

L'altération de type « fantôme de roche » : processus, évolution et implications pour la karstification

'Ghost rock' weathering: processes, evolution and implications for the karstification

Yves Quinif*, Laurent Bruxelles**

Résumé

Depuis plusieurs années, de nombreux exemples de fantômes de roche ont été reconnus dans les karsts en Belgique, en France et en Italie. Ils correspondent à des poches ou à des couloirs de décalcification emplis d'altérite *in situ*. Leur genèse relève d'un cas spécial de karstification où, à l'inverse des phénomènes de karstification par enlèvement total, le résidu insoluble ou moins soluble reste en place et forme un squelette qui mime la structure initiale de la roche (fossiles, joints, lits de chailles, etc.). Cette altérite, qui peut également se développer sous une voûte calcaire, forme un vaste réseau interconnecté et calé sur la fracturation. De fait, elle constitue une discontinuité importante au sein des massifs karstiques. Lorsque le niveau de base s'abaisse, l'altérite s'effondre sur elle-même puis elle est érodée par des circulations souterraines qui se mettent en place à son toit. Des réseaux de galeries mais aussi des formes de surface se forment alors rapidement, essentiellement par évidement de l'altérite. Ce phénomène est maintenant reconnu dans le monde entier, affectant tous les types de roches, carbonatées ou non.

Mots clés : altération, fantômisiation, karst, altérite, morphologie karstique, Hainaut, Grands Causses, Belgique, France.

Abstract

For several years, numerous examples of ghost rocks have been recognised in karst areas in Belgium, in France and in Italy. They correspond to decalcified pockets but also to decalcified corridors filled with in-situ alterite. It is a special case of karstification where a non-soluble skeleton remains and preserves the structures of the initial rock (fossils, joints, levels of cherts, etc.). This alterite, which can also be formed under a safe roof, draws a large maze following the tectonic patterns. It constitutes an important discontinuity inside the karstic areas. When the base level drops, the structure of the alterite collapses and a void is formed on his top. Then runoff can use this void and erode the soft alterite. Cave network but also surface features can develop quickly, mainly by the cleaning of the alterite. Now, some examples of this phenomenon have been recognised all around the world and occur in different sorts of rocks, carbonated or not.

Key words: weathering, ghost rock, karst, alterite, karstic morphology, Hainaut, Grands Causses, Belgium, France.

Abridged English version

Introduction: the mechanisms of the karstogenesis. Some reliefs in some areas are characterised by erosion features and particular hydrogeological phenomena. Lost rivers, major springs, closed depressions, landscapes of conic hills or towers, mineral deserts and a great diversity of underground cavities constitute the karstic massif. The main issue is the genesis of subterranean voids following joints: bedding planes, joints, and sometimes faults. A unit can be defined in terms of systemic analysis: the karstic system made of a set of interconnected voids following logic in terms of hydrodynamics. The subterranean circulations structure between a water supply and an exit area through an aquifer

where water is split between phreatic and vadose zone. The map of the well-known great systems is often strange because of the labyrinthic structure. The morphological study of karstic features leads to the evidence: only the chemical weathering can explain those features. Many fragile features would be destroyed by mechanical erosion. In carbonated facies, the acid attack is the great actor of the karstogenesis. The acid function can be provided by the carbon dioxide or the sulphuric acid. Thus, the karstification is the result of the passage of chemical species between the solid and the liquid phases. We can summarise the characteristics of the karstification by the presence of interconnected voids of different sizes, the main influence of water chemistry and important flows of underground water. Naturally, the paradigm

* Université de Mons - Faculté Polytechnique - Service de Géologie Fondamentale et Appliquée (GFA) - 9, rue de Houdain - 7000 Mons - Belgique (yves.quinif@umons.ac.be).

** INRAP - TRACES (UMR 5608 du CNRS) et GAES - Université de Johannesburg - Afrique du Sud (laurent.bruxelles@inrap.fr).

of the karstogenesis is based on the progressive wideness of joints by chemical dissolution. Some voids develop more than others and accept an increasingly more important water flow. The rock dissolves for a great part: it is called a karstified rock and groups mainly the carbonated rocks. Dissolved species and insoluble parts are taken care of by the water flows. We called this paradigm the karstification by total removal.

The ghost rock karstification. The ghost-rock weathering is characterised by a transformation of the massive rock into a like-powder texture (Rodet, 1996; Vergari, 1998; Quinif, 2010). The porosity increases. In the MEB images, one sees that the intact limestone is made up of grains brought closer together. The grains surface is the cleavage planes. When one looks into a weathered sample, the grains are separated by interconnected voids. The sparitic crystals are isolated from the micritic cement and they start to show corrosion gulfs. In the case of a limestone rich in silica (near Tournai; fig. 1), only the silica skeleton remains. Two main features can be distinguished: (i) The channels which are situated on vertical joints which have conducted aggressive water in a quiet phreatic zone (fig. 2). The developing weathering front needs a zero hydrodynamical potential since the resulting fragile alterite remains in place without mechanical erosion. The mapping of the channels in quarries shows a very dense network. The two important parameters guiding the development of the channels are the nature of the tectonic joints and the stress regime, and the absence of potential; (ii) The pseudoendokarstic features through the ghost-karstification which is totally internal. This latter starts from joints: the weathering makes lateral progress but the resulting feature keeps a roof made of intact rock (fig. 3). The massive is cut up by a lattice of galleries which have never been emptied of matter. During this first phase of karstification, those voids are made up of a porosity of the weathering rock instead of a macroscopic void. In the phenotype called 'grotte du Pic à glace', we are confronted to a gallery-shape but with a residual weathering (fig. 4). The microscopic analysis shows the total dissolution of the carbonates and the resulting silica skeleton. The acid attack of the rock leads to the same feature.

Differences between the two kinds of karstogenesis. The karstic system is a thermodynamic dissipative system in the sense of Prigogine. The dissipation of energy reduces the entropy and increases the structuring of the system. There are three energies which are necessary for the karstification: chemical energy to separate the bed-rock in an insoluble and a soluble part, potential energy to enable water circulation and mechanical energy to fracture the rock and open the discontinuities. From this point of view, the different types of karstification can be expressed in terms of energy dissipation. The 'classical' karst, by total removing, requires the dissipation of the three types of energy. If the potential energy is absent, only the ghost rock develops. Cryptokarst is the weathering of the roof of the massif under a permeable and non-carbonated cover. It is linked to the absence of mechanical energy. Thus, we can conclude that the ghost-rock formation depends on the absence of potential

energy. A second condition is the necessity to have aggressive water. Thirdly, the water can go down in the depth of the massive without potential; the joints must be opened and therefore one needs an extension tectonics.

