Bulletin du Service Géologique de l'Algérie
Vol. **32**, n° **1**, pp. **63-92**, **16** fig., **22** ph., **2023**

LE CRATÈRE DE TALEMZANE (MAÂDNA, HASSI DELAA, LAGHOUAT) : IMPACT DE MÉTÉORITE OU AFFAISSEMENT D'UN DIAPIR ?

Ahmed NEDJARI[1, 3], Mohamed CHETTIH[2], Menad SADI[3], Ahmed SERKHANE[3], Safia ABDI[2] et Azzedine GUIDOUM[2]

RÉSUMÉ

La structure de Talemzane, Hassi Delaa (Laghouat) est attribuée, par une majorité d'auteurs, à l'impact d'une météorite. Sa morphologie circulaire en cuvette à bords relevés et un diamètre inférieur à 2 km, en font une structure de type cratère simple. Récemment (2022), dans une autre approche essentiellement géophysique (sondage, gravimétrie, paléomagnétisme, géoradar et spectrométrie gamma-ray), l'hypothèse d'une origine endogène par effondrement d'un diapir a été avancée. Pour contribuer au débat, cette structure a été revisitée (2021 et 2022) en affinant les observations. Quelle que soit l'approche développée dans sa caractérisation, les éléments en faveur d'une structure produite par l'impact d'une météorite existent à toutes les échelles, générés à différents moments de l'évènement. Ils permettent d'affirmer avec certitude qu'il s'agit bien d'un cratère d'impact de météorite avec : un métamorphisme de choc, des brèches d'impact, des éjectas, des preuves d'une augmentation de la température ayant généré une redistribution et une remobilisation de la silice et une fracturation. Les données de la sismique et le contexte d'ensemble viennent infirmer l'hypothèse «par effondrement d'un diapir».

Mots-clés - Talemzane - Cratère d'impact - Météorite - Éjectas - Métamorphisme de choc.

THE TALEMZANE IMPACT CRATER (MAÂDNA, HASSI DELAA, LAGHOUAT): METEORITE IMPACT OR DIAPIR COLLAPSE?

ABSTRACT

The Talemzane structure in Hassi Delaa (Laghouat) is attributed, by a majority of authors, to the impact of a meteorite. The bowl-shaped depression with raised rims and a diameter of less than 2 km place the structure in the family of simple crater impact. In another approach, mainly geophysical (using borehole, gravimetry, paleomagnetism, georadar, gamma-ray spectrometry), the structure has been interpreted as the result of the collapse of a diapir. In an attempt to contribute further to the debate, this structure has been revisited (field campaign 2021 and 2022) with more refined observations. Regardless of the developed approach used in the characterization of this structure, elements supporting the hypothesis that the structure was produced by a meteorite impact are numerous and visible at all scales. They allow to affirm with certitude that this structure is indeed a meteorite impact crater with: shock me-

[1]Comité de Stratigraphie de l'Algérie (CSA). E-mail: nedjaria@gmail.com.

[2]Laboratoire des Ressources en Eau, Sols et Environnement, Université de Laghouat, Algérie.

[3]Agence du Service Géologique de l'Algérie (ASGA).

- Manuscrit déposé sur l'ASJP le 30 mars 2023, accepté après révision le 25 mai 2023.*

**ASJP : Algerian Scientific Journal Platform.*

tamorphism impact breccias, ejectas, evidence of increase in temperature having generated a distribution and a remobilization of silica, and a fracturing. Seismic data and the overall context show that the hypothesis of «the collapse of a diapir» cannot be retained.

Keywords - Talemzane - Impact crater - Meteorite - Ejectas - Shock metamorphism.

I- PROBLÉMATIQUE

La structure de Talemzane ou de Maâdna se situe à 120 km au SE de Laghouat. Elle occupe la Daiet éponyme, à 40 km à l'est de Hassi Delaa (figs. 1 et 2).

Cette dépression circulaire (ph. 1), de 1750 m de diamètre et de 60 m de profondeur, a pour coordonnées géographiques : 33°19' Nord et 04°02' Est.

Elle est attribuée par une majorité d'auteurs (Karpoff, 1952 ; Lambert *et al.,* 1981 ; Mc Hone 1987 ; Belhai *et al.,* 2006 ; Sahoui, 2009 et 2017) à l'impact d'une météorite dont le diamètre avoisinerait les 90 m (Sahoui, 2009).

La dénomination "cratère de Talemzane", initialement proposée par Karpoff (1952) et reprise par Lambert *et al.* (1980), qui fait entrer cette structure dans la liste officielle des cratères d'impact en 1980, vient de la proximité du Bordj de même nom, un fort militaire.

Sa morphologie circulaire à bords relevés (ph. 1) et un diamètre inférieur à 2 km en font une structure de type cratère simple.

Dans une autre approche, essentiellement géophysique (sondage, gravimétrie, paléomagnétisme, géoradar et spectrométrie gamma-ray), Lamali *et al.* (2016, 2020 et 2022) l'expliquent par l'effondrement d'un diapir.

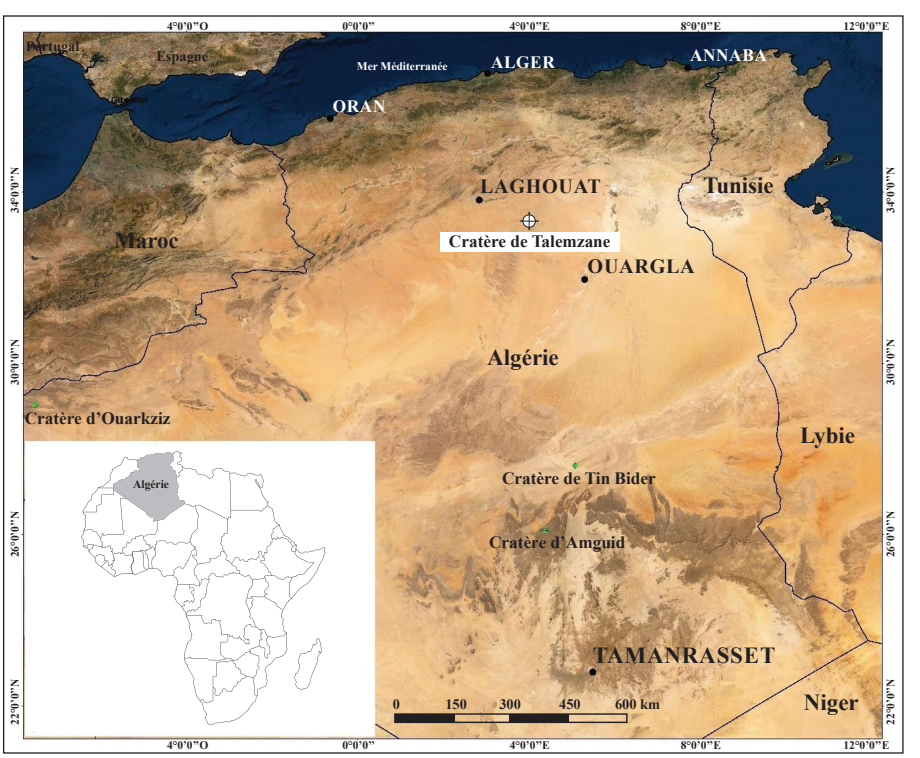


Fig. 1- Situation du cratère de Talemzane.
Location of the Talemzane crater.

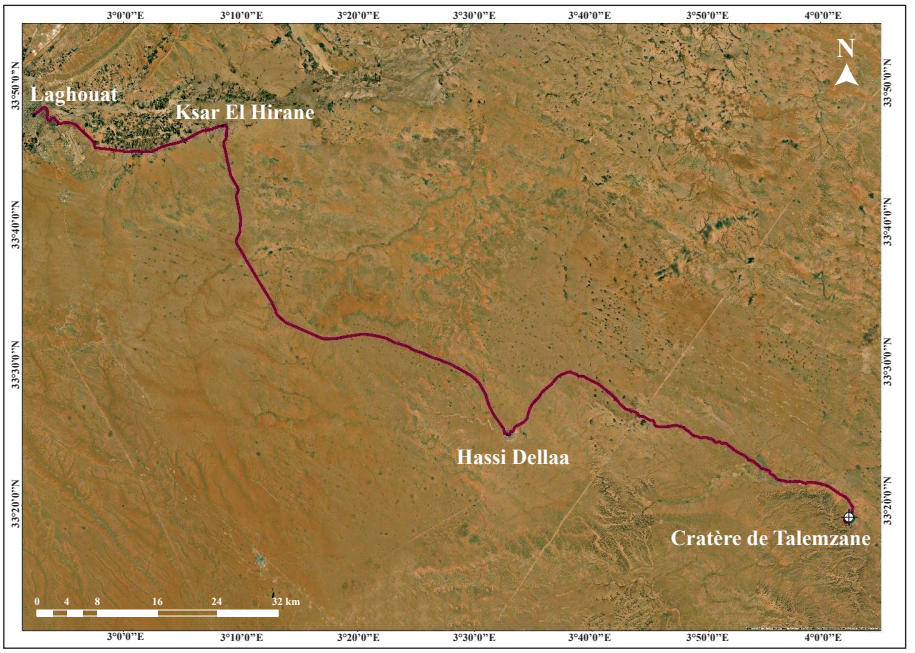


Fig. 2 - Localisation du cratère de Talemzane par rapport à Laghouat (x = 33°19'N et y =04°02'E).
Location of the Talemzane crater with referance to Laghouat (x = 33°19'N and y =04°02'E).



Ph. 1 - Le cratère vu de sa bordure sud.
The crater viewed from its southern rim.

Cette structure est revisitée (2021 et 2022) en affinant les observations de terrain et la recherche d'éléments caractéristiques d'un impact météoritique ; en analysant les linéaments typiques d'un tel évènement par des compléments de laboratoire (pétrographie, analyses chimiques), axés sur la recherche de transformations générées par un éventuel métamorphisme de choc ; et en utilisant les données de deux profils sismiques recoupant en N-S et E-O cette structure et réalisés par ALNAFT sur le permis de Ksar El Hirane. Ce profil permettra de vérifier l'existence ou non d'un diapir effondré sous cette structure, hypothèse avancée par Lamali *et al.* (2020 et 2022). Cette éventualité sera examinée et discutée ultérieurement.

II - CRATÈRE DE TALEMZANE : UN HISTORIQUE DES TRAVAUX

Ce qui suit est un historique des travaux réalisés sur le cratère de Talemzane depuis sa découverte.

- Dubut (1928)

La structure de Talemzane aurait été signalée en 1928 par un officier de l'armée coloniale, le capitaine Dubut (Karpoff, 1953).

- Karpoff (1952, 1953 et 1954)

Karpoff a détaillé ce cratère.

Sur la base d'un rapide levé topographique, d'une cartographie au 1/100, d'un survol du site avec des prises de photos en oblique, il décrivait un objet circulaire, à bordures en anneaux organisées en marches d'escaliers qui contrastaient avec l'intérieur de la dépression tapissé d'alluvions. Des blocs de calcaire empilés pêle mêle sur ces mêmes bordures dénotaient, n'ayant aucun caractère de dépôts de pente.

Diverses origines sont envisagées puis écartées : daïa, dissolution d'un diapir, anticlinal érodé, volcanisme et explosion de gaz.

La seule probabilité retenue restait raisonnablement l'impact d'une météorite.

Ces résultats furent présentés au Congrès International de Géologie d'Alger (1954).

- Lambert *et al.* (1980)

À partir d'observations à différentes échelles (cartographie de faciès, affleurements, échantillons et microscopie), Lambert *et al.* (1980) confirment que le cratère de Talemzane provient bien de l'impact d'une météorite sur un substratum carbonaté, d'âge fini crétacé supérieur-début éocène. Il s'agit bien des observations suivantes (fig. 3) :

- sur les bordures, des blocs métriques à décamétriques, désordonnés et disposés anormalement (redressés à la verticale, retournés, disloqués avec faille de déplacement), sont interprétés en éjectas, du matériel expulsé tout autour de la structure lors de l'impact ;

- une fracturation dans les 3 dimensions avec des veines de 1 cm à 1 m injectées de brèches ;

- des structures planaires dans le quartz expliquées par un métamorphisme de choc.

- Mc Hone *et al.* (1987)

Exploitant les images radar de la mission SIR–A de la NASA (1981), Mc Hone *et al.* (1987) redécouvrent cette structure circulaire, ceinturée par des éjectas. Elle dénotait dans une région dominée par des dayas et ne pouvait être qu'un cratère de météorite pour ces auteurs.

