

Méthodologie d'étude des météorites du Maroc

Methodology of studying meteorites from Morocco

Nawel LAROUCI^{1*}, Hassna CHENNAOUI AOUJJEHANE¹ & Albert JAMBON²

1. Université Hassan II Casablanca, Faculté des Sciences Ain Chock, Laboratoire GAIA, Equipe : patrimoine géologique du Maroc
(*laroucinawel@gmail.com).

2. Université Pierre et Marie Curie, IStEP UMR 7193, Paris, France.

Résumé. La contribution scientifique des météorites provenant du Maroc est sans égal. Leur classification a été une réponse à une nécessité commerciale plus qu'à des considérations scientifiques. Développer une méthodologie éthique et scientifique pour l'étude de ces objets extraterrestres apparaît aujourd'hui comme une nécessité. Il convient de lutter contre les classifications approximatives des météorites provenant du Maroc en général, et la nomenclature «Northwest Africa (NWA)» en particulier. La méthodologie d'étude des météorites du Maroc, proposée dans ce travail comprend trois étapes : 1) Collecte d'informations sur le terrain suivant un questionnaire détaillé. Cette étape est indispensable pour toute étude de chute ou trouvaille, elle renseigne sur l'observation éventuelle d'un bolide, ainsi qu'un certain nombre de critères concernant l'échantillon collecté. Ces informations sont nécessaires pour l'attribution du nom de lieu officiel à toute météorite étudiée. 2) Etude pétrographique et géochimique de l'échantillon : cette étape fondamentale, permet la classification de la météorite. 3) Déclaration de l'échantillon auprès du comité de nomenclature (NomCom) de la «Meteoritical Society», avec des coordonnées précises et un nom de lieu, afin d'officialiser la météorite sur le plan scientifique international et de contribuer à l'enrichissement de la production scientifique qui les concerne. Le NomCom a la responsabilité de soutenir une démarche de documentation solide pour toute nouvelle trouvaille. Les scientifiques ont la responsabilité de léguer aux générations futures un patrimoine aussi bien documenté que possible.

Mots-clés : Météorites, pétrographie, géochimie, classification, déclaration, Maroc.

Abstract. The scientific input of meteorites from Morocco is outstanding. Their classification was a response to commercial needs than scientific considerations. We are concerned by developing an ethical and scientific study protocol of meteorites recovered in Morocco. The Northwest Africa (NWA) nomenclature has accepted the absence of documentation for numerous meteorites from Morocco. In this paper, we present an ethical and scientific methodology to the study of these extraterrestrial objects in order to avoid approximate classifications of meteorites from Morocco, especially the Northwest Africa (NWA) nomenclature. The recommended approach consists of three steps: 1) Collection of field information, following a detailed question list: This step is the essential for any falls or finds of meteorites. It provides information on the possible observation of a meteor, and on a number of criteria, that concern the collected sample, 2) Petrographic and geochemical study of the sample. This fundamental step allows the classifications of the meteorite, 3) Declaration of the meteorite sample with precise coordinates and location name to the Nomenclature Committee (NomCom) of the Meteoritical Society, in order to formalize internationally the new founded meteorite, and contribute to the enrichment of the scientific production related to this meteorite. The NomCom should support and promote every attempt to secure the scientific documentation of new finds in Morocco, and scientists are responsible to hand for future generations, as possible as they can, an accurate scientific documentation of the finds.

Keywords : Meteorites, petrography, geochemistry, classification, declaration, Morocco.

Abridged English version

Introduction

Morocco is the country where the largest share of meteorites has been found, particularly the rare types. Therefore, they are highly coveted by collectors and scientists around the world. In the absence of stringent laws, the anarchic exploitation of these "stones falling from the sky" accelerates the loss of the geoheritage of Moroccan meteorites. Also, beyond the interest and scientific curiosity aroused by meteorites, collecting these space rocks appears to be an important source of income for some hunters and traders. For these reasons, it becomes necessary to develop a protocol for the study of meteorites from Morocco to line up with the scientific progress in this area.

History and study of meteorites from Morocco

The Moroccan territory is a privileged place for collection of meteorites due to its extended desert area through which, Morocco has become one of the richest

countries in the world in terms of meteorites finds. Up to date, many falls and finds were collected and studied. They delivered and continue to deliver an invaluable amount of information about the origin and evolution of our solar system. We can separate meteorites «falls» (with eye-witnesses) from «finds».

All meteorites from Morocco and surrounding countries are named after the acronym Northwest Africa «NWA», followed by a number (Grossman 2000; Chennaoui *et al.* 2013, 2014).

Currently, there are over 8058 NWA meteorites and only 978 were recognized from Morocco (Meteoritical Bulletin Database, February 02, 2015). Only 25 finds from Morocco carry a locality name. There are also 11 witnessed falls from Morocco, classified mostly by our laboratory.

A number of meteorites from Morocco are of great scientific value, among those:

- The observed falls: Tissint, Martian meteorite Shergottite type (Chennaoui Aoudjehane *et al.* 2012), and

Tirherth, Eucrite type. Several falls of ordinary chondrites were also observed: Benguerir (Chennaoui Aoudjehane *et al.* 2006a) and Tamdakht (Chennaoui Aoudjehane *et al.* 2009a). However, there are observed falls where no samples have been recovered, like the fall of the November 15, 2009 in Nzala region (Eastern Region of Morocco).

- Finds of achondrites: Oued Awlitis 001 one of the 86 out of 202 lunar meteorites, 670 of 1550 HEDs (e.g. Barrat *et al.* 2003), 17 out of 23 recorded angrites (e.g. Jambon *et al.* 2005, 2008), 171 out of 395 Ureilites (e.g. Le Guillou *et al.* 2010) and 83 out of 144 Martians meteorites: among those NWA 7034 (Agee *et al.* 2013; Jambon *et al.* 2002, 2003, 2010; Sautter *et al.* 2006).

The study of meteorites from Morocco consists in several steps ranging from: collecting information on the field, to the classification and reporting to the Nomenclature Committee (NomCom) of the Meteoritical Society (MetSoc, www.meteoriticalsociety.org/). The rare types of meteorites are subject to more insightful research.

Falls: Eyewitness / geographic coordinates

Collecting field information is of utmost importance, considering the significant number of falls and the poor treatment of those submitted as NWA. Some samples are still considered in the database as finds, not falls. A questionnaire concerns a number of key criteria including: contact details of the witness, date, place and direction of the fall, height and color of the bolide, potential obstacles to the end of observation, noises heard, as well as other questions related to the observation of the phenomenon to finally find the exact coordinates of the fall. One key measurement is short-lived radiogenic isotopes, which is the only unambiguous way to prove a recent fall.

Petrographic, geochemical study and classification of a meteorite

In the field, it is possible to recognize the major minerals, using a lens. The vast majority of minerals in meteorites are also present in terrestrial rocks. Stony meteorites (chondrites and achondrites) consist mainly of olivine, pyroxene, plagioclase and opaque phases, oxides or sulfides (e.g. Fe-Ni alloy, chromite and troilite). Occasional phases are hydrated phyllosilicates and carbonates. Meteorites are classified, according to their texture, chemical composition, degree of oxidation-reduction and therefore their mineralogical composition (Rubin 1997a, 1997b). Techniques used are Electron Micro-Probe Analyser (EMPA), Scanning Electron Microscope (SEM), Transmission Electron Microscopy (TEM), Raman spectroscopy, X-ray diffraction, isotopic analysis...

The first determination is made in the field by the finder himself, who most of the time obtains a fair assessment of the meteorite value. The second stage is the identification by scientists (with SEM and EMPA, mostly) and the third

stage is the classification. The classification of most meteorites is straightforward (Fig. 1), however a small number of the finds is problematic. Discrimination between some achondrites and terrestrial rocks is sometimes difficult and time consuming. In particular, recognition new meteorite types that usually correspond to the most valuable finds (both scientifically and economically) must definitely be accurate. A such example is identifying a Martian rocks with non-Martian oxygen isotopes, like NWA 7034.

The Meteoritical Bulletin (Met Bull) Publication

The publication of a new find of meteorite is of great importance for scientists and for dealers, especially when the meteorite is of an important economical value. This is a necessary step after studying a new meteorite (fall or find) that should be done as quickly as possible. The declaration should be submitted to the NomCom as an excel spreadsheet listing different criteria (place of collect, petrography, geochemistry, weight and number of pieces collected...). The proposed name of the new meteorite is one of the problems for which our laboratories have been struggling in recent years. The acronym "NWA" has been granted for a large number of finds, since their coordinates are imprecise (a practice introduced in 2000: Grossman 2000, Chennaoui *et al.* 2013, 2014).

Geographic names are preferable whenever coordinates are provided. All hunters, dealers and scientists must be encouraged to document the find location. NWA should be understood as a rubble pile for people unable to work properly. Giving NWA numbers to documented finds is a disaster because it does not make difference between fraudulent finds (i.e. exported from places where collecting meteorites is illegal) and valuable finds with proper documentation. In addition, having reliable find coordinates is important for sample pairing, in the case of rare finds (typically, lunar, martian, rare achondrites ungrouped or not, rare chondrites...).

The NomCom has a crucial responsibility in the meteorite nomenclature. It must realize that the NWA nomenclature as it is presently used is not satisfactory.

Conclusion

The great majority of meteorites from Morocco have been classified under the acronym NWA. This practice encourages the absence of documentary work. The current impossibility to classify a documented meteorite otherwise than under the NWA acronym (or its DCA avatars) in contrast to what happens in every other country could be seen as an intolerable discrimination. It is even worse than that will bequeath to future generations an emasculated heritage without documentation on its origins, especially since Morocco, the country that has provided by far the largest number of rare meteorites. Scientists can no longer accept such irresponsible behavior.

INTRODUCTION

Le Maroc est le pays pour lequel le plus grand nombre de trouvailles de météorites a été enregistré, en particulier pour leurs types rares. Elles sont, donc, très convoitées par

les scientifiques et les collectionneurs du monde entier. Actuellement on compte plus de 8058 météorites NWA (Northwest Africa) et 978 autres météorites provenant du Maroc sont répertoriées dans «Meteoritical Bulletin data base» (02 Février 2015). Toutefois, les laboratoires

marocains ne disposent que d'un nombre limité d'échantillons de référence de météorites provenant du Maroc. La difficulté pour obtenir ces échantillons de référence constitue le problème essentiel auquel nous devons faire face puisque sans eux aucune étude et classification ne peuvent être effectuées. L'appellation NWA a été originellement créée pour les météorites d'origine inconnue (Grossman 2000), situation qui ne se rencontre pas dans les autres parties du monde où l'on ne recherche pas les météorites systématiquement. La méconnaissance de la provenance des météorites est une perte d'information significative car elle ne permet pas, dans la plupart des cas, d'identifier les échantillons pairés en particulier lorsqu'ils ne sont pas parfaitement identiques. Aussi, la lutte contre l'appellation NWA pour les météorites sans coordonnées exactes provenant du Maroc demeure une priorité de nos investigations (Chennaoui Aoudjehane *et al.* 2013, 2014).

