

Découverte d'un nouveau cratère d'impact météoritique en Afrique: l'astrolème de Gweni-Fada (Ennedi, Sahara du Tchad)

Pierre M. Vincent et Alain Beauvilain

C.R. Acad. Sci. Paris,
t. 323, série II a,
p. 987 à 997,
1996

Résumé L'astrolème de Gweni-Fada a un diamètre minimum de 14 km. Il est entièrement contenu dans les grès du Paléozoïque inférieur. Il est caractérisé par une dissymétrie marquée, et par l'importance de sa zone centrale résurgente. La dépression périphérique a une forme en croissant. La zone centrale dessine un dôme structural faillé dont le sommet, décalé vers le Sud, est plus haut que les remparts.

Le métamorphisme de choc se traduit par la présence de plusieurs sets d'éléments planaires dans les quartz de la zone centrale.

Par ses dimensions, Gweni-Fada est la 4^e structure d'impact d'Afrique.

Mots-clés : Tchad, Astrolème, Cratère d'impact, Astéroïde, Métamorphisme de choc, Dévonien.

P. M. V. : Université Blaise-Pascal,
Observatoire de Physique du Globe
et Centre de Recherches
Volcanologiques,
CNRS, 5, rue Kessler,
63038 Clermont-Ferrand
CEDEX, France ;
E-mail: vincent@opg.univ-
bpclermont.fr

A. B. : Centre National d'Appui à la
Recherche, BP n° 1228, N'Djaména,
Tchad.

Abstract The circular structure of Gweni-Fada, Ennedi:
a new meteorite impact crater in northern Chad

The minimum diameter of Gweni-Fada astrobleme is 14 km. It lies entirely within Lower Palaeozoic sandstones. Its main characteristics are its asymmetry, and the size of the central uplift. The peripheral depression has a crescent form. The central zone forms a disrupted structural dome whose summit is higher than the ramparts and displaced toward the south.

Several sets of characteristic planar deformation features are present in the quartz grains of the central zone.

Gweni-Fada is the fourth largest impact crater in Africa.

Keywords: Chad, Astrobleme, Impact crater, Asteroid, Shock metamorphism, Devonian.

**Abridged
English
Version**

INTRODUCTION

ONLY 15 impact craters were known in Africa in 1994, which is not many given the continent's large area (Koeberl, 1994). Since then, two additional structures have been found. The Aorounga ring-structure was until now the only astrobleme recognized in the 1,284,000 km² of the Chad Republic (Becq-Giraudon *et al.*, 1992; Vincent *et al.*, 1994).

The newly discovered impact crater is situated 320 km to the south-east of Aorounga and centred 30 km to the north-east of Fada palm grove, in the Ennedi district of Northern Chad (fig. 1). It is called here the "Gweni-Fada structure", from the name of a wadi inside its external depression.

We first suspected the presence of this structure by examination of a Landsat image, and of oblique aerial photographs specially

Note

présentée par
Théodore Monod.

remise le 1^{er} juillet 1996,
acceptée après révision
le 9 septembre 1996.

taken by a military flight. It was confirmed as a ring-structure by the study of older vertical air photographs from the Institut Géographique National. It is now recognized as a high-velocity impact crater, following a French-Chadian reconnaissance expedition on the site.

GEOMORPHOLOGY AND STRUCTURE

The Gwani-Fada structure lies within sandstones with *Spirophytons*, attributed to the Upper Devonian (Wacrenier *et al.*, 1958). Its minimum diameter is 14 km. The main characteristics of the Gwani-Fada structure are its asymmetry, and the presence of an important central uplift (**photos. 1 and 2**).

The outer zone

Unlike Aorounga, the *external depression* is very irregular, with the form of a crescent encircling the inner zone on two thirds of its periphery. Its diameter is 12 km, and its maximum width, to the north, is 4 km. The external limit of the depression is very sharp. To the north and NW, the sandstones bend towards it with strong dips (**photo. 3**). The inner limit is very irregular, with embayments of the sandy flat region inside the inner zone. An elevated *outer ring*, where sandstones have outward dips, surrounds the depression. The outer limit of the disturbed zone is not always clearly defined. A circular normal fault situated 1 km to the north of the northern depression cliff is taken as a provisional limit, but the actual diameter of the structure could be some kilometres larger than apparent (**fig. 2**).

On the south side, there is no external depression, but parallel terraces are made of elongated blocks where sandstones are tilted or folded (**photo. 1**). This particular morphology seems to result from landslides of the highest part of the depression wall. These landslides ramped up against the already uplifted central zone, contributing largely to the typical asymmetry of the structure.

The central complex (photo. 4)

The large inner zone (maximum diameter 10 km) is rather chaotic; it is a rugged area, with summits higher than in the outer zone. It is made of several blocks. The dips of the

sandstones are very irregular, but usually towards the exterior (**photo. 6**). *Spirophytons* have been found in these sandstones, except in a central core (**photo. 5**) where they are replaced by *Harlanias*, fossils known from the Lower Devonian to Ordovician in Ennedi. Overall, this central complex looks like a *disrupted structural dome*. The Precambrian basement is not involved in the uplift. The extent of the stratigraphical uplift cannot be estimated with the present field data. According to the formula of Grieve, 1981 (*in* Melosh, 1989), it should be: $H_{su}=0,06D^{1,1}$, where D is the final crater diameter, that is an **uplift of more than 1 km** for this 14 km crater.

