (HOWARDITE-EUCRITE-DIOGENITE)

I)- L'Eucrite Polymicte NWA2268

Cette météorite a été trouvée en septembre 2002, dans la région de Tindouf (Sud Ouest algérien). L'échantillon de 65 grammes, est constitué par une seule pièce, entouré totalement par une croûte de fusion lisse, très sombre légèrement craquelée.

Composition minéralogique, chimique et isotopique

La roche gris-clair est finement bréchique (fig. 1A, B) constituée essentiellement de fragments de minéraux, qui peuvent atteindre la

Tableau - Compositions en éléments majeurs (%) et traces ($\mu\text{g/g}$) sur roches totales des Eucrites et Howardites étudiées; de l'eucrite Macibini (Buchanan et *al.*, 2000); des eucrites Nuevo Laredo et Stannern (Mittlefehldt and Lindstrom, 2003).

Whole rocks major (%) and trace (Mg/g) elements of Eucrites et Howadites studied; Macibini eucrites (Buchanan and *al.*, 2000); Nuevo Laredo and Stannern eucrites (Mittlefehldt and Lindstrom, 2003).

	NWA4255	NWA2268	NWA2251	NWA4269	Nuevo-Laredo	Stannern	Macibini
Al ₂ O ₃ %	0,48	10,85	8,65	10,71			
CaO %	0,83	8,63	6,86	10,35	10,2	10,1	9,7
La ($\mu\text{g/g}$)	0,032	2,65	1,819	3,56	3,76	4,74	3,24
Ce	0,078	7,03	4,56	9,67	10,1	12,75	8,89
Pr	0,011	1,02	0,737	1,39			
Nd	0,054	5,34	3,46	7,40	6	8,66	6,07
Sm	0,018	1,64	1,18	2,32	2,46	2,97	1,97
Eu	0,003	0,56	0,381	0,72	0,75	0,75	0,69
Gd	0,024	2,29	1,41	3,29			
Tb	0,004	0,40	0,274	0,59	0,56	0,68	0,45
Dy	0,031	2,85	1,74	4,18			
Ho	0,007	0,60	0,359	0,89			
Er	0,025	1,68	1,23	2,50			
Tm	0,004	0,24	0,138	0,37			
Yb	0,037	1,57	1,02	2,37	2,39	2,59	1,91
Lu	0,008	0,25	0,182	0,39	0,35	0,38	0,29
Sc	11,200	27,50	21,16	34,38	33,7	30,1	29,8

taille de 0,5mm, de plagioclases (An_{85-94}), de pyroxènes ($En_{84-39} Wo_{1-8}$), de spinelles (51% Cr), de silice cristallisée (tridymite), de fer métal (2,5 Ni wt%) et de troïlite. Le métal se présente sous forme spongieuse englobant des fragments de silicates. Il a un rapport Ni/CoH > 20 et est parfois associé à des grains de tetrataénite (>55 Ni wt%). Les pyroxènes présentent des compositions extrêmement variables depuis des orthopyroxènes jusqu'à des ferro-augites en passant par des pigeonites et ferro-pigeonites (fig.2A). Ces pigeonites dérivent d'un composé eucritique, elles se présentent en lamelles d'augite sous forme d'exsolution. On note toutefois la présence d'ortho-pyroxènes magnésiens qui peuvent avoir pour origine un composé diogénitique. Cette diversité de composition des pyroxènes témoigne du caractère polymict de cette eucrite, ils possèdent des hétérogénéités traduisant un processus de formation polygénique.

La roche est également constituée par des fragments ou clastes d'eucrites basaltiques à texture ophitique, de fragments d'eucrites cumulatives et par un faible pourcentage de fragments diogénitiques (orthopyroxènes). Cette eucrite polymict est constituée par plusieurs clastes ou fragments de roches de lithologie et de texture différentes :

Claste 1 : C'est un fragment de composition basaltique de type eucrite à texture ophitique (fig.1C), constitué de plagioclases (An_{91}), de pigeonite ($Wo_{14} En_{33}$) avec des lamelles d'augite exsolvées ($Wo_{40} En_{30}$), de spinelle, d'ilménite et de silice cristallisée (tridymite : déterminée par Microsonde Raman).

Claste 2 : C'est un fragment basaltique (eucritique) à texture ophitique à plagioclases (An_{87}) et pyroxène ferreux et calcique ($Wo_{34} En_{66}$) de type «pyroxferroïte» (fig.1D). Ce pyroxène se déstabilise progressivement en une association d'hedenbergite, fayalite et silice (tridymite). On note aussi la présence de spinelle et d'ilménite.

Claste 3 : C'est un fragment d'eucrite non équilibrée (fig. 1E), qui présente une texture sub-ophitique et est constitué de pigeonite non équilibrée avec une zonation bien visible en image électrons rétro-diffusée montrant un cœur magnésien et une bordure ferrifère. Les plagioclases présentent aussi des compositions différentes du cœur vers la bordure (appauvrissement en calcium). La mésostase interstitielle vitreuse est bien visible et partiellement recristallisée. En phase minéralogique accessoire, le fragment contient aussi de la troïlite en petits grains inclus dans les pyroxènes et plagioclases et essentiellement dans la mésostase.

Fig. 1 A : Texture bréchique avec des fragments de roches (basaltes et gabbros) et de minéraux (plagioclases, pyroxènes, silice et fer métal), dans l'eucrite polymict NWA2268. LPA : 50x (**Brecciated texture with clasts of basalts, gabbros and minerals (plagioclases, pyroxenes, silica and iron metal), in the NWA2268 polymict eucrite. LPA: 50x**)

B : Texture bréchique avec des fragments de roches et de minéraux dans NWA2268. Image en BSE (Back Scattered Electron = Electrons rétrodiffusés) (**Brecciated texture with clasts of rocks and minerals in NWA2268. Back Scattered Electron (BSE) imaging**).

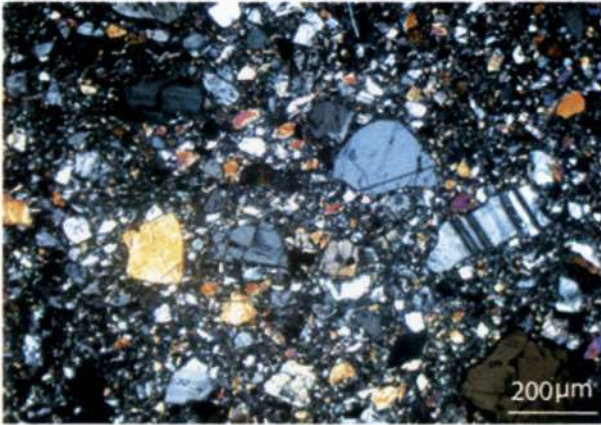
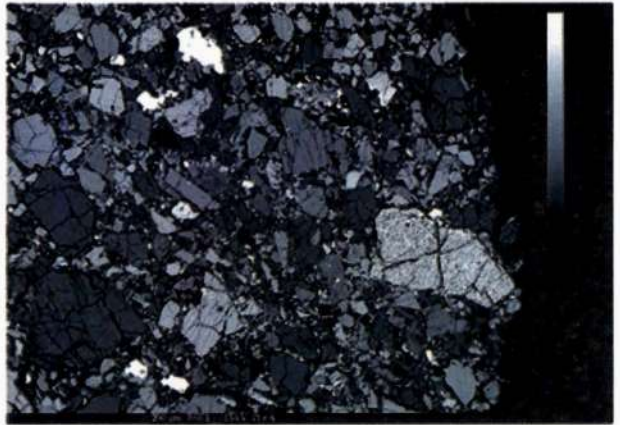
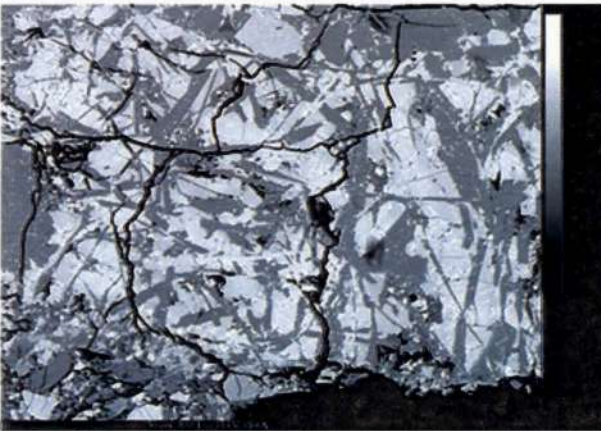
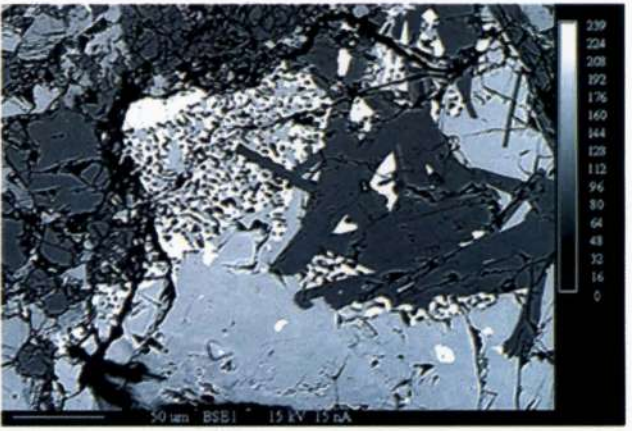
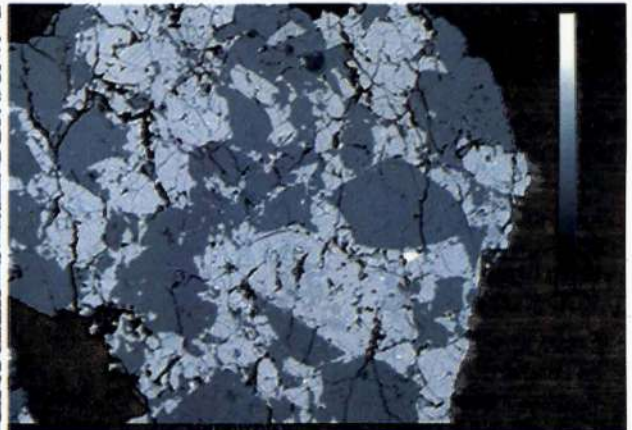
C : Fragment de roche basaltique à texture ophitique constituée de lattes de plagioclases incluses dans le pyroxène. Image en BSE (**Basaltic clast with ophitic texture constituted by plagioclases included in pyroxene. BSE imaging**).

