



HAL
open science

Analyses préliminaires d'une météorite lunaire NWA XXX

Lorine Saint George, Michel Dobrijevic, Aurélie Le Postollec, Laurent Londeix,
Isabelle Billy, Alain Queffelec, Yannick Anguy, Cécile Gaborieau, A. Duphil

► **To cite this version:**

Lorine Saint George, Michel Dobrijevic, Aurélie Le Postollec, Laurent Londeix, Isabelle Billy, et al..
Analyses préliminaires d'une météorite lunaire NWA XXX. 2019. hal-04383287

HAL Id: hal-04383287

<https://hal.science/hal-04383287>

Preprint submitted on 9 Jan 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Analyses préliminaires d'une météorite lunaire NWA XXX

L. Saint George¹, M. Dobrijevic², A. Le Postollec², L. Londeix³, I. Billy³, A. Queffelec⁴,
Y. Anguy⁵, C. Gaborieau⁵, and A. Duphil⁵

¹Université de Bordeaux, F-33400 Talence, France

²Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux, Univ. Bordeaux, CNRS, B18N, allée
Geoffroy Saint-Hilaire, 33615 Pessac, France. Email : michel.dobrijevic@u-bordeaux.fr

³Université de Bordeaux, UMR "EPOC" CNRS 5805, allée Geoffroy Saint-Hilaire, 33615
Pessac, France

⁴Université de Bordeaux, UMR "PACEA" CNRS 5199, allée Geoffroy Saint-Hilaire,
33615 Pessac, France

⁵ENSAM

Juin 2019

Résumé

Dans le cadre d'un stage de Master 1 de physique, nous avons utilisé plusieurs techniques d'analyse pour caractériser une météorite potentiellement lunaire NWA XXX (non référencée) ainsi qu'un échantillon de la météorite lunaire NWA 5000. Nous avons comparé les résultats que nous avons obtenus pour la météorite non référencée avec ceux de NWA 5000 ainsi qu'avec les résultats d'études précédentes sur d'autres météorites lunaires. L'interprétation de nos analyses semble confirmer l'origine lunaire de cette météorite non référencée. Elle présente cependant une composition un peu différente des autres météorites lunaires avec un excès en potassium et en sodium. Elle pourrait donc provenir d'une région non encore explorée de La Lune.

1 Introduction

Dans le cadre du stage de Master 1 effectué par Lorine Saint George (étudiante en Master de Physique Fondamentale et Applications de l'Université de Bordeaux), nous avons analysé quatre météorites appartenant à un ami (voir les remerciements). L'objectif général du stage était d'utiliser plusieurs techniques d'analyse pour apprendre à caractériser des météorites (voir le rapport du stage [Saint George, 2019a]). Parmi ces météorites, il y en avait une qui avait des caractéristiques visibles proches d'une météorite lunaire¹ et nous devons confirmer sa nature en la comparant à une météorite lunaire déjà référencée. Puisque cette météorite n'a jamais été caractérisée (à notre connaissance), nous pensons que les études que nous avons effectuées pourraient intéresser des collègues, des étudiants et/ou des collectionneurs de météorites et nous les présentons dans cet article. Par manque de temps, nous n'avons pas poussé certaines de ces études aussi loin qu'il aurait été possible. Pour cette raison, nous considérons que ce ne sont que des résultats préliminaires. Par ailleurs, l'article ne s'adresse pas à des spécialistes (nous n'en sommes pas).

1. Une météorite lunaire est une roche trouvée sur Terre qui a été éjectée de la Lune à la suite de l'impact d'un objet céleste (astéroïde, comète).

Dans le paragraphe 2, nous présentons la météorite inconnue. Le matériel et les techniques d'analyse utilisées sont résumés dans le paragraphe 3. Les résultats des analyses et la comparaison avec une météorite lunaire déjà caractérisée sont présentés dans le paragraphe 4. Plus de détails sont donnés en annexe. Nous concluons l'ensemble des résultats de cette étude dans le paragraphe 5.

2 Présentation de la météorite

2.1 Origine

La météorite que nous avons analysée dans cette étude est une NWA XXX (North West Africa non répertoriée). C'est une achondrite de type lunaire trouvée au Maroc en 2018 (voir quelques photographies sur la Figure 1). C'est une individuelle d'environ 15 grammes, qui serait aussi une "main mass" (seul échantillon connu de cette météorite). Elle appartient à Mathieu Sudre et nous l'avons nommée MS3. Mathieu Sudre nous avait prêté pour ce stage 2 météorites différentes de type chondrites, un petit échantillon d'une météorite lunaire répertoriée, NWA 5000 (alias MS2 dans cette étude, voir la Figure 10) et la météorite MS3. Dans la suite, nous comparons MS2 et MS3 pour chaque technique d'analyse afin de déterminer si MS3 est vraiment une météorite lunaire. Les masses de ces deux météorites sont données dans la Table 1.

2.2 Analyse morphologique succincte

Les photographies sur la Figure 1 montrent que l'une des faces est patinée (lisse et brillante). Cette patine a peut-être été provoquée par le sable du désert. Nous ne savons cependant pas exactement où elle a été trouvée et ce n'est donc qu'une hypothèse. Les faces internes présentent une matrice noire avec des clastes² de couleurs grises à blanches ainsi que des inclusions noires brillantes. Comme on peut le voir sur les photographies, les clastes font plusieurs millimètres de longueur. On remarque aussi des couches superficielles de couleur beige qui semble s'être ajoutée à la météorite et pourrait donc être d'origine terrestre. La croûte de fusion semble absente de cet échantillon. Il est donc possible que cette météorite soit tombée il y a de nombreuses années sur La Terre et ait été relativement altérée par des processus physiques et chimiques. En comparant ces photographies avec celle de la météorite lunaire NWA 5000 (voir Saint George et al. [2019c]), nous remarquons que cette dernière est aussi constituée d'une matrice noire et de clastes gris et blancs de grandes tailles. Notre échantillon est cependant un peu trop petit pour pousser plus loin la comparaison.

TABLE 1 – Masses des deux météorites MS2 (NWA 5000) et MS3 en notre possession lors de ce stage.

Météorite	Masse (g)
MS2	0.85 ± 0.05
MS3	16.68 ± 0.05

3 Matériel et méthode

Les différentes techniques d'analyse que nous avons utilisées pour caractériser les deux météorites lunaires sont listées ci-après.

2. Eléments rocheux dont la taille est supérieure à la matrice de la roche qui le contient.



FIGURE 1 – Photographies de la météorite MS3. En haut à gauche : partie patinée de la météorite. En haut à droite, la tranche non patinée. En bas : la face principale de la météorite. C'est sur cette dernière que toutes les mesures ont été effectuées.

- Double pesée réalisée en salle de TP de Physique de l’Université de Bordeaux. Nous avons principalement utilisé une balance de précision limitée à 200 g (valeur maximale), avec une précision à l’affichage de 0.01 g. Pour l’une des météorites, nous avons changé de balance. La précision à l’affichage était alors de 1 g (voir Saint George et al. [2019b]).
- Susceptibilité magnétique réalisée au laboratoire EPOC avec l’instrument de mesure MS2E (*Surface Scanning Sensor de Bartington Instruments*[®]). La mesure a été effectuée à 0.46 kHz. La zone active de la surface du capteur représente un rectangle de 10.5 mm × 3.8 mm. La mesure est donc une moyenne de la zone correspondante.
- Spectroscopie XRF (X-Ray Fluorescence) réalisée au laboratoire EPOC. Nous avons utilisé une énergie de 10 keV pour la source primaire de rayons X et un courant de 400 μ A. Les acquisitions duraient 10 s. L’appareil est un *Core Scanner*[®] de la société Avaatech.
- Microanalyse X à l’aide d’un spectromètre à rayons X à dispersion d’énergie (EDS / Energy Dispersive Spectrometer). Cet instrument (*Edax Apollo XL*[®]) est intégré à un microscope électronique à balayage environnemental à effet de champ (*FEI Quanta 250 FEG*[®]). L’analyse a été réalisée sur la plateforme MACAM de l’I2M. Les expériences ont été faites avec une énergie de 20 keV pour détecter les métaux comme le fer (Fe) et le nickel (Ni). Les acquisitions duraient 100 s.
- Spectroscopie Raman réalisée au laboratoire PACEA. L’instrument de l’équipe PACEA est un *Senterra*[®] de la société Bruker. Pour chaque spectre, nous avons utilisé le laser vert à 532 nm et fait des séries de 5 ou 10 co-additions de 10 s. Les spectres obtenus sont comparés à la base de données RRUFF Lafuente et al. [2015] ou à la littérature spécifique pour le carbone Tuinstra and Koenig [1970].

