

Fantômisation : un nouveau paradigme entre la théorie des deux phases de Davis et la théorie de la biorhexistase d'Erhart

YVES QUINIF¹, JEAN-MARC BAELE¹, CAROLINE DUBOIS¹, CÉCILE HAVRON², OLIVIER KAUFMANN¹ & ANNE VERGARI³

¹Service de Géologie Fondamentale et Appliquée, Université de Mons. E-mail: Yves.quinif@umons.be, jean-marc.baele@umons.ac.be, olivier.kaufmann@umons.ac.be.

²INISMa. E-mail: c.havron@bcrc.be.

³SAGREX. E-mail: Anne.Vergari@sagrex.be.

RÉSUMÉ. Le concept traditionnel de la karstification fait intervenir le passage des composés chimiques constituant la phase solide (la roche mère) dans la phase liquide, tous ces éléments, après attaque chimique, étant pris en charge par le flux d'eau. Nous appelons ce paradigme la karstification par enlèvement total. A partir d'un joint (plan de stratification, diaclase, joint tectonique, faille), le flux d'eau dissout les épontes et élargit le joint. Un flux d'eau de plus en plus important circule par ce joint en voie d'ouverture et accentue le phénomène par rétroaction positive. Avec le temps, le flux d'eau entre zone d'alimentation et zone de sortie s'organise et un système karstique se structure. On peut également considérer l'évolution des vides souterrains du point de vue de l'altérogénèse. Lors d'une première phase, le solide initial (la roche mère) se sépare en une phase soluble exportée et une phase solide résiduelle : le « fantôme de roche ». La phase liquide emporte les solutés et le solide résiduel reste sur place sous forme d'altérite résiduelle. Cette situation se déroule lorsque l'énergie potentielle est faible, le flux d'eau étant incapable d'emporter l'altérite résiduelle. Seuls les éléments dissous quittent le système. Cette situation correspond à la phase de biostase dans le concept de la théorie de la biorhexistase d'Erhart. Quand une énergie potentielle apparaît ensuite au cours de l'évolution géologique (surrection, régression eustatique, modification de l'aménagement du sol), l'altérite résiduelle peut être érodée et une grotte spéléologique se forme. Cet épisode correspond à une phase de rhexistase. Dans ce concept, la spéléogénèse *s.s.* (formation d'une cavité pénétrable à l'homme) est la seconde phase qui suit la formation du fantôme de roche. Ce nouveau paradigme peut être comparé à la théorie en deux phases de Davis, mais ici la phase phréatique ne crée pas de vide macroscopique : le fantôme de roche est une nouvelle phase avec une grande porosité, localisée suivant les volumes présentant à l'origine la plus grande perméabilité initiale. La géométrie du réseau de fantômes de roche dépend essentiellement des contraintes tectoniques durant la phase d'altération, ou de la distribution initiale des zones suffisamment perméables. L'érosion mécanique de l'altérite résiduelle crée des grottes spéléologiques qui suivent une autre organisation spatiale que celles dues à la karstification par enlèvement total.

MOTS CLES: Fantôme de roche, karstification, spéléogénèse, bio-rhexistase

ABSTRACT. Ghost-karstification theory: a new paradigm between Davis' two phases' theory and Erhart's biorhexistasy theory. The traditional concept of karstification is the result of the transition of chemical compounds from the solid phase to a liquid phase. Dissolved elements and insoluble parts are carried by the water flows. We called this paradigm the karstification by total removal. Through a joint (bedding plane, tectonic joint, fault), the water dissolves the walls of the joint and widens it. A more and more important water flow circulates through the joints which broaden more and more. Over time, the water flows construct a structured underground river system (karstic system). We also consider the evolution of the underground voids from the general point of view of weathering. In a first stage, the initial solid phase (the bed-rock) is separated into a liquid phase and a residual solid phase which is the "ghost-rock". The liquid phase takes away the soluble ions and colloids and the residual solid remains in place like a residual alterite. This is the situation when the potential energy is nearly zero implying a low fluid flow. Only the dissolved elements go out of the system. This situation corresponds to the biostasy stage in the concept of the Erhart's biorhexistasy theory. The residual solid phase can be removed when the potential energy grows during the geological evolution (tectonic surrection, eustatic regression, modification of the soils management) and a cave appears. This corresponds to the rhexistasy stage in the Erhart's biorhexistasy theory. In this context, the speleogenesis is the second stage preceded by the *in-situ* weathering and the development of a ghost-rock. This new paradigm can be compared to the two phases' theory of Davis, but here, the first phreatic phase doesn't create macroscopic voids: the ghost-rock is a new phase with a high porosity, located along the areas which present a higher permeability in the initial state. The geometry of the ghost-rock network essentially depends of the tectonic constraints during weathering or of the available volumes with sufficient initial permeability. Mechanical erosion of the residual alterite creates caves following a different spatial organization than that obtained by the total removal karstification.

KEYWORDS. Ghost-rock, karstification, speleogenesis, bio-rhexistasy

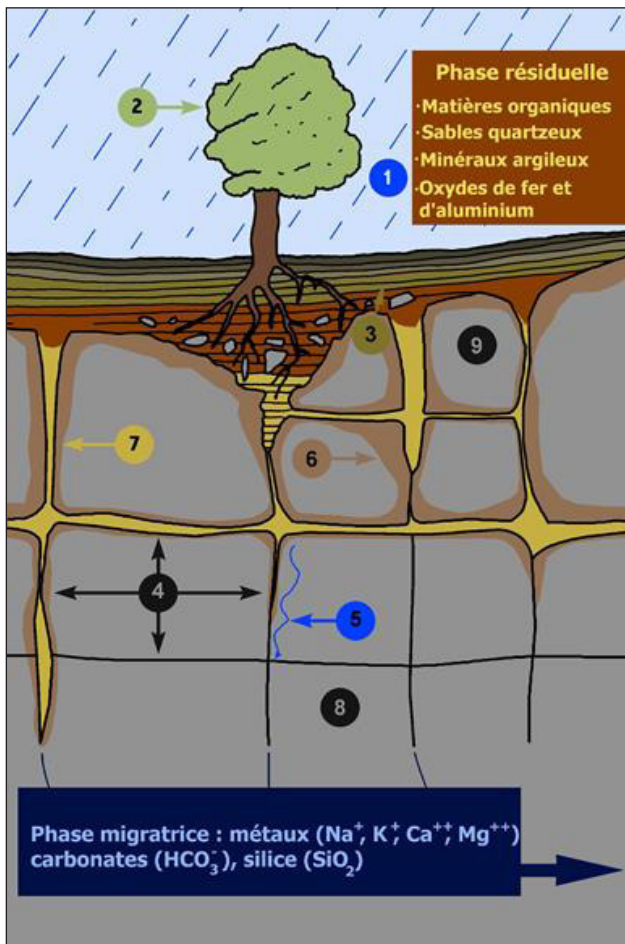
1. Introduction : le fait karstique

L'observation des massifs carbonatés conduit à individualiser une multitude de formes d'érosion qui présentent un caractère spécifique : surface riche en dépressions fermées (lapiaz, dolines, ouvalas) et diverses formes souterraines pénétrables. L'hydrogéologie de ces massifs est souvent particulière connaissant des lois non linéaires (Ford & Williams, 2007 ; Salomon, 2006 ; White, 1989). L'importance épistémologique des explorations, privilégiant naturellement la notion de vides (les formes spéléologiques), conduisit les théories karstogénétiques vers le caractère spéléogénétique : les vides souterrains se développent à partir de joints de tout type qui, sous l'influence de la circulation de l'eau et de l'attaque chimique des épontes, s'élargissent progressivement pour se transformer en conduits, avec une sélection privilégiant certaines familles directionnelles. Une hiérarchisation géométrique et hydrogéologique s'opère et un système karstique se structure avec identification de drains et de zones annexes (Mangin, 1975).

