

LE MONDE SOUTERRAIN

La genèse des cavernes

par

Camille EK

Abstract.- The underground world. Cave formation

The underground landscape consists of pits, shafts, galleries, halls: a lot of hollow forms offering a wide variedness. Their genesis is briefly described. Water is the main erosion agent of these forms, and corrosion the most original process of the underground world. Air is also an important parameter, because the content of carbon dioxide of the cave atmosphere governs the acidity and the aggressiveness of water.

A recently discovered process of cave genesis is the formation of underground weathering nodes by phreatic water, without any solid removal; this process leads to disintegrated masses that, later, by other processes, may be emptied and hollowed out.

More and more caves are also being discovered and studied in non-carbonate rocks, including granite, gneiss, quartzite, etc. These cavities are also, at least partly, due to dissolution or chemical or biochemical processes.

Despite the apparent remoteness of the dark kingdom, caverns are not indifferent to man. They can give him joy, by tourism, but also rise problems through collapses and breakdowns, unexpected floods or by the transmission of pollution. Any human work in a cavernous area deserves and requires a very sensible and systemic preliminary study.

Résumé.- Le paysage souterrain présente des puits, des fissures, des galeries, des salles : une vaste variété de formes, dont la genèse est brièvement décrite. L'eau est l'agent principal de leur creusement, la corrosion le processus le plus original. Mais l'atmosphère souterraine est aussi un paramètre important car c'est la teneur de l'air des grottes en dioxyde de carbone qui régit celle de l'eau et donc l'agressivité de celle-ci.

Un processus original récemment mis en évidence pour la genèse des cavités est la formation sous terre de noyaux d'altération (parfois appelés fantômes de roches) dans lesquels les particules les plus facilement solubles sont emportées par les eaux de la nappe, laissant un squelette de roche désagrégé que, plus tard, les mécanismes physiques peuvent éliminer.

De plus en plus de grottes sont signalées et étudiées dans des roches non carbonatées, granites, gneiss, quartzites, etc. Là aussi la dissolution ou d'autres processus d'altération chimique ou biochimique sont à l'origine du creusement.

Le monde des ténèbres nous semble lointain. Il n'est pourtant pas sans influence sur notre vie. Il peut nous donner bien du plaisir (avec quelques frissons parfois) par le tourisme ; il peut aussi nous causer des problèmes par des effondrements, des inondations, ou la transmission rapide de pollutions à grande distance.

Aussi tout établissement par l'homme de constructions ou de structures de génie civil en terrain caverneux nécessite absolument une étude préliminaire soigneuse, précise et systématique. Notre paix avec le royaume de Hadès est à ce prix.

1. Introduction

L'obscurité et le silence caractérisent le monde souterrain, univers minéral si l'on veut, mais que le spéléologue ressent plutôt comme un univers vide tapissé de pierre et d'eau.

Une grotte est une cavité au sein de l'écorce terrestre. On n'emploie guère le mot que quand l'homme peut pénétrer dans ce vide. Mais on sait aussi que les grottes se prolongent par des vides plus étroits et impénétrables, parfois aussi par des gouffres gigantesques.

Indépendamment des dimensions, c'est sans doute le silence du monde souterrain, seulement rompu parfois par le bruit des gouttes d'eau, et l'obscurité totale, qui elle n'est rompue que par l'éclairage éventuel d'un intrus, qui caractérisent cet univers. Obscurité et silence qui amènent inéluctablement chez l'explorateur les idées de permanence - sinon d'éternité - et d'immobilité. Enfin, pour le bienheureux qui peut pénétrer seul sous terre, il y a une opportunité unique de se rencontrer lui-même, chose si difficile à la surface de la terre.

Mais ce n'est pas le visiteur de la grotte que nous voulons retrouver ici. C'est la caverne elle-même, sous tous ses aspects. Comme c'est l'eau qui creuse la cavité, nous allons donc suivre celle-ci et pénétrer sous terre à la suite des filets qui s'infiltrent, ou des trombes qui dévalent les gouffres.

2. Le paysage souterrain

2.1. Puits et fissures

C'est très généralement l'eau qui creuse les grottes. Venant de la surface, elle s'enfonce dans le massif par des puits ou des fissures.

Les entrées les plus spectaculaires sont évidemment les puits. Nombre de ceux-ci dépassent cent mètres de verticale d'un seul jet. Nous ne citerons que les puits de las Golondrinas (Mexique) : 333 m, ou celui d'Aphanize (France) : 328 m, mais il y en a nombre d'autres et de plus profonds qui seraient à citer (Courbon et Chabert, 1986).

Toutefois c'est le plus souvent par des fissures verticales ou subverticales impénétrables que l'eau pénètre dans le sous-sol.

Les puits témoignent d'un passage de l'eau en grande quantité en un seul point : un cours d'eau s'est enfoui là. Les fissures révèlent des infiltrations plus diffuses qui ont permis à l'eau de gagner les profondeurs.

Puits et fissures conduisent l'eau vers le niveau de base des réserves souterraines.

2.2. Conduits souterrains

Les eaux karstiques sont très généralement drainées vers les fonds de vallée où elles réapparaîtront au niveau des cours d'eau de surface, sous forme de sources karstiques ou de résurgences. Une résurgence est la réapparition au jour d'un cours d'eau qui s'est enfoui sous terre (par une perte, éventuellement un puits), a fait un parcours souterrain plus ou moins long (parfois plusieurs dizaines de kilomètres) puis *rémerge*.

Les conduits souterrains ont des formes très variées. Nous nous limiterons ici à décrire les types les plus fondamentaux et les plus fréquents.

Il y a d'abord les conduits qui se forment et fonctionnent alors que la circulation karstique est jeune et que, par conséquent, les cavités ne peuvent pas accueillir et évacuer souterrainement la totalité des eaux de précipitation sur le bassin. Les eaux remplissent alors tous les vides disponibles et, dans les moments de crue tout au moins, il n'y a pas de place pour l'air dans les conduits. Il est évacué par le haut ; les eaux remplissent tous les vides souterrains, circulent en conduite forcée et creusent donc des conduits cylindriques que les spéléos appellent des « tubes ».

Les eaux élargissent les passages et ceux-ci finissent par ne plus être remplis d'eau jusqu'au plafond. Les galeries évoluent alors en cours de rivières souterraines : l'eau les parcourt avec une surface libre au-dessus de laquelle c'est l'air qui remplit le conduit. Les crues et étiages, qui se manifestaient dans les conduites forcées par les changements de pression et de vitesse, se traduisent maintenant par des variations du niveau de l'eau dans le conduit.