4 Resultats

4.1 Densité

La densité des météorites est un moyen simple de différencier quelques types de météorites. Nous avons mesuré la densité des 4 météorites par la méthode de la double pesée, ce qui nous a permis de comparer la densité de MS3 et de NWA 5000. Le détail de l’expérience et des calculs ont été présentés dans un précédent article (voir Saint George et al. [2019b]). Les résultats sont présentés dans la Table 2. La mesure que nous avons faite sur MS2 est en bon accord avec une mesure effectuée par Macke et al. [2011a]. Notre échantillon de MS2 ne pesait que 0.85 g et le matériel que nous avons utilisé n’était pas assez précis. Pour cette raison, l’incertitude sur sa densité est assez importante (environ 25%). Cependant, nous remarquons que la densité de MS3 est identique à celle de MS2, ce qui renforce l’idée que ces deux météorites sont de même type.

4.2 Susceptibilité magnétique

Le premier test habituel, pour déterminer si une roche est une météorite, est de vérifier qu’elle attire un aimant (aimantation due à la présence de Fe-Ni). L’une des particularités des météorites lunaires est d’être faiblement aimantés. Nous l’avons vérifié avec un aimant néodyme assez puissant. De ce fait, et compte-tenu de leur structure, les météorites lunaires (surtout celles qui ont séjourné longtemps sur La Terre avant d’être découvertes) peuvent ne pas être reconnues comme des météorites par un non-spécialiste.

Une manière quantitative de déterminer la faculté d’aimantation d’une météorite est de mesurer sa susceptibilité magnétique. La valeur que nous avons obtenue pour chaque météorite est la moyenne de 3 séries de 20 mesures (donc 60 mesures au total) prises pour 3 orientations différentes et approximatives du détecteur (0°, 45° et 90°) pour tenir compte de la forte hétérogénéité de la météorite. La mesure que nous avons faite sur MS2 est en très bon accord avec une mesure

TABLE 2 – Densité et susceptibilité magnétique des météorites MS2 (NWA 5000) et MS3. Note : l'échantillon de MS2 en notre possession ayant une faible masse (0.85 g), l'incertitude sur la mesure est assez importante (25%).

Météorite	Densité		Susceptibilité magnétique ($\log_{10}(\chi (10^{-9} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}))$)	
	Mesure	Macke et al. [2011a]	Mesure	Macke et al. [2011a]
MS2 (NWA 5000)	2.57 ± 0.65	2.73 ± 0.07	3.40 ± 0.13	3.31 ± 0.12
MS3	2.72 ± 0.04	-	3.15 ± 0.1	-

effectuée par d'autres auteurs Macke et al. [2011a] (voir la Table 2). Aux incertitudes près, les mesures sur MS2 et MS3 sont très proches. De plus, ces valeurs se distinguent assez bien de la plupart des valeurs de susceptibilité magnétique des autres types de météorite. Ce résultat renforce donc l'idée que MS3 est une météorite lunaire. Voir la Figure 11 en annexe.

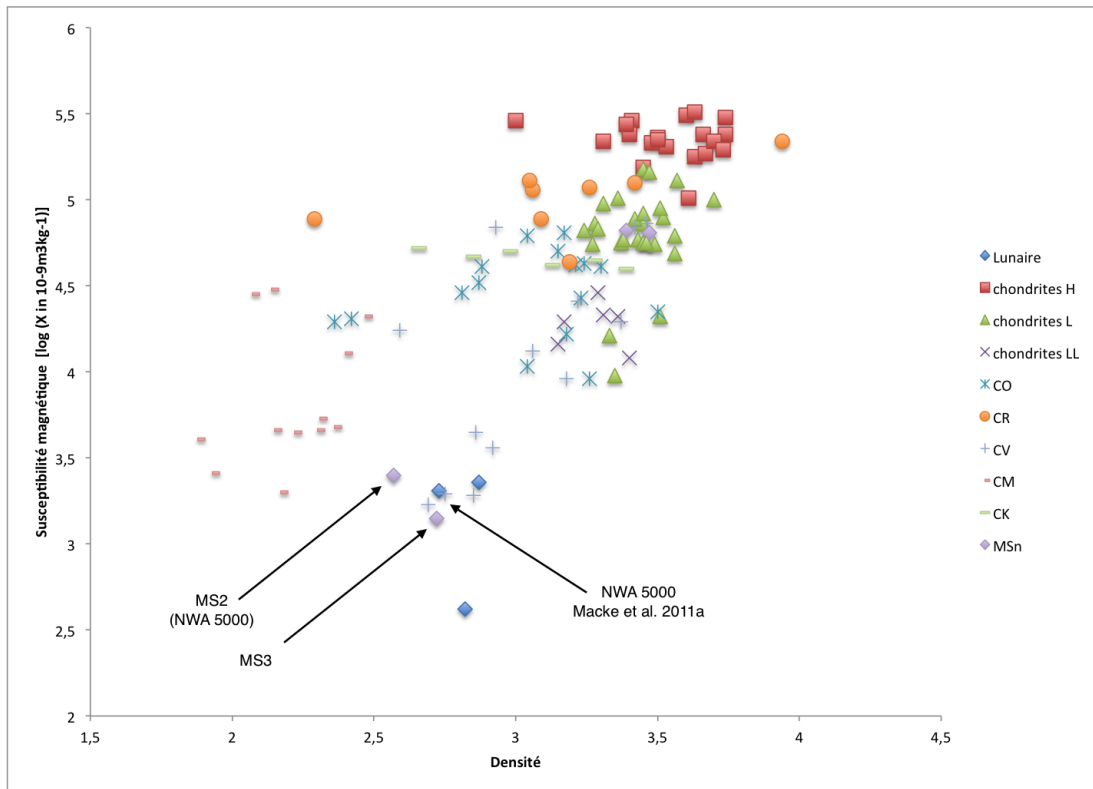


FIGURE 2 – Susceptibilité magnétique en fonction de la densité de plusieurs familles de météorites (données de Consolmagno et al. [2006], Macke et al. [2011a] et Macke et al. [2011b]). Comparaison avec les mesures que nous avons effectuées pour MS2 (NWA 5000) et MS3.

Quelques revues sur les densités et les susceptibilités magnétiques des différentes familles de météorites ont été publiées (voir Consolmagno et al. [2006], Macke et al. [2011a] et Macke et al. [2011b]). Sur la Figure 2, nous voyons que nos mesures pour MS2 et MS3 sont en accord avec d'autres mesures obtenues pour les météorites lunaires. A noter que la valeur de la susceptibilité magnétique de NWA 5000 que nous avons mesurée est en accord avec celle obtenue par Macke et al. [2011a] malgré la petite taille de notre échantillon qui est dominé par un claste blanc.

4.3 Analyse XRF

La première technique d’analyse que nous avons utilisée est la technique XRF qui présente l’avantage d’être rapide à mettre en oeuvre. Cette technique d’analyse permet de détecter les éléments les plus abondants dans les échantillons mais ne permet pas de déterminer leurs abondances en l’absence de calibration. Une autre limitation importante est qu’il n’est pas possible de détecter les éléments plus léger que Mg (Na est détectable s’il est présent en grande quantité). Comme nous analysions des échantillons de compositions inconnues, il n’était pas possible de faire cette calibration. Autre point important, les analyses XRF ont été effectuées sur des zones d’environ 5 mm de côté. Cela permet d’avoir une information moyenne mais ne permet pas de faire des mesures sur des clastes qui ont une taille millimétrique ou inférieure.

TABLE 3 – Liste des éléments détectés en XRF. Les éléments en gras correspondent à ceux pour lesquels le nombre de coups était très élevé (donc probablement plus abondants que les autres).

Energie	10 keV	30 keV
Elements détectés	Mg, Al , Si , S, Cl, K, Ca , Ti, V, Cr, Mn, Fe	Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Zr

Les résultats XRF sont donnés en nombre de coups. Ce nombre n’est pas directement proportionnel à l’abondance de l’élément mais il donne tout de même une indication intéressante sur la composition. Les éléments détectés pour les deux énergies utilisées sont donnés dans la Table 3.

Ainsi, les éléments abondants de la météorite MS3 sont Ca, Si, Al et Fe. L’analyse XRF permet aussi de faire des comparaisons entre échantillons de même nature. Bien que MS3 (probablement lunaire) et MS2 (lunaire) ne soient pas identiques aux chondrites MS1 et MS4, on obtient tout de même des informations intéressantes. On voit sur la Figure 3 que MS2 et MS3 sont très proches en terme de composition ainsi que les météorites MS1 et MS4. On remarque aussi que la météorite lunaire NWA 5000 est relativement différente des 2 chondrites. Cette comparaison montre donc, à l’exception des éléments K et Ti, que MS3 à une composition proche d’une météorite lunaire. On remarque aussi, que comparativement aux chondrites, les météorites lunaires sont pauvres en Fe et riches en Ca et Al.