SHOCK METAMORPHISM

No impactites have been found in the central complex, and probably there are none, except under the sediments of the external depression. The only hope of finding outcrops of impactite is in some *mesas* outside the structure to the south. The only breccias observed are monomict breccias in dyke-like zones; they appeared to be friction cataclasites.

Preliminary examination of thin sections has shown characteristic **planar deformation features** (French and Short, 1968) in quartz grains from the sandstones of the central complex. They are particularly well developed in the "dragées sandstones" of the core, where up to four sets of PDFs are present in the quartz grains of some thin sections (**photo. 7**). The rounded form of the "dragées" is perfectly preserved.

DISCUSSION

The presence of typical planar deformation features confirms that Gwani-Fada results from a high-velocity impact, as was first suspected from its morphology. It belongs to the category of the "complex craters" (Dence, 1968), where the bottom of the initial excavation crater was uplifted, and widened by inward slumping of the flanks.

The initial asymmetry of the structure is enhanced by the later insliding of the terraces from the south rim. This sliding appears to be related to the presence of a higher plateau on the south flank—an explanation already propo-

sed for the King crater, on the far side of the Moon (cf. fig. 2.10, in Melosh, 1989).

The astrobleme occurs entirely within sandstones, and this composition of the target-rocks must explain some of its characteristics.

The age of Gweni-Fada is not known at present. Erosion of the impactites ejected outside of the crater indicate an old age. The absence of melt rocks inside seems also to favour an old age, but two remarks have to be made. In a complex crater, when the central zone is high, impactites tend to flow outside from the uplift. Here they could be in the external depression under the sediment filling. When the target-rocks are rich in water, there is a greater proportion of materials ejected from the crater as fluidized flows (Kieffer and Simonds, 1980). The Palaeozoic sandstones of Ennedi have sizeable aquifers, even with the present arid climate (Schneider, 1989). In view of these remarks, and of its well preserved morphology, this old astrobleme

could nevertheless be appreciably younger than the Devonian sandstones.

Many non-eroded craters of Mars have a central zone abnormally large when compared to the craters of the Moon or Mercury, suggesting the presence of some "fluidizing agent" (Melosh, 1989). It is possible that the considerable development of the uplift zone at Gweni-Fada is related not only to erosion, but also to the presence of aquifers in the impacted sandstones.

According to the formulae of Shoemaker *et al.* (1990), the energy necessary to produce a crater with a diameter of 14 kt is equivalent to $3,4.10^7$ kt of TNT. This is the energy of an "average" asteroid with a diameter of about 900 m impacting the ground at a right angle at a velocity of 17.9 km/s (the average velocity of the "Near Earth Asteroids").

Gweni-Fada is, just before Aorounga, the fourth impact crater of Africa by size, and the first in the Phanerozoic.

INTRODUCTION

On ne connaissait en 1994 que 15 cratères d'impact en Afrique, ce qui est peu pour sa superficie (Koeberl, 1994). Depuis cette date, deux nouveaux cratères ont été découverts. La structure circulaire d'Aorounga était jusqu'à maintenant le seul astroblème reconnu sur les 1 284 000 km² de la République du Tchad (Becq-Giraudon *et al.*, 1992 ; Vincent *et al.*, 1994).

Cette nouvelle structure est située dans la région administrative du BET (Borkou-Ennedi-Tibesti), la partie saharienne du Tchad, à 320 km au SE d'Aorounga, par 17°25' de latitude nord et 21°45' de longitude est (fig. 1). Son centre n'est qu'à 30 km au NE de la palmeraie de Fada, la sous-préfecture de l'Ennedi, mais elle ne peut être atteinte actuellement que par le Nord, après un long détour par l'Ouest du massif montagneux et la dépression du Mourdi. Elle est appelée ici « **structure de Gweni-Fada** », du nom de l'oued qui draine sa dépression externe.

La présence d'une structure circulaire en Ennedi nous avait été suggérée initialement

par l'examen d'une image satellite Landsat, puis confirmée par des photographies aériennes obliques, prises à notre intention par un avion militaire de l'opération « Epervier ». L'étude ultérieure de photographies aériennes verticales de l'IGN fournissait suffisamment d'arguments en faveur de l'hypothèse d'un cratère d'impact, pour justifier une reconnaissance sur le terrain.

Une mission franco-tchadienne, organisée conjointement par le Centre de Recherches Volcanologiques de Clermont-Ferrand (CRV-CNRS) et le Centre National d'Appui à la Recherche (CNAR) de N'Djaména, a pu effectuer la première reconnaissance de cette structure. Le but de cette Note est de donner les résultats préliminaires de notre mission, qui confirment l'interprétation météoritique.

GÉOMORPHOLOGIE ET STRUCTURE

La structure de Gweni-Fada est située dans les formations paléozoïques constituant l'auréole sud du bassin sédimentaire de Koufra. Elle affecte les grès à *Spirophytons*, attribués au Dévonien supérieur (Wacrenier *et*

al., 1958). Son diamètre *minimum* est de 14 km. Elle est caractérisée principalement par sa dissymétrie, et par la présence d'un important soulèvement de la zone centrale.