L'abaissement éventuel du niveau de base, par exemple du fait que les rivières épigées s'encaissent dans le relief, provoque des recreusements et donc des modifications morphologiques des galeries (figure 1).

Les conduits des rivières souterraines peuvent aussi comporter des siphons, caractérisés par un abaissement du plafond : la surface de l'eau touche alors la voûte de la cavité : celle-ci est « noyée » sur une certaine longueur.

Lorsque le niveau d'une nappe aquifère se stabilise très longtemps à une même altitude, ou, sans être immuable, y revient très souvent, la corrosion de la roche à cette altitude se traduit par un plafond plat.

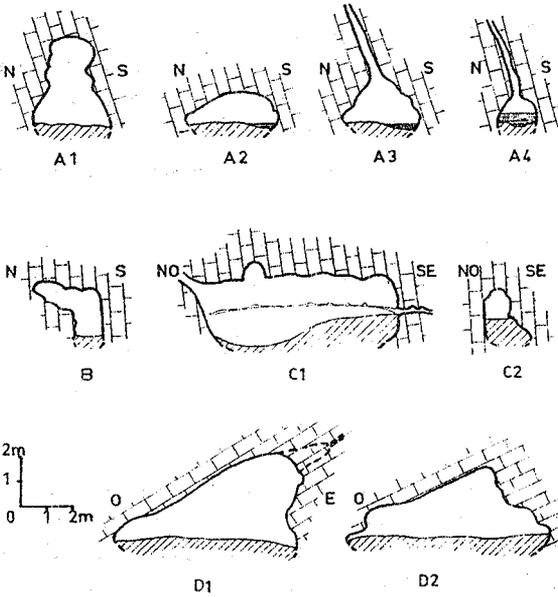


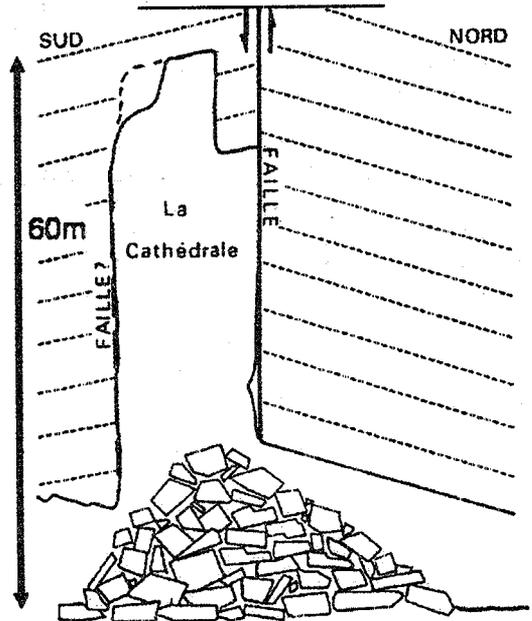
Figure 1. Quelques sections transversales de galeries dans les grottes de Belgique

- A. A la grotte Sainte Anne, à Tilff
- B. A la grotte du pont d'Esneux
- C. A la grotte Jaminon, à Cornesse
- D. A la grotte de Remouchamps

Les sections A1 et A2 proviennent de l'action d'une rivière qui a, en A2, donné une forme elliptique à la galerie et, en A1, creusé successivement à deux niveaux différents, formant deux « tubes » superposés. En A3 et A4 on voit que c'est une fissure qui a, à l'origine, localisé la galerie. En D1 et D2, la pente du plafond de la galerie est visiblement déterminée par le pendage de la roche. On notera que la forme du fond des galeries est généralement masquée par un remplissage meuble (Ek, 1961).

Figure 2. La Cathédrale, salle d'effondrement à Remouchamps.

La Cathédrale est dans une région très faillée de la grotte, ce qui a fort probablement favorisé les écroulements. Les blocs effondrés sont tombés jusque dans la rivière souterraine qui draine la cavité, et leur évacuation progressive à l'état dissous permet aux éboulements de se renouveler. Le trait horizontal au-dessus de la grotte représente la surface du sol et montre le danger que représenterait actuellement la continuation des écroulements au plafond de la salle.



Les galeries des grottes peuvent se développer sur de grandes longueurs et, si on compte les galeries affluentes, les diffluentes, les niveaux successifs, etc., les cavités peuvent atteindre plusieurs centaines de km de développement (590 km pour Mammoth Cave, Kentucky, et 215 km pour Optimisticeskaya en Ukraine, par exemple).

2.3. Salles

La confluence de deux ou plusieurs galeries, ou d'autres facteurs, peuvent amener à la naissance d'élargissements de la cavité qui prennent le caractère de salles.

Celles-ci peuvent atteindre un volume dépassant le million de mètres cubes, comme à Sarawak (Malaisie).

Les salles sont fréquemment jonchées d'éboulis. Certes, tout éboulement, dans les grottes, suppose la présence préalable, sous lui, d'un creux au moins égal au volume éboulé, et généralement plus grand, puisqu'il y a plus de vides entre les blocs effondrés qu'entre les bancs originellement en place. Mais un éboulement modeste peut se produire dans une salle au fond de laquelle circule un cours d'eau et celui-ci peut emporter en solution la roche écroulée, faisant ainsi la place pour un nouvel effondrement, et ainsi de suite. Ceci n'est évidemment possible que si des eaux agressives peuvent parcourir une partie de la base de l'éboulement et s'évacuer (figure 2).

3. Spéléogénèse

3.1. Les eaux souterraines

Les eaux souterraines de surface s'engouffrent parfois sous terre par des puits absorbants. Les entrées massives d'eau constituent des pertes ou ponors (en Belgique on dit souvent chantoirs ou chantoires), et sont un des traits caractéristiques des régions calcaires. Parfois ce sont de vrais puits, parfois des galeries subhorizontales ou en pente faible.

Mais le plus souvent les eaux s'infiltrent par des fissures à partir d'un plateau surincombant. L'eau coule alors très lentement à cause de l'étroitesse des fissures, et traverse la masse rocheuse par gravité, après avoir traversé le sol superficiel où elle dissout du dioxyde de carbone dégagé par la biomasse. Ces eaux sont dès lors agressives vis-à-vis du calcaire, car celui-ci, très peu soluble dans l'eau pure, passe sous l'action du dioxyde de carbone à l'état de bicarbonate, qui est, lui, beaucoup plus soluble. Du fait de la grande lenteur de la circulation fissurale, l'eau ne peut exercer sur la roche aucune action mécanique d'érosion, et c'est l'action chimique seule qui joue pour élargir très progressivement les joints.

