

SUR LA DÉCOUVERTE D'UN IMPORTANT CRATÈRE MÉTÉORITIQUE DANS LE TADEMAÏT ORIENTAL (SAHARA ALGÉRIEN)

Mahammed MAHBOUBI¹, Cheikh MAMMERI², Tahar Abderahim MATSA¹, Abdelmadjid SEDDIKI³, Miloud BENHAMOU⁴, Ibrahim ZEROUAL⁵, Okkacha KHEDDOUM⁴ et Salamet MAHBOUBI⁶

RÉSUMÉ

Ce travail préliminaire concerne une structure géologique circulaire particulière, nommée Tabaloulet, visible sur le Plateau du Tademaït oriental (Algérie) à l'aide des photos satellitaires. Les travaux d'investigation de terrain sur cette morphostructure ont permis d'observer une zone centrale (piton central) ceinturée par une dépression et à l'extérieur par une succession d'anneaux. Cette allure morphométrique rappelle celle d'un cratère météoritique classique de type complexe. Les résultats des analyses structurales, faciologiques et pétrologiques ont mis en évidence une bréchification intense (calcaire bréchique et brèche de retombée), ainsi qu'un métamorphisme de choc (quartz choqué). Toutes ces caractéristiques confirment cet astroblème.

L'impact météoritique s'est produit à partir de la deuxième moitié du Maastrichtien, dans une mer qui occupait à cette époque une partie du Sahara algérien (mer transsaharienne).

Mots-clés - Tabaloulet - Plateau du Tademaït - Brèche - Impact météoritique - Mer transsaharienne - Métamorphisme de choc - Maastrichtien.

¹Laboratoire de Paléontologie Stratigraphique et Paléoenvironnements, FSTU, Université d'Oran 2. E-mails : mahboubi.med@gmail.com; tahar_1993@yahoo.fr

²Centre Universitaire Nour El Bachir, CUNB, El Bayadh. E-mail : mammericheikh@gmail.com

³Laboratoire Géoressources, Environnement et Risques Naturels, FSTU, Université d'Oran 2. E-mail: abdelmadjid.seddiki69@gmail.com

⁴Laboratoire des Bassins et Bilans Sédimentaires, FSTU, Université d'Oran 2. E-mails: milbenhamou@gmail.com; kheddoum.okkacha@univ-oran2.dz

⁵Laboratoire Géoressources, Environnement et Risques Naturels et Centre Universitaire de Tindouf. E-mail : zeroual_ib@yahoo.fr

⁶Laboratoire de Recherche n°25, FSNVSTU, Université de Tlemcen. E-mail: salamet.mahboubi@gmail.com

ON THE DISCOVERY OF AN IMPORTANT METEORITE CRATER IN THE EASTERN TADEMAÏT (ALGERIAN SAHARA)

ABSTRACT

This preliminary work concerns a particular circular geological structure, named Tabaloulet, visible on the eastern Tademaït Plateau (Algeria) using satellite photos. Field investigations of this morphostructure allowed us to observe a central zone, (central peak) surrounded by a depression and outside by a succession of rings. This morphometric appearance is similar to a classic meteorite crater of complex type. The results of the structural, faciological and petrological analyses revealed an intense brecciation (brecciated limestone and fallout breccia), as well as a shock metamorphism (shocked quartz). All these characteristics confirm that this structure is an astrobleme.

The meteorite impact occurred from the Upper Maastrichtian, in a sea that occupied at that time part of the Algerian Sahara (trans-Saharan sea).

Keywords - Tabaloulet - Tademaït Plateau - Breccia - Meteorite impact - Trans-Saharan Sea - Shock metamorphism - Maastrichtian.

I- INTRODUCTION

Ce travail préliminaire consiste à décrire un nouveau cratère météoritique découvert dans le Tademaït oriental. Nous présentons les premiers résultats obtenus à partir de travaux réalisés sur le terrain et d'analyses en laboratoire.

En Algérie, quatre astroblèmes ou cratères météoritiques sont connus, à savoir Tin Bider, Amguid, Ouarkziz et Talemzane (ou Maadna). Ces structures sont suffisamment décrites (Fabre *et al.*, 1970 ; Lambert *et al.*, 1980, 1981 ; Belhaï *et al.*, 2006 ; Belhaï et Sahoui, 2014 ; Sahoui *et al.*, 2016 ; Sahoui, 2017 ; Lamali *et al.*, 2016 et Sighinolfi *et al.*, 2020). Elles se localisent toutes entre le 26^e et le 33^e parallèle Nord et 6^e méridien Est et le 8^e méridien Ouest, c'est-à-dire sur la plateforme saharienne. Les cratères de Tin Bider et Ouarkziz, respectivement de 6 et 3,5 km de diamètre, sont décrits comme des cratères de type complexe (Lambert *et al.*, 1980, 1981 ; Sahoui, 2017) alors que les deux autres cratères (Amguid et Talemzane) sont

plus petits (respectivement de diamètre 0,5 et 1,75 km) et sont considérés comme des cratères de type simple (Lambert *et al.*, 1980, 1981 ; Sahoui, 2017).

Comment cet astroblème a été découvert ?

Lors de la préparation d'une mission de terrain sur le Tademaït oriental (25 septembre 2017), nous avons tracé sur *Google Earth* un itinéraire géologique sensiblement Est-Ouest, recoupant les terrains crétacés et tertiaires de cette région. Au dernier tiers de ce parcours, joignant la partie moyenne de l'Oued Mya à l'amont de l'Oued Tabaloulet, une morphostructure circulaire a attiré notre attention.

Tabaloulet n'est pas le seul cratère découvert à l'aide de l'imagerie spatiale, d'autres l'ont été auparavant. Nous citerons les exemples du cratère de Kamil (Perrin, 2010) et celui du champ météoritique de Gilf Kebir au sud de l'Égypte (Paillou *et al.*, 2004). Il est à préciser

que l'astroblème de Kamil a été identifié par *Google Earth* en dépit de sa petite taille (46 m de diamètre seulement).

Appellation de cette nouvelle structure

Oued Tabaloulet a abrité et accordé l'hospitalité à l'un de nous (M. M.), pour réussir sa première mission de terrain dans cette contrée pendant l'hiver 1989. En guise de reconnaissance, le nom de Tabaloulet est proposé à ce nouveau cratère météoritique.

Localisation de l'impact

Géographiquement, l'impact de Tabaloulet se localise entre les amonts de deux oueds Chebaba et Tabaloulet (coordonnées: N29°10'57" E2°53'36"). Ils coulent vers le nord-est et constituent deux affluents importants de l'Oued Mya. Dans cette région, fortement disséquée par l'érosion, l'accès est parfois difficile pour circuler sur le Plateau du Tademaït oriental (fig.1).

Contexte géologique des environs de l'impact

Le Tademaït oriental est limité à l'est par une zone relativement haute (ligne de partage des eaux) correspondant au môle d'Arak. Paléogéographiquement, ce dernier a joué le rôle d'une barrière empêchant la mer transsaharienne d'occuper le Tademaït occidental. Par la suite, cette transgression a été déviée vers le sud pour couvrir les parties les plus méridionales du Sahara (Reyment et Reyment, 1978; Fabre, 2005).

Le quart sud-est de la carte géologique de Chebaba est constitué par des calcaires marins du Campanien et du Maastrichtien/Paléocène qui couvrent de grandes étendues du Plateau. Tous les dépôts autour du secteur de l'impact sont donc post-sénonien inférieur. L'astroblème de Tabaloulet se localise au sud de cette carte. Son emplacement est figuré par des dépôts quaternaires, décrivant une forme circulaire entourant des terrains crétacés (fig. 2).



Fig. 1- Localisation du cratère météoritique par rapport au Tademaït oriental (image satellitaire SAS. Planet).

Location of the meteorite crater in regard to the Eastern Tademaït (SAS. Planet satellite image).