- Sahoui (2009)

Sahoui réalise une étude détaillée de cette structure dans une approche plurielle. Les principaux apports sont une discrimination et une description détaillée des différents faciès rencontrés et leur répartition, avec :

- **au fond de la structure :** des brèches polygéniques (quartz et calcaire) à ciment micritique.

- **sur les bordures :** des calcaires à silex coiffés par du marbre, des brèches à éléments carbonatés et silex, des poudingues polygéniques.

- **au sommet :** des méga brèches à blocs métriques à pluri métriques, entassés, déformés et fracturés ; des filons de brèche recoupant les calcaires.

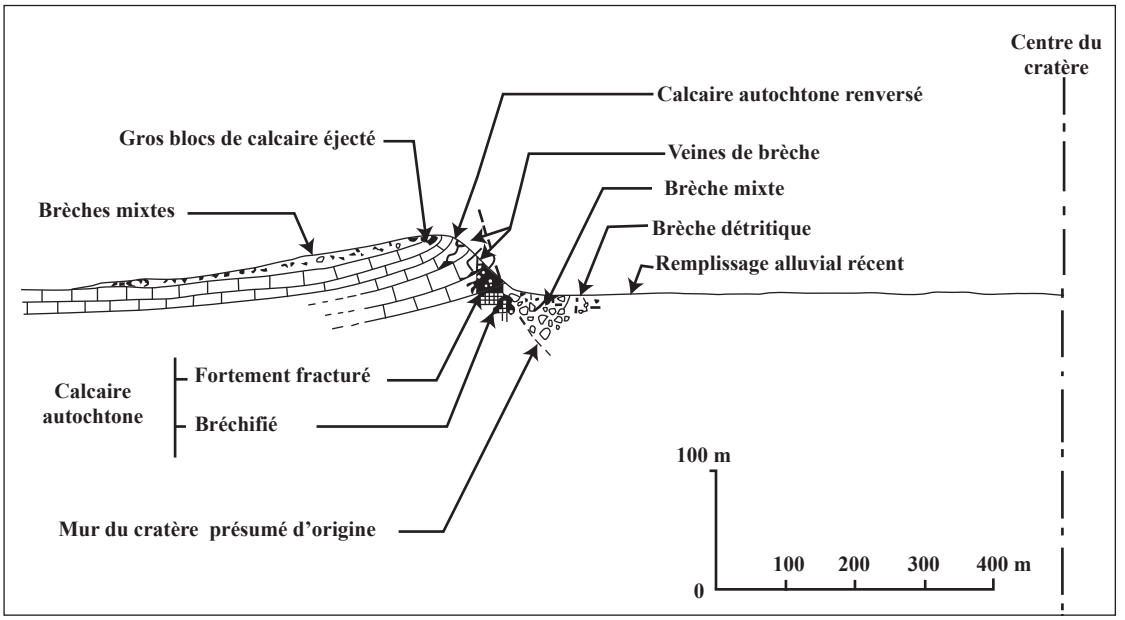


Fig. 3- Coupe à travers le cratère de Talemzane (Lambert *et al.,* 1980).
Cross-section through the Talemzane crater (Lambert et al., 1980).

- **tout autour du cratère :** dans un rayon de 500 m, des brèches polygéniques à éléments vitreux recouvrent la surface (fig. 3). Ceci est confirmé par la cartographie réalisée par Lamali *et al.* (2020) et nos observations.

Le substratum est composé de calcaires à silex en rognons ou en lits millimétriques à centimétriques. La faune associe des gastéropodes, lamellibranches, et foraminifères (Textularidés et Globigérines) de la fin du Crétacé-début Éocène.

-Lamali *et al.* (2009, 2016, 2020 et 2022)

Dans une approche pluridisciplinaire, observations de terrain, cartographie (fig. 4) mais essentiellement géophysique (gravimétrie, paléomagnétisme, géoradar, spectrométrie gamma ray), le cratère de Talemzane est revisité dans un premier temps (2016) sans que la question de son origine soit tranchée pour ces auteurs.

La géophysique donne une image de la structure et la géométrie des différents corps qui la composent.

En se basant sur les données du paléomagnétisme, un nouvel âge est avancé : fin du Miocène supérieur - début du Pliocène.

Ultérieurement, Lamali *et al.* (2020 et 2022) reconsidèrent l'origine de cette structure, à partir d'investigations géophysiques, notamment le géoradar. Cette méthode permettrait, par la signature des faciès, de discriminer les éventuels éjectas.

Ces auteurs rejettent ainsi toute signature électromagnétique pouvant être liée à une caractérisation météoritique du cratère.

Ils expliquent cette structure par un diapir dissous alternatif avec un relief inversé, une hypothèse déjà envisagée puis écartée par Karpoff (1952).

Par ailleurs, les réponses radiométriques ne montrant aucune preuve d'anomalie d'enrichissement en radioéléments pouvant être liés à un impact, semblent les conforter dans leurs convictions (2022).

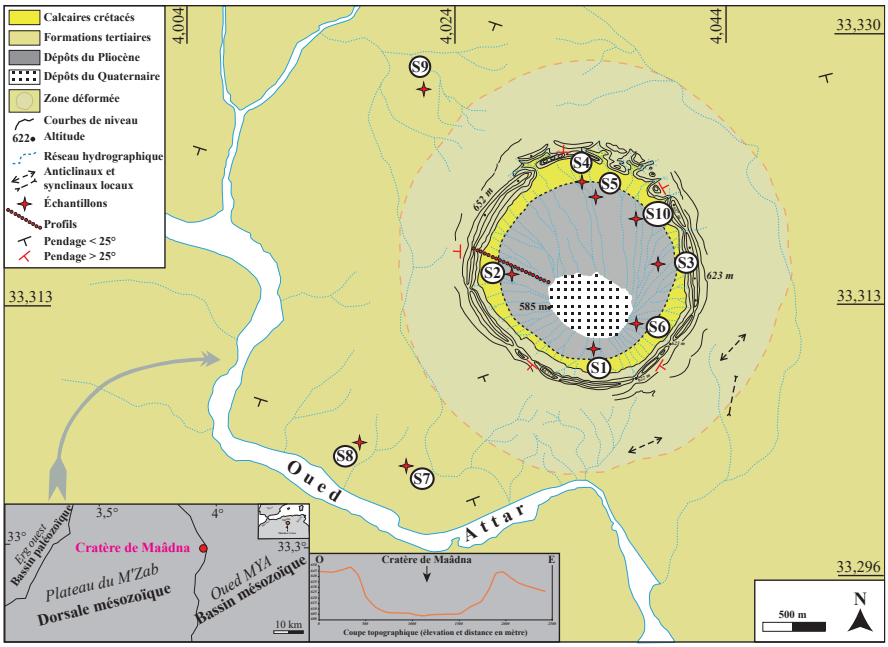


Fig. 4- Levé géologique du site (Lamali *et al.,* 2020).
Geological survey of the site (Lamali et al., 2020).

III -DONNÉES EXISTANTES ET OBSERVATIONS RÉCENTES COMPLÉMENTAIRES

Dans cette approche, les données déjà publiées (Lambert *et al.,* 1980 ; Belhai *et al.,* 2006 ; Sahoui, 2009) ont été reprises puis affinées parfois sur le terrain par :

- un levé de coupe détaillé de l'encaissant et un échantillonnage des principaux faciès pour l'analyse pétrographique et minéralogique ;

- la recherche des éléments caractéristiques d'un cratère d'impact météoritique.

III. 1 - La coupe de l'encaissant

Une coupe (fig. 5) sur la bordure sud du cratère, complétée par des observations provenant de la bordure nord, montre 2 ensembles.

Un premier, d'une quinzaine de mètres visibles, où les séquences sont métriques (2 à 4 m d'épaisseur), dans une évolution strato-croissante. Elles associent des niveaux marneux peu épais et des calcaires métamorphisés fins ou à silex en rognons et lits millimétriques à centimétriques. La faune comporte des gastéropodes, lamellibranches et foraminifères (Textularidés et Globigérines). Les séquences sont clôturées par des encroûtements à stromatolithes.

À ce premier ensemble, vraisemblablement sénonien, succède un second éocène basal assez similaire. Les intervalles marneux y sont mieux exprimés et les calcaires deviennent gréseux.

Des filons de brèches recoupent les calcaires. Ce sont des brèches nées vraisemblablement de l'impact et d'une remobilisation de la silice des silex et du fer. En l'absence de toute source sur le site, cet élément, de la magnétite, pourrait provenir de la météorite et avoir été incorporé lors du choc.

Du Quaternaire moyen conglomératique, encroûtant les dépôts de pente, recouvre sporadiquement la dépression.

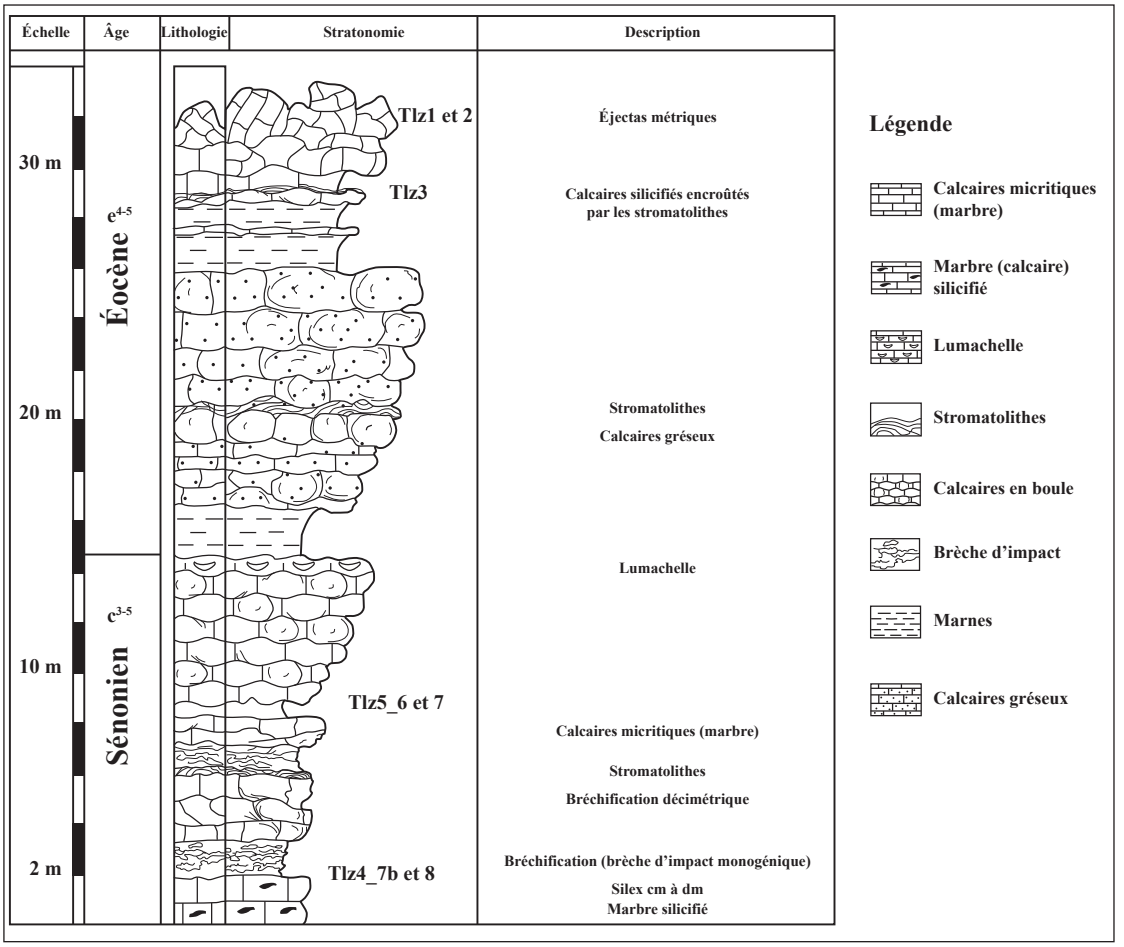


Fig. 5- Log stratigraphique de l'encaissant du cratère de Talemzane.
Stratigraphic column of the host rock of the Talemzane crater.

III. 2 - Les éléments en faveur d'un cratère généré par un impact de météorite

Les éléments en faveur d'une structure produite par l'impact d'une météorite sont nombreux, visibles à toutes les échelles, décrits pour la plupart par les auteurs précédents (Lambert *et al.,* 1980 ; Belhai *et al.,* 2006 ; Sahoui, 2006). Ils ont été générés à différents moments de la formation du cratère.