Cette conception, que nous avons appelée « karstogénèse par enlèvement total », pose quasiment en postulat que le résultat de l'altération chimique de la roche mère, solutés et insolubles, soit évacué en totalité. De plus, ce point de vue a convaincu les chercheurs que les lithologies de type carbonaté sont les seules à pouvoir être karstifiées car le résidu de l'altération est très faible. On peut résumer ce paradigme par les faits suivants :

- Existence d'un massif formé de roches modérément solubles, permettant une certaine pérennité des formes, représentée surtout par les carbonates ;
- Existence de solutions de continuité dans la masse rocheuse permettant à l'eau de pénétrer sous terre ;
- Insolubles en quantités telles que tous les vides formés ne se colmatent pas systématiquement.

On constate que ces notions sont introduites dans l'optique d'expliquer l'existence de vides souterrains. Le raisonnement part d'eux et non pas des prémices du phénomène karstique. Il y a un moyen d'aborder le problème sous un autre angle, celui de l'initiation de l'altération.



La vision thermodynamique de la karstification conduit à une compréhension des processus (Quinif, 1998 ; Quinif, 2010). Cette conception consiste à considérer le système karstique en termes de système thermodynamique qui échange énergie, matière et information avec le monde extérieur. Les énergies en jeu sont (1) l'énergie chimique qui transforme la roche mère en un ensemble de solutés (ions tels que Ca^{++} , HCO_3^- ; colloïdes tel que SiO_2) et une altérite résiduelle (calcite spartique, minéraux argileux, minéraux insolubles) ; (2) l'énergie potentielle, représentée par les débits et les différences d'altitude entre zone d'alimentation et zone de sortie, ou encore par les différences de température dans le cas de circulations hydrothermales ; (3) l'énergie mécanique qui a fracturé la roche et a ouvert certaines familles directionnelles de joints lors de phases de tectonique en extension ou par des effets de relief (détente de versant par exemple).

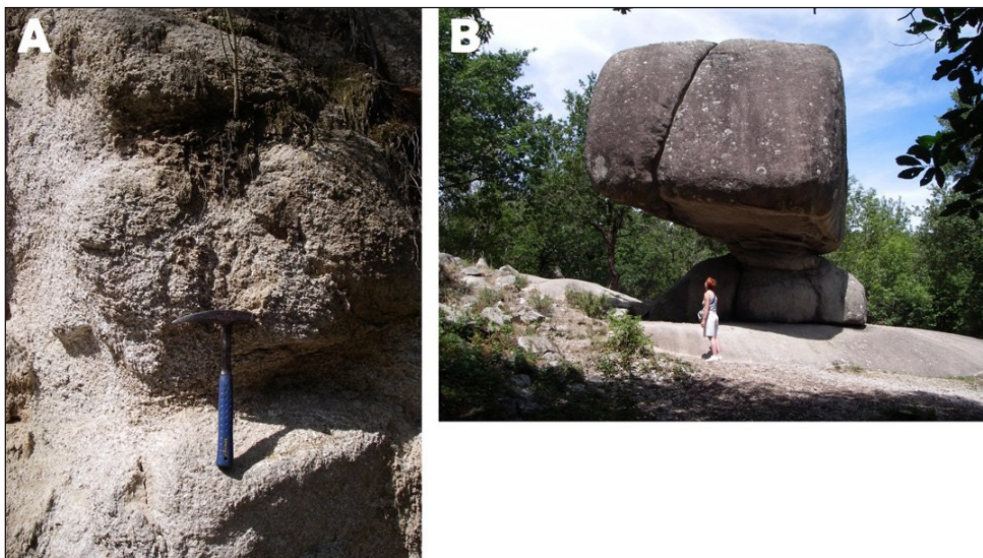


Figure 2. A. Les cryptoformes sur granite (Massif du Sidobre, France). Une boule de granite déjà fortement altérée incluse dans l'arène granitique. **B.** La « Peyro Clabado », une roche granitique mise à jour par l'érosion mécanique de l'altérite lors d'un épisode rhexistatique.

Figure 2. A. Cryptofeatures on granite (Sidobre, France): A ball of weathered granite included in the sandy regolith. **B.** The « Peyro Clabado », a granitic rock revealed by mechanical erosion of the alterite during a rhexistatic episode.

Figure 1. Le mécanisme de la biostase. Cette coupe de principe montre la formation d'un sol (3) sous l'effet des éléments climatiques (1) et de la vie (2) agissant sur une roche mère (8). Cette dernière, un granite par exemple, est découpé par des fractures (4) par lesquelles transite l'eau acide. L'altération de cette roche progresse ainsi de haut en bas à partir de la surface du sol mais aussi à partir des parois des fissures (7). Un liseré d'altération plus ou moins important (6) progresse vers l'intérieur de la roche saine, isolant progressivement des blocs de roches entourés par des zones altérées (9). Les éléments dissous sont évacués avec les eaux souterraines (5). Les éléments résiduels restent sur place, à la base du sol et remplissent les fissures élargies (7).

Figure 1. The mechanism of biostasy. This theoretical section shows the formation of a soil (3) as a result of climatic (1) and biological (2) elements affecting the bedrock (8). This bedrock, for example granite, is cut by fractures (4) through which flows the acid water. Weathering of this rock progresses downward from the surface but also from the walls of cracks (7). A more or less significant border of weathering (6) progresses inside the rock, progressively isolating blocks of rock surrounded by weathered zones (9). The dissolved elements are drained away with groundwater (5). The residual alterite remains on-site, at the base of the soil and filling broadened cracks (7).

Notons que la perméabilité initiale peut être due à des conditions sédimentologiques sous faible diagenèse ou encore à des karsts précédents.

2. L'enseignement de la pédogenèse

2.1. L'altération

Toute roche exposée à l'atmosphère subit les atteintes de l'érosion. En particulier, l'altération chimique les transforme profondément suivant diverses réactions chimiques : dissolution physique, oxydation, attaque acide, hydrolyse. Toutes les lithologies peuvent être transformées, la roche mère fournissant une phase soluble sous forme de solutés ioniques ou de colloïdes et une matrice solide plus ou moins meuble et friable : l'altérite résiduelle (Fig. 1). L'exemple classique du granite est illustratif à la fois des points de vue minéralogique et géomorphologique. Les aluminosilicates, sous l'effet de l'hydrolyse acide, se transforment d'une part en ions métalliques (Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++}), en anions bicarbonates et en colloïdes siliceux, et d'autre part en une altérite résiduelle composée des minéraux argileux, des oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium et du quartz résiduel. Suivant l'intensité de l'altération et sa durée, on retrouve également les minéraux primaires plus moins altérés mais désolidarisés les uns des autres : l'arène granitique. Cette arène sera recouverte par un sol caractéristique du climat (Dercourt *et al.*, 2006).

2.2. Les formes résultantes

L'altérite résiduelle couvre le toit de la roche mère en y sculptant un cryptorelief formé de dépressions arrondies, de couloirs verticaux et de formes positives comme des pitons. Les travaux de



Figure 3. Fantômes de roche (Carrière du Clypot, Neufvilles). Cette carrière exploite la pierre bleue dans le Tournaisien terminal. A l'avant plan, les banquettes de découpe sont dans le faciès « petit granit » (Formation d'Ecaussinnes). La paroi à l'arrière plan est constituée des faciès « raches avec et sans cherts » (Formation de Thiarfont). Les fantômes de roche sont visibles sous la forme de surfaces plus sombres, principalement structurées ici comme des couloirs verticaux descendant du toit sous la couverture sablo-argileuse paléogène. Quelques formes de type fantôme sont totalement incluses dans la masse rocheuse.

