

P

HÉNOMÈNES KARSTIQUES DANS LES ROCHES SILICEUSES AU NIGER ORIENTAL

Barbara SPONHOLZ Geographisches Institut der Universität Würzburg
Am Hubland, D-97074 WÜRZBURG (Allemagne)

RESUME : Dans le Niger oriental, des phénomènes karstiques sont fréquents dans les roches siliceuses : grès, silcrètes, croûtes ferrugineuses, roches cristallines. A partir des études géomorphologiques et micromorphologiques, on peut conclure à une karstification, au sens de production de formes par dissolution. Les résultats permettent de dater du Tertiaire inférieur la principale période de karstification. La répartition régionale des formes induites par cette karstification indique une dépendance probable

des conditions paléoclimatiques. Actuellement le karst influe encore sur le développement des autres formes de relief.

Mots-clés : karst siliceux, géomorphologie, paléoclimat, Sahara, Sahel, Niger.

ABSTRACT : KARSTIC FEATURES IN SILICEOUS ROCKS IN EASTERN NIGER.

In North-Eastern Niger karstic features occur commonly in siliceous rocks (sandstones, silcretes, ironcrusts, crystalline). On the base of geomorphological field

studies and micromorphological analyses karst forming caused by rock solution is verified. The results render possible the datation of the main karstification period in Early Tertiary. The widespread distribution of similar results indicates the dependence of karstification on palaeoclimatic conditions ; actually the karstic systems influence significantly the development of other landforms.

Key-words : silicate karst, geomorphology, palaeoclimatology, Sahara, Sahel, Niger.

INTRODUCTION

Depuis 1986, nous avons étudié des formes karstiques dans le nord-est du Niger, qui est actuellement une région de transition entre le Sahara méridional hyperaride et le Sahel septentrional semi-aride. Les phénomènes karstiques y sont développés exclusivement dans des roches siliceuses.

La question essentielle de l'étude est la suivante : s'agit-il d'une «karstification» au sens propre, c'est-à-dire de la dissolution de la roche dans des matériaux purement siliceux ? (définitions du terme «karst» par exemple d'après JENNINGS, 1985). SILVESTRU (1990) propose le terme «parakarst» pour les phénomènes discutés dans cet article, en les considérant également comme des formes de dissolution. En outre on essaie d'intégrer la karstification à l'ensemble du développement du paysage par une interprétation géomorphologique et paléoclimatologique dans la perspective d'un changement du milieu environnemental.

Face aux conditions climatiques actuelles et aux problèmes hydrologiques, il est nécessaire de préciser les modalités de la karstification dans les matériaux siliceux et l'origine de la nappe. Une tentative d'explication est fournie par une approche géomorphologique et micromorphologique.

1. PRÉSENTATION PHYSIQUE

La région d'étude comprend la partie orientale de la République du Niger entre 8° E (Agadez) et 15° E (Massif de Tchigai) et entre 13°14' N et 21° N. Sa surface est de 610 000 km² environ (fig. 1). La situation climatique actuelle est caractérisée par des pluies épisodiques au nord, qui ne dépassent pas 20 mm/an (station de Bilma : 19,8 mm/an ; A.A., 1985) et par des précipitations de 500 mm/an environ au sud (station de Zinder : 487,5 mm/an), concentrées durant la saison de pluie entre les mois de juin et septembre. Toute la région est soumise au régime des vents alizés du nord-est remplacés en été par la mousson de sud-ouest. Les températures dépassent 40° C avec une amplitude journalière et annuelle augmentant vers le nord : au nord de la région étudiée, le régime climatique est désertique, au sud il est de type sahélien.

Il n'y a pas d'eaux superficielles pérennes sauf quelques lacs artésiens au Kawar et quelques *gueltas* (mares permanentes au fond des gorges) dans le massif de l'Aïr. Surtout dans la partie orientale de la région étudiée, au Kawar et au Djado, la situation hydrogéologique est très compliquée et influencée par des compartiments à tectonique active, avec des superpositions et des mélanges de nappes d'eaux douces et salifères dont l'origine est parfois inconnue (BAUMHAUER et HAGEDORN, 1989 ; JOSEPH et ARANYOSSY, 1992).

Bien que les conditions hydrologiques soient très complexes, les études karstologiques n'ont pas fourni de preuves en faveur d'un hydrothermalisme actif pendant la karstification, sauf dans l'Adrar Bous, un massif isolé de la bordure orientale de l'Aïr.

Du point de vue géologique et géomorphologique, la région peut être divisée en deux parties essentielles : les bordures élevées qui forment des montagnes (Aïr, Tibesti, Damagaram) et les bassins géologiques au centre. Le socle cristallin affleure souvent sur les bordures ; il est partiellement couronné par des sédiments primaires ou par des produits volcaniques tertiaires et quaternaires. Les bassins centraux font partie du grand bassin tchadien. Ils sont remplis de sédiments d'âge primaire à quaternaire (FAURE, 1966 ; GREIGERT et POUAGNET, 1967).

Le bassin central de Bilma est compartimenté par des systèmes de failles avec jeu de blocs (LOUIS, 1973). Ces blocs tectoniques forment les falaises et les massifs isolés dans le Grand Erg de Ténéré — par exemple les falaises d'Achegour, de Fachi ou de Bilma — ainsi que le Massif de Termit. Les dépressions au pied des falaises sont influencées par les structures tectoniques et par les conditions paléoenvironnementales (JOSEPH et ARANYOSSY, 1992 ; BAUMHAUER, 1993). Les phénomènes karstiques sont développés dans les roches cristallines entourant le bassin et dans les grès formant les falaises isolées au centre.

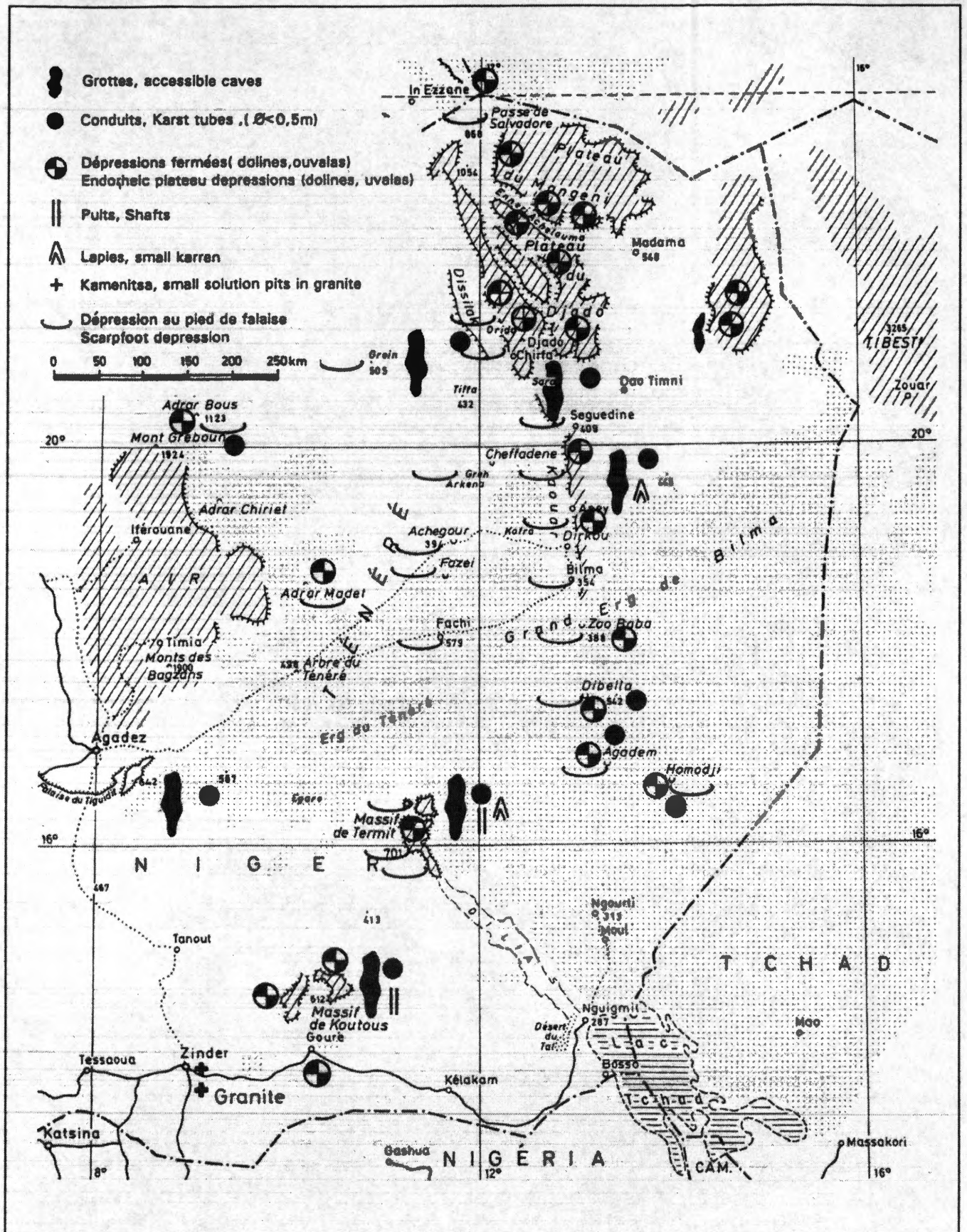


Figure 1: Localisation de la région étudiée et des phénomènes karstiques (source : carte de la République du Niger à 1 / 2 500 000, IGN Paris et carte Michelin 153 à 1 / 4 000 000).
 Localization of the study area and of karst phenomena.