D : Fragment dans NWA2268 de roche basaltique (eucrite) à texture ophitique. Le pyroxène de composition pyroxferroïte est déstabilisé progressivement en une association de Fayalite-Hedenbergite-Silice (tridymite). Image en BSE (**Basaltic clast with ophitic texture in NWA2268. Pyroxene (pyroxferroïte) is progressively destabilized to an association of Fayalite-Hedenbergite-Silica (Tridymite). BSE imaging**).

E : Fragment d'eucrite basaltique non équilibrée, constituée de plagioclases et de pyroxènes zonés et d'une mésostase partiellement dévitrifiée. Image en BSE (**Non equilibrated basaltic clast constituted by plagioclases and zoned pyroxenes and mesostasis partially devitrified. BSE imaging**).

F : Fragment d'eucrite à texture cumulative (micro-gabbro) à plagioclases et pyroxènes. Image en BSE (**Basaltic clast with cumulative texture (micro-gabbro) of plagioclases and pyroxenes. BSE imaging**).

ETUDE DE QUELQUES ACHONDRITES BASALTIQUES DÉCOUVERTES AU SAHARA DU SUD OUEST ALGÉRIEN

A**B****C****D****E****F**

Claste 4 : C'est un fragment finement grenu à texture cumulative (fig. 1F), constitué de plagioclases (An_{94}) et de pigeonite ($Wo_{12}En_{40}$) présentant des lamelles en exsolution d'augite ($Wo_{43}En_{38}$). Des petits cristaux de spinelle, d'ilménite et quelques rares cristaux de silice apparaissent en phases minérales accessoires. Ce claste est un fragment d'une eucrite cumulative.

Les fragments basaltiques de type eucritique forment la majorité des constituants de la roche. Les fragments diogénitiques sont très peu abondants (<10%) et ce sont essentiellement des cristaux d'Opx. La composition chimique globale de la roche apparaît plus calcique et alumineuse et moins magnésienne que pour les howardites connues (Desnoyers et Jerome, 1977; Laul et Gosselin, 1990). Cela s'explique par l'abondance des plagioclases et la pauvreté en composantes diogénitiques (Opx) par rapport aux howardites (fig. 7), ce qui permet de classer cette météorite comme une eucrite polymictite (Delaney et al., 1984; Delaney et al., 1983).

On note aussi la présence de clastes formés d'une association symplectitique d'hedenbergite, de fayalite et de silice (tridymite) (fig. 2B). Sur la base de reconstitutions volumétriques, la composition globale du claste donne un pyroxène de type pyroxferroïte ($En_{10}Wo_{12}$) se situant dans le champ d'instabilité des pyroxènes (Smith, 1972) dans le diagramme (Di-Hd-En-Fs) (fig. 2A). Ce pyroxénoïde a été précédemment décrit dans les basaltes lunaires (Ware N.G. et Lovering J.P.,

1971; Chao et al., 1970; Lindsley et al., 1972), dans les météorites lunaires (Snyder et al., 1999) et les météorites martiennes (Aramovich et al., 2002).

Généralement, le pyroxène le plus tardif s'enrichit en fer et se positionne dans le domaine d'instabilité des pyroxènes (Lindsley, 1983). Les études expérimentales indiquent que la pyroxferroïte est stable seulement au delà d'une pression de 10 Kbar (Lindsley et Burnham, 1970). Ces conditions ne sont pas envisageables pour le cas de l'astéroïde Vesta. En utilisant les conditions barométriques de stabilité des pyroxènes de Smith (1972), nous avons constaté que la composition de la pyroxferroïte recalculée à partir de l'association symplectitique nous indique qu'elle s'est formée dans des conditions de plus de 3 Kbars, alors que les compositions des pyroxferroïtes qui sont partiellement déstabilisées indiquent qu'elles ont cristallisé dans des conditions de sub-surface.

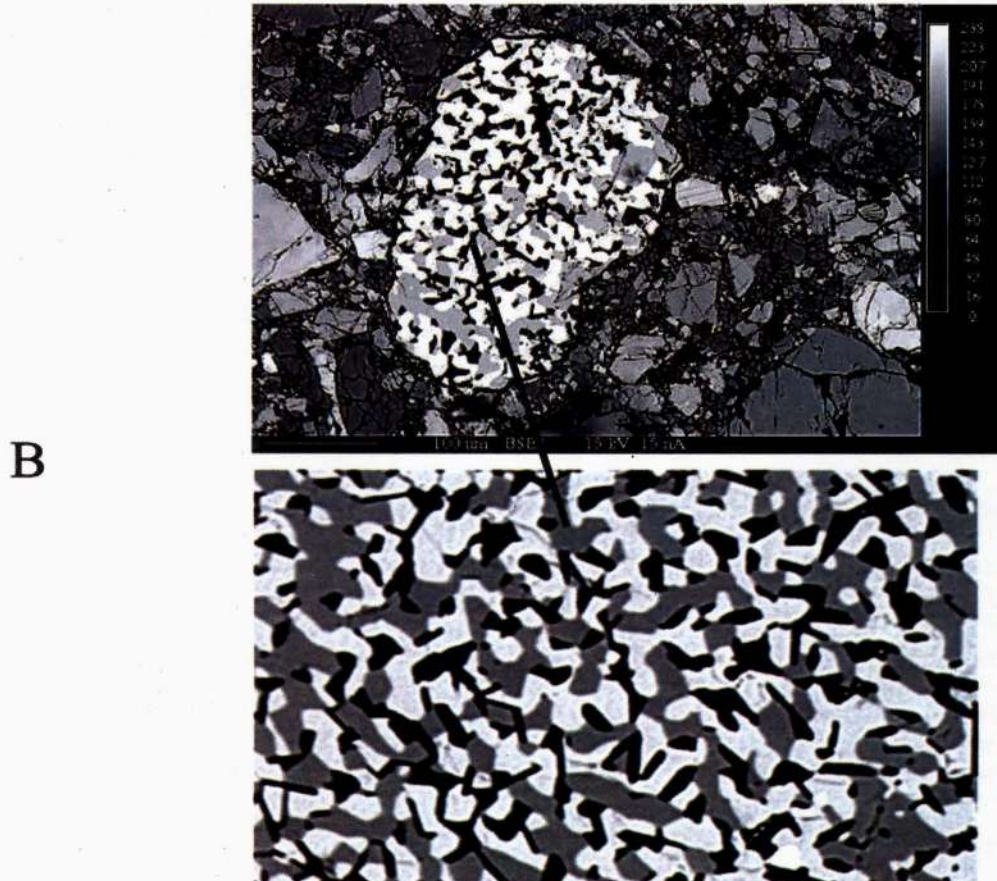
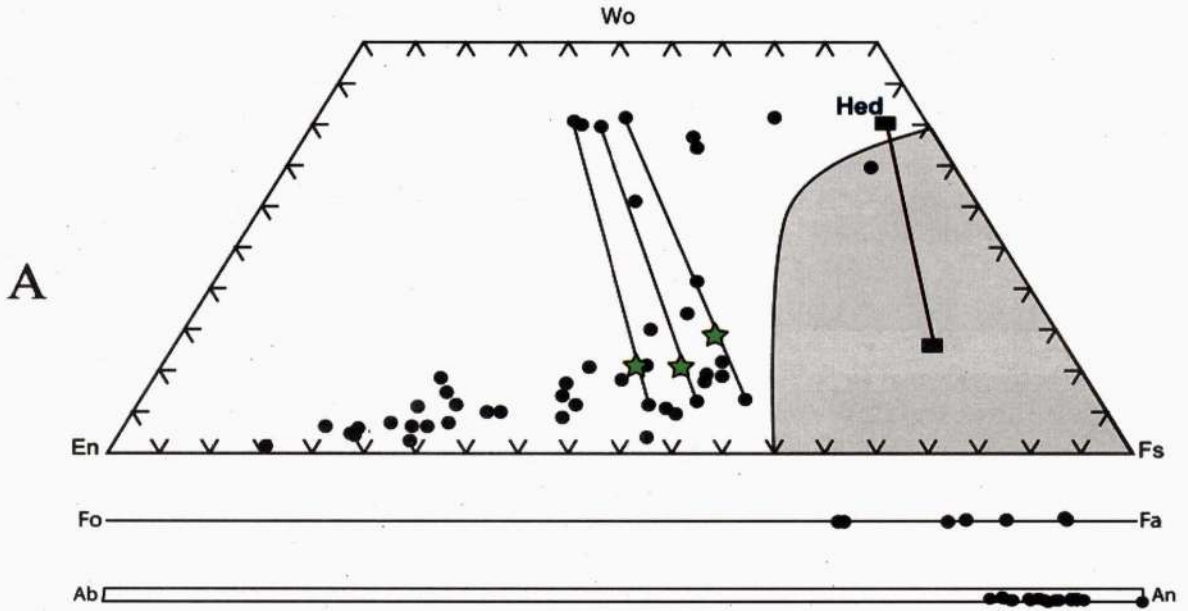
Lindsley et al. (1972) ont confirmé le caractère métastable de ces pyroxferroïtes par des expériences de réchauffement. Ils ont constaté qu'après un réchauffement lent (> 990° pour 3 jours), la pyroxferroïte se déstabilise en un assemblage de 3 phases : hedenbergite, fayalite et silice (tridymite).