Figure 3. Ghost-rock (Clypot quarry, Neufvilles). This quarry exploits the blue stone from the Upper Tournaisian. In the foreground, cutting benches are in the "Petit Granit" (Ecaussinnes Formation) facies. The wall in the background consists of «Raches with and without cherts» facies (Thiarfont Formation). The ghost-rocks are visible in the shape of dark, mainly structured here as vertical corridors down from the roof under the sandy-clayey Paleogene transgressive formations. Some ghost-rocks features are totally included in the bedrock.

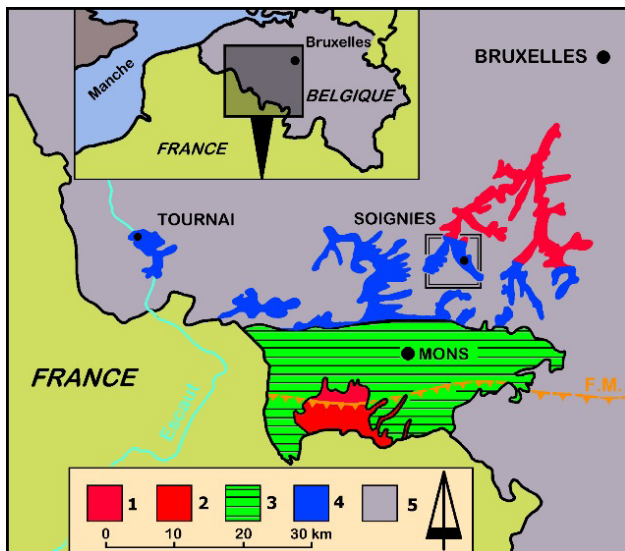


Figure 4. Carte géologique simplifiée du Hainaut septentrional et localisation des carrières de Soignies (encadrement noir). 1. Socle regroupant les schistes siluriens du Massif du Brabant et leur couverture du Dévonien moyen et supérieur. 2. Dévonien du Plateau de Blaugies appartenant à la fois au Bassin autochtone de Namur au nord et au Bassin de Dinant allochtone au sud. 3. Mésozoïque du Bassin subsident de Mons. 4. Calcaires carbonifères. F.M. Faille du Midi, faille de charriage séparant le massif de Dinant allochtone sur le bassin de Namur au nord.

Figure 4. Simplified geological map of northern Hainaut and location of the Soignies' quarries (black frame). 1. Basement comprising Silurian shale of the Brabant Massif and the formations from Middle and Upper Devonian. 2. Devonian of the Blaugies Plateau, belonging to the Namur unit to the north and to the Dinant unit to the south. 3. Mesozoic formations of the Basin of Mons. 4. Carboniferous limestone. 5. Cenozoic sands and clays. F.M. Midi fault, overthrust fault separating the Namur unit in the north from the allochthonous Dinant Basin in the south.

génie civil sous la forêt intertropicale ont démontré la puissance potentielle de ces altérites, dépassant fréquemment plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur. Ces formes se dévoilent lorsque l'altérite est érodée mécaniquement, montrant des morphologies parfois extraordinaires comme les « roches perchées » ou les « roches branlantes » (Fig. 2).

2.3. La biorhexistiasie d'Erhart

Le passage de l'altération chimique prédominante à l'érosion mécanique a été formalisé par H. Erhart dans sa théorie de la biorhexistiasie (Erhart, 1967). Durant les périodes de stabilité biologique, connaissant le développement d'un couvert végétal protecteur, l'altération chimique est la seule à s'exercer quantitativement. Lors d'une rupture d'équilibre, changement climatique, surrection tectonique, régression eustatique, modification anthropique de l'aménagement des sols, le manteau d'altérite devient mécaniquement instable et peut être érodé par exemple par les eaux courantes. Les formes de la roche mère sont alors dégagées.

2.4. Les fantômes de roche

Cette situation peut elle se retrouver dans les roches traditionnellement définies comme karstifiables ? La pureté du calcaire semble militer en défaveur de cette vision des choses. Néanmoins, les paléokarsts hennuyers (Belgique) mis au jour grâce aux travaux des carrières permettent d'étudier des formes analogues à celles rencontrées dans d'autres lithologies (Quinif *et al.*, 1993 ; Quinif & Quinif, 2002 ; Quinif, 2010). Plus particulièrement, les calcaires tournaisiens sont parcourus par des formes karstiques soit sous forme de couloirs descendant à partir

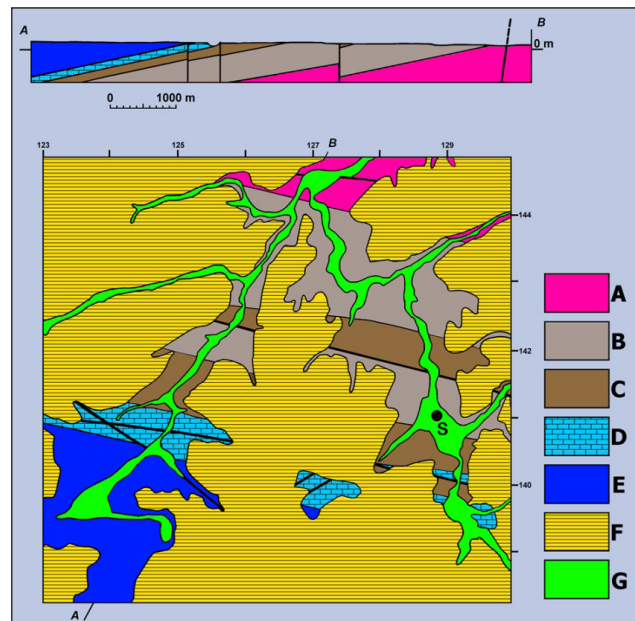


Figure 5. Esquisse géologique de la région de Soignies (S) (d'après Hennebert & Doremus, 1995). Les alluvions quaternaires sont en vert (G). Le Silurien du Massif du Brabant (A) a été tectonisé par la phase calédonienne. Les formations dévono-carbonifères (B : Givétien et Frasnien ; C : Famennien) reposent en discordance sur ce vieux socle. Le calcaire concerné dans cet article est le Tournaisien (D ; E : Viséen). Les failles majeures sont représentées par de gros traits noirs. La couverture tertiaire (Thanétien + Yprésien ; F) est discordante sur la surface pénéplanée du socle. Les coordonnées géographiques sont les coordonnées kilométriques du système Lambert belge.

Figure 5. Geological sketch of the Soignies area (from M. Hennebert & P. Doremus, 1995). Quaternary alluviums are in green (G). The Silurian of the Brabant Massif (A) was tectonised by the Caledonian phase. The Devonian-Carboniferous formations (B : Givetian and Frasnian ; C : Famennian) are discordant on the Brabant Massif. The limestone studied in this paper belongs to the Tournaisian (D ; E : Visean). The major faults are represented by thick black lines. The Tertiary overburden (Thanetian and Ypresian) is discordant on the post-Hercynian peneplain. The geographical coordinates are the kilometric coordinates of the Belgian Lambert System.

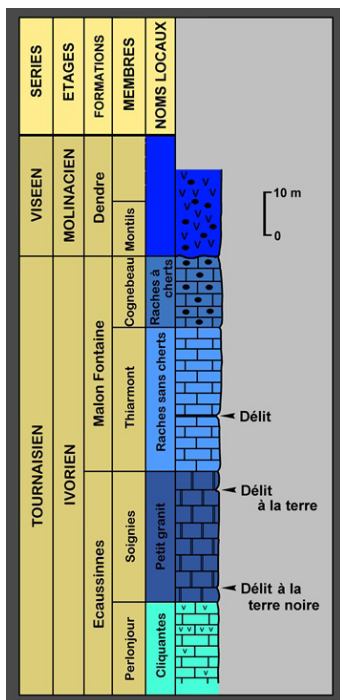


Figure 6. Lithostratigraphie du passage Tournaisien – Viséen dans la région de Soignies. Les “délimit” sont des couches centimétriques argileuses dont l’origine reste obscure. Les “Cliquantes” sont formées de calcaires dolomitiques. Le “Petit granit” est une encrinite très compacte. Les “Rachas” sont des calcaires micritiques sombres (d’après Hennebert & Doremus, 1995). La Formation de la Dendre est un calcaire dolomitique à cherts. Les phénomènes karstiques de type fantômes se développent dans toutes les formations indiquées. Le « Fantôme de l’excursion » est situé dans les Rachas à cherts.