4.4 Analyse EDS

La micro-analyse X par sonde électronique que nous avons utilisée donne les abondances relative (en nombre d’atomes) des éléments dans une zone qui peut aller de quelques millimètres à quelques micromètres. Plusieurs zones d’intérêt ont été choisies sur des critères visuels. En effet, on distingue, sur les faces intérieures de la météorite, des inclusions claires entourées d’une matrice sombre.

Cinq zones ont été analysées (voir la Figure 4). La taille de chaque zone est de 2,3 mm × 2,3 mm environ.

4.4.1 Comparaison avec la météorite lunaire NWA 5000

Puisque nous avons à notre disposition un petit échantillon de la météorite lunaire NWA 5000 (MS2), nous avons vérifié que la météorite MS3 est de même composition élémentaire. Pour cela, nous avons normalisé les abondances en masse de chaque élément (en ne gardant que les éléments significatifs) par rapport à l’abondance de l’élément Si (ce qui est couramment fait en astrophysique). Nous avons aussi choisi de comparer des zones qui visuellement s’apparentent à la matrice (zone A de MS3) et à une inclusion claire (zone B de MS3) sur les 2 météorites. Les

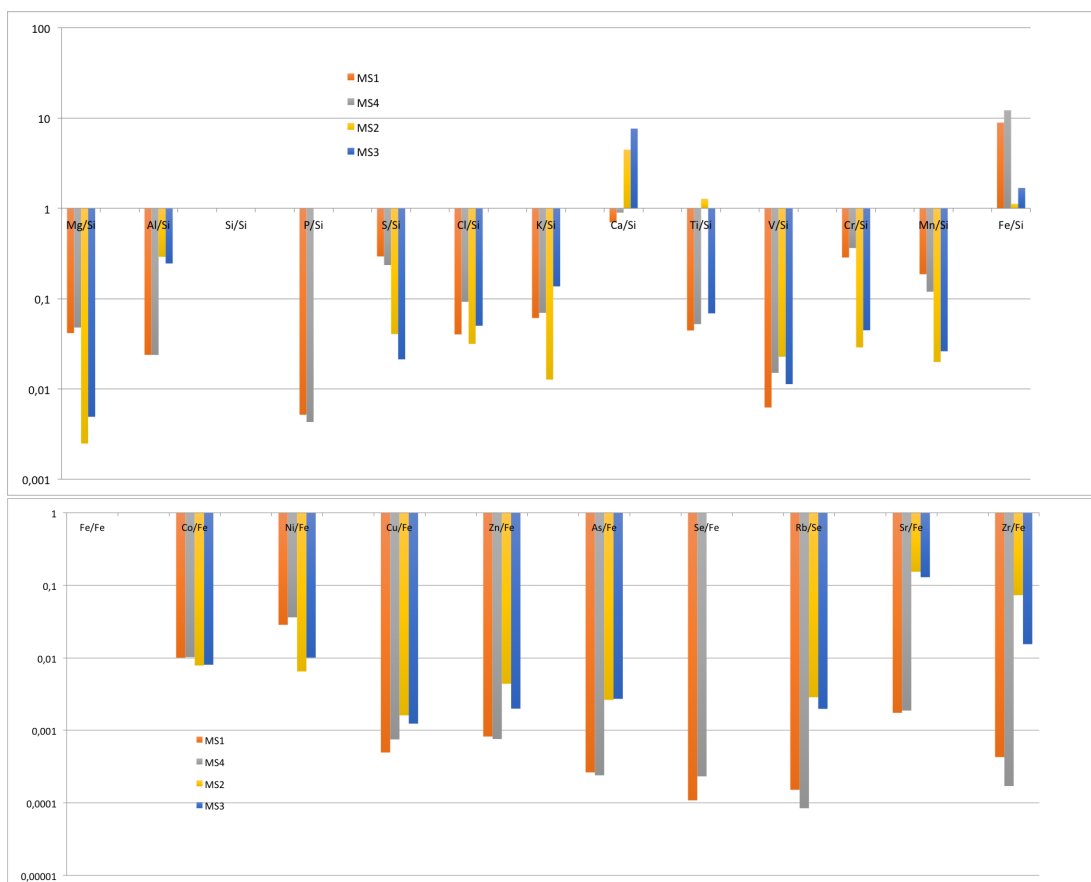


FIGURE 3 – Résultats XRF pour les météorites MS3, MS2 (météorite lunaire NWA 5000) et 2 chondrites (MS1 et MS4). Les valeurs correspondent au rapport du nombre de coups de chaque élément sur celui de Si (en haut) ou Fe (en bas). L'énergie d'activation pour le graphe du haut est de 10 keV et 30 keV pour le graphe du bas.

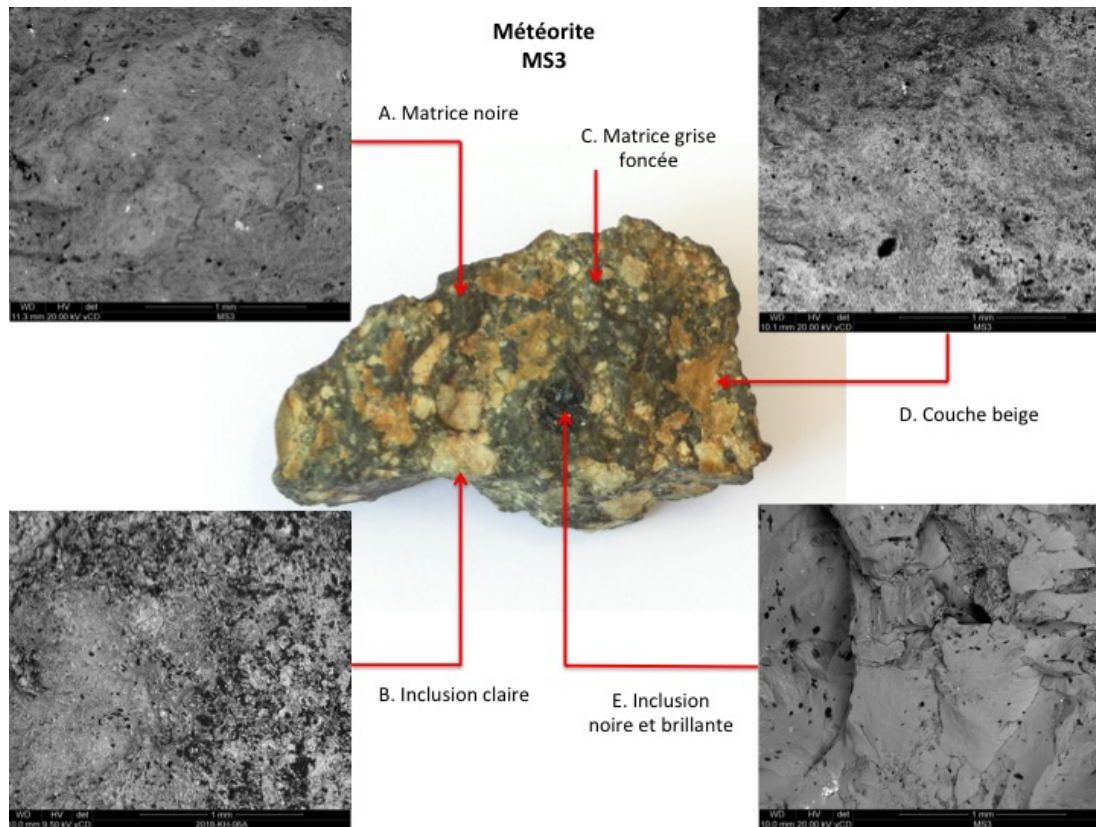


FIGURE 4 – Face de la météorite lunaire analysée en EDS. Cinq zones ont été analysées (A : matrice noire. B : inclusion claire. C : une autre zone de la matrice. D : couche beige. E : une inclusion noire et brillante. Pour les zones A, B, D et E, une photographie au microscope électronique est présentée.