Lorsque les fissures sont élargies, l'eau peut circuler plus vite ; des courants confluent, et, avec l'augmentation de la vitesse et des débits lors des crues, les actions mécaniques font leur apparition : des particules arrachées aux parois sont transportées, pour être redéposées plus en aval. Dans certains cas, et, par exemple, dans la rivière

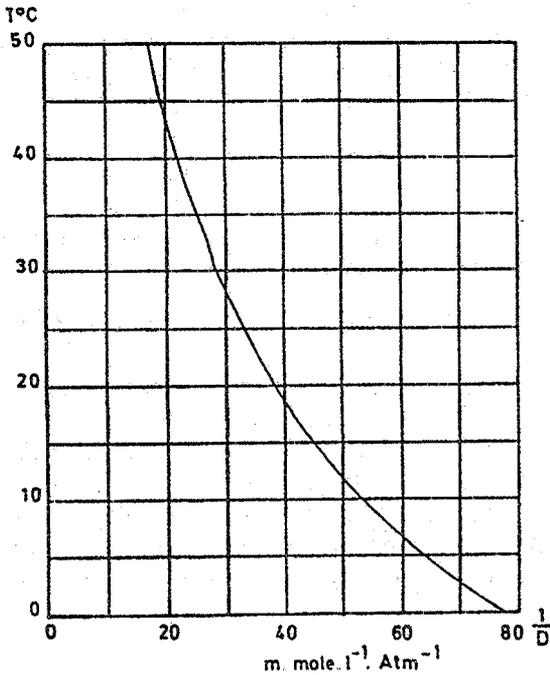


Figure 3. Coefficient de dissolution du CO_2 dans l'eau (H. Roques, 1964).

La loi de Henry exprime que la concentration en CO_2 dissous dans l'eau est liée à la pression partielle de celui-ci dans l'air surincombant par un coefficient qui varie avec la température

$$[\text{CO}_2]_{\text{eau}} = \frac{1}{D} P_{\text{CO}_2 \text{ air}}$$

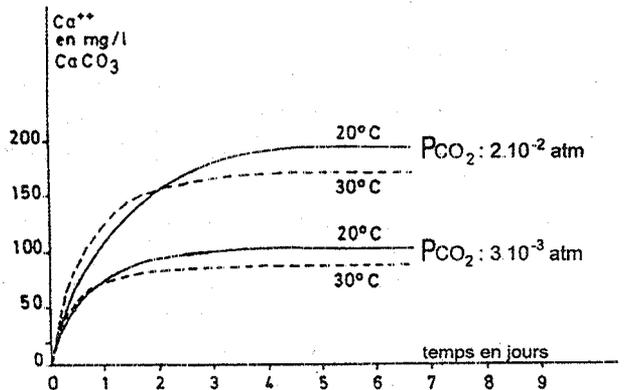
Ce coefficient varie avec la température : à pression égale dans l'air, plus il fait chaud et moins il y a de CO_2 dissous dans l'eau. On aurait tendance à en déduire que c'est dans les régions froides que les eaux sont les plus riches en CO_2 , donc plus agressives vis-à-vis du calcaire, et que les plus grandes grottes en terrain calcaire seraient à rechercher dans les zones climatiques froides. Mais dans la nature, c'est généralement dans les régions chaudes qu'il y a le plus de CO_2 dans l'air du sol et du sous-sol. Et c'est là que sont les cavités les plus vastes.

Figure 4. Vitesse de dissolution de la calcite, en fonction de la température et de la teneur de l'eau en CO_2 , d'après des expériences de T. Stchouzkoy-Muxart, 1971 (légèrement simplifié).

On voit que sous une pression partielle de $2 \cdot 10^{-2}$ atm. de CO_2 , on peut dissoudre presque le double de calcaire de ce qu'on fait à une pression partielle de $3 \cdot 10^{-3}$ atm.

À 20°C , la dissolution est en fin d'expérience un peu plus importante qu'à température plus élevée (30°C). En effet, à pression partielle de CO_2 égale au-dessus de la solution, il y a plus de CO_2 dans l'eau, et donc plus d'agressivité potentielle, à 20° qu'à 30° (loi de Henry)

Enfin, l'attaque du calcaire, en début d'expérience, le premier jour, est plus rapide à température plus élevée. La chaleur accélère les réactions.



souterraine de la grotte de Remouchamps, il y a transport de sable et de limon, et il n'y a pratiquement plus de dissolution.

En résumé, en eau calme ou circulant lentement, les actions chimiques s'exercent seules. Dans les rivières souterraines, la dissolution peut décroître, parfois jusqu'à cesser, et le transport des matières solides prédominer.

La dissolution chimique est donc le processus originel, qui permet l'élargissement des conduits. C'est le caractère original du karst, et sans lui, le développement des cavernes ne pourrait démarrer.

C'est le caractère acide de l'eau qui peut lui fournir l'agressivité vis-à-vis du calcaire. Cette acidité provient en général du dioxyde de carbone dissous. Celui-ci était présent dans l'air atmosphérique à la teneur de 3.10^{-4} au début du vingtième siècle ; il est de $3,8 \cdot 10^{-4}$ actuellement. Mais dans les sols s'ajoute le gaz carbonique d'origine biologique, en beaucoup plus grande abondance, jusqu'à 5 à 10 %.

D'autres acides peuvent aussi donner de l'agressivité à l'eau vis-à-vis des roches carbonatées. Ce sont les acides inorganiques, comme l'acide nitrique produit par l'oxydation de l'ammoniaque, ou l'acide sulfurique provenant de l'altération de la pyrite, etc., ou encore des acides organiques produits par la décomposition des végétaux par exemple. Tous ces agents de dissolution du calcaire sont toutefois très généralement bien moins importants que le dioxyde de carbone.