The evolution of the ghost-rocks. When the ghost rock moves from the phreatic zone to the vadose zone, it settles with the apparition of a void at the roof of the feature. It is due to the disappearance of the pressure of the phreatic water in the porosity of the ghost-rock. So, the residual weathering rock collapses, following the lowering of the water table. A macroscopic void appears at the summit of the pseudoendokarst, under the limestone roof. If a new hydrodynamic potential appears, this new type of energy may contribute to remove the residual weathering. In the 'Improbable cave' in the Clypot quarry, a cave gallery was filled by a river sedimentary series alternately with river sands and the removed ghost rock. A new speleological cave is therefore created from a pseudoendokarstic feature like in Quentin cave (fig. 5; Quinif and Maire, 2009). There is continuity between the ghost-rock features and a speleological cave.

Evolution of the areas containing ghost-rocks. An important point is that if we draw a map of the pseudoendokarst, we can see that they constitute a real network with several, interconnected ghost rocks (Quinif, 1999). In fact, all the tensional fractures present during the weathering were affected (generally in two directions). As in the examples of Belgian quarries, during the uplift of a region or the entrenchment of a valley, the hydraulic gradient becomes steeper. The presence of pseudoendokarsts introduces an important discontinuity that is exploited preferentially by underground streams. From the spring, headward erosion permits the emptying of the alterite and the quick extent of the catchment area inside the plateau. It can be responsible of the formation of some maze caves, with a high density of big galleries, like the Trabuc Cave (Cévennes, France; Bruxelles and Bruxelles, 2003). In the Cévennes border (fig. 6), some examples show the link between ghost rocks in a first step and, in a second step, the genesis of classic karst system (Bruxelles and Wienin, 2009). The exploration of mines permits to study many examples of ghost rocks. In several points, galleries cut ghost rocks, linked or not with the mineralisations (fig. 7). At the top of the alterite, we have found a thick level of laminated sediments. They show the existence of water circulations in the gap, between the ghost rock and the vault. In some places, the alterite is progressively evacuated by infiltrations and little rooms are forming (fig. 8). In another mine, big karstic galleries re-used old weathered sections and cut the initial ghost rocks. On the French Grands-Causse plateau (fig. 6), entrenchment of canyons has permitted the appearance of some powerful karst springs. In the weathered Jurassic dolomite, headward erosion removes the dolomitic sand and empties the highest joints. By this way, the catchment areas of springs can grow quickly throughout the plateau. On the surface, many pits appear and lead to the removal of the alterite by underground streams. At this time, many sinkholes open regularly. The catchment area of the Durzon spring, for example, is captur-

ing the catchment area of other springs that have drained this part of the plateau for a long time (Bruxelles, 2004). This process is leading to destruction of old horizontal morphologies and development of the most typical landscape of the Grands Causses: the tower-like mega-lapiaz (fig. 9).

Conclusions: mind of the theory. The ghost-rock karstification theory is inherited from the theory of biorhexistasy (Erhart, 1967). The weathering of the rock separates the rock in two phases: residual and solid for a first part, and soluble for the second part. The ghost-rock stage is the biostasy stage while the rhexistasy phase is the mechanical removing of the remaining alterite. The equilibrium rupture is the creation of a new hydrodynamical potential. Ghost rocks are a special case of karstification formed per descendum, but also per ascensum in association with hypogenic circulation. Instead of forming a single void, they consist of porous alterite that retains the shape and volume of the original rock. Pseudoendokarsts can form an interconnected network that promotes the development of the future karst. When a new hydraulic gradient appears, springs are formed and permit the erosion of the alterite. Parts of the weathered networks are progressively emptied (fig. 10). Many examples of ghost rocks are well known all around the world (Europe, USA, China...). They occur in carbonated rocks but also in non-carbonated rocks as in quartzite (South Africa, Venezuela; Martini et al., 2002) or in gneiss (Congo; Willems et al., 2001). Lot of underground features but also outside morphologies can now be linked to ghost-rocks formations.

Introduction : la dynamique de l'altération

La vision classique du karst et de la karstification a évolué au cours des études réalisées depuis maintenant deux siècles. Le point de vue géomorphologique est de caractériser ce paysage particulier, présentant des formes généralement absentes d'autres types : dépressions fermées, surface des roches intensément découpées, hydrologie particulière avec pertes massives de rivières et sorties d'eau concentrées, existence d'une morphologie souterraine : grottes et gouffres. Le point de vue hydrogéologique est basé sur des circulations souterraines obéissant à une hydrodynamique non linéaire. Des approches synthétiques ont été développées, tentant de réconcilier les visions particulières dans une optique globale. Tous ces points de vue reposent néanmoins sur un concept d'altération chimique de la roche, hétérogène dans l'espace et évolutive dans le temps. Il y a élargissement progressif de certaines discontinuités dans la masse rocheuse par rapport à d'autres, avec une circulation souterraine qui devient privilégiée en suivant certains passages. De la sorte, une sélection des vides élargis se fait suivant un schéma hydrodynamique avec la formation de drains transmissifs et de systèmes annexes capacitifs (Mangin, 1974). Cette vision, paradoxalement, n'avait jamais été remise en question concernant certains karsts. Pourtant, de nombreuses questions se posent, qui ne peuvent être résolues que par des réponses *ad*

hoc. Par exemple, des cavités de toutes tailles se voient trépanées par le creusement des canyons. Ces cavités isolées (coupoles géantes) ne peuvent être facilement intégrées dans un schéma de type purement hydrodynamique. Dans la même optique, il est bien souvent difficile de déterminer « un amont » et « un aval » quand le spéléologue se trouve dans une galerie. Et combien de fois la progression ne s'arrête-t-elle pas sur une fermeture complète du vide sur de la roche compacte ?

Ces points peuvent être expliqués si l'on considère la karstification sur une base plus géologique. L'altération des roches est un phénomène universel : ce n'est que dans le cas d'un manque total d'eau que cette altération est réduite au minimum. La façon la plus fréquente sous laquelle se manifeste cette altération est la pédogenèse. Or, qu'est ce que cette altération du point de vue de la chimie physique ? Il s'agit du passage d'une phase solide en une phase soluble et une phase solide résiduelle. C'est ce que nous apprend la théorie de la biorhexistasie d'H. Erhart (1967). L'exemple du granite est le plus souvent cité. Certains minéraux (*e.g.*, orthose) se transforment chimiquement pour fournir une phase soluble : des ions potassium et de la silice ainsi que du bicarbonate provenant du CO₂ atmosphérique et surtout pédologique, et une phase solide résiduelle : les minéraux des argiles. Dans cette optique, où se situe la différence avec l'altération dans le cadre de la karstification ? Dans le karst, on suppose implicitement qu'il n'y a qu'une phase solide, d'où la nécessité d'avoir une roche « modérément » soluble pour que la karstification puisse s'installer. Dans le cas d'une roche présentant plusieurs phases minérales de solubilités différentes, on doit logiquement admettre une évacuation simultanée de toutes les phases produites. Or, des observations réalisées sur des paléokarsts dans les calcaires carbonifères de la province du Hainaut (Belgique) démontrent qu'il n'en est pas nécessairement ainsi, jetant un nouveau regard sur la karstification (Quinif, 2010).