Figure 6. Lithostratigraphy of the transition between Tournaisian and Viséan in the area of Soignies. The strata called “délimit” are thin clayed layers of some centimeters of which the origin

is yet obscure. The formation “Cliquantes” is constituted by dolomitic limestones. The formation “Petit Granit” is a very compact encrinite. The formation “Rachas” are black micritic limestones (following Hennebert & Doremus, 1995). The ghost-rocks develop in all those formations. The studied example of “Fantôme de l’excursion” is located in the Rachas with cherts.

du toit du calcaire soit sous forme de morphologies entièrement incluses dans la masse rocheuse (Fig. 3). Elles renferment une altérite résiduelle formée des éléments insolubles comme les cherts siliceux et d’éléments modérément solubles comme la calcite sparitique des tests de fossiles ou de filons. Cette altérite est très poreuse (plusieurs dizaines de pourcents) et, dans une première phase, isovolumique, mimant ainsi la roche mère d’où le nom que nous avons donné au phénomène : le fantôme de roche.

3. Une forme exemplaire : le « fantôme de l’excursion »

3.1. Cadre morpho-structural

Le fantôme de roche que nous avons nommé « fantôme de l’excursion » est situé dans la carrière de Gauthier-Wincqz à Soignies, au sein d’un puissant ensemble carbonaté carbonifère dont l’encrinite du Tournaisien supérieur, très compacte (Havron *et al.*, 2007). Ces séries ont été basculées à la fin du Paléozoïque par la tectogenèse varisque. Dans la région de Soignies, la couverture dévono-carbonifère constitue une bande de direction N100°E avec un pendage régulier de 10 à 15° S. Le calcaire est recoupé par une surface d’érosion post-hercynienne fossilisée par une série sablo-argileuse thanétienne et yprésienne dont l’épaisseur varie de quelques mètres à plus de 10 mètres (Hennebert & Doremus, 1995). Le socle paléozoïque a subi de puissantes altérations durant le Mésozoïque, notamment le Jurassique et le Crétacé inférieur (Figs 4, 5, 6).

3.2. Pétrographie du fantôme de roche

Le fantôme de roche se développe dans le membre de Cognebeau de la formation de Malon Fontaine (Tournaisien supérieur, Fig. 6). Visible sur une hauteur d’environ 4 mètres, il est limité vers le haut par un toit de calcaire sain (Fig. 7). Le bas de l’altérite n’a pas été dégagé car le fantôme s’enfonce sous le plancher de la carrière. La zone altérée s’élargit de façon continue du haut vers le bas. Il existe une zone frontière de quelques décimètres de large au maximum entre la roche saine et le fantôme de roche. Les filons de calcite et les fossiles du calcaire sain restent présents dans la matrice du fantôme de roche. Les strates peuvent être suivies sur toute la largeur de la zone altérée. Le fantôme de roche



Figure 7. Le fantôme de l’excursion (Carrière Gauthier-Wincqz, Soignies). Le fantôme est totalement inclus dans la masse rocheuse. De couleur plus sombre, on y distingue encore des joints de stratifications. Les filons de calcite sparitique, moins altérés, restent visibles. L’aspect granuleux de l’altérite, meuble, est dû aux entroques elles aussi moins altérées que le ciment micritique.

Figure 7. The ghost-rock named “Fantôme de l’excursion” (Gauthier-Wincqz quarry, Soignies). The ghost-rock feature develops in front of the geologist, totally included in the bed-rock. It is darker than the bed-rock and we can see some bedding-planes. The calcitic joints are visible because they are less weathered. The grain aspect of the alterite is due to the crinoids which are less weathered than the micritic cement.

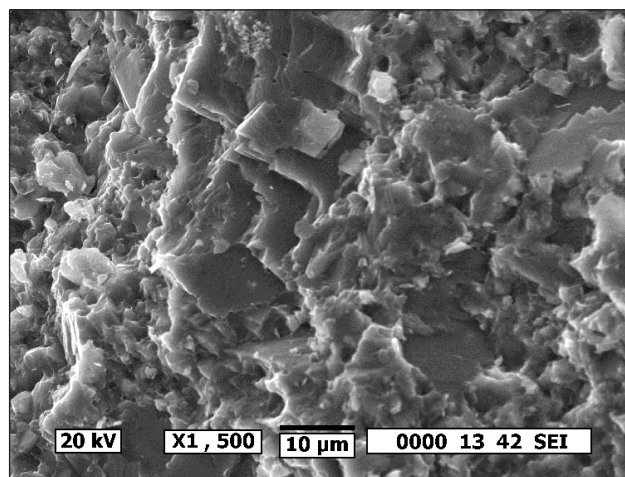


Figure 8. Photographie au MEB d’un échantillon de calcaire sain. Le calcaire est compact, aucun pore n’est décelable. Les grains sont solidaires.

Figure 8. SEM photograph of a fresh limestone. The grains are connected together, without weathering area.

connaît une faible cohésion, il est très friable. Sa teinte est plus sombre que celle du calcaire dont il est issu.

La plus importante des caractéristiques du fantôme de roche est l’augmentation de la porosité, ce dont témoignent bien les photographies prises au MEB, (Figs 8 & 9). Si les roches saines

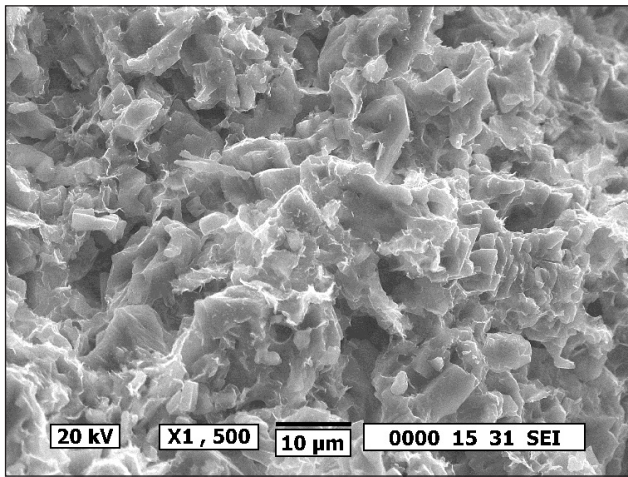


Figure 9. Photographie au MEB d'un échantillon de calcaire fantômisé. Les grains sont séparés par des vides ; cette porosité est interconnectée.

Figure 9. SEM photograph of a sample constituted with ghost limestone. The grains are separated by voids. This porosity is interconnected. The sparitic crystals are affected by weathering gulfs.

(calcaires et calcschistes), titrant à 90% de CaCO_3 sont compactes, dures, fossilifères et présentent l'odeur caractéristique de roches riches en matière organique, l'équivalent stratigraphique fantômisé, après exportation des carbonates les plus solubles, peut être effrité à main nue et possède une porosité de l'ordre de $40\% \pm 5\%$ (Havron *et al.*, 2007). Leur composition chimique reste néanmoins essentiellement carbonatée, sauf les cherts siliceux qui subsistent.