- Éléments générés au moment de l'impact

Une intense bréchification affecte l'ensemble et s'observe à toutes les échelles. Elle se caractérise par des éléments très peu déplacés, s'organisant, le plus souvent, en un puzzle. Elle est interprétée comme provenant d'un impact (Lambert *et al.,* 1980). Ce sont dans le détail :

1. des brèches dans les premiers niveaux marno-calcaires et les calcaires de la coupe (phs. 2, 3, 4 et 5): dans les premiers niveaux marneux de la base de la coupe, une brèche monogénique (phs. 2 et 3) montre des éléments centimétriques carbonatés avec des espaces occupés par de la silice de recristallisation (ph. 3). Elle pourrait à priori être interprétée en une calcrète. Cela aurait impliqué une émersion avec dessiccation. De tels évènements interviennent en fin de séquences, ce qui n'est pas le cas ici.



Ph. 2- Brèches monogéniques dans un faciès marno-calcaire.
Base de coupe en bordure nord du cratère.
Largeur de l'affleurement : 2 m.

Monogenic breccias in a marl-limestone facies.
Base of the cut on the north rim of the crater.
Outcrop width : 2 m.



Ph. 3- Détails de la brèche associant des éléments centimétriques carbonatés et de la silice. La largeur du manche du marteau fait 5 cm.

Details of the breccia combining centimetric carbonate elements and silica. The hammer handle is 5 cm wide.



Ph. 4 - Flanc SO du cratère : détail d'une brèche dans une fracture.
Eléments : calcaire silicifié, magnétite (grains noirs).
Largeur de l'affleurement : 1 m.

SW flank of the crater: detail of a breccia in a fracture.
Elements: silicified limestone, magnetite (black grains).
Outcrop width : 1 m.



Ph. 5 - Bréchification à l'échelle de l'affleurement dans des calcaires à silex.
Largeur de l'affleurement : 1,5 m.

Brecciation at the outcrop scale in flinty limestone.
Outcrop width : 1.5 m.

En lames minces, les faciès sont une micrite à pellets, un faciès de vasière interne sans aucun encroûtement. Cette brèche provient très probablement d'un cratère d'impact ;

2. des dislocations de blocs avec déplacement (ph. 6) ;

3. des débits en boules des roches (ph. 7) ;

4. des structures qui se rejoignent en un cône au fond du cratère, interprétées en fractures coniques ; ce point sera développé dans une analyse de la fracturation. Elles sont également visibles à l'échelle de l'échantillon (ph. 8).

Contrairement à ce qui s'observe dans la région, les marnes et les calcaires du premier ensemble, ainsi que les faciès fins micritiques ont évolué en marbre (ph. 9), les calcaires gréseux, suivants en quartzites.

La silice des silex a été remobilisée et redistribuée en ciment dans les roches, mais également en joints, enduits sur les bancs (ph. 10), en "ponce" du verre pouvant résulter de la fusion et de l'ébullition des nodules de silex (ph. 11).

- Éléments liés à la formation du cratère

Lors d'un impact, l'énergie mécanique générée est véhiculée par les ondes de choc. La pression se transmet à partir du point d'impact. Une série de zones de chocs concentriques se forme et donne naissance au cratère. Elles expulsent le matériel dans toutes les directions. Ce sont les éjectas.

À Talemzane, des méga brèches à blocs calcaires métriques à décamétriques, associés dans le désordre, complètement fracturés le plus souvent dans les trois directions, désorientés, retournés, redressés à la verticale pour certains, nombreux, et divers coiffent les bordures (phs. 12 et 13). Ils sont interprétés en éjectas (Lambert *et al.*, 1980 ; Sahoui, 2006). Ils existent tout autour de ce cratère et dispersés sur un rayon de 500 m (Lambert *et al.*, 1980 (fig. 3) ; Lamali *et al.*, 2020).

La nature des éléments montre que ce matériel provient bien de l'encaissant, avec des calcaires à silex et des calcaires gréseux métamorphisés.



Ph. 6 - Blocs interprétés en éjectas (Lambert *et al.*, 1980). Bordure sud du cratère. Largeur de l'affleurement : 2 m.

Blocks interpreted as ejecta (Lambert et al., 1980). The southern rim of the crater. Outcrop width : 2 m.



Ph. 7 - Matériel semblant être passé par une phase ductile par réchauffement. Largeur de l'affleurement: 2 m.
Material that appears to have undergone a ductile phase as a result of heating. Outcrop width: 2 m.



Ph. 8 - Structures dans un calcaire, interprétées en fractures coniques. Diamètre : 50 cm.
Structures in a limestone, interpreted as conical fractures. Diameter : 50 cm.



Ph. 9 - Calcaire micritique transformé en marbre interprété comme une transformation lors du choc. Largeur de la photo: 20 cm.

Micritic limestone transformed into marble, interpreted as a transformation during the shock. Photo width: 20 cm.



Ph. 10 - Plaquages de silice interprétés comme provenant de la fusion et de la redistribution des nodules de silex des calcaires. Largeur de l'affleurement : 50 cm.

Silica veneers interpreted as originating from the fusion and redistribution of limestone flint nodules. Outcrop width : 50 cm.



Ph. 11 - Silice interprétée en verre de fusion. Taille : 5 cm.

Silica interpreted as a melting glass. Size : 5 cm.



Ph. 12 - Bordure sud du cratère. Blocs désordonnés interprétés comme des éjectas. Le marteau fait 25 cm de haut.

The southern rim of the crater. Disordered blocks interpreted as ejecta. The hammer is 25 cm high.



Ph. 13 - Bordure sud du cratère. Blocs désordonnés et strates empilés interprétés comme des éjectas. Le marteau fait 25 cm de haut.

The southern rim of the crater. Disordered blocks and stacked strata interpreted as ejecta. The hammer is 25 cm high.

Plus loin, la pression diminue en général et génère des déformations de la roche impactée. Sur les bordures du cratère des plissements de faible amplitude sont observés (Lambert *et al.,* 1980).

Sur ce site, un ensemble de critères indéniables permet d'affirmer avec certitude que cette structure est bien un cratère d'impact de météorite avec notamment: un métamorphisme de choc (point développé ci-après), des brèches d'impact, des éjectas, des preuves d'une augmentation de la température ayant généré une redistribution et une remobilisation de la silice.

L'absence de relief, une tectonique discrète propre au domaine saharien et l'absence de diapirisme (voir V) viennent à l'appui de ces affirmations.

IV- MICROFACIÈS ET MÉTAMORPHISME DE CHOC

Une recherche d'éventuelles modifications générées par un "métamorphisme de choc" (Grieve *et al.,* 1996 ; French, 1998 ; Kumar et kring, 2008 ; Ferriere *et al.,* 2009 ; Ferriere et Osinski, 2013 ; Sahoui, 2017) a été faite sur lames minces dans les calcaires et les marno-calcaires impactés.

Les calcaires échantillonnés à cet effet sont, en majorité, des calcaires gréseux à oolithes, bioclastes et nodules de silex, dans une matrice micritique et ferrugineuse.

L'aspect d'ensemble est un calcaire silicifié (ph. 9) dont la dureté est supérieure à 6, très loin de celle d'un calcaire ordinaire.

Les éléments en faveur d'un métamorphisme de choc sont pluriels. Nous nous arrêterons sur les plus démonstratifs.

Ces modifications affectent les grains à l'exemple des oolithes, des bioclastes mais également les quartzs détritiques.

Les oolithes

- Fracturation radiale centripète

Les oolithes montrent une fracturation radiale centripète. Ces fractures sont remplies de calcite secondaire et d'oxyde de fer (ph. 14).

- Déformation des oolithes et décollement des lamines externes du cortex

La photo 15 montre une déformation dans l'allure générale de l'oolithe, mais également une fracturation et un décollement des lamines externes du cortex. Les fractures sont radiales, centripètes et remplies de calcite et d'oxydes de fer.

Les carbonates remobilisés sont redistribués autour des lamines et dans l'ensemble de la fracturation en dehors de l'oolithe.

Les grains de quartz

- Grains de quartz éclatés

Les grains de quartz d'origine détritique apparaissent éclatés en éléments qui s'emboîtent en un puzzle (ph. 16).

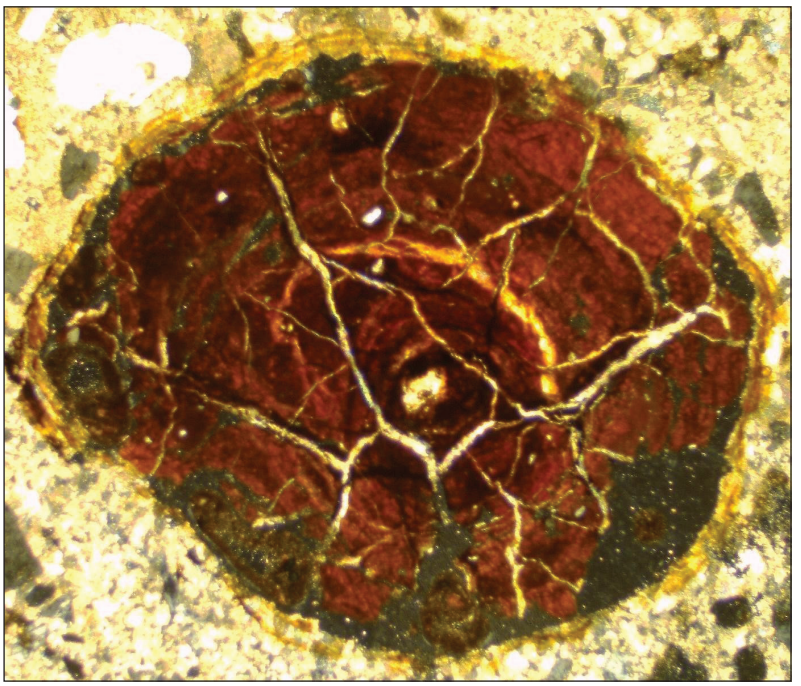
- Fractures de grains

Ces fractures sont dans une seule direction et injectées de carbonate (ph. 17).

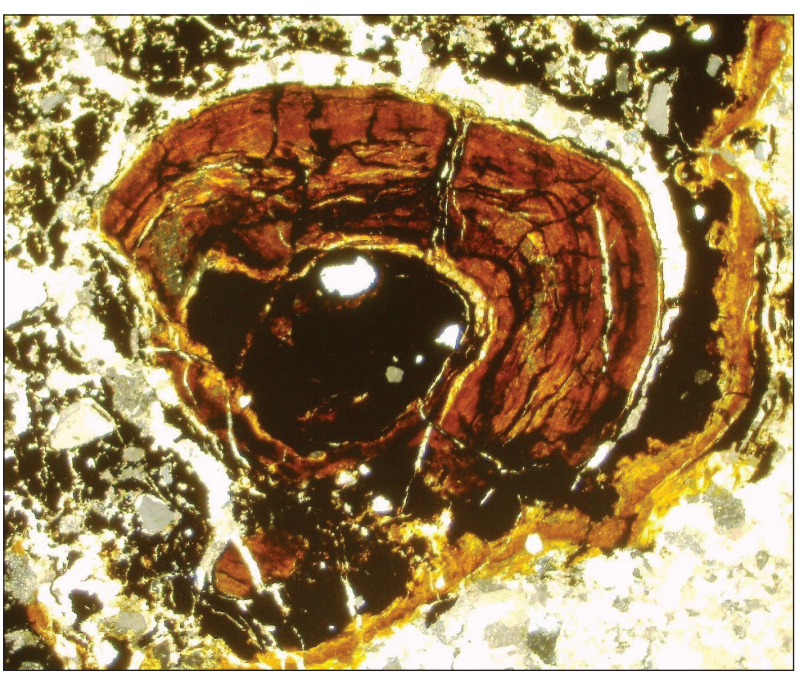
- Déformation au niveau des minéraux

À l'échelle du minéral, on observe des cristaux engrenés et déformés (ph. 18).