3.2. L'air

L'air des grottes est généralement en relation d'une part avec l'air atmosphérique et d'autre part avec l'air du sol. Certaines grottes ont des entrées si vastes reliées par des galeries si larges et ventilées par des courants d'air que leur atmosphère est pratiquement semblable à celle de l'air libre. C'est le cas, par exemple, de Teng Long Dong (Province de Lichuan, Chine), où la teneur en CO_2 de l'air varie, dans les galeries principales, entre 350 et 500 ppm (Ek & al., 1989). A l'autre extrême on peut citer la grotte de Saint-Léonard (Québec) qui avait été fermée pendant onze ans par un épais remblai de terre, et dont l'atmosphère n'était donc en contact qu'avec l'air du sol. Le jour de sa réouverture, la pression partielle de dioxyde de carbone était de 1600 à 3500 ppm (Ek & al., 1981).

La majorité des grottes sont dans une situation intermédiaire entre ces deux extrêmes. La teneur de l'air en gaz carbonique est donc en général très nettement plus élevée qu'à l'extérieur. Ceci a son intérêt du fait que, en fonction de la loi de Henry, il y a tendance à l'établissement d'un équilibre entre la pression partielle du CO_2 dans l'air et sa teneur dans l'eau (figure 3). Par conséquent, plus la teneur de l'air surimcombant en CO_2 est élevée, plus les eaux ont tendance à s'acidifier et à être agressives (figure 4).

Le dioxyde de carbone est généralement plus abondant, d'une part à proximité des fissures en relation avec la couverture pédologique, et d'autre part dans les endroits confinés, à l'abri des échanges avec l'air libre atmosphérique.

Deux autres caractères importants de l'atmosphère souterraine sont la constance de la température et la forte humidité en général.

Les cavités souterraines sont à l'abri du rayonnement solaire. Dès qu'on a fait quelques mètres dans une grotte - quelques dizaines de mètres si l'entrée est très spacieuse

ou si un cours d'eau pénètre dans la caverne - on est à l'abri des variations journalières. Un peu plus loin, même les variations saisonnières s'estompent puis disparaissent. L'espace souterrain est dès lors à température constante, et cette température est surtout commandée par la température moyenne annuelle en surface.

La situation peut être modifiée si la grotte a plusieurs entrées à des altitudes différentes. Dans ce cas, l'air de la grotte, plus chaud en hiver - et donc moins dense - a tendance à sortir par l'entrée supérieure, ce qui crée un courant d'air. Celui-ci s'inverse en été. C'est ce qu'on appelle l'effet de tube à vent.

L'atmosphère des grottes est généralement très humide et, dans nos régions, à partir d'une certaine distance de l'entrée, saturée d'humidité. Ceci est lié à la descente des eaux des précipitations vers la nappe aquifère, et est une marque caractéristique et permanente du climat souterrain.

3.3. Les parts respectives de la dissolution et de l'érosion mécanique

a. - les premiers temps de la karstification

Au début du processus, lorsque les fissures n'ont pas encore été ouvertes, l'eau circule très lentement et la dispersion des filets d'eau ne donne, en chaque endroit, que des débits minimes. Or, à des vitesses inférieures à 10 cm/sec, l'eau ne peut rien transporter, pas même le plus fin grain de sable ou de limon.

La corrosion chimique peut par contre très bien s'exercer sur la roche : l'eau qui sourd des fissures contient couramment l'équivalent de 200 à 300 mg de calcaire dissous par litre.

b. - l'évolution des processus

L'élargissement progressif de certaines fissures et la concentration des filets d'eau finit par permettre un écoulement plus rapide et, progressivement, le transport des matériaux solides s'installe. Limon, sable, cailloux, circulent alors dans les cavités et les actions physiques d'érosion et de transport peuvent finir par l'emporter sur la dissolution. Dans les plus grands conduits, les grandes rivières souterraines, cette dernière peut devenir négligeable devant les processus purement mécaniques.

Plus les cavités s'agrandissent, plus le risque d'effondrement du plafond augmente. Celui-ci peut même se produire lorsqu'il n'y a plus d'eau dans la partie concernée de la cavité. Mais, sans eau, les débris ne seront pas évacués.

En résumé, la corrosion apparaît comme le départ nécessaire, le processus original et déterminant de la genèse de la plupart des cavernes. Mais dans les cavités les plus vastes, les traits principaux de la morphologie, souvent, ne sont pas les effets de la dissolution, mais ceux de l'érosion par l'eau et, parfois, des éboulements.

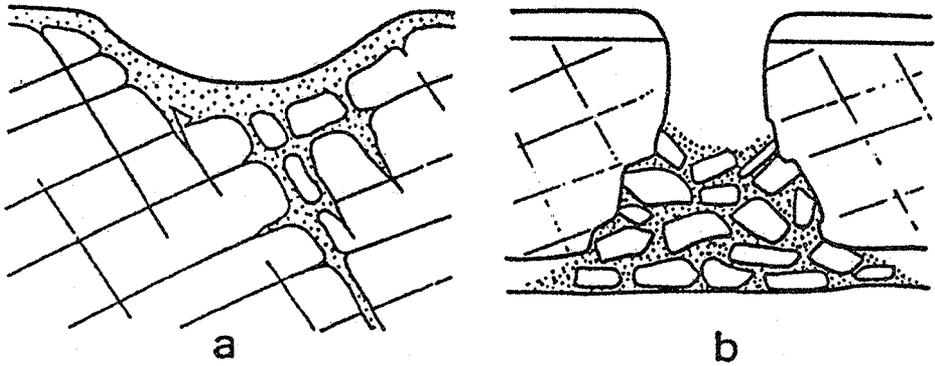


Figure 5. Dolines

- a Doline de dissolution-tassement, formée par l'élargissement progressif de fissures et provoquant un abaissement localisé du sol.
- b Doline d'effondrement, formée par l'écroutement du plafond d'une grotte

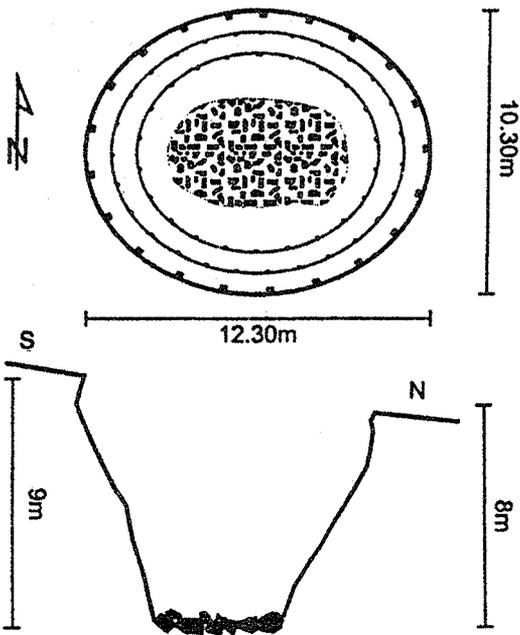


Figure 6. La doline d'Amostrenne (Esneux), 2003.