L'altération de type « fantôme de roche »

Les carrières de calcaires en Hainaut (fig. 1) exploitent les carbonates carbonifères par des excavations qui révèlent, en paroi, des paléokarsts scellés par des formations transgressives mésozoïques et cénozoïques. Ces paléokarsts se présentent sous deux types de structures.

Les couloirs verticaux

Ils sont développés le long de joints, mesurant de quelques mètres à plus de 10 m de large et parfois plus de 50 m de profondeur (fig. 2). Ces couloirs renferment une roche poreuse, souvent mécaniquement friable, qui n'est autre que l'altérite résiduelle de la roche en place, composée des éléments insolubles comme la silice microcristalline et les minéraux argileux, mais également moins solubles comme la phase spartique des calcaires : tests de fossiles, calcite de fentes de tension.

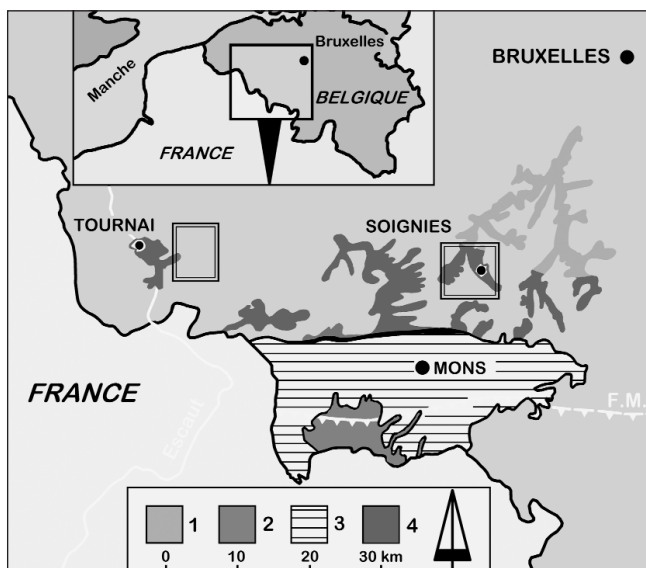


Fig. 1 – Carte géologique simplifiée du Hainaut septentrional (Belgique) et localisation des carrières de Tournai et de Soignies (rectangles noirs). 1 : socle regroupant les schistes siluriens du Massif du Brabant et leur couverture du Dévonien moyen et supérieur ; 2 : Dévonien du Plateau de Blaugies appartenant à la fois au Bassin autochtone de Namur au nord et au Bassin de Dinant allochtone au sud ; 3 : Mésozoïque du Bassin subsidant de Mons ; 4 : calcaires carbonifères ; F.M. : Faille du Midi, faille de charriage séparant au sud le massif de Dinant allochtone sur le synclinorium de Namur au nord. La carrière du Milieu se situe dans le rectangle à l'est de Tournai.

Fig. 1 – Simplified geological map of the Northern Hainaut (Belgium) and location of the quarries of Tournai and Soignies (black rectangles). 1: substratum including Silurian schist and their Middle and Upper Devonian cover; 2: Devonian of the Blaigies plateau (part of the autochthonous basin of Namur to the North and of the allochthonous basin of Dinant to the South); 3: Mesozoic of Mons basin; 4: Carboniferous limestones; F.M.: Midi fault separating the allochthonous Dinant massif to the South from the Namur synclinorium to the North. The Milieu quarry is situated in the rectangle, at the East of Tournai.

« Les pseudo-endokarsts »

Ces forment ressemblent à s'y méprendre à des galeries de grottes classiques mais leur remplissage est constitué de l'altérite résiduelle. Ces « pseudo-galeries » n'ont donc jamais été vidées puisque l'altérite en place occupe encore l'essentiel du volume. La structure géologique de l'encaissant calcaire est conservée : stratification, fracturation, lits de silex ou de chailles sont en place. La roche est transformée par dissolution isovolume. Le fantôme de roche est caractérisé par une perte de cohésion, une grande porosité, cette phase résiduelle pouvant être constituée de carbonates, de silice ou d'argiles en trace. Illustrons ce fait par deux exemples découverts en Belgique :

- Dans la carrière « Gauthier-Wincqz » à Soignies (province du Hainaut), le calcaire est transformé sur 4 m de hauteur (fig. 3) en une matrice poreuse et friable (Havron *et al.*, 2007). Les fentes de tension calcitique et les fossiles tels les encrines constituent essentiellement cette matrice. Le gradient d'altération est abrupt mais les contours sont irréguliers,



Fig. 2 – Un couloir dans le calcaire tournaisien de la carrière de Gauthier-Wincqz à Soignies (Belgique). Le couloir se termine vers le bas en biseau et marque ainsi la limite inférieure de l'altération. La paroi altérée à l'intérieur du couloir, noire, mettant en évidence les éléments moins solubles, contraste nettement avec la paroi découpée à la scie à roche du front.

Fig. 2 – A corridor in the Tournaisian limestone of the Gauthier-Wincqz quarry at Soignies (Belgium). The corridor ends at an angle down and marks the lower limit of the alteration. The black weathered wall inside the corridor highlights the less soluble elements, in contrast to the wall cut by the quarry.

