



Geothermal convection cells and ghostrock karstification.

Yves Quinif, Alain Rorive, Alain Rorive, Luciane Licour, Grégory Dandurand,
Laurent Bruxelles

► To cite this version:

Yves Quinif, Alain Rorive, Alain Rorive, Luciane Licour, Grégory Dandurand, et al.. Geothermal convection cells and ghostrock karstification.. *Karstologia Mémoires*, 2022, 18th International Congress of Speleology - Savoie Mont Blanc 2022 - SYMPOSIUM 04 - Geomorphology and Speleogenesis, 4 (24), pp.231-234. hal-03850238

HAL Id: hal-03850238

<https://hal.science/hal-03850238>

Submitted on 13 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Geomorphology

S.04 - Speleogenesis, geomorphology
S.12 - Glacier, firn and ice caves



Savoie Mont-Blanc 2022



Cellules de convection géothermiques et fantômisation

Yves QUINIF⁽¹⁾, Alain RORIVE⁽²⁾, Luciane LICOUR⁽³⁾,
Grégory DANDURAND⁽⁴⁾ & Laurent BRUXELLES⁽⁵⁾

- (1) Service de Géologie fondamentale et appliquée, Université de Mons, rue de Houdain, 9, B-7000 Mons, Belgique, yves.quinif2@gmail.com
(2) Service de Géologie fondamentale et appliquée, Université de Mons, rue de Houdain, 9, B-7000 Mons, Belgique, alain.rorive@umons.ac.be
(3) Haute Ecole Provinciale de Hainaut-Condorcet, Dept d'Agronomie, rue Paul Pastur, 73, B-7500 Tournai Tournai, Belgique. luciane.licour@condorcet.be.
(4) Inrap Nouvelle-Aquitaine (Poitiers) / UMR5608 TRACES (Toulouse). Gregory.Dandurand@Inrap.fr
(5) TRACES, UMR 5608 du CNRS, 5 allées Antonio Machado, 31058 Toulouse cedex 9. Laurent.bruxelles@inrap.fr

Résumé

L'initiation de la spéléogénèse a toujours constitué une énigme lorsqu'elle est considérée dans son contexte géologique. La découverte des fantômes de roche et surtout leur conception systémique dans le cadre de la karstogénèse conduit à reconsidérer cette initiation. La fantômisation est la division de la roche-mère en deux phases : une phase soluble exportée hors du système et une phase résiduelle constituant l'altérite. Les exemples des karsts de Lombardie et les paléokarsts du Hainaut ont montré que cette fantômisation se déroule plusieurs centaines de mètres sous la surface piézométrique. Le champ géothermique de Saint-Ghislain (Hainaut, Belgique) illustre une solution apportée à l'explication de l'initiation de la karstogénèse. Cet aquifère de calcaires et anhydrites carbonifères affleure au nord du Bassin de Mons et s'enfonce jusque 1700 à 4300 m de profondeur sous les formations houillères à la verticale de la ville de Saint-Ghislain, à l'ouest de Mons (Hainaut, Belgique). L'application de modèles thermo-hydrodynamiques à cet aquifère aveugle permet de considérer l'apparition de cellules de convection alimentées par le gradient géothermique. Ainsi, en fonction d'une perméabilité initiale et au-dessus d'une épaisseur limite, une circulation lente d'eau s'amorce et provoque la fantômisation que l'on peut alors rattacher à une spéléogénèse de type hypogène, l'énergie chimique étant ici apportée à la fois par les réactions bactériennes d'oxydo-réduction sur sulfures et la dissolution physique des sulfates. Le fantôme de roche se crée ainsi, l'altérite pouvant être érodée partiellement plus tard à la faveur de l'apparition d'un potentiel hydrodynamique, qu'il soit d'origine gravitaire ou, comme ici, d'origine géothermique.

