

Phénomènes karstiques fossiles et actuels au sein des formations métamorphiques silico-alumineuses de la nappe pan-africaine de Yaoundé (Sud-Cameroun)

Jean-Paul Vicat^{a,b}, Hubert Mvondo^c, Luc Willems^d, André Pouclet^{b,*}

^a Département de géologie, université de N'Djaména, BP 1027 N'Djaména, Tchad

^b Institut des sciences de la Terre d'Orléans, UMR 6113, Université, BP 6759, 45067 Orléans cedex 2, France

^c Département de géologie, université de Yaoundé-1, BP 1616, Yaoundé, Cameroun

^d 197, rue Clémenceau, 4550 Villers-le-temple, Belgique

Reçu le 2 juillet 2001 ; accepté le 5 mars 2002

Présenté par Georges Pédro

Abstract – Fossil and present-time karstic phenomena in silico-aluminous metamorphic formations of the Pan-African nappe of Yaoundé (South-Cameroon). Numerous karstic features have been recognised in the non-carbonaceous micaschists and gneisses of the Yaoundé Pan-African nappe, south of Cameroon. It is shown that their formation was controlled by the structural features of the rocks. The wells and the pipes in the bedrock outcrops point out a current karstification process, resulting from the plagioclase dissolution by the acid rain waters. Hill wall alveoli and caves, of pre-Miocene age, are exhumed features that were done by dissolution in the aquiferous underground. **To cite this article: J.-P. Vicat et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 545–550.** © 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

silico-aluminous karst / dissolution / structural control / Pan-African / Cameroon

Résumé – Diverses formes karstiques ont été mises en évidence au sein des micaschistes et des gneiss non carbonatés de la nappe de Yaoundé. Leur formation est fortement contrôlée par les caractères structuraux des roches. Les puits et les conduits de paroi résultent d'une karstification actuelle, initiée par la dissolution des plagioclases sous l'effet des eaux pluviales acides. Les alvéoles de paroi et les grottes sont des formes exhumées anté-Miocène, dues à une dissolution en milieu noyé. **Pour citer cet article : J.-P. Vicat et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 545–550.** © 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

karst silico-alumineux / dissolution / contrôle structural / Pan-africain / Cameroun

Abridged version

1. Introduction and geological setting

Several karstic-like features are recognised in the silico-aluminous metamorphic rocks of the southern Cameroon [10–14] (Fig. 1). The area is a 600 to 800 m high plateau deeply eroded by a very active hydrological network. Climate is equatorial, very wet and moderately hot. The geological context consists of two units: (i) the Archaean

Ntem Complex [3] with greenstone belts and charnockitic to granitic rocks [7, 8], and (ii) the Yaoundé Group with gneisses and micaschists metamorphosed around 620 Ma and thrust above the Ntem complex during the Pan-African orogeny [4]. This paper focuses on the karstic features of the Yaoundé nappe gneisses. Their study shows (1) that these features are either presently generated by the acid rains, or are ancient and previously formed in watered zone and (2) that the structural patterns of the rocks control the alteration and dissolution processes.

* Correspondance et tirés à part.

Adresse e-mail : andre.pouclet@univ-orleans.fr (A. Pouclet).