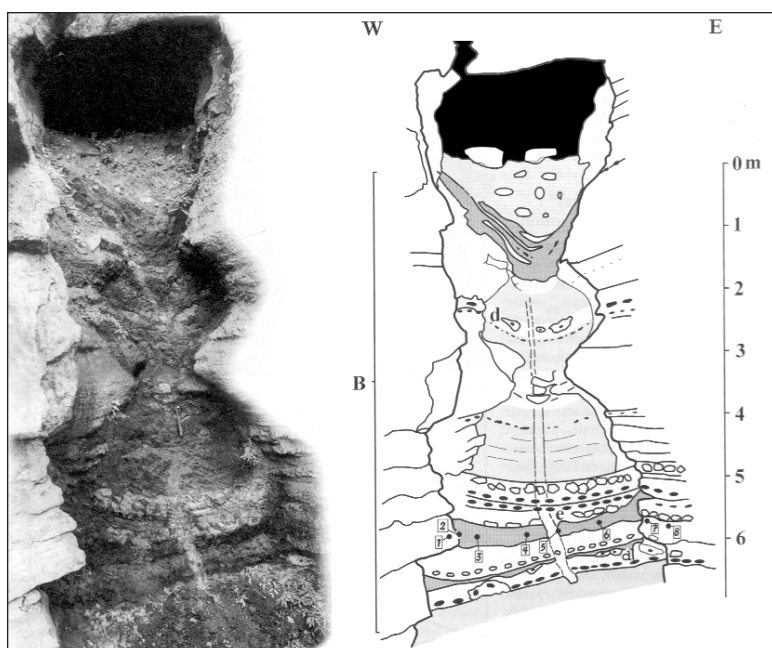
gouliers, dépendant de la nature mécanique de la roche en place. Cette altérite résiduelle est calcaire parce que le *bedrock* est totalement carbonaté. Cet exemple illustre donc le cas d'une altérite résiduelle formée des éléments moins solubles que la matrice micritique. Soluble doit ici être pris dans le sens cinétique : la vitesse de dissolution est plus faible à cause d'un rapport surface/volume plus faible que celui de la micrite. La porosité totale est de $40 \pm 5\%$. L'examen microscopique montre que, dans le cas d'un encaissant sain, les grains sont solidaires les uns des autres, sans forme de dissolution. Dans le cas du fantôme de roche, les grains sont séparés par des vides avec une porosité interconnectée. Les cristaux sparitiques peuvent être affectés par des golfes de corrosion.

- Un exemple du second type de structure de fantôme de roche est constitué par un pseudo-endokarst appelé « grotte du Pic à glace » à la carrière du Milieu près de Tournai à l'ouest de la province du Hainaut (Vergari, 1998). La section de cette pseudo-galerie, haute de 7 m et large de 1 m à 3 m, résulte de l'avancée du front d'exploitation (fig. 4). Sous un



Fig. 3 – Carrière Gauthier-Wincqz à Soignies (Belgique) : le fantôme de l'excursion. Dans la zone altérée, on devine aisément que la stratification est présente dans le fantôme de roche en continuité avec celle de la zone saine. La roche est devenue pulvérulente. Aucun vide macroscopique n'est présent. Le mètre déroulant est déployé sur 2 m de hauteur.

Fig. 3 – Gauthier-Wincqz quarry at Soignies (Belgium): the excursion ghost. In the weathered part, the stratification is visible into the ghost rock, in continuity with the stratigraphy in the safe rock. The rock is now powdery. There is no macroscopic void. The scale is two metres long.



vide d'un mètre de haut au sommet de la forme, la galerie est constituée par l'altérite résiduelle *in situ* dans laquelle on distingue toujours la stratification originelle, les lits de silex et le joint vertical central initial. Le contact entre l'altérite et la roche mère est brutal. La morphologie des parois est constituée d'une succession de coupoles. La grande différence d'avec le fantôme de roche vu précédemment dans la carrière Gauthier-Wincqz est la nature de la roche mère qui, ici, est un calcaire riche en silice microcristalline. Le fantôme de roche n'est plus constitué que par cette silice, ce que démontre l'examen microscopique. La porosité atteint 60-70 % parce que le carbonate a totalement disparu. C'est en un sens l'aboutissement du phénomène de karstification en fantôme de roche, en comparaison avec l'exemple précédent (carrière de Gauthier-Wincqz) où l'altération s'est arrêtée avant la disparition totale des carbonates.

Différence entre les deux types de karstification et conditions de la formation du fantôme de roche

À l'encontre du développement du karst « classique » durant la première phase, le vide créé par la fantômisiation est très dispersé : ce sont les pores de l'altérite résiduelle. La première phase du développement du karst par fantômisiation est donc un réseau de couloirs et de pseudo-endokarsts parcourant le massif rocheux. Il n'y a donc pas de galeries ou de puits spéléologiques. La géométrie de ces réseaux altérés est déterminée principalement par la fracturation et le type de champs de contrainte auxquels est soumis le massif au cours de son histoire. La présence de l'altérite résiduelle, mécaniquement très fragile, demande une genèse en présence d'un potentiel hydraulique extrêmement réduit. On se trouve là dans un aquifère sans circulation organisée, dans un environnement proche du niveau de base. L'eau se déplace très lentement, ce qui nécessite des joints ouverts pour que les solutions saturées puissent se renouveler, d'où des conditions de tectonique extensive. Si l'hydrodynamique est forte lors de la genèse par dissolution, les deux phases « soluble » et « solide résiduelle » seront évacuées simultanément et nous nous retrouvons là dans les conditions de la

Fig. 4 – La grotte du Pic à glace (Hainaut, Belgique). Sur la photographie de gauche, le marteau donne l'échelle. Le croquis de droite est la coupe litho-stratigraphique du pseudo-endokarst. Les parois sont sculptées en coupoles. Ce qui apparaît comme un remplissage n'est autre que l'altérite résiduelle, dans laquelle on distingue notamment les lits de silex. La cavité supérieure résulte du tassement des couches très poreuses de l'altérite.

Fig. 4 – The Pic à glace cave (Hainaut, Belgium). Hammer for scale in the left picture. The right sketch is the litho-stratigraphic section of the pseudoendokarst. The walls are carved by several cupolas. What appears to be the filling of the cave correspond in fact to the residual alterite in which we can distinguish the cherts levels. The upper cavity corresponds to the compaction of the porous layers of the alterite.

karstification classique que nous appellerons pour ces raisons « karstification par enlèvement total ».

Le devenir des fantômes de roche

Le tassement

Par essence, la fantômisaiton est un processus qui se déroule dans la zone saturée de l'aquifère. Lorsque l'altérite se dénoie, l'eau interstitielle n'exerce plus de contre-pression et l'altérite très poreuse se tasse sur elle-même. Un vide apparaît au sommet, comme dans l'exemple de la grotte du Pic à glace (fig. 4).

L'érosion mécanique

Si un potentiel hydrodynamique apparaît, l'eau de l'aquifère peut éroder mécaniquement l'altérite résiduelle des pseudo-endokarsts. Une grotte au sens spéléologique apparaît alors. Deux exemples pris dans les paléokarsts du Hainaut et un troisième dans la bordure cévenole éclairent ce processus :

- À la carrière de Nocarcentre, à Ecaussinnes (Belgique), une grotte a été trépanée par un tir (Quinif et Maire, 2009). Elle est constituée d'une galerie parcourue par une rivière souterraine. L'exploration a mis au jour l'existence d'une forte épaisseur de fantômes de roche sous la rivière. La morphologie de la galerie est essentiellement constituée de coupes et de formes arrondies, que l'on aurait classiquement attribuées à une genèse phréatique dans une galerie totalement noyée (fig. 5). Mais, lors de son recoupement par le front de taille, le cours d'eau débouchait en paroi dans la carrière, nécessitant une exhaure importante. Puis, quelques mois plus tard, la galerie était sèche car la rivière souterraine s'était enfoncée à un niveau inférieur. Clairement, nous avons assisté ici au creusement d'une grotte en quelques dizaines d'années ! Le creusement a uniquement consisté en l'évacuation mécanique de l'altérite résiduelle du pseudo-endokarst. L'énergie hydrodynamique est provoquée par le nouveau potentiel induit par le creusement progressif de la carrière au sein de l'aquifère traversé de pseudo-endokarsts.