3.3. Mécanisme génétique

Il apparaît bien au travers de cet exemple que la fantômisation est une altération de type acide provoquant l'exportation d'une partie carbonatée plus soluble que la partie résiduelle constituée de calcite aussi bien que des insolubles représentés ici par des nodules siliceux. L'analyse pétrochimique conduit à mettre en évidence la synthèse d'acide sulfurique à partir de l'oxydation de sulfure tel la pyrite, au travers de l'observation des empreintes de gypse dans l'altérite. Il s'agit bien d'une altération que nous pourrions appeler de type pédogénétique, *per descensum*, à partir d'une surface couverte de forêts dans un contexte tropical typique du Crétacé moyen. Ce n'est pas une cavité karstique classique, une grotte vide de matière qui s'est formée mais une racine d'altération, dans ce cas totalement incluse dans la roche mère, que nous avons appelée pseudoendokarst.

4. Conditions environnementales de formation d'un fantôme de roche

Le statut de paléokarsts des fantômes de roche affectant les calcaires carbonifères hennuyers nous donne l'opportunité d'étudier le phénomène de fantômisation dans sa première phase, là où le volume initial de la forme karstique est conservé sous la forme de l'altérite résiduelle. Seule la porosité a augmenté de façon drastique. Le contexte géologique *s.l.* indique un flux d'eau météorique ayant affecté le massif rocheux *per descensum*. Dans ce cas d'espèce, la perméabilité initiale est due aux joints tectoniques ayant joué en extension lors de phases tectoniques au Crétacé inférieur (Quinif *et al.*, 1997).

La friabilité de l'altérite résiduelle prouve une genèse phréatique, en l'absence d'énergie potentielle, tout comme durant la première phase de la théorie en deux cycles de Davis (Davis, 1930). La différence, fondamentale, réside ici dans la formation du fantôme de roche et non d'une cavité ouverte dès les débuts de la karstogenèse. D'un point de vue énergétique, le fantôme de roche ne peut se développer que dans un environnement de faible potentiel, ce qui le distingue du karst par enlèvement total où les solubles, moins solubles et insolubles sont emportés simultanément par le flux d'eau.

5. Evolution des fantômes de roche

Après la genèse de l'altérite résiduelle, l'évolution de la forme peut continuer de diverses manières. A nouveau, la vision thermodynamique permet une compréhension simple du phénomène. L'altérite résiduelle devient instable lorsqu'un potentiel apparaît, dû à une augmentation de la différence d'altitude (surrection tectonique, régression eustatique), ou des débits concentrés, par exemple lors d'une déforestation.

5.1. Le tassement

Le passage du fantôme de roche de la zone saturée de l'aquifère à la zone vadose par abaissement de la surface piézométrique provoque l'affaissement de l'altérite résiduelle. Le potentiel résulte ici de l'abaissement de la surface piézométrique.

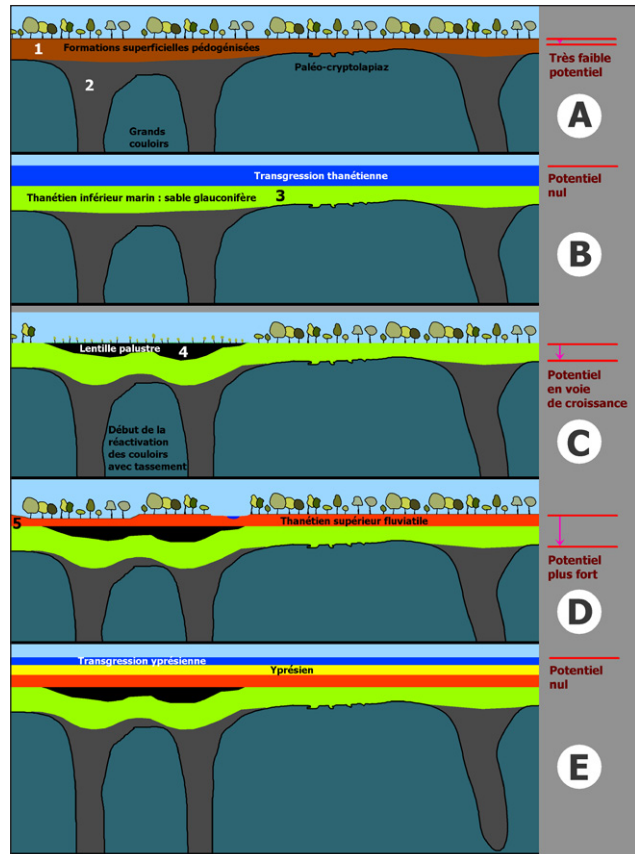


Figure 10. Evolution d'un fantôme de roche par tassement. Cet exemple est inspiré d'un cas étudié aux carrières du Hainaut (Soignies). En A, le fantôme de roche se développe dans un cadre biotasiq : faible potentiel et couverture végétale. Sous les formations superficielles pédologiques (1), le fantôme de roche se développe sous forme de grands couloirs (2). En B, la transgression thanétienne dépose des sables glauconifères (3) et fossilise toute évolution karstique. Le potentiel est nul. En C, la surrection initie une phase continentale avec apparition d'un potentiel en voie de croissance. Le fantôme de roche se tasse, la couverture thanétienne s'enfonce en initiant en surface une dépression qui évolue en marécage avec sédimentation palustre (4). En D, l'évolution continentale continue avec une sédimentation de sables fluviatiles (5) qui s'accumulent notamment dans la dépression avec stratification entrecroisée et chenalisante. En E, la transgression yprésienne scelle définitivement le karst.

Figure 10. Evolution of a ghost-rock feature by compaction. This example is inspired by a real case study in the quarries of Hainaut (Soignies). A. The ghost-rock develops in a biostasy stage with a very weak hydrodynamic potential and a forest cover. Under the soils formations (1), the ghost-rock develops great vertical corridors (2). B. the Thanetian transgression settles glauconiferous sands (3) and stops karstic evolution. Potential energy is zero. C. The surrection provokes a continental stage with the apparition of a growing hydrodynamic potential. The ghost-rock is compacted and the Thanetian overburden sinks in, and at the surface a sinkhole is created which evolves like a swamp with organic sediments (4). D. The continental evolution continues with the sedimentation of river sands (5) which accumulate in the depression with a crossed stratification. E. The Ypresian transgression fossilizes definitively the karst.

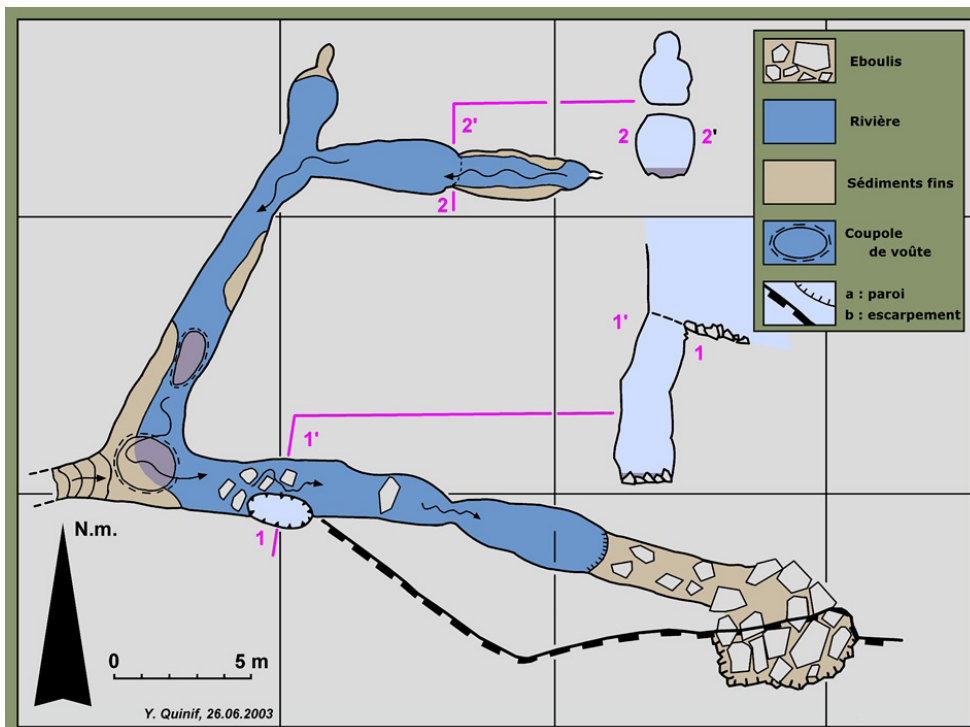


Figure 11. Plan de la Grotte Quentin. La rivière souterraine prend naissance au siphon amont (coupe 2) et rejoint au-delà du puits d'entrée des galeries inférieures avant de déboucher dans la carrière. Cette eau coule sur ce qui reste d'altérite non encore évacuée.