La forme escarpée et la présence de débris rocheux dans le fond dénotent une doline d'effondrement.

Dessin de Serge Delaby, 2003.

3.4. Rapports avec les phénomènes de surface

Notre sujet ici se limite à la genèse des cavernes. On ne peut pour autant ignorer les relations entre le domaine de Hadès et celui de Phœbus.

Les eaux qui creusent les grottes peuvent parfois être des eaux juvéniles, hydrothermales, venues de la profondeur. La grande majorité des cavités explorées est toutefois due à des eaux venant de la surface du sol et infiltrées par des fissures ou des ponors. Les fissures absorbantes donnent fréquemment naissance, à la surface du sol, à des dépressions fermées, souvent circulaires, les dolines (figures 5 et 6). La disparition sous terre de cours d'eau entraîne, en aval des pertes, l'assèchement des vallées. On voit que les phénomènes souterrains influencent la morphologie de surface. A l'aval des écoulements souterrains, la réapparition des eaux au jour donne naissance à de grosses venues d'eau qui sont parfois non de vraies sources, mais les résurgences de cours d'eau enfouis. Ces résurgences débitent donc parfois des eaux polluées.

Ainsi, on ne peut étudier le monde souterrain sans tenir compte de ses rapports avec les phénomènes de la surface. Au-dessus des grottes, le sol est susceptible de s'effondrer si des écroulements de plafond se propagent jusqu'à la surface (figure 4).

L'étude des phénomènes souterrains réclame donc une appréhension systémique, une claire conscience que le monde des cavernes n'est pas un système fermé (Ek, 1983 ; 1995 ; 2005).

3.5. Noyaux d'altération, « fantômes de roches » : une autre spéléogénèse.

Sur le front de taille de certaines carrières du Hainaut apparaissent des plages où la roche a été altérée sur place. La stratification et les diaclases restent visibles mais en ces endroits la roche se révèle tout à fait meuble au toucher, et pulvérulente. Des éléments insolubles comme les grains ou cailloux de quartz, les squelettes siliceux, et des éléments difficiles à dissoudre, comme certaines veines de calcite, des entroques, des coquillages, subsistent, bien identifiables. Mais la matière calcaire, constituée de grains très fins (quelques microns), a été en grande partie dissoute. La roche n'est dès lors plus cohérente du tout, sa porosité atteignant parfois 45 %. C'est ce qui a fait dire qu'on n'a plus là qu'un « fantôme de roche » (Vergari et Quinif, 1997 ; Quinif, 1999).

Les noyaux d'altération ainsi caractérisés présentent, lorsqu'on les excave, l'aspect de grottes aux formes irrégulières, mais aux contours fortement influencés par la structure (diaclasses, variations lithologiques...). Il s'agit d'un type de cavité qu'on a, en Belgique, d'abord trouvé uniquement dans le Calcaire carbonifère du Hainaut (Vergari, 1998 ; Quinif et Quinif, 2002).

Les Français avaient aussi observé de tels noyaux d'altération, notamment dans la craie de Normandie, et on en a, depuis lors, trouvé dans la craie du Crétacé de la Montagne Saint-Pierre (Visé, Belgique) et dans d'autres pays.

Des traces de cavités souterraines ont également été décrites récemment dans les craies crétacées du Limbourg belge (Dusar *et al.*, 2005).

3.6. Les grottes en terrains non carbonatés

Si la très grande majorité des cavités connues sont dans des roches carbonatées, calcaire, craie ou dolomie, il y en a cependant - et on en découvre de plus en plus - dans d'autres roches.

a. - anhydrite et gypse

L'anhydrite (sulfate de calcium) et le gypse (sulfate de calcium hydraté) se dissolvent en beaucoup plus grande quantité dans l'eau que le calcaire : de l'ordre de 2 g/l pour l'anhydrite et de l'ordre de 2,6 g/l pour le gypse. Ces deux minéraux n'affleurent pas en Belgique, mais on en trouve en profondeur : un sondage a révélé à Saint-Ghislain, près de Mons, des cavités importantes à plus de 2000 m de profondeur. La circulation des eaux dans ce karst a donné naissance à un jaillissement artésien de 90 m³/h d'une eau à la température de 70°C, eau que l'on utilise maintenant pour du chauffage urbain.

Dans d'autres pays, et notamment en France et en Pologne, des affleurements de gypse recèlent des grottes assez importantes. La grotte de Optimisticeskaya, la plus longue grotte d'Ukraine, est développée dans le gypse. Il faut noter que, contrairement à ce qui se passe pour les roches carbonatées, le CO₂ n'intervient pas dans la dissolution de ces roches : elles sont solubles dans l'eau pure.

b. - la halite ou sel gemme

Comme les roches précédentes, la halite (chlorure de sodium) se dissout aisément dans l'eau sans intervention du dioxyde de carbone. La halite est encore beaucoup plus soluble que l'anhydrite ou le gypse : l'eau peut dissoudre plus de 300 gr/l de chlorure de sodium à la température ordinaire. Il est tellement soluble qu'on n'en trouve guère d'affleurement important que dans des régions très arides. Il y en a cependant quelques rares exemples en Europe ; à Cardona (en Espagne, dans la dépression de l'Ebre), s'est développée dans un gisement de sel la grotte Forat Micó, parcours méandrant d'une rivière souterraine. La grotte avait en 1984 un développement de 640 m, en deux niveaux superposés (figure 7).

c. - les roches siliceuses et silicatées

On ne s'étonne pas de voir des grottes dans des grès à ciment calcaire. Mais on connaît aussi des cavités dans les roches siliceuses ou silicatées totalement dépourvues de carbonates.

Luc Willems (2000) en a étudié plusieurs et a proposé un inventaire très riche de ces phénomènes.