2. Karstic features and structural control

A first type of karstic-like features corresponds to surface reliefs as *kamenitzas*, *lapies*, and sub-vertical *karrens* on the hill flanks, to vertical wells or pits, and to sub-horizontal pipes. It is characterised by a present-time water running, invasive vegetation, and the presence of clayey and sandy alteration products. The surface reliefs resulted from selective alteration along structural discontinuities such as fractures, lithological joints, schistosity, foliation and shearing planes. However, the *karrens* regularly disposed along the steeply slopes of the hills are only due to the rainwater rush down. Numerous wells, 20 to 80-cm averaged wide and about 1-m deep, can be seen on the hilltops and the upper flanks. They are clearly disposed along sub-vertical fractures (Fig. 2), which corresponds to the brittle pattern of the bedrock with three trending directions, mainly $N0^{\circ}$ – 10° and $N50^{\circ}$ – 70° , and secondly $N150^{\circ}$ – 170° . Hill wall pipes are located at sub-horizontal structural joints (Fig. 3). They are characterised by outpouring of water and by the precipitation of a whitish mixture of smectites and opal and of needles of quartz. These features show that a present-time karstification is in progress with infiltration of rainwater into the vertical fractures and exsurgence on the hill flanks along structural joints (schistosity, foliation and shear planes). The widening of the wells and of the pipes, and the precipitation of neogenic minerals at the pipe outlets indicate that dissolution processes are occurring.

A second type of karstic features corresponds to centimetric to metric alveoli and to more or less large caves dug into the cliff wall rocks. These holes are dry and devoid of alteration product deposition. The alveoli are set along the sub-horizontal structural discontinuities (Fig. 4). They are ellipsoidal and show a smooth inner surface (Fig. 5). Elongation of the mouth is parallel to the foliation plane. The internal wideness strongly reduces as a flatten cone shape. The direction of the axes of the cones, i.e. the internal development of the holes, is generally orientated NNE,

the same direction than that of the stretch lineation. The same direction is also shown by the axes of the sheath folds (Fig. 6). One can note that the shape of the alveoli resembles that of the sheath folds on the cliff walls (Fig. 7). Some large caves can only be explained by karstic processes [10, 11]. It is the case for the cave of Mfula (Fig. 1). In this cave, more than 5000 m³ large, 60 m deep and 10 m high, noticeable dissolution features are observed (Fig. 8). The internal shape, wideness and floor slope, and the development axis are controlled by the structural characteristics of the gneisses. Alveoli and caves being devoid of any water flow and of rock debris or alteration products, they are considered as fossil karstic cavities.

3. Discussion and conclusion

The present-day formation of cavities, as well as the digging of the fossil cavities, is strongly controlled by the structural patterns of the crystalline bedrock. It is observed that the surface alteration and the genesis of cavities are firstly due to the vanishing of the plagioclases [10]. These minerals suffered a rapid hydrolysis by the acid rains of pH 5 that we measured in the Yaoundé area. The removal of the plagioclases facilitates the infiltration of water along structural discontinuities, which leads to progressive enlargement of wells and pipes by dissolution effect. This process is presently working on the hilltops and flanks. It was also working in the deep and flooded substratum by the aquiferous nappe and gave the alveoli and caves (Fig. 9). These karstic objects now appear into sight on the hill flanks, as a consequence of epeirogenic surrection of the Cameroon Line, a volcano-tectonic event that took place in the Miocene. Thus, these objects are fossil and predated the Miocene. The pre-Miocene topographic surface is uplifted at about 1500 m [1, 2, 6]. Regressive erosion controlled by the fracturing pattern, causes denudation of massive blocks that undergo present-day karstification (Fig. 9). But it is very probable that a more developed karstification is also in progress in the deep aquifer.

1. Introduction et contexte géologique

Dans le Sud du Cameroun, de nombreuses formes comparables à celles rencontrées dans le modelé karstique s'observent au sein des roches cristallines silico-alumineuses [10–14] (Fig. 1). Leur genèse est attribuée essentiellement à de la dissolution bien que le milieu ne soit nullement carbonaté. C'est pour cette raison que nous utilisons le terme de karst [12]. La région fait partie du plateau sud-camerounais d'altitude comprise entre 600 et 800 m et comporte un réseau hydrographique très actif. Entre les vallées se dressent des collines en « demi-oranges », d'une centaine de mètres de hauteur. Le climat est de type équatorial humide, tempéré par l'altitude, avec une tem-