Figure 11. Map of Quentin cave. The underground river comes from the upstream sump (section 2). It flows downstream to the lower galleries to go out in the quarry. This water flows on the residual alterite.

L'évacuation de l'eau interstitielle supprime la contre pression qu'elle pouvait exercer et la porosité diminue petit à petit. Dans le cas des couloirs descendant à partir du toit du calcaire sous couverture transgressive ou pédologique, cet affaissement se traduira en surface par un puits, un effondrement (collapse) avec soutirage de la couverture. C'est essentiellement la cause des effondrements en terrain karstique et la cause première de l'aléa karstique (Vergari, 1996 ; Kaufmann, 2000).

Un tassement modéré peut aussi conduire à la formation en surface, au travers d'une série transgressive meuble, de vastes dolines qui connaissent une évolution palustre (Fig. 10). Ce type de forme a été découvert et étudié à l'aplomb de la Carrière du Hainaut à Soignies. La doline a affecté des sables du Thanétien inférieur marin et fut colmatée d'une série palustre avec lignite et sables fluviatiles au Thanétien supérieur continental (Quinif, 2010).

5.2. L'érosion fluviale

Lorsqu'une connexion peut être établie entre une zone d'entrée et une zone de sortie de l'aquifère fantômisé, un courant d'eau souterrain érode une partie de l'altérite, créant ainsi une grotte spéléologique. La Grotte Quentin, découverte dans la carrière de Nocarcentre à Ecaussinnes, en constitue un exemple emblématique car formée à une échelle de temps humaine (Quinif & Maire, 2009). La carrière de Nocarcentre, comme ses semblables de la région de Soignies, est une carrière trou exploitant le calcaire du Tournaisien supérieur. Elle a recoupé de très nombreux fantômes de roche et fut le lieu de résurgences à fort débit à partir de ces fantômes de roche. La Grotte Quentin fut découverte par un conduit vertical ouvert par un coup de mine et conduisant à une ensemble de galeries parcourues par une rivière souterraine (Fig. 11). Celle-ci sortait d'un siphon à travers l'altérite encore en place, à l'image d'autres exemples déjà observés dans ces carrières. Le potentiel est ici constitué par la différence d'altitude entre la surface piézométrique régionale et le niveau piézométrique rabattu localement suite à l'exhaure réalisée en fond de carrière. Lors de l'exploration, la rivière coulait sur une couche d'altérite en voie d'érosion (Fig. 12). Quelques mois après cette découverte, ce cours souterrain était descendu d'un niveau, laissant ces galeries sèches, fossiles, tandis qu'un nouveau niveau d'écoulement était établi.

La Grotte Quentin nous donne ainsi l'holotype d'une grotte formée par évacuation de l'altérite résiduelle d'un ensemble de fantômes de roche lors d'une phase rhexistatique provoquée ici par l'exhaure de la carrière (Fig. 13). La découverte d'une autre



Figure 12. Galerie principale de la Grotte Quentin. La rivière s'incise dans l'altérite. Toute la galerie est un fantôme de roche dont l'essentiel de l'altérite a été érodé. Cette phase rhexistatique est provoquée par l'apparition d'un potentiel dû au creusement et à l'exhaure de la carrière.

Figure 12. Main gallery of Quentin cave. The river digs the residual alterite. The gallery is a ghost-rock; most of the alterite has been eroded following the apparition of the hydrodynamic potential induced by the digging of the quarry.

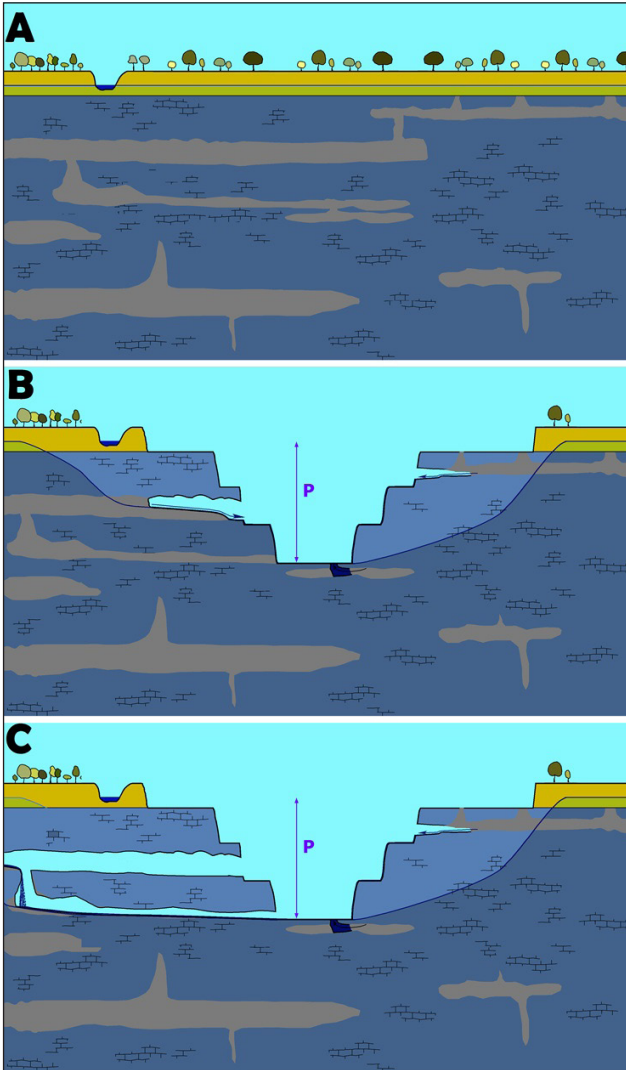


Figure 13. A. Evolution anthropique d'un massif fantômisé. Cet exemple est inspiré d'un cas étudié à la carrière de Nocarcentre (Ecaussinnes). Le massif de calcaire carbonifère a été fantômisé (zones grises) lors d'une période biostasiq au Crétacé. Ensuite, les transgressions paléogènes ont fossilisé les fantômes de roche. B. Le creusement de la carrière provoque l'apparition d'un potentiel P. L'exhaure se marque par un cône de dépression au sein de la nappe. L'eau s'écoule depuis les zones à surface piézométrique haute vers le fond de la carrière en empruntant certains fantômes de roche. L'altérite résiduelle y est érodée. C. La rivière souterraine a creusé un niveau de galerie en érodant l'altérite résiduelle. La galerie précédemment active est devenue fossile.

Figure 13. A. Anthropogenic evolution of ghost-rock features. This example is inspired by a case study in the quarry of Nocarcentre (Ecaussinnes). The carboniferous limestone has been weathered (grey areas) during biostasy stage in the Cretaceous. Then, Paleogene transgressions have fossilized those karstic features. B. The digging of the quarry provokes the apparition of a hydrodynamic potential P. The dewatering creates a depression cone in the water table. The water flows from areas with high water table to the bottom of the quarry through ghost-rocks. The residual alterite is eroded by the underground river. C. The underground river has hollowed a gallery eroding the residual alterite. The previously active gallery became fossil.

grotte dans la carrière du Clypot, la Grotte Improbable, colmatée quant à elle par une série fluviatile remaniant des altérites résiduelles interstratifiées dans des sables, confirme ce schéma génétique (Fig. 14). Ici, la série fluviatile a été datée du Paléocène inférieur (Quinif et al., 2006). Cette Grotte Improbable constitue donc un exemple de cavité résultant aussi d'une rhexistase succédant à une biostase ayant généré les fantômes de roche, durant l'évolution géologique régionale.