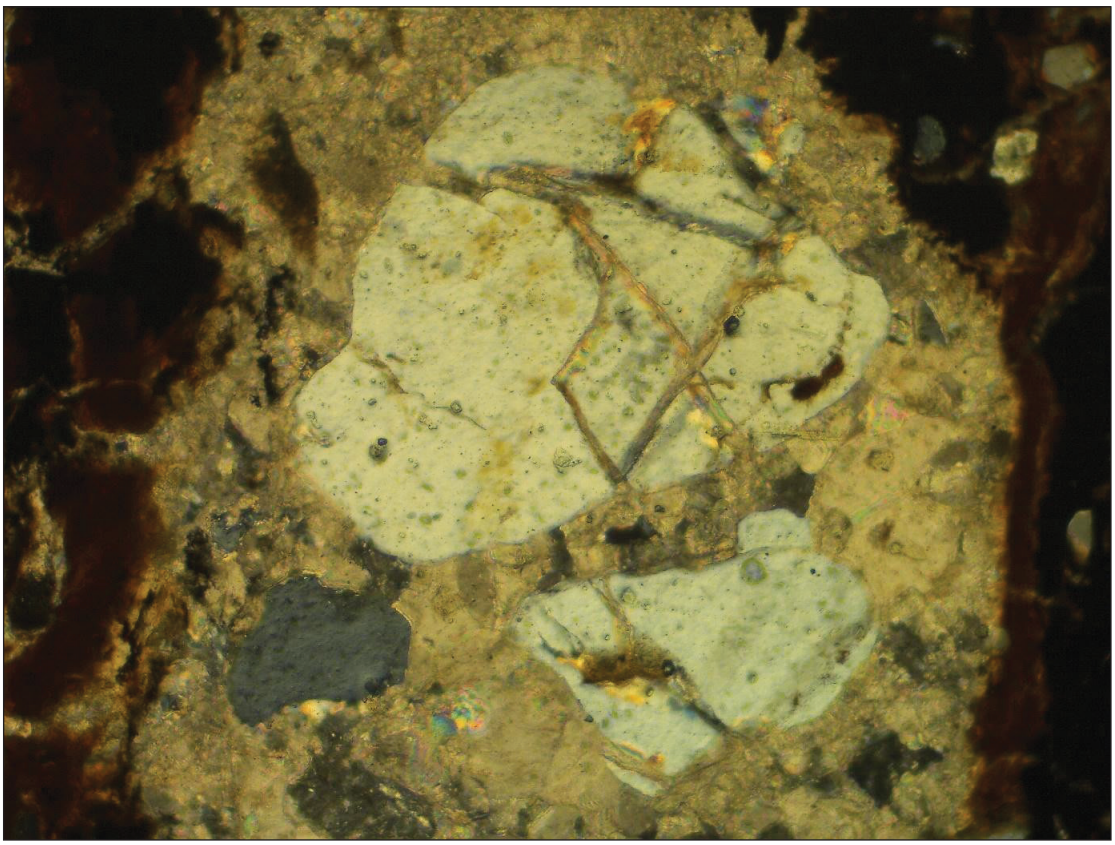
Les modifications observées ne peuvent être attribuées à une quelconque tectonique, celle-ci étant discrète dans cette région, ni à un diapirisme (voir V), ni à une diagénèse (compaction) en raison de l'épaisseur réduite des formations sus-jacentes. Par ailleurs, les faciès les plus bas (côte: 2900 m), dans le Trias, ne montrent aucune déformation similaire (phs. 19 et 20).



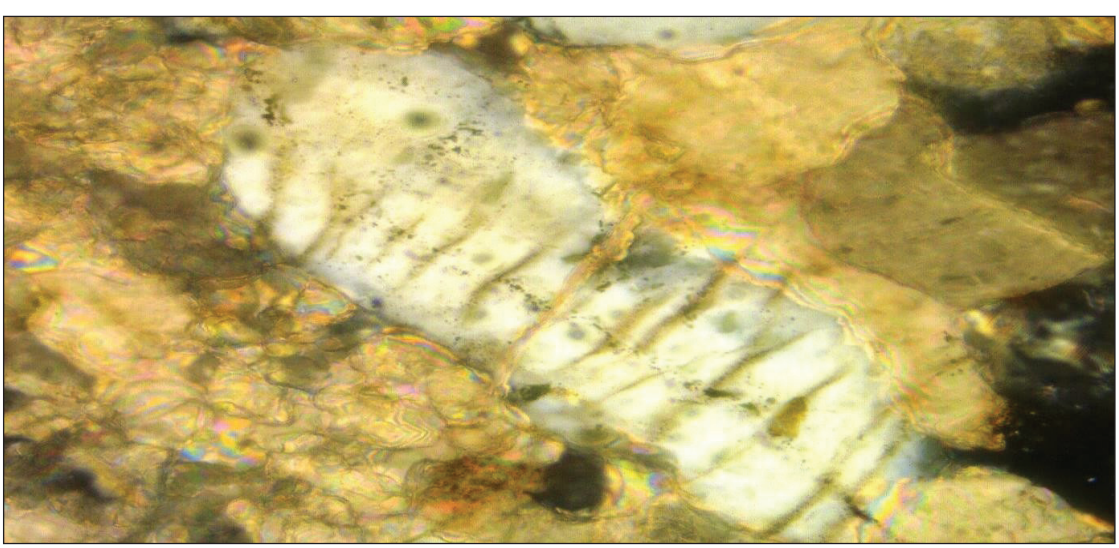
Ph. 14 - Oolithe à fracturation centripète. Ech. Tlz1 bis LP. X25. Largeur du champ : 0,5 cm.
Oolite with centripetal fracturing. Sample Tlz1 bis LP. X25. Field width : 0.5 cm.



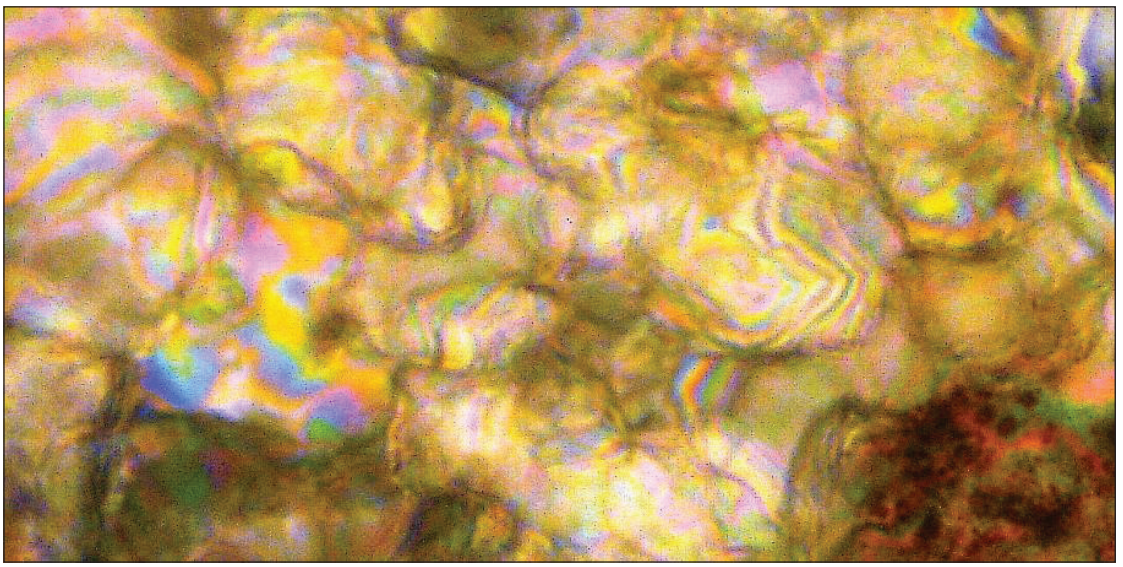
Ph. 15 - Oolithe déformée et fracturée. Noter le décollement des lamines externes et la fracturation. Ech. Tlz1 LP. X40. Largeur du champ : 0,5 cm.
Deformed and fractured oolite. Note the detachment of the outer laminae and fracturing. Sample Tlz1 LP. X40. Field width : 0.5 cm.



Ph. 16 - Quartz détritique éclaté. Ech.Tlz1.LP. X40. Largeur du champ : 0,5 cm.
Exploded detrital quartz. Sample Tlz1.LP. X40. Field width : 0.5 cm.

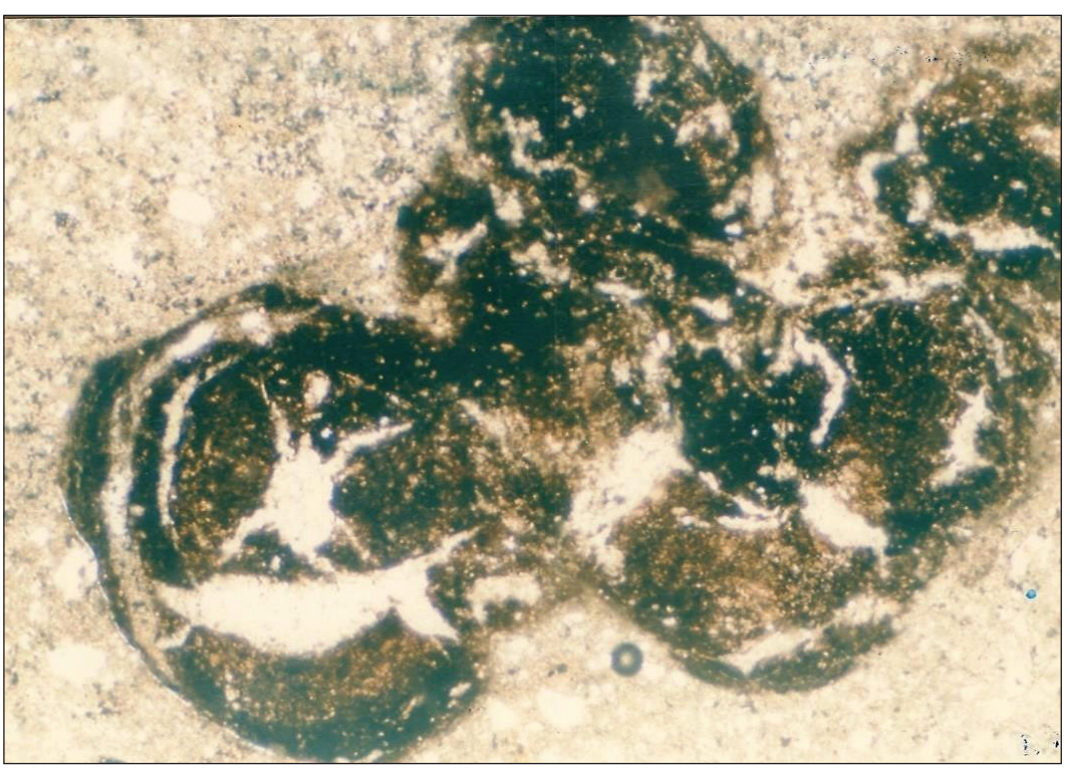


Ph. 17 - Fractures dans un grain de quartz. Ech. Tlz1. LP X50. Largeur du champ : 0,25 cm.
Fractures in a quartz grain. Sample Tlz1. LP X50. Field width : 0.25 cm.



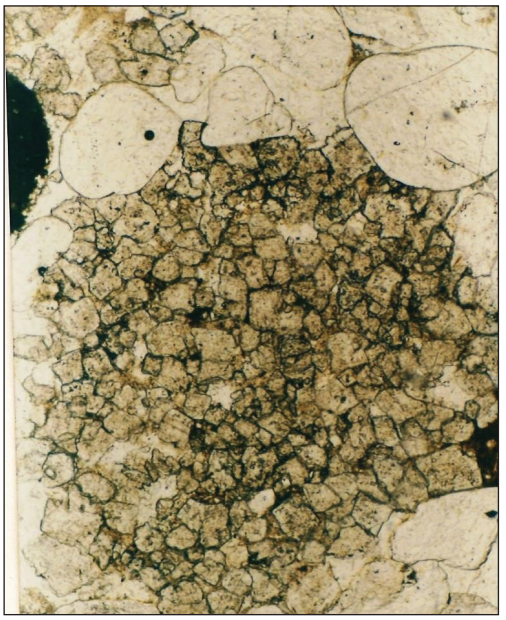
Ph. 18 - Matrice carbonatée. Les cristaux de calcite sont imbriqués et les lamines de croissance déformées. Ech. Tlz1. LP X100. Largeur du champ : 0,2 cm.

Carbonate matrix. Embedded calcite crystals and deformed growth laminae. Sample Tlz1. LP X100. Field width : 0.2 cm.



Ph. 19 - Sondage Li 1 du Trias, profondeur : 2 940 m. Nodules pédologiques centimétriques non déformés par la compaction.

Triassic borehole Li 1, depth : 2 940 m. Centimetric soil nodules undistorted by compaction.



Ph. 20 - Sondage Li 1 du Trias, profondeur : 2995 m. Les grains engrenés et la texture packstone traduisent une légère compaction. La seule lecture plausible reste un "métamorphisme de choc".

Triassic borehole Li 1, depth : 2995 m. The interlocking grains and packstone texture indicate slight compaction. The only remaining plausible interpretation is "shock metamorphism".

Remobilisation et redistribution de la silice des silex, des carbonates et du fer

La silice est recristallisée sous diverses formes (phs. 21 et 22), dans les fractures nouvellement créées, les grains carbonatés (cortex des oolithes, bioclastes). Certains quartz sont proches d'une forme bipyramidale.