pérature moyenne de 29 °C et une humidité relative élevée toute l'année (80% en moyenne). Les précipitations sont comprises entre 1600 et 1900 mm. Une importante couverture d'altération latéritique masque une grande partie du substratum rocheux. Cependant, le relief, relativement accidenté, met à nu les formations rocheuses sur les flancs des collines et dans les vallées encaissées. On distingue deux ensembles géologiques : le complexe du Ntem et le groupe de Yaoundé. Le complexe du Ntem [3] appartient à la marge archéenne nord-ouest du craton du Congo. Il comprend des ceintures de roches vertes, encaissées dans des massifs charnockitiques et intrudées par des plutons de tonalites datés entre 2,9 et 2,8 Ga, de granites potassiques, vers 2,6 Ga et de syénites, vers

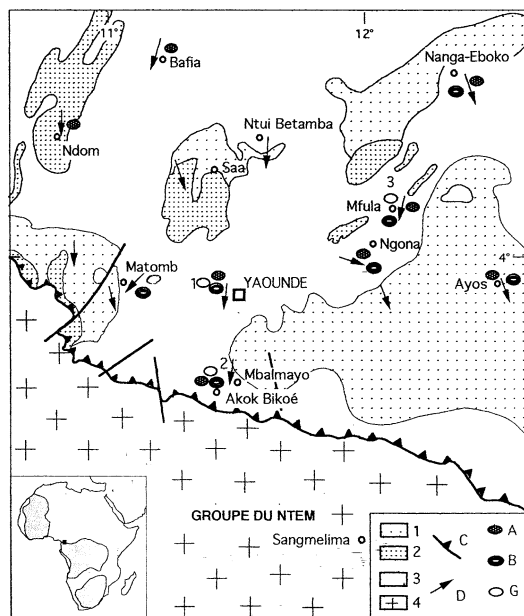


Figure 1. Carte géologique schématique du Sud-Cameroun et localisation des observations. 1–3, nappe de Yaoundé : 1, micaschistes ; 2, quartzites micacés ; 3, gneiss ; 4, groupe du Ntem ; A, alvéoles de paroi ; B, plis en fourreaux ; C, chevauchement ; D, linéation d'étirement (direction de transport de la nappe) ; G, grottes.

Figure 1. Geological sketch map of South-Cameroon and localisation of the observations. 1–3, nappe of Yaoundé: 1, micaschists; 2, micaceous quartzites; 3, gneiss; 4, Ntem group; A, cliff wall alveoli; B, sheath folds; C, thrust; D, stretch lineation (direction of the nappe transport); G, caves.

2,3 Ga [7, 8]. La partie nord-ouest de ce complexe a été déformée et métamorphisée par l'événement tectono-magmatique transamazonien vers 2,05 Ga [7–9]. Au nord, ce socle archéen est surmonté par le groupe de Yaoundé, constitué en nappes charriées vers le sud lors de l'orogénèse pan-africaine [4]. Ce groupe rassemble des formations métasédimentaires grésopélitiques, des orthogneiss et des intrusions granitiques datées du Méso- au Néoproterozoïque. L'ensemble a été structuré et métamorphisé vers 620 Ma [5, 9]. L'essentiel de la déformation est un grand mouvement tangentiel à vergence sud. Schistosités et foliations sont sub-horizontales et portent une linéation d'étirement d'orientation sensiblement nord-sud (Fig. 1). Le métamorphisme décroît depuis les migmatites et les gneiss à disthène de Yaoundé jusqu'aux micaschistes de la région de Mbalmayo. Dans la région de Yaoundé, le chevauchement vers le sud est matérialisé au sein des gneiss par de nombreux plis en fourreaux et par de grands cisaillements plats, indiquant un déplacement du compartiment supérieur vers le sud.

Cette étude s'intéresse aux formes karstiques apparaissant dans les gneiss de la nappe de Yaoundé. Nous montrons (1) que les formes observées sont, soit actuelles et formées à l'air libre sous l'effet des eaux

pluviales, soit fossiles et initialement formées en milieu noyé, et (2) que la structuration du substratum cristallin contrôle les processus d'altération et de dissolution.