- La carrière du Clypot, à Neuville près de Soignies (Belgique), exploite une pierre ornementale constituée d'une encrinite très compacte : le « petit granit ». Au cours de l'excavation, une grotte, totalement remblayée par une série sédimentaire de type fluviatile, a été recoupée : la grotte Improbable (Quinif *et al.*, 2006). Sous les alluvions, le contact avec la roche mère correspond à un fantôme de roche décimétrique assez résistant. Il s'agit vraisemblablement de la racine d'un gradient d'altération plus important. Le tracé de cette grotte a pu être reconstitué géométrique-

ment sur une centaine de mètres. Le remplissage comprend divers faciès : sable blanc à granulométrie de type fluviatile, « argile noire », alternance de fines strates de sables et de lutite noire. On y trouve des structures chenalisantes et des stratifications entrecroisées. Les sédiments de type « argile noire » sont en fait de l'altérite résiduelle parfois remaniée. Des blocs de calcaire fantômisé se retrouvent d'ailleurs isolés dans les couches sableuses, avec la présence de figures en piles de pont marquant l'écoulement autour de cet obstacle. Une analyse pétrographique détaillée complétée par l'étude paléontologique et radiochronologique démontre que le sédiment est constitué de sables marins côtiers d'âge coniacien remanié sous terre au Paléocène inférieur. La grotte Improbable est donc un ancien pseudo-endokarst dont l'altérite résiduelle a été évacuée et a été substituée par un sédiment fluviatile. Cette phase évolutive est dépendante de l'apparition d'un potentiel hydrodynamique permettant cette circulation de haute énergie.

- Sur la bordure cévenole, au sud du Massif central (fig. 6), de nombreux exemples de fantômisaiton ont pu être mis en évidence (Bruxelles et Wienin, 2009). La visite de mines, comme celle de la Grande Vernissière (Durfort-et-Sassenac, France), a fourni les preuves que nous recherchons pour expliquer l'origine de certaines cavités de ce secteur. En plusieurs points, les galeries ont recoupé des masses d'altérites *in situ* sous toit calcaire sain, associées ou non avec les minéralisations hydrothermales (fig. 7). Au sommet de l'altérite, nous avons identifié un niveau d'argi-

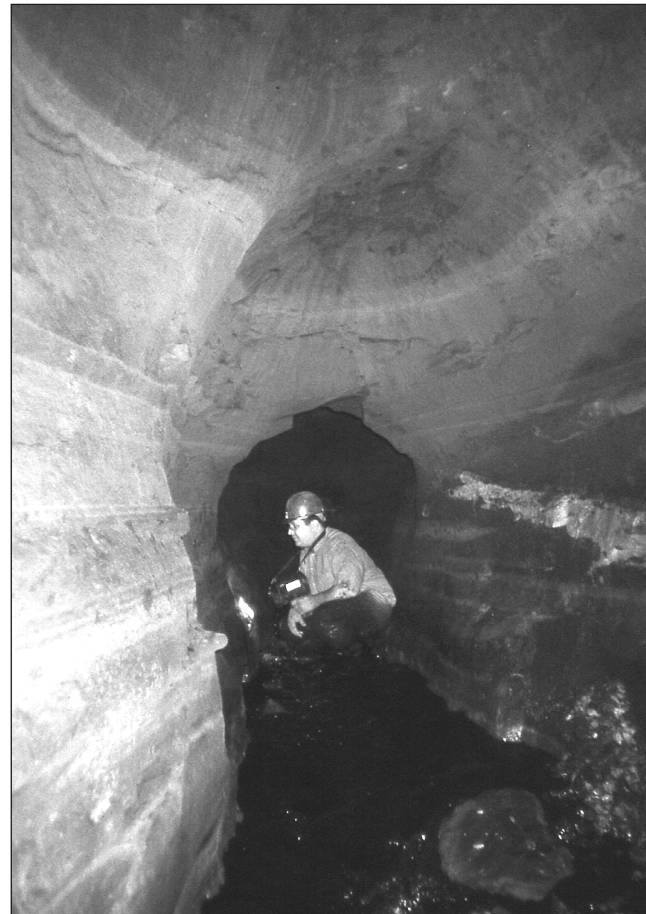


Fig. 5 – La grotte Quentin (Ecaussinnes, Belgique). Cette galerie aux formes arrondies de type coupes provient de la vidange de l'altérite résiduelle contenue initialement dans le pseudo-endokarst.

Fig. 5 – The Quentin cave (Ecaussinnes, Belgium). This gallery with rounded morphologies is formed by the removal of the residual alterite that initially filled the pseudoendokarst.