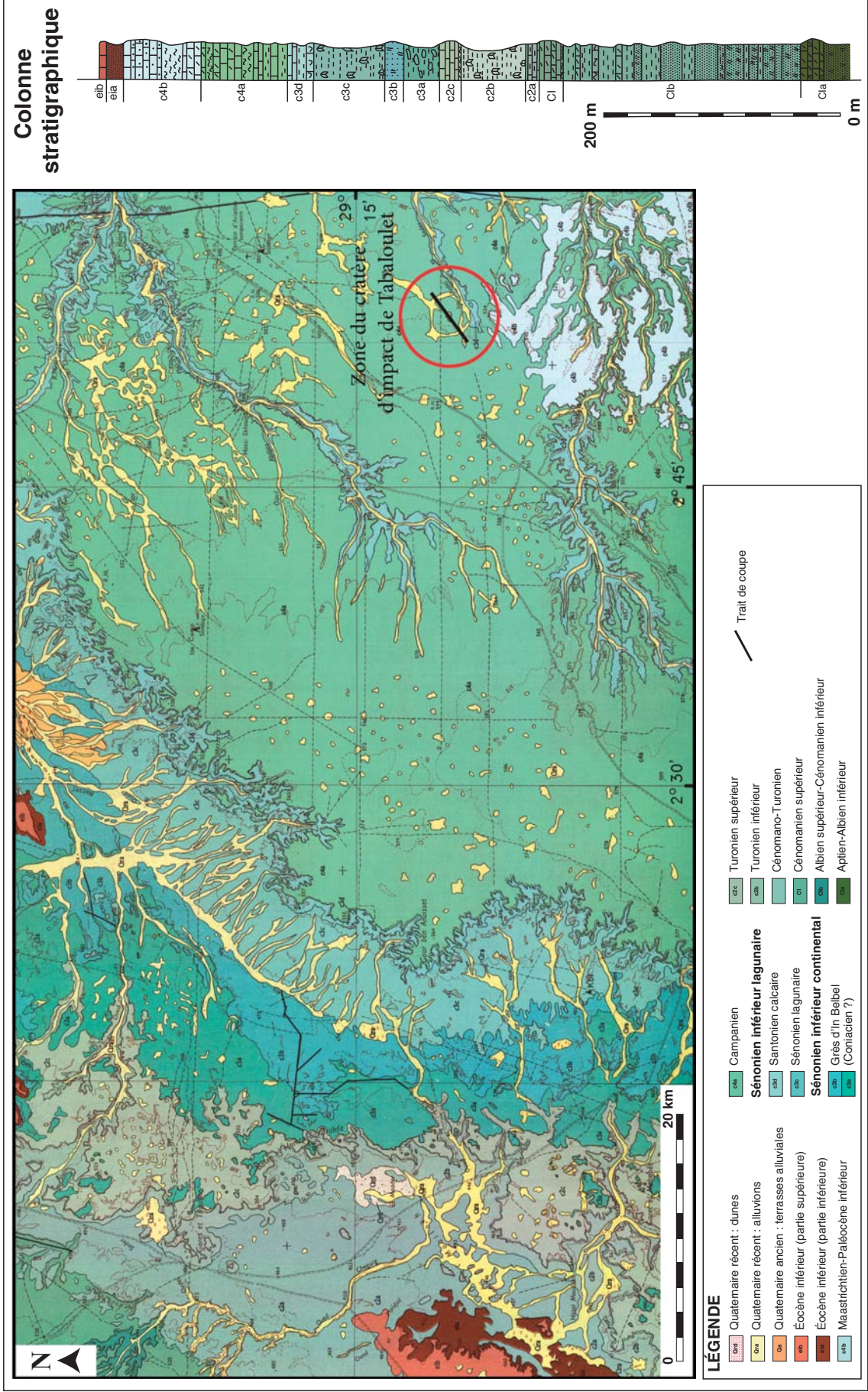


Fig. 2- Extrait de la carte géologique de Hassi Chebaba n° NH-31-IX à l'échelle 1/200 000 (modifiée, d'après Guezlane et Nimour, 1997).
Excerpt from the Hassi Chebaba geological map n° NH-31-IX at 1/200 000 scale (modified, after Guezlane and Nimour, 1997).

Ces dépôts carbonatés se sont déposés au fond d'une mer peu profonde qui a occupé une partie du Sahara à la fin du Crétacé et au début du Tertiaire. Sur le terrain, le Maastrichtien et le Paléocène forment deux cuestas (Maastrichtien inférieur et Maastrichtien supérieur/Paléocène inférieur). Elles sont cartographiées séparément et leur puissance peut atteindre ou dépasser une centaine de mètres (Amard *et al.*, 1981).

II- DESCRIPTION SOMMAIRE DE LA STRUCTURE DE TABALOULET

II.1- Les critères morphométriques

C'est une structure circulaire identifiable sur toutes les images satellitaires avec un rayon de 2,25 km, c'est-à-dire que son diamètre apparent est d'environ 4,5 km. Trois parties la composent : un piton central, une dépression annulaire et une succession d'anneaux vers l'extérieur du site.

- Le piton central occupe le cœur de la structure et peut atteindre 650 m de diamètre (figs. 1 et 4; pl. I). Il est surélevé de 7 mètres par rapport à la dépression qui l'entoure. Contrairement aux autres impacts de même type décrits en Algérie (Tin Bider et Ouarkiz), le piton central de la nouvelle structure est mieux conservé. Il est limité par un banc de calcaire (1,8 m d'épaisseur), présentant un pendage relativement fort vers l'extérieur (jusqu'à 60°), selon l'endroit où on se trouve. Vers le centre, les pendages sont plus marqués (70 à 90°) (figs. 2, 3A et D, 4; pl. I) et les bancs de calcaire sont très lités, plissés et induits d'une patine ferrugineuse (pl. I; fig. 3). La partie sud du piton est légèrement affaissée en raison d'un probable glissement. Nous pensons que ces calcaires sont d'âge santonien.

- La dépression annulaire, large de 500 à 600 m, sépare le piton central des anneaux (fig. 4A, B et C). Cette dépression est peu visible, car elle est cachée en partie par des éléments glissés.

- Les anneaux : trois anneaux sont visibles dans la partie occidentale de la structure (An1, An2 et An3) (fig. 4A, B et C). Sur le terrain, en se servant de l'image satellitaire, nous arrivons à identifier deux autres anneaux (An4 et An5). Un sixième anneau probable (An6) clôture la structure vers l'extérieur et lui donne une extension de 12 km environ (fig. 4C).

Cette morphométrie s'accorde parfaitement pour classer l'astroblème de Tabaloulet comme étant un cratère de type complexe (Grieve et Pesonen, 1992 ; Peulvast et Vanney, 2001).

II.2- Données faciologiques et pétrologiques des terrains rencontrés dans le cratère

Les données faciologiques

Le secteur de l'impact est formé par des calcaires en bancs décimétriques à métriques, constituant la roche cible. En plus de ces faciès carbonatés, les travaux de terrain ont permis d'observer deux autres faciès. Il s'agit d'un calcaire bréchique et d'une brèche de retombée. Une vingtaine d'échantillons ont été prélevés au centre de la structure et à l'ouest de celle-ci sur un tronçon de 4 km environ. Les analyses ont conduit aux résultats suivants :

- Le calcaire du piton central

L'analyse des microfaciès de trois échantillons de calcaire récoltés montre (pl. I; figs. 2, 3 et 4):

- Echantillon Tab 6 : il s'agit d'un calcaire mudstone à péloïdes, parsemé de cavités à remplissage calcitique fenestrate, probablement due à une émergence temporaire. On note la présence de fantômes de foraminifères empâtés dans une micrite en voie de dolomitisation.
- Echantillon Tab 2 : il est représenté par deux faciès, soit par un calcaire pelle-