Analyse de la fracturation

La chute d'une météorite sur Terre provoque la déformation des roches impactées, à l'origine entre autres, d'une excavation à rebords soulevés et d'une couverture d'éjectas renversée (Gault, 1960 ; French, 1998 ; Andersson et Dverstop, 1987).

Cette déformation est associée à un réseau de fractures complexe, typique de cet évènement (Anderson et Dverstop, 1987 ; Kumar et Kring, 2008). Il est le plus souvent organisé en trois groupes distincts de fractures : des fractures radiales, des fractures concentriques et des fractures coniques.

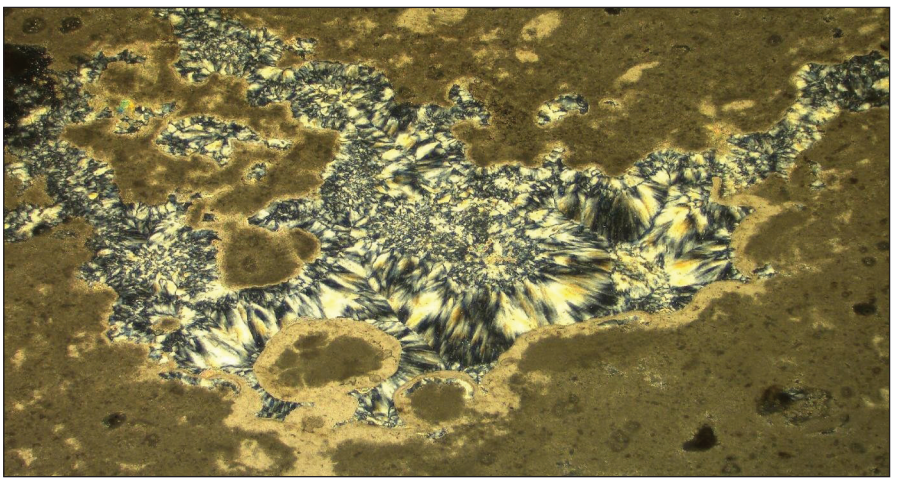
Afin de mettre en évidence ce type, sur le site du cratère de Talemzane, une cartographie et une analyse du réseau des linéaments ont été réalisées.

La première étape a consisté en un traitement des images Landsat-TM pour une identification et une extraction des linéaments. Les traitements concernent les compositions colorées, l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et les filtres directionnels. La seconde est la validation de la nature structurale des linéaments et des investigations géologiques de terrain.

Le traitement numérique des images satellitaires a été réalisé à l'aide du logiciel ENVI.

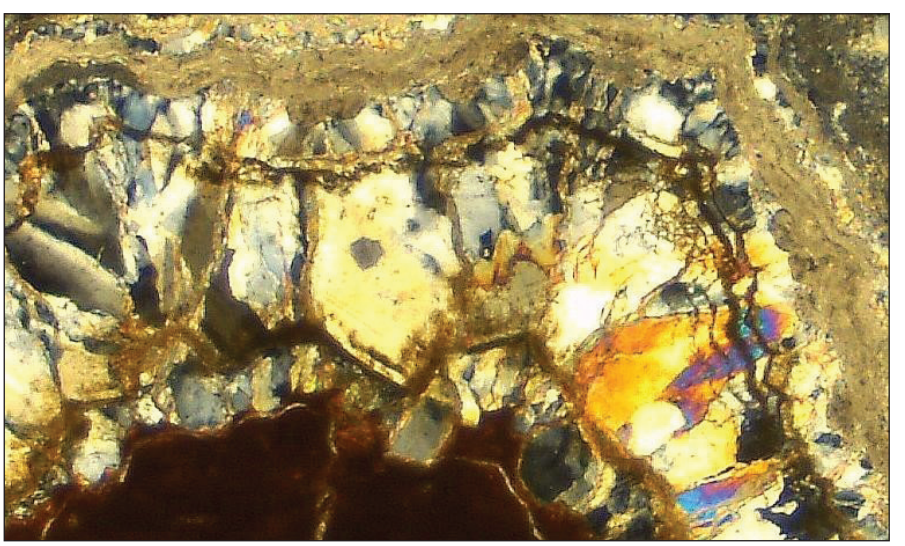
Les filtres directionnels de matrice 7 x 7 de type Sobel ont été appliqués dans les directions N 0°, N 45°, N 90° et N 135° (fig. 6).

Le relevé des linéaments a été effectué par une interprétation visuelle des bandes TM 3, 4, 5 et 7 rehaussées des néo-canaux issus du filtrage spatial et des images obtenues après analyse en



Ph. 21 - Silice recristallisée dans les fractures. Ech. Tlz1. Largeur du champ : 0,5 cm. Ce phénomène est spectaculaire pour la silice des silex qui a été remobilisée.

Recrystallized silica in fractures. Sample Tlz1. Field width : 0.5 cm. This phenomenon is spectacular for flint silica which has been remobilized.



Ph. 22 - Silice de recristallisation entre les lamines d'une oolithe. Ech. Tlz1. Largeur du champ : 0,4 cm.

Recrystallization silica between the laminae of an oolite. Sample Tlz1. Field width : 0.4 cm.

composantes principales. La finalité est une carte détaillée du bâti structural (fig. 6), d'où ont été éliminés les tracés rectilignes relatifs aux activités anthropiques (pistes) et au réseau hydrographique.

La carte de synthèse du réseau de linéaments obtenue est représentée dans la figure 6.

Sur ce document, les linéaments radiaux se distinguent nettement sur le rebord soulevé du cratère (fig. 6).

Bien qu'il s'agisse d'un cratère simple, des fractures concentriques apparaissent. Elles pourraient correspondre aux failles listriques concentriques formées lorsque les parties de la paroi supérieure du cratère se sont effondrées,

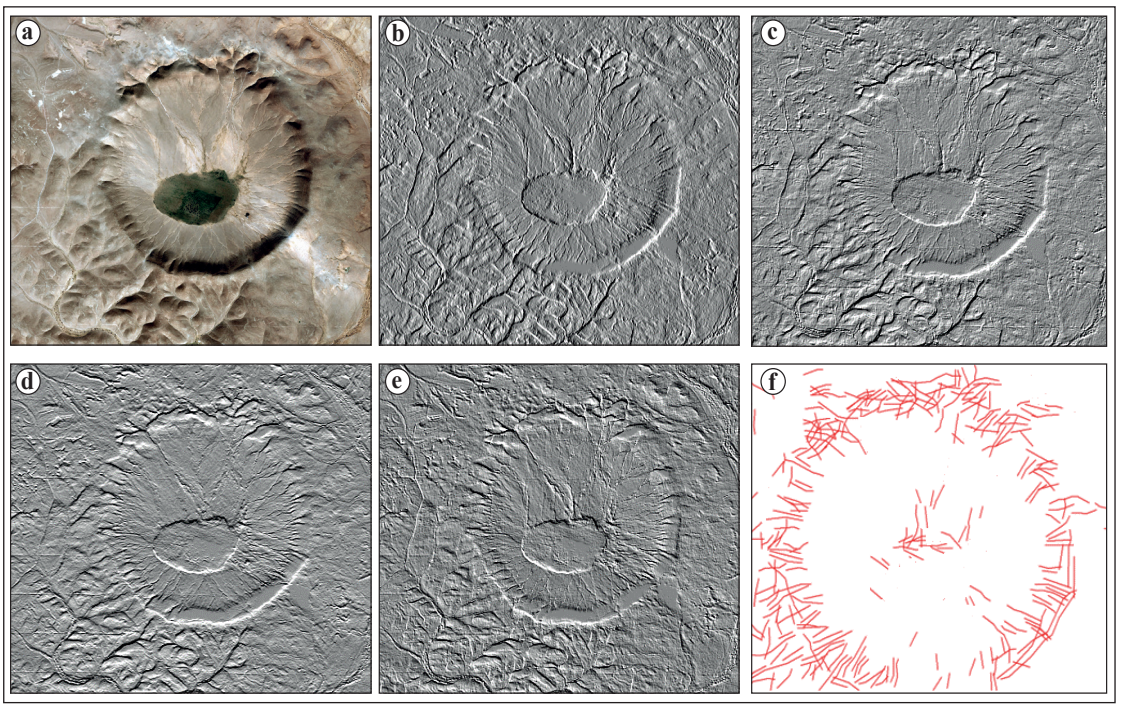


Fig. 6- (a) - Image en couleur naturelle 321 RVB du cratère de Maâdna-Talemzane ;
(b,c,d,e) - Filtres directionnels dans les directions
N 0°, N 45°, N 90° et N 135° ;
(f) - Carte de linéaments de synthèse.

(a) - Natural color image 321 RGB of the Maâdna-Talemzane crater ;
(b,c,d,e) - Directional filters in the directions
N 0°, N 45°, N 90° and N 135° ;
(f) -The synthesis lineament map.

ou aux discontinuités des paquets redéposés sur le rebord du cratère après impact.

La rosace d'orientation (fig. 7), ne met en évidence aucune direction préférentielle, mais plutôt une distribution assez homogène. Néanmoins, une très légère orientation Est-Ouest semble se dégager, tout en restant inférieure à 10%.

L'histogramme des angles d'orientation (fig. 8) montre que ce faible pourcentage semble beaucoup plus lié à l'héritage, au réseau de fractures tectoniques existant dans la région avant l'impact.

Dans l'histogramme de la fréquence des longueurs, la distribution est dissymétrique (fig. 9). Pour de nombreux auteurs, parmi lesquels Andersson et Dverstop (1987), Long et Billaux (1987) et Cacas *et al.* (1990), la distribution log-normale est le plus couramment utilisée.

Cependant, de nombreuses études (Bonnet *et al.,* 2001 ; Bour et Davy, 1999) ont montré qu'une distribution en loi de puissance est plus à même de représenter la distribution des longueurs des réseaux de fractures. La valeur de l'exposant *a* de la loi de puissance $n(l) \propto l^{-a}$ indique la proportion de petites fractures par rapport aux grandes. La loi de puissance a été ainsi testée pour ajuster la distribution des longueurs de fractures (fig. 10). Nous avons utilisé les estimateurs de vraisemblance pour ajuster la loi. De la valeur de la pente *a* obtenue -3,709, se dégage une prédominance des petites longueurs et une fracturation diffuse majoritaire.

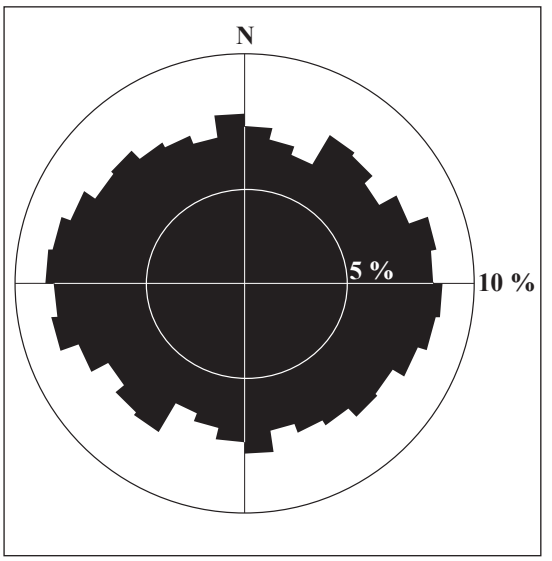


Fig. 7 - Rosace d'orientation du réseau de fractures du cratère de Maâdna-Talemzane.

Orientation rosette of the fracture network of the Maâdna-Talemzane crater.

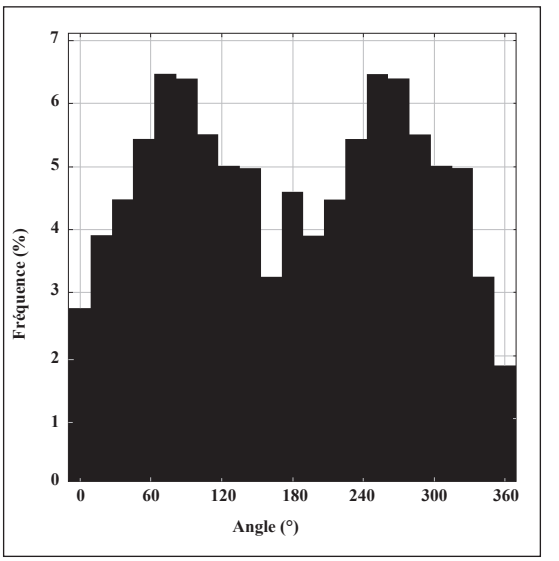


Fig. 8 - Histogramme des angles d'orientation du réseau de fractures du cratère de Maâdna-Talemzane.