Nous avons également observé des veinules d'olivine (Fa_{71}) qui recoupent de grands cristaux de pyroxène ($En_{60}Wo_6$). De tels filonnets ont été décrits dans l'eucrite polymictite Macibini (Buchanan et al., 2000) et dans NWA049 (Beck et

Fig. 2 A : Composition des pyroxènes, olivine et plagioclases de l'eucrite polymictite NWA2268. Cercles noirs : analyses ponctuelles. Etoiles : composition principale recalculée des pigeonites démixées. Carrés noirs : composition recalculée de la pyroxferroïte à partir de la composition modale et les analyses ponctuelles de la Fayalite, Hedenbergite et Silice. Champ gris représente la zone d'instabilité des pyroxènes à 925°C et 01 atm d'après Smith, (1972) (**Composition of pyroxenes, olivine and plagioclases of the NWA2268 polymict eucrite. Black circles: in situ analyses. Stars: calculated composition of undemixed pigeonites. Black square: calculated compositions of pyroxferroïte from the modal composition and in situ analyses of Fayalite, Hedenbergite and Silica. Gray field represents the unstable zone of the Fe-rich pyroxenes at 925°C and 01 atm according to Smith, (1972).**)

B : Fragment de pyroxferroïte (image en BSE.) totalement déstabilisée avec composition modale de l'association symplectitique Fayalite 46% (blanc) – Hedenbergite 26% (gris) – Silice 28% (noir) (**Pyroxferroïte (BSE imaging) totally destabilized with its modal composition of the symplectitic association : Fayalite 46% (white) – Hedenbergite 26% (gray) – Silica 28% (black).**)

ETUDE DE QUELQUES ACHONDrites BASALTIQUES DÉCOUVERTES AU SAHARA DU SUD OUEST ALGÉRIEN



al., 2001). Kozul et Hewins (1989) les ont interprétés comme une déstabilisation du pyroxène en olivine et silice. Takeda et *al.* (1994) ont suggéré qu'une refusion partielle du pyroxène et la formation d'olivine pourraient être le résultat de chocs, cette néo-olivine serait alors injectée dans les fractures. Une troisième hypothèse stipule, que cette olivine serait magmatique (Kozul et Hewins, 1989; Beck et *al.*, 2001). Dans notre cas, l'absence de silice et les bordures réactionnelles entre ces veinules et les pyroxènes (bordures riches en Fe et Ca ($\text{En}_{30}\text{Wo}_{41}$), permettent de favoriser la troisième hypothèse sur l'origine magmatique de cette olivine. C'est un liquide magmatique différencié qui a réagi (réaction solide-liquide) avec le pyroxène en donnant des olivines et des pyroxènes riches en fer et calcium.

La composition en terres rares de la roche totale indique que NWA2268 présente un très léger enrichissement en REE par rapport à la composition chondritique (fig.10A). Elle est proche de l'eucrite polymictite Macibini avec un léger appauvrissement en LREE et HREE (fig.10B).

Le métal (Ni=2.5wt%) présente un rapport Ni/CoH>20, non commun pour les eucrites, qui ont généralement un Ni<0,01-0,1wt% et un Ni/Co<5 (Yamaguchi et *al.*, 2006). Par contre, le métal incorporé dans la roche comme fragment de projectile montre un rapport Ni/Co>10 (Yamaguchi et *al.*, 2006). Ce qui nous permet de conclure que ce métal est un

fragment de projectile incorporé dans NWA2268 au cours de la période d'impact.

L'analyse isotopique de l'oxygène a donné un $\Delta^{17}\text{O} = -0.4\text{‰}$, ce qui confirme l'appartenance de l'eucrite polymictite au groupe des HED (Howardites, Eucrites, Diogénites) (fig.8) (Clayton et *al.*, 1976; Clayton et Mayeda, 1996), bien qu'elle présente un enrichissement prononcé en ^{18}O et ^{17}O par rapport aux autres HED.

II)- L'eucrite monomictite NWA4269

La météorite a été découverte en septembre 2004 dans la Hamada du Draa. La roche, en une seule pièce de 54g, de forme plus ou moins allongée, est totalement recouverte d'une croûte de fusion noire et lisse.

Composition minéralogique, chimique et isotopique

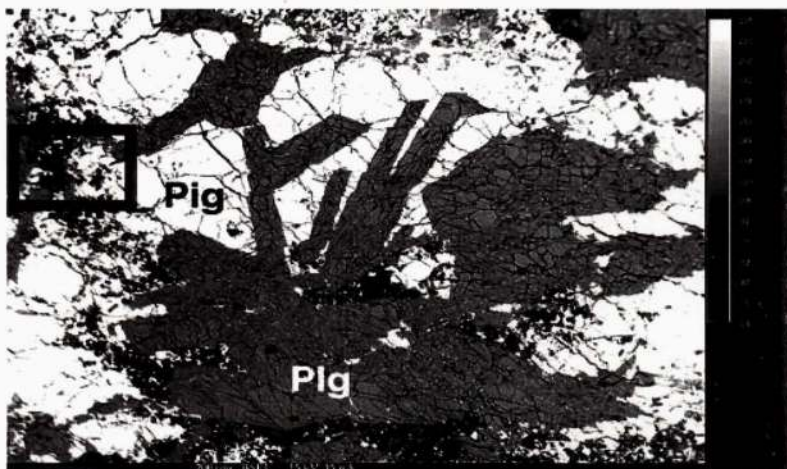
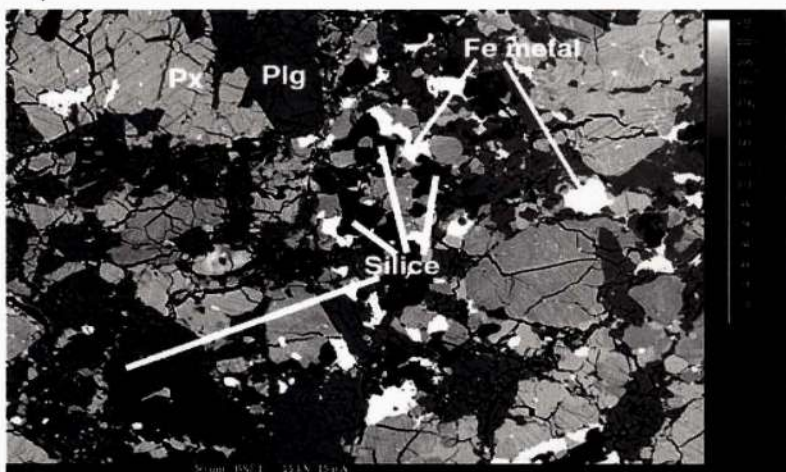
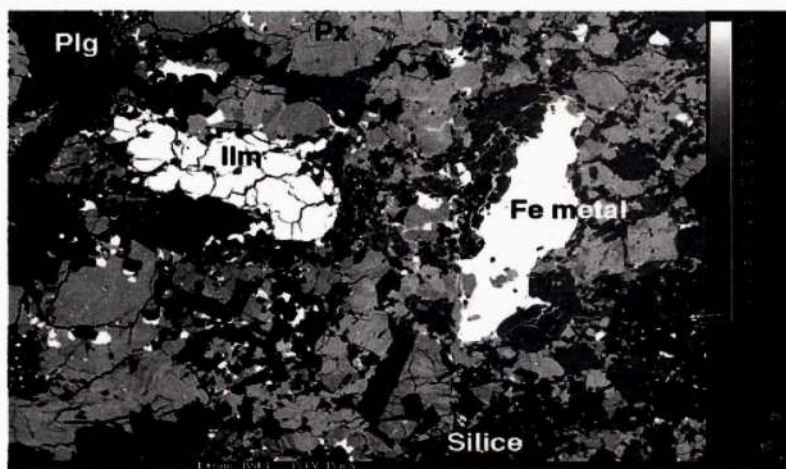
La roche est de couleur grise à la cassure, bréchique, finement grenue avec des plages millimétriques de métal. Elle présente deux zones distinctes, une grossière à reliques de texture ophitique formée de plagioclases et de pigeonite démixée (fig.3A) et l'autre plus fine à texture granoblastique à plagioclases, pigeonite, augite, orthopyroxène, silice (quartz), fer métal (Ni<0.1wt%), troïlite, spinelle et phosphates (fig.3B, C).