	MS3-A (wt %)	MS3-B-FF (wt %)	MS3-C-RS (wt %)	MS3-D-FF (wt %)	MS3-E-FF (wt %)
C	11,28	23,55	5,16	17,34	12,35
O	43,69	37,05	40,03	47,19	41,31
Na	0,53	0,55	0,36	0,35	0,27
Mg	3,01	2,71	14,10	1,18	3,66
Al	11,44	9,28	2,82	3,59	11,19
Si	16,55	11,98	16,45	5,95	15,47
P	0,04	0,04	0,02	0,22	0,00
Hg	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00
S	0,09	0,17	0,05	0,15	0,10
Cl	0,31	0,49	0,09	0,22	0,14
K	1,12	0,86	0,52	1,13	0,34
Ca	7,34	10,01	4,00	20,88	11,32
Ti	0,21	0,18	0,19	0,16	0,17
V	0,03	0,00	0,07	0,00	0,04
Cr	0,09	0,09	0,19	0,05	0,15
Mn	0,07	0,07	0,24	0,00	0,11
Fe	3,91	2,68	15,03	1,38	3,08
Co	0,00	0,00	0,12	0,00	0,00
Ni	0,10	0,10	0,08	0,15	0,10
Ar	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00
Po	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00
Th	0,18	0,18	0,00	0,00	0,22
Ce	0,00	0,00	0,16	0,06	0,00
Total	99,99	99,99	100,00	100,00	100,02

FIGURE 5 – Abondances relatives (en masse) des éléments identifiés par EDS pour chacune des 5 zones. FF : Full Frame (l'ensemble de la zone a été analysée). RS : Reduced Scan (seule une partie de la zone a été analysée).

résultats sont présentés sur la Figure 5 pour les abondances et la Figure 6 pour la comparaison entre MS3 et NWA 5000.

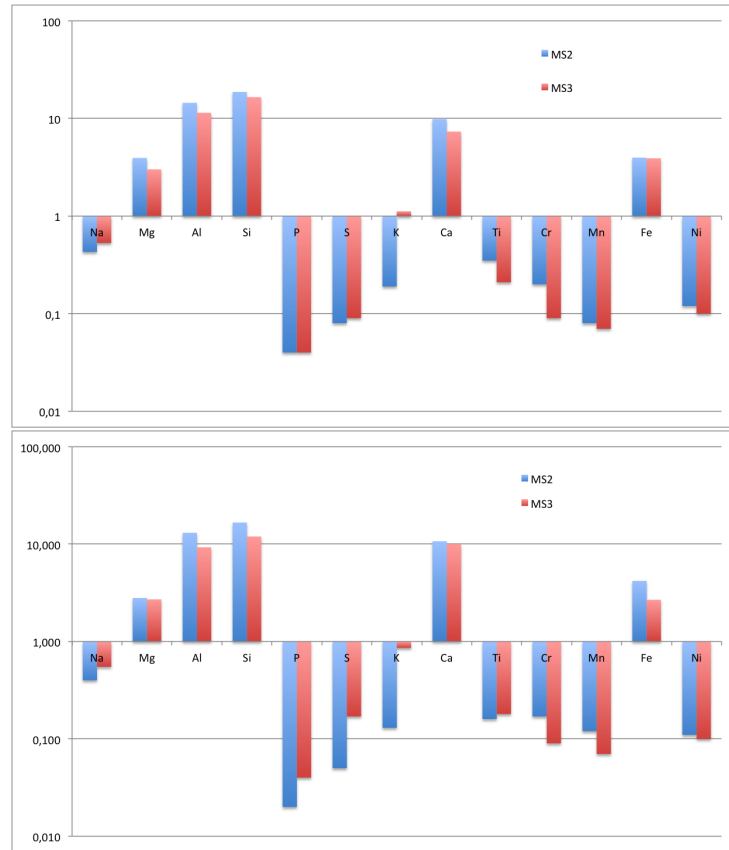


FIGURE 6 – Résultat des analyses EDS. Comparaison des abondances relatives (en masse) pour la météorite MS3 et la météorite lunaire NWA 5000 (MS2). Le graphique du haut correspond aux abondances obtenues à partir de la zone A de MS3 et une zone sombre de MS2. Le graphique du bas correspond aux abondances obtenues à partir de la zone B de MS3 et une zone claire de MS2.

Nous remarquons que les 2 météorites ont globalement la même composition (notez l'échelle logarithmique en ordonnée). La différence majeure concerne l'élément K qui est près de 10 fois plus grand pour MS3 que pour NWA 5000.

L'abondance de Fe que nous trouvons dans NWA 5000 est en accord avec les travaux de R. L. Korotev³. En effet, il a trouvé que l'abondance relative totale de Fe (présentée sous la forme de FeO en masse) est de 5,7% alors que nous trouvons pour les zones A et B des abondances relatives totales de 5,11% et 5,4% respectivement.

4.4.2 Présence de feldspath potassique ?

Il existe trois types de météorites lunaires :

- les feldspathiques, qui correspondent aux hauts plateaux de La Lune. Ce sont les plus répandues des météorites lunaires,
- les basaltiques correspondant aux mers lunaires,
- les intermédiaires.

3. La base de données sur les météorites lunaires de R. L. Korotev est disponible à l'adresse suivante : http://meteorites.wustl.edu/lunar/moon_meteorites_list_alumina.htm.

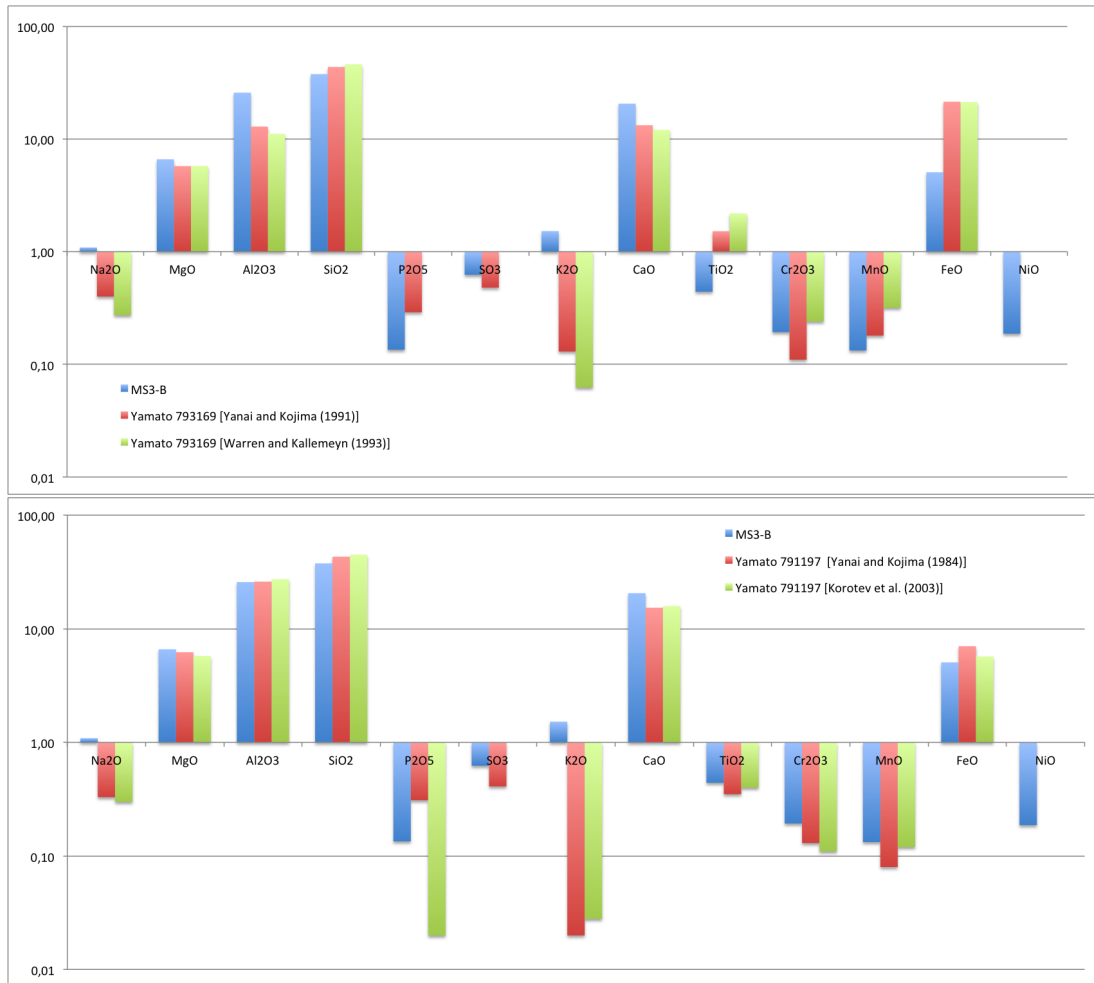


FIGURE 7 – Résultat des analyses EDS. Comparaison des abondances relatives (en masse) des oxydes normalisées à 100% pour la zone B de la météorite MS3 et deux météorites lunaires. La météorite "Yamato 793169" est une lunaire de type basaltique et la météorite "Yamato 791197" est de type feldspathique.