Afin de structurer et d'organiser le travail scientifique concernant les échantillons de météorites marocaines, un protocole d'étude et de déclarations des chutes et des trouvailles de météorites du Maroc a été mis en place. Le protocole a pour objectif de documenter de façon standard l'étude des météorites au Maroc et de préserver ce patrimoine. Normalement ce travail devrait être reconnu par la communauté scientifique et être soutenu par la «Meteoritical Society». Cette stratégie de travail s'étend à plusieurs niveaux en relation avec la chute et/ou la trouvaille. Elle peut aller du suivi d'un météore par caméra à l'enquête de voisinage, de la prospection d'éventuels échantillons sur le terrain, à l'étude pétrographique et géochimique d'échantillons jusqu'à leur classification et la déclaration de la météorite suivant les règles définies par le comité de nomenclature des météorites de la «Meteoritical Society».

Le nom assigné à chaque nouvelle météorite provenant du Maroc et des pays voisins sans coordonnées exactes est NWA (Northwest Africa) suivi d'un nombre (Grossman 2000; Chennaoui Aoudjehane *et al.* 2013). En raison de l'absence de coordonnées géographiques d'un grand nombre de trouvailles (collectées le plus souvent par des nomades), celles-ci se voient octroyer l'acronyme «NWA» par le comité de nomenclature de la «Meteoritical Society». La règle de nomenclature a été déviée de son objectif initial et aujourd'hui chaque nouvelle météorite provenant du Maroc et des pays voisins prend, sauf exception, l'appellation NWA. Il devient difficile d'encourager les chercheurs de météorites à révéler les coordonnées de leurs trouvailles si finalement elles sont classifiées comme des météorites sans nom propre. Il est, donc, devenu urgent de documenter les trouvailles de nouvelles météorites pour leur assigner de vrais noms de lieux et d'essayer de documenter, certaines trouvailles NWA déjà classées afin de valoriser la collection marocaine en matière de roches extraterrestres (Exemple de *NWA 6369 = Fej Errih*).

Historique des météorites au Maroc

Le territoire marocain a la particularité d'être un lieu privilégié de collecte des météorites par son espace désertique significatif (plus de 50% du territoire national). Ce dernier favorise la recherche des météorites, essentiellement les «trouvailles», car ces grandes étendues, de

couleur claire, dépourvues de végétation permettent plus facilement le repérage de roches généralement de couleur plus sombres que le substratum. D'autre part, de nombreux marocains se sont mis à chercher les météorites comme source de revenu complémentaire.

Cette chasse aux météorites a démarré à la fin des années 1990, et au fil des années on a vu que la nature des trouvailles a évolué. Aujourd'hui, les chondrites ordinaires de faibles valeurs (commerciale et scientifique) constituent une faible proportion des trouvailles répertoriées. Seules celles ayant une valeur commerciale et/ou scientifique font l'objet de commerce et d'étude. Le savoir-faire des chasseurs de météorites s'est fortement amélioré et les trouvailles récentes sont assez extraordinaires. Ainsi, par exemple, depuis la fin des années 1990, on dénombre de plus en plus de météorites collectées au Maroc, dont certaines sont d'une grande valeur scientifique, telles que:

- Les chutes observées: Tissint (18 Juillet 2011), météorite martienne de type Shergottite (Chennaoui Aoudjehane *et al.* 2012). Il a fallu près de 4 mois pour que les premiers fragments soient trouvés. Des centaines de marocains ont contribué à la récolte des morceaux de cette météorite. Tihert (09 Juillet 2014), type Euclite a été découverte le lendemain de sa chute car beaucoup plus proche de zones habitées. Nous comptons également plusieurs chutes observées de type chondrites, à savoir: la météorite de Benguerir (22 Novembre 2004) (Chennaoui *et al.* 2006a) et la météorite de Tamdakht (20 Décembre 2008) (Chennaoui Aoudjehane *et al.* 2009a) trouvée dans la neige de l'Atlas après des recherches pendant plusieurs semaines. Pour d'autres chutes observées aucun échantillon n'a pu être récupéré pour étude, comme la chute du 15 Novembre 2009 dans la région de Nzala (Région Est du Maroc). Certaines chutes ne sont parfois pas déclarées comme telles et la publication se fait sous un numéro NWA.

- Les trouvailles d'achondrites telles que: la météorite lunaire Oued Awlitis 001 (Wittman *et al.* 2014). La roche sédimentaire martienne que tous les spécialistes espéraient depuis des décennies est venue du Maroc : NWA 7034, (Agee *et al.* 2013). Cette roche dénommée comme un vulgaire caillou montre que la nomenclature NWA pour ce type d'échantillon extraordinaire ne satisfait personne. Son découvreur scientifique Carl Agee (Université New Mexico USA), président en charge du comité de Nomenclature se permet de la nommer «Black Beauty», nom donné par les marchands dans une optique marketing à défaut du nom propre qu'elle devrait porter Rabt Sbayta. Dans le même esprit, Eric Hand (2014) écrit un article de 6 pages dans «Science» parlant de Black Beauty sans citer une seule fois son nom officiel.

Intérêt de l'étude des météorites

Parmi les météorites différenciées, les corps parents ne sont connus avec certitude que pour la lune et la planète Mars. Les fragments de météorites proviennent essentiellement de la ceinture d'astéroïdes située entre Mars et Jupiter. Certaines météorites telles que les chondrites carbonées, renferment des informations sur le matériel protosolaire, et même présolaire. Depuis leur formation les différents corps planétaires n'ont pas subi le même degré d'évolution. Il existe une multitude de corps de petite taille

Les trouvailles, dont la chute est passée inaperçue et qui se sont accumulées depuis des milliers d'années, sont récoltées dans les déserts. L'étude de terrain consiste uniquement à retrouver les coordonnées exactes de l'échantillon et à documenter l'histoire de sa trouvaille.

Collecte des informations

La collecte d'informations est une étape fondamentale pour toute étude de météorites afin de déterminer les sites privilégiés de collectes ou l'endroit exact d'une chute. Nous avons conçu un questionnaire relatif aux chutes (Fig. 2) afin de faciliter et d'orienter la collecte d'informations et essayer de les documenter au mieux.

Ce questionnaire mentionnant les noms et les coordonnées des témoins, porte sur un certain nombre de critères essentiels, à savoir : la date et le lieu de la chute, la direction, la hauteur et la couleur du bolide, les obstacles potentiels de la fin de l'observation, les bruits entendus, ainsi que d'autres informations relatives à l'observation du phénomène.

La date et l'heure de l'observation sont les premières données à enregistrer. Des dates ou heures différentes déclarées par un autre témoin oculaire peuvent dévoiler une seconde chute totalement dissociée de la première (exemple de la chute dans la région de Taghit et la chute de Breja, deux chutes différentes observées aux frontières Maroc-Algérie les 1^{er} et 19 Mai 2010).

L'emplacement exact du témoin est un élément très important qui permet de déterminer avec précision la trajectoire du météore. La multiplication et le croisement des directions décrites par différents témoins situés de part et d'autre de l'endroit suspecté, permettra la convergence vers un seul point, qui correspondra à la dernière observation de la trajectoire lumineuse qui se termine le plus souvent à une dizaine de km d'altitude. L'endroit potentiel de la chute doit être extrapolé en fonction de l'inclinaison de la trajectoire de la vitesse du vent, etc., ce qui conduit à une incertitude notable quant à l'endroit exact de l'arrivée au sol. Certains critères sont révélateurs d'une étape bien précise de la chute de la météorite, telles que, la couleur du météore, la trajectoire, la cause de la fin de l'observation, l'apparition d'étincelles ou encore le bruit entendu par les témoins.

La dernière partie du questionnaire concerne les informations relatives à la collecte de la météorite. Elle renferme le nombre et le poids des fragments ramassés et définit les coordonnées géographiques exactes de la chute en général et de chaque échantillon retrouvé en particulier.

La compilation des informations recueillies sur le terrain permet de tracer une ellipse de chute relative à une chute donnée lorsque plusieurs morceaux sont collectés. L'ellipse permet de définir approximativement l'étendue géographique d'une chute résultant de la trajectoire du bolide et de sa fragmentation dans l'atmosphère.

Les coordonnées géographiques précises permettent d'assigner sans ambiguïté un nom de lieu à la météorite et d'identifier les passages éventuels. Il est important de donner à la météorite un nom de lieu officiel tiré des cartes topographiques disponibles de la région de la découverte,

en respectant l'orthographe. Ce nom peut être celui de la ville, du village ou de toute structure topographique apparente (oued, montagne, sebkha ...) la plus proche du lieu de la trouvaille.

Cela évite les classifications multiples auprès du comité de nomenclature de la «Meteoritical Society» (<http://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php>). Par exemple, la météorite d'Al Haggounia 001, trouvaille de plusieurs tonnes, a été longtemps classifiée et déclarée par différents laboratoires sous des noms différents «NWA» et des types différents (aubrite ou chondrite à enstatite). Une étude de terrain détaillée a permis de déterminer son ellipse de chute et la classification a été corrigée (Chennaoui Aoudjehane *et al.* 2007, Devaux *et al.* 2011). La position des pierres sur le terrain indique sans ambiguïté une chute datée de 25000 ans environ (Chennaoui Aoudjehane *et al.* 2009b) et non pas une météorite fossile prise dans des sédiments comme cela avait été annoncé d'après des témoignages oraux transmis de bouche à oreille.

Etude minéralogique, pétrographique, géochimique et classification d'une météorite

La grande majorité des minéraux présents dans les météorites se trouvent également dans les roches magmatiques, basiques et ultrabasiques terrestres. Les météorites rocheuses (chondrites et achondrites) sont formées principalement d'olivine, de pyroxènes, de plagioclases, de phases opaques constituées de métal alliage Fe-Ni (Kamacite et Taenite), de sulfure (Troilite, Chromite...) et de minéraux accessoires (Ilménite, phosphates...). On distingue également, dans certains cas, des phyllosilicates hydratés et des carbonates. Les météorites métalliques et mixtes se distinguent par la présence de fer natif allié au nickel, sous deux formes possibles : la kamacite et la taenite, toutes deux cristallisant dans le système cubique, mais avec des structures différentes. La forme kamacite correspond à des teneurs en nickel inférieure à 7,5 % environ, tandis que la taenite présente des teneurs de 20-65 % de Ni. Les météorites métalliques renferment en inclusion d'autres minéraux, parmi lesquels les plus fréquents sont la troilite (un sulfure de fer), la cohenite (carbure de fer), la schreibersite (phosphure de fer et de nickel) et le graphite (Rubin 2007a).

Les météorites sont classées d'après leur texture, leur composition minéralogique, leur composition chimique et leur degré d'oxydoréduction. (Fig. 1). La composition isotopique de l'oxygène permet de confirmer les diagnostics et de repérer quelques échantillons anormaux.