2. Formes karstiques et relations structurales

Deux types de formes se distinguent par le fait qu'elles sont ou non empruntées par une circulation hydrique actuelle. Il s'agit, d'une part, de reliefs de surface et de puits verticaux généralement humides et envahis par de la végétation, et, d'autre part, d'alvéoles, de conduits de paroi et de véritables grottes, généralement secs. Nous examinons ici les relations entre ces morphologies et les caractères structuraux des roches.

La première catégorie, associée aux eaux pluviales et d'infiltration, est marquée par la présence de produits d'altération. Des coupelles de dissolution (kamenitzas) et des rigoles ou lapiez métriques à décimétriques se forment sur les surfaces sub-horizontales des gneiss et des micaschistes. Les discontinuités créées par les fractures, les diaclases et la foliation guident l'infiltration de l'eau et déterminent les zones d'altération, contrôlant ainsi la formation des micro-reliefs. Des cannelures verticales, d'espacement plurimétrique et de profondeur décimétrique, se localisent sur les flancs dénudés des collines. Dues au ruissellement des eaux pluviales, elles suivent la ligne de plus grande pente et ne semblent pas immédiatement liées à la structuration de la roche [10, 11]. Sur la plupart des collines au nord de Yaoundé, on observe des puits verticaux, plus ou moins inondés et plus ou moins remplis de produits d'altération sablo-argileux. La profondeur mesurable dépasse le mètre, pour un diamètre d'une cinquantaine de centimètres. Ces puits sont clairement disposés sur des fractures verticales (Fig. 2). En saison des pluies, des sources ou exurgences apparaissent sur les parois subverticales des collines. Ces exurgences se localisent au niveau de cavités centimétriques à section allongée, selon des joints subhorizontaux (Fig. 3). En fait, l'infiltration des eaux pluviales se fait au niveau des fractures subverticales de directions majeures N0°–10°E et N50°–70°E et de direction mineure N150°–170°E. La structuration des gneiss montre une foliation et des plans de cisaillement subhorizontaux, qui facilitent la formation des joints de décompression. Ces joints jouent le rôle de drain et les conduits de paroi résultent manifestement de leur élargissement par altération préférentielle et dissolution, la dissolution étant attestée par la précipitation d'opale, de smectites et d'aiguilles de quartz au débouché des conduits. Le développement actuel de ces cavités verticales et ho-



Figure 2. Puits sur une fracture verticale dans les gneiss de la colline de Mvog-Beti à Yaoundé.

Figure 2. Well located on vertical fracture in the gneisses of Mvog-Beti hill at Yaoundé.

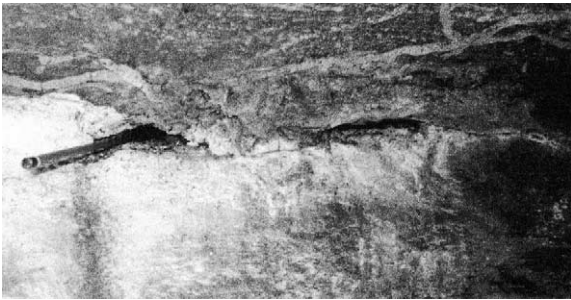


Figure 3. Conduits de paroi centimétriques sur un joint horizontal servant de drain dans les gneiss de la colline de Nkongméyos.

Figure 3. Centimetric hill wall pipes located on horizontal joint draining the meteoric water in the gneisses of Nkongméyos hill.

rizontales, par circulation des eaux pluviales et dissolution selon des joints structuraux, est responsable de l'évolution des reliefs, en facilitant le décollement de grands blocs de roches sur les flancs des collines. Ainsi se forment de vastes chaos de blocs décimétriques, entre lesquels peuvent exister des grottes secondaires, non karstiques, comme celle de Nkongméyos, près de Yaoundé (Fig. 1) [11].