L'analyse chimique permet de faire une première comparaison entre les deux types principaux. A partir des abondances relatives en masse (Figure 5), nous avons calculé l'abondance relative des oxydes correspondants aux principaux éléments présents et nous avons normalisé l'ensemble pour avoir un total de 100%. Nous avons ensuite comparé ces abondances avec des résultats publiés pour 2 météorites lunaires : la météorite "Yamato 793169" qui est une lunaire de type basaltique et la météorite "Yamato 791197"⁴ qui est de type feldspathique. La comparaison est présentée sur la Figure 7.

Les abondances élémentaires de la météorite MS3 (du moins la zone B) sont en bon accord avec deux analyses effectuées sur la météorite feldspathique "Yamato 791197" (voir Yanai and Kojima [1984], Korotev et al. [2003]). L'accord est moins bon pour la météorite basaltique "Yamato 793169", principalement pour Fe, Al et Ti. Cependant, une différence notable s'observe pour les éléments Na et K qui sont bien plus abondants dans MS3 par rapport à "Yamato 791197". Nous avons regardé les abondances en K de plusieurs météorites lunaires dans la littérature et aucune ne semble présenter cette abondance relativement élevée en K. Une explication pourrait être la non-représentativité de la zone que nous avons étudiée. Cependant, la différence entre MS2 et MS3 pour l'élément K est nette aussi en XRF et dans ce cas la zone analysée fait près de 0.5 cm × 0.5 cm ; ce qui limite le rôle potentiel de l'hétérogénéité.

4.5 Analyse Raman

Une analyse Raman assez rapide a été effectuée sur chacune des 5 zones présentées ci-dessus. Nous avons testé l'homogénéité de chaque zone en faisant quelques points mais l'analyse montre que nous avons raté un certain nombre de minéraux.

Les résultats sont les suivants :

- La matrice noire, zone A, présente du carbone (C) graphite et amorphe (ou désordonné), de l'enstatite (MgSiO_3) et de la forstérite (Mg_2SiO_4). Voir la Figure 8.
- Le claste blanc, zone B, serait composé de feldspaths plagioclases ($(\text{K,Na,Ca})(\text{Al,Si})_4\text{O}_8$) et de forstérite (Mg_2SiO_4).
- La matrice gris foncé, zone C, présente du feldspath plagioclase ($(\text{Na,Ca})(\text{Al,Si})_4\text{O}_8$), de l'enstatite (MgSiO_3), de la forstérite (Mg_2SiO_4), de l'hématite (Fe_2O_3) et potentiellement de l'ilménite (FeTiO_3).
- La couche beige, zone D, contient de la calcite (CaCO_3). Voir la Figure 9. La calcite est un minéral rare dans les météorites. Il correspondrait donc à un élément terrestre qui se serait formé sur la météorite lors de son séjour sur La Terre par l'action de l'eau et de l'air. R. Robotov, spécialiste des météorites lunaires, dit que les météorites qui ont séjourné longtemps dans les déserts chauds sont souvent contaminées par des calcites.
- L'inclusion noire et brillante, zone E, présente de la labradorite ($(\text{Na,Ca})(\text{Al,Si})_4\text{O}_8$) et de la monticellite (CaMgSiO_4) qui est une olivine.

Ainsi, dans la zone A, nous avons trouvé de la forstérite (Mg_2SiO_4) et de l'enstatite (MgSiO_3) qui sont des minéraux de magnésium. L'analyse EDS nous montre que cette zone est riche aussi en Al et Na. Il est donc fort probable que nous ayons raté⁵ d'autres minéraux comme des plagiocalses que l'on retrouve dans la zone B. Cette zone présente une composition élémentaire identique à la zone A. La présence de carbone peut être liée à la composition de la météorite elle-même, ou être une pollution terrestre comme la calcite.

4. "Yamato 791197" et "Yamato 793169" sont les deux premières météorites lunaires à avoir été trouvées (en 1979, près des montagnes Yamato en Antarctique). Les scientifiques ne comprirent pas aussitôt que ces objets venaient de La Lune.

5. Nous étions pris par le temps pour faire cette analyse et les spots d'analyse Raman sont de très petite taille, il est donc possible de passer à côté de certaines phases minérales.

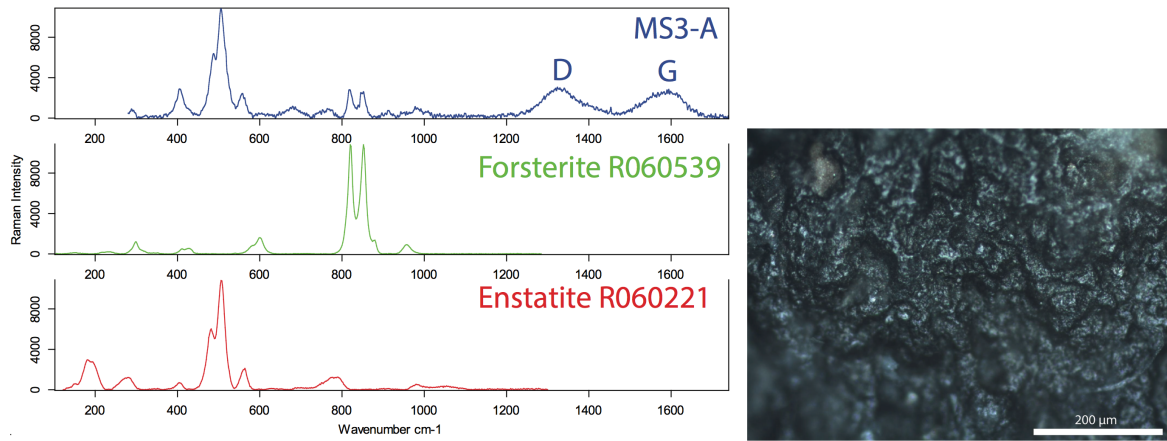


FIGURE 8 – A gauche : spectre Raman d'un point de la matrice (zone A) de MS3. Le spectre mesuré du haut dévoile la présence de carbone (désordonné et graphite), de la forstérite (Mg_2SiO_4) et de l'enstatite ($MgSiO_3$) par comparaison avec les spectres Raman de référence de ces minéraux. A droite : photographie au microscope de la zone analysée.

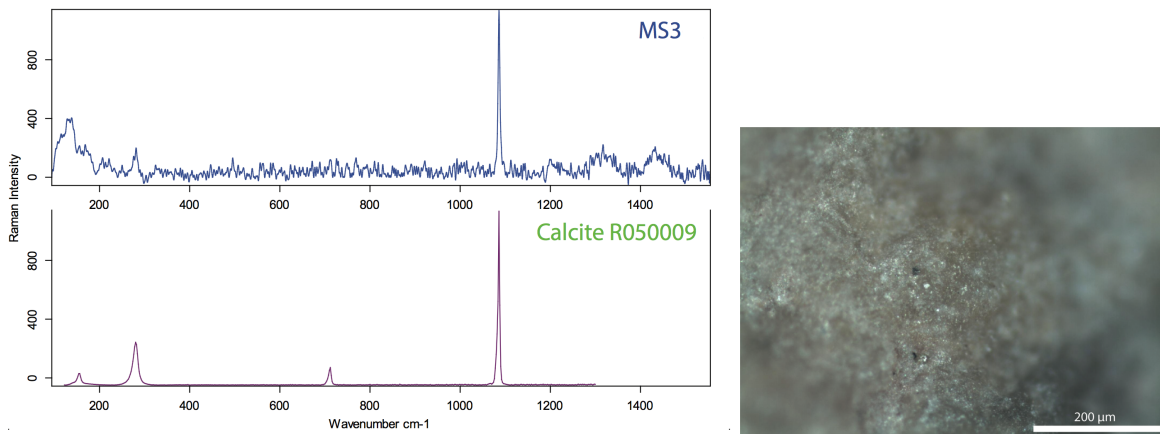


FIGURE 9 – A gauche : spectre Raman d'un point de la couche qui semble superficielle (zone D) de MS3. Le spectre mesuré du haut montre la présence de la calcite ($CaCO_3$) par comparaison avec le spectre Raman de référence. A droite : photographie au microscope de la zone analysée.

Dans la zone B, nous avons détecté du feldspath plagioclase $((\text{Na,Ca})(\text{Al,Si})_4\text{O}_8)$ et de la forstérite $(\text{Mg}_2\text{SiO}_4)$. Voir la Figure 14 présentant le groupe des feldspaths. Ainsi, les éléments les plus abondants détectés en EDS comme Al, Ca et Mg (en plus de Si et O évidemment) sont bien représentés dans ces minéraux. Ils expliqueraient aussi la présence de Na. L'élément K pourrait provenir de feldspaths alcalins $(\text{Na}_x\text{K}_{1-x}\text{AlSi}_3\text{O}_8)$, notamment l'orthose (KSi_3O_8) . Le fer (Fe), dernier élément relativement abondant, pourrait provenir de la fayalite $(\text{Fe}_2\text{SiO}_4)$, le pôle pur ferreux de l'olivine (la forstérite étant le pôle pur magnésien de l'olivine).