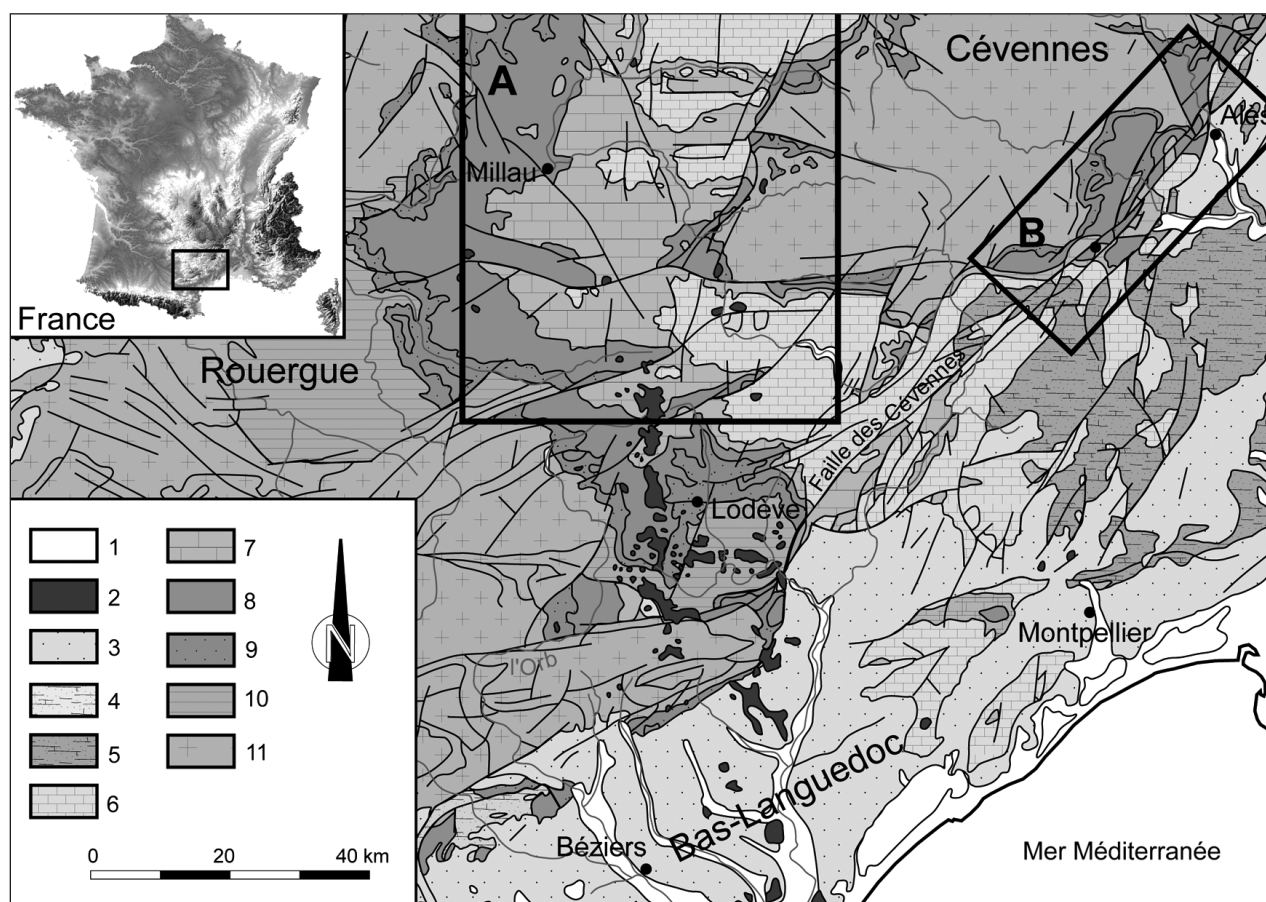


Fig. 6 – Carte géologique simplifiée de la bordure sud du Massif Central français. 1 : Quaternaire ; 2 : volcanisme ; 3 : Tertiaire ; 4 : Crétacé supérieur ; 5 : Crétacé inférieur ; 6 : Malm ; 7 : Dogger ; 8 : Lias ; 9 : Trias ; 10 : Permien ; 11 : Socle Primaire ; A : Grands Causses ; B : bordure cévenole.

Fig. 6 – *Geological map of the southern part of the French Massif Central. 1: Quaternary; 2: volcanism; 3: Tertiary; 4: Upper Cretaceous; 5: Lower Cretaceous; 6: Malm; 7: Dogger; 8: Lias; 9: Trias; 10: Permian; 11: substratum; A: Grands Causses; B: Cévennes border.*



Fig. 7 – Pseudo-endokarst vidé par l'exploitation d'une mine dans les Cévennes gardoises (la Grande Vernissière, district de Durfort). L'altérite laissée en place par les mineurs constitue l'une des parois de la galerie et se prolonge à droite sous la voûte calcaire.

Fig. 7 – *Pseudoendokarst partially excavated by mining in the Cévennes (la Grande Vernissière, Durfort). The sandy-clayey formation, in the centre of the gallery, corresponds to the ghost rock and continues under the safe roof.*

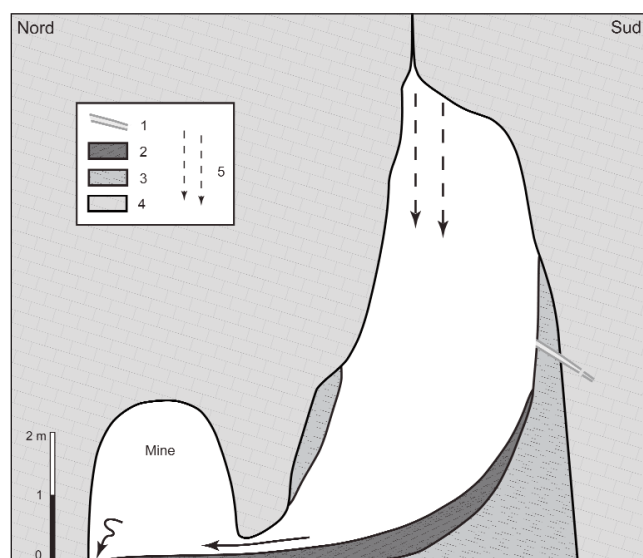


Fig. 8 – Coupe schématique d'une poche verticale fantômisée en cours de vidange. 1 : filon minéralisé ; 2 : altérite remaniée ; 3 : altérite argileuse ; 4 : altérite sableuse ; 5 : infiltrations.

Fig. 8 – *Schematic section of a vertical pocket. Ghost rock is partially eroded since the opening of the mine. 1: mineralised vein; 2: reworked alterite; 3: clayey alterite; 4: sandy alterite; 5: dripping water.*

le litée associé à des morphologies karstiques de type cou-pole. Il matérialise l'existence de circulations d'eau mises en place dans les vides formés par tassement, entre la roche fantômisée et la voûte. Dans d'autres secteurs, à la faveur d'infiltrations, l'altérite a été partiellement évacuée et des vides plus importants sont en cours de formation (fig. 8).

L'évolution des massifs fantômés

Lors de la surrection d'une région, la présence d'altérite meuble au sein d'un massif rocheux introduit une discontinuité importante qui sera préférentiellement exploitée par l'érosion. Ainsi, en surface, le déblaiement des couloirs altérés exhume les parties plus saines et peut aboutir, dans la dolomie jurassique des Grands Causses par exemple, à la formation de méga-lapiés d'aspect « ruiniforme » (fig. 9). Dans les pseudo-endokarsts, l'abaissement relatif du niveau de base provoque un tassement de l'altérite du fait de l'importante porosité. Puis des circulations karstiques peuvent réutiliser les vides formés au toit des altérites (Quinif, 1999 ; Bruxelles et Wienin, 2009) et déblayent complètement le fantôme de roche. Le réseau de conduits altérés est alors réutilisé par de véritables circulations karstiques qui réaménagent les vides et introduisent des sédiments allochtones. Comme dans le cas de la grotte Improbable en Belgique, le recoupement de pseudo-endokarst par les carrières est caractérisé parfois par l'apparition d'une émergence au toit de l'altérite. L'écoulement évacue les parties fantômées et, en quelques mois, l'érosion régressive permet la formation de ca-

vités pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres de développement (fig. 10). À une autre échelle, lors du creusement des vallées, le développement des systèmes de drainage karstique a pu largement bénéficier de ce phénomène. Ainsi, certaines émergences des Grands Causses comme la source du Durzon dans le canyon de la Dourbie (Bruxelles, 2004) ou d'autres sources majeures dans les gorges du Tarn (Bruxelles *et al.*, 2007) ont une dynamique conquérante par