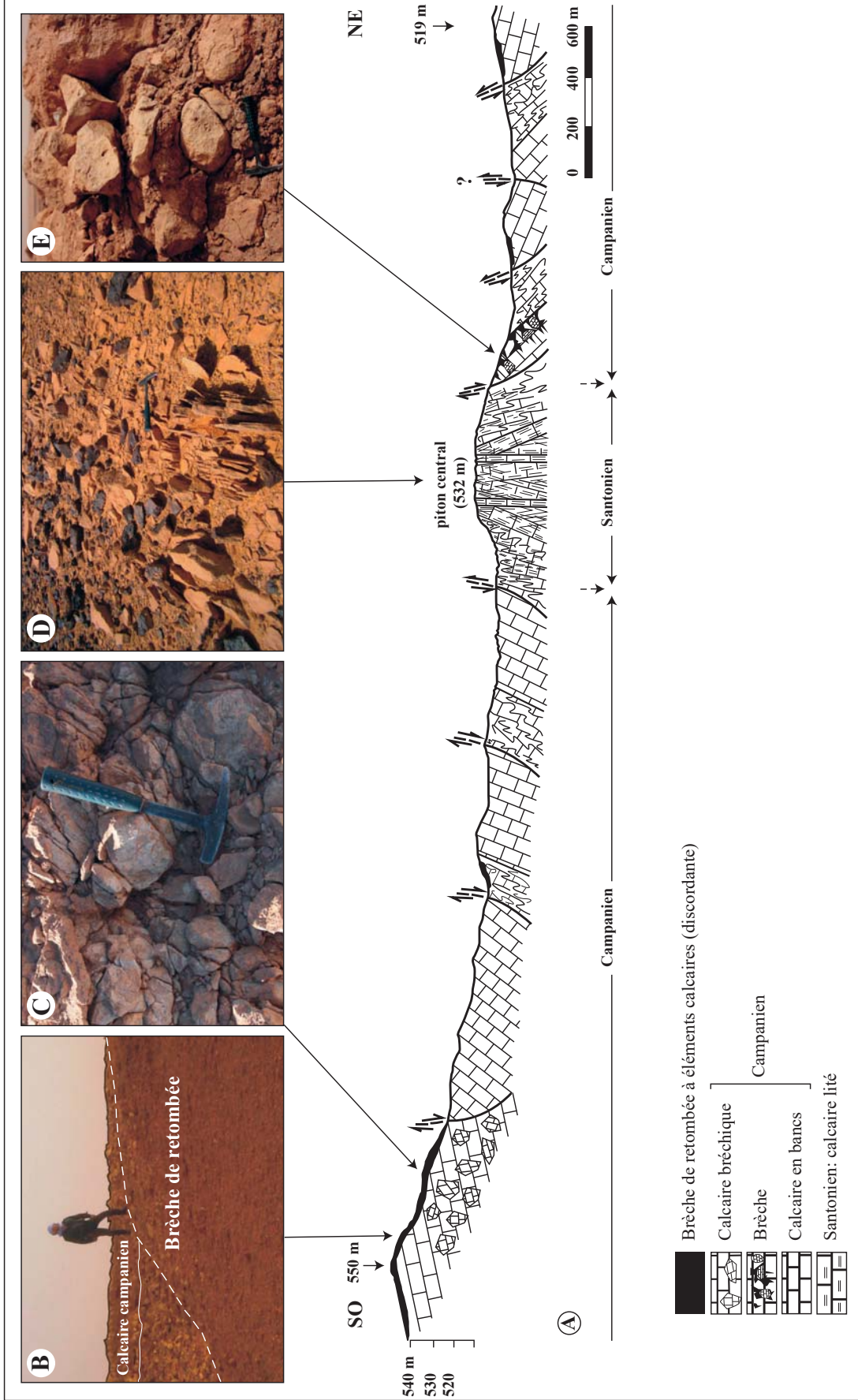


Fig. 3- Coupe géologique synthétique passant par le piton central du cratère de Tabaloulet.

Synthetic geological cross section through the central peak of the Tabaloulet crater.

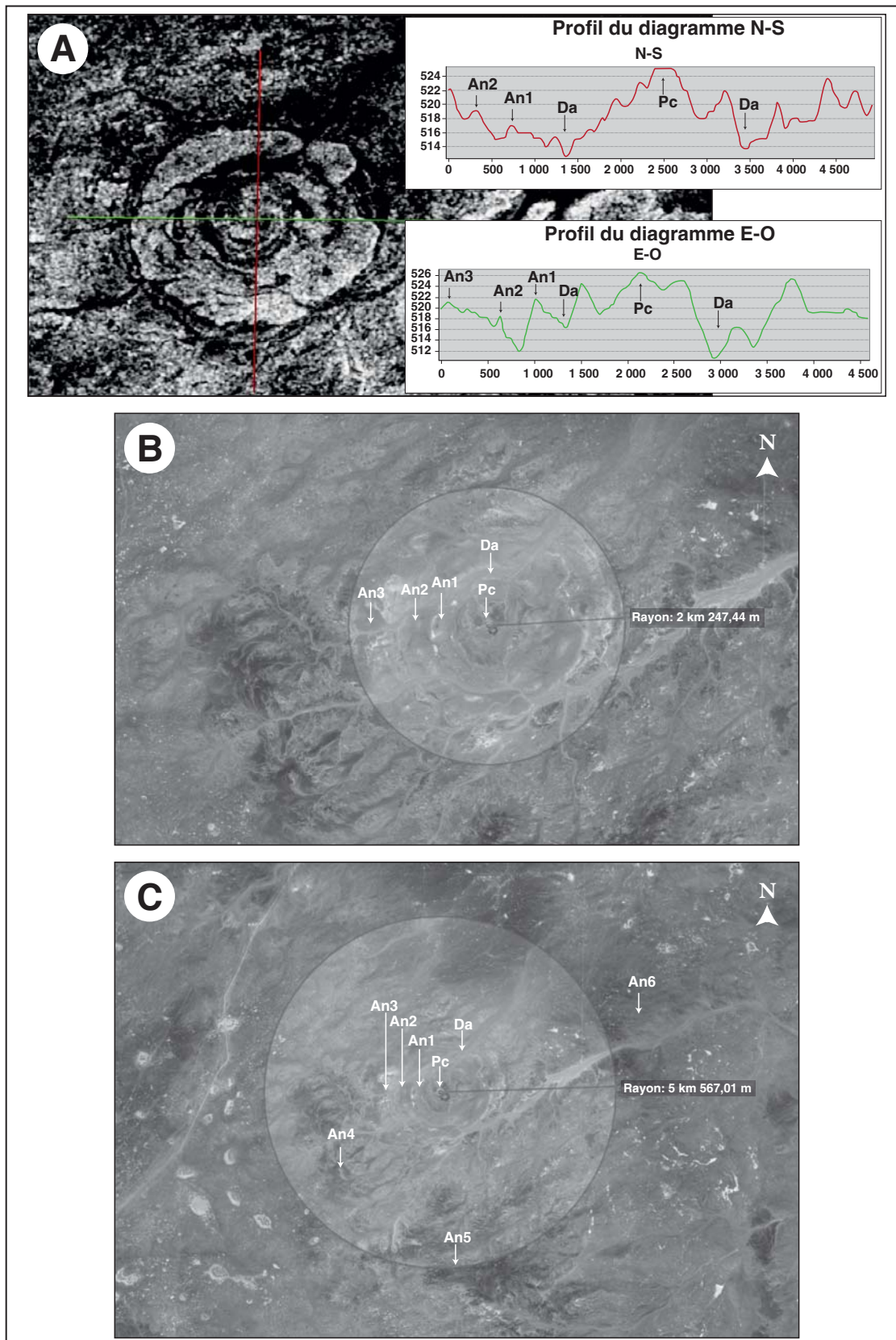


Fig. 4- Morphologie de l'astroblème de Tabaloulet (**Pc**: piton central; **Da**: dépression annulaire; An1, 2, 3, 4, 5 et 6: anneaux) (**A**: image radar; **B** et **C**: images satellitaires traitées, SAS. Planet).
Morphology of the Tabaloulet astrobleme (Pc: central peak; Da : annular depression; An1, 2, 3, 4, 5 and 6: rings) (A: radar image; B and C: processed satellite images, SAS. Planet).

toïdale blanc ou encore par un calcaire rougeâtre brun à micrite laminaire à grains de quartz.

- Echantillon Tab 3 : il s'agit d'un calcaire à gravelle, disséqué par des cavités remplies de cristaux sparitiques. Les cavités pourraient être des indices d'émersion (structure fenestree).