Etude macroscopique

Une observation préliminaire sur le terrain permet d'identifier des échantillons susceptibles d'être des météorites et d'écarter toutes les roches qui s'avèrent incontestablement d'origine terrestre (Fig. 3).

Les critères macroscopiques les plus importants sont :

1- Croûte de fusion : si la météorite n'est pas altérée et n'a pas séjourné longtemps sur Terre, il est possible d'observer une croûte de fusion de couleur noire de l'ordre du 1/10^{ème} de mm jusqu'à 1 à 2 mm. Ce revêtement recouvre l'extérieur

d'une météorite fraîchement tombée. Habituellement, la croûte de fusion est noire en raison du fer présent dans la météorite et oxydé à la surface lors de la traversée de l'atmosphère. Suivant la nature de chaque type de météorite et de sa composition minéralogique et chimique, la croûte de fusion peut être plus ou moins fine, brillante (généra-

lement pour les achondrites silicatées pauvres en fer métallique Fig. 3a) ou mate (généralement pour les chondrites Fig. 3b et 3c).

On peut remarquer également des petites dépressions micrométriques au niveau de la surface, la texture de la croûte de fusion rappelle l'aspect du cuir tanné.

<p>Questionnaire Chute</p> <p><input type="checkbox"/> Information témoin</p> <p>Témoin N° : Lieu/Date : Coordonnées du Témoin : Nom : Prénom : Numéro de téléphone : Adresse :</p> <p><input type="checkbox"/> Témoignage</p> <ul style="list-style-type: none"> Date et heure de l'observation de la chute : Endroit du témoin lors de la chute : Quel temps faisait-il ? : Était t-il seul au moment de l'observation ou était t-il accompagné ? <i>(Si oui! Demander les coordonnées de (s) la personne (s) si possible)</i> <p><input type="checkbox"/> Orientation et trajectoire du bolide</p> <ul style="list-style-type: none"> Dans quelle direction a été observée la chute : A quelle hauteur : <i>(se référer à un objet type arbre, montagne, poteau électrique...)</i> Quelle était sa trajectoire (verticale/horizontale)?: Dans quelle direction a-t-il vu le météore : - Au début de son observation ? : - A la fin de son observation ? : Type de trajectoire apparente verticale, horizontale ou entre les deux : Préciser l'angle : 	<p><i>(une fois les informations enregistrées, Vérifier avec le témoin sur le terrain l'exactitude des informations et retrouver les repères pour pouvoir réaliser les mesures exactes moyennant boussole et GPS et ce, en se plaçant exactement à la place du témoin lors de l'observation)</i></p> <p><input type="checkbox"/> Fin de l'observation</p> <ul style="list-style-type: none"> Quelle a été la cause de la fin de l'observation? (un obstacle ? une montagne?) Qu'a-t-il observé ? (description de l'observation) A t-il vu de la lumière ? <i>(Décrire l'intensité de la lumière par rapport à la lune par exemple)</i> A t-il vu de la fumée? (décrire) Combien de temps a duré l'observation? Qu'a-t-il entendu? - Une ou plusieurs détonations ? (décrire) - Quand ? Pendant ou après l'observation de la lumière ? <i>(Évaluer en minute ou seconde)</i> A-t-il entendu une pierre tomber sur le sol ? A-t-il senti une secousse? A-t-il remarqué un comportement anormal des animaux ? 	<p><input type="checkbox"/> Collecte d'échantillon</p> <ul style="list-style-type: none"> Une fois avoir entendu une secousse, quelle était la réaction du témoin? (décrire également le sentiment ressenti) S'est t-il déplacé pour voir : A-t-il trouvé quelque chose : - Quand : <i>(date)</i> - Où : <i>(retenir un repère)</i> Qu'a-t-il fait ce moment ? A-t-il touché, senti...la roche ? A-t-il récupéré des échantillons : (Si oui), combien de morceaux : Morphologie des morceaux : <i>(complets ou cassés)</i> Poids estimé des échantillons collectés : Présence ou non de croûte de fusion A-t-il en sa possession la météorite ? <p><u>A faire !</u> Se déplacer sur terrain et vérifier les coordonnées GPS de la chute. Prendre une photo de l'échantillon sur le sol+GPS pour la déclaration.</p> <p>Il est également souhaitable de retenir un repère, dans le cas échéant, pour d'éventuelles recherches de météorites dans le futur.</p> <p><input type="checkbox"/> Récupération d'échantillons références (20g est un minimum pour une déclaration ou 20% de l'objet si sa masse est < 100g)</p> <p><input type="checkbox"/> Quête de nouveaux témoins</p> <ul style="list-style-type: none"> Connait-il d'autres témoins ? (Si oui), saisir leurs coordonnées
---	--	--

Figure 2. Questionnaire de collecte d'informations sur le terrain relatif aux chutes de météorites.

Figure 2. Questionnaire to collectfield information on meteoritefalls.

2- Regmaglyptes : la surface de la météorite est généralement marquée de cupules ou « traces de pouce » appelées « regmaglyptes » (Fig. 3a). Ces cupules correspondent à de la matière en fusion arrachée à la surface de la météorite lors de la traversée de l'atmosphère. Les regmaglyptes sont fréquents mais parfois peu identifiables.

3- Forme de la pierre : si elle est entière et peu altérée, la forme de la pierre est une des caractéristiques. Elle dérive d'un bloc polyédrique défini initialement par une fracturation, ayant subi l'émoussement de ses arêtes. Cette forme particulière est inhabituelle parmi les roches terrestres mais demande une certaine expérience pour être identifiée.

4- Lignes de fuite : au niveau de la croûte de fusion, il

est possible d'identifier des lignes de fuite (semblables à des gouttes de fluide poussées très énergiquement vers l'arrière par la grande vitesse de traversée de l'atmosphère) témoins de l'orientation de la météorite lors de son arrivée sur Terre.

5- Présence de chondres et de métal : une cassure fraîche ou un léger polissage permet de révéler l'intérieur de l'échantillon et de faire une bonne observation de sa pétrographie (Fig. 3c). Dans le cas des chondrites, nous pouvons facilement identifier des particules d'éclat métallique argenté (métal) ou doré (sulfures) et des billes correspondant à des chondres, gouttelettes proto-solaires composées de silicates. Les chondres sont parfois visibles dans la croûte de fusion.

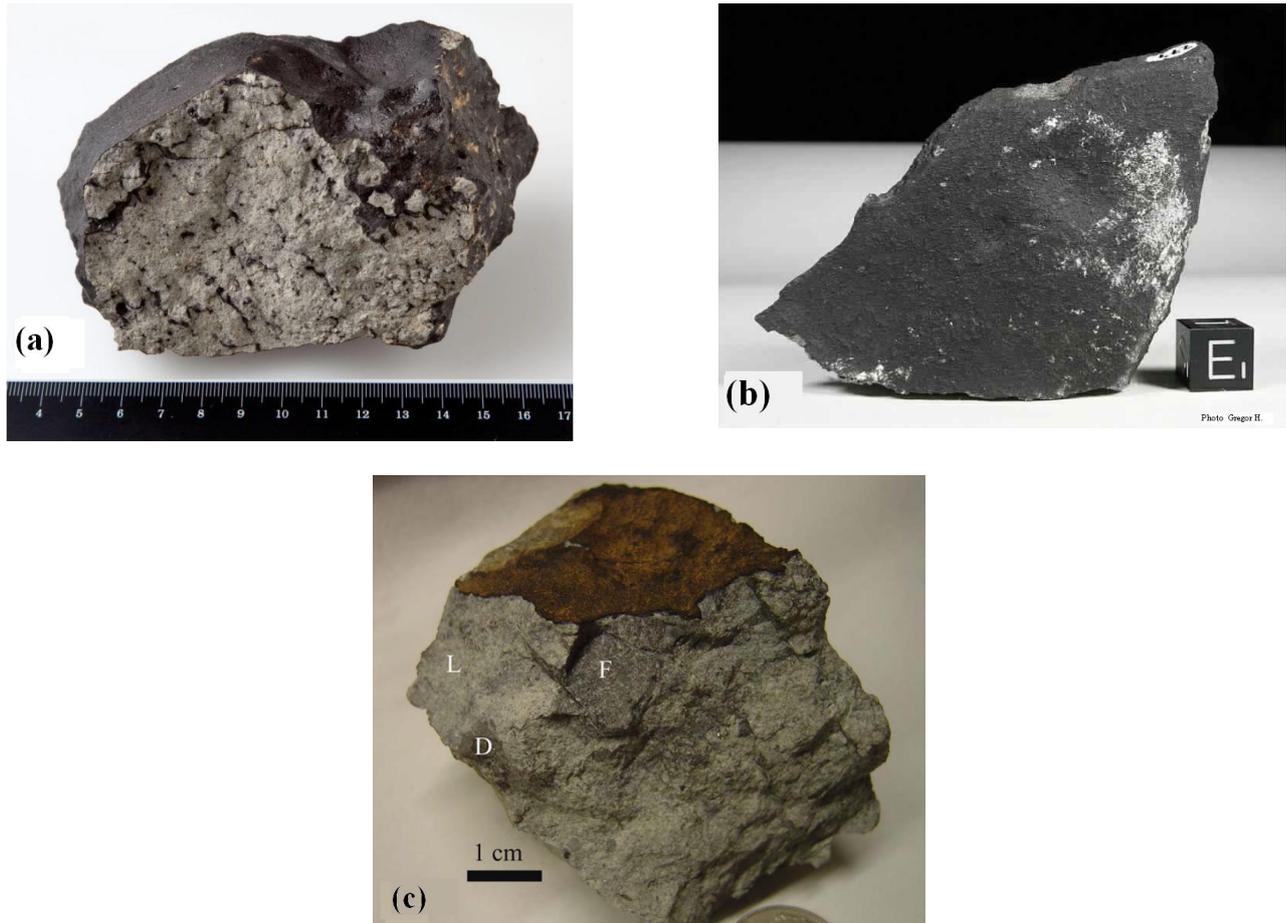


Figure 3. Photos macroscopiques des échantillons de météorites (chutes et trouvailles) provenant du Maroc. **a)** Echantillon de la chute de « Tissint », météorite martienne de type Shergottite. Elle se distingue par une croûte de fusion (Cf) noire très brillante, l'intérieur est gris clair et montre des veines de choc fondues noires et des poches de fusion (Chennaoui *et al.* 2012). **b)** Echantillon complet de la chute de « Tamdakht », chondrite ordinaire de type H (Chennaoui *et al.* 2009a). La croûte de fusion est relativement mate et épaisse. **c)** Echantillon de la chute de « Benguerir », chondrite ordinaire de type LL (Chennaoui *et al.* 2006a). La croûte de fusion est mate, l'intérieur de l'échantillon est grisâtre avec des zones claires et des zones plus sombres, ainsi que des veines de choc fondues.