Histogram of the orientation angles of the fracture network of the Maâdna-Talemzane crater.

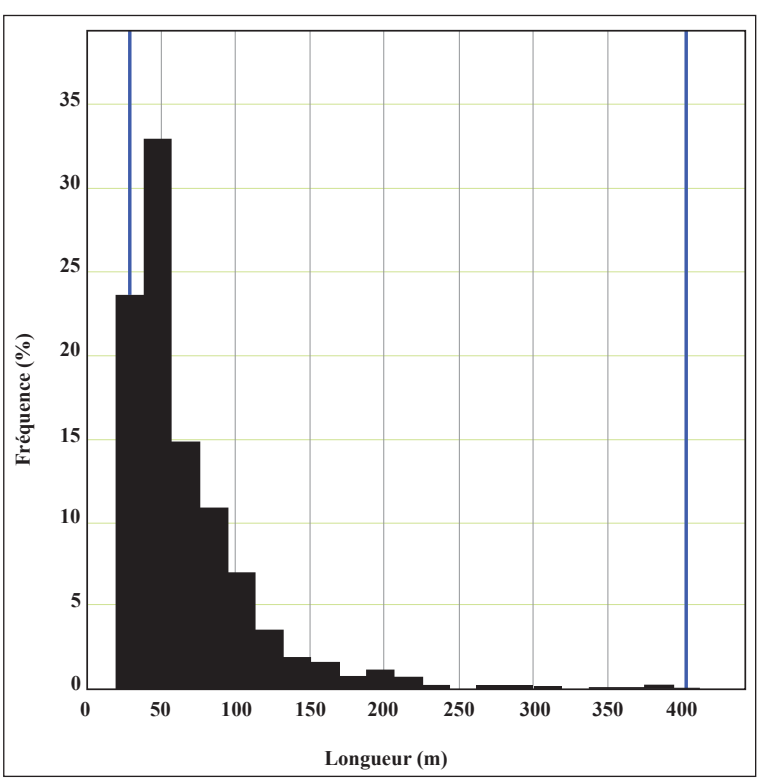


Fig. 9 - Histogramme des longueurs de fractures.

Histogram of the fractures' lengths.

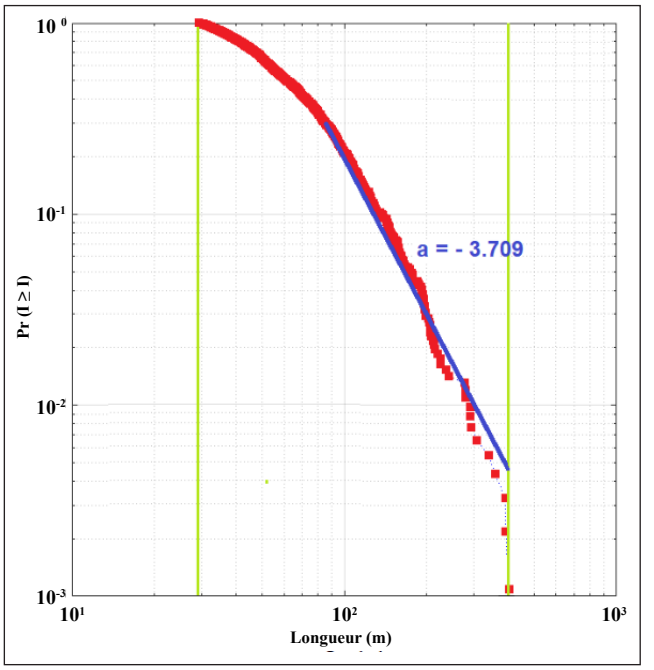


Fig. 10 - Ajustement de la distribution des longueurs de fractures à la Loi de puissance à l'aide des estimateurs du maximum de vraisemblance.

Adjustment of the fracture length distribution to the power law using maximum likelihood estimators.

Par ailleurs, le spectre d'énergie $\Gamma_I(\vec{\nu}) \alpha |\vec{\nu}|^{-\beta}$ où Γ_I est la puissance spectrale, β l'exposant du spectre et $|\vec{\nu}|$ la fréquence radiale, permet également de procéder à une évaluation préliminaire de l'invariance d'échelle qui pourrait correspondre à une loi de puissance.

À ce titre, le spectre de puissance (fig. 11) montre une légère décroissance en loi de puissance peu évidente, mais bien visible sur le spectre de puissance moyen de Fourier avec un exposant du spectre β = -0,74 et où l'exposant de Hurst H = 0,87. Ceci confirme déjà l'auto-affinité des distributions des linéaments.

Cette analyse spectrale sommaire a conduit à effectuer une analyse fractale dans le but d'étudier le réseau de linéaments et déterminer sa dimension fractale pour quantifier la complexité de la structure du réseau (Mandelbrot, 1982 ; Wornell, 1995). La méthode la plus utilisée pour cela est celle dite "du comptage de boîtes". Son principe général consiste à recouvrir un signal par des boîtes de taille ε. Si $N(\varepsilon)$ est le nombre de boîtes de taille ε nécessaire pour recouvrir complètement l'objet, la dimension fractale D_f est ainsi donnée par De Souza et Rostirolla, 2011:

$$D_f = \lim_{\varepsilon \to 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln (1/\varepsilon)}$$

Le résultat du traitement est présenté en fig. 12. La valeur de la dimension fractale obtenue (1,85) reflète l'importance de la fracturation et le degré de complexité du réseau de linéaments et indique à priori l'existence de nombreux degrés de liberté.

Conclusion

L'analyse quantitative de la fracturation montre une organisation du réseau en linéaments radiaux et en linéaments concentriques, où les linéaments diffus semblent majoritaires

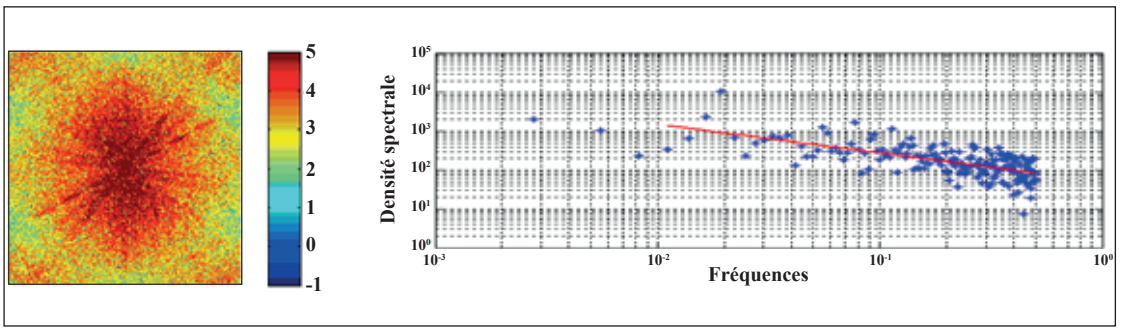


Fig. 11 - Illustration de l'invariance d'échelle sur le spectre de puissance. De gauche à droite : puissance spectrale (log- représentation) et diagramme log−log de la puissance spectrale en fonction de la fréquence spatiale.

Illustration of power spectrum scaling. From left to right : spectral power (log-representation) and log-log diagram of spectral power as a fonction of spatial frequency.

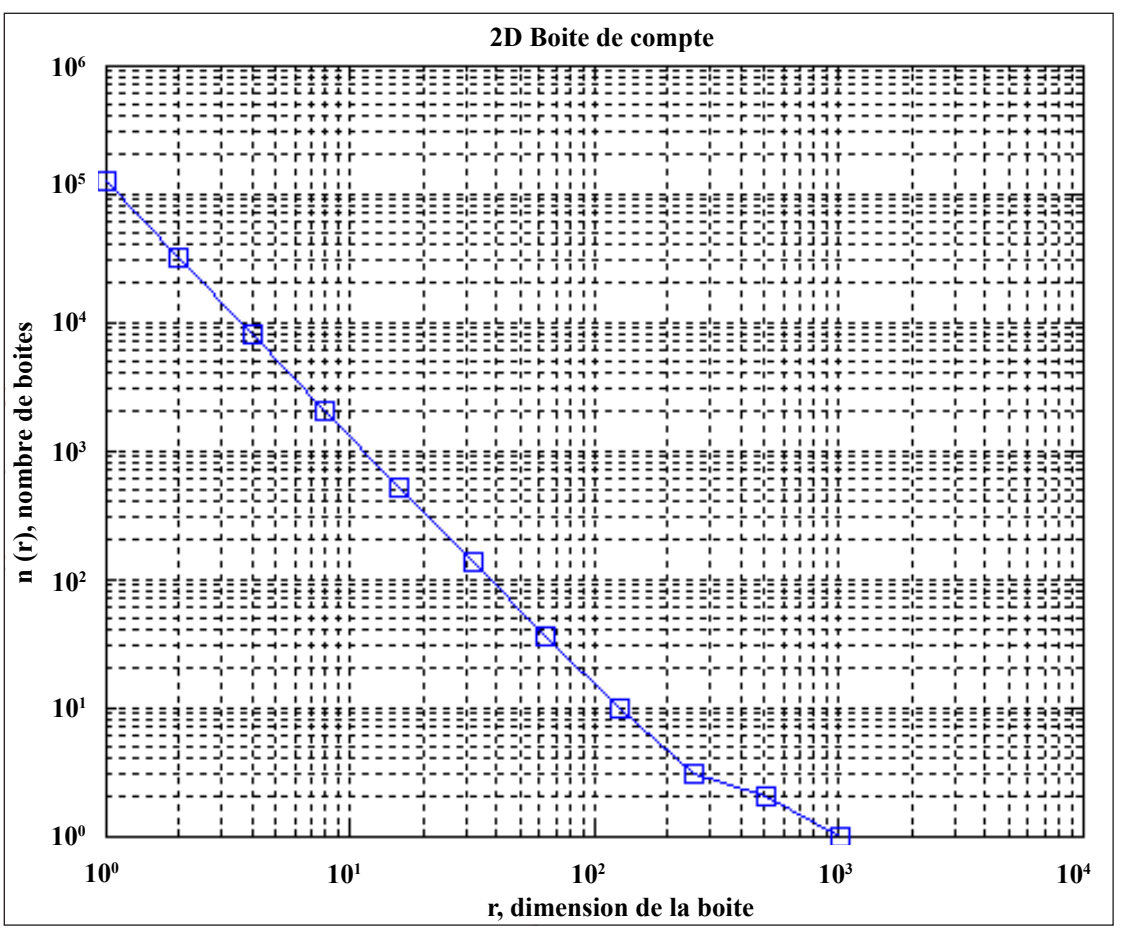


Fig. 12 - Log "nombre de boites" en fonction log "dimension de la boite" : Log[N(ε)] f(Log(ε)).

Log "number of boxes" as function of log "box size" : Log[N(ε)] f(Log(ε)).

avec une distribution assez homogène sans aucune direction préférentielle. Ceci est en faveur de l'hypothèse d'un cratère d'impact de météorite.

V- À PROPOS DE L'INTERPRÉTATION D'UNE STRUCTURE GÉNÉRÉE PAR L'EFFONDREMENT D'UN DIAPIR

L'éventualité d'un cratère lié à la dissolution d'un diapir pourrait être à priori séduisante, car de telles structures ponctuent l'Atlas saharien proche (Abed, 1982 ; Ait Ouali, 1982 ; Herkat, 1992).

La structure de Talemzane se situe à plus de 50 km au sud de cette chaîne de montagnes, en plateforme saharienne, plus exactement la province triasique. Sur le plan de la géologie et de la géodynamique, c'est un tout autre contexte que celui du Nord (Aliev, 1971 ; Fabre, 1971 ; Fabre, 1974 ; Nedjari *et al.,* 1999).

Néanmoins, quelle que soit la région considérée, le développement des diapirs exige un moteur, des conditions et des situations particulières. Dans le cas de l'Atlas saharien, ils sont induits par l'orogénèse alpine. Ces objets géologiques sont en grande partie liés à la géométrie et à l'évolution structurale du substratum, contrôlée elle-même par la cinématique d'ensemble.

Au Maghreb, les premiers mouvements halo-cinétiques sont enregistrés dès le Jurassique (Perthuisot et Rouvier*,* 1992), souvent le long d'accidents décrochants NE-SO. Les premières rides sont liées aux mouvements coulissants extensifs du début du Crétacé. Les percements diapiriques se produisent à l'intersection de deux directions structurales. À la fin du Crétacé et la première moitié du Tertiaire, les structures déjà perçantes continuent leur ascension, d'autres naissent dans un contexte extensif en général.