Une deuxième série de phénomènes karstiques est caractérisée par la rareté ou par l'inexistence de produits d'altération. Ce sont les alvéoles de paroi et les grottes karstiques. Les alvéoles de paroi sont fréquentes dans la région de Yaoundé (Fig. 1). Elles ne sont pratiquement pas colonisées par la végétation et ne servent pas d'exurgence pour les eaux pluviales infiltrées. Elles s'observent sur les parois sub-verticales, où elles apparaissent le plus souvent allongées dans les plans de foliation horizontale des gneiss (Fig. 4). L'ouverture, de dimension décimétrique, est ellipsoïdale, avec un grand axe parallèle à la foliation, au plus égal à quatre fois le petit axe (Fig. 5). Vers l'intérieur, les dimensions diminuent rapidement. Une étude structurale réalisée sur plusieurs falaises au nord de Yaoundé montre que la plupart des alvéoles s'enfoncent en direction N10°E. C'est précisément la direction de la linéation d'étirement et celle de l'axe d'allongement des plis en fourreaux qui caractérisent le style structural de la nappe des gneiss de Yaoundé

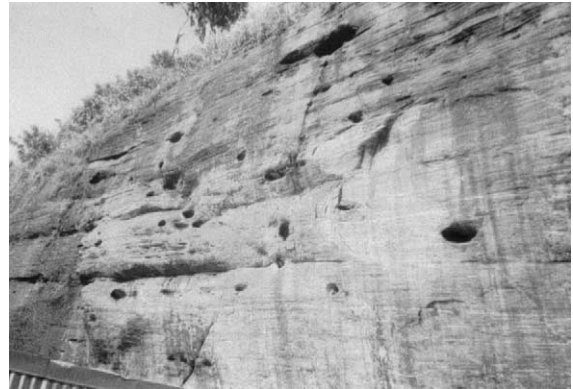


Figure 4. Alvéoles de paroi sur la falaise de la colline de Mvog-Beti à Yaoundé.

Figure 4. Cliff wall alveoli located on the Mvog-Beti hill at Yaoundé.



Figure 5. Alvéoles de paroi sur la colline de Mvog-Beti.

Figure 5. Cliff wall alveoli on the Mvog-Beti hill.

(Fig. 6). La forme des alvéoles est la même que celle des plis en fourreaux sur les parois rocheuses (Fig. 7).

Certaines grottes connues dans la région de Yaoundé sont, en fait, des abris sous roche ou des grottes de chaos rocheux. Toutefois, il en existe qui ne peuvent s'expliquer que par une dissolution généralisée du substratum, comme celle de Mfula [10, 11]. Cette grotte s'ouvre au flanc d'une falaise d'une colline de gneiss granulitiques, située à 80 km au nord-est de Yaoundé (Fig. 1). Les dimensions sont importantes : plus de 5000 m³. Après un vaste porche ellipsoïdal de 20 m de large et 8 m de haut, la cavité se développe sur 60 m de profondeur et 10 m dans sa plus grande hauteur, en laissant plusieurs piliers résiduels (Fig. 8). Elle s'enfonce en direction NNE. Le plancher est en légère pente de 10° vers le sud-est. Sur l'ensemble des parois, on observe de nombreuses alvéoles de dissolution, à section ovale décimétrique à métrique. Une cloche de dissolution d'environ 5 m de diamètre occupe le plafond central. La grotte de Mfula présente les caractéristiques des grottes karstiques développées en roches carbonatées [12]. Actuellement, aucune circulation d'eau ne sort de la grotte, qui est donc une forme fossile. La forme généralement ellipsoïdale, avec un grand axe sub-horizontale, la pente du

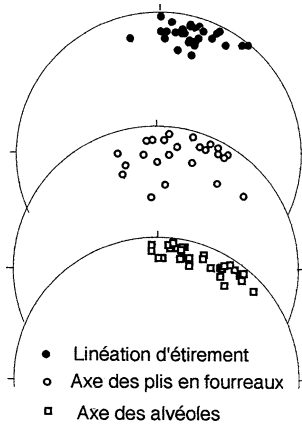


Figure 6. Projection stéréographique (Canevas de Schmidt, hémisphère inférieur) de la linéation d'étirement, des axes de plis en fourreaux et des axes des alvéoles. Mesures réalisées sur la falaise de Mvog-Beti à Yaoundé. Noter la bonne superposition de ces directions.