4.6 Minéralogie lunaire et météorites lunaires

D'après R. L. Korotev⁶, il n'y a principalement que 4 minéraux à la surface de La Lune (représentant 98-99% du total) : du feldspath plagioclase $(\text{Na}_x\text{Ca}_{1-x}\text{Al}_{2-x}\text{Si}_{2+x}\text{O}_8)$, du pyroxène $(\text{XY}(\text{Si,Al})_2\text{O}_6)$, de l'olivine et de l'ilménite (FeTiO_3) . Le reste (1-2%) est dominé par des feldspaths potassiques et des minéraux oxydés. La composition des météorites lunaires est en accord avec la minéralogie lunaire (voir la Figure 12). D'après Korotev (voir son site internet), les météorites dont la composition en Al_2O_3 et FeO ne se trouve pas sur la courbe que l'on devine sur la Figure 12 ne sont très probablement pas des météorites lunaires.

Pour MS3, l'abondance relative en masse de Al_2O_3 est de 21,6 % et 5,03 % pour FeO pour la zone A et 21,14 % et 3,96 % respectivement pour la zone E. Ces deux couples de valeurs ne se trouvent pas très loin de celles des météorites lunaires feldspathiques de cette figure qui ont des abondances relatives en masse de Al_2O_3 supérieures à 25 %. La différence avec les valeurs mesurées dans les autres météorites lunaires et le sol lunaire pourrait avoir plusieurs causes : (1) la forte hétérogénéité de la météorite (les abondances en Al_2O_3 varient beaucoup d'un point à l'autre de la météorite) et le faible nombre de mesures effectuées ; (2) une altération importante de la météorite lors de son séjour à la surface de La Terre ; (3) son origine. En effet, l'impact qui a été à l'origine de cette météorite a peut-être eu lieu dans une région lunaire très différente de celle explorée par les sondes *Apollo* et *Luna*. Il est cependant remarquable que toutes les météorites analysées à ce jour correspondent parfaitement aux échantillons lunaires rapportés sur La Terre.

Pour aller plus loin dans la comparaison avec les météorites lunaires, les abondances relatives en masse de quelques éléments importants sont donnés dans la Table 4. Ces valeurs doivent être comparées à celles présentées sur la Figure 13. Pour tous les éléments, on trouve un très bon accord avec les météorites lunaires feldspathiques, à l'exception de Na dont l'abondance est un peu plus élevée.

TABLE 4 – Abondances relatives en masse obtenues à partir des analyses EDS pour la zone A de la météorite MS3.

Elément (ou rapport)	CaO/ Al_2O_3	MgO/FeO	MnO	Na ₂ O	TiO ₂	FeO
Abondance relative en masse (%)	0,48	0,99	0,09	0,71	0,35	5,03

5 Conclusion

L'étude des météorites lunaires présente un intérêt scientifique à plus d'un titre. Les impacts qui sont responsables de leur origine ont pu avoir lieu n'importe où sur La Lune, sur la surface visible comme sur la surface cachée, ainsi que de régions très différentes de celles qui ont été visitées par les sondes américaines et soviétiques. Chaque météorite lunaire nous donne des informations supplémentaires sur La Lune.

6. Voir son site web : <http://meteorites.wustl.edu/lunar/>

L'objectif de cette étude était de vérifier que MS3 est bien une météorite lunaire sans altérer la météorite (pas de coupe pour faire des lames minces par exemple). Elle présente en effet toutes les caractéristiques d'une météorite lunaire (dans la limite des analyses que nous avons interprétées) par comparaison avec la météorite lunaire NWA 5000. Nous notons cependant une différence pour le potassium (K) et le sodium (Na). Cette météorite provient donc peut-être d'une autre région de La Lune que celles visitées par les sondes *Apollo* et *Luna*.

L'analyse Raman a malheureusement été effectuée trop rapidement et nous n'avons très probablement pas détecté tous les minéraux. L'obtention d'une carte Raman permettrait d'être exhaustif sur la minéralogie d'une zone.

Pour dire avec certitude que la météorite MS3 est d'origine lunaire, il faudrait mesurer les abondances isotopiques de certains éléments (hydrogène (H), oxygène (O), gaz rares). Les rapports isotopiques de ces éléments sont identiques dans les météorites lunaires et le sol lunaire. Ils sont différents des roches terrestres. Malheureusement, nous n'avons pas eu encore l'opportunité de faire une analyse isotopique, sachant que nous souhaitons utiliser une technique non destructive⁷.

Remerciements

Un grand merci à Mathieu Sudre, collectionneur de météorites, pour nous avoir prêté ses précieuses météorites pour toute la durée du stage. Merci à tous ceux qui ont rendu ce stage possible en nous permettant de réaliser toutes les expériences dont nous avons besoin : P. Bégasse (technicien de l'Université de Bordeaux) pour la réalisation de l'expérience de la double pesée ; L. Rossignol (responsable technique du pôle PALEO du laboratoire EPOC) pour nous avoir prêté une loupe binoculaire et pour toutes les informations utiles qu'elle nous a fournies.

Nous sommes ouverts à toutes les critiques constructives et toutes les informations qui pourraient améliorer cette étude du point de vue de l'analyse des résultats et de leur interprétation.

Références

- Harold C. Connolly, Caroline Smith, Gretchen Benedix, Luigi Folco, Kevin Righter, Jutta Zipfel, Akira Yamaguchi, and Hasnaa Chennaoui Aoudjehane. The Meteoritical Bulletin, No. 93, 2008 March. *Meteoritics and Planetary Science*, 43(3) :571–632, Mar 2008. doi : 10.1111/j.1945-5100.2008.tb00673.x.
- G. J. Consolmagno, R. J. Macke, P. Rochette, D. T. Britt, and J. Gattacceca. Density, magnetic susceptibility, and the characterization of ordinary chondrite falls and showers. *Meteoritics and Planetary Science*, 41(3) :331–342, Mar 2006. doi : 10.1111/j.1945-5100.2006.tb00466.x.
- Randy L. Korotev, Bradley L. Jolliff, Ryan A. Zeigler, Jeffrey J. Gillis, and Larry A. Haskin. Feldspathic lunar meteorites and their implications for compositional remote sensing of the lunar surface and the composition of the lunar crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67 : 4895–4923, Dec 2003. doi : 10.1016/j.gca.2003.08.001.
- B. Lafuente, R. T. Downs, H Yang, and N Stone. The power of databases : the RRUFF project. In *Highlights in Mineralogical Crystallography*, pages 1–30. T. Armbruster and R. M. Danisi, Berlin, w. de gruyter edition, 2015.
- R. J. Macke, D. T. Britt, W. S. Kiefer, A. J. Irving, and G. J. Consolmagno. Porosity, Magnetic Susceptibility and Density of Lunar Meteorites. *Meteoritics and Planetary Science Supplement*, 74 :5093, Sep 2011a.

7. Le propriétaire de la météorite ne voit pas d'un bon oeil qu'on l'abîme.

- Robert J. Macke, Guy J. Consolmagno, and Daniel T. Britt. Density, porosity, and magnetic susceptibility of carbonaceous chondrites. *Meteoritics and Planetary Science*, 46(12) :1842–1862, Dec 2011b. doi : 10.1111/j.1945-5100.2011.01298.x.
- L. Saint George. *Rapport de stage de M1 : analyse multi-techniques de météorites chondritiques et lunaires*. Université de Bordeaux, 2019a. doi : 10.13140/RG.2.2.12103.85925.
- L. Saint George, M. Dobrijevic, A. Le Postollec, and Londeix. *Mesure de la densité de plusieurs météorites*. Université de Bordeaux, 2019b. doi : 10.13140/RG.2.2.11523.04640.
- L. Saint George, M. Dobrijevic, A. Le Postollec, L. Londeix, I. Billy, Y. Anguy, C. Gaborieau, and A. Duphil. *Analyses préliminaires de la météorite lunaire NWA 5000*. Université de Bordeaux, 2019c. doi : 10.13140/RG.2.2.36688.87046.
- F. Tuinstra and J. L Koenig. Raman Spectrum of Graphite. *The Journal of Chemical Physics*, 53(3) :1126–1130, August 1970. ISSN 00219606. doi : 10.1063/1.1674108.
- Keizo Yanai and Hideyasu Kojima. Yamato-791197 : A lunar meteorite in the Japanese collection of Antarctic meteorites. *National Institute Polar Research Memoirs*, 35 :18, Dec 1984.