Ainsi, il y a en Amérique du Sud plusieurs grottes dans des grès et des quartzites non carbonatés. La grotte du Centenaire de Minas Gerais (Brésil) a un développement de plus de 3000 m et une dénivelée de 450 m, Willems *et al.* (2005) ont étudié au Brésil une grotte, Ibitipoca, de plus de 2 km de développement et comportant une rivière qu'ils ont suivie sur plusieurs centaines de mètres. La grotte montre des traces d'évolution en régime phréatique (c'est-à-dire sous la surface de la nappe aquifère) et les formes observées font

Figure 7. La grotte de Forat Micó (Cardona, Espagne) dans un gisement de sel.
(D'après Indurain, 1984, simplifié).

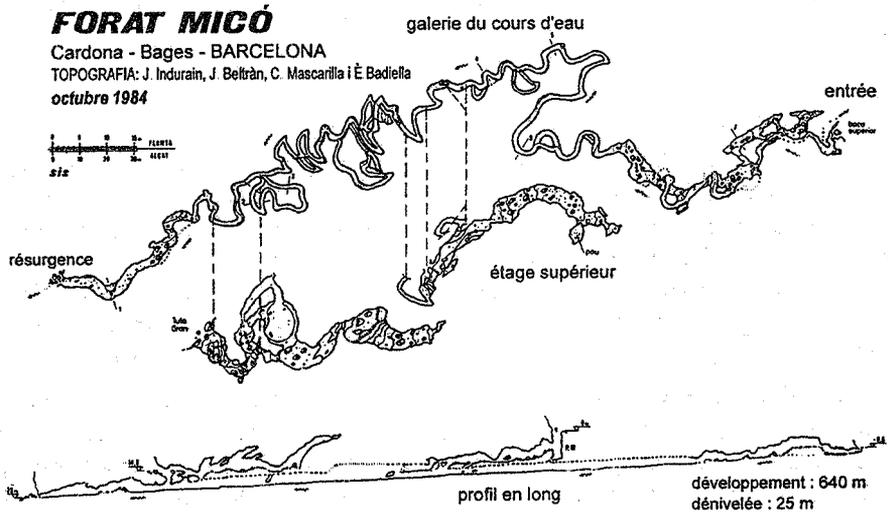
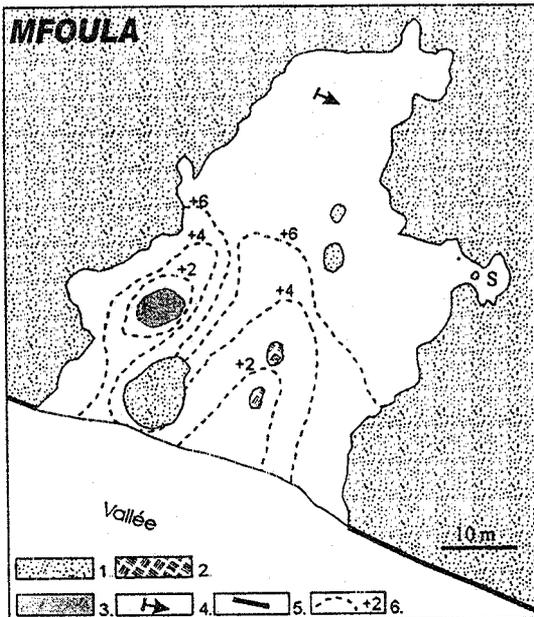


Figure 8. La grotte de Mfoula (Cameroun méridional) dans des gneiss.



1. Pilier
2. Roche en place
3. Mare
4. Pente de la foliation
5. Falaise
6. Courbe de niveau approximative par rapport au point bas de la salle

Simplifié, d'après Willems et al., 1997 et Willems, 2000.

dire aux auteurs que des processus chimiques sont à l'origine du creusement de la cavité. Chabert et Courbon (1997) font état de plusieurs grottes de plus de 2000 m de développement au Venezuela.

On allègue, pour la genèse de ces cavités, des altérations hydrothermales, de l'hydrolyse, et on cite des pH inférieurs à 4, ou au contraire, pour la dissolution de la silice, supérieurs à 9.

Dans les granites, des grottes sont signalées en Californie, au Texas, en Guyane, au Brésil, au Sahara, en Australie, mais aussi en Suède, en France et en Allemagne (Willems, 2000).

Il y a des cavités importantes dans les gneiss et les schistes cristallins en Amérique du Sud, en Afrique, mais aussi en Suisse et en Autriche. La Gruta dos Ecos au Brésil, dans les micaschistes, a plus de 2 km de développement.

Certaines de ces cavités - mais non les plus longues - sont d'origine tectonique, liées à des fractures ou à des failles ; mais la plupart, et les principales, présentent des formes indubitablement liées à des actions chimiques (figure 8).

D'autre part, Ehrlich (1998) décrivait des bactéries et de nombreux protozoaires jusqu'à plus de 400 m de profondeur et plusieurs auteurs actuellement, parmi lesquels Willems (2000), attirent l'attention sur le rôle possible, voire probable, des bactéries et d'autres êtres vivants dans la genèse des cavités.

d. – les tunnels dans la lave

Un tout autre processus donne des tunnels dans les coulées volcaniques. Lorsque la lave s'écoule, à une température qui au départ, est généralement de 800 ou 1200° C, la partie qui est en contact avec le sol et celle qui, au sommet, est en contact avec l'air se refroidissent et se consolident les premières. La partie médiane de la coulée se refroidit moins vite et, dans les endroits où la lave est la plus épaisse, elle continue à s'écouler comme dans un tunnel entre les régions bordières déjà consolidées. Finalement, la lave étant évacuée, subsiste un tube vide, créant ainsi une grotte dans le basalte. Ces grottes n'ont généralement pas d'orifice et ne sont souvent découvertes que lorsque leur toit s'effondre accidentellement. Elles peuvent être très longues : le « Tunnel de l'Atlantide », sur l'île de Lanzarote, est un tube de lave de 7 km de long qui descend du volcan La Corona.

4. Les concrétions des grottes

Les dépôts observés dans les grottes sont très variés. Mais les plus caractéristiques, les plus propres aux cavités souterraines sont certainement les concrétions (Gewelt & Ek, 1988).

Celles-ci sont, dans les grottes des terrains carbonatés, essentiellement constituées de carbonate de calcium.

La formation de concrétions carbonatées est directement liée à la dissolution, qu'elle implique préalablement : c'est le CO_2 présent dans l'eau qui a permis la dissolution du carbonate sous forme de bicarbonate. Si le gaz s'évade de la solution, le carbonate reprécipite et concrétionne.