Fig. 3 A : Zones à texture ophitique dans l'eucrite monomictite NWA4269 associant de grandes lattes plurimillimétriques de plagioclases (Plg) fortement fracturées au sein de grands cristaux de pigeonite (Pig). Aux interfaces entre pigeonites et plagioclases se développe (rectangle noir) une texture "granoblastique" à grains plus fins (~ 10 μm). Image en BSE (*Ophitic texture in the NWA4269 monomictite eucrite with large millimetric lath of plagioclases (Plg) strongly broken within large poekilitic pigeonite (Pig). To the interfaces between pigeonites and plagioclases a fine-grained "granoblastic" texture (~ 10 μm) develops (black rectangle). BSE imaging*).

B : Les zones "granoblastiques" sont formées, en plus du plagioclase et de la pigeonite démixée (bandes claires : ferro-hypersthène et bandes sombres : ferro-augite), d'une association composée de grains de ferro-augite (démixion totale de la pigeonite), de silice, de troïlite, de fer métal et d'ilménite. Image en BSE (*"granoblastic" zones are formed by plagioclase and exolved pigeonite (clear bands: ferro-hypersthene and dark bands: ferro-augite), grains of ferro-augite, silica, troïlite, iron metal and ilmenite. BSE imaging*).

C : Le fer métal peut être extrêmement abondant dans les zones "granoblastiques" sous forme de grains qui peuvent atteindre des tailles millimétriques. Image en BSE (*Iron metal can be abundant in the "granoblastic" zones and grains can reach millimetric sizes. BSE imaging*).

ETUDE DE QUELQUES ACHONDrites BASALTIQUES DÉCOUVERTES AU SAHARA DU SUD OUEST ALGÉRIEN

A**B****C**

A. SEDDIKI, J.Y. COTTIN, B. MOINE, N. REMACI-BENAOUDA, J. BASCOU, C. RENAC, M. GODARD, V. SAUTTER, M. BOUROT-DENISE, J.P. LORAND ET DJ. BELHAI

Les pigeonites sont démixées et présentent de fines lamelles (0,3 à 1,3 μm) de ferro-augite ($\text{En}_{26-27} - \text{Wo}_{34-41}$) et de ferro-hypersthène ($\text{En}_{29-30} - \text{Wo}_{6-3}$). Le faible développement des lamelles d'augite indique un refroidissement rapide de l'échantillon limitant le mûrissement des exsolutions.

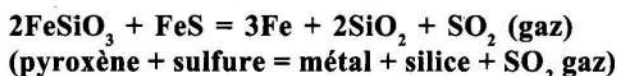
Dans les zones granoblastiques, la démixion totale des pyroxènes est rarement complète et l'on trouve peu de grains d'augite individualisés (fig. 5A). Cette eucrite est classée type 5 suivant la séquence métamorphique de Takeda et Graham (1991). Cela est confirmé par la composition des spinelles riches en TiO_2 (fig. 5 B).

La température estimée à partir des courbes de solvus (Lindsley, 1983) se situe à environ 800°C (fig. 5A). Cependant les thermomètres Opx-Cpx de Brey et Khöler (1990 a); Brey et Khöler (1990 b) donnent des températures d'équilibre de 750°C.

L'association granoblastique est le résultat d'une recristallisation après un réchauffement au cours d'un métamorphisme d'impact ou d'enfouissement (Takeda et Graham, 1991; Yamaguchi et al., 1996). Le métal (Fe) est extrêmement abondant dans les zones «granoblastiques» en grains de quelques microns (fig. 3A, B et fig. 4A). Cependant certains grains peuvent atteindre des tailles millimétriques. La silice (quartz α) apparaît systématiquement en association avec les grains de métal (fig. 4A) et de troïlite (fig. 4B) et peut former des plages de 100-200 μm .

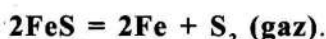
Deux hypothèses majeures peuvent expliquer l'origine du métal. La première est en relation avec la fugacité de l'oxygène qui, en diminuant, favorise la cristallisation du métal (Duke, 1965). La deuxième hypothèse, plus plausible, est une réaction de désulfuration au cours du réchauffement comme elle a été proposée par Palme et al., (1988) pour l'eucrite monomictite

Camel Donga. Cette réaction réductrice peut s'écrire comme suit :

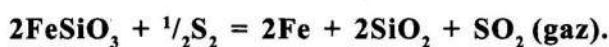


D'après Palme et al., (1988), cette réaction peut se faire en plusieurs étapes.

Au cours d'une élévation de température d'une eucrite à 800-900°C, on a la désulfuration de la troïlite comme suit :



Puisque le S_2 est plus apte à s'échapper, nous aurons une plus forte réduction de la troïlite FeS. En plus, le S_2 (gaz) peut réagir avec FeO des pyroxènes en produisant plus de métal suivant la réaction :



NWA4269 présente un spectre enrichi en REE par rapport à la chondrite (8xC1) avec une légère anomalie négative en Eu caractéristique des basaltes non cumulatifs (fig. 10A). Le spectre de cette eucrite monomictite est comparable aux deux eucrites connues, la Stannern et la Nuevo Laredo (Mittlefehldt et Lindstrom, 2003) avec plus de similitudes avec cette dernière (fig. 10B). Les eucrites basaltiques sont divisées en deux groupes sur la base de leurs compositions : le groupe principal ou la lignée Nuevo Laredo définit une séquence formée par cristallisation fractionnée d'un liquide magmatique primitif à pigeonite et plagioclases, dont ont été fractionnées précocement des diogénites comme pyroxénites cumulatives (Stolper, 1977; Ruzicka et al., 1997). La lignée Stannern représente une séquence de fusion partielle (de 5% à plus de 20%) d'un corps parental à olivine-pyroxène-plagioclase-spinelle-métal (Stolper, 1977; Consolmagno et Drake, 1977). L'eucrite monomictite de composition évoluée, se place dans la lignée Nuevo Laredo (fig. 9), elle représente un liquide

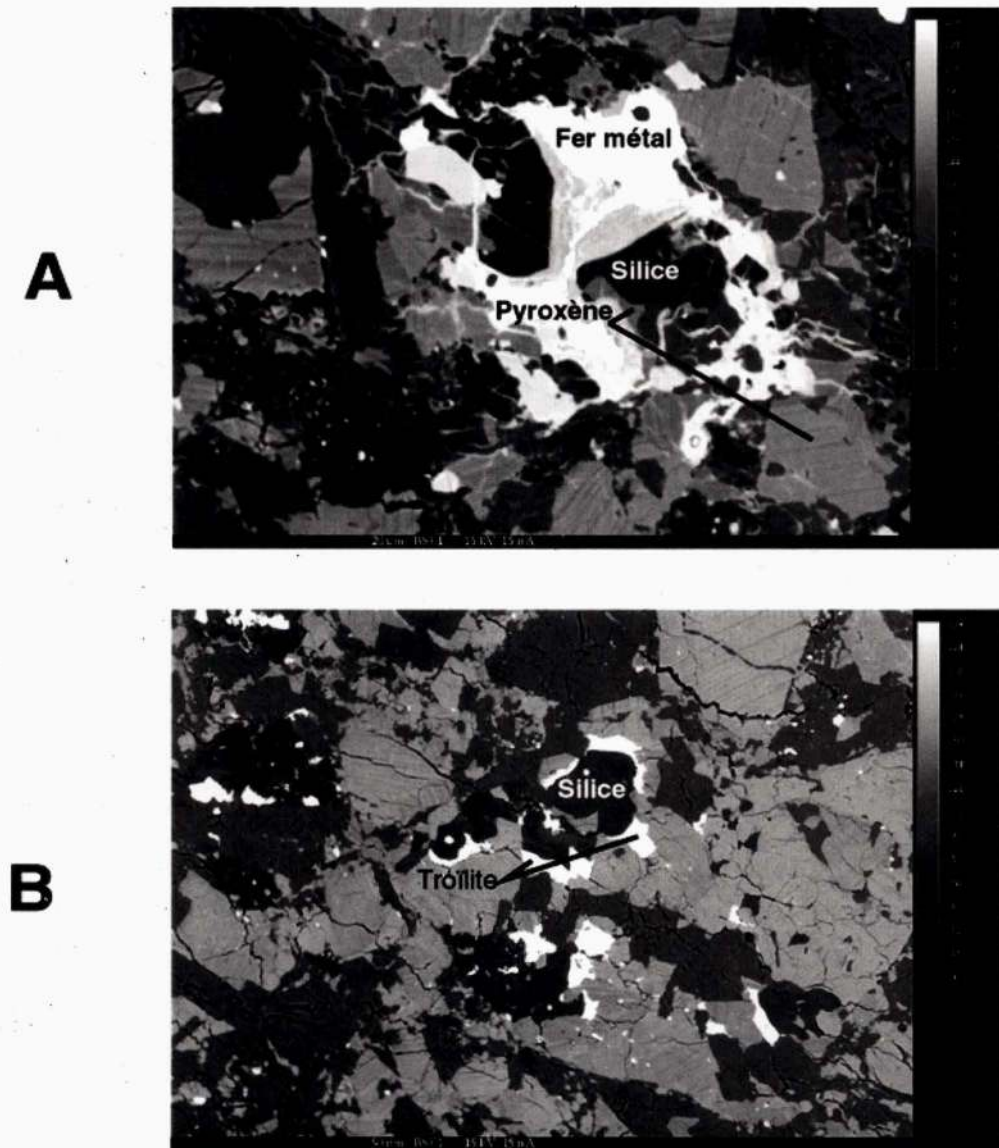


Fig. 4 - La silice apparaît systématiquement associée au fer métal (A) et à la troïlite (B) dans NWA4269. Image en BSE.