Du point de vue structural et morphologique, elle comprend deux parties bien distinctes : une zone interne complexe au relief tourmenté, et une zone externe plus régulièrement déformée (**photo. 1 et 2**).

La zone externe est formée d'une dépression entourant la zone centrale et d'une couronne périphérique (**fig. 2**).

La dépression externe a la forme d'un croissant qui encercle la zone interne sur les 3/4 de sa périphérie. Son diamètre est de 12 km et sa largeur maximum, au Nord, de 4 km. La limite externe de la dépression est une faille particulièrement nette, formant une falaise d'une hauteur minimum de 100 m (**photo. 3**). Au Nord et au NW, une rampe longe le pied de la falaise sur 5 km : elle représente la surface structurale des grès effondrés dans la dépression, avec des pendages internes compris entre 35 et 60°. Ailleurs, quelques panneaux de taille plus modeste attestent que cette disposition est celle de toute la dépression.

Au Sud, la limite externe est plus confuse et plus irrégulière. L'emplacement de la dépression y est occupé par une succession de terrasses, formées par des panneaux étroits

et plus ou moins basculés, localement plissés, et serrés les uns contre les autres (**photo. 1**). La discordance des directions indique qu'ils sont venus buter sur le relief de la zone centrale, déjà déformée. Il semble que cette disposition inhabituelle puisse s'expliquer par un glissement tardif, dans la dépression, d'une partie de la couronne périphérique ; celle-ci devait être préalablement découpée « en marches d'escalier » par des failles parallèles, comme on peut l'observer à la limite nord. Ce glissement de terrain s'est produit là où le flanc de la structure est le plus élevé – l'altitude y atteint 1 100 m, contre 900 m au maximum ailleurs – ceci pouvant expliquer cela.

La couronne périphérique est formée de grès à pendages faibles dirigés vers l'extérieur, s'atténuant rapidement en s'éloignant de la dépression. La limite externe de la zone déformée n'est pas évidente. Au Nord, une faille normale observée, parallèle à celle de la dépression, découpe une « marche d'escalier » d'environ 1 km de large : la limite de la structure y a été placée provisoirement, donnant un diamètre minimum de 14 km. Une seconde faille semble exister au-delà, mais n'a pu être contrôlée sur le terrain. Le diamètre réel pourrait donc être sensiblement supérieur à cette valeur, de l'ordre de 16 km (**fig. 2**).

Fig. 1 Carte de localisation.

Location map.

Fig. 2 Carte structurale. 1 : complexe central ; a, cœur ; b, couronne interne ; 2 : dépression externe ; 3 : couronne périphérique ; a, extension minimum, b, extension maximum ; 4 : zone des matériaux glissés.

A-B. Coupe SW-NE. Même légende.

Structural map 1: central complex, a, core; b, internal ring; 2: external depression; 3: outer ring, a, minimum extension, b, maximum extension; 4: slumped zone. A-B. South-west - north-east section. Same legend.

Photo. 1 Vue d'ensemble vers le NE. On voit au premier plan les bancs plissés et faillés de la zone glissée. Assemblage de photographies aériennes obliques (Armée de l'Air, Opération « Epervier »).

General view, looking north-east. In the foreground are seen the faulted or folded beds of the slumped zone. Montage of aerial oblique photographs (Armée de l'Air, Opération "Epervier"). L=17 km at the base of the photo.

Photo. 2 Vue d'ensemble vers l'Ouest. La disposition de la zone centrale en dôme structural est bien visible. A sa gauche, la partie glissée est limitée par la falaise arquée (couleur sombre), limitant le plateau d'Eniména (tâche claire).

La dépression externe ensablée s'étend plus largement à droite, au-delà du champ de la photo. Photo oblique de l'Armée de l'Air, Opération « Epervier ».

General view, looking west. The central zone is clearly a structural dome. On its left, the slumped zone is limited by the curved cliff (dark colour) at the foot of Eniména plateau (light colour). The sandy external depression is larger out of the photo to the right. Oblique photograph from Armée de l'Air, Opération "Epervier". L=14 km at the middle of the photo.