Figure 6. Stereographic projection (Schmidt net, lower hemisphere) of the stretch lineation, sheath folds axes and cliff wall alveolus axes. Measurements made on the cliff of Mvog-Beti at Yaoundé. Note the good consistency of these directions.



Figure 7. Plis en fourreau sur la falaise de la colline de Mvog-Beti. Une petite alvéole de dissolution s'observe dans un pli du bas de la photo. De petites figures de dissolution de zones riches en plagioclases apparaissent en haut et à droite du pli du centre de la photo.

Figure 7. Sheath folds at the Mvog-Beti hill cliff. A small cliff wall alveolus is seen in a fold at the lower part of the photo. Some small dissolution features due to dissolution of plagioclases are located in the upper right of the fold at the middle of the photo.

plancher ainsi que les axes l'allongement des alvéoles des parois sont strictement contrôlés par les caractères structuraux des gneiss. Les gneiss montrent en effet une foliation et des plans de cisaillement subparallèles, faiblement pentés vers le sud-est, et une linéation d'étirement bien marquée NNE–SSW. Il apparaît donc que la grotte de Mfula, comme quelques autres du Sud-Cameroun (Akok Békoé, Matomb..., Fig. 1), peut s'expliquer par le développement extrême d'alvéoles de paroi. Le creusement de ces cavités a dû se faire en milieu inondé par un aquifère, bien avant l'individualisation des collines dans le paysage. L'absence de résidus solides et les morphologies



Figure 8. Intérieur de la grotte de Mfula : vue sur la salle principale. La hauteur sous plafond est d'environ 6 m.

Figure 8. Sight of main chamber of the Mfula cave. The rise under roof reaches about 6 m.

de type karstique, alvéoles de parois et colonnes, indiquent que la dissolution a joué un rôle prédominant dans la formation de telles cavités [12].

3. Discussion et conclusion

Les formes d'altération actuelles (microreliefs, puits et trous de paroi) résultent de l'action des eaux pluviales et d'infiltration. Des réseaux de cavités se forment au sein des masses rocheuses, qui sont contrôlés par les joints structuraux : diaclases et fractures subverticales héritées d'anciens grands décrochements, d'une part, plans de foliation et de cisaillement liés à la mise en place des nappes pan-africaines, d'autre part. On observe que l'altération en surface et le développement des cavités sont liés à la disparition des plagioclases, ce qui conduit à la désagrégation de la roche, plus ou moins rapidement en fonction de l'abondance de ce minéral. L'altération rapide des plagioclases peut s'expliquer par l'acidité des eaux pluviales qui ont un pH moyen de 5 dans la région de Yaoundé, d'après nos mesures.

Les formes karstiques fossiles, grottes et alvéoles de paroi, se sont développées au sein d'un aquifère profond, avant la surrection des reliefs (Fig. 9). Les processus de dissolution dans cet aquifère et la formation des cavités ont été clairement contrôlés par les caractères structuraux. Ainsi, les alvéoles de paroi résultent de la dissolution des plis en fourreaux dont le cœur est essentiellement constitué d'agrégats quartzofeldspathiques. Elles se développent selon l'axe d'allongement de ces plis, qui correspond à la direction de contrainte structurale majeure. L'aspect lisse de l'intérieur des alvéoles, qui diffère de l'aspect carié des surfaces altérées soumises à l'action des eaux pluviales, montre que la dissolution des différents minéraux s'est produite malgré leurs faibles coefficients de dissolution. La formation de vastes grottes comme celle de Mfula peut s'expliquer par le fait que la roche,