The silica appears systematically associated with (A) iron metal and with (B) troilite in NWA4269. BSE imaging.

A. SEDDIKI, J.Y. COTTIN, B. MOINE, N. REMACI-BENAOÛDA, J. BASCOU, C. RENAC, M. GODARD, V. SAUTTER, M. BOUROT-DENISE, J.P. LORAND ET DJ. BELHAÏ

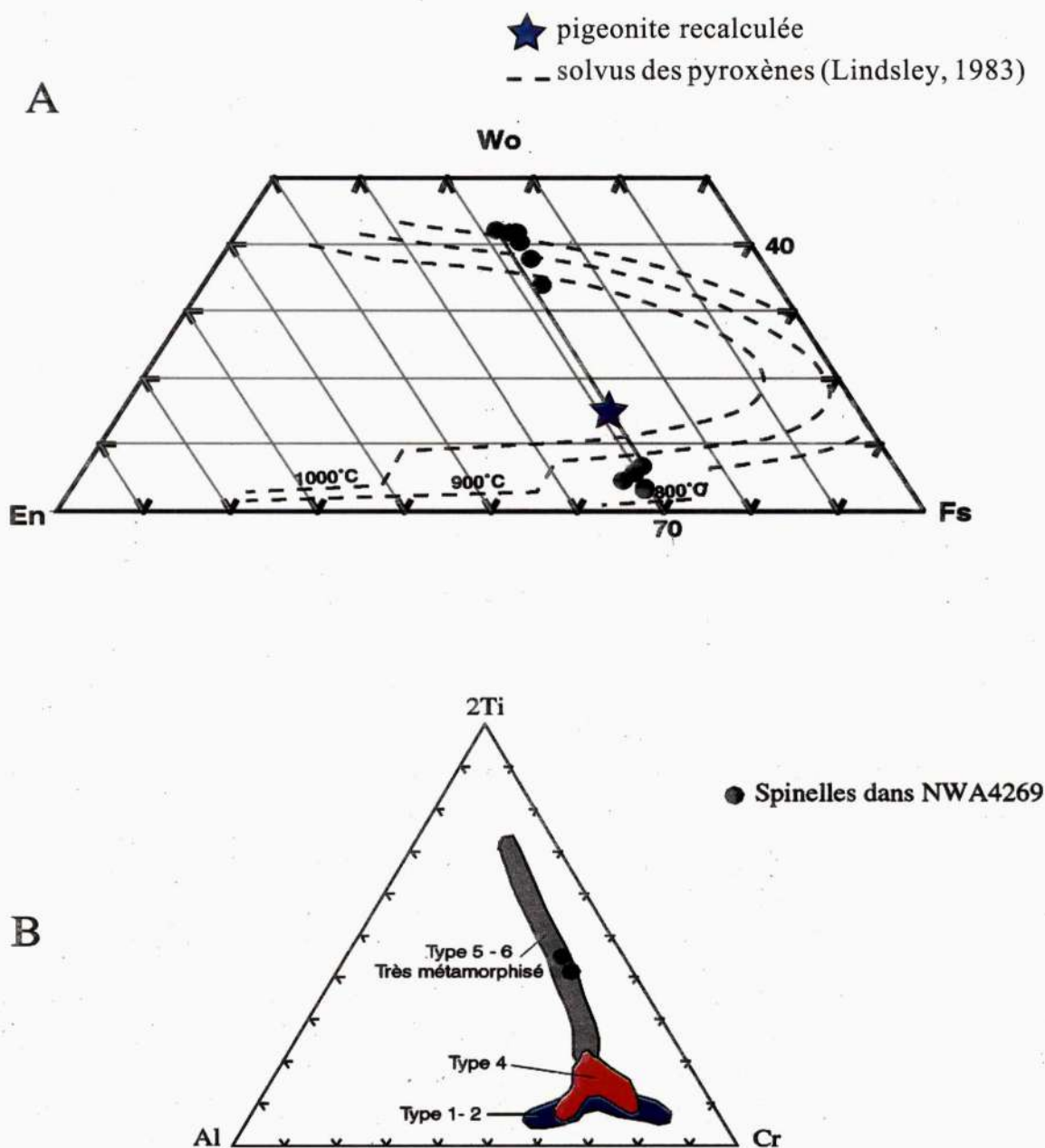


Fig. 5 A : Diagramme Ca-Fe-Mg des pyroxènes de l'eucrite polymict NWA4269. Les courbes en tiretés représentent les solvus des pyroxènes à différentes températures d'après Lindsley (1983) (*Ca-Fe-Mg diagram for pyroxenes in the NWA4269 polymict eucrite. The dotted lines represent solvus of pyroxenes at different temperatures according to Lindsley (1983).*)

B : Diagramme mettant en relation la composition des spinelles dans les eucrites et le degré de métamorphisme (Yamaguchi, 2000) (*Diagram of spinelle compositions of eucrites and the degree of metamorphism (Yamaguchi, 2000).*)

résiduel issu de la cristallisation fractionnée d'un liquide magmatique.

Le rapport Fe/Mn des pyroxènes est compris entre 27 et 42, similaire aux rapports des achondrites de type HED (Papike et *al.*, 2003). L'eucrite NWA4269 se situe bien dans la gamme des compositions des eucrites (fig.7). Cette achondrite a un rapport isotopique de l'oxygène exceptionnel ($\Delta^{17}\text{O}=0.136\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}=3.27\text{‰}$, $\delta^{17}\text{O}=1.84\text{‰}$) (fig.8) par rapport à celui connu pour le groupe des HED attribué à l'astéroïde 4Vesta ($\Delta^{17}\text{O}$ de -0.2‰ à -0.3‰) (Clayton et *al.*, 1976; Clayton et Mayeda, 1996). Cette eucrite NWA4269 ainsi que l'eucrite Ibitira (Wiechert et *al.*, 2004) sont des HED atypiques (fig.8).

III)- La diogénite NWA4255:

Cette roche a été découverte en septembre 2002. Elle est constituée de plusieurs fragments partiellement recouverts d'une croûte de fusion. Elle présente une couleur grise avec quelques taches de rouille dues à l'altération terrestre du fer métal.

Composition minéralogique, chimique et isotopique

Cette météorite est constituée essentiellement de cristaux centimétriques d'orthopyroxène ($\text{Fs}_{25,30}\text{Wo}_{1,50}$), la croûte de fusion est partiellement recristallisée (fig.6A). C'est une orthopyroxénite composée en phase mineure par du spinelle chromifère ($\text{cr}^*=0.92$), d'olivine (Fa_{30}), de fer métal ($\text{Ni}<0.1\text{wt\%}$) et de la troïlite. Le rapport Fe/Mn des pyroxènes se situe entre 23 à 28, ce qui représente des compositions d'HED de l'astéroïde Vesta (Papike et *al.*, 2003). L'analyse de la roche totale indique des compositions très pauvres en calcium et aluminium par rapport aux diogénites décrites (fig.7). Les rapports isotopiques ($\Delta^{17}\text{O}=-0.38\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}=3.25\text{‰}$ et $\delta^{17}\text{O}=1.31\text{‰}$) (fig.8) confirment l'appartenance de cette météorite au groupe des HED de l'astéroïde 4Vesta (Clayton et *al.*, 1976; Clayton et Mayeda, 1996). L'origine

du métal dans ce type de roches est généralement expliquée par la réduction du fer dans les pyroxènes riches en fer, comme dans le cas de l'eucrite Camel Donga (Palme et *al.*, 1988) ainsi que de NWA4269. Par contre, par rapport à ces dernières eucrites, l'absence de la silice associée à la troïlite et le fer métal (fig.6B) nous indique une