II. KARSTOLOGIE DU NIGER ORIENTAL

Un levé géomorphologique montre une fréquence importante des phénomènes karstiques dans toutes les régions gréseuses. Dans certaines régions du Djado, de la falaise de Bilma et du massif de Termit, le volume karstique est de 3 %. On trouve toutes les formes de dissolution connues dans le karst des roches calcaires (cf. Les reliefs de «pseudokarst» dans les grès, d'après MAINGUET, 1972).

Les réseaux karstiques comprennent des puits et des dolines sur les hauts plateaux ainsi que des conduits horizontaux interconnectés et recoupés par les falaises récentes (BUSCHE, 1982 ; BUSCHE et ERBE, 1987 ; BUSCHE et SPONHOLZ, 1988 ; SPONHOLZ, 1989). Les phénomènes karstiques au Niger n'atteignent pas la dimension de ceux décrits par URBANI et COURBON (1978), par POUYLLAU (1985), POUYLLAU et SEURIN (1985) et par GALAN et LAGARDE (1988) en Amérique du Sud (grès quartzitique de Roraima au Venezuela), mais ils ont les mêmes caractéristiques.

- **Les dépressions fermées** : celles-ci mesurent de 5 m jusqu'à quelques centaines de mètres de diamètre (fig. 2, photo 1). Selon leur géométrie et leur extension, les dépressions du massif de Termit (qui sont les plus importantes) peuvent être assimilées à des «ouvalas». Les dépressions sont remplies de matériaux fins, pour la plupart allochtones (VÖLKEL, 1989 ; SPONHOLZ, 1992, 1994), dans lesquelles s'est installé un drainage centripète. Ce drainage, le seul type d'écoulement superficiel dans tout le massif, s'oriente suivant les fissures qui fonctionnent comme des entonnoirs allongés (*Schluckrinnen* d'après BUSCHE et SPONHOLZ, 1988).

Sur les plateaux du Continental terminal dans le sud du massif de Termit et dans le massif d'Agadem, on trouve des conduits verticaux en grande densité. Ce sont des tubes interconnectés de 5 à 20 cm de diamètre de type *root lapies* (TWIDALE, 1987), leur densité atteignant 46 sur 4 m². Leur existence semble liée aux dépressions peu profondes dans les croûtes ferrugineuses sédimentaires du Continental terminal. Entre les tubes persistent seulement des minces cloisons. Ils sont remplis d'une variété de remplissages d'âges différents.

- **Les cavités** : au Djado, on trouve des grandes grottes et des conduits allongés qui forment des réseaux souterrains (fig. 3 et 4, photos 2 et 3) dans les inselbergs au pied de la falaise (RENAULT, 1953). De grandes salles d'une vingtaine de mètres de hauteur et de 40 m de longueur sont observables. Dans le détail, elles montrent

des formes du karst phréatique : des anastomoses de voûte, des poches de dissolution latérales, des colonnes relictives de dissolution et des conduites forcées verticales. Souvent les tunnels du karst phréatique sont inclinés vers l'intérieur de l'inselberg, à l'opposé des exutoires actuels. Il existe aussi des formes du karst vadose (petites ravines creusées au fond des cavités, etc.). Ces dernières sont le résultat d'une évolution plus récente, adaptée au relief actuel, postérieure à la baisse de la nappe karstique au cours de l'incision des falaises.

- **Les encroûtements siliceux** : parmi les produits caractéristiques des vides de dissolution étudiés dans les grès, on observe un encroûtement superficiel de silice amorphe de moins d'un millimètre d'épaisseur. La silice a pu précipiter à partir des eaux riches en silice dissoute, circulant lentement dans les vides. Son dépôt renseigne sur la première phase de modelé après la fin de la phase de dissolution, l'inondation des vides étant toujours effective. On manque d'arguments qui attesteraient une précipitation plus tardive,

après l'assèchement du système. On ne trouve nulle part des inclusions orientées selon des courants superficiels. Ainsi, les parties encroûtées des cavités témoignent des formes originales de dissolution du fait de leur bon état de conservation.

- **Les remplissages karstiques** : les dépressions fermées sur les plateaux, ainsi que les conduits verticaux de diamètre réduit, sont remplis de matériaux divers. Le remplissage le plus ancien est présent dans les tubes verticaux. A proximité il existe des conduits remplis d'une brèche bien cimentée et de matériaux fins, non consolidés, mais stratifiés. Le faciès de la brèche est celle du Continental terminal (Continental terminal remanié). De ce fait, et parce que cette brèche se situe dans deux puits isolés sur le plateau du Massif de Koutous (grès karstifiés du Continental hamadien), loin de l'affleurement actuel du Continental terminal, son dépôt date probablement du Tertiaire inférieur à moyen, qui est à peu près contemporain de la sédimentation du Continental terminal. Au contraire, les remplissages fins, non consolidés, qu'on trouve dans les puits et dans les dolines



Photo 1 : Le haut plateau du massif de Termit à l'est de Dougoulé, vu vers l'est (photo prise en mars 1986). Le niveau principal est dominé de quelques buttes (restes d'un niveau plus ancien). Les deux niveaux sont développés dans les croûtes ferrugineuses du Continental terminal. Les dépressions d'extension diverse (personnage donnant l'échelle) sont remplies de matériaux fins de provenance surtout allochtone. Dans les remplissages on voit les axes du drainage souterrain, liés à la fissuration.
The plateau of the Massif of Termit, east of Dougoulé, view to the East (photo taken in march 1986). Above the main surface there are rising some remains of an older surface. Both surfaces are developed in ironcrusts of the Continental terminal. The depressions of different extension (person for scale) are filled with fine materials of allochthonous origin. In the fillings traces of subterranean drainage are visible in accordance with the fracturation.

sont des dépôts beaucoup plus récents que la karstification : ils couvrent des reliefs éolisés aux bordures des dépressions karstiques (HAGEDORN, 1988). De ce fait ils marquent un hiatus entre la karstification, le démantèlement des plateaux et l'apport des dépôts. Leurs faciès varient entre des dépôts remaniés des alentours et des apports éoliens de type lœssique, partiellement transformés en paléosols (tableau 1 ; FELIX-HENNINGSEN, 1992 ; SPONHOLZ, 1989, 1992, 1994).

Sur la falaise de Bilma (Emi Bao), on observe des entonnoirs de suffosion dans les remplissages fins non consolidés des dépressions moins étendues, qui fonctionnent également comme des voies de drainage souterrain. Leur nombre ainsi que leur diamètre augmentent vers le fond des dépressions (SPONHOLZ, 1992).

Dans les grottes, on ne trouve pas de remplissages endokarstiques à l'exception des encroûtements siliceux recouvrant les stalactites ferrugineuses (SPONHOLZ, 1994), et des excréments de chauves-souris. Ces derniers proviennent de dépôts d'urine et forment des spéléothèmes (10 cm de longueur maximum) ainsi que du guano

(quelques cm d'épaisseur) (BUSCHE et ERBE, 1987 ; SPONHOLZ, 1989). RENAULT (1953) mentionne des stalactites siliceuses, mais rien ne prouve qu'il s'agisse des mêmes spécimens, l'auteur n'ayant pu observer des spéléothèmes siliceux.

III. MICROMORPHOLOGIE DE LA ROCHE ALTÉRÉE ET DES ENCROÛTEMENTS

Pour trouver des indications de dissolution de la roche également à l'échelle micromorphologique et pour préciser le rôle du karst dans l'ensemble du développement du paysage, des échantillons de parois karstifiées ont été analysés et observés au microscope.

A. Caractère micromorphologique de la roche altérée

- **Méthodes** : les échantillons ont été étudiés sur lames minces. Ces sections comprennent la transition entre les vides karstiques (partie extérieure des parois) et l'intérieur sain de la roche. Les intensités de

corrosion des grains de quartz ont été classées (microscope LEITZ DIAPLAN ; analyses sous lumière naturelle transmissive et polarisée d'après la méthode de BURGER et LANDMANN, 1988). Pour certains échantillons, des analyses chimiques ponctuelles par la microsonde électronique (CAMECA SX 50) ont été effectuées.

Les grains de quartz ont été isolés de l'échantillon par traitement aux acides chlorhydrique et oxalique (SPONHOLZ, 1989, d'après MÜLLER, 1967). A cause du ciment souvent siliceux et de la forte fragmentation des grains dans la partie extérieure, la provenance des grains de quartz quant à la situation dans l'échantillon n'est pas représentative. Les grains ont été étudiés par analyse au MEB (JEOL JSM-840) afin de mettre en évidence des traces d'une attaque chimique et/ou mécanique, liée à la karstification.

- **Résultats** : l'étude des lames minces de tous les échantillons montre une influence forte de la dissolution de la roche au niveau des vides karstiques. Même dans les échantillons fortement altérés, une telle

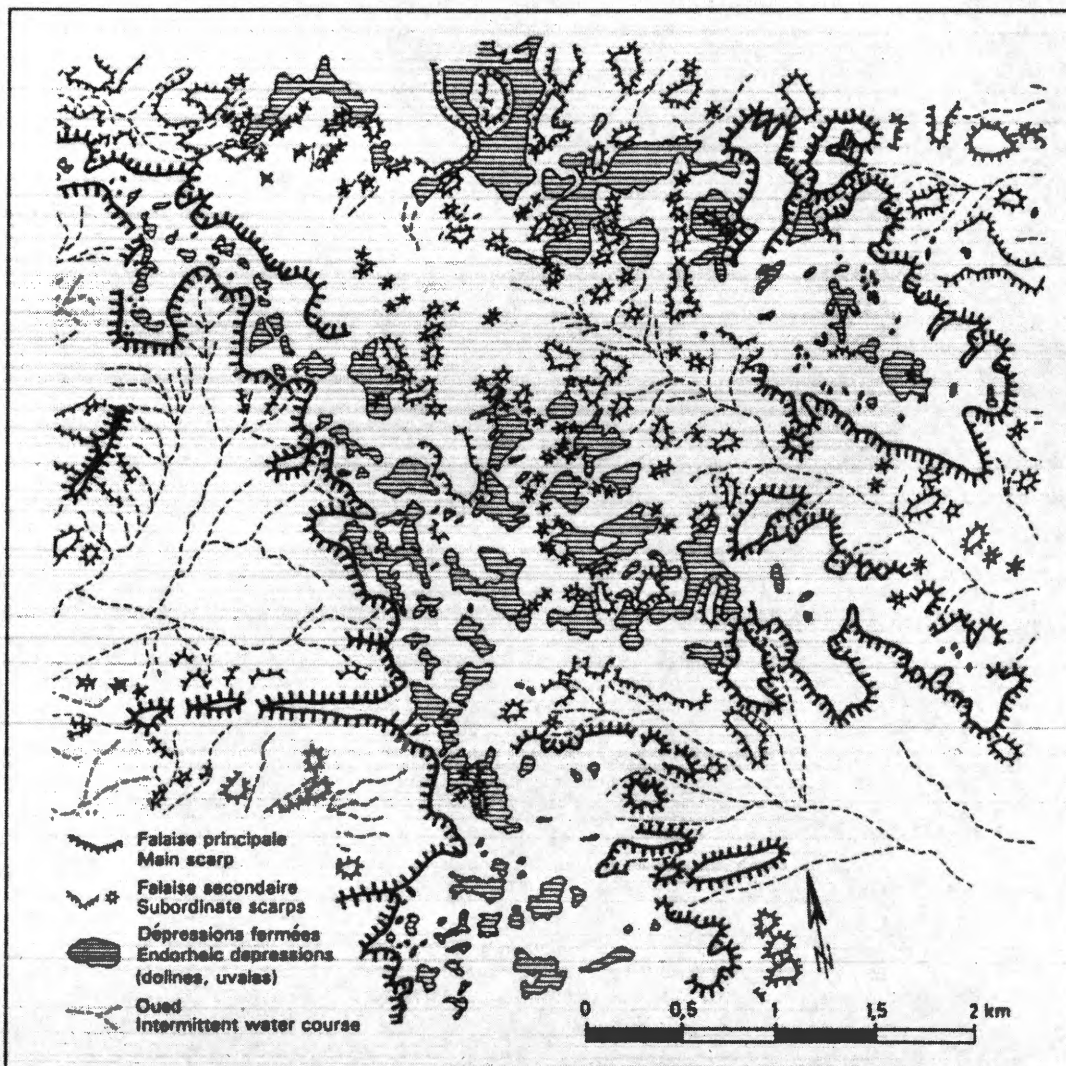


Figure 2 : Dépressions fermées («ouvalas») sur le haut plateau du massif de Termit. Les aires en hachures marquent les dépressions qui sont en général remplies des matériaux fins allochtones. Le drainage des dépressions est exclusivement souterrain (voir aussi photo 1) (d'après photos aériennes à 1/50 000 ; SPONHOLZ, 1989).

Endorheic depressions («uvalas») on the plateau surface of the Massif of Termit. The areas in hatching give the extension of the depressions who are generally filled with fine grained, allochthonous materials. The drainage of the depressions is only subterranean. (see also photo 1) (mapped from air photographs 1 / 50 000 ; SPONHOLZ, 1989).

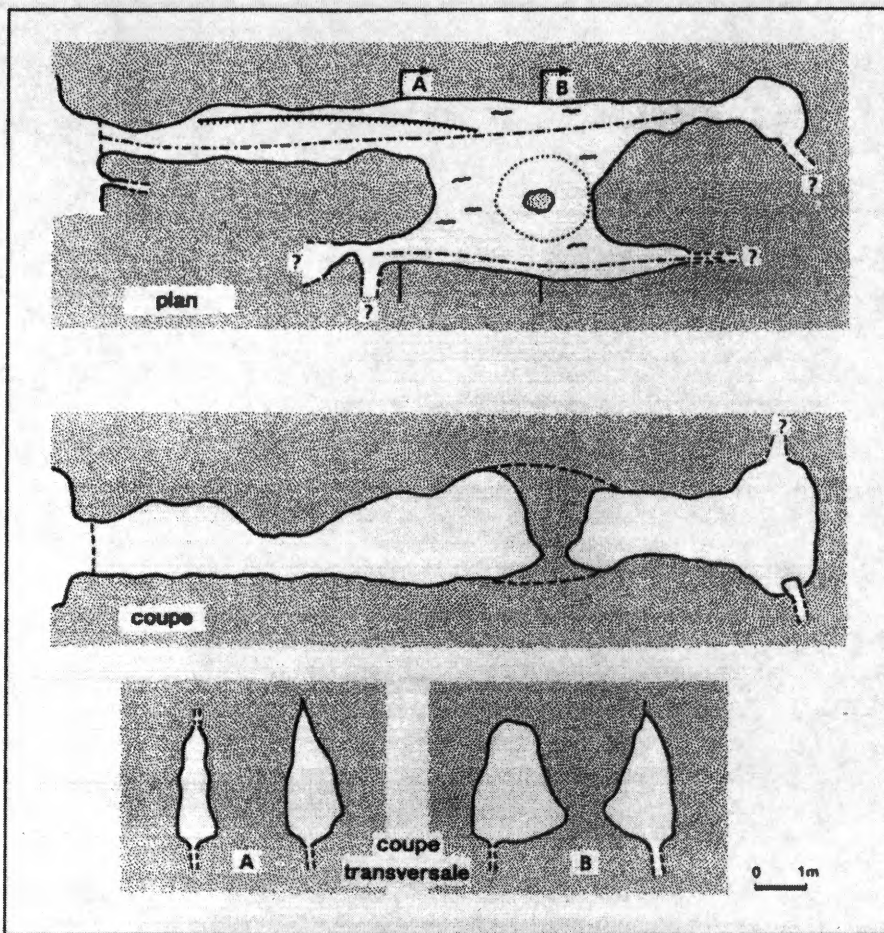


Figure 3 : Un exemple de grotte dans l'inselberg «Ehi Ouarek» au pied de la falaise de Djado. Au milieu de la salle on observe une colonne de dissolution (voir aussi photos 2 et 3).

Example of cave in the inselberg «Ehi Ouarek» in the foreland of the Cuesta of Djado. In the middle of the cave room there is a solution pillar (see also photos 2 and 3).

influence demeure bien visible. La dissolution se manifeste par une attaque extrême dans les parties les plus externes de la roche. Dans cette zone, les grains de quartz sont souvent corrodés jusqu'à l'intensité 4-5 d'après la classification de BURGER et LANDMANN (1988). Le pourcentage de tels grains est toujours plus élevé dans les parties extérieures que dans les parties internes de la roche. La transition entre les grains fortement corrodés et les grains sains se trouve régulièrement de 1 à 3 mm sous la surface de la roche (fig. 5, photo 4).

Les marques de dissolution sur les grains de quartz peuvent atteindre une fragmentation totale. Dans le cas contraire, on trouve des chenaux et des golfes de dissolution, d'extension diverse à la surface des grains. Le spectre de ces formes comprend aussi bien des dépressions peu profondes que des caries importantes, qui affectent presque tout le volume du grain.

Les études sur un échantillon provenant de l'Adrar Bous (bordure orientale du massif de l'Air) ont donné un résultat singulier. Il s'agit d'une roche cristalline

dans laquelle pratiquement tous les minéraux sont substitués par de la silice (microcristalline), préservant la structure originelle (SCHARFF, comm. pers.). Ce matériel siliceux a été karstifié. Cette situation pétrographique particulière s'explique peut-être par des conditions hydrothermales différentes de celles décrites dans cet article.

Tous les grains de quartz étudiés montrent une mobilisation importante de la silice. Pour une part, ce sont des formes de dissolution, pour une autre ce sont des précipitations de silice à la surface des grains. Comme traces de dissolution, on observe des crevasses, des caries, des trous irréguliers perçant les grains et d'autres caractéristiques des surfaces corrodées (KRINSLEY et DOORNKAMP, 1973 ; LE RIBAUT, 1975). Bien que la dissolution de la silice soit importante pour le modelé des grains, dans la plupart de cas étudiés, c'est la précipitation qui prédomine. Probablement cela est dû au fait que l'échantillonnage des grains n'est pas représentatif, en raison d'une préparation délicate en laboratoire et du mélange

analysé ; des grains fortement corrodés provenant des parties externes ne sont pas toujours récupérables et sont mêlés à des grains moins fragmentés des parties plus internes.

B. Caractère micromorphologique des encroûtements siliceux

La précipitation de silice sur les surfaces des grains de quartz peut se présenter comme une néocrystallisation de quartz bien nette ou sous forme d'une couche amorphe. Dans le premier cas, on voit bien les surfaces de cristaux de quartz sur le grain originel (photo 5). Des lacunes en forme de «V», en général interprétées comme des lacunes de dissolution, semblent être des surfaces néoformées incomplètes (TIETZ, 1987). Cette prédominance de néocrystallisation de quartz se produit au nord de la région étudiée. Elle indique une précipitation pendant une période très longue et/ou à partir de solutions peu concentrées (de silice ainsi que d'autres éléments) qui favorise la cristallisation. C'est pourquoi il est nécessaire de faire intervenir, pour cette région, une plus grande abondance des eaux qu'actuellement. Elle a été suivie par d'autres périodes de précipitation de silice amorphe qui forment le ciment du grès.

Face à ces formes de néocrystallisation dans des grès siliceux, prédominantes dans le nord de la région étudiée, les précipitations de silice amorphe dominent quant à elles plus au sud. Là, le karst s'est développé dans des grès fortement ferrugineux. La précipitation amorphe y est caractérisée surtout par des globules de silice résultant probablement de solutions plus concentrées en fer et en aluminium (photo 6). Jusqu'à maintenant, on ne peut pas encore préciser si cette différence du mode de précipitation siliceuse dépend des différences pétrographiques et minéralogiques qui apparaissent dans la composition chimique des eaux, ou d'une évolution géomorphologique différente de ces deux régions.

Sur tous les grains étudiés, la mobilisation chimique de la silice représente la dernière période du modelé de la surface. Même des détails très ciselés du modelé chimique ne sont plus retouchés. C'est la preuve que pendant les phases postérieures il n'y a plus d'attaque mécanique.

L'étude des grains de quartz au MEB montre en plus une certaine fréquence de micro-organismes inclus dans la couche de silice amorphe. On trouve plusieurs sortes de bactéries, de germes et de «matière organique» (non identifiée) : il s'agit de pseudomorphoses siliceuses. L'identification de phosphore, par microsonde électronique, présent dans le ciment de quelques échantillons (la composition chimique

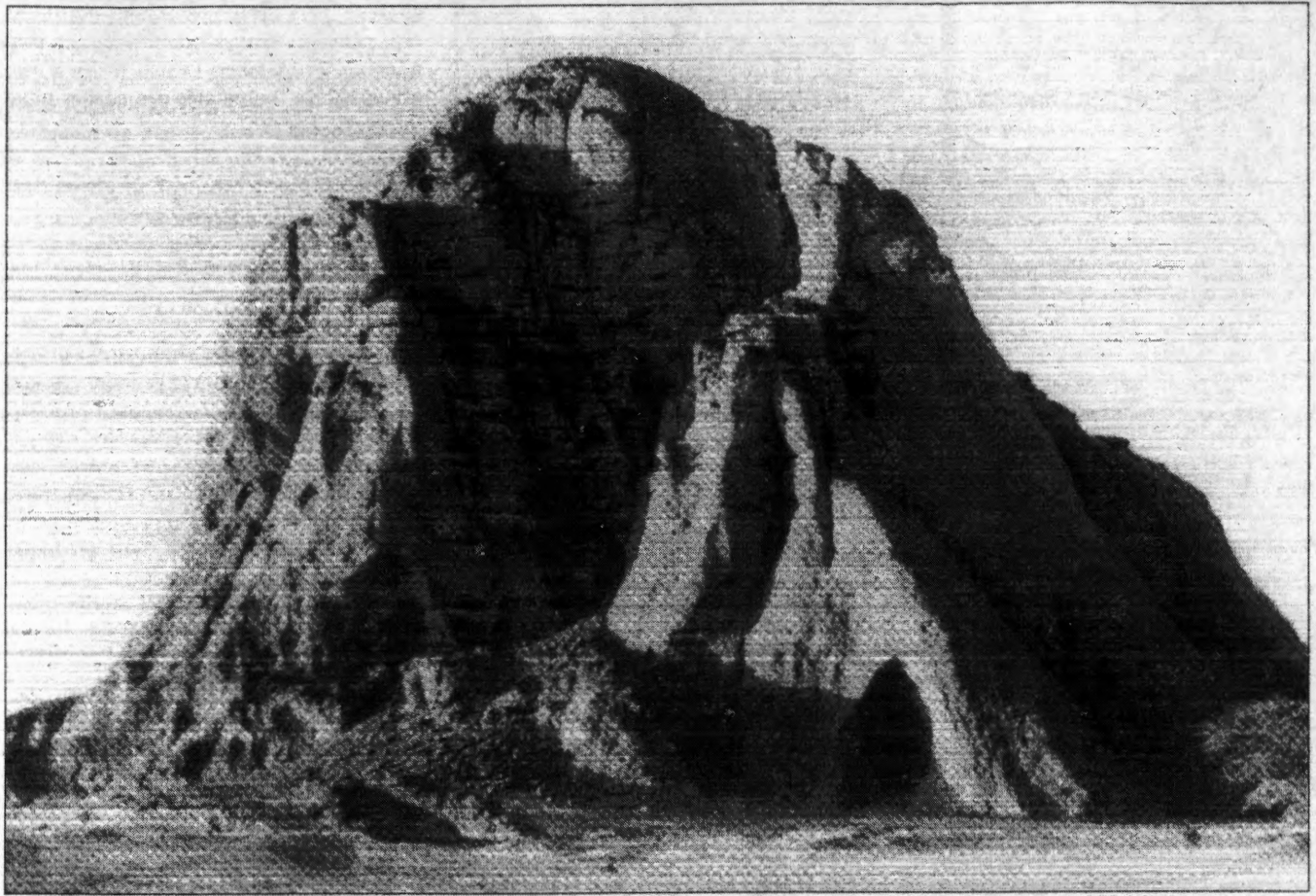


Photo 2 : L'inselberg «Ehi Ouarek», situé au pied de la falaise de Djado, est formé dans des grès cambriens. Il domine les environs de plus de 300 m. Dans les versants raides, l'ombre marque les sorties de cavités. Bien que ces sorties soient élargies par l'altération récente, le volume karstique dans cet inselberg est d'environ 3 %.

The inselberg «Ehi Ouarek» in the foreland depression of the Cuesta of Djado. The inselberg consists of cambrian sandstones and is higher than 300 m. The entrances of caves are marked by the shade on the inselberg walls. The entrances are widened by younger weathering, but nevertheless the karst volume of this inselberg is about 3 %.

exacte n'est pas identifiable du fait d'une petite quantité totale), indique un rôle important des micro-organismes dans la composition chimique de l'environnement.

V. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

Concernant les preuves d'une karstification au sens propre, les levés géomorphologiques ont donné les résultats suivants :

- 1) Il existe une convergence de formes de dissolution entre le karst siliceux étudié au Niger oriental et celui développé par ailleurs dans des roches calcaires, mais il y a absence de spéléothèmes siliceux.
- 2) Les caractéristiques de ce «karst» ne peuvent pas être expliquées par des processus d'érosion mécanique. On trouve des poches de dissolution, des colonnes de dissolution façonnées régulièrement, etc. Même une transformation postérieure de telles formes peut être exclue du fait de la présence des encroûtements.

3) Là où il y a transformation du karst par d'autres processus morphologiques, ceux-ci sont nettement séparés de la karstification précédente. Les morphologies initiales, en voie de transformation, sont progressivement détruites. Les croûtes sur les parois des vides sont corrodées par les processus d'altération et la déflation, plus efficace près des entrées.

4) La karstification la plus intense ne se situe pas dans les parties de roche désagrégée, mais au contraire dans les parties les plus solides, parfois même indurées par une silicification de 2 à 3 m d'épaisseur, les silcrètes (BUSCHE, 1983), ou dans les croûtes ferrugineuses du massif de Termit et du massif d'Agadem.

5) Le volume et les formes de détail des vides karstiques sont les mêmes dans les massifs et les falaises principales ainsi que dans les inselbergs des avant-pays. De plus, les systèmes karstiques étudiés sont recoupés par les versants actuels. C'est pourquoi la karstification semble s'être achevée pour l'essentiel avant l'élaboration

du modelé actuel. Sinon, les aires de drainage d'extension différente et l'inclinaison des versants auraient eu une influence remarquable sur la formation du relief karstique. Aussi le processus de «piping», avec nécessité du déchargement des matériaux clastiques sur une certaine distance (DREW, 1982), doit-il être considéré comme un des agents morphologiques discutables. Mais la création de réseaux souterrains étendus, la formation de microformes typiques et les caractéristiques micromorphologiques ne sont pas explicables par le piping (suffosion). Dans les régions avoisinantes, on observe également des formes de piping qui offrent une possibilité supplémentaire d'argumentation.

6) Les dépressions karstiques sont creusées beaucoup plus profondément dans la roche que les dépressions éoliennes de même diamètre et elles sont drainées par voie souterraine. De plus, les remplissages des cuvettes éoliennes sont moins épais et ne sont pas sujets à la suffosion - elles n'ont pas de drainage souterrain.

VI. LE RÔLE DU KARST SILICEUX DANS LA MORPHOGENÈSE DU NIGER ORIENTAL

En relation avec le cadre géologique et géomorphologique de l'Afrique de l'Ouest (FAURE, 1966 ; BUSCHE, 1982 ; GRUNERT, 1983 ; HAGEDORN, 1984 ; SKOWRONEK, 1987), la phase principale de karstification peut être datée du Tertiaire inférieur à moyen. C'est d'une part la période qui suit le dépôt des grès les plus récents fortement karstifiés (Continental intercalaire supérieur), et qui d'autre part précède le creusement des grandes vallées et des avant-pays des falaises à la transition Tertiaire/Quaternaire. A cause de l'âge des sédiments karstifiés, une mobilisation importante de la silice s'est produite jusqu'au Tertiaire moyen (karstification des silcrètes miocènes ; BUSCHE, 1983). Après seuls des sédiments fortement ferrugineux se sont déposés (croûtes ferrugineuses du Continental terminal), dans des conditions de dissolution différentes.

Néanmoins, des analyses hydrologiques (FAURE, 1963 ; BAUMHAUER, 1986) et pédologiques (VÖLKE, 1989) indiquent des processus de dissolution de silice continus pendant le Quaternaire récent (HUGOT et CARBONNEL, 1986). Mais les formes karstifiées discutées ici se trouvent au-dessus de la nappe actuelle et sont transformées par des processus d'altération et d'érosion mécanique. Ce sont des phénomènes fossiles dont les restes sont préservés. On peut discuter aussi de l'évolution post-karstique.

- L'influence la plus importante est marquée par le drainage souterrain concernant des régions étendues. Même sur les plateaux, de larges aires sont caractérisées par l'absence totale de système fluvial. Ce fait ne peut pas être le résultat du climat aride actuel, comme le témoignent les (paléo-)systèmes fluviaux bien développés dans d'autres régions du Sahara central.

- Le drainage souterrain entraîne un comportement atypique d'infiltration durant les rares pluies. Le drainage centripète dans les dépressions karstiques a pu alimenter la nappe souterraine pendant les périodes humides quaternaires (BUSCHE, 1982 ; JOSEPH et ARANYOSSY, 1992). En outre, les eaux étaient stockées dans les remplissages fins des dépressions, où elles pouvaient causer un effet de « pot de fleurs » et rendre possible une remontée de la végétation vers le nord.

- Une influence directe sur la formation du relief récent est donnée par les formes karstiques de grande dimension (BUSCHE, 1993). Le creusement des vallées et la genèse des falaises ainsi que les grands reliefs karstiques ont été guidés par la tectonique (JOSEPH et ARANYOSSY,

stratigraphie		phases de karstification	transformation du karst	remplissages karstiques
Q			subrosion dans des grès peu cimentés et dans les remplissages	remplissages non consolidés (paléosols, dépôts éoliens)
			démantèlement et éolisation des plateaux	
T			formation du macrorelief moderne (recoupage des réseaux karstiques)	stalactites ferrugineux (SPONHOLZ, 1994)
			karstification de croûtes ferrugineuses	
C	CT CH		karstification	remplissages bréchiques
	CI			

Tableau 1 : Karstification et développement post-karstique. *Karstification and post-karstic development.* C : Crétacé, *Cretaceous.* T : Tertiaire, *Tertiary.* Q : Quaternaire, *Quaternary.* CI : Continental intercalaire, *Continental intercalaire.* CH : Continental hamadien, *Continental hamadien.* CT : Continental terminal, *Continental terminal.*

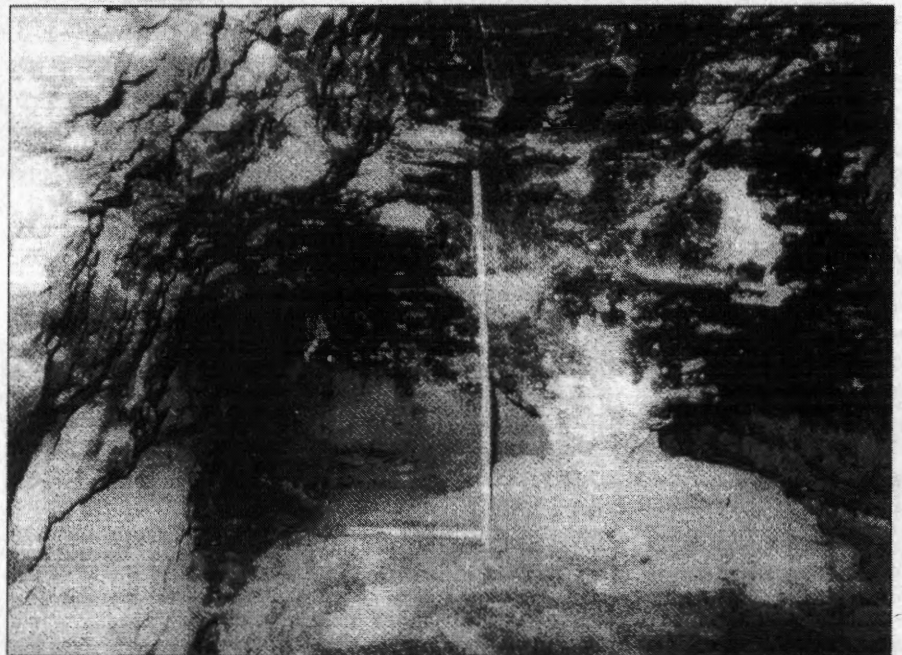


Photo 3 : Salle d'une grotte dans le même inselberg (voir photo 2). Au centre, on voit une colonne de dissolution. Les formes d'érosion mécanique plus récentes sont creusées dans le fond. *Cave room in the same inselberg (see photo 2). In the central part a solution pillar, on the cave floor younger features of mechanical erosion.*

1992 ; BAUMHAUER, 1993). Par ailleurs, les microformes karstiques donnent un aspect d'éponge (accélération de l'infiltration) à certaines parties de la roche et peuvent la protéger contre l'érosion superficielle (BUSCHE et SPONHOLZ, 1992).

- Une influence de la nappe karstique sur la formation des dépressions au pied des falaises au sens des *Karstrandebenen* (LEHMANN, 1953) a été récemment discutée (BAUMHAUER, 1993 ; BUSCHE 1993).

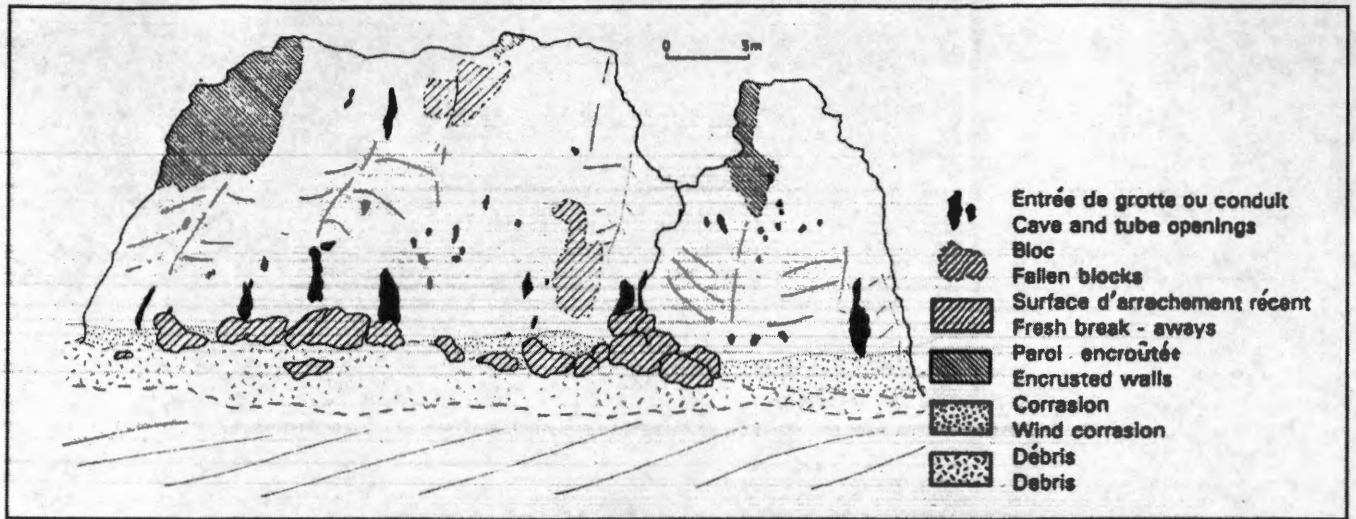


Figure 4 : Inselberg gréseux karstifié au nord d'Aney, Kawar septentrional. Dans la roche, environ 100 vides karstiques (conduits et petites grottes) ont été relevés (SPONHOLZ, 1989 ; BUSCHE et SPONHOLZ, 1992). Karstified sandstone inselberg north of Aney, northern Kavar. The rock is riddled by about 100 karst holes (tubes and caves) (SPONHOLZ, 1989 ; BUSCHE et SPONHOLZ, 1992).

Pour la genèse du karst siliceux, il faut supposer un régime hydrique plus important qu'aujourd'hui. Bien que les courants souterrains, la qualité et la quantité des eaux ne soient pas bien connus pour la période tertiaire, il y avait assez d'eau souterraine pour un karst phréatique (JENNINGS, 1983 ; MARTINI, 1987). Cependant les possibilités d'une interprétation paléoclimatologique du karst siliceux au Niger oriental restent limitées à cause des variations pétrographiques du matériel karstifié : grès siliceux assez purs constituant les falaises de Djado et de Bilma et Continental terminal à forte teneur en fer dans les massifs d'Agadem et de Termit. Malheureusement les

caractéristiques varient dans ces deux zones d'affleurement : pétrographie des roches karstifiées, intensité et type de karst, dessin micromorphologique des précipitations siliceuses et conditions climatiques actuelles et anciennes. Jusqu'à maintenant, on ne peut pas préciser si les caractéristiques des précipitations siliceuses, qui dépendent surtout du milieu chimique et de la concentration des éléments dans la solution, sont liés aux conditions climatiques ou plutôt à la pétrographie régionale. Cependant, la répartition des résultats plaide en faveur de l'hypothèse d'une influence paléoclimatique. En général, les résultats laissent supposer des conditions climatiques assez

humides et assez chaudes pour permettre le développement d'organismes et un milieu assez agressif chimiquement : milieu marécageux et mal drainé, dans lequel un karst couvert s'est installé.

Malgré toutes ces questions, qui réclament des études ultérieures, on peut affirmer que le « karst siliceux » est un « karst » au sens propre, avec dissolution de la roche. Bien que les systèmes étudiés appartiennent à un paléokarst, la dissolution semble continuer au niveau de la nappe. De plus, les phénomènes présentés sont de grande importance pour l'interprétation des processus géomorphologiques tertiaires et quaternaires et pour comprendre l'hydrologie actuelle.

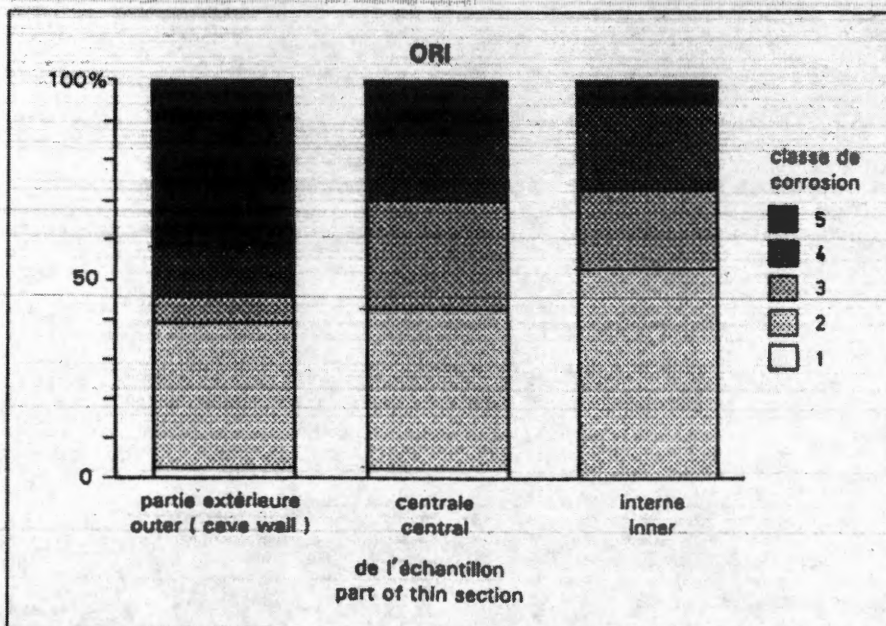


Figure 5 : Resultat de l'étude micromorphologique (lame mince) d'un échantillon de la même région (au pied de la falaise de Djado, «Orida»). Dans la partie extérieure de la roche (parois d'une cavité couverte d'une mince couche de silice amorphe) la quantité des grains de quartz fortement corrodés (classes 4 à 5 d'après BURGER et LANDMANN, 1988) est élevée. Résultat typique pour tous les échantillons pris dans des situations identiques, il indique la dissolution à partir des vides (voir aussi photo 4).

Result of the micromorphological analyses (thin section) of a sample of the same region (foreland of the Cuesta of Djado, «Orida»). In the exterior part of the rock (silica coated cavern wall) the quantity of severely corroded quartz grains (class 4 to 5 after BURGER et LANDMANN, 1988) is elevated. This is a typical result gained from other samples taken from similar situations, too. This indicates a solution influence out from the caverns (see also photo 4).

Remerciements : les études de terrain ont été supportées par un crédit de la «Deutsche Forschungsgemeinschaft» (Association allemande de la recherche) que nous remercions sincèrement. Les lames minces ont été préparées par P. SPÄTHE à l'Institut de minéralogie de l'Université de Würzburg. Les études au MEB ont été réalisées à l'ISMRA / Caen et à l'Université de Paris VI ; je remercie J.-Cl. FLAGEOLLET et G. COUDÉ-GAUSSEN de m'y avoir invitée. Je voudrais également remercier S. POMEL pour toutes les discussions critiques et pour avoir revu le manuscrit.

BIBLIOGRAPHIE

A.A. - 1985. *Annuaire météorologique du Niger*. Niamey.
BAUMHAUER R. - 1986. Zu jungquartären Seenentwicklung im Bereich der Stufe von Bilma (NE-Niger). *Würzburger Geogr. Arb.*, 65, 235 p.
BAUMHAUER R. - 1993. Zur Genese der Schichtstufenvorlandsenken in der südlichen zentralen Sahara. *Würzburger Geogr. Arb.*, 87, *Horst-Hagedorn-Festschrift*, p. 85-105.
BAUMHAUER R. et HAGEDORN H. - 1989. Probleme der Grundwassererschließung im Kawar (Niger). *Die Erde*, 120, p. 11-20.
BURGER D. et LANDMANN M. - 1988. Quantitative Mikromorphologie der Quarzverwitterung mit beispielen aus dem tropischen Karst. *Tübinger Geogr. Studien*, 100, p. 169-184.
BUSCHE D. - 1982. Die geomorphologische Entwicklung des westlichen Murzuk-Beckens, des Djado-Plateaus und des nördlichen Kaouar. *Habil.-Schrift, Geographisches Institut der Univ. Würzburg*, t. I : 377 p. et t. II : 137 fig., non publié.
BUSCHE D. - 1983. Silcrete in der zentralen Sahara (Murzuk-Becken, Djado-Plateau und Kaouar ; Süd-Libyen und Nord-Niger). *Z. Geomorph. N.F., Suppl. Bd. 48*, p. 35-49.
BUSCHE D. - 1993. Das Sandsteinkarstrelief des Tchigai, Nordost-Niger. *Würzburger Geogr. Arb.*, 87, *Horst-Hagedorn-Festschrift*, p. 63-84.
BUSCHE D. et ERBE W. - 1987. Silicate karst landforms of the southern Sahara (north-eastern Niger and southern Libya). *Z. Geomorph. N.F., Suppl. Bd. 64*, p. 55-72.
BUSCHE D. et SPONHOLZ B. - 1988. Karsterscheinungen in nichtkarbonatischen Gesteinen der Republik Niger. *Würzburger Geogr. Arb.*, 69, p. 9-43.
BUSCHE D. et SPONHOLZ B. - 1992. Morphological and micromorphological aspects of the sandstone karst of eastern Niger. *Z. Geomorph. N.F., Suppl. Bd. 85*, p. 1-18.
DREW D.P. - 1982. Piping in the Big Muddy badlands, Southern Saskatchewan,

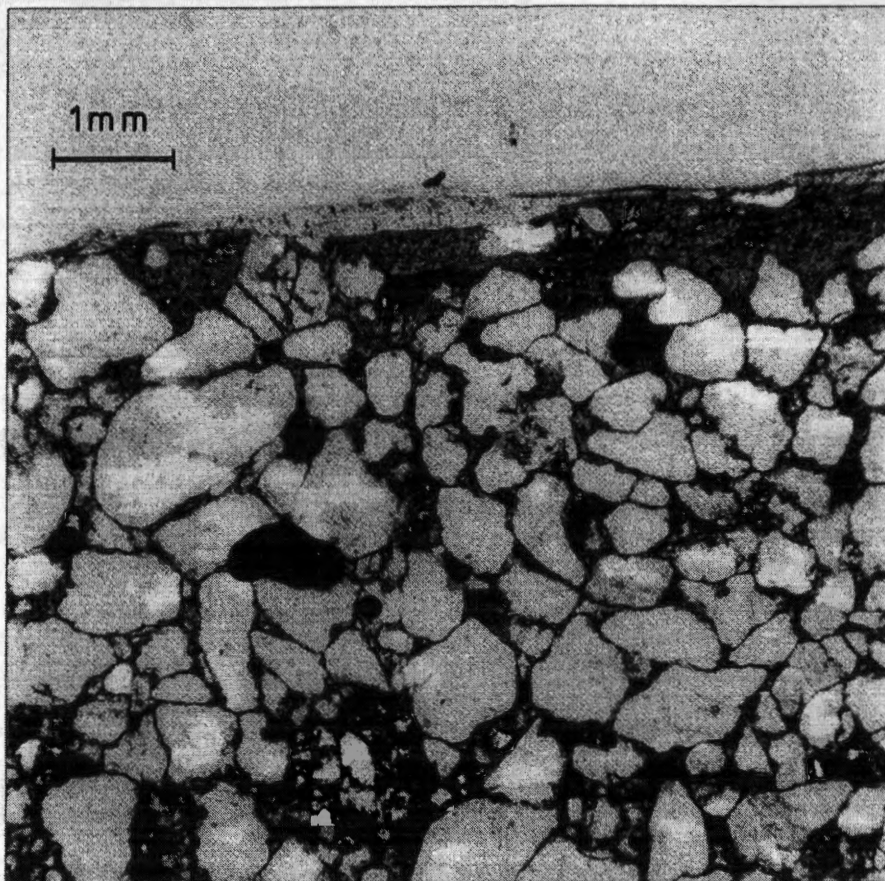


Photo 4 : Zone extérieure de l'échantillon «Ori» (provenant de l'inselberg «Orida» au pied de la falaise de Djado). Transition entre la grotte et la roche saine, couverte d'une mince couche de silice amorphe. La lame mince montre le contenu élevé des grains de quartz fortement corrodés dans cette partie extérieure (voir aussi fig. 5). La dissolution peut aller jusqu'à la fragmentation complète du grain.
Exterior part of the sample «Ori» (from the inselberg «Orida» in the foreland of the Cuesta of Djado). Transition between the cavern and the solid rock, covered by a thin layer of amorphous silica. The thin section shows the higher content of severely corroded quartz grains in this exterior zone (see also fig. 5). The corrosion may be advanced up to the complete fragmentation of the grains.

Canada. In BRYAN R. et YAIR A. - *Badland geomorphology and piping*. 408 p., Cambridge.
FAURE H. - 1963. Inventaire des évaporites du Niger. *Min. Trav. Publ. Min. Hydraul.*, 260 p., non publié.
FAURE H. - 1966. Reconnaissance géologique des formations sédimentaires post-paléozoïques du Niger oriental. *Mem. B.R.G.M.*, 47, 630 p., Paris.
FELIX-HENNINGSSEN P. - 1992. Frühholozäne Feuchtzeitböden auf Altdünen der Ténéré und des Tchigai-Berglandes, Ost-Niger. *Würzburger Geogr. Arb.*, 84, p. 97-129.
GALAN C. et LAGARDE J. - 1988. Morphologie et évolution des cavernes et formes superficielles dans les quartzites du Roraima. *Karstologia*, 11-12, p. 49-60.
GREIGERT J. et PUGNET R. - 1967. Essai de description des formations géologiques de la République du Niger. *Mem. B.R.G.M.*, 48, 236 p., Paris.
GRUNERT J. - 1983. Geomorphologie der Schichtstufen am Westrand des Murzuk-

Beckens (Zentrale Sahara). *Relief, Boden, Paläoklima*, 2, 271 p., Berlin, Stuttgart.
HAGEDORN H. - 1984. Zur Reliefentwicklung der südlichen Zentralsahara. *Z. Geomorph. N.F., Suppl. Bd. 50*, p. 53-58.
HAGEDORN H. - 1988. Äolische Abtragungsformen im Massiv von Termit (NE-Niger). *Würzburger Geogr. Arb.*, 69, p. 277-287.
HUGOT G. et CARBONNEL J.-P. - 1986. Le lapiaz de Souroukoudinga (Burkina Faso), un karst à micro-tourelles d'âge supposé quaternaire. *Karstologia*, 8, p. 31-38.
JENNINGS J.N. - 1983. Le karst méconnu du domaine aride et semi-aride. *Karstologia*, 1, p. 61-73.
JENNINGS J.N. - 1985. *Karst geomorphology*. 293 p., Oxford.
JOSEPH A. et ARANYOSSY J.-F. - 1992. Paléo-hydrologie de la nappe crétacée de Bilma (Niger). *Würzburger Geogr. Arb.*, 84, p. 73-95.

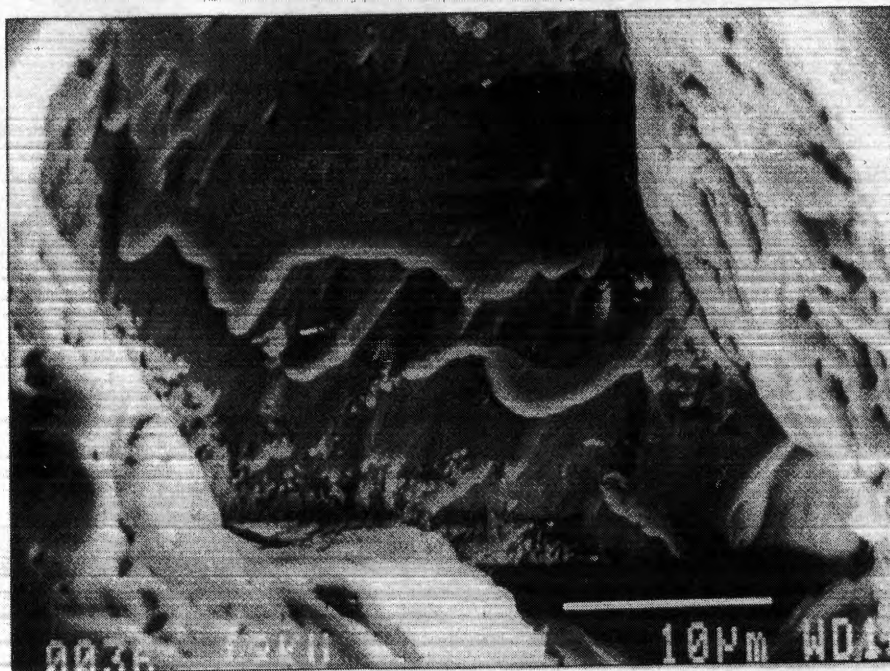


Photo 5 : Grain de quartz vu sous MEB (échant. «Chem 3», falaise de Bilma). La surface du grain est couverte de marques irrégulières de dissolution (à gauche et à droite) et montre également des faces nettes de quartz cristallisé (au milieu). Les lacunes en forme de «V» dans les faces cristallisées, sont en partie interprétées comme des précipitations/néocrystallisations de quartz, encore incomplètes.

Quartz grain under SEM (sample «Chem 3», Cuesta of Bilma). The grain surface is covered by irregular etching features (right and left). On the other hand there exist well crystallized quartz faces (in the center). The «V»-shaped patterns on the crystallized faces are interpreted as not yet complete precipitation/newcrystallization features.

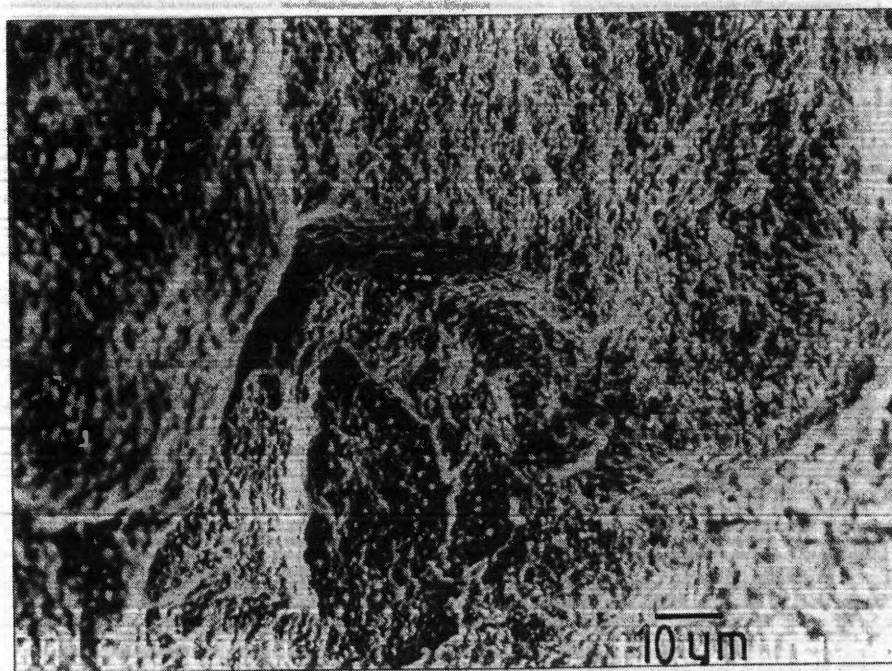


Photo 6 : Grain de quartz vu sous MEB (échant. «Kou 33», massif de Koutous). Le grain est couvert de silice amorphe sous forme de globules.

Quartz grain under the SEM (sample «Kou 33», Massif of Koutous). The grain is covered by a layer of amorphous silica, precipitated as globules.

KRINSLEY D.H. et DOORNKAMP J.C. - 1973. *Atlas of quartz sand surface textures*. 91 p., Cambridge.

LEHMANN H. - 1953. Karstentwicklung in den Tropen. *Umsch. Wissensch. Technik*, 18, p. 559-562.

LE RIBAUT L. - 1975. L'exoscopie : méthode et applications. *Notes et Mem. Total*, 12, 232 p.

LOUIS P. - 1973. Contribution géophysique à la connaissance géologique du Bassin du Lac Tchad. *Mem. O.R.S.T.O.M.*, 42, Paris.

MAINGUET M. - 1972. *Le modelé des grès*. Vol. I, 227 p., IGN, Paris.

MARTINI J. - 1987. Les phénomènes karstiques des quartzites d'Afrique du Sud. *Karstologia*, 9, p. 45-52.

MÜLLER G. - 1967. *Methods in sedimentary petrology*. Vol. I, 283 p.

POUYLLAU M. - 1985. Les karsts gréseux dans la Gran Sabana (Guyane vénézuélienne). *Bull. Assoc. Geogr. Franc.*, 4, p. 269-283, Paris.

POUYLLAU M. et SEURIN M. - 1985. Pseudo-karst dans des roches gréseo-quartzitiques de la formation Roraima (Gran Sabana, Venezuela). *Karstologia*, 5, p. 45-52.

RENAULT Ph. - 1953. Caractères généraux des grottes gréseuses du Sahara méridional. *Actes du 1er Congrès Intern. Spéleol.*, Paris, 2 / 1, p. 275-289.

SILVESTRU E. - 1990. Propositions pour une classification lithogénétique des formes karstiques et apparentées. *Karstologia*, 15, p. 55-57.

SKOWRONEK A. - 1987. Böden als Indikatoren klimagesteuerter Landformung in der zentralen Sahara. *Relief, Boden, Paläoklima*, 5, 184 p., Berlin, Stuttgart.

SPONHOLZ B. - 1989. Karsterscheinungen in nichtkarbonatischen Gesteinen der östlichen Republik Niger. *Würzburger Geogr. Arb.*, 75, 265 p.

SPONHOLZ B. - 1992. Karstverfüllungen in Ostniger. *Würzburger Geogr. Arb.*, 84, p. 131-145.

SPONHOLZ B. - 1994. Silicate karst associated with lateritic formations (examples from eastern Niger). *Catena*, 21, sous presse.

TIETZ G. F. - 1987. Lösung und Ausheilung tropisch verwitterter Quarze aus einem Oberkreide-Sandstein (SW-Nigeria). *Facies*, 17, p. 267-276.

TWIDALE C. R. - 1987. Sinkholes (dolines) in lateritized sediments, Western Sturt Plateau, Northern Territory, Australia. *Geomorphology*, 1, p. 33-52.

URBANI F. et COURBON P. - 1978. Les karst gréseux du Venezuela, une spéléologie entre ciel et terre. *Spelunca*, 4, p. 24-28.

VÖLKEL J. - 1989. Geomorphologische und pedologische Untersuchungen zum jungquartären Klimawandel in den Dünengebieten Ostnigers (Südsahara und Sahel). *Bonner Geogr. Abh.*, 79, 258 p.