Abstract

Geothermal convection cells and ghostrock karstification. The initiation of speleogenesis has always been an enigma when it is viewed in its geological context. The discovery of ghostrock and especially their systemic conception within the framework of karstogenesis leads to reconsider this initiation. "Ghosting" is the division of the bedrock into two phases: the weathering divides the bedrock in a soluble phase exported out of the system and a residual phase constituting the alterite. The examples of the karsts of Lombardy and the paleokarsts of Hainaut have shown that this ghosting takes place several hundred meters below the water table. The Saint-Ghislain geothermal field (Hainaut, Belgium) illustrates a solution to the explanation of the initiation of karstogenesis. This aquifer of limestone and carboniferous anhydrites outcrops north of the Mons Basin and sinks to a depth of 1,700 to 4,300 m under the coal formations vertically above the town of Saint-Ghislain, west of Mons (Hainaut, Belgium). The application of thermo-hydrodynamic models to this blind aquifer allows us to consider the appearance of convection cells fed by the geothermal gradient. Thus, depending on an initial permeability and above a limit thickness, a slow circulation of water begins and causes ghosting which can then be linked to a hypogenous type speleogenesis, chemical energy here being provided both by bacterial oxidation-reduction reactions on sulphides and the physical dissolution of sulphates. The phantom of rock is thus created, the alterite being able to be partially eroded later thanks to the appearance of a hydrodynamic potential, whether it is of gravity or, as here, of geothermal origin.

1. Introduction – Les fantômes de roche et les énergies mises en œuvre

La karstification par fantômisation se distingue de la karstification par enlèvement total (théorie « classique ») par le très faible potentiel hydrodynamique existant au départ de la karstogénèse. La formation des fantômes de roche se caractérise en effet par une attaque chimique séparant la roche mère en deux phases : une phase soluble exportée par les eaux souterraines et une phase résiduelle :

l'altérite. La karstification classique, par enlèvement total, connaît quant à elle l'érosion à la fois des éléments solubilisés et les éléments solides détachés de la roche mère par la dissolution de la matrice. Un exemple type est la dissolution de la partie micritique du calcaire et le résidu sparitique. Dans le cas de la fantômisation, ce dernier reste sur place au moins temporairement en la compagnie des

insolubles et autres moins solubles : dolomite, minéraux argileux, silice. Le processus de fantômisiation est bien connu dans le cas du granite où on l'appelle arénisation. La différence étant que les insolubles prennent largement la plus grande part dans l'altérite résiduelle : quartz, minéraux argileux secondaires, aluminosilicates résiduels. On a pensé longtemps que ce processus n'était pas de mise dans le cas des roches carbonatées. Or, les examens des paléokarsts en roches carbonatées dinantiennes de la province du Hainaut (Belgique) ont montré qu'il en est bien ainsi. Les formes souterraines gardent une altérite résiduelle formées de la partie moins soluble ; elle garde le volume initial, la perte de matière se manifestant par une augmentation de la porosité : c'est le fantôme de roche.



Figure 1 : Fantôme de roche (carrière du Clypot, Soignies, Belgique).

Cette distinction entre les deux types de karstogenèse se marque dans le concept thermodynamique de la

karstification. La karstification, comme tout processus d'érosion, est le résultat d'une dissipation d'énergie. Parmi les types d'énergie concernée, l'énergie chimique est fondamentale car elle est la cause de la transformation de la roche mère. Elle tire sa source de réactions acide-base, l'acide pouvant être dû au CO_2 atmosphérique ou profond, aux sulfures qui s'oxydent en sulfates sous l'action de bactéries avec, comme corollaire, la présence d'acide sulfurique, en bref à la présence d'ions H_3O^+ . Le second type d'énergie est l'énergie potentielle qui est la cause du mouvement de l'eau souterraine. Elle trouve sa source dans la gravité, le plus souvent invoquée, mais aussi dans le gradient géothermique, nous y reviendrons. Il manque encore un élément : la perméabilité initiale. En effet, les eaux souterraines doivent être capables de circuler au début du processus en l'absence d'érosion. Cette perméabilité initiale peut être due à une fracturation dont certaines familles directionnelles sont soumises à un régime tectonique en extension : c'est une troisième forme d'énergie de type mécanique. Il se peut que cette perméabilité initiale soit héritée d'une trop faible diagenèse, ou encore de la présence de cavités préexistantes.

Le gradient hydraulique joue le rôle fondamental dans le type de karstification. La fantômisiation se satisfait d'un gradient hydraulique ΔH très faible puisque l'altérite résiduelle reste dans les formes souterraines sans être mécaniquement érodée dans cette première phase. Elle le sera lorsque le massif connaîtra l'augmentation de ce gradient (surrection, eustatisme, changement climatique). Son érosion mécanique aboutira alors à l'ouverture de cavités « spéléologiques ». Cette évolution qui part de l'altération chimique à l'érosion mécanique est une parfaite illustration de la théorie de la biorhexistase d'ERHART (1967).