Les formes de concrétion les plus typiques sont les stalactites et les stalagmites, mais on rencontre aussi sous terre des planchers stalagmitiques, des coulées de calcite, des draperies, des perles des cavernes, des dépôts de gours (petits bassins de calcite fermés par des barrages), des excentriques (dont la forme est liée à la capillarité), du lait de lune (mou lors de sa formation), etc. L'aragonite cristallise souvent sous forme d'aiguilles...

Dans l'ensemble cependant, la plupart des concrétions peuvent entrer dans une des deux catégories suivantes :

- concrétions liées à la percolation (*dripstones*) : stalactites, draperies, stalagmites...
- concrétions liées à l'écoulement (*flowstones*) : planchers, coulées...

Les découvertes récentes les plus importantes concernant les concrétions sont relatives à leur âge et aux climats sous lesquels elles se sont formées. Ces progrès sont dus essentiellement à l'apport des méthodes radiométriques et isotopiques (en particulier, mais non exclusivement : ^{14}C , et $^{230}\text{Th} / ^{234}\text{U}$). Ces méthodes ont contribué à montrer que le concrétionnement semble avoir été très abondant depuis la fin de la dernière période froide du Quaternaire, il y a 10 000 ans, très abondant aussi durant les périodes interglaciaires du Quaternaire, et beaucoup plus restreint durant les périodes froides (Gewelt & Ek, 1988).

5. Conclusions

Et l'homme dans tout ça ?

Les cavernes, c'est la profondeur, l'invisible, le royaume des ombres. L'homme vit à la surface de la terre, dans la lumière ; il aime le soleil. Qu'a-t-il à faire du domaine souterrain ?

Aimerait-il se faire peur ? Il visite les cavernes, en touriste, par milliers. Les grottes sont une attraction touristique des plus prisées. On peut dans certaines trouver des bars ou servir des repas, faire des concerts ou des spectacles...

Les cavités souterraines ne sont cependant pas sans danger. Nous n'en prendrons que quelques exemples, tous pris dans notre pays.

Les toits des cavités souterraines peuvent s'effondrer. Ceci ne constitue un danger que pour les personnes qui se trouveraient dans la grotte, tant que l'effondrement ne se propage pas jusqu'à la surface du sol. Or ceci s'est déjà produit à plusieurs reprises en Belgique. Ainsi, en 1977, tout un essaim de puits d'effondrement se forma à Kain, au nord de Tournai, dans la plaine de l'Escaut. Le volume total des creux alors apparus était de l'ordre de 3000 m³. D'autres puits se formèrent ensuite sur les deux berges de l'Escaut, absorbant une partie de son débit et vidant un bras mort du fleuve (de Roubaix *et al.*, 1979). Un autre effondrement se produisit à Kain, ouvrant un trou béant dans la cour d'une école, un jour de congé heureusement.

A Xhoris, ce n'est pas un véritable effondrement, mais le tassement du sol au dessus d'une cavité qui ouvrit dans les murs d'une maison des fissures de plusieurs centimètres de large, ouvrant l'habitation au vent et nécessitant de très onéreux travaux.

Des inondations peuvent menacer des habitations situées près des points où l'eau pénètre sous terre. Ainsi, dans le vallon des Chantoirs, à Sprimont, le ruisseau du Rouge Thier s'engouffre dans une perte dite le trou du Moulin. Bien que celui-ci ait une entrée spacieuse, il est arrivé à plusieurs reprises au XX^{ème} siècle que la perte s'engorge et qu'une inondation noie la maison voisine, l'ancien moulin, sous deux mètres d'eau.

L'autoroute E 25 passe, entre Liège et Luxembourg, par Remouchamps (Aywaille) où il traverse l'Amblève par un long et audacieux viaduc. La moitié nord de ce viaduc est établie sur le calcaire. De nombreux sondages faits à l'emplacement de la culée nord et des piliers de pont n'ont rien décelé, mais quand on a creusé les fondations de la culée et des piliers, des grottes sont apparues. De coûteux travaux de colmatage ont été opérés ; un pilier a été déplacé de treize mètres, ce qui a nécessité de longs calculs de résistance des matériaux... (Ek, 1983).

A Sprimont, un cressonnier cultivait ses légumes en profitant d'une source karstique abondante et claire. Mais progressivement les eaux s'enrichirent en sable, qui rendit le cresson imangeable. Une étude montra rapidement que le sable était en fait essentiellement constitué de corindon, un abrasif utilisé par les carriers dans le sciage des calcaires. Il y avait en effet, à quatre kilomètres de la source de la cressonnière, d'importantes carrières dans le calcaire. Les eaux étaient, dans cette région, absorbées sous terre et parcouraient une longue distance avant de reparaître au jour au Trou bleu, la source de la cressonnière, qui était donc la résurgence de ruisseaux enfouis bien en amont. Malgré

l'évidence du fait que les carriers ne filtraient pas les eaux usées qu'ils rejetaient dans la nature, la disproportion entre les intérêts économiques était trop importante, et c'est le cressonnier qui dut cesser son activité.

Dans le même vallon de Sprimont, une cartographie des « chantoirs » (ou « chantoires »), les points d'enfouissements de l'eau, avait été faite par Martel, Vandenbroeck et Rahir (1910). Cette cartographie fut révisée par Michel (1972) qui constata alors que de nombreuses pertes s'étaient déplacées, dont plusieurs de plus de 100 m en moins d'un siècle. La cartographie fut encore revue vingt ans plus tard et il fut ainsi confirmé que les points d'enfouissement de l'eau ne sont pas fixes du tout, mais se meuvent au cours du temps : les phénomènes karstiques sont très dynamiques, et on ne peut considérer comme stables les pertes karstiques

Tout ceci nous porte à considérer que dans les terrains caverneux, il est primordial d'étudier soigneusement la situation, de chercher à prévoir l'évolution des phénomènes, *avant* de procéder à des constructions ou des travaux importants, et de considérer les processus dans un esprit systémique, car le trajet des eaux souterraines, l'évolution des grottes, la dynamique des processus à la surface du sol sont liés. Les cavernes ne sont pas aussi loin de nous que nous pourrions le penser.

Remerciements

L'auteur doit un très grand merci

- à Madame Elizabeth Tinant-Tallier pour la composition et la présentation du texte,
- à Madame Marie-Claire Cellier pour la mise en page de l'illustration,
- à Monsieur Jean Grimbérieux pour les améliorations au résumé anglais,
- et à ces trois mêmes personnes pour leurs avis éclairés et leurs pertinentes suggestions sur le contenu même du texte.