- Le calcaire bréchique

Il affleure dans deux endroits différents :

- à la base d'un banc de calcaire limitant le piton central (fig. 3E), le calcaire bréchique est représenté par des blocs arrondis, de taille avoisinant les 30 cm. Ces derniers sont englobés dans une pâte bréchique rougeâtre, dont les éléments sont centimétriques. Ces éléments sont de même nature que les grands blocs. Ce banc de calcaire est affecté par des failles synsédimentaires.
- à la base de l'anneau 4, le calcaire bréchique est disloqué en boules bien arrondies (figs. 1, 2 et 3B; pl.II), quelquefois affectées par des slumps. Ces blocs sont cassés et désagrégés pour en donner une brèche intrinsèque. Parfois, ils sont séparés par des fissures remplies par un matériel plastique (fluage) de même nature, associé à de petites failles synsédimentaires (pl. II, figs. 2 et 3). Cette brèche d'impact est due probablement au mouvement d'excavation lors de la formation de l'astrolème.

- La brèche de retombée

Les brèches se trouvant à l'intérieur de la structure sont appelées "brèches de retombées" (French, 1998; French et Koeberl, 2010). À Tabaloulet, cette brèche d'impact affleure en discontinuité et également à l'intérieur du cratère. Elle est localisée dans cinq endroits différents à l'est et l'ouest du piton central. L'affleurement

le plus important (1,5 m d'épaisseur) (fig. 3 A et pl. II. 4) se situe à proximité de l'anneau 4 où elle recouvre en discordance les calcaires campaniens.

L'analyse du faciès et du microfaciès de cette brèche montre :

- Echantillon Tab 14 : il s'agit d'une brèche à éléments calcaires lithographiques hétérogènes subarrondis à subanguleux ou en forme de baguettes et à texture laminaire (pl. III. 2 et 4). Les éléments bréchiques sont entourés par une pellicule laminaire micritique brune (1^{ère} génération) englobée elle-même par une structure laminaire (2^{ème} génération). Ces éléments sont sertis dans une matrice micritique plus claire.
- Echantillon Tab 17 : il s'agit d'une calcrête à oncolithes dont la taille varie de 5 mm à 5 cm (pl. III. 5, 6 et 7). Par endroit, on observe des microgéodes à cristaux de calcite. Le faciès est assimilable au type Babaudus (König-Francioni, 2008). Les grains de quartz sont anguleux à subanguleux avec parfois des golfes de corrosion. Ces grains sont sertis dans une gangue micritique pelloïdale à petits oncoïdes. Ces derniers présentent sur leur bord un liseré ou un film de microcristaux calcitiques fibreux à tendance microstalactitique traduisant un milieu supratidal-continental. Les éléments les plus grossiers sont encroûtés. Cette calcrête est identique aux croûtes calcaires développées sur les séries pleistocènes en Algérie occidentale (Elloy et Thomas, 1981 ; Menzoul, 2011).
- Echantillon Tab 18 : il présente trois générations d'oncolithes : (pl. III. 1, 3 et 8).
 - La première est représentée par des oncolithes (2 à 15 mm) à nucleus carbonaté brun et blanc entouré par une pellicule laminaire présentant des structures

zonaires, englobant un faciès carbonaté pélitique à grains de quartz anguleux.

- La deuxième génération comporte des oncolithes de même taille à nucleus carbonaté blanchâtre, toujours entouré par une structure laminaire.
- Dans la troisième génération, le tout est lié par une structure laminaire représentant des séquences binaires millimétriques liées à l'humectation/sécheresse reflétant le cycle de Milankovitch.

La mise en évidence de cette brèche de retombée (fig. 3B; pl. III. 1 à 8) est idéalement comparée avec celles de deux cratères différents de la marge de la Téthys Nord, tel que le cratère de Rochechouart en France (König-Francioni, 2008) et le cratère d'Azuera en Espagne (Ernstson et Claudin, 1990). Par conséquent, nous pouvons dire que la brèche de Tabaloulet montre beaucoup de similitudes dans sa composition et sa structure avec celles décrites dans les deux cratères européens.

Les données pétrologiques

L'impact météoritique de Tabaloulet s'est produit dans une zone du Plateau du Tademaït oriental où la série géologique est exclusivement formée de calcaires. Les travaux relatifs à la recherche d'indices de choc dans les calcaires ont souligné des difficultés (voir l'impossibilité) pour cerner les différents critères permettant de justifier l'existence d'un impact météoritique (Sahoui, 2017). Malheureusement, les étapes plus subtiles du métamorphisme de choc ne peuvent être appliquées que de manière très incomplète pour les impactites formées dans des roches sédimentaires. En effet, les roches carbonatées, le calcaire et la dolomie ne présentent pas les textures et les caractéristiques diagnostiques microscopiques ou macroscopiques nécessaires pour entreprendre ce type de classification.

Une étude détaillée de la brèche lithique de retombée a été effectuée. Cette dernière est formée par une matrice comprenant essentiellement des fragments de roches et de minéraux choqués ou non choqués. Plusieurs fragments collectés de la brèche lithique et de retombées, ont été imprégnés dans l'acide chlorhydrique (HCl) pour déterminer si l'échantillon contenait des grains de quartz métamorphisés par le choc. Les microstructures associées aux grains de quartz sont les plus déterminantes d'un impact, car le quartz ne possède aucun clivage (French et Koeberl, 2010).

Le résidu insoluble représentait généralement 5 à 10% de la totalité de l'échantillon dissout dans l'acide. L'étude au microscope optique du résidu insoluble a montré qu'il était composé de grains de quartz choqué (10 à 20%), de grains opaques (10 à 20%) et de quartz non choqué (60 à 70%). Les grains de quartz choqué contiennent de multiples ensembles de lamelles planes qui se croisent. La moyenne de la taille des grains a été déterminée comme étant de 0,1 mm et le plus gros grain rencontré était de plus de 1,5 mm.

Un total d'une vingtaine de grains de quartz avec des structures planaires de déformation (PDFs) ont été identifiés, avec une seule direction (pl. IV. 1) ou deux directions (pl. IV. 2). Les grains sont subarrondis à anguleux, de l'ordre de 600 μm à 1,5 mm. Ces structures particulières sont des lamelles optiques parallèles (5 à 10 μm), très rapprochées, qui suivent les plans cristallographiques des grains de quartz.

Une dizaine de grains présentant des fractures planaires (PFs) ont été identifiés (pl. IV. 3). Une lame mince, effectuée sur un échantillon, a mis en évidence des grains de quartz présentant des fractures planaires (PFs) (pl. IV. 4). Les PFs sont bien développées et traversent l'ensemble du grain dans la plupart des cas. Les PFs dans chaque grain sont typiquement espacées de 10 à 30 μm .

Des fractures de concussion ont été mises en évidence dans quelques rares grains de quartz. Elles représentent des fractures radiales (pl. IV. 5).

Des particules de type micro-scories ont été découvertes dans la brèche de retombée (pl. IV. 6). Ces fragments de verre d'impact présentent d'anciennes bulles (vésicules extérieures). Ces fragments d'impact fondus ont une taille comprise entre 0,5 et 1,0 mm.

Un mosaïcisme a été identifié dans quelques grains de quartz (pl. IV. 7). Le mosaïcisme est reconnu par un motif d'extinction moucheté ou tacheté, contrairement à l'extinction ondulatoire qui balaye le grain en faisant tourner la platine du microscope. Le cristal contient de nombreux sous-domaines plus petits (Stöffler et Langenhorst, 1994). La mosaïque de grains constitue un deuxième phénomène de déformation important dans le quartz choqué ; un cristal montrant une extinction en mosaïque, présente une extinction parcellaire, causée par une désorientation modérée à importante du réseau cristallin, à la suite d'une déformation plastique (Stöffler et Langenhorst, 1994).

Quelques rares "toasted" quartz ou "grains grillés" ont été identifiés (pl. IV. 8). C'est une coloration brunâtre due à une forte proportion de très petites inclusions qui sont principalement localisées le long des PDFs (Whitehead *et al.*, 2002).