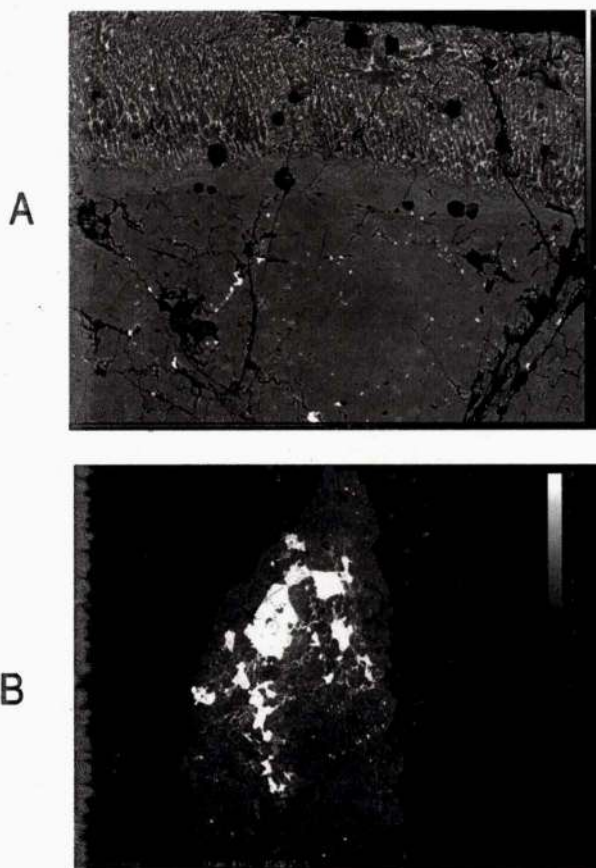


Fig. 6 A : Mégacristal d'orthopyroxène formant la diogénite NWA4255 avec inclusions de spinelle, de troïlite et de fer métal. La croûte de fusion partiellement recristallisée est bien visible. Image en BSE (*Megacrystal of orthopyroxene that composed the NWA4255 diogenite with spinelle, troilite and iron metal inclusions. The fusion crust is partially recrystallized. BSE imaging.*)

B : Gros grains de fer métal dans la diogénite. Image en BSE (*Large iron metal grains in the diogenite. BSE imaging.*)

réaction différente de celle évoquée pour l'eucrite NWA4269. Cette réaction également proposée par Palme *et al.* (1988) est la suivante :

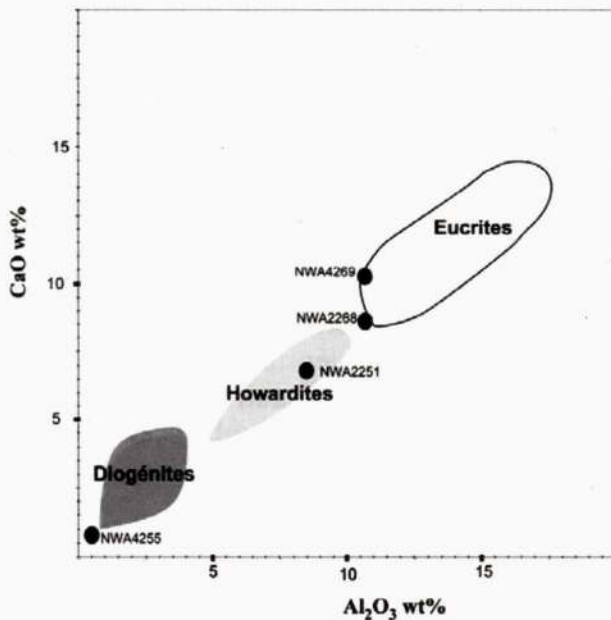
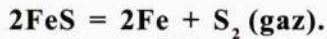


Fig. 7 - Diagramme Al_2O_3 vs CaO discriminant des HED. (In Yanai, 1998).

Diagram Al_2O_3 vs CaO of the HED.
(In Yanai, 1998).

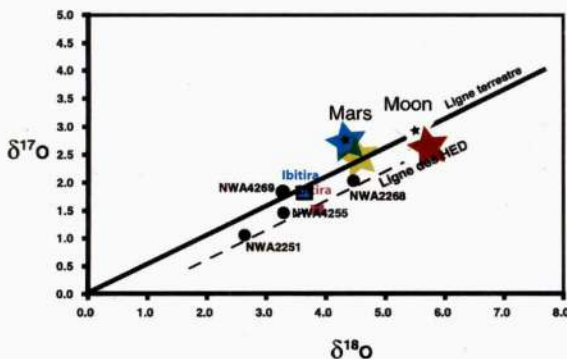


Fig. 8 - Analyse isotopique de l'oxygène pour les HED étudiées.

Diagram of oxygen isotopic ratios of studied HED.

NWA4255 est très pauvre en REE par rapport à la chondrite C1 (fig. 10A). Elle peut représenter la phase cumulative d'un liquide mantellique appauvri, comme cela a été proposé par Fowler *et al.* (1995) pour certaines diogénites pauvres en REE telles que Shalka et Ellemeet.

IV)- La howardite NWA2251

La roche est plus ou moins arrondie, de 6g, totalement recouverte par une croûte de fusion noire et lisse. A la cassure, cette météorite est de couleur gris foncé, bréchique, formée par de nombreux fragments et recoupée par une veine de choc millimétrique très sombre.

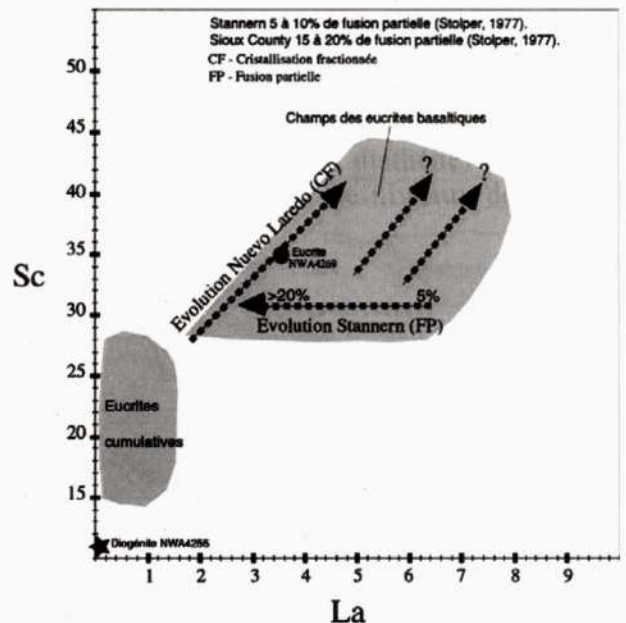


Fig. 9 - Evolutions des concentrations en La et Sc des HED étudiées (compositions de roches totales) : Evolutions Stannern et Nuevo Laredo, d'après Mittlefehldt et Lindstrom, 2003.

La vs Sc evolutions studied HED (whole-rock contents). Stannern and Nuevo Laredo trends from Mittlefehldt and Lindstrom, 2003.