Annexe : figures supplémentaires

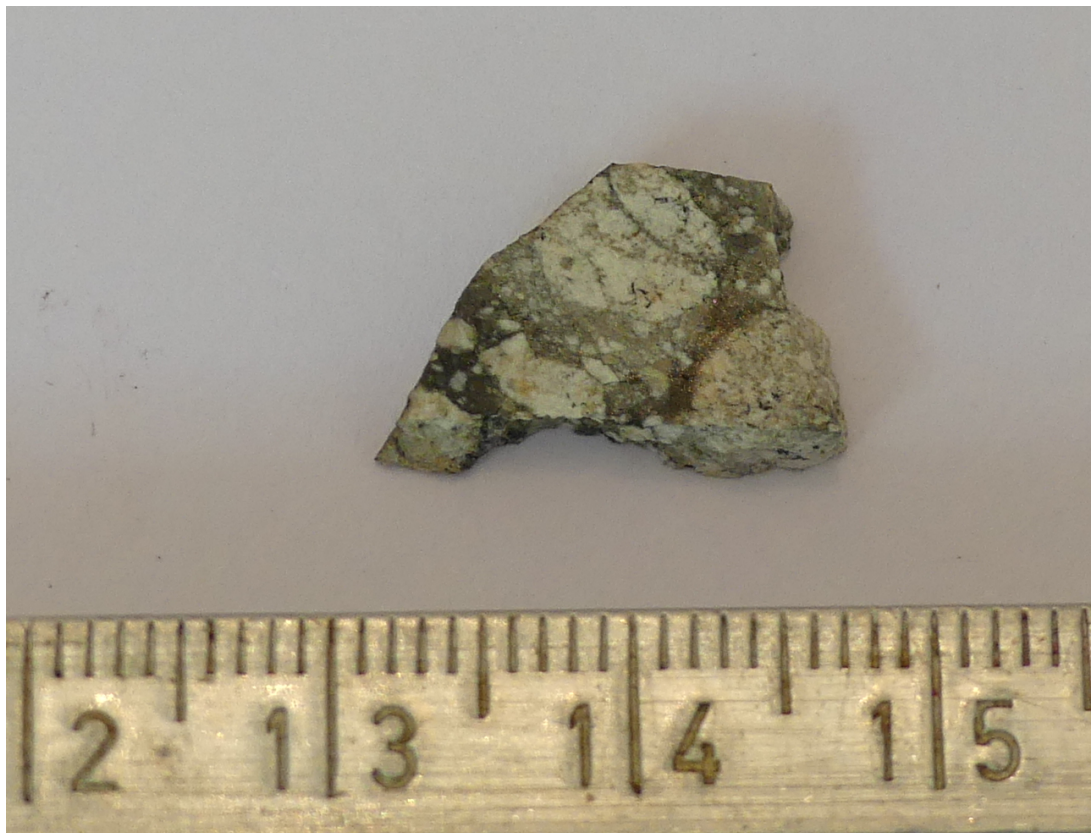


FIGURE 10 – Photographie de la météorite lunaire NWA 5000 (alias MS2 dans cette étude) que nous avons utilisée pour les différentes mesures et la comparaison avec MS3. Elle a été trouvée au sud du Maroc en 2007 (voir "The Meteoritical Bulletin, No. 93" Connolly et al. [2008]).

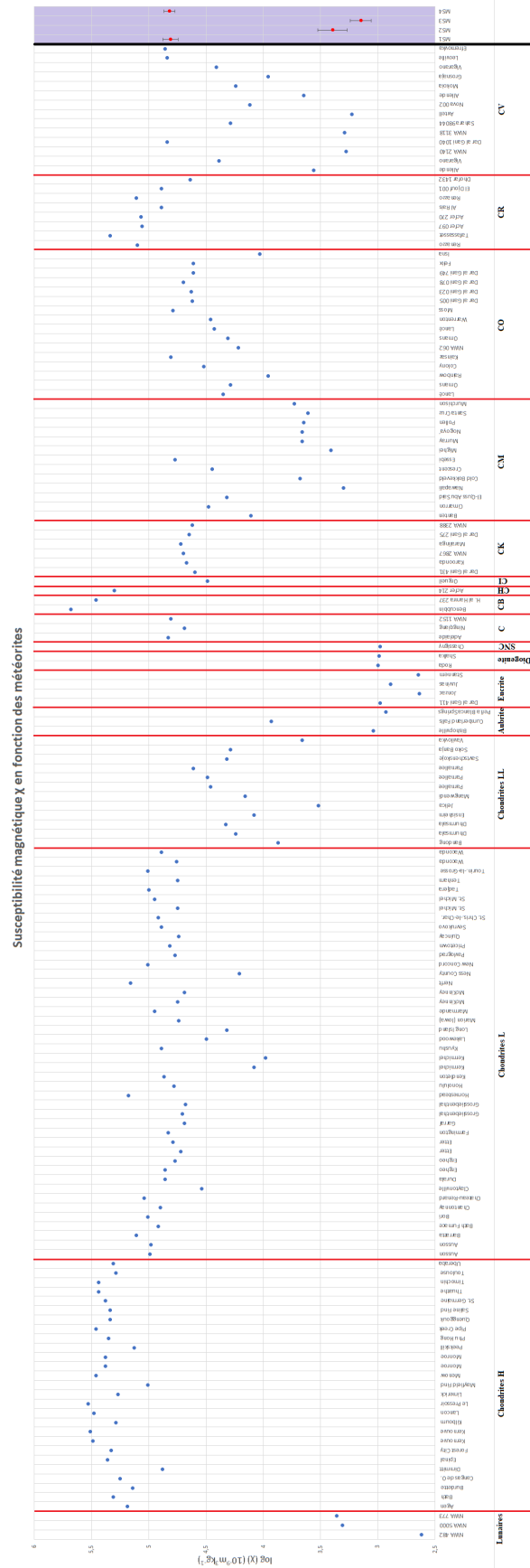


FIGURE 11 – Susceptibilité magnétique des météorites que nous avons mesurées (partie colorée) et comparaison avec celles trouvées dans la littérature Macke et al. [2011a,b], Consolmagno et al. [2006].

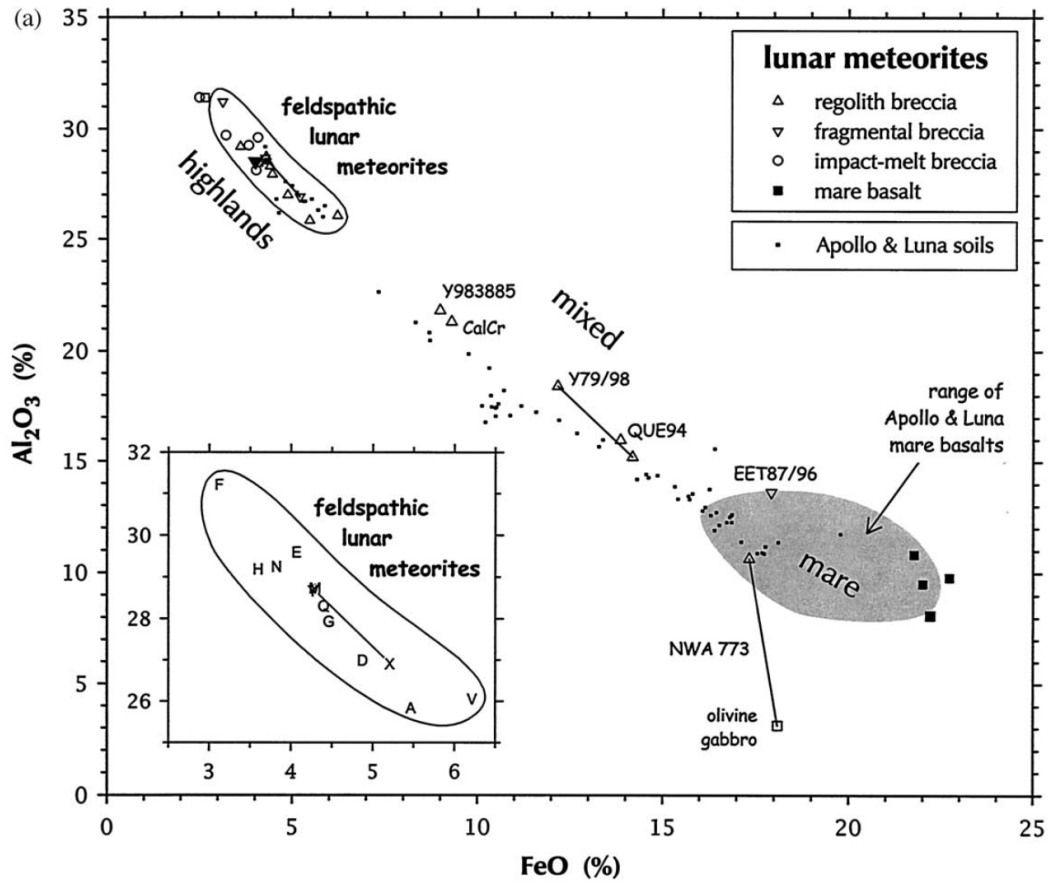


FIGURE 12 – Composition en Al_2O_3 et FeO du sol lunaire et des météorites lunaires connues. Les points avec une faible abondance de FeO (3-5 %) et une grande abondance de Al_2O_3 (25-30 %) correspondent aux hauts plateaux feldspathiques de La Lune. Figure tirée de l'article Korotev et al. [2003].