III- DISCUSSION

Selon leur intensité, les ondes de choc laissent des traces différentes dans un minéral. Les caractéristiques de déformation planaires (PDFs) sont les plus importantes, comme dans le cas du quartz. Le diagnostic des caractéristiques de choc dans le quartz reste l'une des méthodes les plus fiables disponibles pour confirmer un événement d'impact (French, 1998 ; French et

Koeberl, 2010 ; Alwmark *et al.*, 2014 ; Holm-Alwmark *et al.*, 2018).

Nous avons identifié des grains de quartz caractérisés par des fractures planaires, des PDFs et un mosaïcisme de choc, qui se sont avérés être indiquants des degrés croissants de pression de choc qui se développent à des pressions de 12 à 36 GPa (Stöffler et Langenhorst, 1994).

Les fractures planaires commencent à se former à des pressions ~ 5 GPa ; il s'agit de fractures ouvertes parallèles avec un espacement de $\sim 15-20$ μm ou plus (Stöffler et Langenhorst, 1994 ; Grieve *et al.*, 1996 ; French et Koeberl, 2010 ; Ferrière et Osinski, 2013). Les PDFs, commencent à se former à des pressions ~ 8 à 10 GPa et sont composées de lamelles planes individuelles étroites et droites de matériau amorphe, formant des ensembles parallèles espacés de 2-10 μm (Stöffler, 1972 ; Stöffler et Langenhorst, 1994).

Les fractures à concussion ont été mises en évidence dans les brèches. Ce sont des fractures conchoïdales intragranulaires, qui émanent des contacts grain à grain de quartz voisins. Elles s'étendent souvent dans les deux grains en contact en se ramifiant à partir du contact grain à grain (Buhl *et al.*, 2013). Des fractures similaires ont été décrites pour la première fois par Kieffer (1971) dans le Meteor Crater (Arizona), comme étant des fractures de concussion. Ces fractures sont un phénomène commun courant dans les sites d'impacts météoritiques (Melosh, 1989 ; Buhl *et al.*, 2013).

Des particules de type micro-scories ont été découvertes dans la brèche de retombée. Ce sont essentiellement des fragments de verre fondu. Ces éléments sont interprétés comme des caractéristiques résultant d'une éruption vésiculaire (éclatement de bulles) à la surface du grain, ou collision en vol avec d'autres éjectas fins (King

et Petruny, 2008). Ce verre vésiculaire fondu par choc, possède une texture similaire à celle des scories volcaniques. En l'absence de volcanisme décrit dans la région, la seule explication, reste celle de fragments d'impact météoritique. Suite à l'événement d'impact, les sédiments de la zone cible ont été soumis à de hautes températures qui les ont conduits à une fusion partielle. Des vestiges de ces fragments fondus ont été trouvés dans les affleurements des brèches d'impact.

Des grains de quartz "grillés" ont été identifiés dans la brèche de retombée. Ferrière *et al.* (2009) ont suggéré une origine par vésiculation, après la libération de la pression, à des températures élevées après le choc (post-choc).

La présence d'éléments de micro-déformation planaire, dans la brèche de retombée, est une preuve que ces roches ont été formées à la suite d'un impact d'astéroïde ou de comète. Les caractéristiques de déformation par choc, dans les composants des brèches rencontrées dans cette région et la présence de verre (particules de type micro-scories) suggèrent fortement que les brèches ont été formées par des processus d'impact.

Aucun fragment météoritique n'a été retrouvé jusqu'à présent dans cette zone, cela à cause de la pulvérisation totale de ce dernier. L'origine de l'impacteur doit faire l'objet d'une étude géochimique sur les brèches de retombée, seul moyen pour une possible identification. Les travaux sur l'identification des composants de l'impacteur, distribués dans les roches cibles, sont une discipline assez récente de la recherche sur les cratères d'impact. Des travaux plus anciens ont été réalisés par Palme *et al.* en 1978.

IV- CONCLUSION

Les critères structuraux, morphométriques, faciologiques et pétrologiques de la nouvelle structure circulaire de Tabaloulet plaident en

faveur de l'existence d'un impact météoritique important dans le Tademaït oriental. Les critères morphométriques concordent pour dire que cette structure (d'une douzaine de kilomètres de diamètre) peut être classée comme un impact météoritique de type complexe car elle est formée par un pic central, ceinturé par une dépression et des anneaux. L'existence de cet astroblème est également confirmée par des critères faciologiques et pétrologiques. Ces deux derniers critères sont attestés successivement par la présence de deux types de brèches (calcaire bréchique et brèche de retombée) et par un métamorphisme de choc (quartz choqué).

Quant à l'âge de cet astroblème, les roches cibles sont datées du Campanien et du Maastrichtien inférieur, ce qui nous laisse dire que l'âge de cet impact est probablement post-maastrichtien inférieur (<70 millions d'années), c'est-à-dire le même âge proposé à deux autres cratères complexes algériens (Tin Bider et Ouarkziz).

Comme perspective, nous pouvons dire que ce travail préliminaire mérite d'être complété dans l'avenir par une étude géophysique et géochimique détaillée.

Remerciements

Les auteurs remercient vivement les deux reviewers de cet article. Certains passages ont pu être améliorés grâce à leurs critiques et leurs suggestions.

Nous remercions également D. Belhaï et R. Sahoui pour les enrichissantes discussions que nous avons eues sur les impacts météoritiques.

Au Laboratoire des lames minces du Département des Sciences de la Terre, la préparation du matériel lithique était à la charge de H. Bouza, malgré ses nombreuses tâches. Nous le remercions pour sa contribution.

Sur le terrain, le soutien logistique était assuré régulièrement par nos fidèles amis sahariens : M. Mammeri, M. Belkheiri, D. Mahboubi, K. Belachir,

et D. Bouaïchi. Qu'ils trouvent ici notre dévouement et notre reconnaissance. Sans eux, ce travail ne connaîtrait jamais le jour.

Cette découverte est dédiée en hommage à notre Ami Rachid AIT OUALI, éminent Géologue algérien de son vivant.

BIBLIOGRAPHIE

- ALWMARK, C., ALWMARK-HOLM, S., ORMÖ J., AND STURKELL, E. 2014.** Shocked quartz grains from the Målingen structure, Sweden. Evidence for a twin crater of the Lockne impact structure. *Meteoritics & Planetary Science* 49(6), pp.1076-1082.
- AMARD, B., COLLIGNON, M. ET RAMAN, J. 1981.** Étude stratigraphique et paléontologique du Crétacé supérieur et Paléocène du Tinrhert et Tademaït (Sahara algérien). *Documents des Laboratoires de Géologie Lyon*, H. 6, pp. 15-173.
- BELHAÏ, D. AND SAHOUI, R. 2014.** Tin Bider, a complex impact crater in the central saharan platform (Algeria). *77th Annual Meteoritical Society Meeting*, abstract #5147.
- BELHAÏ, D., MERLE, O., VINCENT, P., DEVOURD, B. ET AFALFIZ, A. 2006.** État des connaissances et mise au point sur les cratères météoritiques du Sahara. Des indicateurs de pièges à hydrocarbures. *Bulletin du Service Géologique de l'Algérie*, Vol. 17, n°2, pp. 95-112.
- BUHL, E., POELCHAU, M.-H., DRESEN, G. AND KENKMANN, T. 2013.** Deformation of dry and wet sandstone targets during hypervelocity impact experiments, as revealed from the MEMIN program. *Meteoritics & Planetary Science*, 48, pp. 71-86.
- ELLOY, R. ET THOMAS, G. 1981.** Dynamique de la genèse des croûtes calcaires (calcrêtes) développées sur séries rouges pléistocènes en Algérie nord-occidentale. Contexte géomorphologique et climatique. Pétrographie et géochimie. *Bulletin du Centre de Recherche Exploration-Production, Elf-Aquitaine*, 5, 1, pp. 53-112.
- ERNSTSON, K. AND CLAUDIN, F. 1990.** Pelarda formation (eastern Iberian chains, NE Spain): ejecta of the Azuara impact structure. *Neues Jahrbuch für geologie und paläontologie, Monatshefte*, pp. 581-599.
- FABRE, J. 2005.** Géologie du Sahara occidental et central. *Editions du Musée Royal de l'Afrique centrale-Afrique - Belgique*, vol.108, pp. 1-572.
- FABRE, J., KAZI-TANI, N. ET MEGARTSI, M. 1970.** Le rond de l'Ouarkziz (Sahara nord-occidental) : un astrolème ? *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris*, t 270, pp. 1212-1215.
- FERRIÈRE, L. AND OSINSKI, G.-R. 2013.** Shock metamorphism. In: Impact cratering: Processes and products, edited by G.-R. Osinski, and E. Pierazzo, Chichester, UK: *Blackwell Publishing LTD*, pp. 106-124.
- FERRIÈRE, L., KOEBERL, C., REIMOLD, W.-U., HECHT, L. AND BARTOSOVA, K. 2009.** The origin of "toasted" quartz in impactites revisited. *40th Lunar and Planetary Science Conference*, abstract #1751.
- FRENCH, B.-M. 1998.** Traces of catastrophe: a handbook of shock-metamorphic effects in terrestrial meteorite impact structures. *LPI contribution n° 954. Houston, Texas: Lunar and Planetary Institute*, 120 p.
- FRENCH, B.-M. AND KOEBERL, C. 2010.** The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn't, and why. *Earth-Science Reviews*, 98, pp. 123-170.