2. Le karst géothermique de Saint-Ghislain (Bassin de Mons, Belgique)

Un important aquifère constitué principalement de calcaires paléozoïques se situe dans le Bassin de Mons, structuré en fond de bateau comprenant des formations du Crétacé supérieur et du Paléogène incisées dans les formations paléozoïques du socle varisque (BOULVAIN & PINGOT, 2011). Sous les formations Houillères écaillées (Pennsylvanien et Serpukhovien), le Viséen et le Tournaisien regroupent des formations carbonatées (calcaires et dolomies) et sulfatées (anhydrite) d'une épaisseur avoisinant les 2.600 m d'épaisseur (Fig. 2). La karstification visible en affleurement au nord notamment grâce aux carrières des régions de Soignies et de Tournai se retrouve en profondeur, sans doute avec des différences morphologiques (dissolution des anhydrites, présence de brèches). Cet aquifère offre ainsi un modèle de karstification profonde dont les circulations ont été modélisées (LICOUR, 2012). En ce sens, il peut être considéré comme un holotype pour les circulations karstiques profondes.

En 1982, un sondage d'exploration géologique découvre de l'eau chaude artésienne au cœur du Bassin de Mons. Ce sondage recoupa vers 1.700 m de profondeur, dans les carbonates et sulfates viséens, des cavités et brèches très

perméables contenant de l'eau à 70°C. Deux autres sondages (Douvrain et Ghlin) recoupèrent également les formations aquifères géothermiques. La configuration géologique visualisée par la figure 2 localise les zones d'infiltration au nord. Les eaux peuvent ainsi descendre au cœur de la structure où elles subissent le gradient géothermique normal (3°C/100 mètres). Il faut noter qu'aucune possibilité de sortie des eaux chaudes n'existe au sud, à l'est ou à l'ouest : l'aquifère s'enneie profondément sous la nappe de charriage ardennaise sous la faille du midi. Les seules sources sont situées au nord de l'affleurement de l'aquifère et présentent des anomalies thermiques.

Ces constations ont conduit l'une d'entre nous (LICOUR, 2012) à concevoir un modèle de circulation des eaux dans l'aquifère suivant une ou plusieurs cellules de convection thermique dont le moteur est la différence de température suivant la profondeur (Fig. 3). La quantification de ce modèle par un logiciel adapté prouve la vraisemblance de ces circulations, les seules pouvant expliquer la karstification profonde nécessitant une évacuation des eaux minéralisées. Verticalement, le mouvement de l'eau se fait suivant une descente par le mur de l'aquifère et une remontée par le

toit. La modélisation dans une coupe verticale N-S indique l'initiation d'une cellule de convection dans un plan vertical (Fig. 3). Le mouvement peut être initié par le gradient

géothermique à partir d'une épaisseur d'aquifère dont la valeur est fonction de la perméabilité initiale.