Le domaine saharien est connu pour être relativement stable depuis au moins les grandes structurations hercyniennes à l'origine de l'individualisation des bassins (Fabre, 1974 ; Nedjari, 2002 ; Nedjari *et al.*, 2011). L'orogenèse alpine y est des plus discrètes. Les séries mésozoïques sont affectées essentiellement de légères déformations à grand rayon de courbure (Conrad, 1969 et 1981). Il est difficile d'envisager dans un tel contexte un quelconque diapirisme triasique.

Une phrase de Fabre (1974) répond parfaitement à cette question : " *nulle part, nous ne trouverons de traces de tectonique salifère, malgré la puissance de ces formations* ".

La province triasique saharienne est très bien connue à travers les nombreux travaux pétroliers et universitaires, les synthèses (Busson, 1970 ; Boudjema, 1987 ; Nedjari *et al.,* 2002 a ; Nedjari *et al.,* 2011).

Des sondages carottés dans leur intégralité ont été examinés, notamment ceux proches du cratère (Nedjari *et al.,* 2002 a). Les séries y sont normales et ne montrent aucune perturbation (Ait Ouali et Nedjari*,* 1996 ; Nedjari *et al.,* 2002 b ; Ait Ouali *et al.,* 2009).

C'est le cas notamment des sondages Li 1 et Li 4 (figs. 13 et 14) situés à moins de 10 km de ce site.

Sur un socle à rhyolites et andésites altérées repose une couverture sédimentaire de 3 000 m où un complexe triasique est puissant de 560 m. La base de ce dernier est argilo-gréseuse puis argileuse avant que ne prédominent les évaporites avec 160 m.

VI- LES DONNÉES DES PROFILS SISMIQUES RECOUPANT LE CRATÈRE

Deux profils sismiques réalisés par ENAGEO pour SONATRACH-ALNAFT, dans le cadre de la prospection du périmètre de Ksar El Hirane, recoupent le cratère de Talemzane en N-S (Xline 4098) et E-O (Xline 2746).

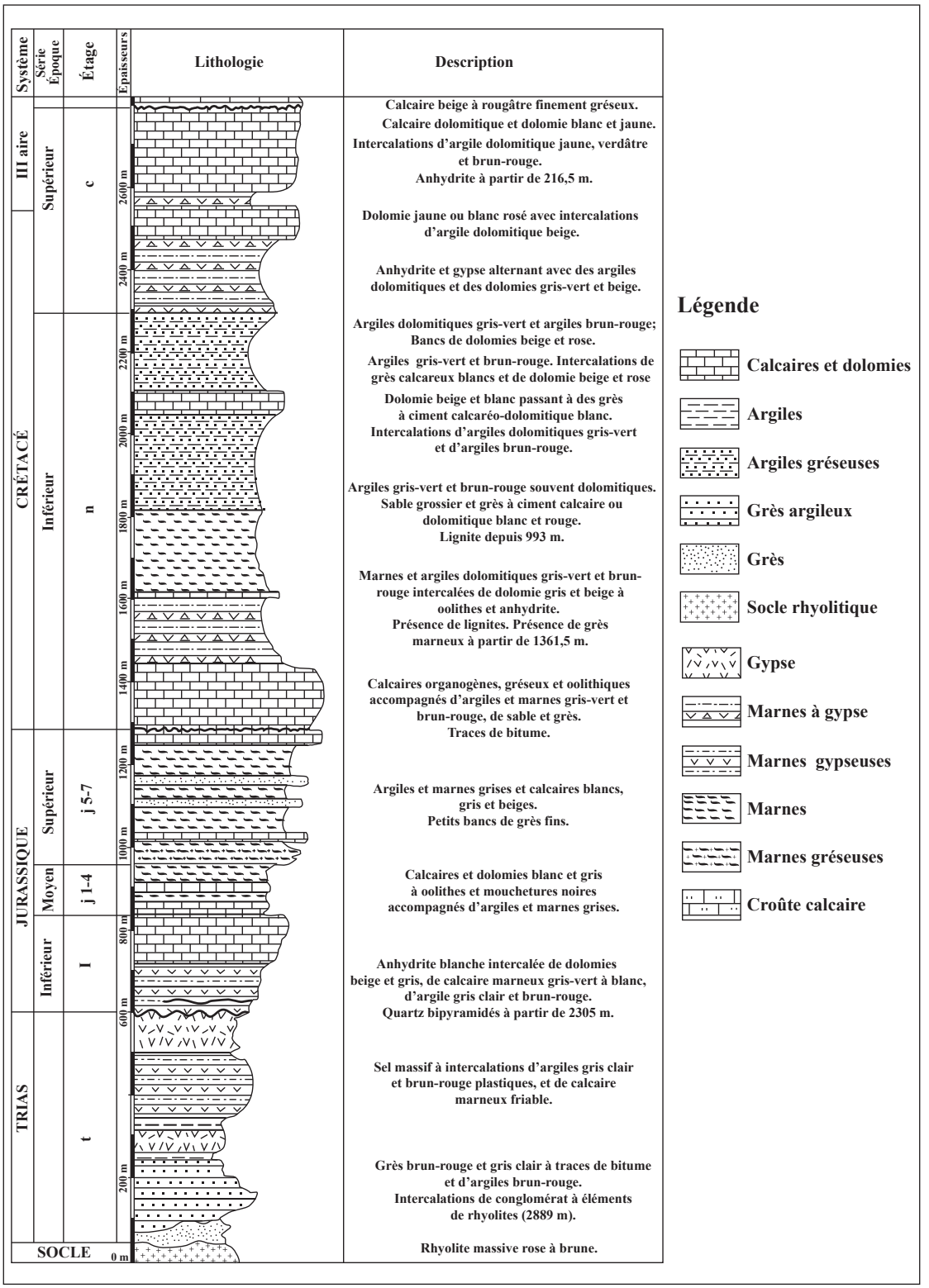


Fig. 13 - Log stratigraphique du sondage Li 1.

Stratigraphic column of Li 1 borhole.

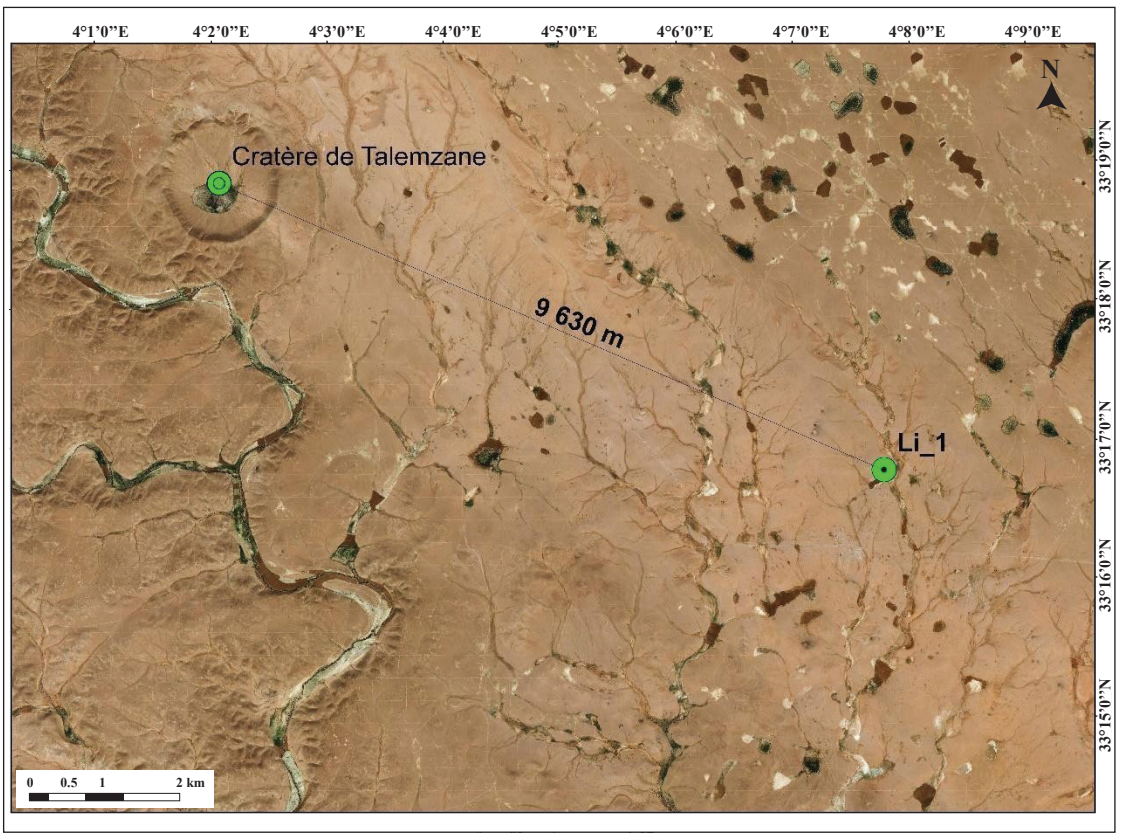


Fig. 14 - Localisation du sondage Li 1 par rapport au cratère de Talemzane.
Location of Li 1 borehole in relation to the Talemzane crater.

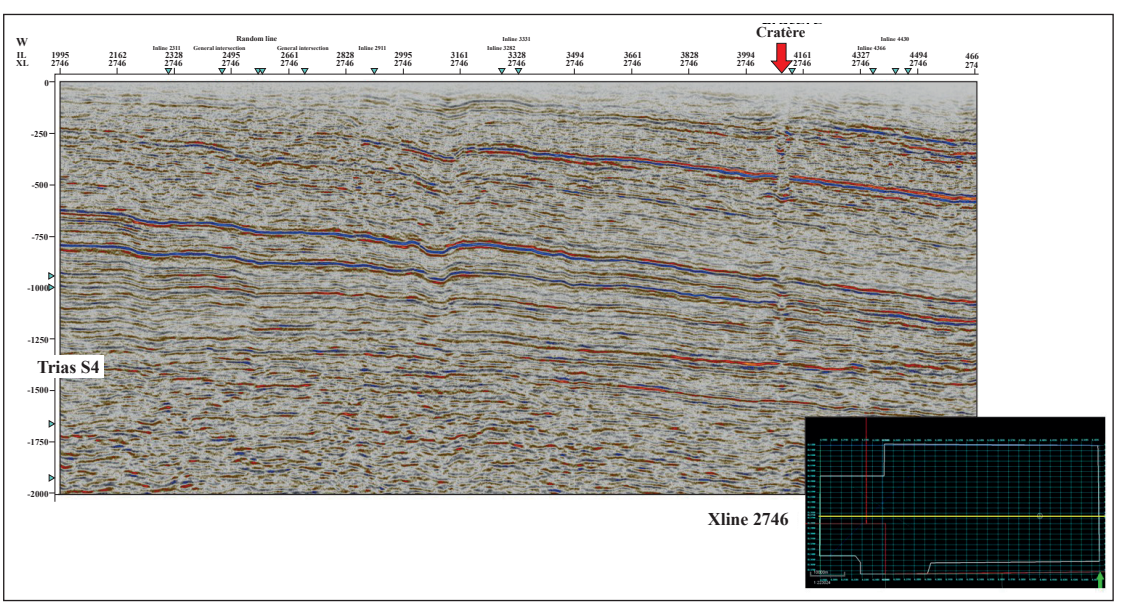


Fig. 15 - Image du profil sismique Xline 2746 (ALNAFT, 2020).
Image of Xline 2746 seismic profile (ALNAFT, 2020).