- GRIEVE, R.-A.-F. AND PESONEN, L.-J. 1992.** The terrestrial impact cratering record. *Tectonophysics*, 216, pp. 1-30.
- GRIEVE, R.-A.-F., LANGENHORST, F. AND STÖFLER, D. 1996.** Shock metamorphism of quartz in nature and experiment. II. Significance in geoscience. *Meteoritics & Planetary Science*, 31, pp. 6-35.
- GUEZLANE, M. ET NIMOUR, K. 1997.** Carte géologique de Hassi Chebaba (1/200 000), feuille NH-31-IX. *Service Géologique de l'Algérie*.
- HOLM-ALWMARK, S., FERRIÈRE, L., ALWMARK, C. AND POELCHAU, M.-H. 2018.** Estimating average shock pressures recorded by impactite samples based on universal stage investigations of planar deformation features in quartz-sources of error and recommendations. *Meteoritics & Planetary Science*, 53, pp. 110-130.
- KIEFFER, S.-W. 1971.** Shock metamorphism of the coconino sandstone at meteor crater, Arizona. *Journal of Geophysical Research*, 76, pp. 5449-5473.
- KING, JR. D.-T., AND PETRUNY, L.-W. 2008.** Impact spherule-bearing, Cretaceous-Tertiary boundary sand body, shell creek stratigraphic section, Alabama, USA. *Geological Society of America*, 437, pp. 179-187.
- KÖNIG-FRANCIONI, C. 2008.** Le cratère météoritique de Rochechouart. *Bulletin Annuel de l'Association Vendéenne de Géologie*, pp. 24-34.
- LAMBERT, P., MCHONE, J.-F., DIETZ, R.-S. AND HOUFANI, M. 1980.** Impact and impact-like structures in Algeria. Part I. Four bowl-shaped depressions. *Meteoritics*, 15, pp. 157-179.
- LAMBERT, P., MCHONE, J.-F., DIETZ, R.-S., BRIED, M. AND DJENDER, M. 1981.** Impact and impact-like structures in Algeria. Part II. Multi-ringed structures. *Meteoritics*, 16, pp. 203-227.
- LAMALI, A., ROCHETTE, P., MERABET, N., ABTOU, A., MAOUCHE, S., GATTACCECA, J., FERRIÈRE, L., HAMOUDI, M., MEZIANE, E.-H. AND AYACHE, M. 2016.** Geophysical and magneto-structural study of the Maâdna structure (Talemzane, Algeria): Insights on its age and origin. *Meteoritics and Planetary Science*, 51 (12), pp. 2249-2273.
- MENZOUL, B. 2011.** Sur les encroûtements calcaires (calcrêtes) du Plateau d'Oran. *Mémoire d'Ingénieur d'État, Université d'Oran*, 40 p.
- MELOSH, H.-J. 1989.** Impact cratering: A geologic process. New York: *Oxford University Press*, 245 p.
- PAILLOU, P., EL BARKOOKY, A., BARAKAT, A., MALEZIEUX, J.-M., REYNARD, B., DEJAX, J. AND HEGGY, E. 2004.** Discovery of the largest impact crater field on earth in the Gilf Kebir region. *Comptes Rendus Geoscience*, 336, pp.1491-1500.
- PALME, H., JANSSENS, M.-J., TAKAHASHI, H., ANDERS, E. AND HERTOGEN, J. 1978.** Meteoritic material at five large impact craters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42, pp. 313-332.
- PERRIN, E. 2010.** Un cratère météoritique découvert grâce à google earth.
- PEULVAST, J.-P. ET VANNEY, J.-R., 2001.** Géomorphologie structurale. Terre, corps planétaires solides. 1. Relief et structure. Gordon and Breach, Paris. *Editions du Bureau de Recherches Géologiques et Minières*, Orléans, 504 p.
- REYMENT, R.-A. AND REYMENT, E.-R. 1978.** The paleocene trans-saharan transgression

and its ostracod fauna. *Proceeding of the 2nd Geological Conference on the Geology of Libya, London Academic Press*, 234. pp. 245-252.

SAHOUI, R. 2017. Les cratères d'impact météoritiques algériens et mauritaniens: caractérisations des effets et du métamorphisme de choc. *Thèse de Doctorat, USTHB, Alger*, 231 p.

SAHOUI, R., BELHAÏ, D. AND JAMBON, A. 2016. Impact-generated carbonate melts from the Talemzane structure (Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*, 9: 641.

SIGHINOLFI, G.-P., BARBIERI, M., BRUNELLI, D. AND SERRA, R. 2020. Mineralogical and chemical investigations of the Amguid crater (Algeria): Is there evidence on an

impact origin? *Geosciences* 10 (3): 107, pp. 1-15.

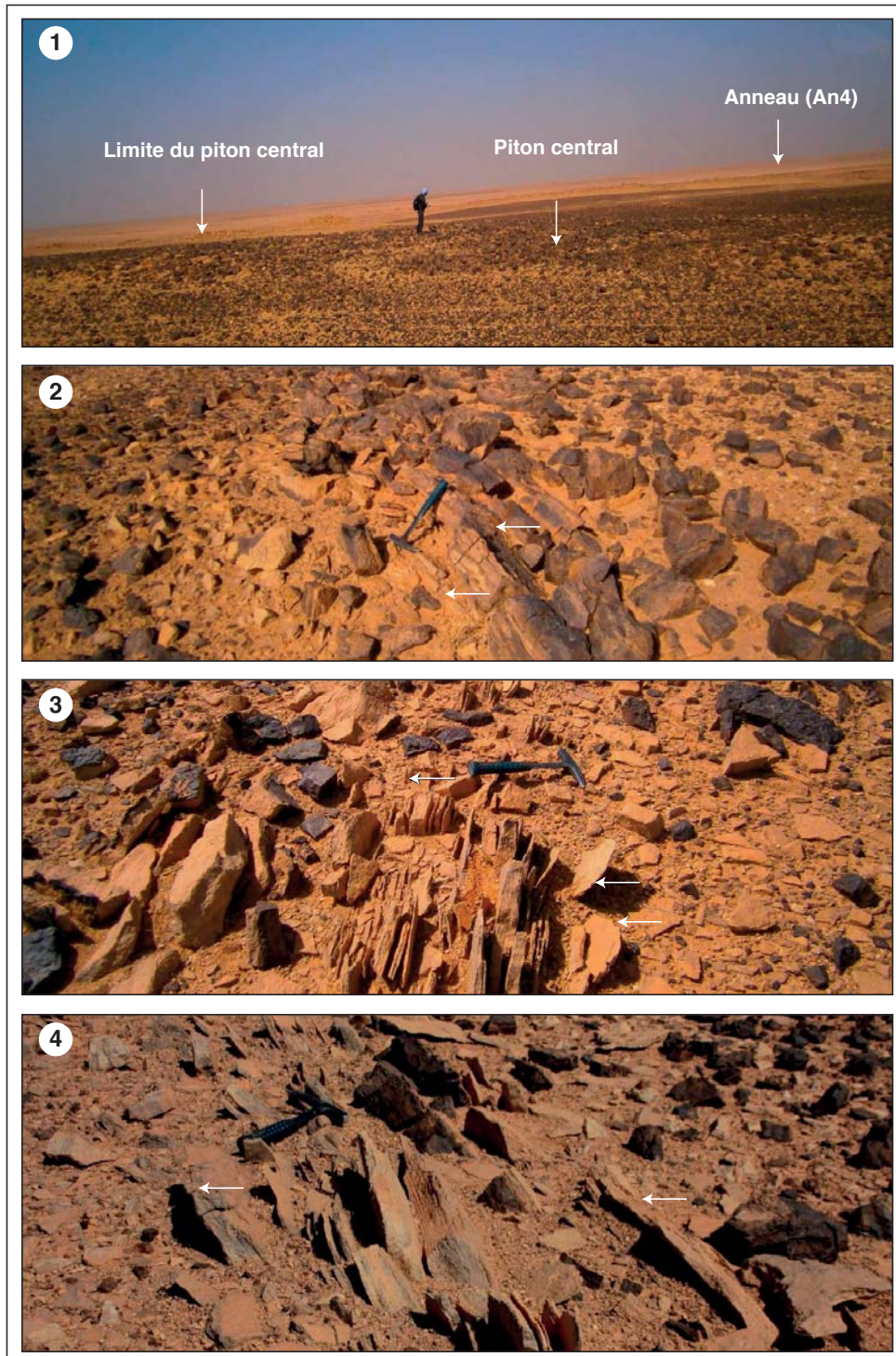
STÖFFLER, D. 1972. Deformation and transformation of rock forming minerals by natural and experimental shock processes: I. Behavior of minerals under shock compression. *Fortschritte der Mineralogie* 49, pp. 50-113.