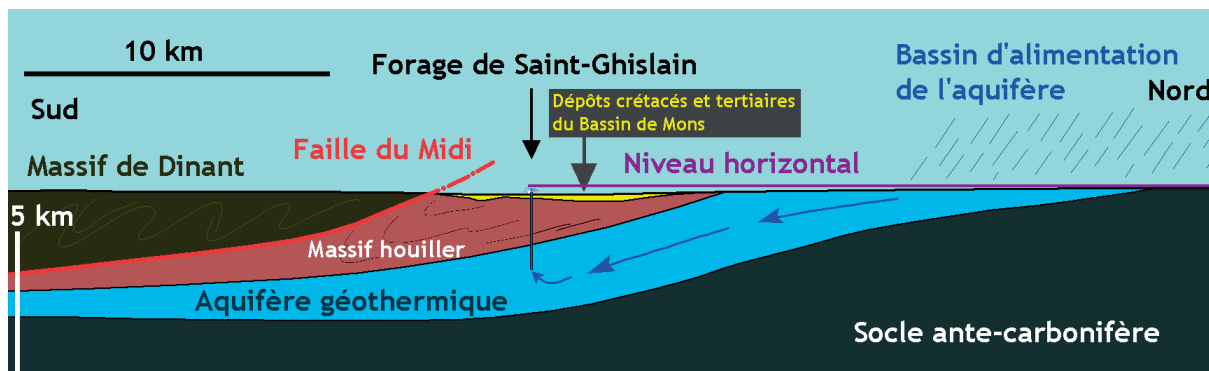


Figure 2 : L'aquifère géothermique du Hainaut. Cette figure est une coupe géologique interprétative orientée du nord vers le sud, à partir des données géologiques récoltées en affleurement, des forages et des investigations géophysiques. Les formations formant l'aquifère géothermique sont formées des calcaires, dolomies et anhydrites datant du Carbonifère inférieur. Elles reposent sur le socle primaire ante-carbonifère et sont surmontées par les formations du Carbonifère supérieur. Les eaux sont artésiennes au niveau des sondages forés dans le Bassin de Mons, étant à une altitude inférieure à la zone d'alimentation de l'aquifère.

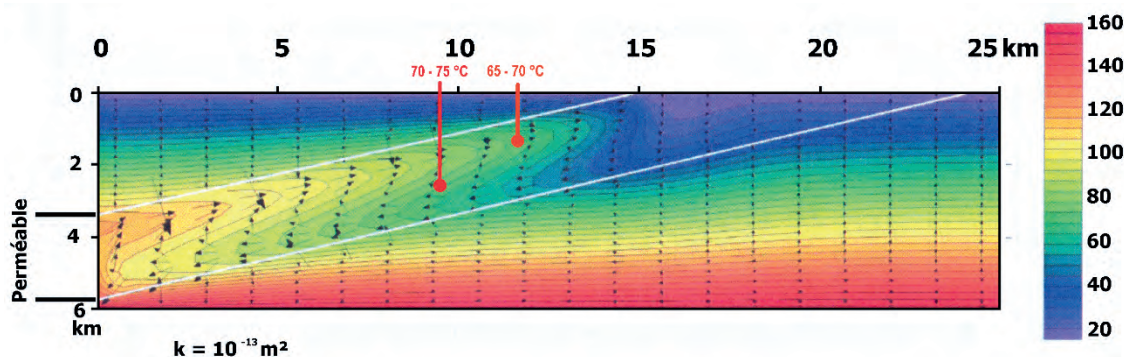


Figure 3 : Modèle de couche perméable inclinée à mur et toit imperméable et surface libre. A droite, l'échelle de température. Les deux lignes rouges verticales indiquent les positions des sondages de Saint-Ghislain et de Douvrain.

Les valeurs de discrétisation et des paramètres utilisés sont : 1. 25 km de long, soit 250 colonnes de 100 m, 6 km de profondeur, soit 60 rangées de 100 m ; gradient géothermique de 2,5 °C/100 m, soit 10 °C en surface et 157,5 °C au fond ; une porosité de 5 % et une perméabilité de 10^{-13} m^2 pour la couche perméable, une porosité de 2 % et une perméabilité de 10^{-20} m^2 pour les couches imperméables. La

géométrie de l'aquifère a été calquée sur celle de l'aquifère du Carbonifère hennuyer. Les valeurs choisies sont adéquates pour l'initiation de la convection verticale. Le mouvement peut être initié par le gradient géothermique à partir d'une épaisseur d'aquifère dont la valeur est fonction de la perméabilité initiale.

3. La karstification de type fantôme de roche à moteur géothermal

Seule hypothèse expliquant la karstification profonde dans l'aquifère de Saint-Ghislain, le gradient géothermique génère ainsi des cellules de convection. Cette hypothèse résulte de la configuration géométrique de cet aquifère qui constitue un cul-de-sac au sud, en profondeur, avec des zones d'infiltrations et des exutoires limités aux régions d'affleurement septentrionales. Les mesures de température dans les sources et les sondages ainsi que leur distribution géographique conforte cette hypothèse. En outre, les grands « puits naturels du Houiller » apportent un argument supplémentaire à l'existence de cette karstification profonde (QUINIF, 1995 ; QUINIF & LICOUR, 2012). Ces formes géantes verticales, larges de plusieurs dizaines de mètres et profondes parfois de plus d'un

kilomètre transpercent les terrains houillers et trouvent leur origine dans la karstification sous-jacente. On peut les considérer comme des fontis géants. Leurs remplissages, qui ont révélé les iguanodons de Bernissart, situent leur genèse au Crétacé.