*Figure 3. Macroscopic photos of meteorite samples (falls and finds) from Morocco. a) Sample of the Tissint fall, a Martian Shergottite. This stone exhibits a glossy black fusion crust, the interior is gray and shows black melted shock veins and melt pockets (Chennaoui *et al.* 2012). b) Full sample of Tamdakht fall, type H ordinary chondrite (Chennaoui *et al.* 2009a). The fusion crust is relatively thick and dull. c) Sample of Benguerir fall, type LL ordinary chondrite (Chennaoui *et al.* 2006a). The fusion crust is dull, the interior of the sample is grayish with light and dark clasts and melted shock veins.*

6- Textures : dans le cas des météorites métalliques, une surface polie attaquée avec un mélange d'acide et d'alcool appelé Nital, fait apparaître des figures de Widmanstätten et/ou des bandes de Neumann (bandes de largesurs diverses de kamacite et de taenite qui s'entrecroisent) témoignant de cristaux de grande dimension absents des matériaux fabriqués par l'Homme. La texture de Widmanstätten correspond à la séparation secondaire de taenite et de kamacite. Cette texture est absente d'un petit nombre de météorites métalliques.

7- Densité de l'échantillon : la densité des météorites est généralement plus élevée que celle des roches terrestres qui est inférieure à 3. Nous citons quelques exemples de densité de météorites mixtes telles que les Mésosidérites (4,25), Pallasites (4,76), de météorites rocheuses telles que les Chondrites ordinaires type H (3,40), les météorites martiennes (3,10), les météorites lunaires (2,7-3,8, ...) (Britt

& Consolmagno 2003, Grady 2000, Warren 2001, Wilkison *et al.* 2003). La densité est un paramètre délicat à apprécier de façon précise.

8- Aimantation : elle s'applique aux chondrites et météorites de type sidérites et mixtes du fait de la forte présence de la phase métal Fe-Ni. Les météorites de type achondrites présentent quant à elles une très faible aimantation. L'inconvénient de cette pratique est que le champ intense d'un aimant impose un champ rémanent qui vient oblitérer la trace du magnétisme rémanent enregistré sur le corps parent.

9- Mesure de la susceptibilité magnétique : c'est une technique quantitative de mesure du magnétisme d'une roche (Rochette *et al.* 2009). Cette technique permet de contraindre la classification d'une météorite directement à partir des mesures réalisées et ce, suivant le diagramme de la Figure 4.

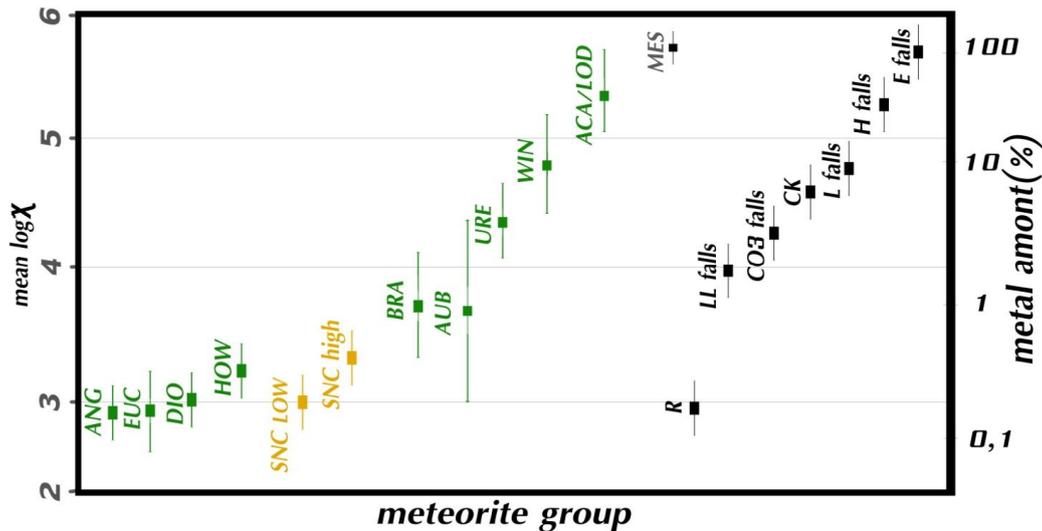


Figure 4. Diagramme des susceptibilités magnétiques ($\log\chi$). Moyenne de $\log\chi$ (en $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$) des météorites incluant les chutes de chondrites (Rochette *et al.* 2009).

Figure 4. Diagram of magnetic susceptibility ($\log\chi$). Mean $\log\chi$ (in $10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$) of meteorites including chondrite falls (Rochette *et al.* 2009).

La susceptibilité magnétique correspond au taux d'aimantation induite d'un matériel lorsqu'il est soumis à un champ magnétique faible (<1mT). Elle dépend de la quantité et de la nature des phases magnétiques. Cette méthode rapide et non destructive détermine la quantité de métal ou des autres minéraux magnétiques dans les échantillons (Smith *et al.* 2006). Elle peut permettre une classification rapide des nouvelles météorites mais aussi de relever des erreurs de classification manifeste dans les grandes collections anciennes. Les travaux de Rochette *et al.* (2003, 2009) ont montré que la plupart des classes de météorites ont une susceptibilité magnétique bien définie. Cette méthode ne peut être utilisée seule car les domaines de certaines météorites se superposent, excepté les chondrites ordinaires (OC), pour lesquelles la classification par la mesure de la susceptibilité magnétique est acceptée par le NomCom. Pour les météorites non magnétiques, il faut rester très prudent, car la signature magnétique étant parfois le résultat de l'incorporation d'un impacteur magnétique.

10- Minéralogie : certains minéraux, d'assez grande taille, peuvent être facilement reconnaissables à l'œil nu, tels que les olivines (verdâtres), les pyroxènes (sombres) ou encore les plagioclases (baguettes claires), la taénite, les sulfures, la magnétite...

En résumé, reconnaître une météorite à l'œil nu, est souvent difficile du fait de la ressemblance de certaines achondrites avec des roches magmatiques terrestres (exemple des péridotites et des Nakhilites). Il est, donc, nécessaire de prendre en compte plusieurs critères et de faire appel à l'analyse minéralogique et géochimique de laboratoires spécialisés dans le domaine de l'étude des météorites afin de pouvoir classifier d'une manière précise l'échantillon en question.

Etude pétrographique et géochimique et méthodes de classification des météorites

L'observation pétrographique et les analyses Géochi-

miques sont réalisées sur des morceaux d'échantillons, des lames minces et/ou de sections polies. Les météorites étant un matériel rare, l'analyse est limitée à quelques grammes voire quelques milligrammes. Le découpage de l'échantillon est réalisé à l'aide d'une micro-scie afin de minimiser la perte lors du prélèvement. Cette étape est suivie par la préparation de la lame mince et/ou de la section polie. La reconnaissance des minéraux commence par l'observation des phases à la loupe binoculaire (Fig. 5a), puis au microscope à transmission (Fig. 5b, 5c) et/ou à réflexion (Fig. 5d), et peut se poursuivre par une observation plus approfondie à l'aide du microscope électronique à balayage (MEB) (Fig. 5e, 5f).

1- Le MEB permet des observations à des grossissements allant de $\times 10$ jusqu'à $\times 50\,000$. Plusieurs types d'imageries peuvent être réalisés avec ce genre de microscope. Généralement pour les météorites, deux types d'imageries seront essentiellement utilisés, l'imagerie en électrons secondaires SEI (secondary electron imaging) qui fournit des informations de la surface de l'échantillon et l'imagerie en électrons rétrodiffusés BSE (Back scattered electrons) (Fig. 5e, 5f) qui permet de distinguer les différentes phases en fonction de leurs compositions (numéro atomique moyen des minéraux).

Le MEB est souvent couplé à un système de microanalyse chimique EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) qui permet d'obtenir des analyses chimiques ponctuelles semi-quantitatives sous forme de spectres (Fig. 6). Ce système peut permettre également l'acquisition de cartes de répartition des éléments chimiques par balayage dans une fenêtre fixée. Le MEB permet ainsi de calculer le mode minéralogique.

L'acquisition de résultats sous formes d'images (Fig. 5e, 5f) et de spectres chimiques (Fig. 6), relatifs aux phases minérales présentes dans les échantillons, permet un repérage des minéraux pour des analyses quantitatives à la microsonde électronique. Après une étude au MEB les types de météorite sont identifiés.