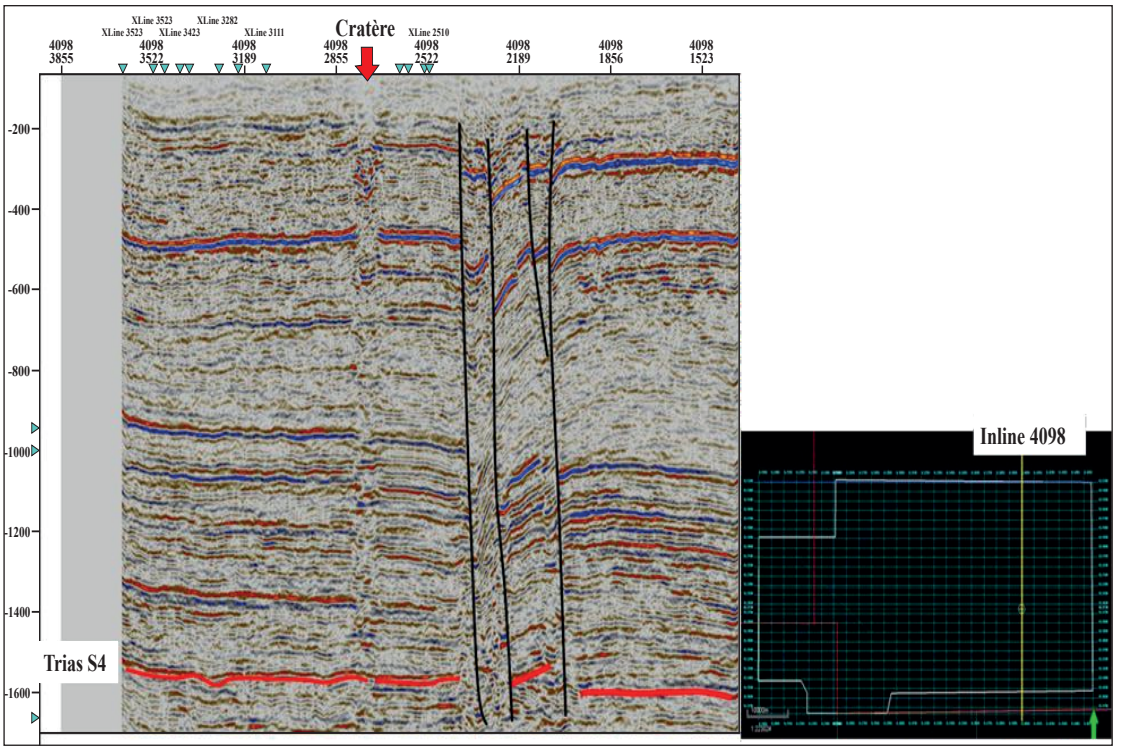


Fig. 16 - Image du profil sismique Xline 4098 (ALNAFT, 2020).

Image of Xline 4098 seismic profile (ALNAFT, 2020).

Les images (figs. 15 et 16) déforment la réalité en raison d'une échelle verticale très exagérée. Il convient d'en tenir compte.

Les sondages proches (Li 1 et Li 4) ont rencontré un Trias argilo-gypseux à plus de 2300 m de profondeur.

L'examen de ces profils montre que :

- le profil S-N à l'approche de la zone atlasique met en évidence des accidents et des failles normales qui déterminent un "graben" à l'origine d'un léger effondrement. Ces accidents s'estompent vers le sud. L'impact semble s'être produit sur un de ces accidents avec une légère perturbation qui n'affecte en rien le Trias ;

- ce Trias ne présente aucune manifestation de diapirisme, ni de remontée des évaporites ;

- le profil O-E vient en confirmation de ces observations. Les données sismiques excluent ainsi toute manifestation diapirique.

VII- CONCLUSION

Quelle que soit l'approche utilisée dans la caractérisation de la structure de Talemzane, les éléments en faveur d'une structure produite par l'impact d'une météorite sont largement prépondérants et s'expriment à toutes les échelles.

Sur ce site, un ensemble de critères permet d'affirmer avec certitude que cette structure est bien un cratère d'impact de météorite avec : un métamorphisme de choc, des brèches d'impact, des éjectas, des preuves d'une augmentation de la pression, et de là ayant généré une redistribution et une remobilisation de la silice, un réseau de linéaments de type radial.

Par ailleurs, les profils sismiques recoupant ce cratère en E-O et en N-S ainsi que le contexte d'ensemble d'un domaine géologiquement montrent que l'hypothèse par effondrement d'un diapir ne peut être retenue.

Remerciements

Les auteurs expriment leurs remerciements et gratitudes aux rewievers dont les lectures ont grandement contribués à l'amélioration de cet article, à ALNAFT qui a mis à notre disposition les profils sismiques recoupant la structure de Talemzane et autorisé leur utilisation et à l'ASGA pour avoir assuré le financement des missions de terrain et la logistique dans le cadre de son programme d'inventaire du patrimoine géologique.

BIBLIOGRAPHIE

Abed, S. 1982. Lithostratigraphie et sédimentologie du Jurassique moyen et supérieur du djebel amour (Atlas saharien central, Algérie). *Thèse de Doctorat*, 256 p.

Ait Ouali, R. 1982. Étude des stades diagénétiques des séries carbonatées du Jurassique terminal des monts des Aurès et des Ouled Nail (Algérie). *Thèse de Doctorat*, *Université de Pau*, 230 p.

Ait Ouali, R. et Nedjari, A. 1996. La Province triasique saharienne : 20 ans d'informations géologiques : bilan critique et réflexions. *Bulletin du Service Géologique de l'Algérie*, *7*(2), pp. 211-228.

Ait Ouali, R., Nedjari, A., Bitam, L., Taquet, Ph., Tayeb Cherif, L. et Bouras, R. 2009. Le Zarzaitine inférieur (In Amenas, Sahara algérien) : derniers développements dans une série du Trias pro-parte. *Bulletin du Service Géologique de l'Algérie, 17*, pp. 21-28.

Aliev, M. 1971. Structures géologiques et perspectives en pétrole et gaz du Sahara algérien. *Rapport SONATRACH*.

Andersson, J. and Dverstop, B. 1987. Conditional simulations of fluid flow in three-dimensional networks of discrete fractures. *Water Resour. Res*., *23* (10), pp. 1876-1886.

Belhaï, D., Merle, O., Vincent, P., Devourd, B. et Afalfiz, A. 2006. Etat 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*, *17*(2), pp. 95-112.

Bonnet, E., Bour, O., Odling, N., Main, I., Berkowitz, B., Davy, P. and Cowie, P. 2001. Scaling of fracture systems in geological media. *Reviews of Geophysics*, *39* (3), pp. 347-383.

Boudjema, A. 1987. Evolution structurale du bassin pétrolier triasique du Sahara nord oriental (Algérie) *Thèse de Doctorat, Univ. Paris Sud-Centre d'Orsay*, 290 p.

Bour, O. and Davy, P. 1999. Clustering and size distributions of fault patterns: theory and measurements. *Geophysical Research Letters*, *26* (13), pp. 2001-2004.

Busson, G. 1970. Le Mésozoïque saharien. Essai de synthèse des données de sondages algéro-tunisiens. *CNRS-CRZA S. Geol*., *11* (2), 788 p.

Cacas, M.-C., Ledoux, E. and De Marsily, G. 1990. Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: calibration and validation: 1. The flow model. *Water Resources Research*, *26*, pp. 479-489.

Conrad, G. 1969. L'évolution continentale post hercynienne du Sahara algérien (Saoura, Erg Chech-Tanezrouft, Ahnet-Mouydir). *Editions du C.N.R.S*, 527 p. 284.

CONRAD, J. 1981. La part des déformations post hercyniennes et de la tectonique dans la structure du Sahara central algérien-un domaine relativement mobile de la plateforme hercynienne. *C.R.A.S Paris*, t. 293, pp.1053-1056.

DE SOUZA, J.-D. AND ROSTIROLLA, S.-P. 2011. A fast MATLAB program to estimate the multifractal spectrum of multidimensional data: Application to fractures. *Comput. Geosci., 37*, pp. 241-249.

FABRE, J. 1971. Structure de l'Algérie saharienne. Eléments pour une carte tectonique. *Bulletin du Service Géologique de l'Algérie*, *Nouvelle Série, 41*, pp. 161-185.

FABRE, J. 1974. *Introduction à la géologie du Sahara*. SNED Alger.

FERRIÈRE, L. AND OSINSKI, G.-R. 2013. Shock metamorphism. *In* Impact cratering: Processes and products, edited by Osinski, G.-R. and Pierazzo, E. Chichester, UK: *Blackwell Publishing Ltd*, pp. 106-124.

FERRIERE, L., KOEBERL, C., REIMOLD, W.-U., HECHT, L. AND BARTOSOVA, K. 2009. The origin of ''toasted'' quartz in impactites revisited (abstract #1751). *40th Lunar and Planetary Science Conference*.

FRENCH, B.-M. 1998. *Traces of catastrophe: A handbook of shock-metamorphic effects in terrestrial meteorite impact structures*. LPI Contribution 954. Houston, Texas: Lunar and Planetary Institute.

GAULT, D.-E., QUAIDE, W.-L. AND OBERBECK, V.-R. 1968. Impact Cratering Mechanics and Structures. In: French, B.-M. and Short, N.-M., Eds., *Shock Metamorphism of Natural Materials*, Mono Book, Baltimore, pp. 87-99.

GRIEVE, R.-A., LANGENHORST, F. AND STÖFFLER, D. 1996. Shock metamorphism of quartz in nature and experiment: II. Significance in geosciences. *Meteoritics & Planetary Science*, *31*, pp. 6-35.

HERKAT, M. 1992. Manifestations diapiriques du Trias dans les séries du Crétacé supérieur de l'Atlas saharien et des Aurès. *Bulletin du Service Géologique de l'Algérie*, *3*(1), pp. 15-27.

KARPOFF, R. 1952. Les cratères de météorites. *Bulletin Liaison Saharienne*, *3*(10), pp. 2-5.

KARPOFF, R. 1953. The meteorite cratere of Talemzane, in southern Algeria. *Meteoritics*, I, pp. 31-38.

KARPOFF, R. 1954. Un cratère de météorite à Talemzane dans le Sud algérien. *Inter. Geol. Cong. 1952, section XIII-2*, pp. 234-244.

KUMAR, P.-S., AND KRING, D.-A. 2008. Impact fracturing and structural modification of sedimentary rocks at Meteor Crater, Arizona. *Journal of Geophysical Research: Planets*, *113*(9), 17 p.

LAMALI, A., ABTOUT, A., MERABET, N., MAOUCHE, S., ROCHETTE, P., BOUKERBOUT, H., MEZIANE, E.-H. AND AYACHE, M. 2009. The Maâdna meteoritic crater (talemzane, algeria): geophysical and geological investigations). *72nd Annual Meteoritical Society Meeting*.

LAMALI, A., ROCHETTE, P., MERABET, N., ABTOUT, A., MAOUCHE, S., GATTACCECA, J., FERRIÈRE, L., HAMOUDI, M., MEZIANE, E. 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*.

Lamali, A., Hamai, L., Nadjemi, A., Yelles-Chaouche, A., Abtout, A., Merabet, N., Bentridi, S.-E., Djadia, L., and Mokhtar, S.-A. 2020. Exploration of the hypothetical impact ejecta layer around the Maadna structure (Talemzane, Algeria) using georadar technique. *Journal of African Earth Science*, *172*.

Lamali, A., Hamai, L., Mokhtar, S.-A., Yelles-Chaouche, A., Abtout, A., Merabet, N., and Bentridi, S.-E. 2022. Field gamma ray spectrometry as a diagnostic tool for the assessment of hypothetical melt rocks from the Maâdna structure (Talemzane, Algeria): Implications for the crater formation process. *Meteoritics and Planetary Science*, *57*, pp. 929-946.

Lambert, P., Mc Hone, 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.

Lambert, P., Mc Hone, 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.

Long, J.-C. and Billaux, D.-M. 1987. From field data to fracture network modeling: an example incorporating spatial structure. *Water Resources Research*, *23*(7), pp. 1201-1216.

Mandelbrot, B.-B. 1982. The fractal geometry of nature. Freeman Press, New-York.

Mc Hone, J.-F. and Greely, R. 1987. Talemzane: Algerian impact crater detected on SIR-A orbital imaging radar. *Meteoritics*, *22*, pp. 253-264.

Nedjari, A., Ait Ouali, R. et Delfaud, J. 2002 a. Le Trias des bassins sahariens : mise au point et nouvelle approche. *Mém. Serv. Géol. Alg*., *1*, pp. 87-113.

Nedjari, A., Mesbah, M., Benhamouche., A. et Berraki, A. 2002 b. Province triasique saharienne : une approche de sa structure par l'analyse du réseau hydrographique sub actuel et actuel. *Bulletin du Service Géologique de l'Algérie*, *12* (1), pp. 77-95.

Nedjari, A., Aït Ouali, R., Debaghi F., Hamdidouche, R., Benhamouche, A., Amrouche, F. et Messamri K. 2011. La géologie saharienne revisitée (1980- 2009). *Mémoire du Service Géologique National*, *18*, pp. 85-176.

Perthuisot, V. et Rouvier, H. 1992. Les diapirs du Maghreb central et oriental: des appareils variés, résultants d'une évolution structural et pétrographique complexe. *Bull. Soc. Géol. France*, *t.163*, *6*, pp. 751-760.

Sahoui, R. 2009. Étude géologique du cratère d'impact météoritique de Maadna (Hassi Delaa, Laghouat). Modélisation analogique des structures tectoniques. *Thèse de Magister, USTHB*, 196 p.

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

Wornell, G.-W. 1995. *Signal processing with fractals: A wavelet-based approach*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.