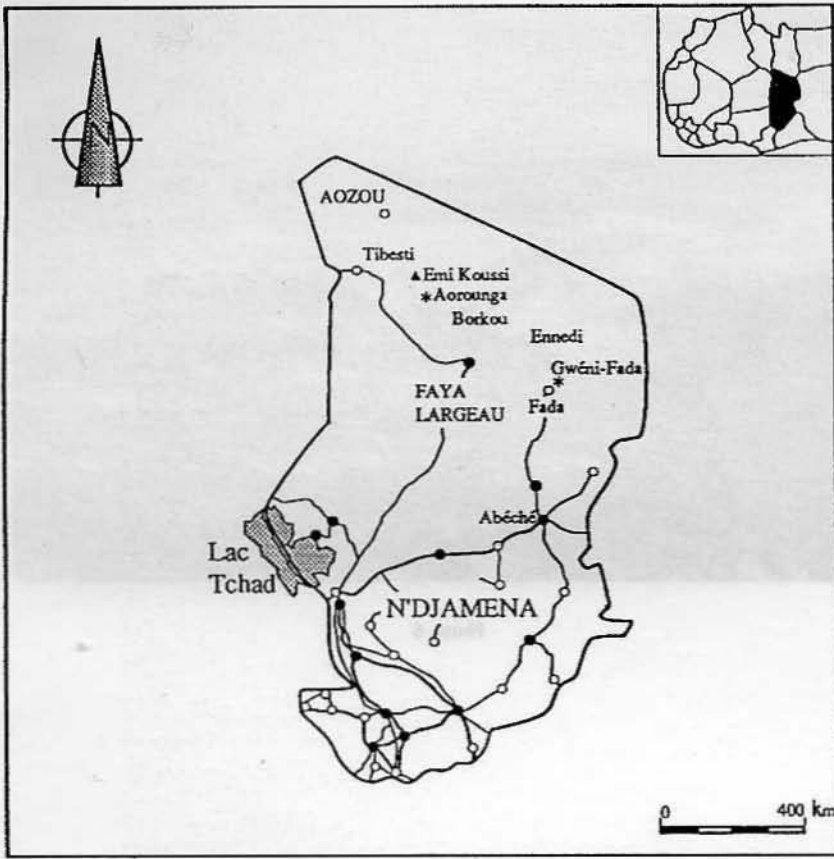


Fig. 1

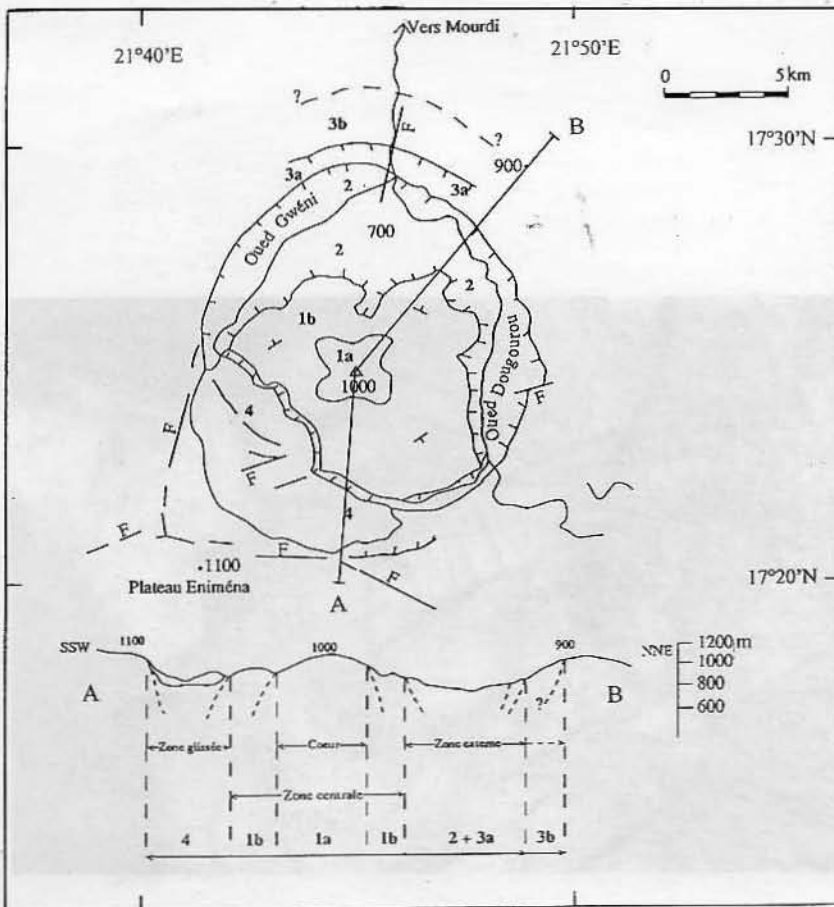


Fig. 2

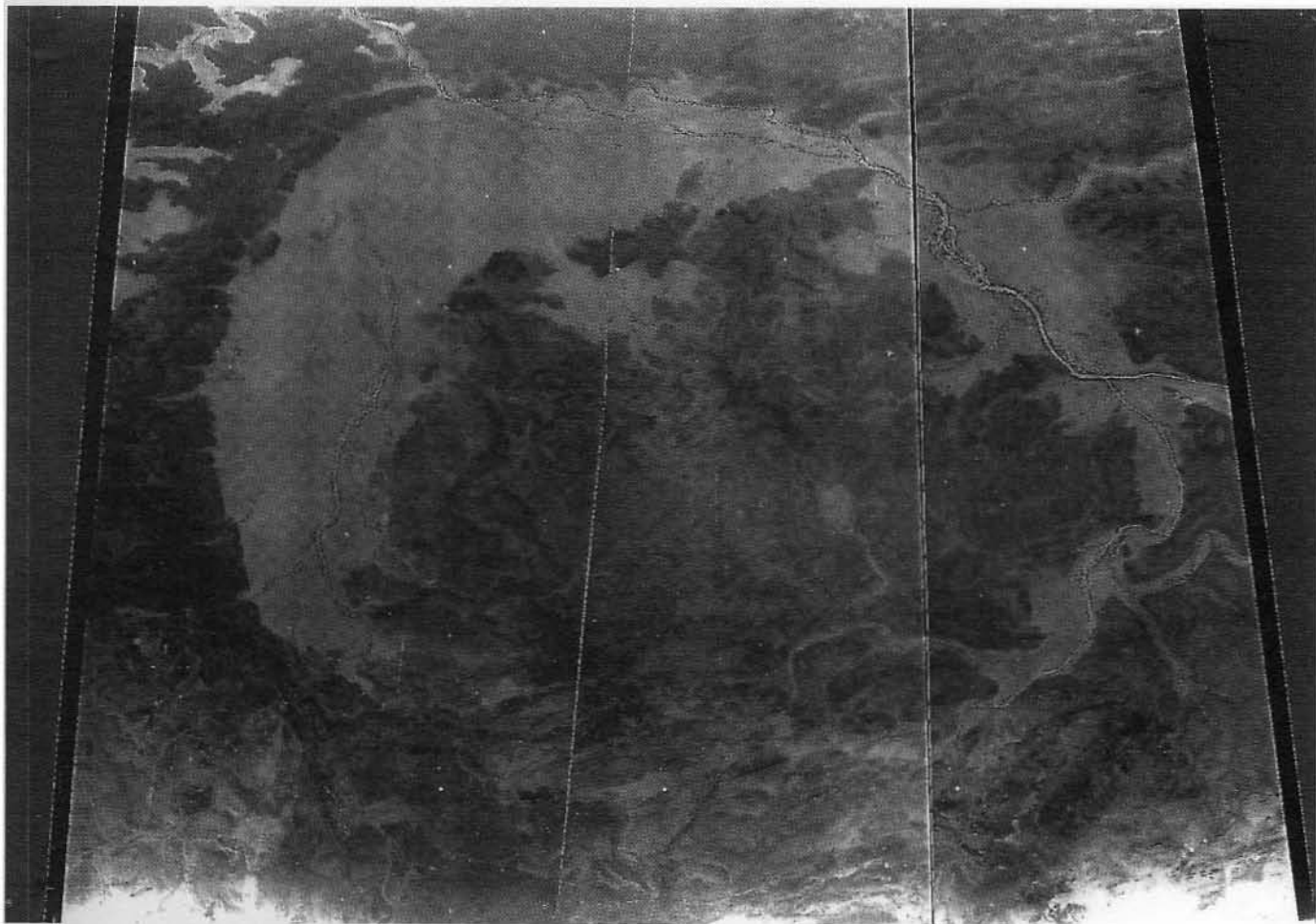


Photo. 1

Photo. 2





Photo. 3

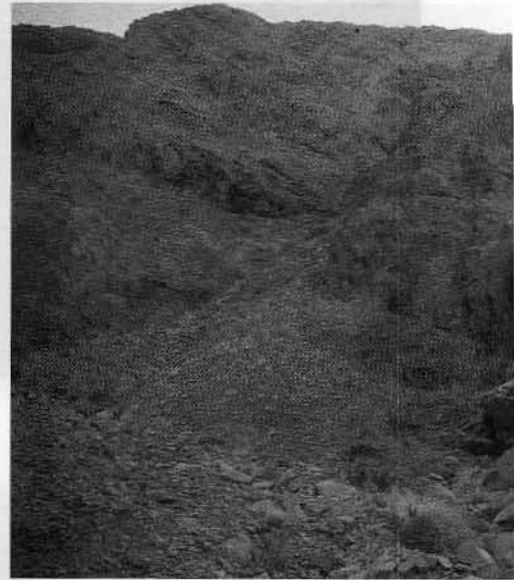


Photo. 5

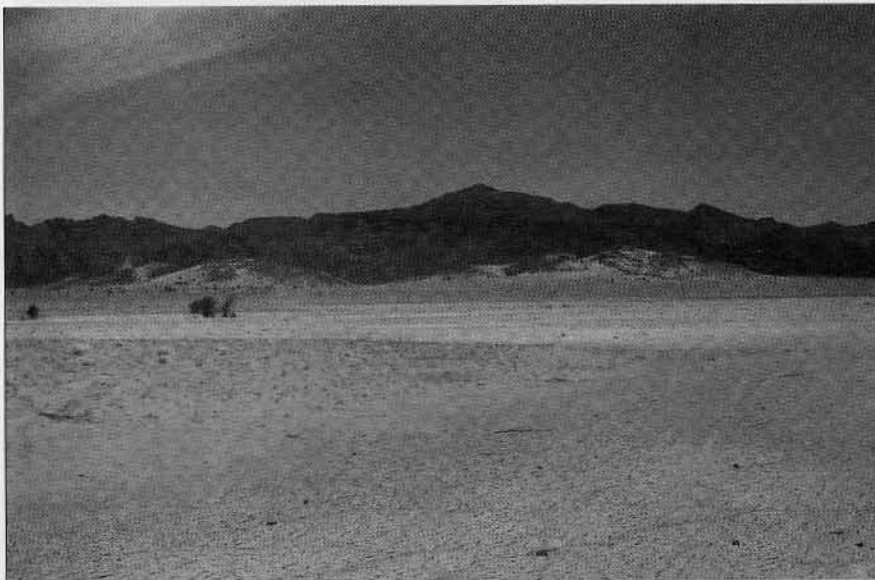


Photo. 4



Photo. 5



Photo. 6

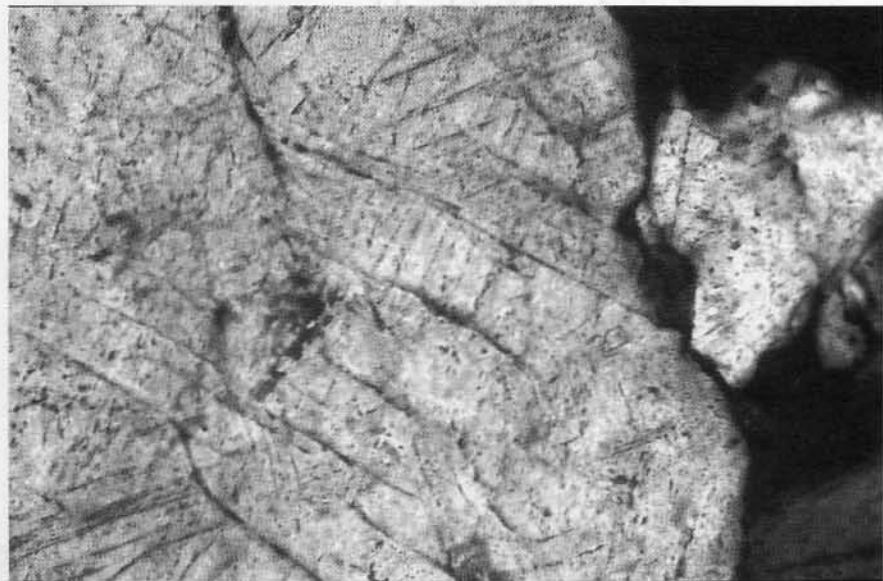


Photo. 7

Photo. 3 Rempart nord de la dépression externe. Au pied de la falaise, rampe formée de bancs de grès à pendage interne.

North rim of the external depression. At the foot of the cliff, a ramp is composed of sandstones beds with internal dips.

Photo. 4 Le complexe central vu de la dépression externe vers le Sud. Les flancs, à pendages externes, entourent un cœur (pic central avec le sommet), où affleurent les grès les plus anciens.

Looking south, the central complex as seen from the external depression. The oldest sandstones of the core (central peak with the summit) are surrounded by the outward dipping beds of the structural dome.

Photo. 5 Cœur du complexe central. Les pendages sont sub-verticaux.