Ouvrages cités

CHABERT C. & P. COURBON, 1997. *Atlas des cavités non calcaires du monde*. Union Internationale de Spéléologie, 109 p.

COURBON P. & C. CHABERT, 1986. *Atlas des grandes cavités mondiales*, Union Internationale de Spéléologie, 255 p.

DA SILVA S., 2004. *Carstificação en rochas siliciclasticas na Serra de Ibitipoca, Minas Gerais*. Dissertação de Mestrado, Belo Horizonte, 142 p.

DELABY S., 2003. Effondrement karstique à Amostrenne (Esneux). *Eco-karst*, 50 :12-14.

- De ROUBAIX E., F. DERYCKE, M. GULINCK, R. LEGRAND & W. LOY, 1979. *Tournaisis 77-78. Effondrements à Kain et évolution récente de la nappe aquifère*. Service géologique de Belgique, Professionnal Paper 157.
- DUSAR M., D. LAGROU, L. WILLEMS, P.J. FELDER & J. MATTHIJS, 2005. *De mergelgrotten van Hinnisdael. Een geologische bijdrage tot de studie van het krijt*. Geological Survey of Belgium, Professional Paper 2005/1 – N 301, 89 p.
- EHRlich H.L., 1998. Geomicrobiology : its significance for geology. *Earth Sc. Rev.*, Elsevier, 45 :49-60.
- EK C., 1961. Conduits souterrains en relation avec les terrasses fluviales. *Annales de la Société géologique de Belgique*, 84 :313-340.
- EK C., 1976. Les phénomènes karstiques, 137-157 in : *Géomorphologie de la Belgique, hommage au Professeur Paul Macar*, A. Pissart (éd. sc.), Liège, 224 p.
- EK C., 1983. L'eau dans le vallon des Chantoirs (Remouchamps). Une leçon sur les collaborations nécessaires. *Hydrographica*, S.N.D.E., 1-2 : 7-1.
- EK C., 1995. Grottes et rivières des régions calcaires, 178-193, in : *L'Ardenne, essai de géographie physique. Hommage au professeur A. Pissart* (A. Demoulin, éd. sc.), ULg, 238 p.
- EK C., 2005. Les phénomènes karstiques de Wallonie, 9-16, in : *Actes du colloque international : Karst et aménagement des territoires*, Ministère de la Région Wallonne, 132 p.
- EK C., D. CARON & J. ROBERGE, 1981. La forte teneur en gaz carbonique d'une cavité du Québec : la grotte St-Léonard, île de Montréal. *Le Naturaliste canadien*, 108 : 57-63.
- EK C., R. MICHEL, V. MOUSNY & D. CLOSSON, 1997. The dynamics of the karstic features of Sprimont (Belgium) and its consequences on land-use planning. *Proceedings of the 12th International Congress of Speleology*. Switzerland, 5 :13-14.
- EK C., S. ZHANG & M. GEWELT, 1989. Carbon dioxide content of cave sediments and cave air in China. *Proceedings of the 10th International Congress of Speleology*, Budapest, 1 : 63-66.
- FORD D. & P. WILIAMS, 1989. *Karst geomorphology and hydrology*. Unwin Hyman Ed., London, 601 p.
- GEWELT M. & C. EK, 1988. Les concrétions carbonatées des grottes. *Annales de la Société géologique de Belgique*, 111 :9-19.
- GUNN, J. (sc. Ed.), 2004. *Encyclopedia of Caves and Karst Science*. Fitzroy Dearborn, London and New York, 902 p.
- MICHEL R., 1971. *Le vallon de Sprimont à Chanxhe. Etude géomorphologique d'un synclinal calcaire*. Mémoire de licence en sc. Géographique, Université de Liège.
- QUINIF Y., 1999. Fantômisation, cryptoaltération et altération sur roche nue, le triptyque de la karstification. *Etudes de Géographie physique, Travaux*, Suppl. XXVIII, Cagap, Univ. de Provence : 159-174.
- QUINIF Y. & G. QUINIF, 2002. Méthodes et éléments de cartographie d'un paléokarst. *Karstologia*, 39(1) : 1-8.

ROQUES H., 1964. Contribution à l'étude statique et cinétique du système gaz carbonique-eau-carbonate. *Annales de Spéléologie*, 19 :255-484.

STCHOUZKOY-MUXART T., 1971. Contribution à l'étude de la solubilité de la calcite dans l'eau en présence d'anhydride carbonique. *Bulletin de l'Association des Géographes français*, 389 :215-226.

TASSEROUL L., 2006. *Caractérisation chimique et diversité des bactéries oxydant l'ammoniac en milieu karstique*. Mémoire de licence en sc. biologiques, Université de Liège, 55 p.

VAN DEN BROEK E., E. MARTEL & E. RAHIR, 1910. *Les cavernes et les rivières souterraines de la Belgique*, 2 tomes, Bruxelles, 1684 p.

VERGARI A. & Y. QUINIF, 1997. Les paléokarsts du Hainaut. *Geodynamica Acta*, 10(4) : 175-187.

VERGARI A., 1998. Nouveau regard sur la spéléogenèse : le « pseudo-endokarst » du Tournaisis (Belgique). *Karstologia*, 31(1) : 12-18.

WALTHAM A.C., G. VANDENVEN & C.M. EK, 1986. Site investigation on cavernous limestone for the Remouchamps viaduct, Belgium. *Ground Engineering*, 19(8) : 16-18.

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 de doctorat, Département de Géographie physique, Université de Liège, 168 p., + 160 p. d'annexes.

WILLEMS L., A. POUCKET & J-P VICAT, 1997. Karst non carbonaté au Cameroun méridional. Les grottes de Mfoula. *Würtzburger Geograph. Arb.*, Würzburg, 89 :1-14.

C.D. ROM

WILLEMS L., J. RODET, A. POUCKET, S. MELO, M.-J. RODET & A.S. AULER, 2005. Polyphased karst systems in sandstones and quartzites of Minas Gerais, Brazil. *Proceedings of the 14th International Congress of Speleology*, Athens.

SITE WEB

<http://audy.speleo.cz/Cave/Breuver/index.html>

(concernant une vaste grotte dans les quartzites, au Brésil).

Adresse de l'auteur :

Camille EK
Rue des Vennes, 131
4020 Liège
Belgique
camille.ek@ulg.ac.be