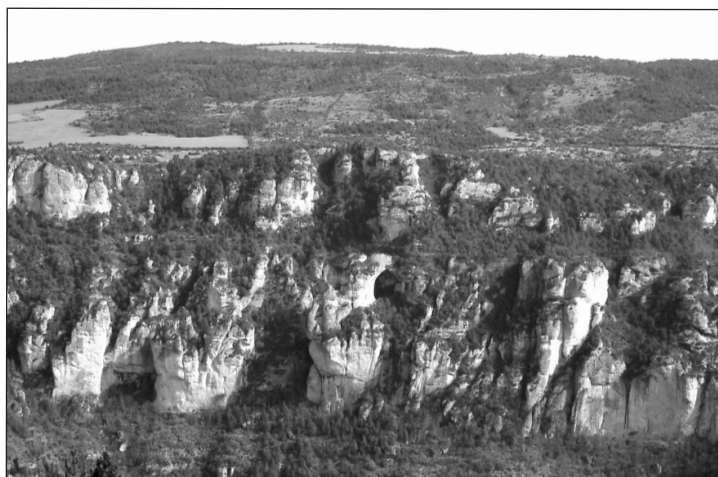


Fig. 9 – **Bordure nord du Causse Méjean.** L'érosion met bien en évidence l'altération profonde des dolomies jurassiques (Dogger). Elle prédispose au déblaiement des couloirs (canales), au dégagement des reliefs ruiniformes mais aussi à la formation d'avens.

Fig. 9 – **Northern border of the Causse Méjean.** The erosion reveals the deep weathering of Jurassic dolomites (Dogger). It predisposes to the clearing of corridors (canales), to the exhumation of tower-like mega-lapiés and also to the formation of pits.

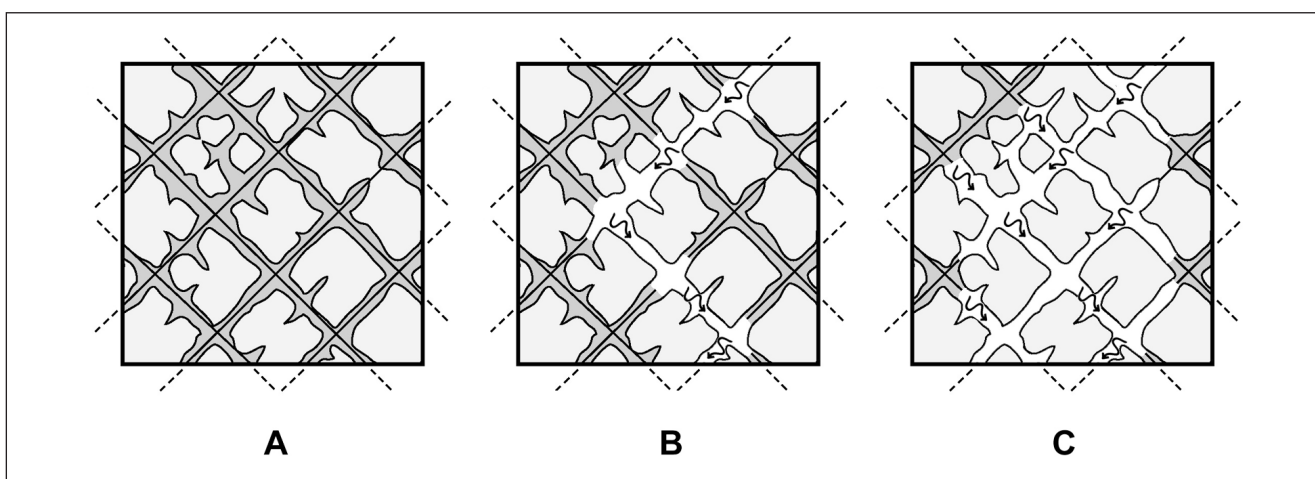


Fig. 10 – **Plan schématique d'un pseudo-endokarst.** Tant qu'il n'y a pas assez d'énergie potentielle hydraulique, les circulations ne peuvent évacuer l'altérite (A). Puis l'apparition d'un gradient hydraulique permet la mise en place d'une circulation et l'évidement des conduits par érosion régressive (B). Progressivement, un labyrinthe de galeries apparaît, calé sur le maillage tectonique qui avait guidé l'altération (C). Les parties trop éloignées des principales circulations restent colmatées par le fantôme.

Fig. 10 – **Schematic map of a pseudoendokarst.** As long as there is not enough potential hydrological energy, the runoff is not able to evacuate the alterite (A). Then, the appearance of a hydraulic gradient permits the development of a water flow which can remove the alterite by headward erosion (B). Progressively, a real maze of galleries appears, linked to the tectonic network which guided initially the development of the ghost rock (C). Parts that are too far from the main water flows will remain filled with the ghost rock.

rapport aux autres sources (fig. 6). Drainant directement les formations fantômisées, elles étendent rapidement leur bassin-versant vers l'intérieur des plateaux en vidant les parties altérées de la dolomie et en exportant le sable dolomitique résiduel. Le soutirage induit par ces circulations provoque la vidange de fractures altérées qui rejoignent directement la surface et forment de nombreux gouffres. Il se produit donc un processus d'érosion régressive en milieu souterrain depuis l'émergence (Bruxelles, 2004 ; Quinif et Maire, 2009 ; Quinif, 2010 ; Dandurand et Maire, sous presse).