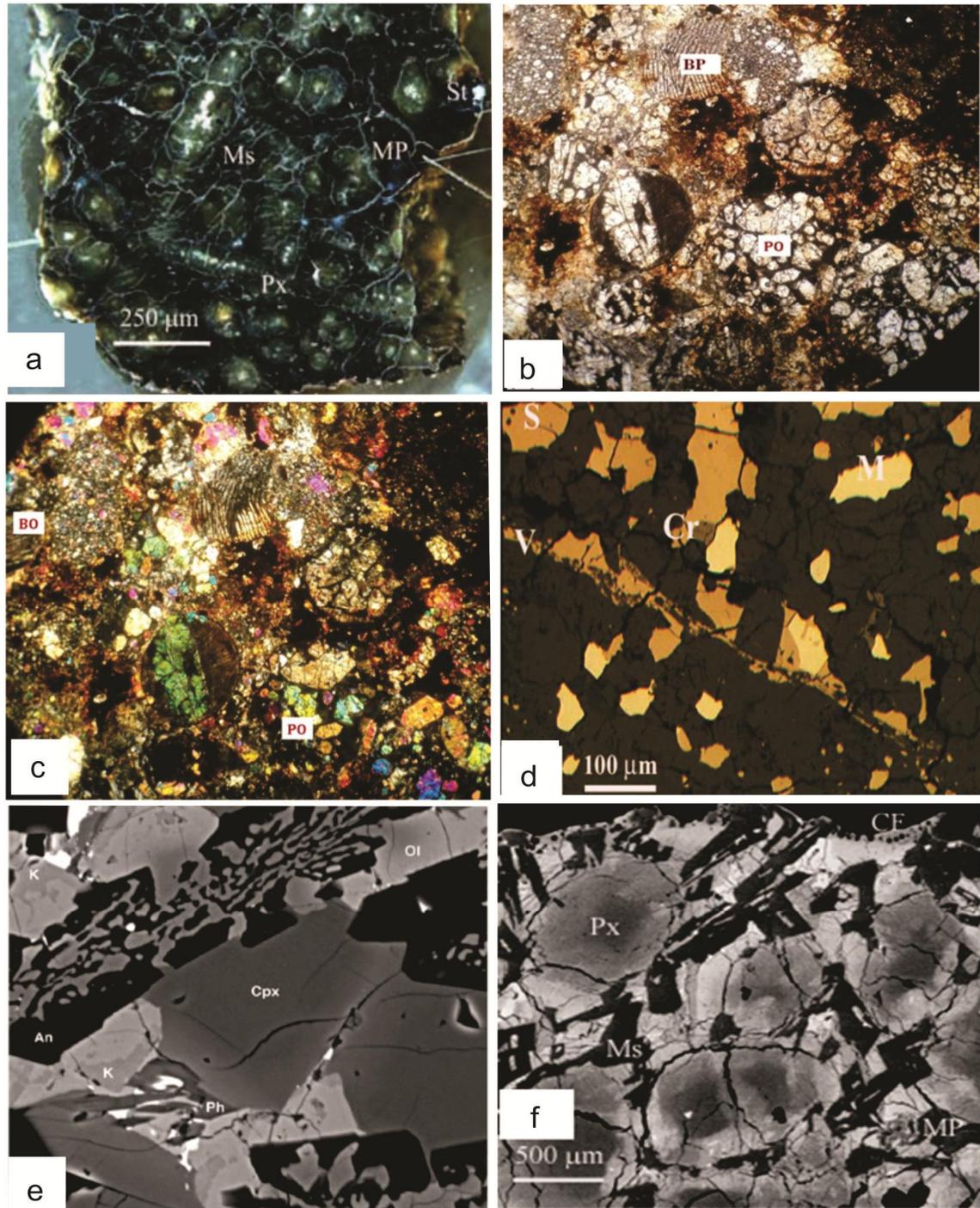


Figure 5. Image d'observation de détails de lame mince et de sections polies de quelques météorites du Maroc : **a)** Image à la loupe de la météorite martienne type Shergottite NWA 480. **b-c)** Images en lumière naturelle et en lumière polarisée d'une lame mince de chondrite ordinaire au microscope à transmission montrant différents types de chondres (**PO** : chondres porphyriques à olivine, **BO** : chondres barrés à olivine, **BP** : Chondres barrés à pyroxène). **d)** Image au microscope à réflexion d'une section polie de la chute de la chondrite Benguerir ordinaire de type LL6 (Chennaoui *et al.* 2006a) (**M** : métal, **S** : sulfure, **D** : lithologie sombre, **L** : lithologie claire, **Cr** : chromite, **V** : veine de choc). **e)** Image BSE au microscope électronique à balayage de NWA 480 montrant un basalte à gros grains principalement constitué de pyroxène (Px) et de plagioclase amorphe (maskelynite) en baguettes fondues par le choc (Ms) (Chennaoui *et al.* 2005a) (**CF** : croûte de fusion, **Px** : pyroxène, **Ms** : Maskelynite, **MP** : poche de fusion, **St** : Stishovite). **f)** Image BSE d'une section polie de l'Angrite NWA 1296 (Jambon *et al.* 2005) (**Ol** : olivine, **Cpx** : clinopyroxène, **K** : kirschsteinite, **An** : anorthite, **Ph** : phosphate).

*Figure 5. Close up of polished and thin sections of some meteorites from Morocco. a) Microscopic image of Martian meteorite Shergottite NWA 480. b-c) Image of a thin section of an ordinary chondrite with a polarizing microscope showing different types of chondrules (PO: porphyritic olivine chondrules, BO: barred olivine chondrules. BO: barred olivine chondrules. d) Image with reflection microscopy of a polished section of the Benguerir fall LL6 ordinary chondrite (Chennaoui *et al.* 2006a) (M: metal, S: sulfide, D: dark clast, L: light clast, Cr: chromite, V: shock vein). e) BSE image in scanning electron microscope of NWA 480, showing a coarse-grained basalt consisting mainly of pyroxene (Px) and amorphous plagioclase transformed into maskelynite (Ms) (Chennaoui *et al.* 2005a) (CF: fusion crust, Px: pyroxene, Ms: Maskelynite, MP: melting pocket, St: Stishovite). f) BSE image of polished section of Angrite NWA 1296 (Jambon *et al.* 2005) (Ol: olivine, Cpx: clinopyroxene, K: kirschsteinite, An: anorthite, Ph: phosphate).*

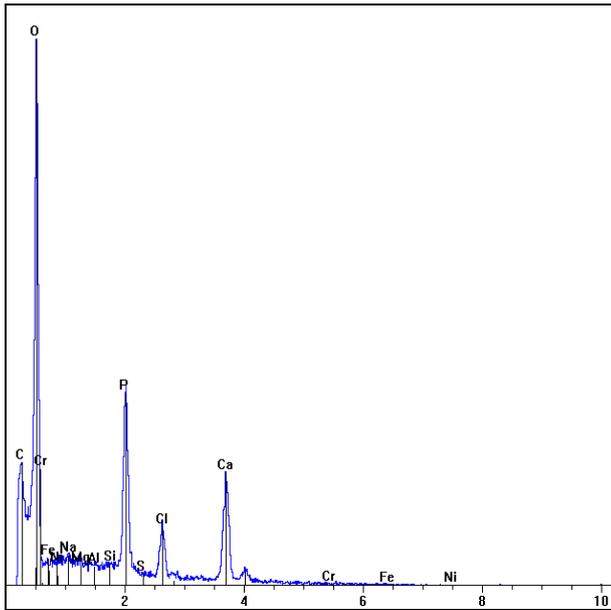


Figure 6. Spectre EDS au MEB d'une chlorapatite de la météorite NWA 5363, une Achondrite non groupée. (Larouci *et al.* 2013).

Figure 6. EDS spectrum of chlorapatite of the meteorite NWA 536., an ungrouped achondrite (Larouci *et al.* 2013).

2- La microsonde électronique permet de préciser la classification. Par exemple, pour les chondrites ordinaires, la teneur en forsterite (Fo) de l'olivine permet de trancher entre H, L et LL. Les analyses qu'elle permet de réaliser constituent une base de la classification des météorites. Le rapport Fe/Mn dans les olivines et les pyroxènes permet de distinguer les différentes classes d'achondrites entre elles (Papike 1998) et d'identifier leurs cousines terrestres.

D'autres techniques analytiques peuvent être utilisées en parallèle pour compléter davantage l'étude minéralogique, pétrographique et géochimique des météorites, comme la spectroscopie Raman, le microscope électronique à transmission (MET), la diffraction aux Rayons X, les analyses isotopiques diverses...

La compilation des différents résultats obtenus par les techniques citées ci-dessus permet de mettre en évidence une liste de caractères relatifs à un échantillon donné. Les météorites sont classées d'après leur texture, leur composition minéralogique et leur composition chimique qui donnent leur type. Le degré de choc subi par la roche sur son corps parent est bien calibré dans le cas des chondrites ordinaires (de S1–S6, S venant du mot Shock en anglais) (Stöffler *et al.* 1991, Rubin *et al.* 1997). L'altération terrestre (de W0–W6, W venant du mot Weathering en anglais) des échantillons est également estimée (Wlotzka 1993).

3- Les mesures des isotopes de l'oxygène : la distribution hétérogène des isotopes de l'oxygène dans la nébuleuse solaire, les planètes, les astéroïdes et les météorites a permis de classer ces divers matériaux en fonction de leurs signatures isotopiques en oxygène et de reconnaître des échantillons provenant d'un même réservoir. La même signature isotopique, marquant des objets chimiquement différents, peut indiquer soit une origine commune à partir du même objet parent, soit une formation dans la même zone de la nébuleuse protosolaire (Fig. 7).

Les travaux de Clayton et Mayeda (1996, 1999) et Greenwood *et al.* (2005, 2006) ont développé cette technique et en ont fait une technique de pointe reconnue pour confirmer la classification réalisée à partir de la composition chimique. Ces analyses sont réalisées dans un petit nombre de laboratoires dans le monde car on utilise l'analyse très précise de l'isotope 17, le moins abondant des isotopes de l'oxygène. Les résultats obtenus sont indispensables pour classer certaines météorites, essentiellement les achondrites

4- L'utilisation de la composition isotopique du Cr et en particulier le ^{54}Cr (Trinquier *et al.* 2007 ; Göpel *et al.* 2011). Ce système isotopique constitue un outil très intéressant car il informe sur deux aspects de l'histoire de la météorite. La première c'est que le couple ^{53}Cr - ^{53}Mn permet d'obtenir des informations chronologiques concernant l'âge de formation de la météorite tandis que le ^{54}Cr nous renseigne sur le mélange des différents composants concernant leur nucléosynthèse. Les variations de ^{54}Cr dans les météorites ne sont pas encore bien cernées, mais elles peuvent être utilisées comme outil de classement, très semblable à la technique des isotopes de l'oxygène et ce en utilisant $\square^{54}\text{Cr}$ en fonction de $\Delta^{17}\text{O}$ (Fig. 8).

Datation des météorites

Pour compléter l'étude des météorites, il est possible de procéder à des datations absolues. Pour mémoire, plusieurs types d'âges peuvent être mesurés :

- L'âge *absolu* (ex. de datation par le ^{87}Rb - ^{87}Sr) date la solidification du liquide initial, la dernière différenciation chimique et le refroidissement (condition de système clos) des matériaux météoritiques, cet âge est aux alentours de 4,56 Ga pour la majeure partie des météorites excepté certaines météorites martiennes et lunaires beaucoup plus jeunes attestant d'une activité géologique récente.

- L'âge *d'exposition au rayonnement cosmique* : (ex. de datation par le ^3He , ^{21}Ne , et ^{38}Ar) mesure l'intervalle de temps qui sépare l'instant où une météorite est détachée de son corps parent, probablement à la suite d'un choc, jusqu'à sa capture et à sa chute sur Terre. Par exemple l'âge d'exposition de Tissint, 0.7 ± 0.3 Ma, est comparable à celui des autres Shergottites et suggère un impact commun pour leur libération de la planète Mars (Chennaoui Aoudjehane *et al.* 2012).

- L'âge *terrestre* définit le temps de résidence à la surface de la Terre des météorites dont la chute n'a généralement pas pu être observée. Les isotopes radioactifs cosmogéniques de courte période, les plus utilisés pour dater les âges terrestres des météorites, sont : ^{39}Ar (demi-vie : $T_{1/2} = 269$ ans), ^{14}C ($T_{1/2} = 5\,730$ ans), ^{36}Cl ($T_{1/2} = 0,3 \times 10^6$ ans), ^{26}Al ($T_{1/2} = 0,72 \times 10^6$ ans) et ^{53}Mn ($T_{1/2} = 3,7 \times 10^6$ ans). (ex. Al Haggounia 23000 ± 2000 ans, Chennaoui Aoudjehane *et al.* 2009b). Pour les chutes récentes (moins de quelques années) la mesure directe du rayonnement gamma des isotopes cosmogéniques comme ^{22}Na (2,6 ans), ^{54}Mn (312 jours) et ^{26}Al (0.5 Ma) et leurs rapports permet de confirmer une date de chute putative. Ainsi, la météorite de Mreira (Mauritanie) reconnue comme une trouvaille malgré quelques témoignages, a pu être confirmée comme une chute.