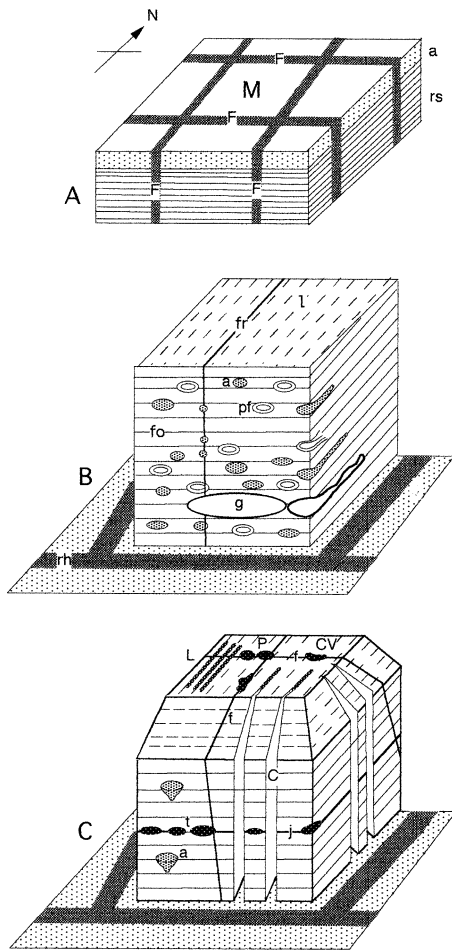


Figure 9. Histoire de la karstification (représentation schématique, sans échelle). **A.** Fin Crétacé à Paléocène : **M**, massif rocheux limité par de grandes fractures du substratum, **F**, qui drainent les eaux de surface ; **a**, manteau d'altération ; **rs**, substratum cristallin. **B.** Exhumation du massif rocheux du Plio-Pléistocène au Quaternaire : **a**, alvéoles de paroi ; **pf**, plis en fourreaux ; **g**, grottes ; **l**, linéation d'étirement ; **fo**, foliation ; **fr**, fracture ; **rh**, réseau hydrographique. **C.** Évolution actuelle : **L**, lapiez ; **P**, puits ; **CV**, coupelle de dissolution ; **f**, fracture ; **C**, cannelure ; **j**, joint sub-horizontale ; **t**, conduit de paroi ; **a**, alvéole de paroi fossile, évasée par le ruissellement des eaux pluviales.

Figure 9. History of the karstification (sketch cartoon, no scales). **A.** Late Cretaceous to Palaeocene: **M**, massive block bordered by vertical fractures of the substratum, **F**, draining the meteoric water; **a**, alterite cover; **rs**, crystalline bedrock. **B.** Plio-Pleistocene to Quaternary come-into sight of the block: **a**, cliff wall alveoli; **pf**, sheath folds; **g**, caves; **l**, stretch lineation; **fo**, foliation; **fr**, fracture; **rh**, hydrographic network. **C.** Present-time evolution: **L**, lapiez; **P**, well; **CV**, kamenitza; **f**, fracture; **C**, groove; **j**, sub-horizontal joint; **t**, hill wall pipe; **a**, ancient cliff wall alveolus widened by rain falling.

un gneiss mafique à grenat et amphibole, est riche en plagioclase, minéral le plus facilement hydrolysable.

Le relief actuel très accidenté du Sud-Cameroun résulte de la surrection de la Ligne du Cameroun, phénomène volcano-tectonique apparu au Miocène. Cette surrection a disséqué la péninsule du Crétacé et du Paléogène [1, 6]. Cette surface a été portée à 1500 m d'altitude dans le Sud-Cameroun [2]. Les

alvéoles et les grottes se seraient développées au sein de la nappe aquifère pré-Miocène, avant d'être exhumées (Fig. 9B); ce sont donc des formations anté-Miocène. En revanche, les formes associées à une circulation d'eau, puits et trous de paroi, sont actuelles (Fig. 9C). Il est cependant probable que des processus karstiques analogues à ceux qui ont donné les formes fossiles se produisent actuellement en profondeur, dans la nappe aquifère.