Conclusions et perspectives

Les observations réalisées dans les carrières belges mais aussi dans la bordure cévenole montrent clairement le passage d'un fantôme en place à une galerie partiellement évidée et servant alors de drain karstique classique. Ces observations permettent de montrer comment les pseudo-endokarsts ont pu être réutilisés dans les étapes préparatoires de la karstogenèse dans ces massifs. On peut alors se poser la question de l'origine de certaines grandes cavités de ces secteurs comme la grotte de Trabuc (Mialet, Gard). Sa géométrie labyrinthique, sa physionomie et certains remplissages originaux nous avaient très tôt incités à imaginer qu'un phénomène de fantômisait était à l'origine d'une partie de la cavité (Bruxelles et Bruxelles, 2003). Le phénomène de fantômisait et l'identification de cavités découlant de ce processus prennent de plus en plus d'importance. Observés et décrits pour la première fois aux États-Unis (Schmidt, 1974), elles ont ensuite été étudiées dans la craie de Normandie et qualifiées de « primokarst » (Rodet, 1996). Puis, c'est en Belgique que leur étude a pris de l'ampleur (Vergari, 1998 ; Quinif, 1999) avant que les fantômes de roche ne soient reconnus dans plusieurs autres régions comme les Alpes lombardes (Tognini, 2001), les Alpes centrales, mais aussi dans le Médoc (Courrèges, 1997), les Grands Causses (Bruxelles, 2004) ou la bordure cévenole (Bruxelles et Wienin, 2009). Au-delà des roches carbonatées, le processus de fantômisait permet aussi de mieux comprendre l'existence de traces de karstification (*i.e.*, formes de surface ou cavités) dans des roches non carbonatées. Ainsi, les morphologies développées dans les grès quartzitiques des tepuys vénézuéliens (Piccini, 1995) semblent pouvoir être assimilés à des couloirs et à des pseudo-endokarsts rajeunis par la vidange de l'altérite. C'est également le cas des grottes creusées dans les quartzites d'Afrique du Sud (Martini et Marshall, 2002) ainsi que dans les métagabbros et les gneiss d'Afrique orientale (Willems *et al.*, 2001). Ce serait également le cas pour les morphologies karstiques décrites dans les péridotites riches en nickel de Nouvelle Calédonie (Trescases, 1973).

Remerciements

Nous tenons à remercier les trois relecteurs anonymes qui ont permis, par leurs remarques constructives, d'améliorer notre manuscrit.

Références

- Bruxelles L. (2004)** – Dépôts et altérites des plateaux du Larzac central : causses de l'Hospitalet et de Campestre (Aveyron, Gard, Hérault). Évolution morphogénétique, conséquences géologiques et implications pour l'aménagement. *Document du BRGM*, 304, 286 p.
- Bruxelles L., Bruxelles S. (2003)** – La chasse aux fantômes dans les Grands Causses. Utilisation d'un nouveau concept de spéléogénèse dans la recherche de cavités. *Spelunca*, 88, 14-20.
- Bruxelles L., Wienin M. (2009)** – Les fantômes de roche de la mine de la Grande Vernissière (Fressac, Gard). Premières observations sur l'origine de certains karsts de la bordure cévenole. *Actes du colloque AFK - Pierre Saint-Martin 2007. Karstologia Mémoires*, 17, 192-200.
- Bruxelles L., Simon-Coinçon R., Guendon J.-L., Ambert P. (2007)** – Formes et formations superficielles de la partie ouest du Causse de Sauveterre (Grands Causses, Aveyron et Lozère). *Karstologia*, 49, 1-14.
- Courrèges M. (1997)** – Le crypto-karst de la péninsule du Médoc. Crypto-altération, dissolution, karst sous-marin et évolution quaternaire. *Quaternaire*, 8, 289-304.
- Dandurand G., Maire R. (sous presse)** – Essai de typologie des cavités du karst de la Rochefoucauld (Charente). Rôle de la « fantômisait » crétacée, du battement de la nappe karstique et d'un effet de site hérité. *Dynamiques environnementales. Travaux du Laboratoire de Géographie Physique Appliquée de l'université Bordeaux 3*.
- Erhart H. (1967)** – La genèse des sols en tant que phénomène géologique. Masson, collection Évolution des sciences, Paris, 90 p.
- Havron C., Baele J.-M., Quinif Y. (2007)** – Pétrographie d'une altérite résiduelle de type « fantôme de roche ». *Karstologia*, 49, 25-32.
- Mangin A. (1974)** – Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. 1^{ère} partie. Généralités sur le karst et les lois d'écoulement utilisées. *Annales de Spéléologie*, 29, 283-332.
- Martini J.E.J., Marshall C.G.A. (2002)** – Noodsberg cave, une grotte dans les quartzites de la province du Kwazulu-natal. *Karstologia*, 39, 47-50.
- Piccini L. (1995)** – Karst in siliceous rock : karsts landforms and caves in the Auyan-tepui (Est Bolivar, Venezuela). *International Journal of Speleology* 24, 41-54.
- Quinif Y. (1999)** – Fantômisait, cryptoaltération et altération sur roche nue, le triptyque de la karstification. Actes du colloque européen Karst 99, 159-164.
- Quinif Y. (2010)** – Fantômes de roche et fantômisait – Essai sur un nouveau paradigme en karstogenèse. *Karstologia Mémoires*, 18, 196 p.
- Quinif Y., Maire R. (2009)** – La Grotte Quentin (Hainaut, Belgique) : un modèle d'évolution des fantômes de roche. *Actes du colloque AFK - Pierre Saint-Martin 2007. Karstologia Mémoires*, 17, 214-218.
- Quinif Y., Meon H., Yans J. (2006)** – Nature and dating of karstic filling in the Hainaut Province (Belgium). Karstic, geodynamics and paleogeographic implications. *Geodinamica Acta* 19, 73-85.

- Rodet J. (1996)** – Une nouvelle organisation géométrique du drainage karstique des craies : le labyrinthe d'altération, l'exemple de la grotte de la Mansonnière (Bellou-sur-Huisne, Orne, France). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 322, 1039-1045.
- Tognini P. (2001)** – Lombard Southalpine karst: main features and evolution related to tectonic, palaeogeographic and palaeoclimatic regional history – two examples of a global approach, *In* Hauselmann P., Monbaron M. (Eds.) *Cave Genesis in the Alpine Belt*. Rapports de recherche, Institut de Géographie, Université de Fribourg, 81-114.
- Trescases J.-J. (1973)** – *L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiques en zone tropicale : formation des gisements nickélifères de Nouvelle-Calédonie*. Thèse en sciences, université de Strasbourg. Mémoires de l'ORSTOM, 78, 259 p.
- Schmidt V.A. (1974)** – The paleohydrology of Laurel Caverns, Pennsylvania. *In Proceedings of the 4th Conference on Karst Geology and Hydrology*. Morgantown, W.Va, West Virginia Geological and Economic Survey, 123-128.
- Vergari A. (1998)** – Nouveau regard sur la spéléogénèse : le pseudo-endokarst du Tournaisis (Hainaut, Belgique). *Karstologia*, 31, 12-18.
- Willems L., Pouclet A., Vicat J.P. (2001)** – Problématique des karsts en roches silicatées non carbonatées. La grotte Mfoula, un cas dans les gneiss du Sud Cameroun. *Geological survey of Belgium*, Professional papers, 2001/3N, 295, 135-139.

Article soumis le 6 juin 2011, accepté le 4 septembre 2011.