STÖFFLER, D. AND LANGENHORST, F. 1994. Shock metamorphism of quartz in nature and experiment. I. Basic observation and theory. *Meteoritics* 29, pp. 155-181.

WHITEHEAD, J., SPRAY, J.-G. AND GRIEVE, R.-A.-F. 2002. Origin of "toasted" quartz in terrestrial impact structures. *Geology*, 30, pp. 431-434.

Annexe

Planche I



1- Vue panoramique du piton central.

Panoramic view of the central peak.

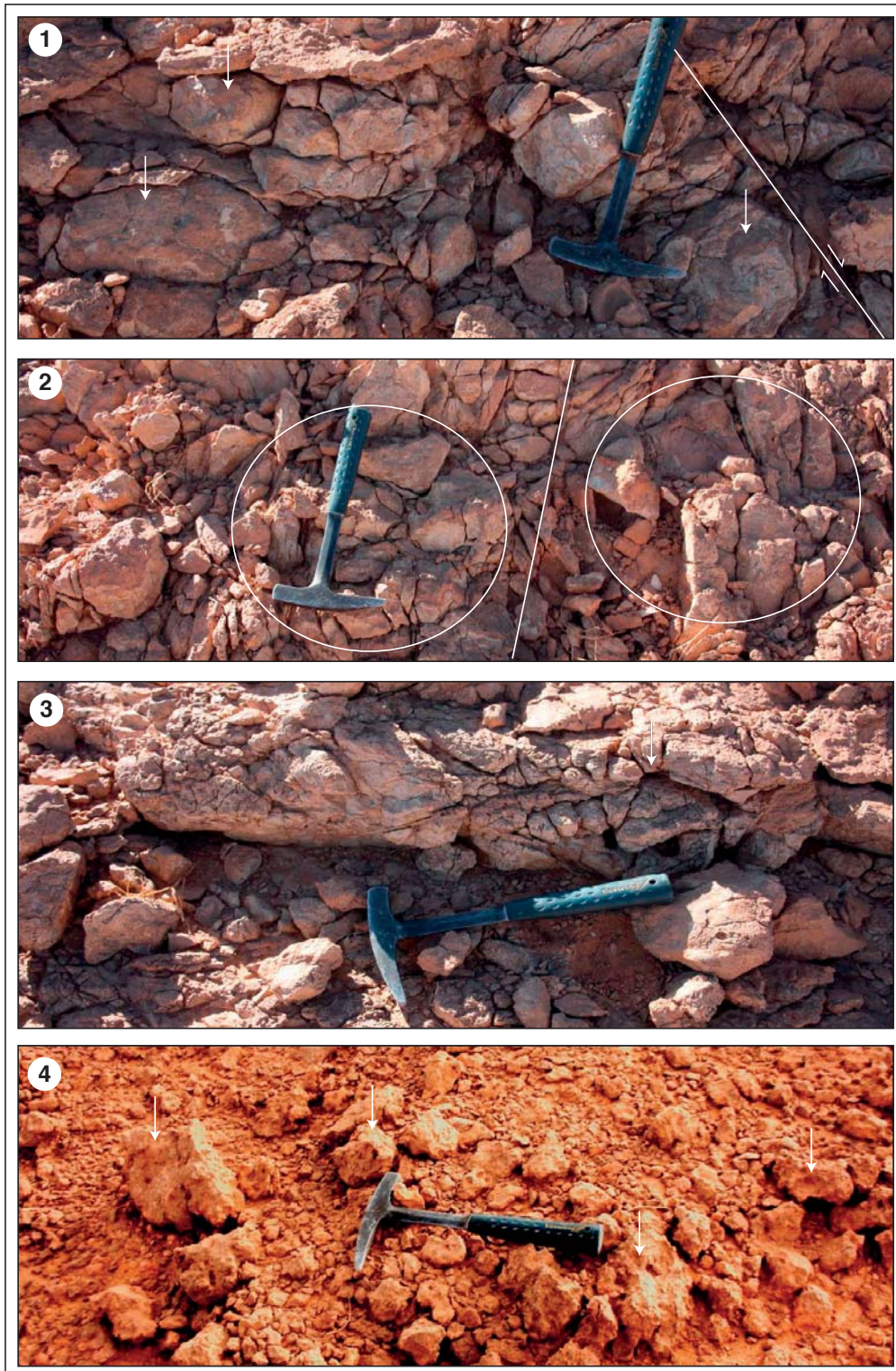
2- Les calcaires santoniens redressés (piton central).

The redressed santonian limestones (central peak).

3 et 4- Les calcaires santoniens fortement lités et redressés (piton central).

The highly bedded and redressed santonian limestones (central peak).