Figure 14. Coupe dans le remplissage de la Grotte Improbable (carrière du Clypot, Neufvilles). Cette galerie est colmatée par une série stratifiée avec des sables fluviatiles blancs et des strates noires constituée d'altérite résiduelle. Des faciès de type « mille feuilles » sont formés d'une alternance de lamines de sable blanc et de lamines d'altérite résiduelle. Le remplissage a pu être daté du Paléocène basal. Nous avons donc affaire ici à un fantôme de roche de type pseudoendokarst dont l'altérite fut érodée par une rivière souterraine au Dano-Montien qui a déposé cette série sablo-argileuse.

Figure 14. Section in the filling of the cave « Grotte improbable » (Clypot quarry, Neufvilles). This gallery is filled with a stratified series with white river sands and black layers of removed residual alterite. There is also facies of thin laminated strata of white river sands and black removed alterite. The filling is dated from basal Paleocene. We have here a ghost-rock feature like pseudoendokarst where the residual alterite were eroded by an underground river during the Danian or Montian which has sedimented this sandy-clayed series.

6. La karstogenèse par fantômisation. Naissance d'un nouveau paradigme

La karstogenèse de type fantôme de roche décrite ci-dessus comprend plusieurs étapes caractérisées par des critères thermodynamiques précis.

6.1. Phase biostasiq

L'altération chimique du socle génère des volumes d'une altérite résiduelle localisés selon la distribution initiale des zones de perméabilité favorable au processus de fantômisation. Ces dernières peuvent être des joints ouverts par une tectonique en extension (Vandycke & Quinif, 1999), des niveaux stratigraphiques plus poreux dans un contexte de socle faiblement tectonisé (Dubois et al., 2011) ou encore des cavités résultant d'une karstification antérieure dans le cas d'une évolution polycyclique. Cette évolution se fait essentiellement dans la zone saturée de l'aquifère. L'état thermodynamique du système est caractérisé par l'absence d'énergie potentielle et la prééminence des énergies chimique et mécanique.

6.2. Phase rhexistatique

L'apparition d'énergie potentielle provoque la circulation d'eau dans l'aquifère ayant acquis une énergie telle qu'elle possède un pouvoir d'érosion mécanique de l'altérite. Cette rupture d'équilibre est due à une surrection tectonique ou une régression eustatique faisant apparaître une différence d'altitude entre zone d'alimentation et zone de sortie, ou encore à une modification de l'environnement telle qu'une déforestation brisant la stabilité des sols et des altérites sous-jacentes.

Cette activité hydrodynamique crée la grotte spéléologique. Certains pseudoendokarsts se décolmatent, souvent par érosion régressive à partir de points de sortie du système. Ce processus est possible car la perméabilité de l'altérite résiduelle est très élevée. Des observations de terrain démontrent que de véritables rivières souterraines pouvaient « sortir » d'un fantôme de roche encore intact avec des débits de l'ordre de plusieurs dizaines de litres/seconde.

6.3. Evolution spéléologique

Cette dernière phase peut être considérée comme le raccord avec la théorie classique de la spéléogénèse. Les vides souterrains créés à partir de fantômes de roche deviennent des galeries et puits qui continuent à évoluer sous l'effet de l'érosion chimique et mécanique des eaux courantes. Par exemple, une galerie en tube, résultant de l'évacuation de l'altérite résiduelle, connaît une évolution en canyon par surcreusement du plancher rocheux, avec marmites de géants à la base (Fig. 15). Si les galeries ainsi formées dans la zone saturée ou épiphréatique connaissent à nouveau une phase noyée, des coupoles peuvent se former suivant le processus classique. Ce fait est attesté lorsque d'anciens spéléothèmes sont érodés en coupoles qui recourent calcite stalagmitique et calcaire encaissant (exemples dans la Grotte Chauvet).

7. Conclusion

La spéléogénèse fut toujours considérée occupant une place à part dans le cadre des phénomènes d'érosion. S'il est vrai que, dans un système karstique structuré, l'hydrogéologie particulière l'oppose aux autres aquifères, la genèse du relief de surface et

des vides souterrains appartient bien à l'ensemble des processus appartenant à la géodynamique de surface. Le début en est l'altération chimique qui sépare la roche mère en une phase soluble exportée et une phase solide résiduelle. On y retrouve les mêmes formes que dans les autres lithologies, par exemple le cryptorelief en boules dans l'arène granitique en pays cristallin. Il est clair que la vision scientifique de la particularité du karst est fille des observations spéléologiques qui ont conduit la pensée à concevoir la genèse passant directement de la roche mère au vide des conduits. La réalité des fantômes de roche correspond en fait aux préceptes de la théorie de la biorhexistasie d'Erhart. De plus, la formation des vides spéléologiques résulte d'une rupture d'équilibre, soit la phase rhexistatique, qui permet ainsi l'érosion mécanique d'une partie de l'altérite résiduelle. Enfin, la genèse des fantômes de roche dans la zone saturée de l'aquifère rappelle les conceptions de Davis à la différence près – notable il est vrai – de la spéléogénèse en zone phréatique profonde.

La karstogénèse par fantômisation conduit à des conséquences importantes qui sont source de grandes différences avec le paradigme classique de karstification par enlèvement total. Tout d'abord, bien que ce soit sans doute une remarque mineure, le terme karstogénèse doit ici impérativement remplacer le terme spéléogénèse car la première phase de fantômisation ne crée pas de cavité au sens propre du terme. Le vide est représenté par la somme des vides poreux de l'altérite résiduelle. La spéléogénèse s.s. se produit lors de la seconde phase quand l'érosion mécanique emporte une partie de cette altérite résiduelle.

Les conditions initiales de la fantômisation sont souvent très différentes de celles qui règnent lors de la spéléogénèse. En effet, une question de durée des phénomènes se pose ici de façon cruciale. L'examen des paléokarsts du Hainaut nous a montré que les fantômes de roche se forment durant un temps géologiquement long par rapport à la spéléogénèse. L'exemple de la Grotte Quentin démontre que cette spéléogénèse – la formation des conduits pénétrables – par érosion mécanique de l'altérite résiduelle peut prendre un temps géologiquement « instantané », à l'échelle humaine. Replacé dans l'évolution géologique d'une région, il peut se passer un temps long entre la phase de fantômisation et celle de la spéléogénèse. Ainsi, les paramètres géologiques qui existent peuvent-ils être totalement

Figure 15. Evolution spéléologique d'un fantôme de roche de type pseudogalerie horizontale. Cet exemple est celui du Trou de barrique (Entre-deux-Mers, Aquitaine). A. Section de la galerie. Dans une série stratiforme de calcaires stampiens (B, 2), le fantôme de roche initial (1) est toujours visible au niveau du tube supérieur (C, 3). Après la phase de fantômisation, une surrection a engendré une phase rhexistatique avec écoulement d'eau au travers du fantôme de roche qui s'est progressivement érodé. Ensuite, l'évolution a continué de façon habituelle avec surcreusement en canyon (D, 4) accidenté de marmites (adapté de Dubois et al., 2011).