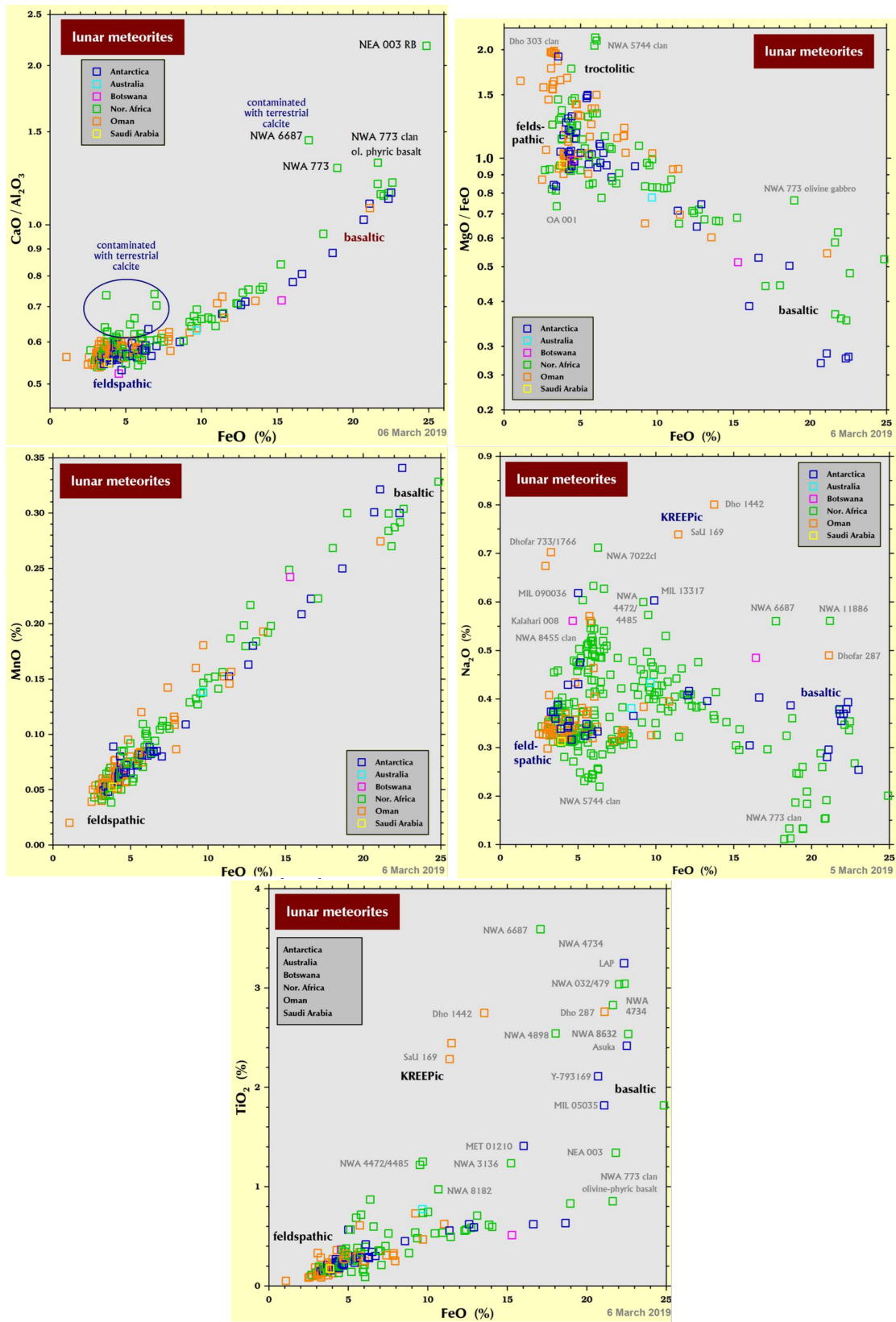


FIGURE 13 – Abondances relatives de CaO/Al₂O₃, MgO/FeO, MnO, Na₂O et TiO₂ en fonction de FeO en masse (en %). Figures provenant du site de R. Korotev.

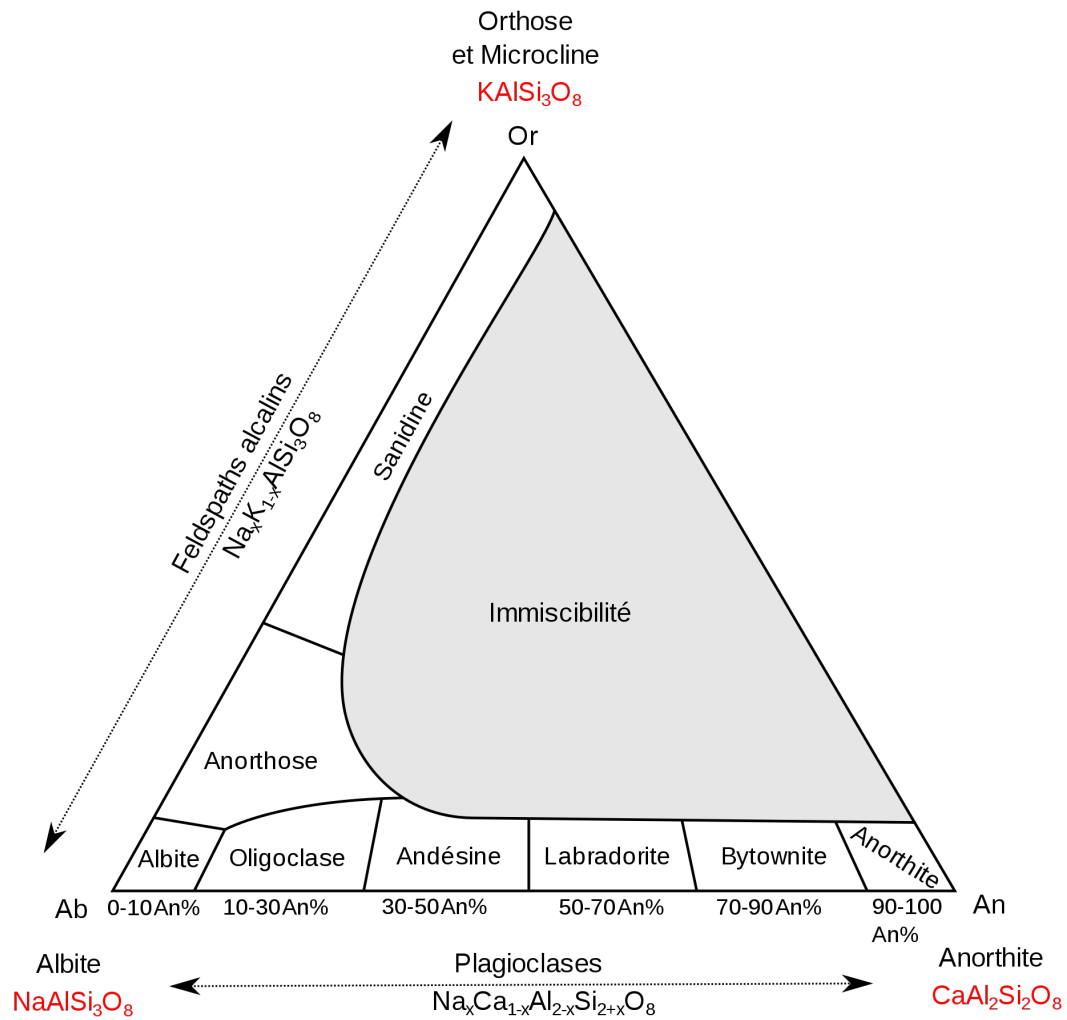


FIGURE 14 – Gammes de composition de la série des feldspaths (à 900 °C). Dans la zone marquée "Immiscibilité" on n'observe pas à l'équilibre un minéral homogène, mais la coexistence d'un plagioclase et d'un feldspath alcalin. Figure et légende adaptée par Ariel Provost d'après N. N. Greenwood et A. Earnshaw (1998). Chemistry of the Elements, p. 357. Source Wikipedia.