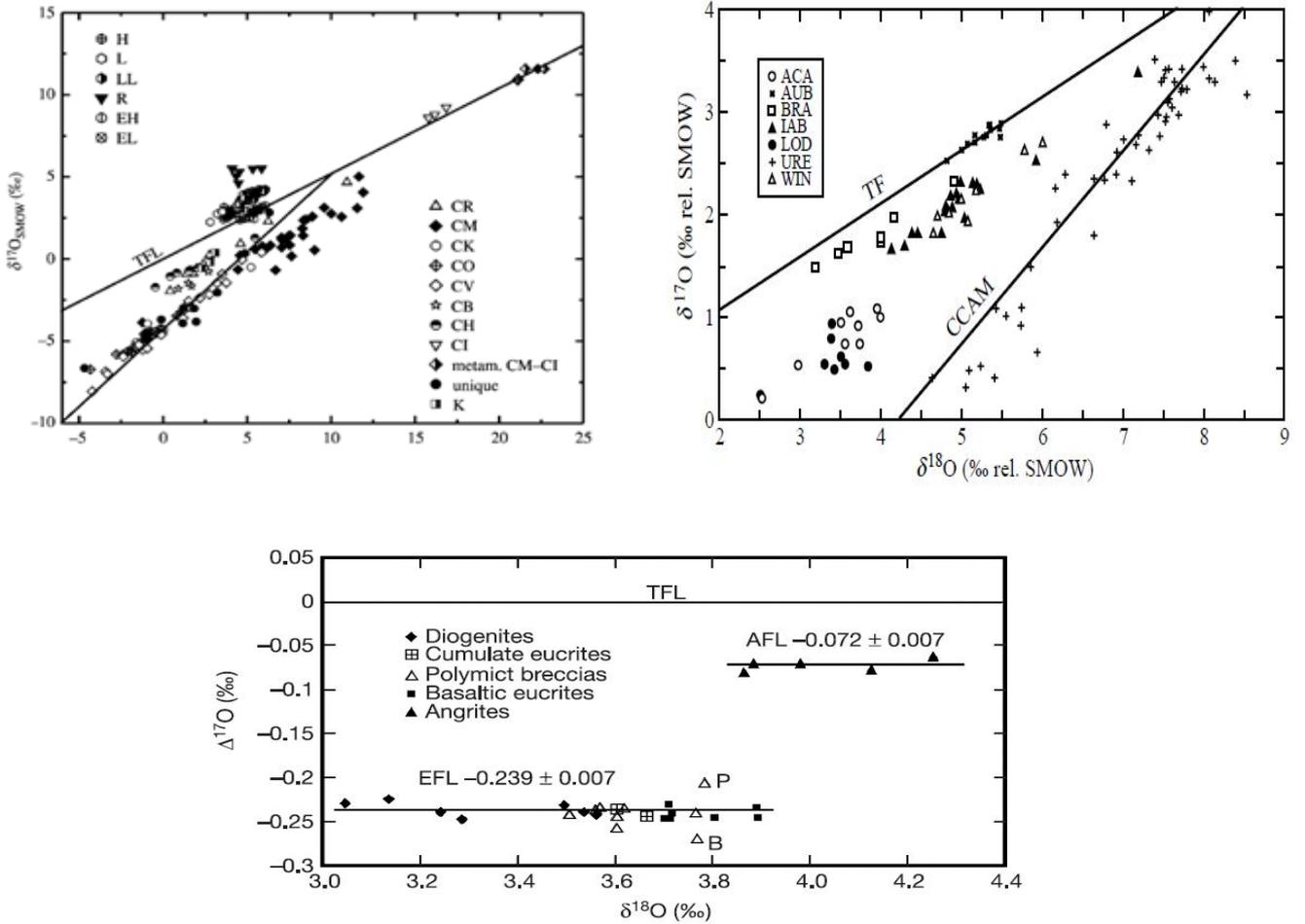


Figure 7. Diagramme des isotopes de l'oxygène, $\delta^{17}\text{O}$ par rapport à $\delta^{18}\text{O}$ pour la Terre et les différents groupes de météorites. (Clayton & Mayeda 1996, 1999) et $^{17}\Delta$ par rapport à $\delta^{18}\text{O}$ pour les types HED, (Greenwood et al. 2005).

Figure 7. Diagram of oxygen isotopes showing the relationship between $\delta^{17}\text{O}$ and $\delta^{18}\text{O}$ for Earth and different groups of meteorites. (Clayton & Mayeda, 1996, 1999) and $^{17}\Delta$ vs $\delta^{18}\text{O}$ for HEDs, (Greenwood et al. 2005).

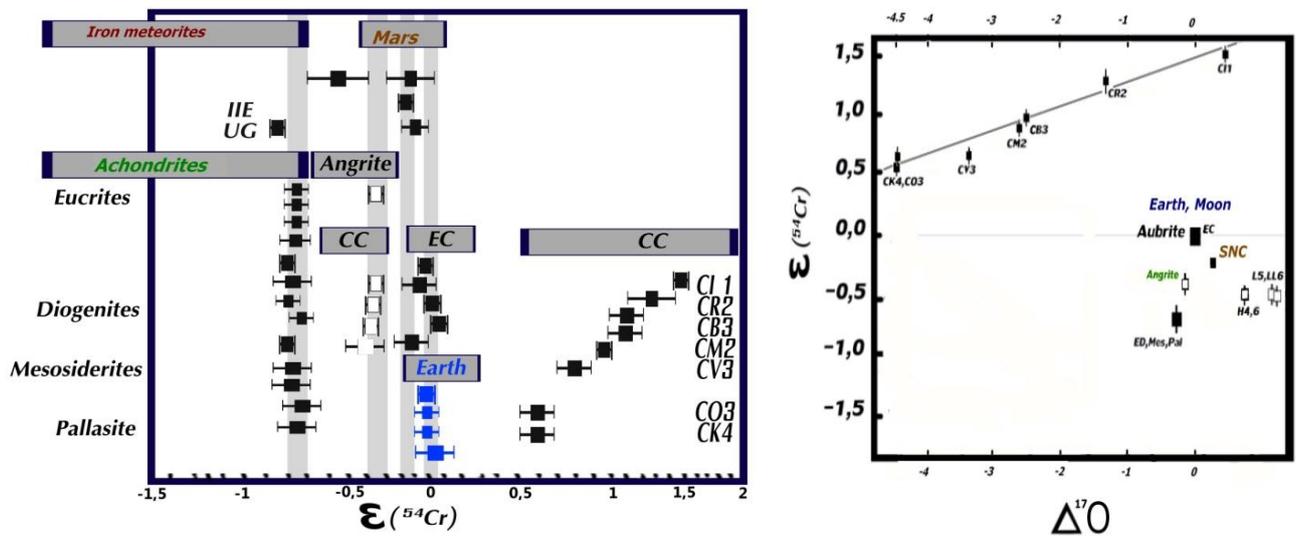


Figure 8. Diagramme montrant les intervalles de valeurs de $\epsilon^{54}\text{Cr}$ pour les achondrites basaltiques, chondrites ordinaires (OC), chondrites à enstatite (EC), et Mars. (Trinquier et al. 2007).

Figure 8. Diagram showing the range of values of $\epsilon^{54}\text{Cr}$ for basaltic achondrites, ordinary chondrites (OC), enstatite chondrites (EC), and Mars. (Trinquier et al. 2007).

Tableau 1. Modèle de protocole suivi pour la déclaration de la chute de « Tissint ».

Tableau 1. Model of the protocol followed for the submission of "Tissint" fall.

Non de la météorite	Tissint
Date et heure de la chute	18 juillet 2011 vers 2h00 du matin
Date de la découverte	Octobre 2011
Collecte des informations sur terrain	<ul style="list-style-type: none"> • Mission de terrain : réalisée en Janvier 2012 • Coordonnées géographiques : 29°28.917'N, 7°36.674'W <p>Historiques (témoignages des témoins oculaires : des nomades de la région de la vallée de Oued Draâ ainsi que quelques habitants de la ville de Tata ont observé le météore la nuit du 18 juillet 2011 vers 2h00 du matin, lequel avait d'abord une couleur jaune, puis vert avant de se fragmenter en deux parts, ils ont également entendu deux explosions très fortes.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tracé de l'ellipse de chute : trajectoire du bolide du Nord Ouest vers le Sud Est avec détermination de l'ellipse de chute. • Estimation du poids total découvert : 7 kg environ • Proposition de la nomenclature la plus adaptée : Tissint
Analyses effectuées	<ul style="list-style-type: none"> • Pétrographie (réalisée par Irving et Kuehner) : phénocritaux d'olivine (1,5 mm) et microphénocristaux (0,4 mm) dans une matrice plus fine de pyroxène zonés, plagioclase (maskelynite), chromite pauvres en Ti, ilménite, pyrrhotite et merrillite en phase mineure. • Degré de choc : Modéré • Degré d'altération terrestre : très faible • Géochimie : <ul style="list-style-type: none"> - Analyse des minéraux : Olivine (au centre) $Fa_{19,4-20,2}$, (au bord) $Fa_{43,2-60,4}$. Centre des orthopyroxènes ($Fs_{24,0-24,4}Wo_{4,1-4,6}$, pigeonite ($Fs_{26,1-51,6}Wo_{11,9-16,9}$), augite subcalcaïque ($Fs_{21,7-23,3}Wo_{25,0-24}$) et plagioclase ($An_{61,1-64,3}Or_{0,5-0,4}$). - Isotope de l'oxygène (Tanaka): $\delta^{17}O = 2.849, 2.892$; $\delta^{18}O = 4.844, 4.943$; $\Delta^{17}O = 0.299, 0.290$ ‰ - Analyses de roche totale et éléments traces (Chen et Herd): Sm/Nd=0.646 (voir Chennaoui et al. 2012). • Age d'exposition au rayonnement cosmique : 0.7 ± 0.3 Ma
Classification	Achondrite, météorite Martienne de type Shergottite.
Déclaration publiée acceptée (Metbull 17)	<p>Writeup from MB 100: Tissint 29°28.917'N,7°36.674'W Tata, Morocco Fell: 18 juillet 2011 "Classification: Martian meteorite (Shergottite) History: (H. Chennaoui Aoudjehane, FSAC, and A. Aaronson) At about 2 am local time on July 18, 2011, a bright fireball was observed by several people in the region of the Oued Drâa valley, east of Tata, Morocco. One eyewitness, Mr Aznid Lhou, reported that it was at first yellow in color, and then turned green illuminating all the area before it appeared to split into two parts. Two sonic booms were heard over the valley. In October 2011, nomads began to find very fresh, fusion-crust stones in a remote area of the Oued Drâa intermittent watershed, centered about 50 km ESE of Tata and 48 km SSW of Tissint village, in the vicinity of the Oued El Gsaïb drainage and also near El Ga'ïdat plateau known as Hmadat Boû Rba' ine. The largest stones were recovered in the El Ga'ïdat plateau, whereas the smallest one (a few grams) closer to the El Aglâb Mountains. One 47 g crusted stone was documented as being found at 29°28.917' N, 7°36.674' W. Physical characteristics: Several fusion-crust stones have been collected ranging from 1 to 987 g, with a total weight of around 7 kg. The stones are almost completely coated by glistening black fusion crust, characterized by thicker layers on exterior ridges as well as much glossier regions (above interior olivine macrocrysts). Some stones have thinner secondary fusion crust on some surfaces. The crust on some stones has been broken in places to reveal the interior, which appears overall pale gray in color with larger, very pale yellow olivine macrocrysts, and sporadic small pockets and some very thin veinlets of black glass. No terrestrial weathering is evident. Petrography: (A. Irving and S. Kuehner, UWS): Olivine macrocrysts (to 1.5 mm) and microphenocrysts (to 0.4 mm) are set in a finer groundmass of patchily zoned pyroxene, plagioclase (maskelynite), Ti-poor chromite, ilmenite, pyrrhotite and minor merrillite. Both the larger olivine macrocrysts and smaller olivine microphenocrysts exhibit thin ferroan rims against the groundmass, and contain tiny chromite inclusions. Narrow ferroan zones also occur within the interior of some olivine macrocrysts. Geochemistry: Olivine (cores of large macrocrysts $Fa_{19,4-20,2}$, Fe/Mn=42-44; rims $Fa_{43,2-60,4}$, Fe/Mn=50-55), cores of microphenocrysts $Fa_{29,1-30,2}$, Fe/Mn=45-46; rims up to $Fa_{53,3}$, Fe/Mn=53), orthopyroxene cores ($Fs_{24,0-24,4}Wo_{4,1-4,6}$, Fe/Mn=30-32), pigeonite ($Fs_{26,1-51,6}Wo_{11,9-16,9}$, Fe/Mn=31-35), subcalcaic augite ($Fs_{21,7-23,3}Wo_{25,0-24,2}$, Fe/Mn=26-28), plagioclase ($An_{61,1-64,3}Or_{0,5-0,4}$). Oxygen isotopes (R. Tanaka, OkaU): analyses of acid-washed subsamples by laser fluorination gave, respectively $\delta^{17}O =$</p>