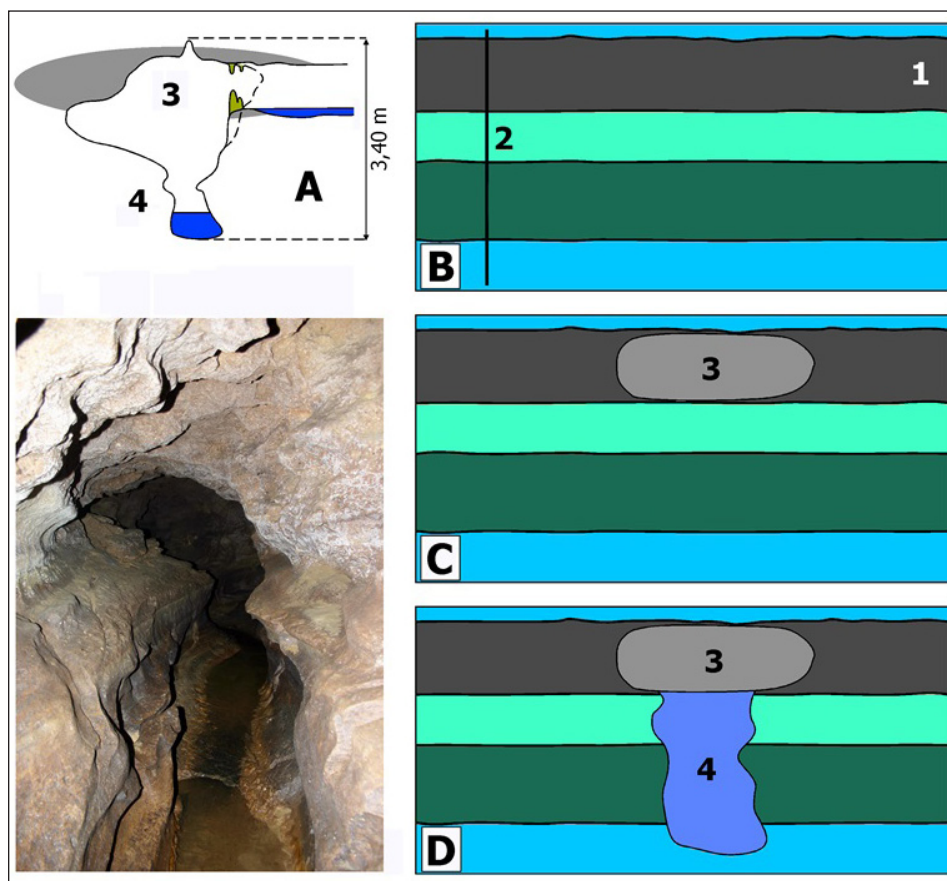


Figure 15. Speleological evolution of a ghost-rock feature presented as a horizontal pseudo-gallery. This example is taken from the cave "Trou de la barrique" (Entre-deux-Mers, Aquitaine, France). In a stratiform series of Stampian limestones (2), the initial ghost-rock (1) is yet visible at the level of the upper tube (3). After a ghost-rock genesis stage, a surrection provokes a rhexistasy stage with water flowing through the ghost-rock with its progressive erosion. Then, the evolution has continued ordinarily with a hollowing towards a canyon (4) and potholes (from Dubois et al., 2011).

différents entre les deux étapes : champs de contrainte, relief, climat. On ne peut donc plus raisonner à partir de paramètres géologiques déterminés dans la continuité temporelle de la phase spéléogénétique. Les familles de fractures karstifiées peuvent correspondre à un champ de contrainte très différent de celui qui prédominait lors de la phase spéléogénétique. Cela conduit à une organisation spatiale incompréhensible si on ne tient compte que de ce dernier. Les niveaux d'émergence aux flancs des vallées se font au travers de fantômes de roche qui se vident. Leur répartition altitudinale dépend donc de la géométrie de ces derniers et non uniquement des crans de descente de la rivière ou du glacier façonnant la vallée.

Comme on le voit, la karstogenèse par fantômisiation nous oblige à reconsidérer tous les paramètres invoqués lors de la karstification par enlèvement total et conduit à des conséquences différentes. Il s'agit donc bien d'un nouveau paradigme dans l'histoire des théories karstogénétiques.

8. Remerciements

Cet article résume l'exposé introductif au colloque « Ghost-rock karst symposium » tenu à Han-sur-Lesse en octobre 2012. Il constitue donc le bilan de recherches qui se déroulent notamment au Service de Géologie fondamentale et appliquée de la Faculté Polytechnique de Mons (Université de Mons). Nous tenons à remercier l'ensemble des intervenants qui ont permis à ces recherches de se développer, notamment les cadres et le personnel des différentes carrières citées ici ainsi que les amis spéléologues et autres qui n'ont jamais rechigné à nous aider sur le terrain et en laboratoire. Nous remercions aussi les relecteurs pour leurs remarques constructives.

9. Références

- Davis W.M., 1930 – Origin of limestone caverns. *Geol.Soc.Amer.Bull.*, 41, 475-628.
- Dercourt J. Paquet J. Thomas P., Langlois C., 2006 – Géologie, objets, méthodes et modèles. Dunod.
- Dubois C., Lans B., Kaufmann O., Maire R., Quinif Y., 2011 – Karstification de type fantômes de roche en Entre-deux-Mers (Gironde, France), implications en karstogenèse et morphologie karstique. *Karstologia*, 57, 19-27.
- Ford D.C., Williams P., 2007 - Karst geomorphology and hydrology. John Wiley & Sons.
- Erhart H., 1967 - La genèse des sols en tant que phénomène géologique. Masson Ed., Paris ; coll. Evolution des sciences, 90p.
- Havron C., Baele J.-M., Quinif Y., 2007 – Pétrographie d'une altérite résiduelle de type « fantôme de roche ». *Karstologia*, 49, 25-32.
- Hennebert M., Doremus P., 1995 - Lens-Soignies 38/7-8, carte géologique de Wallonie 1 :25.000. Ministère de la Région Wallonne, DGRNE, Namur.
- Kaufmann O., 2000 – Les effondrements karstiques du Tournais : genèse, évolution, localisation, prévention. Thèse de doctorat, Faculté Polytechnique de Mons. Vol 1, 177 p. Vol 2, 348 p.
- Mangin A., 1975 - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. *Ann. Spéol.* 29, 3, 283-332 ; 29, 4, 495-601 ; 30, 1, 21-214.
- Quinif Y., 1998 - Dissipation d'énergie et adaptabilité dans les systèmes karstiques. *Karstologia*, 31, 1-11.
- Quinif Y., 2010 – Fantômes de roche et fantômisiation – Essai sur un nouveau paradigme en karstogenèse. *Karstologia Mémoires*, 18, 196p.
- Quinif Y., Maire R., 2009 – La Grotte Quentin (Hainaut, Belgique) : un modèle d'évolution des fantômes de roche. *Karstologia Mémoires*, 17, 214-218.
- Quinif Y., Quinif G., 2002 - Méthodes et éléments de cartographie d'un paléokarst. L'exemple de la Carrière du Clypot (Hainaut, Belgique). *Karstologia*, 39, 1, 1-8.
- Quinif Y., Vandycke S., Vergari A., 1997 - Chronologie et causalité entre tectonique et karstification - l'exemple des paléokarsts crétacés du Hainaut (Belgique). *Bulletin Société Géologique de France*, 168, 4, 463-472.
- Quinif Y., Vergari A., Doremus P., Hennebert M., Charlet J.-M., 1993 - Phénomènes karstiques affectant le calcaire du Hainaut. *Bulletin Société belge de Géologie*, 102, 379-394.

- 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*, 19/2, 73-85.

Salomon J.-N., 2006 – Précis de karstologie. Presses Universitaires de Bordeaux.

Vandycke S., Quinif Y., 1999 - Tectonique, contraintes et karst : implications génétiques. *Etudes de géographie physique, Travaux 1999 - Suppl. XXVIII*, Cagap, Université de Provence, 199-204.

Vergari A., 1996 – Contraintes paléokarstiques dans l'exploitation du calcaire carbonifère sur le bord nord du Synclinerium de Namur en Hainaut occidental. Thèse de doctorat, Faculté Polytechnique de Mons, 276 p.

White W.B., 1989 - *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*. Oxford University Press, New York, Oxford.