

Observation par Microscopie Electronique des effets de chocs dans trois météorites martiennes

B. Van de Moortèle^a, B. Reynard^a, P. Rochette^b, M. Jackson^c, M. Wilson^d, P. McMillan^{d,e} and P. Gillet^a

^aLaboratoire de Sciences de la terre, Ecole Normale Supérieure de Lyon, 46 allée d'Italie, 69007 Lyon, France

^bCentre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement, Europôle Méditerranéen de l'Arbois - BP 80 - 13545 Aix-en-Provence cedex 04, France

^cInstitute for Rock Magnetism, University of Minneapolis, 291 Shepherd Labs, 100 Union Street S.E., Minneapolis, MN 55455-0128, USA

^dDepartment of Chemistry and Materials Chemistry Centre, Christopher Ingold Laboratories, University College London, 20 Gordon Street, London WC1H 0AJ, UK

^eDavy-Faraday Laboratory, Royal Institution of Great Britain, 21 Albemarle Street, London W1S 4BS, UK

Résumé – Les deux météorites martiennes NWA 1950 et NWA 2737 ont la particularité de posséder des olivines de couleur sombre contrairement à la météorite de Chassigny dont les olivines sont vertes. Dans ce travail, nous montrons que ces propriétés optiques sont liées à la présence de nano-précipités métalliques de FeNi au sein même de ces olivines. Ces observations couplées à des mesures de propriétés magnétiques nous permettent de proposer que les olivines de la surface martienne sont un support possible pour les anomalies magnétiques enregistrées à la surface de Mars. Dans ce même travail nous rapportons l'observation et la modélisation d'un nouveau polymorphe de l'olivine se formant à basse température et haute pression.

1. Introduction

Les processus engendrés lors des impacts de météorites sont de bons analogues au processus de transformation de phases à l'intérieur de la Terre. Ces échantillons ont subi des pressions et températures relativement élevées induisant des transformations de phases qu'il est parfois difficile de reproduire en laboratoire. Nous rapportons ici l'étude de 3 météorites martiennes NWA 1950, NWA 2737 et Chassigny. Les deux premières météorites ont la particularité de présenter des olivines (silicate de Fe et Mg le plus abondant dans les planètes telluriques) de couleur noire alors que ce minéral est en général de couleur verte comme c'est le cas pour Chassigny.

2. Observations microstructurales

Origine de la couleur

Les deux météorites dont les olivines sont de couleur sombre (NWA 1950 et NWA 2737) présentent toutes deux des précipités d'une taille moyenne de 7 et 12 nm respectivement alors que Chassigny en est totalement dépourvue (champ sombre annulaire de la figure 1). La déconvolution des spectres EDX obtenus sur la matrice d'olivine et à l'aplomb des précipités aboutit à l'identification de précipités purement métalliques de Fer-Nickel. La réduction d'une partie du métal s'est accompagnée d'une oxydation d'une autre partie en Fe³⁺ comme le montre le spectre Mössbauer (~ 4%). Dans le cas de NWA 2737, la composition des précipités est fonction de la taille : plus les précipités sont gros plus ils sont pauvres en Ni. Les précipités de NWA 1950 sont des précipités de Fe, aucune trace de Ni n'ayant pu être mise en évidence par EDX. Ces observations ont toutes été confirmées par la mesure des propriétés magnétiques : aucun ferromagnétisme pour Chassigny alors que nous avons mesuré une Température de Curie de 770 °C (celle du Fe) pour NWA 1950, et étalée entre celle du Ni (358 °C) et celle du Fe pour NWA 2737 (confirmant la composition variable en Ni des précipités). Ces observations pourraient expliquer les anomalies magnétiques enregistrées sur la surface de Mars par la mission Mars Global Surveyor [1].

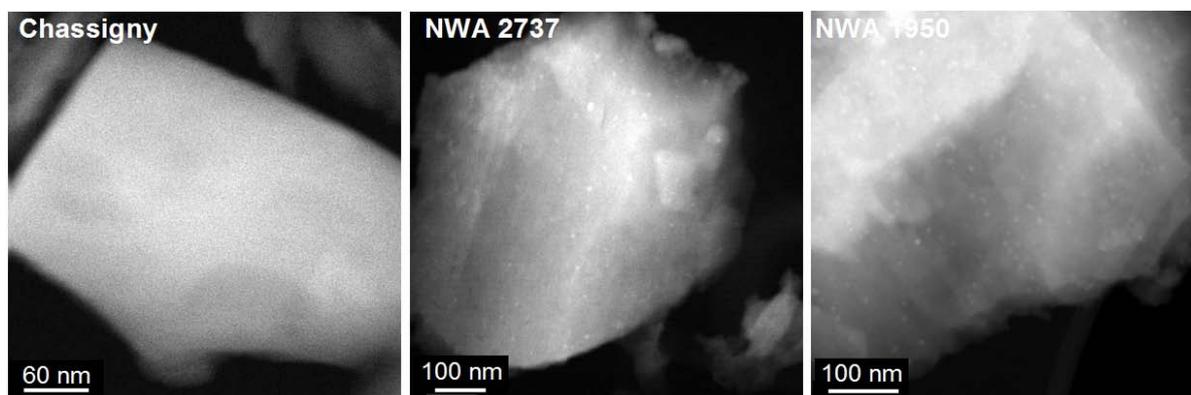


Figure 1 – Images en champ sombre annulaire d'olivines de 3 météorites martiennes : les spots clairs sur NWA 1950 et 2737 sont des précipités de FeNi responsables de la couleur sombre de ces olivines.