Planche II

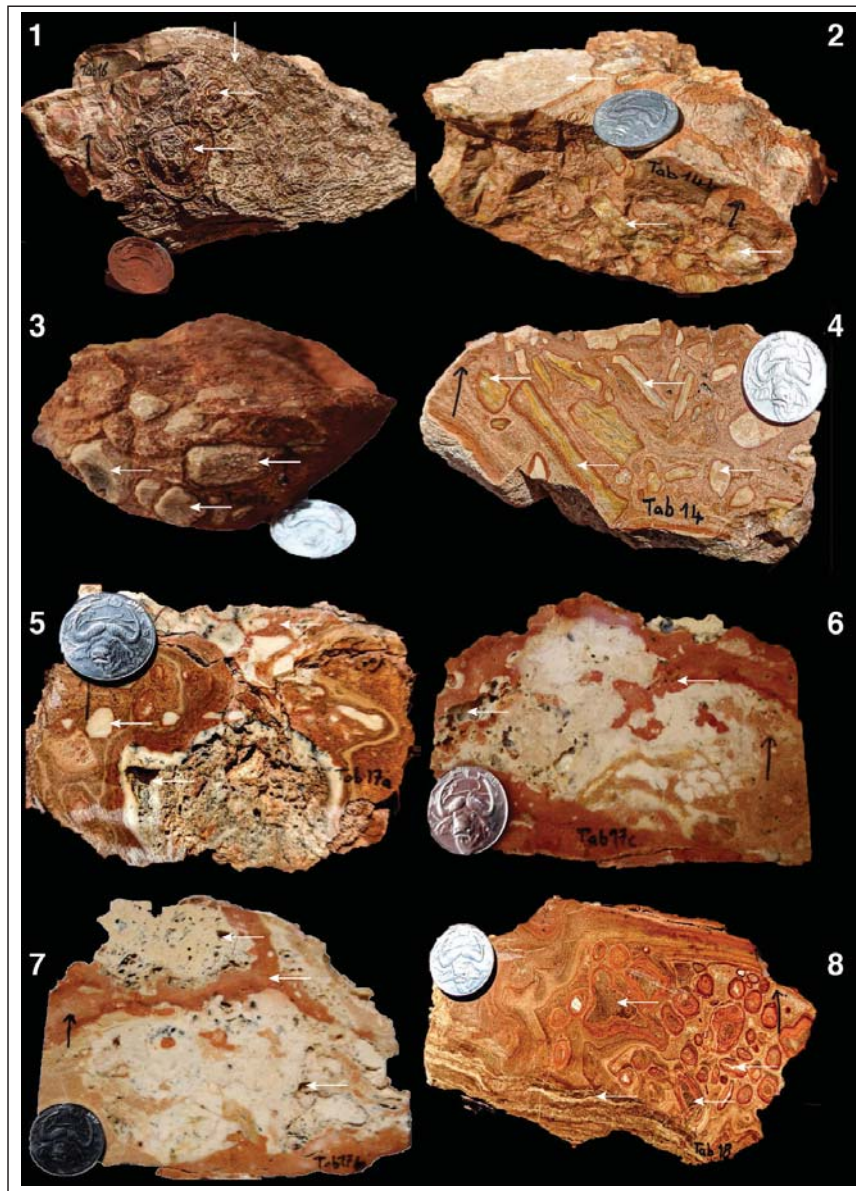


1 et 2- Calcaire bréchique campanien débité en boules, parfois écrasées.
Ball-shaped campanian brecciated limestone, somewhat crushed.

3- Calcaire bréchique à slump.
Brecciated limestone with slump.

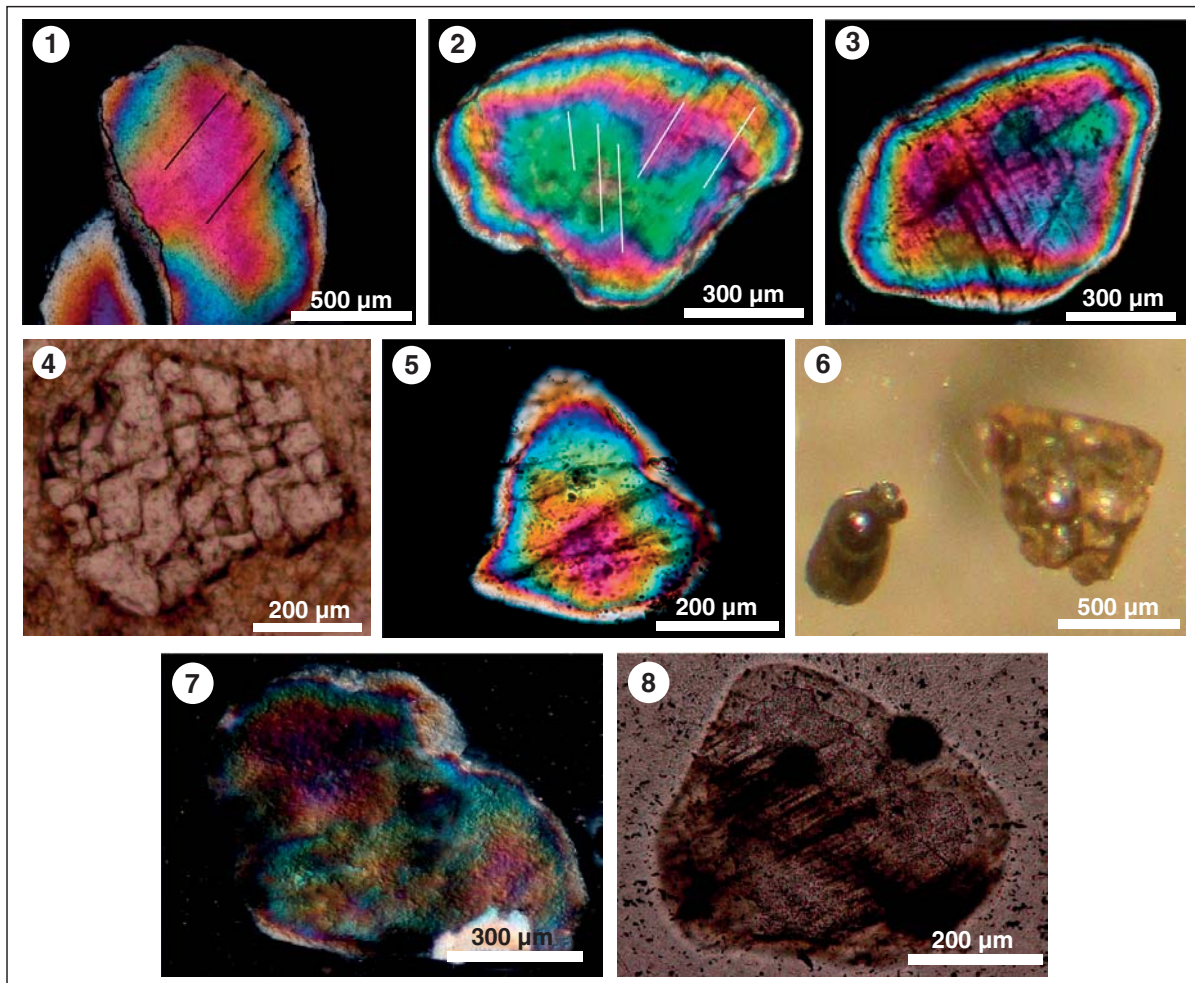
4- Brèche de retombée à l'affleurement.
Fallout breccia at outcrop.

Planche III



- 1- Brèche de retombée (surface extérieure de la roche exposée à l'altération) (éch.18).
Fallout breccia (outer surface of the rock exposed to weathering) (sample 18).
- 2- Brèche de retombée à éléments calcaires hétérogènes en forme de baguettes (éch.14).
Bar-shaped fallout breccia with heterogeneous calcareous elements (sample 14).
- 3- Brèche de retombée à la patine montrant des éléments de calcaire (éch.17).
Fallout breccia showing limestone elements (sample 17).
- 4- Brèche de retombée composite à éléments de remaniement calcaire en forme de baguettes (éch.14).
Composite fallout breccia with bar-shaped reworking limestone elements (sample 14).
- 5, 6 et 7- Brèche de retombée vacuolaire à éléments de calcaire hétérogène lithographique arrondis ou en forme de baguettes et à texture laminaire (éch.17).
Vacuolar fallout breccia with heterogeneous lithographic limestone elements, rounded or bar-shaped and with laminar texture (sample 17).
- 8- Brèche de retombée montrant des oncoïdes à nucleus carbonaté. Le tout est englobé par une croûte zonaire laminaire (éch.18).
Fallout breccia showing oncoïds with carbonate nucleus. The whole is covered by a laminar zonal crust (sample 18).

Planche IV



Quelques grains de quartz choqué et des particules de type micro-scoires récupérées depuis la brèche lithique (de retombée) se trouvant à l'intérieur de la structure.

Some shocked quartz grains and micro-slag type particles recovered from the lithic breccia (fallout breccia) inside the structure.

1- Figures de déformations planaires ("PDFs") avec une seule direction (éch.3').

Planar deformation features ("PDFs") with only one direction (sample.3').

2- "PDFs" avec deux directions (éch.17g).

PDFs with two distinct directions (sample 17g).

3- Fractures planaires ("PFs") (éch.1).

Planar fractures ("PFs") (sample 1).

4- "PFs" (éch.2).

PFs (sample 2).

5- Fractures de concussion (éch.1).

Concussion fractures (sample 1).

6- Particules de type micro-scoires (éch.18).

Micro-slag particles (sample 18).

7- Un grain de quartz affecté par un mosaïcisme (éch.17g).

A quartz grain affected by a mosaicism (sample 17g).

8- Un "toasted" quartz ou "grillé" (éch.17g).

A "toasted" quartz grain (sample 17g).