Tableau 1 (suite).

Tableau 1 (continued).

Déclaration publiée acceptée (Metbull 17)	2.849, 2.892; $\delta^{18}\text{O} = 4.844, 4.943$; $\Delta^{17}\text{O} = 0.299, 0.290$ per mil. Bulk composition (G. Chen and C. Herd, UAb) ICPMS analysis of powdered interior material gave Sm/Nd=0.646, indicating that this specimen has affinities with the depleted compositional group of shergottites. Classification: Achondrite (Martian, olivine-phyric shergottite). Specimens: A total of 30.3 g of type material and one polished thin section are on deposit at UWS. Other known institutional specimens include 370 g (ASU), 58 g (UAb), and 108 g (UNM). The remaining material is held by anonymous dealers and collectors".
Publications scientifiques	Publications : <ul style="list-style-type: none"> • Chennaoui Aoudjehane H., Avicé G., Barrat J. A., Boudouma O., Chen G., Duke M. J. M., Franchi I. A., Gattacceca J., Grady M. M., Greenwood R. C., Herd C. D. K., Hewins R., Jambon A., Marty B., Rochette P., Smith C. L., Sautter V., Verchovsky A., Weber P., and Zanda B. 2012. Tissint Martian meteorite: A fresh look at the interior, surface, and atmosphere of Mars. <i>Science</i> 338:785–788. • Lin Y., El Goresy A., Hu S., Zhang J., Gillet P., Xu Y., Hao J., Miyahara M., Ouyang Z., Ohtani E., Xu L., Yang W., Feng L., Zhao X., Yang J. and Ozawa S. (2014) NanoSIMS analysis of organic carbon from the Tissint Martian meteorite: Evidence for the past existence of subsurface organic-bearing fluids on Mars, <i>Meteoritics & Planetary Science</i>, Volume 49, Issue 12, pages 2201–2218 Résumés : <ul style="list-style-type: none"> • Irving A. J., Kuehner S. M., Tanaka R., Herd C. D. K., Chen G., and Lapen T. J. 2012. The Tissint depleted permafic olivine-phyric shergottite: Petrologic, elemental and isotopic characterization of a recent fall in Morocco (abstract #2510). 43rd Lunar and Planetary Science Conference. CD-ROM. • Lin Y. T., Hu S., Feng L., Zhang J. C., Hao J. L., and Xu L. 2012. Petrography and shock metamorphism of the Tissint olivine-phyric shergottite (abstract). <i>Meteoritics & Planetary Science</i> 48:5131. • Lin Y., El Goresy A., Hu S., Zhang J., Gillet P., Xu Y., Hao J., Miyahara M., Ouyang Z., Ohtani E., Xu L., Yang W., Feng L., Zhao X., Yang J., and Ozawa S. 2013b. Organic carbon from the Tissint Martian meteorite: Hints for biogenic origin (abstract #1614). Goldschmidt Conference.

Déclaration d'une météorite

La richesse et la diversité du patrimoine météoritique ne peut être mesurée et appréciée qu'à travers le nombre de déclarations de météorites auprès du comité de nomenclature de la «Meteoritical Society», seul organisme habilité à reconnaître et approuver les roches extraterrestres dans le monde. Cette étape qui est indispensable après l'étude d'une nouvelle météorite (chute ou trouvaille) doit être réalisée le plus rapidement possible pour garantir la primauté de la déclaration en vue d'assurer une nomenclature correcte fondée sur les cartes topographiques du Maroc (Division de la Cartographie). Ce dernier point est critique dans un pays arabophone où les noms de lieux en caractères latins résultent de transcriptions variées selon les époques.

La déclaration d'une chute ou trouvaille auprès du NomCom (garant de l'authenticité de l'objet pour les chercheurs et les collectionneurs de météorites) doit être accompagnée d'une classification. Elle implique le dépôt dans une institution scientifique reconnue par la «Meteoritical Society» d'un spécimen de référence d'un poids minimum de 20 g ou de 20% de la météorite étudiée si sa masse est < 100g. Cet échantillon de référence est prévu pour permettre de revenir ultérieurement sur la classification de la météorite s'il le faudrait, et de la mettre à la disposition des scientifiques désirant réaliser des recherches sur l'échantillon en question.

La déclaration est soumise au NomCom sous forme d'un tableau Excel comprenant différents critères indispensables à l'acceptation de la météorite (lieu de

collecte, coordonnées géographiques, pétrographie, géochimie, histoire de la découverte ou de la chute, poids total connu et nombre de pièces récoltées, localisation de l'échantillon de référence, ...).

Les noms proposés pour les nouvelles météorites découvertes sur le sol marocain est l'un des problèmes pour lequel nos laboratoires luttent ces dernières années. En raison de l'absence de coordonnées géographiques exactes d'un grand nombre de trouvailles, celles-ci se voient octroyer l'acronyme «NWA» suivi d'un chiffre. On notera qu'avant l'invention du GPS aucune trouvaille de météorite ne documentait ses coordonnées, le lieu de la trouvaille (nom de la météorite) était considéré comme suffisant.

Une telle appellation en l'absence d'information est inévitable, c'est un pis-aller que la communauté scientifique ne doit pas encourager. Il était, donc, urgent de travailler sur la classification et la déclaration des nouvelles météorites en les documentant au maximum (coordonnées géographiques, répartition spatiale, histoire de la découverte, nom et contact du découvreur, etc...) en leur assignant un nom de lieu. Nous avons, aussi, proposé de renommer, par la même occasion, certaines NWA déjà classées afin d'en prouver l'origine marocaine (ex NWA 7034, NWA 6369, NWA 7325...) (Chennaoui Aoudjehane *et al.* 2013, 2014) et de valoriser la collection marocaine en matière de roches extraterrestres.

Les noms (ou acronymes) officiels sont également une condition nécessaires avant de publier les travaux réalisés sur les météorites dans toute revue spécialisée ou actes de réunions scientifiques. Les «noms provisoires» sont attribués aux météorites dont l'origine n'a pas encore été

examinée ni approuvée par le comité de nomenclature. Elles ne peuvent être citées ou utilisées dans une publication. Cette pratique peu recommandable est utilisée par certains pour obtenir un nom qui paraît officiel pour une météorite non authentifiée dans les règles. Ce protocole d'étude des météorites du Maroc constitue une démarche systématique de nos travaux depuis le début des années 2000, nous présentons comme exemple la météorite de Tissint à laquelle il a été appliqué (Tab. 1).

CONCLUSION

A travers ce protocole, nous visons à exposer la démarche scientifique reconnue et adoptée au plan international, pour déclarer les météorites et les officialiser. Cette démarche doit être suivie rigoureusement pour lutter contre les classifications anarchiques des météorites provenant du Maroc. Cette approche est réalisable selon les étapes suivantes :

- Collecte des informations sur le terrain concernant les chutes et les trouvailles, cette étape doit être bien documentée car elle constitue le point de départ de la recherche de certaines chutes et permet de justifier la nomenclature proposée par les coordonnées géographiques déterminées et reportées sur les cartes topographiques disponibles. Cet aspect du travail a été négligé en partie à cause de l'attitude laxiste du NomCom vis à vis des déclarations de nouvelles trouvailles.

- Analyses minéralogique, pétrographique et géochimique des échantillons réalisées dans les laboratoires spécialisés dans l'étude des météorites : cette étape doit être réalisée avec précision pour permettre une classification correcte de l'échantillon.

- Déclaration des météorites classifiées au comité de nomenclature de la «Meteoritical Society» :

La majeure partie des météorites provenant du Maroc n'ont pas été classifiées sous un nom de lieu marocain. Certaines, rares, et d'une grande valeur scientifique (HED, lunaires, martiennes) sont publiées sous l'acronyme «NWA». Ce traitement discriminatoire du NomCom, chaque fois que les informations de terrain sont disponibles, prive le Maroc de son patrimoine (Chennaoui Aoudjehane *et al.* 2013, 2014). En ce sens et pour parer à ce problème, nous avons suivi la démarche présentée dans cet article pour éviter la nomenclature «NWA» et porter nos travaux de recherche aux standards internationaux en partenariat avec différents laboratoires spécialisés dans le monde (Tab. 1).

La documentation précise des échantillons trouvés sur le territoire du Maroc est une information scientifique d'importance que nous devons léguer aux générations futures. Parallèlement à ce travail de documentation, de classification et de déclaration des météorites du Maroc, qu'il s'agisse de chutes ou de trouvailles, nous avons également mené des actions de communication et de sensibilisation auprès du grand public et de la communauté scientifique marocaine (Chennaoui Aoudjehane 2005b, 2006b, 2008; Jambon 2007).