Le complexe central (**photo. 4**) a un diamètre qui atteint 10 km. Il tranche vigoureusement sur la zone externe par son relief tourmenté, cahotique, sans ordre apparent ; son contour est très irrégulier, avec des caps rocheux, et des baies ensablées ouvertes sur la dépression (**photo. 2**). Il culmine au-dessus de 1 000 m d'altitude, soit 200 m au-dessus de l'altitude *moyenne* de la couronne externe (seul le plateau d'Eniména, sur le flanc sud, est plus élevé).

L'étude de terrain montre qu'il est constitué de nombreux blocs juxtaposés, s'ordonnant en deux ensembles grossièrement concentriques : un cœur, avec tous les sommets, et une couronne interne (respectivement 1 a et 1 b sur la figure 2). On n'y trouve que des formations gréseuses, dont la stratification reste reconnaissable.

Le cœur de la structure est la partie la plus déformée : tous les bancs y ont des pendages compris entre 40° et la verticale (**photo. 5**). Ce sont des grès plus ou moins grossiers, parfois à dragées de quartz. Des *Harlamias* y ont été trouvés en trois gisements. Ces fossiles sont connus en Ennedi sous les grès à *Spirophytons*, depuis les formations attribuées au Dévonien inférieur et jusqu'à l'Ordovicien. Ce sont donc là les terrains les plus anciens reconnus dans cette structure.

La couronne interne est formée d'un ensemble de grands blocs entourant le

Core of the central complex, showing sub-vertical dips.

Photo. 6 Couronne interne ; les pendages sont vers la dépression externe. A l'horizon, falaise du rempart externe.

Internal ring, with dips toward the external depression. The outer cliff of the external depression is at the horizon.

Photo. 7 Lame mince de quartz choqué dans les « grès à dragées » du complexe central. Quatre systèmes à éléments planaires se recourent (L P, L=1,5 mm).

Thin section of shocked quartz, in the "dragées sandstone" of the central complex. Four intersecting sets of planar deformation features (Crossed polars, 1.5 mm wide).

cœur ; les pendages sont variables, mais inférieurs à 45°, et dirigés habituellement vers l'extérieur de la structure (**photo. 6**). Deux sites fossilifères attestent qu'il s'agit des grès à *Spirophytons*.

Le cœur de la structure n'est pas au centre, mais décalé vers le Sud. La couronne interne est très irrégulière, avec une extension maximum en direction E-W.