Références

- [1] L.C. King, La géomorphologie de l'Afrique du Sud. Recherches et résultats, *Ann. Géogr.* 336 (1954) 113–129.
- [2] M. Kuete, Étude géomorphologique du plateau sud-camerounais à l'ouest du 13°E, thèse d'État, université Bordeaux-3, 1990, 917 p.
- [3] M. Lasserre, D. Soba, Âge libérien des granodiorites et des gneiss à pyroxènes du Cameroun méridional, *Bull. BRGM* 2 (1976) 17–32.
- [4] J.P. Nzenti, P. Barbey, J. Macaudière, D. Soba, Origin and evolution of high-grade Yaoundé gneiss (Cameroon), *Precambrian Res.* 38 (1988) 91–109.
- [5] J. Penaye, S.F. Toteu, W.R. Van Schmus, J.P. Nzenti, U–Pb and Sm–Nd preliminary geochronologic data on the Yaoundé series, Cameroon: re-interpretation of the granulitic rocks as the suture of a collision in the 'Centrafrican' belt, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II* 317 (1993) 789–794.
- [6] M. Petit, Les grands traits morphologiques de l'Afrique centrale atlantique, in: R. Lanfranchi, D. Schwartz (Eds.), *Paysages quaternaires de l'Afrique centrale atlantique*, collect. didact. Orstom, 1990, pp. 21–30.
- [7] R. Tchameni, Géochimie et géochronologie des formations de l'Archéen et du Paléoproterozoïque du Sud-Cameroun (Groupe du Ntem, Craton du Congo), thèse, université d'Orléans, 1997, 356 p.
- [8] R. Tchameni, K. Mezger, N.E. Nsifa, A. Poulet, Neoproterozoic crustal evolution in the Congo craton: evidence from the K-rich granulites of the Ntem Complex, southern Cameroon, *J. Afr. Earth Sci.* 30 (2000) 133–147.
- [9] S.M. Toteu, W.R. Van Schmus, J. Penaye, J.B. Nyobe, U–Pb and Sm–Nd evidence for Eburnian and Pan-African high-grade metamorphism in cratonic rocks of southern Cameroon, *Precambrian Res.* 67 (1994) 321–347.
- [10] J.-P. Vicat, B. Lips, A. Poulet, J.-M. Léger, L. Willems, Phénomènes pseudo-karstiques dans les roches plutoniques et métamorphiques du Sud du Cameroun, *Karstologia* 29 (1997) 17–22.
- [11] J.-P. Vicat, L. Willems, A. Poulet, Phénomènes pseudo-karstiques et karstiques dans la couverture latéritique et le substratum pluto-métamorphique du Sud du Cameroun, in: J.-P. Vicat, P. Biling (Eds.), *Géosciences au Cameroun*, Geocam, 1/1998, Presses de l'université Yaoundé-1, 1998, pp. 107–128.
- [12] L. Willems, Phénomènes karstiques en roches silicatées non carbonatées. Cas des grès, des micaschistes, des gneiss et des granites en Afrique sahélienne et équatoriale, thèse, université de Liège, Belgique, 2000, 257 p.
- [13] L. Willems, A. Poulet, J.-P. Vicat, Karsts non carbonatés au Cameroun méridional. L'exemple des grottes de Mfoula, *Würzburger Geo. Arbeiten*, Würzburg 92 (1997) 225–238.
- [14] L. Willems, J.-P. Vicat, A. Poulet, Karst dans les mica-schistes d'Akok Bekoé (Sud-Cameroun), *Bull. Soc. géogr. Liège* 37 (1999) 5–18.