Nouvelle phase de l'olivine

Dans la météorite NWA 2737, nous avons observé un deuxième type de microstructure illustré par l'image HRTEM de la figure 2a. Il s'agit d'une zone de composition chimique identique à celle de l'olivine mais dont la Transformée de Fourier (TF) ne peut être indexée que dans le sous-réseau hexagonal anionique de l'oxygène. La spectroscopie Raman montre également deux spectres très proches dans une zone identifiée a priori comme de l'olivine. Le 1^{er} est un spectre typique de l'olivine et le 2^{ème} montre d'une part les mêmes pics que l'olivine mais plus large (signature d'un désordre important) et d'autre part des pics supplémentaires : un pic à 760 cm⁻¹ qui peut être interprété comme un défaut de la structure, mais surtout deux pics à 650 et 686 cm⁻¹ qui ne peuvent en aucun cas être attribués à des modes de vibrations de l'olivine mais à un nouveau polymorphe de l'olivine, la phase ζ .

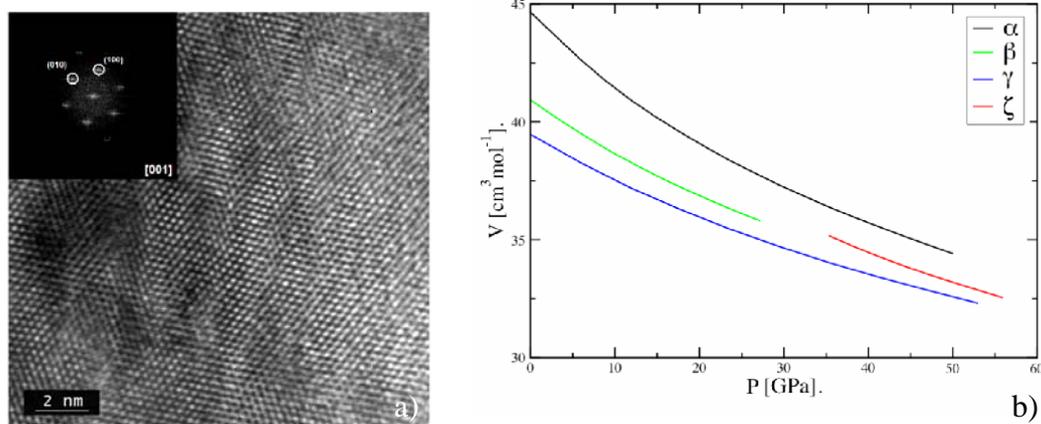


Figure 2—a) image HRTEM de la nouvelle phase ζ de l'olivine. La TF de cette image a pu être indexée selon le réseau hcp des ion O^{2-} ($a \sim 0.3$ nm et $c \sim 2a$) et un réseau cationique désordonné. b) simulation de $V=f(P)$ montrant l'existence d'une phase ζ , polymorphe de l'olivine, obtenue à température ambiante, à partir de la phase α de l'olivine, par une brusque augmentation de la pression.

Nos observations ont été confortées par des simulations de dynamique moléculaire basées sur un modèle ionique anisotrope (détails dans [2]). La figure 2b est un diagramme $V=f(P)$ obtenu par simulation dans lequel on peut voir outre les phases α , β et γ de l'olivine, la phase ζ . Cette phase a été obtenue par une brusque augmentation de la pression à partir de la phase α -Mg₂SiO₄ (maintenue de manière métastable à une pression de 50 GPa) reproduisant ainsi les effets d'un choc. Les simulations montrent que non seulement cette phase ζ peut être ramenée à la pression ambiante mais surtout qu'elle est moins métastable que les phases β et γ de l'olivine à cette pression. Nous pensons que de nombreuses études précédentes ont observé cette phase ζ mais l'ont confondue avec la phase α en raison des fortes similitudes existant entre ces deux phases (en particulier dans les spectres Raman) [3-5].

3. Conclusion

Le processus de dismutation du Fe dans les olivines de NWA 1950 et NWA 2737 menant à la formation des nano-précipités métalliques a probablement eu lieu lors d'un choc : soit au moment de l'extraction de la météorite, soit lors de l'impact d'un astéroïde sur la planète Mars. Ces olivines constellées de particules ferromagnétiques sont de très bons candidats pour être les porteurs du magnétisme rémanent jusqu'alors inexplicable de la planète Mars. D'après les calculs, la nouvelle phase ζ de l'olivine se forme à une pression supérieure à 30 GPa et à basse température. Ces conditions de température et pression sont très fréquentes lors des chocs. Nous pensons que cette phase est restée longtemps inaperçue en raison de ces fortes ressemblances avec la phase α de l'olivine.

4. Références

- [1] M.H. Acuna et al., Global distribution of crustal magnetization discovered by the Mars Global Surveyor MAG/ER experiment, *Science* **284** (1999) 790-793
- [2] A. Aguado et al., Multipoles and interaction potentials in ionic materials from planewave-DFT calculations, *Faraday Discussions* **124** (2003) 171-184
- [3] R. Jeanloz, Shock effects in olivine and implications for hugoniot data, *Journal of Geophysical Research* **85** (1980) 3163-3176
- [4] B. Reynard et al., High-temperature Raman spectroscopic and X-ray diffraction study of beta-Mg₂SiO₄: Insights into its high-temperature thermodynamic properties and the beta- to alpha-phase-transformation mechanism and kinetics, *American Mineralogist* **81** (1996) 585-594
- [5] P.F. McMillan et al., Hydroxyl Groups in beta-Mg₂SiO₄, *American Mineralogist* **76** (1991) 354-360