Malgré son aspect chaotique de prime abord, et son irrégularité, cet ensemble représente un **dôme structural**, avec les formations les plus anciennes au centre. Son découpage en blocs faillés résulte d'un important soulèvement. La couronne interne joue ici le rôle du « peak ring » d'autres structures – comme Aorounga par exemple –, mais avec cette différence qu'elle n'est pas séparée du piton central par une dépression.

Le cratère initial est resté contenu dans les grès paléozoïques, le socle précambrien n'affleurant pas dans le cœur de la structure. L'épaisseur des grès dans cette région n'est pas connue. L'importance stratigraphique du soulèvement de la zone centrale (Hsu) ne peut être estimée avec les données de terrain disponibles. D'après la formule de Grieve, 1981, (*in* Melosh, 1989), $Hsu=0,06D^{1,1}$, D étant le diamètre du cratère final. Pour un cratère de 14 km, le **soulèvement serait de plus de 1 km**.

LE MÉTAMORPHISME DE CHOC

Brèches

Des brèches indurées ressortent dans le relief à la manière de filons ou de dykes. Toutes celles qui ont été observées directement sont monolithologiques. Le passage progressif à l'encaissant, de même nature pétrographique, montre qu'il s'agit de *brèches de friction*. Il est remarquable qu'en dehors de ces zones broyées, les matériaux ont peu subi de transformations visibles *macroscopiquement*, au point que même des fossiles peuvent être conservés.

Il n'a pas été trouvé d'impactites au cours des itinéraires de reconnaissance. Il est possible qu'il n'en existe plus du fait de l'érosion, sauf sans doute dans la dépression externe sous le remplissage sédimentaire. Sur le plateau de Enimena, à 2 km au-delà du rempart sud, quelques petites *mesas* visibles sur les photographies aériennes restent le meilleur espoir d'en trouver à l'affleurement.

Métamorphisme de choc

Il affecte la zone centrale, et particulièrement son cœur. Les grès y ont fréquemment pris un aspect quartzitique par compaction. Dans les quartzites des grès à *Harlanias*, on peut compter jusqu'à 3 ou 4 sets d'éléments planaires qui se recourent (**photo. 7**). Dans un même échantillon, tous les quartz sont choqués avec la même intensité de métamorphisme ; les dragées de quartz, de 1 à 2 cm de diamètre, n'échappent pas à cette règle, bien que leur forme arrondie soit parfaitement préservée. Le verre semble rare, limité souvent à un film entourant les grains de quartz, mais l'étude microscopique n'est pas achevée actuellement.

DISCUSSION

La présence d'un métamorphisme de choc confirme que la structure de Gwenni-Fada, comme cela avait été pressenti au vu de son aspect morphologique, est un cratère résultant de l'impact d'un astéroïde hypervé-

loce. Il se classe dans la catégorie des « *cratères complexes* » (Dence, 1968), c'est-à-dire ceux dont le cratère d'excavation initial a été modifié structurellement par la résurgence du plancher, et élargi par le glissement centripète des flancs.

Il est entièrement contenu dans des grès, et cette nature des roches-cibles doit expliquer certaines de ses particularités.

L'impact ne s'est pas produit sur une surface horizontale. Les grès paléozoïques de l'Ennedi, qui forment la bordure sud du bassin de Koufra, ont un léger pendage vers le Nord. Plus important que ce pendage général était la présence d'un plateau, au Sud du futur emplacement de l'impact : ce relief semble responsable des glissements de terrain tardifs qui ont donné les terrasses comblant la partie sud de la dépression externe. Une explication comparable a été proposée ailleurs, par exemple pour le cratère King, sur la face cachée de la Lune (*cf.* fig. 2.10, in Melosh, 1989). Si cette interprétation se confirmait, la forte dissymétrie morphologique de la structure correspondrait en partie à une dissymétrie structurale initiale, indiscutable, mais accentuée ultérieurement par la déstabilisation du rempart sud.

L'âge de Gwenni-Fada n'est pas connu actuellement. L'érosion des impactites éjectées à l'extérieur des remparts montre qu'elle est relativement ancienne. A l'intérieur, l'absence de matériaux fondus à l'affleurement semble aller dans le même sens, mais deux remarques doivent être faites. D'une part, dans les cratères jeunes présentant une zone centrale élevée, on observe que les ejecta ont tendance à s'écouler vers l'extérieur de la partie soulevée : elles pourraient ici s'être rassemblées dans la dépression périphérique, maintenant comblée par des sédiments. D'autre part, quand les roches-cibles contiennent de l'eau, la proportion de matériaux éjectés hors des remparts, sous forme de mélanges fluidifiés, est nettement plus importante (Kieffer et Simonds, 1980) : c'est l'explication proposée pour les larges « ramparts-craters » de Mars (Melosh, 1989). Or, les grès paléozoïques de l'Ennedi sont des formations qui, même sous le climat désertique actuel, contiennent

d'importantes nappes aquifères (Schneider, 1989). Compte tenu de ces remarques, et de la bonne conservation de ses formes, cet astéroïde pourrait être sensiblement plus jeune que les formations dévoniennes qui le contiennent.