La finalité des différentes actions de sensibilisation que nous avons entreprises est d'aboutir à une véritable structure de recherche nationale de type Muséum qui permettrait, d'une part, une large diffusion de la culture

scientifique à un public de tous âges et toutes origines et d'autre part, d'avoir un laboratoire spécialisé, doté de moyens analytiques suffisants pour l'étude élémentaire des météorites. Ce Muséum enrichira davantage les collaborations mutuelles entre spécialistes engagés dans des disciplines différentes et complémentaires, tous attachés à la diffusion de la culture scientifique. Il contribuera également à l'augmentation de la production de travaux authentiques.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le comité éditorial du Bulletin de l'Institut Scientifique, ainsi que Dr. Abderrahmane Ibhi et un autre expert évaluateurs anonyme pour leurs précieuses corrections, modifications et recommandations. Ce travail a été financé par le projet PICS SDU 01/10 : Etude pétrographique minéralogique et géochimique des météorites collectées au Maroc, et par le Programme VOLUBILIS –Comité AI n° MA/11/252.

REFERENCES

- Agee C.B., Wilson N.V., McCubbin F. *et al.* 2013. Unique meteorite from early Amazonian Mars: water rich basaltic breccia Northwest Africa 7034, *Science*, 339, 780–785.
- Agee C.B. 2014. Black Beauty: A unique 4.4 Ga, water rich meteorite from Mars. *Elements*, 10, 168 p.
- Barrat J.A., Jambon A., Bohn M. *et al.* 2003. Petrology and geochemistry of the unbrecciated achondrite North West Africa 1240 NWA 1240: An HED parent body impact melt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67, 20, 3959–3970.
- Britt D.T. & Consolmagno G.J. 2003. Stony meteorite porosities and densities: A review of the data through 2001. *Meteoritics and Planetary Science*, 38, 8, 1161–1180.
- Clayton R.N. & Mayeda T.K. 1996. Oxygen isotopic studies of achondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, 1999–2017.
- Clayton R.N. & Mayeda T.K. 1999. Oxygen isotope studies of carbonaceous chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63, 2089–2104.
- Chennaoui Aoudjehane H., Jambon A., Reynard B. *et al.* 2005a. Silica as a shock index in shergottites: A cathode luminescence study. *Meteoritics and Planetary Science*, 40, 1–14.
- Chennaoui Aoudjehane H. 2005b. *Les météorites du Maroc*. 4ème Colloque International Magmatisme, Métamorphisme et Minéralisations Associées. 3MA, Agadir, Maroc, p. 152.
- Chennaoui Aoudjehane H., Jambon A., Bourot Denise M. *et al.* 2006a. The Benguerir meteorite: Report and description of a new Moroccan fall. *Meteoritics and Planetary Science*, 41, 8, 231–238.
- Chennaoui Aoudjehane H. 2006b. *Les météorites du Maroc*. Réunion des Sciences de la Terre, RST Dijon France, p. 258.
- Chennaoui Aoudjehane. H., Jambon A. & Rjimati E. 2007. Al Haggounia Morocco strewn field. *Meteoritics and Planetary Science*, Supplement, 42, A30.
- Chennaoui Aoudjehane H. 2008. Les météorites du Maroc: une richesse scientifique et un patrimoine à préserver. *Bulletin d'Information de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques*, 3, 63–74.
- Chennaoui Aoudjehane H., Jambon A., Bourot Denise M. *et al.* 2009a. Tamdakht Meteorite: The Last Moroccan Fall. *Meteoritics and Planetary Science*, 44, 7, Supplement 5038, A 50.
- Chennaoui Aoudjehane H., Jambon A., Rjimati E. *et al.* 2009b. The Late Quaternary Fall at Al Haggounia Morocco: The ¹⁴C

- Evidence. *Meteoritics and Planetary Science*, 44, 7, Supplement 5037.
- Chennaoui Aoudjehane H., Avice G., Barrat J. A. *et al.* 2012. Tissint Martian Meteorite: A Fresh Look at the Interior, Surface, and Atmosphere of Mars. *Science*, 338, 6108, 785–788.
- Chennaoui Aoudjehane H., Jambon A., & Larouci N. 2013. On meteorites from Morocco and the NWA meteorite nomenclature. *Meteoritics and Planetary Science*, 48, 7, Supplement, 5347.
- Chennaoui Aoudjehane H., Jambon A., Larouci N. *et al.* 2014. Meteorites from Northwest Africa NWA: one step forward. *Meteoritics and Planetary Science*, 49, 9, Supplement 5289.
- Devaux A., Jambon A., Boudouma O. *et al.* 2011. Al Haggounia 001: a weathered EL6 chondrite. *Meteoritics and Planetary Science*, 46, 7, Supplement 5298.
- Göpel C., Birck, J.L., and Zanda B. 2011. *Mn/Cr systematics in carbonaceous chondrites: Mineral isochrons versus stepwise dissolution*. Goldschmidt Conference Abstracts, 936 p.
- Grady M. M. 2000. *Catalogue of Meteorites, With special reference to those represented in the collection of the Natural History Museum*, Fifth Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 689 p. and CD-ROM.
- Greenwood R., Franchi I., Jambon A. *et al.* 2005. Widespread magma oceans on asteroidal bodies in the early Solar System. *Nature*, 435, 916–918.
- Greenwood R., Franchi I., Jambon A. *et al.* 2006. Oxygen isotope variation in stony iron meteorites. *Science*, 313, 1763–1765.
- Grossman J.N. 2000. The Meteoritical Bulletin, N. 84. *Meteoritics and Planetary Science*, 35, A199–225.
- Hand E. 2014. Black beauty, a meteorite from ancient Mars, has captivated collectors and scientists. *Science*, 346, 1044–1049.
- Jambon A., Barrat J.A., Sautter V. *et al.* 2002. The basaltic Shergottite North West Africa 856: Petrology and chemistry. *Meteoritics and Planetary Science*, 37, 1147–1164.
- Jambon A., Bohn M., Boudouma O. *et al.* 2003. Al Mala'ika NWA 1669: A new Shergottite from Morocco: mineralogy and petrology. *Meteoritics and Planetary Science*, 38, A43.
- Jambon A., Barrat J.A., Boudouma O. *et al.* 2005. Mineralogy and petrology of the angrite Northwest Africa 1296. *Meteoritics and Planetary Science*, 40, 361–375.
- Jambon A. 2007. La Lune : composition chimique et modèles de formation et de différenciation. 5^{ème} colloque international sur le magmatisme, Métamorphisme et Minéralisations associées, 3Ma, Fès, Maroc, p. 23.
- Jambon A., Boudouma O., Fonteilles M. *et al.* 2008. Petrology and mineralogy of the angrite Northwest Africa 1670. *Meteoritics and Planetary Science*, 43, 1783–1795.
- Jambon A., Barrat J.A., Bollinger C. *et al.* 2010. *Northwest Africa 5790. Top Sequence of the Nakhilite Pile*. 41st Lunar and Planetary Science Conference, Houston - Texas, 1996 pdf.
- Krot A.N., Keil K., Scott E.R.D. *et al.* 2013. *Classification of meteorites and their genetic relationships*. In: Davis A.M. (Ed.) - *Meteorites, Comets and Planets* Vol. 1, Treatise on Geochemical Second edition eds. K.K. Turekian and H.D. Holland, Elsevier, Oxford, p. 8883.
- Larouci N., Jambon A., Chennaoui Aoudjehane H. *et al.* 2013. Are NWA 5363/NWA 6517 remnants of a terrestrial embryo?. *Meteoritics and Planetary Science*, 48, 7, Supplement, pdf 5185.
- Le Guillou C., Rouzaud J.N., Remusat L. *et al.* 2010. Structures, origin and evolution of various carbon phases in the ureilite Northwest Africa 4742 compared with laboratory-shocked graphite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, 14, 4167–4185.
- Papike J.J. 1998. *Planetary Materials, Reviews*. In: Papike J.J. (Ed.) - *Mineralogy*. Mineralogical Society of America, Washington, DC, 36, 890 p.
- Rochette P., Sagnotti L., Bourot-Denise M. *et al.* 2003. Magnetic classification of stony meteorites: 1. Ordinary chondrites. *Meteoritics and Planetary Science*, 38, 251–268.
- Rochette P., Gattacceca J., Bourot-Denise M. *et al.* 2009. Magnetic classification of stony meteorites: 3. Achondrites. *Meteoritics and Planetary Science*, 44, 405–427.
- Smith D.L., Ernst R.E., Samson C. *et al.* 2006. Stony meteorite characterization by non-destructive measurement of magnetic properties. *Meteoritics and Planetary Science*, 41, 3, 355–373.
- Stöffler D., Keil K., and Scott E.R.D. 1991. Shock metamorphism in ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55, 3845–3867.
- Rubin A.E. 1997a. Mineralogy of meteorite groups. *Meteoritics and Planetary Science*, 32, 231–247.
- Rubin A.E. 1997b. Mineralogy of meteorite groups: an update. *Meteoritics and Planetary Science*, 32, 733–734.
- Rubin A.E., Keil K., and Scott E.R.D. 1997. Shock metamorphism of enstatite chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61, 847–858.
- Sautter V., Jambon A. & Boudouma O. 2006. Cl-amphibole in the nakhilite MIL 03346: Evidence for sediment contamination in a Martian meteorite. *Earth and Planetary Science Letters*, 2521, 45–55.
- Trinquier, A., Birck, J.L., and Allègre C.J. 2007. Widespread ⁵⁴Cr heterogeneity in the inner solar system. *The Astrophysical Journal*, 655, 1179–1185.
- Tschermak G. 1885. Die mikroskopische Beschaffenheit der Meteoriten. Translated by Wood J.A. and Wood E.M. and reprinted in 1964 in Smithsonian. *Contributions to Astrophysics*, 4, 138–239.
- Warren P.H. 2001. Porosities of lunar meteorites: Strength, porosity, and petrologic screening during the meteorite delivery process. *Journal of Geophysical Research - Planets*, 106, E5, 10, 101–10, 111.
- Weisberg M.K., McCoy T.J., & Krot A.N. 2006. *Systematics and Evaluation of Meteorite Classification*. Meteorites and the Early Solar System II, 19–52.
- Wilkison S.L., McCoy T.J., McCamant J.E. *et al.* 2003. Porosity and density of ordinary chondrites: Clues to the formation of friable and porous ordinary chondrites. *Meteoritics and Planetary Science*, 38, 10, 1533–1546.
- Wittmann A., Korotev R.L., Jolliff B. L. *et al.* 2014. Petrology and Chemistry of a Lunar Feldspathic Impact Melt Rock Meteorite from Oued Awlitis, Morocco. *Meteoritics and Planetary Science*, 49, 9, Supplement, 5352.
- Wlotzka F. 1993. A weathering scale for the ordinary chondrites. *Meteoritics*, 28, 3, 460–460.

Manuscrit reçu le 03/11/2014

Version révisée acceptée le 20/02/2015

Version finale reçue le 16/07/2015

Mise en ligne le 23/07/2015