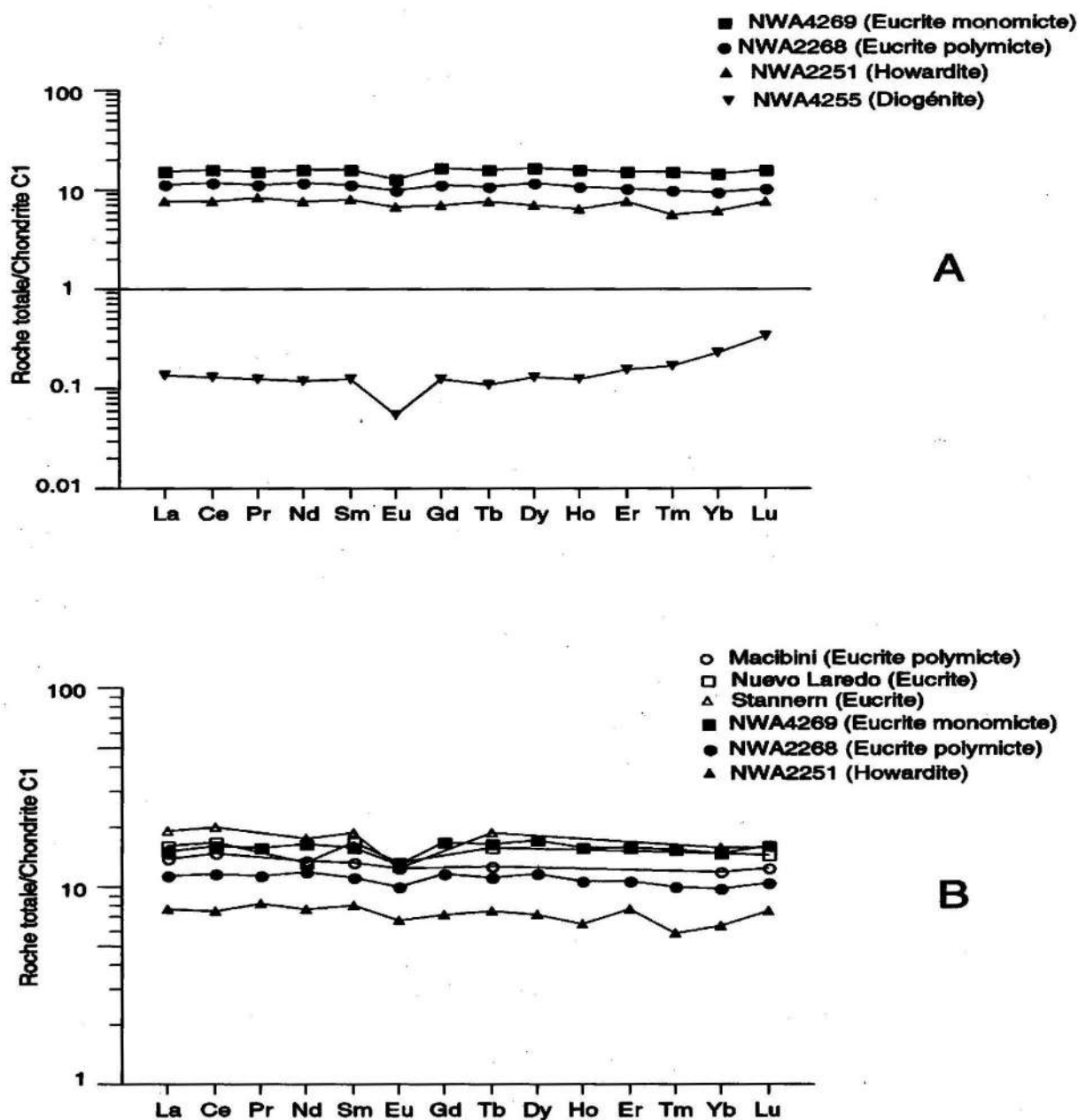


Fig. 10 A: Spectres des terres rares (REE) normalisés à la chondrite C1 (Anders et Grevesse, 1989), des HED étudiées (*Diagram of Rare earth elements (REE) contents normalized to the chondrite C1 (Anders and Grevesse, 1989) for the studied HED*).

B : Spectres des terres rares normalisés à la chondrite C1 (Anders et Grevesse, 1989), des Eucrites et Howardites étudiées, comparées aux eucrites les plus connues dans la littérature. Données de l'eucrite Macibini (Buchanan *et al.*, 2000), des eucrites Nuevo Laredo et Stannern (Mittlefehldt et Lindstrom, 2003) (*Diagram of Rare earth elements (REE) contents normalized to the chondrite C1 (Anders and Grevesse, 1989) for studied eucrites and howardites, compared to the more known eucrites in the literature. Data of the eucrite Macibini (Buchanan and al., 2000), of Nuevo Laredo and Stannern eucrites (Mittlefehldt and Lindstrom, 2003).*

A. SEDDIKI, J.Y. COTTIN, B. MOINE, N. REMACI-BENAOUDA, J. BASCOU, C. RENAC, M. GODARD, V. SAUTTER, M. BOUROT-DENISE, J.P. LORAND ET DJ. BELHAI

Composition minéralogique, chimique et isotopique

Cette météorite est constituée par une matrice bréchique contenant des clastes de basalte eucritique et des clastes diogénitiques. Des fragments de pyroxferroïte ont été également retrouvés, ce minéral est déstabilisé en une association d'hédenbergite, de fayalite et de silice. Les clastes eucritiques sont à plagioclases (An_{88-93}), pigeonite ($Fs_{36} Wo_7$), maskelynite (An_{89-91}) (phase non cristalline à composition de plagioclase, silice, troïlite, chromite (43% Cr) et ilménite). Les clastes diogénitiques sont composées en phase majeure d'orthopyroxène ($Fs_{33-21} Wo_{1-3}$), et en phases mineures de chromite, de troïlite et d'ilménite. Une veine de choc (2 mm) a été distinguée séparant deux lithologies. La première est à clastes eucritiques (<60%) et diogénitiques, alors que la deuxième est uniquement à fraction diogénitique (Opx et spinelle).

L'analyse du verre de la croûte de fusion correspond à une composition d'howardite (Desnoyers et Jerome, 1977; Laul et Gosselin, 1990). L'analyse des éléments en traces sur roche totale est effectuée en ICP-MS par Laser-Ablation sur la veine de choc qui recoupe la roche; elle peut représenter la composition de la roche totale. Nous constatons que notre roche présente un spectre de terres rares plat (0,8x C1) (fig.10). Elle est moins riche en REE par rapport aux eucrites, cela est interprété par l'abondance de composants diogénitiques.

L'analyse à la microsonde électronique de la croûte de fusion a donné des teneurs moyennes en calcium et aluminium, entre celles des diogénites et des eucrites les situant dans le domaine des howardites (fig.7).

La composition isotopique de l'oxygène ($\delta^{17}O = -0,4\text{‰}$, $\delta^{18}O = 2,62\text{‰}$, $\delta^{17}O = 0,91\text{‰}$) nous confirme son appartenance au groupe des HED attribué à l'astéroïde 4Vesta (Clayton et al., 1976; Clayton et Mayeda, 1996).

CONCLUSION

L'étude pétrographique, géochimique et isotopique des quatre échantillons de météorites récoltés au Sahara algérien, a montré l'appartenance de ces roches au groupe des «HED» constituant l'astéroïde 4Vesta.

Il s'agit d'une eucrite monomictite, d'une eucrite polymictite, d'une howardite et d'une diogénite. L'eucrite monomictite a une composition basaltique (plagioclase+pigeonite), elle s'est mise en place sous forme de coulée basaltique de surface ou en dyke intrusif dans la croûte de l'astéroïde. La composition lithologique de cette eucrite monomictite a été modifiée par un métamorphisme thermique (>800°C), bien illustré par l'équilibration des compositions des pyroxènes ainsi que la démixion des pigeonites en Opx et Cpx, alors que les textures magmatiques sont partiellement préservées. Ce réchauffement qu'a subi la roche a induit la volatilisation du soufre et a abouti à la réduction du fer des silicates en fer métal. L'eucrite monomictite NWA4269 est un liquide résiduel issu de la cristallisation fractionnée d'un liquide magmatique basaltique.

L'eucrite polymictite NWA2268 et la howardite NWA2251 sont des brèches composées de fragments de minéraux et de roches de compositions d'eucrites basaltiques et de diogénites (orthopyroxénites). La première présente une faible proportion (<10%) de composants diogénitiques alors que la seconde en est largement plus riche. Les impacts successifs sur le corps parent ont produit la howardite et l'eucrite polymictite. Ce sont des régolites qui se forment alors, à partir des fragments de roches de profondeur et de surface de l'astéroïde et sont colmatés par une matrice finement bréchique. La diogénite NWA4255 est constituée essentiellement de cristaux centimétriques d'orthopyroxène (orthopyroxénite). Elle est très pauvre en REE par rapport à la chondrite C1. Elle peut représenter la phase cumulative d'un

liquide mantellique appauvri comme cela a été proposé par Fowler et *al.*, (1995) pour certaines diogénites pauvres en REE telles que Shalka et Ellemeet.

Au niveau des spectres de terres rares, la diogénite NWA4255 apparaît la plus pauvre (fig.10A). Elle représente probablement un cumulat de cristallisation à partir d'un liquide basaltique (Stolper, 1977; Ruzicka et *al.*, 1997). La howardite NWA2251 pauvre en terres rares par rapport aux eucrites NWA2268 et NWA4269, est représentée par un spectre plat. Elle incorpore une fraction diogénitique assez importante par rapport à l'eucrite polymictique NWA2268. L'eucrite monomictique NWA4269 est également représentée par un spectre de terres rares plat. Cette roche est riche en REE, ce qui confirme son caractère très évolué, corroboré par sa minéralogie (enrichissement en fer des pyroxènes et plagioclases à An < 80%).

L'analyse isotopique de l'oxygène a confirmé l'appartenance des roches étudiées à la lignée du groupe des « HED » attribué à l'astéroïde 4Vesta ; l'eucrite monomictique NWA4269 fait exception par son rapport ($\Delta^{17}\text{O}=0.136\text{‰}$) différent de celui du groupe des « HED », tout comme l'eucrite Ibitira (Wiechert et *al.*, 2004). Cette différence peut s'expliquer soit par son appartenance à un corps parent différent de 4Vesta, soit par des compositions hétérogènes au sein même de cet astéroïde.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDERS, E. AND GREVESSE, N. 1989. Abundances of the elements: Meteoritic and solar. *Geochim. Cosmochim. Acta* 53, 197-214.
- ARAMOVICH, C. J., CHRISTOPHER, D. K. H. AND PAPIKE, J. J. 2002. Symplectites derived from metastable phases in martian basaltic meteorites. *American Mineralogist*, Vol. 87, p. 1351-1359.
- BECK, P., BARRAT, J.A., JAMBON, A., GILLET, PH., BLICHERT-TOFT, J. AND LESOURD, M. 2001. The polymict eucrite North West Africa 049. *64th Annual Meteoritical Society Meeting*, p. 5297.
- BINZEL, R. P. AND XU, S. 1993. Chips off of asteroid 4 Vesta: evidence for the parent body of basaltic achondrite meteorites. *Science*, 260, 186-191.
- BINZEL, R. P., GAFFEY, M. J., THOMAS, P. C., ZELLNER, B. H., STOORS, A. D. AND WELLS, E. N. 1997. Geologic mapping of Vesta from 1994 Hubble Space Telescope images. *Icarus*, 128 : 95-103.
- BOGARD, D. D. AND GARRISON, D. H. 2003. $^{30}\text{Ar} - ^{40}\text{Ar}$ ages of eucrites and thermal history of asteroid 4 Vesta. *Meteoritics and planet. Sci.*, 38, 669-710.
- BREY, G. P. AND KÖHLER, T. K. 1990 a. Geothermobarometry in four phase lherzolites. I: Experimental results from 10 to 60 kb. *Journal of Petrology*, 31: 1313-1352.
- BREY, G. P. AND KÖHLER, T. K. 1990 b. Geothermobarometry in four phase lherzolites. II: New thermobarometers and practical assessment of existing thermobarometers. *Journal of Petrology*, 31: 1353-1378.
- BUCHANAN, P. C., LINDSTROM, D. J., MITTFELDEHLDT, D. W., KOEBERL, C. AND REIMOLD, W. U. 2000. The South African polymict eucrite Macibini. *Meteoritics and Planetary Science*, 35, 1321-1331.
- CHAO, E. C. T., MINKIN, J. A., FRONDEL, C., KLEIN, C., DRAKE, J. C., FUCHS, I., TANI, B., SMITH, J. V., ANDERSON, A. T., MOORE, P. B., ZECHMAN, G. R., TRAILL, R. J., PLANT, A. G., DOUGLAS, J. A. AND DENCE, M. R. 1970. Pyroxferroite, a new calciumbearing iron silicate from Tranquillity Base. *Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf.*, 65-79.
- CLAYTON, R. N., ONUMA, N. AND MAYEDA, T. K. 1976. A classification of meteorites based on oxygen isotopes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 30, 10-18.
- CLAYTON, R. N. AND MAYEDA, T. K. 1996. Oxygen isotope studies of achondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta* 60, 1999-2017.

A. SEDDIKI, J.Y. COTTIN, B. MOINE, N. REMACI-BENAOUDA, J. BASCOU, C. RENAC, M. GODARD, V. SAUTTER, M. BOUROT-DENISE, J.P. LORAND ET DJ. BELHAI

- CONSOLMAGNO, G. J. AND DRAKE, M. J. 1977. Composition and evolution of the eucrite parent body: evidence from rare earth elements. *Geochim. Cosmochim. Acta* 41, 1271-1282.
- DELANEY, J. S., TAKEDA, H., PRINZ, M., NEHRU, C. E. AND HARLOW, G. E. 1983. The nomenclature of polymict basaltic achondrites. *Meteoritics*, Vol. 18, N° 2, June 30, 103-111.
- DELANEY, J. S., PRINZ, M. AND TAKEDA, H. 1984. The polymict eucrites. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 15th, J. Geophys. Res.*, 89 (suppl), C251-C288.
- DESNOYERS, C. AND JEROME, D. Y. 1977. The Malvern howardite: a petrological and chemical discussion. *Geochim. Cosmochim. Acta* 41, 81-86.
- DRAKE, M. J. 2001. The eucrite/Vesta story. *Meteorit. Planet. Sci.*, 36, 501-513.
- DUKE, M. 1965. Metallic iron in basaltic achondrites. *J. Geophys. Res.*, 70, 1523-1527.
- FOWLER, G. W., SHEARER, C. K., PAPIKE, J. J. AND LAYNE, G. D. 1995. Diogenites as asteroidal cumulates: Insights from orthopyroxene trace element chemistry. *Geochim. Cosmochim. Acta* 59, 3071-3084.
- GODARD, M., JOUSSELIN, D. AND BODINIER, J. L. 2000. Relationships between geochemistry and structure beneath a palaeo-spreading centre: A study of the mantle section in the Oman Ophiolite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 180: 133-148.
- IONOV, D. A., SAVOYANT, L. AND DUPUY, C. 1992. Application of ICP-MS technique to trace element analysis of peridotites and their minerals. *Geostand. Newslett.*, 16: 311-315.
- KOZUL AND HEWINS 1989. Fayalite-bearing eucrites and the origins of HED magmas [abstract]. *Meteoritics*, 24, 289.
- LAUL, J. C. AND GOSSELIN, D. C. 1990. The Bholghati howardite: Chemical study. *Geochim. Cosmochim. Acta* 54, 2167-2175.
- LINDSLEY, D. H. 1983. Pyroxene thermometry. *American Mineralogist*, Vol. 68, p. 477-493.
- LINDSLEY, D. H. AND BURNHAM, C. W. 1970. Pyroxferroite: stability and x-ray crystallography of synthetic $\text{Ca}_{(0.15)}\text{Fe}_{(0.85)}\text{SiO}_3$. *Pyroxenoid. Science*, 168, 364-367.
- LINDSLEY, D. H., PAPIKE, J. J. AND BENCE, A. E. 1972. Pyroxferroite: breakdown at low pressure and high temperature. In *Lunar Science III*, 483-485 (abstract).
- MC CORD, T. B., ADAMS, J. B. AND JOHNSON, T. V. 1970. Asteroid Vesta: spectral reflectivity and compositional implications. *Science*, 168, 1445-1447.
- METZLER, K., BOBE, K. D., PALME, H., SPETTEL, B. AND STÖFFLER, D. 1995. Thermal and impact metamorphism on the HED parent asteroid. *Planet. Space Sci.*, Vol. 43, Nos. 3/4, pp. 499-525.
- MITTFELFEHLDT, D. W. AND LINDSTROM, M. M. 2003. Geochemistry of eucrites: Genesis of basaltic eucrites, and Hf and Ta as petrogenetic indicators for altered antarctic eucrites. *Geochim. Cosmochim. Acta* Vol. 67, N° 10, 1911-1935.
- PALME, H., WLOTZKA, F., SPETTEL, B., DREIBUS, G. AND WEBER, H. 1988. Camel Donga: A Eucrite with High Metal Content. *Meteoritics*, 23, 49-57.
- PAPIKE, J. J., KARNER, J. M. AND SHEARER, C. K. 2003. Determination of planetary basalt parentage: A simple technique using the electron microprobe. *American Mineralogist*, Vol. 88, 469-472.
- RUZIKA, A., SNYDER, G. A. AND TAYLOR, L. A. 1997. Vesta as the howardite, eucrite and diogenite parent body: Implications for the size of core and for large-scale differentiation. *Meteorit. Planet. Sci.*, 32, 825-840.
- SMITH, D. 1972. Stability of iron-rich pyroxene in the system $\text{CaSiO}_3\text{-FeSiO}_3\text{-MgSiO}_3$. *Am. Mineral.*, 57, 1413-1428.
- SNYDER, G. A., TAYLOR, L. A. AND PATCHEN, A. 1999. Lunar meteorite EET96008, Part I. Petrology and mineral chemistry: Evidence of large-scale, late-stage fractionation (abstract). *Lunar Planet. Sci.* 30, #1499, *Lunar and Planetary Institute, Houston, Texas, USA*.

- STOLPER, E. 1977.** Experimental petrology of eucrite meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta* 41, 587-611.
- TAKEDA, H. AND GRAHAM, A.L. 1991.** Degree of equilibration of eucritic pyroxenes and thermal metamorphism of the earliest planetary crust. *Meteoritics*, 26, 129-134.
- TAKEDA, H., MORI, H. AND BOGARD, D. D. 1994.** Mineralogy and ^{39}Ar - ^{40}Ar age of an old pristine basalt: Thermal history of the HED parent body. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 122, 183-194.
- WARE, N.G. AND LOVERING, J.P. 1971.** Electron-Microprobe Analyses of Phases in Lunar Samples. *Sci.*, 167, No. 3918, 517-520.
- WARREN, P. H. 1985.** Origin of howardites, diogenites, and eucrites: a mass balance constraint. *Geochim. Cosmochim. Acta* 49, 577-586.
- WIECHERT, U. H., HALLIDAY, A. N., PALME, H. AND RUMBLE, D. 2004.** Oxygen isotope evidence for rapid mixing of the HED meteorite parent body. *Earth Planet. Sci. Lett.* 221, 373-382.
- WILSON, L. AND KEIL, K. 1996.** Volcanic eruptions and intrusions on the asteroid 4 Vesta. *J. Geophys. Res., Planet.*, 101, 18927-18940.
- YAMAGUCHI, A., TAYLOR, G. J. AND KEIL, K. 1996.** Global crustal metamorphism of the eucrite parent body. *Icarus*, 124 N° 0192, 97-112.
- YAMAGUCHI, A., TAYLOR, G. J. ET KEIL, K. 1997.** Shock and thermal history of equilibrated eucrites from Antarctica. *Antarct. Meteorite Res.*, 10, 415-436.
- YAMAGUCHI, A. 2000.** Spinels in basaltic eucrites: implication for crystallisation and metamorphic history. (Abstract), *63th Annual Meteoritical Society Meetings*.
- YAMAGUCHI, A., OKAMOTO, C. AND EBIHARA, M. 2006.** The origin of FeNi-metals in eucrites and implication for impact history of the HED parent body. (abstract). In Lunar and Planetary Science XXXVII, abstract n°. 1678, *Lunar and Planetary Institute, Houston*.
- YANAI, K. 1998.** Unbrecciated-holocrystalline achondrite with howardite composition. (abstract). In Lunar and Planetary Science XXIX, abstract no. 1045, *Lunar and Planetary Institute, Houston*.