Beaucoup de cratères martiens peu érodés ont une zone centrale anormalement large, comparée à celle des cratères de la Lune ou de Mercure, suggérant, d'après Melosh (1989), la présence d'un « agent fluidifiant » propre à Mars : il est possible qu'à Gwenni-Fada aussi, l'importance de la zone centrale soit liée non seulement à l'érosion, mais aussi à la présence de nappes aquifères dans les grès impactés.

Les dimensions des cratères météoritiques sont liées à différents facteurs, le principal étant l'énergie de l'impacteur. Celle-ci peut être calculée, en utilisant la formule de Shoemaker *et al.* (1990), à $1,42 \cdot 10^{20}$ J pour un cratère de 14 km de diamètre, soit l'équivalent de $3,4 \cdot 10^7$ kt de TNT. C'est l'énergie qu'aurait un astéroïde « moyen » d'environ 900 m de diamètre, percutant perpendiculairement le sol à la vitesse de 17,9 km/s (vi-

tesse d'impact moyenne calculée pour les astéroïdes observés dans le voisinage de la Terre, avec une densité de $2,4 \text{ g/cm}^3$, estimée par comparaison avec les météorites présumées comparables, compte tenu du foisonnement dû à leur fragmentation, d'après les données de Shoemaker *et al.*, 1990).

Par ses dimensions, ce nouveau cratère d'impact est le 4^e du continent africain : aux deux structures du Vredefort en Afrique du Sud ($D > 180$ km) et de Highbury au Zimbabwe (D entre 15 et 25 km) connues en 1994 (*in* Koeberl, 1994), est venue s'ajouter la structure géante du Morokweng, également en Afrique du Sud, qui pourrait atteindre 340 km d'après la géophysique (Corner *et al.*, 1996). Les trois premières étant précambriennes, Gwenni-Fada est la plus grande structure d'impact météoritique connue actuellement en Afrique dans le Phanérozoïque. Elle est suivie de peu par l'autre structure d'impact du Tchad, celle d'Aorounga, avec un diamètre de 13 km. Il faut noter qu'il s'agit là aussi d'un chiffre provisoire, susceptible d'être revu à la hausse après des études de terrain plus détaillées.

Remerciements : Ces recherches ont été rendues possibles grâce à l'aide obtenue au Tchad, particulièrement des ministères tchadiens de l'Éducation Nationale (CNAR) et des Mines et de l'Énergie (DRGM) ; de la Mission Française de Coopération et d'Action Culturelle, du Programme des Nations-Unies pour le Développement (PNUD), de l'Armée de l'Air française (Opération « Epervier »). L'organisation de la mission doit beaucoup à Najia Beauvilain. Les remarques constructives de Christian Koeberl ont permis d'améliorer une première version de cette Note.

BECQ-GIRAUDON, J.-F., ROUZEAU, O., GOACHET, E. et SOLAGES, S., 1992. Impact hypervélocité d'une météorite géante à l'origine de la dépression circulaire d'Aorounga au Tchad, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 315, série II, p. 83-88.

CORNER, B., REIMOLD, W.U., BRANDT, D. et KOEBERL, C., 1996. Evidence for a major impact structure in the Northwest Province of South Africa. The Morokweng impact structure, *Lunar Planet. Sci.*, XXVII, p. 257-258.

DENCE, D.M., 1968. Shock zoning at Canadian craters, In : *Shock Metamorphism of Natural Materials*, French B.M. et Short N.F., éd., Mono Book Corp., Baltimore, p. 169-184.

FRENCH, B.M. et SHORT, N.M., éd., 1968. *Shock Metamorphism of Natural Materials*, Mono Book Corp., Baltimore, 644 p.

GRIEVE, R.A.F., ROBERTSON, P.B. et DENCE, M.R., 1981. Constraints on the formation of ring impact structures, based on terrestrial data, In : *Multiring Basins. Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.*, 12A, p. 37-57.

KIEFFER S.W. et SIMONDS C.H., 1980. The role of volatiles and lithology in the impact cratering process, *Reviews of*

Geophysics and Space Physics, 18, 1, p. 143-181.

KOEBERL, C., 1994. African meteorite impact craters: characteristics and geological importance, *Journ. African Earth Sci.*, 18, n° 4, p. 263-295.

MELOSH, H.J. 1989. *Impact cratering. A geologic process*, Oxford University Press.

SCHNEIDER, J. L., 1989. Géologie et hydrogéologie de la République du Tchad, *Thèse*, Univ. Avignon.

SHOEMAKER, E.M., WOLFE, R.F. et SHOEMAKER, C.S., 1990. Asteroid and comet flux in the neighbourhood of Earth, *Geol. Soc of America, Special Paper*, 247, p. 155-170.

VINCENT, P.M., BEAUVILAIN, A., BOUDEULLE, M. et MOUTAYE, A. H., 1994. The asteroïde of Aorounga (Sahara of Chad): preliminary structural data, *Third Intern. ESF workshop, Impact cratering and evolution of planet Earth*, Limoges-Rochecouart, abstract.

WACRENIER, P., HUDELEY, H. et VINCENT, P.M., 1958. *Carte géologique du Borkou-Ennedi-Tibesti à 1/1 000 000*, Direction des Mines et de la Géologie, Brazzaville, AEF.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES