

Existence de karsts en roches cristallines silicatées non carbonatées en Afrique sahélienne et équatoriale, implications hydrogéologiques

LUC WILLEMS¹, ANDRÉ POUCKET² et JEAN-PAUL VICAT²⁻³

Mots clés. – Karst silico-alumineux, Afrique sahélienne, Afrique équatoriale, Hydrogéologie.

Résumé. – Différentes cavités étudiées au Niger occidental et au Cameroun méridional démontrent l'existence de phénomènes karstiques largement développés au sein de métagabbros et de gneiss. Des grottes de grande dimension sont issues d'une dissolution généralisée des formations silicatées réputées peu solubles. La karstification se fait par le biais de circulations hydriques le long de discontinuités lithologiques et de réseaux de fracturation en profondeur. L'existence de telles cavités a des implications majeures en géomorphologie, tant en climat sahélien qu'équatorial, ainsi que sur l'hydrogéologie et les ressources en eaux, particulièrement dans le Sahel.

Existence of karsts into silicated non-carbonated crystalline rocks in Sahelian and Equatorial Africa, hydrogeological implications

Key words. – Silico-aluminous karst, Sahelian Africa, Equatorial Africa, Hydrogeology.

Abstract. – Various cavities studied in western Niger and South Cameroon show the existence of important karstic phenomena into metagabbros and gneisses. These large-sized caves resulted from generalized dissolution of silicate formations in spite of their low solubility. Karstification is produced by deep hydrous transfer along lithological discontinuities and fracture net works. The existence of such caves has major implications in geomorphology, under either Sahelian and Equatorial climate, and in hydrogeology and water supply, particularly in the Sahel area.

Introduction. – Since a few decades, several karst-like morphologies are described in non-carbonated rocks (sandstones, quartzites, schistes, gneisses...) [Wray, 1997 ; Vicat and Willems, 1998 ; Willems, 2000]. The cave of Guéssédoundou in West Niger seems to be due to a large dissolution of metagabbros. The cave of Mfoula, South Cameroon, attests for the same process in gneisses. This forms proof that big holes may exist deeper in the substratum even of non-carbonated silicate rocks. Their size and number could mainly influence the landscape and the hydrogeology, especially in the Sahelian areas.

Guéssédoundou, a cave into metagabbros in West Niger. – The site of Guéssédoundou is located 70 km south-west of Niamey (fig. 1). The cave is opened at the top of a small hill, inside in NNE-SSW elongated pit (fig. 2 ; pl. I A). The hole, 3 to 4 m deep and 20 m large, has vertical walls and contains numerous sub-metric angular blocks. A cave, a few meters deep, comes out the south wall. Bedrocks consist of metagabbros of the Makalondi greenstone belt, a belt of the Palaeoproterozoic Birimian Formations of the West Africa craton [Poucllet *et al.*, 1990]. The rock has a common granular texture with plagioclases, partly converted in albite and clinozoisite, and pyroxenes pseudomorphosed in actinote and chlorite. It is rather fairly altered. Chemical composition is mafic and poorly alkaline (tabl. I). A weak E-W schistosity generated with the epizonal thermometamorphism. The site depression was created along a N010° shear zone where rocks suffered important fracturation and fluid transfers, as shown by its silification and ferruginisation.

The absence of human activity traces and the disposition of the angular blocks attest that the pit is natural and was due to the collapse of the roof of a vast cavity whose current cave is only the residual prolongation. To the vertical walls of the depression and at the cave entry, pluridecimeteric hemispheric hollows are observed (pl. I B). Smooth morphology and position of these hollows sheltered within the depression dismiss the assumptions of formation by mechanical erosion. In return, these features are typical shape of dissolution processes observed into limestone karstic caves. That kind of process must be invoked to explain the opening of the Guéssédoundou cave, in the total lack of desagregation materials. Dissolution of metagabbro occurred during hydrous transfer, which was probably guided by numerous fractures of the shear zone. Additional observations have been done in the Sirba Valley, where similar metabasite rocks constitute the substratum, with sudden sinking of doline-like depressions and evidence of deep cavities by core logging [Willems *et al.*, 1993, 1996]. It is concluded that karstic phenomena may exist even in silica-aluminous rocks of crystalline terrains, such as the greenstones of a Precambrian craton.

Mfoula a cave into gneisses in South Cameroon. – The cave of Mfoula is located 80 km north-east of Yaoundé (fig. 3). It is the second largest cave of Cameroon, more than 5,000 m³, with a large opening in the lower flank of a deep valley (pl. I C). The cavity is about 60 m long, 30 m large and 5 to 12 m high (fig. 4; pl. I D). It is hollowed in orthogneisses belonging to the Pan-African Yaoundé nappe. Rocks exhibit subhorizontal foliation in two superposed lithological facies : the lower part is made of amphibole- and garnet-bearing layered gneisses, and the upper part, of more massive granulitic gneisses. Average composition is silico-aluminous and moderately alkaline (tabl. I). The cave

¹Laboratoire de sédimentologie, Dpt Géologie-Pétrologie-Géochimie, B20, Université de Liège & Dpt. de Géographie Physique, Université de Liège, B11, B-4000 Liège, Belgique.

²Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, UMR 6113, Université, BP 6759, 45067 Orléans cedex, France.

³Département de Géologie, Faculté des Sciences, Université, BP 898, N'Djaména, Tchad.

Manuscrit déposé le 9 février 2001 ; accepté après révision le 26 février 2002.

is made of different chambers separated by sub-cylindrical pillars. The ceiling of the main chamber, 6 m in diameter, is dome-shaped with a smooth surface (D, fig. 4). The walls have also a smooth aspect decorated with many hemispherical hollows. The floor is flat according to the rock foliation. There are very few rock debris and detrital fragments and no traces of mechanical erosion and transport. The general inner morphology is amazingly similar to that of a limestone cave. The only way to generate such a cavity is to dissolve the rock by water transfer.

To test the effect of the dissolution process, we analysed a clayey residual sampled in an horizontal fracture of the floor (tabl. I). Alteration begins by plagioclases in producing clay minerals and in disaggregating the rock. However, there is no more clay and sand material. That means all the silicate minerals must have been eliminated. Dissolution of silicates is a known process in sandstone and quartzite caves. It may work as well in gneisses. To fasten the chemical action, we may consider an additional microbial chemolithotrophic activity. The activity of bacteria colonies is known in various rocks and depths, mainly in the aquifer [Sinclair and Ghiorse, 1989 ; Stevens and McKinley, 1995]. The formation of the Mfoula cave is summarized as follows (fig. 5). Meteoric water is drained down along sub-vertical fractures and then along horizontal discontinuities of the foliation, particularly in case of lithological variations. Chemical and biological dissolution is working. Lateral transfers linked to the aquifer oscillations caused widening of the caves. Dissolved products are transported by the vertical drains. Regressive erosion of the valley, linked to the epeirogenic upwelling due to the volcano-tectonic activity of the Cameroon Line, makes the cavities come into sight at the valley flanks.

Discussion and conclusion. – The two examples of the Guéssédoundou and Mfoula caves evidence the reality of the karsts in non-carbonated silicated rocks. The karst term is used to design « any features of the classical karst morphology (caves, dolines, lapies...) where dissolution plays the main genetical action » [Willems, 2000]. Our observations indicate that (i) the karst genesis may have occurred into any kind of rocks, and (ii) the cave formation is not directly dependent of the present climate. These facts have major consequences to hydrogeological investigations, especially for water supply in Sahelian and sub-desertic countries. Some measurements of water transfer speed across either sedimentary pelitic strata of the Continental terminal or igneous rocks of the substratum in West Niger [Estèves and Lenoir, 1996 ; Ousmane *et al.*, 1984] proved that supplying of aquifers in these silico-aluminous rocks may be as fast as in a karstic limestone. That means the West Niger substratum is highly invaded by a karstic net and may have hidden a lot of discontinuous aquifers. The existence of this karst system can be easily shown by morphological observations, the same that are done in karstic limestone regions (abnormally suspended dry valleys, collapses, dolines...). Clearly, this must be the guide for any search of water, even in desertic areas where limestones are absent.

INTRODUCTION

Depuis quelques décennies, plusieurs cavités et morphologies comparables à celles trouvées dans les karsts calcaires sont répertoriées à la surface du globe principalement dans des lithologies gréseuses ou quartzitiques [p. ex. : Bellard-Pietri, 1974 ; Galan, 1982, 1988 ; Galan et Lagarde, 1988 ; Pouyllau et Seurin, 1985 ; Szczervan et Urbani, 1974 ; Urbani, 1978, 1981, 1993 ; Urbani et Szczervan, 1975 ; Wray, 1997 ; Vicat et Willems, 1998]. Pour les gneiss, les schistes et les roches cristallines en général, une quinzaine de sites sont connus et n'ont fait l'objet que d'études limitées [Willems, 2000]. La cavité de Guéssédoundou, au Niger occidental, illustre le cas d'une dissolution généralisée de métagabbros. La grotte de Mfoula, au Cameroun, montre des phénomènes de dissolution en grand dans des gneiss non altérés. Ces formes démontrent l'existence de grands vides, en profondeur, dans des roches silicatées non carbonatées peu ou non altérées. Le nombre et la dimension des cavités peuvent être très importants et influencer la géomorphologie des paysages au même titre que les karsts calcaires ou les karsts gréseux, avec des conséquences notables sur les ressources en eaux dans les régions semi-désertiques.

GUESSEDOUNDOU, UNE GROTTÉ DANS DES METAGABBROS DU NIGER OCCIDENTAL

Contexte géomorphologique et géologique

La grotte a été découverte à une quinzaine de kilomètres au nord-est de Makalondi, village situé à 70 km au sud-ouest de Niamey (fig. 1) [Willems *et al.*, 1996]. Le site de Guéssédoundou est une petite colline au sommet de laquelle

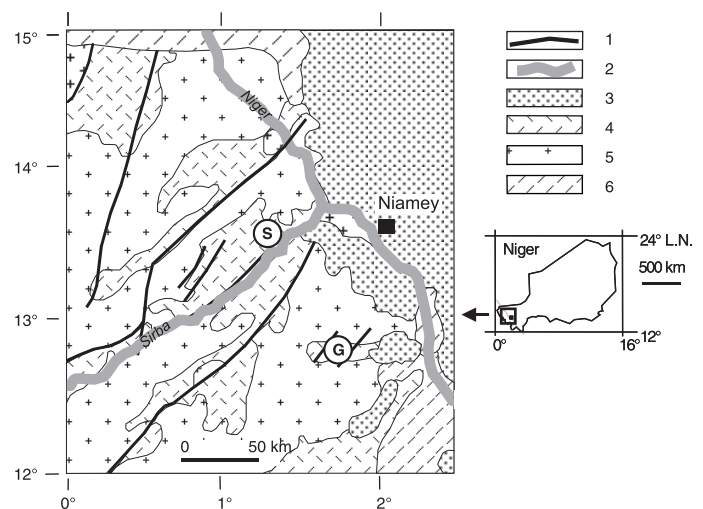


FIG. 1. – Localisation de la zone d'étude au Niger et carte géologique simplifiée du Niger occidental. 1, failles ; 2, vallées alluviales ; 3, Continental terminal ; 4, Paléoproterozoïque, ceintures de roches vertes birimiennes ; 5, Paléoproterozoïque, granitoïdes birimiens ; 6, Néoproterozoïque, couverture gréseuse ; G, site de Guéssédoundou ; S, site de Guiddéré.

FIG. 1. – Location of the studied area and geological sketch-map of West Niger. 1, faults ; 2, alluvial valleys ; 3, "Continental terminal" ; 4, Palaeoproterozoic, Birrimian greenstone belts ; 5, Palaeoproterozoic, Birrimian granitoids ; 6, Neoproterozoic, sandstone cover ; G, site of Guéssédoundou ; S, site of Guiddéré.

s'ouvre une dépression ovale orientée NNE-SSW, longue d'une vingtaine de mètres et profonde de trois à quatre mètres (fig. 2 ; pl. I A). Ses parois sont subverticales et le fond est occupé par un amas de blocs anguleux pluridécimétriques. Une cavité est ouverte dans le flanc sud de la dépression. Elle s'enfonce de quelques mètres en légère pente

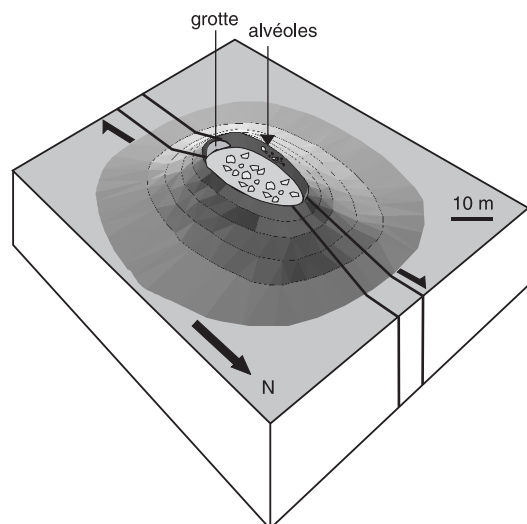


FIG. 2. – Schéma général du site de Guéssédoundou [modifié d'après Willems *et al.*, 1996].

FIG. 2. – Schematic 3D-block of the Guéssédoundou site [modified after Willems *et al.*, 1996].

dans la roche et se prolonge sous forme de conduits trop étroits pour être parcourus. Son plafond, haut de 1,80 m à l'entrée, s'abaisse rapidement.

Géologiquement, on se trouve dans la ceinture de roches vertes de Makalondi, formée de terrains birimiens datés du Paléoprotérozoïque [Poucllet *et al.*, 1990]. La roche est un métagabbro à grains fins, faiblement altéré, traversé par des filons quartzeux de largeur décimétrique. La texture gabbroïque est préservée, ainsi qu'une partie des plagioclases magmatiques (An 73-69), le reste étant transformé en un mélange d'albite et de clinzoïsite. Les pyroxènes sont pseudomorphosés en actinote et chlorite. La composition chimique est basique (SiO₂ : 49,5 ; MgO : 9,3), très peu alcaline (Na₂O + K₂O : 1,4) et à la limite de la saturation (Ol normative : 0,3 %) (tabl. I). L'ensemble de la formation est affecté par une intense fracturation verticale suivant le grand axe de la dépression. Cette fracturation est due à un important couloir de cisaillement N010° à décrochement dextre (fentes de tension N050°), le long duquel les roches ont subi une silicification et une ferruginisation. En outre, une schistosité est-ouest et antérieure au cisaillement structure le gabbro. Elle marque l'aplomb de l'entrée de la cavité qui s'enfonce dans l'axe de la direction de cisaillement.

Formation de la grotte

La présence de blocs anguleux de taille quelconque et l'absence de trace d'activité humaine sur le site montrent que la dépression s'est formée naturellement par effondrement du toit d'une vaste cavité dont la grotte actuelle serait le prolongement résiduel visible. L'absence de traces d'écoulement et d'abrasion mécanique signifie que cette cavité est due uniquement à des phénomènes d'érosion chimique. A l'entrée de la grotte et sur les parois subverticales de la dépression se sont formés des creux hémisphériques de quelques centimètres à quelques décimètres de diamètre (pl. IB). Ces alvéoles de paroi sont connues dans d'autres lithologies, notamment dans les calcaires. Plusieurs hypothèses génétiques sont habituellement proposées : (1) formation par haloclastie, (2) corrosion à un nœud de fracturation, (3)

TABLE I. – Analyses chimiques des roches de Guéssédoundou et de Mfoula (analyses par ICP, Service d'analyses de l'Université et du CNRS d'Orléans). Métagabbro de Guéssédoundou ; Mfoula : MF-S, gneiss granulitique sain et MF-4, gneiss granulitique altéré prélevé dans une fissure. * Le soufre analysé est compris dans la perte au feu (P.F.). Il n'a pas été trouvé de carbone ni d'azote. La norme est calculée sur la base du rapport Fe₂O₃/FeO de 0,15 pour le gabbro et de 0,23 pour les gneiss.

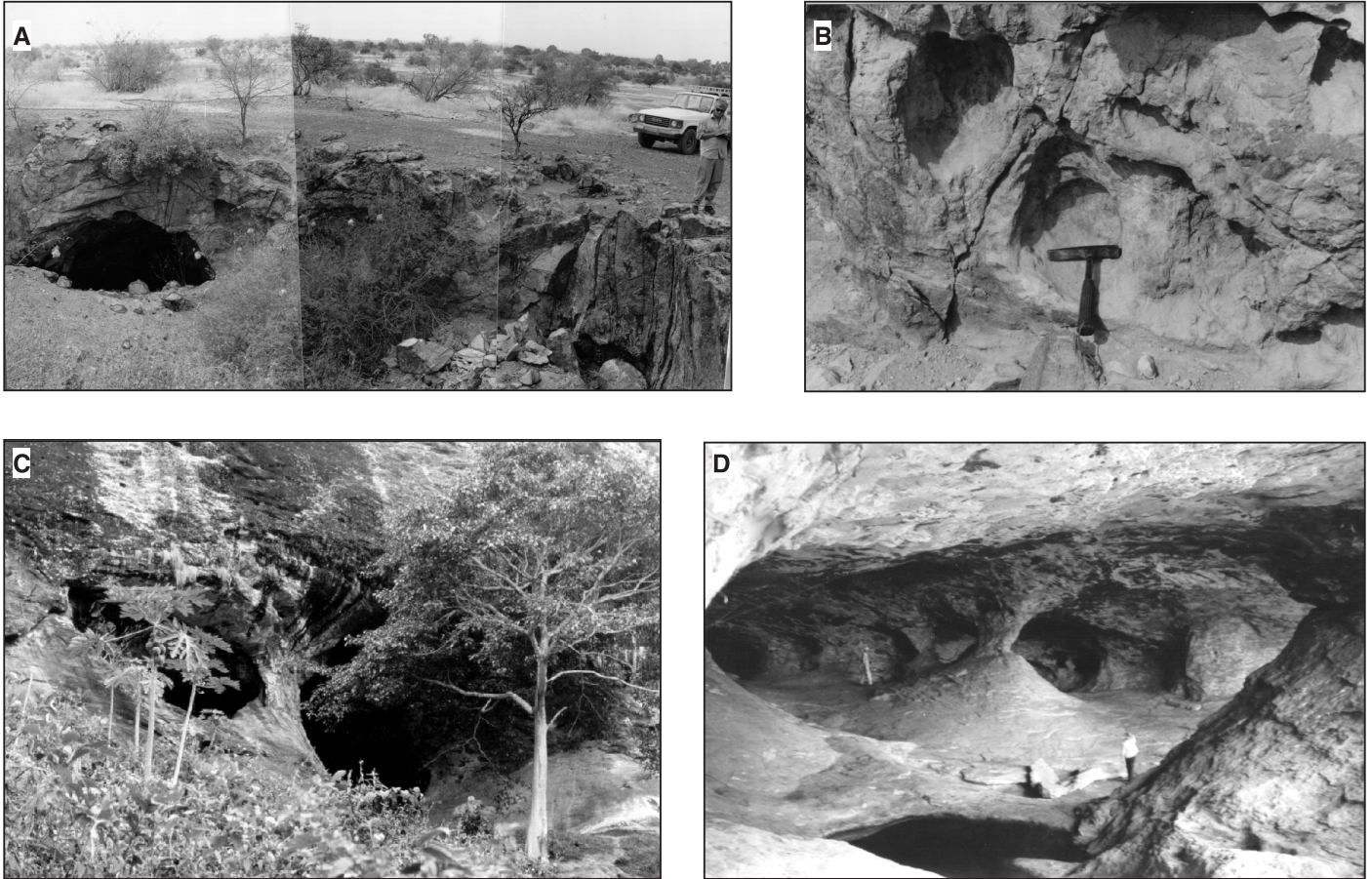
TABLE I. – Chemical analyses of the Guéssédoundou and Mfoula rocks (analyses by ICP, analytical lab. of University and CNRS of Orléans). Metagabbro of Guéssédoundou ; Mfoula : MF-S, fresh granulitic gneiss, MF-4, altered granulitic gneiss sampled in a crack. *The analysed sulfur is in the loss on ignition (P.F.). No carbon or nitrogen was found. The norm analysis is based on a Fe₂O₃/FeO ratio of 0.15 for the gabbro and of 0.23 for the gneisses.

	Guéssédoundou	Mfoula MF - S	Mfoula MF - 4
	métagabbro	gneiss granulitique sain	gneiss granulitique altéré prélevé dans une fissure
SiO ₂	49,53	62,51	56,39
TiO ₂	0,24	1,58	0,26
Al ₂ O ₃	15,44	16,41	9,87
Fe ₂ O ₃	8,76	1,32	1,36
FeO		5,86	5,93
MnO	0,13	0,11	0,02
MgO	9,25	3,21	0,88
CaO	13,62	5,68	1,02
Na ₂ O	1,39	2,44	1,77
K ₂ O	0,03	1,18	2,08
P ₂ O ₅	0,01	0,11	0,36
TOTAL	98,40	100,41	79,94
perte au feu	1,26	0,10	18,02
S			3,66
TOTAL avec perte au feu	99,66	100,51	97,96
norme CIPW			
Quartz	0,00	23,71	31,28
Orthose	0,18	6,94	12,29
Albite	12,05	20,56	14,98
Anorthite	36,66	27,42	2,94
Diopside	26,32	0,00	0,00
Hypersthène	22,42	15,20	11,57
Olivine	0,33	0,00	0,00
Magnétite	1,55	1,90	1,97
Ilménite	0,47	2,99	0,49
Corindon	0,00	1,02	3,63
Apatite	0,02	0,24	0,79
TOTAL	100,00	100,00	79,94

formation par tourbillons d'eau, (4) altération due à l'eau contenue dans un sol au contact de la roche (encoche basale) et (5) éolisation. L'absence de sels au sein de la roche écarte la première hypothèse. L'aspect lisse et non fracturé des parois des alvéoles ne peut résulter d'une corrosion à un nœud de fracturation. L'aspect fermé de la dépression et l'absence de trace d'écoulement éliminent les hypothèses de formation par tourbillons d'eau ou par éolisation.

Une genèse au sein d'un manteau d'altération ne peut convenir puisque la roche est peu altérée et les alvéoles se sont développées sur toute la hauteur de la paroi de la dépression et non à un niveau bien particulier qui correspondrait à un horizon pédogénique précis.

Seule une dissolution généralisée des métagabbros en relation avec une circulation lente de solutions s'effectuant à la faveur des plans de fracture du couloir de cisaillement permet d'expliquer la formation des alvéoles. L'inversion de relief du site résulte d'une plus faible érosion des roches



PL. I. – A : vue sur la dépression et la grotte de Guéssédoundou. B : alvéoles sur une des parois verticales de la dépression de Guéssédoundou. C : vue des entrées de la grotte de Mfoula. D : vue sur la salle principale de la grotte de Mfoula.

PLATE I. – A: view of the pit and of the Guéssédoundou cave. B: hemispheric hollows on the vertical walls of the pit of Guéssédoundou. C: sight of the entrance of the cave of Mfoula. D: sight to the main chamber of the Mfoula cave.

rendues plus résistantes à cet endroit par l'armature des filons de quartz et par la ferruginisation le long du couloir de cisaillement. En contrepartie, les roches broyées, devenues poreuses, ont drainé les infiltrations des eaux météoriques, facilitant les processus de dissolution.

Une des questions qui reste posée est de savoir si les phénomènes de dissolution ont pris place dans la roche saine ou dans les métagabbros en cours d'altération. Différents phénomènes karstiques examinés dans la région indiquent que les deux scénarios sont possibles [Willems *et al.*, 1993, 1996]. Cependant, la présence de nombreux minéraux primaires, la faible quantité de minéraux secondaires et la position en inversion de relief du site de Guéssédoundou, incite à penser que la grotte et les alvéoles se sont mises en place avant l'apparition d'un manteau d'altération et l'inversion de relief, au sein même de la roche du substratum. Cette hypothèse est sérieusement renforcée par deux observations [Willems, 2000]. Lors de la saison des pluies de 1992, un important effondrement s'est formé en quelques jours dans la vallée de la Sirba, près du village de Guiddéré. La dépression de 3 m de profondeur sur 290 m de long et 17 m de large s'est produite dans un talweg à peine marqué par l'alignement de quelques mares temporaires. Le bord subvertical laisse apparaître, sous le sol actuel, une lithomarge de métagabbro similaire à celui de Guéssédoundou. Le fond est à un niveau inférieur à celui de l'oued au

confluent le plus proche. Aucun transfert significatif de matériaux rocheux ne s'est fait par le seuil reliant la dépression à cet oued. Il est clair que cet événement résulte de l'effondrement du toit d'une vaste cavité existant dans le substratum, à la manière d'une doline. Au cours d'un forage effectué dans les mêmes métabasites de la Sirba par le projet « Or » de la Communauté Economique Européenne, le trépan et la tête de forage furent perdus à 85 m de profondeur. Cet accident se produit lorsque le trépan débouche brusquement dans un vide (J.-M. Levecq, chef de projet, comm. pers.). Il nous paraît donc probable que le substratum de métabasites des ceintures de roches vertes du Niger occidental doit être assez largement creusé de cavités, notamment le long de zones de fracturation [Willems *et al.*, 1993].

Bien d'autres cavités plus ou moins karstiques ont été décrites au Niger dans des strates sédimentaires grésopélitiques, des ferralites et dans la lithomarge de granites [Willems *et al.*, 1996]. Cependant, seul le site de Guéssédoundou apporte un argument sérieux pour une karstification en roche cristalline. Le processus de dissolution invoqué pour cette grotte va prendre toute son ampleur dans un autre site en roche cristalline découvert au Sud-Cameroun. On examinera alors les facteurs autorisant le développement d'un tel phénomène.

MFOULA, UNE GROTTTE DANS DES GNEISS AU CAMEROUN

Contexte géomorphologique et géologique

Le site de Mfoula se situe à 80 km au nord-est de Yaoundé (fig. 3). Une colline en demi-orange est limitée par une falaise dont l'orientation est parallèle à l'axe d'une large vallée. La grotte s'enfonce, au bas de la falaise, d'une soixantaine de mètres horizontalement à l'intérieur de la colline (fig. 4). Elle a en moyenne une trentaine de mètres de largeur pour une hauteur pouvant dépasser les 10 mètres. Son volume supérieur à 5 000 m³ en fait la deuxième cavité en importance connue à ce jour au Cameroun (pl. I, C et D) après la grotte Gaskin, tube de lave dans les basaltes du Mt Cameroun. L'entrée de la cavité domine d'une cinquantaine de mètres le fond de la vallée. D'autres porches de dimension décamétrique sont également visibles quelques dizaines de mètres plus haut dans la falaise.

Les roches dans lesquelles se développent ces cavités sont des formations orthométamorphiques résultant de la transformation de granitoïdes divers aux confins de la catzone avec acquisition d'une foliation et d'un litage subhorizontal à faiblement penté vers le sud-est. Péetrographiquement, les roches de la partie inférieure de la grotte sont des orthogneiss à amphibole, biotite et grenat, injectés de passées migmatitiques dans le plan de la foliation et accompagnées d'un cortège de filons pegmatitiques et aplitiques. Les roches de la partie supérieure ont un faciès granulitique avec prédominance de granulites à grenat, amphiboles, biotites, orthopyroxènes, feldspaths potassiques, plagioclases sodiques et quartz. La transition entre ces deux faciès principaux se fait par une formation orthogneissique plus franchement litée à lits quartzo-feldspathiques à texture en mosaïque et lits à amphibole, biotite et pyroxène. Une ana-

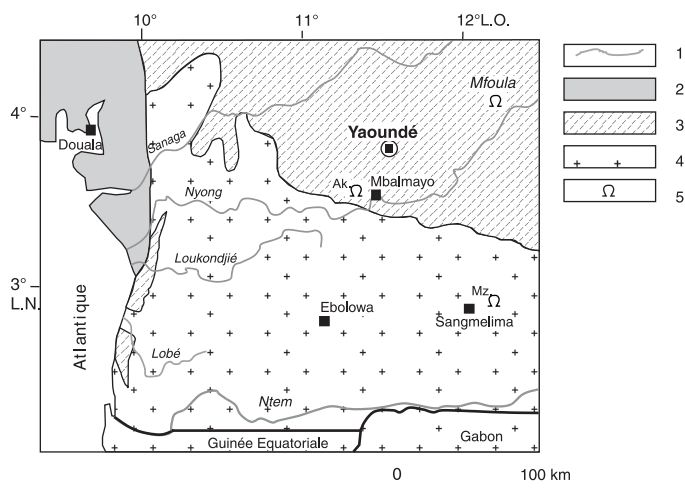


FIG. 3. – Localisation de la grotte de Mfoula sur la carte géologique simplifiée du Cameroun méridional [modifiée d'après Vicat *et al.*, 1998]. 1, rivières ; 2, Phanérozoïque ; 3, Nappe panafricaine, groupe de Yaoundé (gneiss, micaschistes, chloritoschistes) ; 4, Groupe archéen du Ntem (ceintures de roches vertes, granites, gneiss) ; 5, principales grottes : Mfoula, Ak., Akok Békoé et Mz., Mézessé.

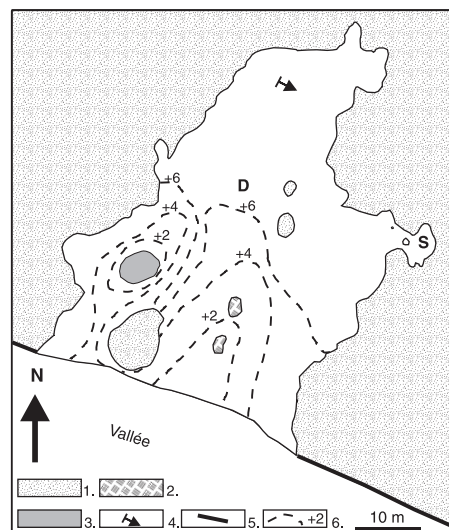


FIG. 4. – Plan de la grotte de Mfoula. 1 : roche en place, 2 : blocs effondrés, 3 : eau, 4 : direction de la pente et de la foliation, 5 : falaise, 6 : courbe de niveau relative par rapport au point le plus bas de la grotte, D : dôme développé au plafond de la grotte ; S : salle secondaire [modifié d'après Willems *et al.*, 1997].

FIG. 4. – Map view of the Mfoula cave [from Willems, 2000]. 1 : bedrock, 2 : collapsed blocks, 3 : water, 4 : slope and foliation direction, 5 : limit of the cliff, 6 : isohypses, D : dome developed in the cave roof, S : secondary room.

lyse d'un échantillonnage moyen des gneiss granulitiques met en évidence leur composition silico-alumineuse faiblement alcaline (SiO₂ : 62,5 ; Na₂O + K₂O : 3,6) et sursaturée (Qtz normatif : 23,7 % ; Co normatif : 1,0 %).

Cette lithologie contrôle l'allure générale des cavités. L'entrée de la grotte se présente en deux porches ovalisés horizontalement, parallèlement à la foliation de la roche et séparés par un pilier (pl. 1C). L'orientation générale de la grotte SSW-NNE est perpendiculaire au plan de la falaise. A l'intérieur, il n'y a pratiquement pas de blocs effondrés hormis quelques débris décimétriques près de l'entrée. Le plancher, conforme à la foliation des gneiss, avec une pente générale faible vers le sud-est, a un aspect relativement lisse alors que le plafond, au niveau des granulites, présente une surface plus irrégulière avec, par endroits, une coloration brun foncé due aux oxydes de fer provenant de l'altération des grenats.

Les principales caractéristiques morphologiques intérieures sont les suivantes (pl. ID) : (1) des piliers résiduels, de section décimétrique à plurimétrique séparent plusieurs chambres de dimension décroissante vers le fond ; (2) des alvéoles hémisphériques se développent sur les parois subverticales, particulièrement du côté nord-ouest ; (3) une voûte en dôme d'environ six mètres de diamètre apparaît au plafond de la chambre principale (D, fig. 4) ; (4) une dépression fermée d'environ deux mètres de diamètre est creusée dans un replat surélevé par rapport au niveau de l'entrée de la grotte. L'eau qui suinte le long de la falaise extérieure dégouline sur les parois et alimente cette dépression en donnant une mare tapissée de mousses et d'algues. A part cet écoulement, on ne voit pas d'eau se déplaçant à l'intérieur de la cavité.

Formation de la grotte

Des études préliminaires de la grotte de Mfoula attribuaient sa formation à l'infiltration des eaux pluviales le long de plans de fracturation verticaux et du drainage horizontal dans des fissures correspondant aux plans de schistosité [Vicat *et al.*, 1997, 1998]. Des conduits se creuseraient par l'altération chimique des minéraux hydrolysés et leur dissolution. Les résidus insolubles seraient évacués par une circulation hydrique. La coalescence de plusieurs conduits formerait alors des cavités.

Pour tester la nature de la dissolution, un échantillon de roche altérée argilisée a été prélevé dans une fissure horizontale débouchant sous une marche du plancher. Par rapport à la roche saine, la roche altérée montre une importante perte au feu due au développement de minéraux hydrolysés secondaires et de quelques sulfates (PF : 18 % incluant 3,7 % de soufre ; tabl. I). La présence de soufre est attribuée à la décomposition des quelques pyrites et pyrrothites présentes dans la roche. On doit noter l'absence de carbone et d'azote traduisant le manque de carbonates dans la roche et celui de la matière organique dans l'altérite. La composition normative du résidu (tabl. I), par rapport à celle de la roche fraîche, montre que ce sont les plagioclases qui ont fait les frais de la dissolution sélective, alors que les feldspaths potassiques et le quartz ont proportionnellement été préservés. Cette constatation est conforme à l'observation pétrographique des roches altérées sur les parois : les plagioclases se transforment rapidement en argile qui est entraînée par les eaux et laissent autant de petites cavités [Willems *et al.*, 1997].

Cependant, l'hypothèse de genèse avancée ci-dessus est confrontée à un double problème : l'absence d'argiles résiduelles en quantité importante compte tenu du volume de la cavité et l'absence de fracturation tant verticale qu'horizontale au sein de la cavité, permettant la mise en place de processus d'évacuation mécanique des résidus. Ces argiles auraient dû être partiellement conservées dans les alvéoles de paroi ou au fond d'une chambre annexe (S, fig. 4) séparée par un seuil de la salle principale et du porche. Aussi, les résidus d'altération étudiés seraient-ils dus uniquement à une altération actuelle de la roche, surtout à proximité de l'entrée de la cavité, en relation avec l'atmosphère plus humide lors de la saison des pluies. L'aspect relativement lisse des parois de la grotte, l'absence de dépôts résiduels et de processus d'écoulement à l'intérieur de la cavité plaide donc en faveur d'une dissolution généralisée de la roche et d'une évacuation des produits à l'état ionique par les eaux d'infiltrations rejoignant les aquifères discontinus classiquement présentes dans les formations cristallines multifracturées.

Deux questions se posent alors : dans quel environnement la grotte de Mfoula s'est-elle formée et continue-t-elle de se développer actuellement ? Outre l'absence d'écoulement dans la cavité, le peu de blocs effondrés montre que cette grotte est très stable dans sa morphologie et n'évolue plus sous les conditions actuelles de surface. La cavité a donc dû prendre naissance dans un environnement différent de celui d'aujourd'hui. L'absence d'écoulement, la terminaison en cul-de-sac de cette grotte et la diminution progressive de la hauteur vers le fond de la cavité indiquent qu'une érosion a progressé de l'ouverture actuelle sur la falaise vers l'intérieur de la colline. Or, la vallée est précisé-

ment disposée sur une direction de fracturation majeure reconnue dans tout le substratum du Sud-Cameroun et affectant les formations des nappes panafricaines. Cette fracturation est naturellement un drain hydrique important qui fonctionne toujours avec la présence d'un ruisseau au fond de la vallée. Les cavités qui débouchent actuellement à flanc de coteau devaient se rattacher anciennement à ce drain. L'existence d'un dôme développé dans le plafond de la grotte, les multiples alvéoles parfois imbriquées les unes dans les autres sur les parois et la présence de diverses chambres encore séparées par des piliers suggèrent clairement une genèse dans un milieu ennoyé. Le dôme est analogue à ceux que l'on observe dans les karsts calcaires. En roche carbonatée, ces dômes ont donné lieu à deux hypothèses génétiques : érosion de tourbillons d'eau ou dissolution à la jonction d'un système croisé de fractures. Ces hypothèses ne peuvent s'appliquer à Mfoula puisque la grotte se termine en cul-de-sac, ne montre aucune trace d'écoulement turbulent ni de fracture dans ses parois. Une autre hypothèse est suggérée [communication de C. Ek *in* Willems *et al.*, 1997] : celle d'une poche d'air prisonnière d'une nappe d'eau et mise sous-pression lors des variations du niveau piézométrique. La remontée de ce niveau produit en particulier une augmentation de la pression partielle de CO₂ dans la poche d'air qui facilite la corrosion du plafond. Les vides peuvent être originellement de formes irrégulières. L'action de la corrosion sur une échelle de temps suffisamment longue permet d'éliminer les irrégularités des parois pour aboutir, à terme, à un dôme régulier. En retenant l'hypothèse d'une genèse en milieu noyé, on admet que c'est dans ces conditions qu'a dû se réaliser une dissolution généralisée de la roche conduisant à la formation de la grotte.

Étant donné les très faibles valeurs des coefficients de dissolution déterminés expérimentalement et l'importance du facteur temps, il est raisonnable de faire appel aux micro-organismes. Depuis une dizaine d'années, plusieurs études ont montré le rôle important que des micro-organismes pouvaient jouer dans l'attaque généralisée des roches et ce à grande profondeur. Certains auteurs, repris dans l'article de synthèse de Ehrlich [1998], considèrent que l'activité de ces micro-organismes peut augmenter la porosité des calcaires, la porosité primaire constatée dans certains grès [Bennett *et al.*, 1988] et donc créer des vides et des cavernes. Ce phénomène qui limite la création et le dépôt de résidus insolubles peut aussi bien être envisagé pour les gneiss. La présence de colonies bactériennes a été mise en évidence dans tous les types de roches, dont les granites, même à grande profondeur [*in* Stevens et McKinley, 1995]. Les études menées sur des formations sédimentaires de Caroline du Sud [Sinclair et Ghiorse, 1989] ont montré que le nombre et l'activité métabolique des bactéries étaient indépendants de la profondeur, qu'elles se localisaient principalement dans les aquifères et qu'elles présentaient une association de plusieurs espèces. Cette dernière constatation est extrêmement importante puisque l'on peut raisonnablement supposer que les différentes espèces de bactéries en présence conjuguent leurs effets pour attaquer la roche ou les résidus produits par telle ou telle bactérie. Toutes ces nouvelles données rendent parfaitement réalistes l'éventualité d'une dissolution généralisée de type karstique de roches silico-alumineuses.

Les différentes observations réalisées permettent d'imaginer un schéma de mise en place de la grotte de Mfoula (fig. 5). Une zone de fracturation verticale, à l'emplacement de la vallée actuelle, draine les eaux de surface vers la profondeur. Le long des parois de ce drain, des fronts de dissolution se mettent en place latéralement à différentes profondeurs. Des colonies de bactéries activent les processus de dissolution. Dans l'hypothèse de bactéries chemolithotrophes, les différences de lithologie jouent un rôle important puisqu'elles déterminent la disponibilité en minéraux utiles pour ce type de micro-organismes. Le déve-

oppement de Mfoula à l'interface de deux faciès pétrographiques différents et la présence d'hétérogénéités à l'intérieur de la roche avec l'importance variable de minéraux plus ou moins altérables ont certainement facilité localement l'élargissement des cavités. La création de fronts de dissolution est, elle-même, guidée par les joints de schistosité sub-horizontaux. La coalescence de plusieurs cavités, dont témoignent les poches observées dans la paroi occidentale de la grotte, a finalement produit l'élargissement de la grotte actuelle. L'abaissement des thalwegs et le creusement récent des vallées au Sud-Cameroun sont dus à la surrection épirogénique des marges de la ligne volcanotectonique du Cameroun. Ce phénomène exonde les cavités du karst qui apparaissent maintenant ouvertes sur les flancs des collines. Dans la situation actuelle, il n'y a donc pratiquement plus de dissolution dans la grotte.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Les deux exemples de cavité abordés ici montrent la réalité des karsts en roches silicatées non carbonatées cohérentes, le terme karst pris dans le sens de « toutes formes caractéristiques de la suite karstique classique (grotte, lapiés, ...) où la dissolution a joué un rôle déterminant dans l'apparition des morphologies et ce quelque soit la lithologie considérée » [Willems, 2000]. Les différentes observations suggèrent que ces grottes se mettent en place à suffisamment grande profondeur pour être à l'abri des influences climatiques de surface. Dans les mêmes aires géographiques, d'autres cavernes ont été répertoriées dans des lithologies similaires notamment dans des micaschistes [Willems *et al.*, 1999] et des granites [Willems *et al.*, 1998a et b ; Willems, 2000]. Elles présentent de nombreuses similitudes avec celles présentées dans cet article. Elles démontrent, si besoin en était, que le terme karst ne doit pas être limité aux seuls calcaires mais peut être appliqué à toutes les lithologies.

Implications hydrogéologiques en contexte sahélien

Au Niger occidental, de grandes cavités et alvéoles sont connues au sein de formations non carbonatées du Tertiaire appelées Continental terminal. Ce sont des dépôts de grès, pélites et argiles qui font partie de la bordure sud d'un vaste bassin sédimentaire, le bassin des Iullemeden, et recouvrent les formations du substratum birimien. Pour certaines de ces grottes, les genèses par des processus de suffosion et écoulement des eaux peuvent être écartées sans ambiguïté et seule une dissolution généralisée des roches apporte une réponse satisfaisante à leur formation [Willems, 2000]. Il apparaît maintenant que non seulement la couverture sédimentaire, mais aussi le substratum cristallin sont creusés de cavités véritablement karstiques. Il est clair que cette situation a des conséquences dans les circulations hydriques et le développement des aquifères.

Estèves et Lenoir [1996] ont analysé le fonctionnement hydrologique d'un bassin situé dans les dépôts argilo-sableux du Continental terminal. Les eaux infiltrées doivent traverser une épaisseur de 45 mètres de strates sédimentaires avant d'atteindre le niveau de l'aquifère. Lors de la crue du 19 juillet 1993, Ces auteurs ont déterminé que cette tranche du Continental terminal était traversée par les eaux de surface en trois heures environ. De plus, ils ont calculé que la plus forte crue enregistrée durant cette année a con-

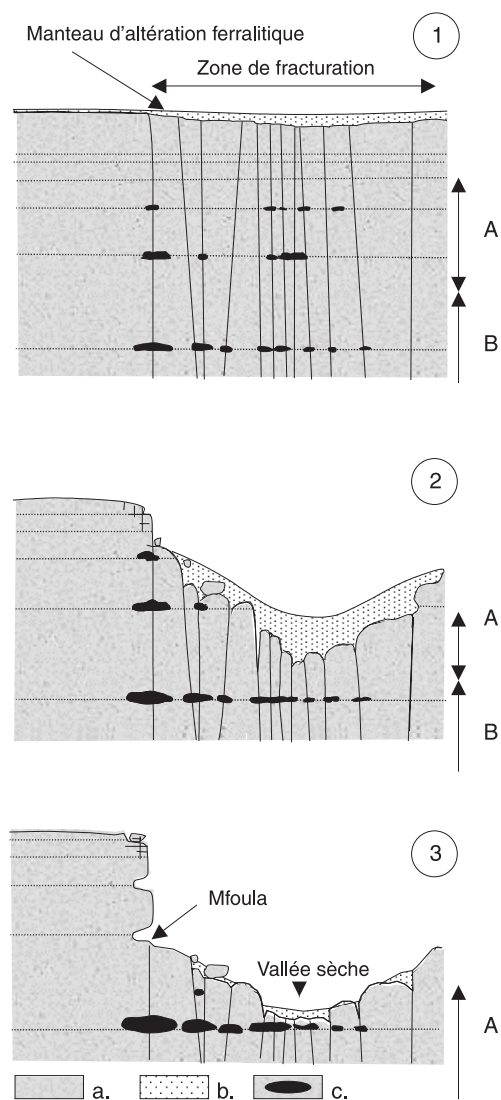


FIG. 5. – Mode de formation du karst de Mfoula. 1, formation des cavités dans les zones ennoyées à différents niveaux des nappes aquifères, le long des drains sub-horizontaux correspondant à la foliation et aux couches lithostratigraphiques. 2, creusement des vallées par érosion régressive guidée par les couloirs de fracturation servant également de drains verticaux. 3, niveau actuel des vallées et apparition des cavités exondées sur les flancs. A, zone vadose ; B, zone noyée. a : roches non altérées, b : manteau d'altération, c : Cavités.

FIG. 5. – Formation of the Mfoula cave. 1, formation of the cavities in the under-water levels of the successive aquifers, along sub-horizontal drains coinciding with the foliation and to the lithostratigraphical beds. 2, digging of the valleys by regressive erosion guided by the fracture zones which served for vertical drains. 3, present level of the valleys and coming out of the caves on the flanks. A, vadose zone ; B, drowned zone. a : fresh rocks, b : saprolite, c : caves.

tribué pour 32 % de l'alimentation annuelle de la nappe. Ces temps de transfert de l'eau de surface vers la nappe à travers des terrains en partie argileux et peu favorables à une infiltration rapide sont comparables à ceux répertoriés dans de nombreux massifs calcaires. Des vitesses de l'ordre de 1 à 24 km par jour sont généralement mesurées dans des calcaires fissurés ou à chenaux [Schoeller, 1962]. A titre de comparaison, Schoeller [1962] donne le chiffre de 35,3 mètres par jour pour des circulations d'eau à travers des grès ou des sables moyens, mais seulement 1,98 m/jour pour des silts, des sables fins et des lèss, et ce, pour des circulations verticales. Il semble donc bien qu'une circulation rapide s'effectue au travers des strates sédimentaires, dans des plans de fracturation où l'on peut voir un réseau de micro-chenaux débouchant sur des conduites décimétriques à métriques. Par ailleurs, Estèves et Lenoir ont montré que le niveau piézométrique de l'aquifère présente localement des points bas de drainage sous d'anciens thalwegs, observation comparable à ce qui peut être observé sous les vallées abandonnées des terrains calcaires.

Dans le substratum cristallin, on a vu que les mêmes processus de dissolution doivent être envisagés. Les études isotopiques des eaux menées par Ousmane *et al.* [1984] sur les aquifères à l'intérieur du socle ont montré que des nappes situées à plusieurs dizaines de mètres de profondeur sont alimentées de façon rapide à partir d'épisodes pluvieux et de crues exceptionnelles, sans que des phénomènes d'évaporation en surface n'interviennent de façon significative (étude menée sur 43 puits dont les profondeurs varient entre 30 et 76 m)

L'infiltration rapide des eaux constatée tant dans la couverture cénozoïque que dans le socle est due à l'existence de réseaux de cavités de type karstique. Les conséquences de ces karsts en région sahélienne sont analogues à ce qui se produit en terrain calcaire : sécheresse en surface et déplacement du niveau de base du gradient hydraulique des thalwegs vers le toit des nappes les moins profondes. Le climat semi-aride n'est donc pas le seul responsable du

manque d'eau superficiel et de l'existence de nombreuses vallées sèches. Dans le cas des dépôts du Continental terminal, l'importance du gradient hydraulique est limitée par la présence de niveaux argileux à différentes profondeurs, donnant naissance à un système d'aquifères multicouches [Greigert, 1979]. Une dissolution des formations se met en place préférentiellement au niveau de ces aquifères et génère la formation de cavités étagées comme celles que l'on retrouve dans la région de Niamey [Willems, 2000]. La mise en place de processus de suffosion n'intervient que tardivement dans la genèse des grottes, après assèchement des aquifères dans lesquels elles ont pris place. Les nombreuses ruptures de pentes trouvées dans le profil longitudinal des vallées, caractérisées par la disparition en amont de tout écoulement linéaire [Willems *et al.*, 1996] seraient dus à l'effondrement de grottes sous-jacentes aux thalwegs et qui s'effondrent préférentiellement de l'aval vers l'amont. Ce faisant, les processus généralisés de dissolution des formations du Niger occidental associés à la formation de cavités et à leur effondrement contribuent de façon majeure à la dissection des paysages et donc à la géomorphologie générale de cette région.

Le peu d'études consacrées aux karsts en roches non carbonatées silicatées dans de nombreuses régions du monde empêche souvent une évaluation correcte de leurs importances tant d'un point de vue hydrogéologique que géomorphologique. L'exemple du Niger occidental montre qu'en réalité, l'hydrogéologie et la géomorphologie des régions sahéliennes et sans doute également sahariennes sont très fortement influencées par des processus de dissolution creusant des cavités dans pratiquement n'importe quel type de terrain. La mise en évidence géomorphologique de ces processus doit systématiquement servir de guide à la recherche de réseaux karstiques susceptibles de receler des réserves en eaux.

Remerciements. – Les auteurs tiennent à remercier Messieurs Camille Ek et Alain Dassargues pour l'aide apportée à l'amélioration de cet article.

Références

- BELLARD-PIETRI E. (1974). – Exploration préliminaire du plateau de Sarrisarinama (Venezuela). Les gouffres Humboldt et Martel. – *Spe-lunca (4)*, **14/4**, 99-101.
- BENNETT P.C., MELCER M.E., SIEGAL D.I. & HASSETT J.P. (1988). – The dissolution of quartz in dilute aqueous solutions of organic acids at 25° C. – *Geochim. Cosmochim. Acta*, **52**, 1521-1530.
- EHRlich H.L. (1998). – Geomicrobiology : its significance for geology. – *Earth. Sci. Rev.* **45**, 45-60.
- ESTEVEs M. & LENOIR F. (1996). – Un exemple de fonctionnement hydrologique dans la région de Niamey : le bassin de Sama Dey. In M. HOEPFFNER, T. LEBEL & B. MONTENY (Eds.), Interactions surface continentale/atmosphère : l'expérience HAPEX-Sahel. – *ORSTOM Paris, Colloques et Séminaires, X^e journées hydrologiques*, sept. 1994, 225-239.
- GALAN C. (1982). – Notas sobre la morfología de la cueva autana y algunos comentarios generales sobre las formas pseudocarsicas desarrrolladas en cuarcitas del grupo Roraima, Guayana Venezolana. – *Bol. Soc. Venezolana Espel.* **10** (19), 115-128.
- GALAN C. (1988). – Cavernas y formas de superficie en rocas silíceas recamblicas del grupo Roraima, Guayana, Venezuela. – *Bol. Soc. Venezolana Espel.* **23**, 1-12.
- GALAN C. & LAGARDE J. (1988). – Morphologie et évolution des cavernes et formes superficielles dans les Quartzites du Roraima (Venezuela). – *Karstologia* n° **11-12**, 49-60.
- GREIGERT J. (1979). – Atlas des eaux souterraines du Niger, état des connaissances (mai 1978), les nappes du Continental terminal du synclinal de Dogondoutchi. – Pub. Minis. Min. et Hydr., éd. BRGM, Orléans, tome 1, fasc. V, 81-102.
- OUSMANE B., FONTES Ch., ARANYOSSY J.-F. & JOSEPH A. (1984). – Hydrologie isotopique et hydrochimie des aquifères discontinus de la bande sahélienne et de l'Aïr (Niger). – *I.A.E.A. – SM – 270/59*, 81-109.
- POUCLET A., PROST A.E., AMA-SALAH I. & LAPIERRE H. (1990). – Les ceintures birimiennes du Niger occidental (Protérozoïque inférieur), nouvelles données pétrologiques et structurales des formations métavolcaniques. – *C.R. Acad. Sci.*, Paris, **311**, II, 333-340.
- POUYLLAU M. & SEURIN M. (1985). – Pseudo-karst dans des roches grès-quartzitiques de la formation Roraima. – *Karstologia* n° **5**, 45-52.
- SCHOELLER H. (1962). – Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources. – Masson, Paris, 642 p.

- SINCLAIR J.L. & GHORSE W.C. (1989). – Distribution of aerobic bacteria, protozoa, algae, and fungi in deep subsurface sediments. – *Geomicrobiol. Journ.*, **7**, 15-31.
- STEVENS T.O. & MCKINLEY J.P. (1995). – Lithoautotrophic microbial ecosystems in deep basalt aquifers. – *Science*, **270**, 450-454.
- SZCZERVAN E. & URBANI F. (1974). – Carso de Venezuela, Parte 4 : Formas carsicas en areniscas precambrias del Territoria Federal Amazonas y Estado Bolivar. – *Bol. Soc. venez. Espeleol.* (Caracas), **5**, (1), 27-54.
- URBANI F. (1978). – Les karsts gréseux du Venezuela. – *Spelunca* (Paris), **18**, 1) 25-28.
- URBANI F. (1981). – Karst development in siliceous rocks, Venezuelan Guiana Shield. – Proceed, *8th intern. congress speleol.*, Bowling Green 1981, 548.
- URBANI F. (1993). – Quartzite caves in Venezuela. – *Caves and Caving*, **61**, 32-33.
- URBANI F. et SZCZERVAN E. (1975). – Formas pseudocarsicas en granito rapkivi precambrico, Territorio Federal Amazonas. – *Bol. Soc. Venez. espeleol.* (Caracas), **6** (12), 57-70.
- VICAT J.-P. & WILLEMS L. (1998). – Les karsts siliceux d’Afrique. In : J.P. VICAT & P. BILONG (Eds.), Géosciences au Cameroun. – *Coll. Géocam 1/1998* – Presses Univ. de Yaoundé, 139-145.
- VICAT J.P., LIPS B., POUCKET A., LEGER J.M. & WILLEMS L. (1997). – Phénomènes karstiques dans les roches plutoniques et métamorphiques du sud Cameroun. – *Karstologia*, **26**, 51-54.
- VICAT J.-P., WILLEMS L. & A. POUCKET (1998). – Phénomènes pseudo-karstiques et karstiques dans la couverture latéritique et le substratum plutono-métamorphique du Sud du Cameroun. In : J.P. VICAT & P. BILONG (Eds.), Géosciences au Cameroun. – *Coll. Géocam 1/1998*. – Presses Univ. de Yaoundé, 107-128.
- WILLEMS L. (2000). – Phénomènes karstiques en roches silicatées non carbonatées. Cas des grès, des micaschistes, des gneiss et des granites en Afrique sahélienne et équatoriale. – Thèse Doct., Univ. de Liège, Belgique, 257p.
- WILLEMS L., COMPERE Ph. & SPONHOLZ B. (1998a). – Study of siliceous karst genesis in eastern Niger. Microscopy and analysis of speleothems. – *Zf. Geomorph.*, Berlin – Stuttgart, **42/2**, 129-142.
- WILLEMS L., COMPERE Ph., SPONHOLZ B. & VICAT J.-P. (1998b). – Spéléothèmes des karsts siliceux du Niger et du Cameroun. In : J.P. VICAT & P. BILONG (Eds.), Géosciences au Cameroun. – *Coll. Géocam 1/1998*, Presses Univ. de Yaoundé, 128-138.
- WILLEMS L., LENOIR F., LEVECOQ J.M. & VICAT J.-P. (1993). – Evolution du relief au Niger occidental : rôle de la fracturation du socle précambrien et de la formation de pseudo-karsts au sein de la lithomarge et de la couverture sédimentaire. – *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **147**, sér. II, 97-102.
- WILLEMS L., POUCKET A. & VICAT J.-P. (1997). – Karsts non carbonatés au Cameroun méridional. L'exemple des grottes de Mfoula. – *Würzburger Geographische Arbeiten*, **89**, 14 p.
- WILLEMS L., POUCKET A., LENOIR F. & VICAT J.-P. (1996). – Phénomènes karstiques en milieux non-carbonatés. Etudes de cavités et problématique de leur développement au Niger occidental. – *Zf. Geomorph.*, Berlin-Stuttgart, Suppl.-Bd **103**, 193-214.
- WILLEMS L., VICAT J.-P. & POUCKET A. (1999). – Karst dans les micaschistes d’Akok Bekoé – Sud Cameroun. – *Bul. Soc. Géogr. de Liège*, Belgique, **37/2**, 5-18.
- WRAY R.A.L. (1997). – A global review of solutional weathering forms on quartz sandstones. – *Earth Sci. Rev.*, **42**, 137-160.