La question de l'initiation de cette karstification se pose maintenant. Comme nous l'avons écrit ci-dessus, une perméabilité initiale et les deux types d'énergie sont nécessaires.

1. La perméabilité initiale est due dans ces roches compactes à une fracturation ayant joué en extension lors d'une phase de l'histoire géologique. Or, le Crétacé offre cette possibilité (QUINIF *et al.*, 1997). Cette chronologie est en parfait accord avec celle du fonctionnement des puits du Houiller daté par

la paléontologie. À cette profondeur, déjà acquise aux temps crétacés, seul le calcaire se fracture, l'anhydrite réagit de façon plastique.

2. L'énergie chimique est fournie, outre le CO₂ superficiel, par les réactions rédox affectant les sulfures (HAVRON *et al.*, 2007). Les températures de l'aquifère ont favorisé en outre l'activité bactérienne.

3. Le gradient de potentiel est ici dû non pas à la gravité comme pour beaucoup de karsts mais à la chaleur, le gradient géothermique.

4. Conclusion

L'aquifère de Saint-Ghislain, grâce à ses caractéristiques géologiques, fournit un modèle de karstification profonde. L'évolution en subsidence depuis les temps post-varisques nous le montre non affecté par l'érosion qui aurait suivi une surrection, effaçant les formes primitives de la karstification par fantômisatation. Nous nous trouvons ici dans le cas de la karstification hypogène prouvée dans de nombreuses configurations géologiques (AUDRA *et al.*, 2004 ; KLIMCHOUK, 2009). L'apport des considérations présentes

Lors de l'initiation, les vitesses de circulation de l'eau dans les cellules de convection étaient très faibles. Nous sommes donc amenés à penser que c'est une karstogenèse de type fantômisatation qui a eu lieu. Ensuite, la formation des fantômes de roche touchant les évaporites, une dissolution physique simple s'est ajoutée à ce processus. La dissolution d'une partie de la roche mère a engendré par la suite des brèches d'affaissement, rencontrées par les forages.

est le concept d'initiation de la karstogenèse par fantômisatation au sein de cellules de convection géothermiques. Pour cela, il faut une formation aquifère karstifiable dont l'épaisseur, la profondeur et la perméabilité initiale se situent dans la gamme de valeurs citées plus haut. Ainsi que nous l'avons déjà démontré dans une autre publication, ce mécanisme éclaire la genèse des résurgences vauclusiennes (DANDURAND *et al.*, 2019).

Références

AUDRA P. et HOFMANN B. A. (2004) Les cavités hypogènes associées aux dépôts de sulfures métalliques (MVT). *Le Grotte d'Italia*, 5, 35-56.

AUDRA P., BIGOT J.-Y. & NOBÉCOURT J.-C. (2010) Hypogenic caves in France. Speleogenesis and morphology of the cave systems. *Bulletin de la Société géologique de France*, t. 181, 4, 327-335.

BOULVAIN F. et PINGOT J.-L. (2011) Genèse du sous-sol de la Wallonie. *Classe des Sciences, Académie royale de Belgique*, 190 p.

ERHART H. (1967) *La genèse des sols en tant que phénomène géologique*. Masson Ed., Paris, coll. Évolution des sciences, 90 p.

HAVRON C., BAELE J.-M. et QUINIF Y. (2007) Pétrographie d'une altérite résiduelle de type « fantôme de roche ». *Karstologia*, 49, 25-32.

DANDURAND G., QUINIF Y., GUENDON J.-L. et GRUNEISEN A. (2019) Sources vauclusiennes et fantômes de roche. *Karstologia*, 74 : 31-46.

KLIMCHOUK A. (2009) Morphogenesis of hypogenic caves. *Geomorphology*, 106, 1–2, 100-117.

LICOUR L. (2012) *Relations entre la géologie profonde et le comportement hydrogéologique du réservoir géothermique du Hainaut (Belgique)*. Thèse de doctorat, Université de Mons Ed. : 372 p.

QUINIF Y. (1995) Le Puits de Flénu (Belgique). La plus grande structure endokarstique au monde (1200 m) et la problématique des puits du Houiller. *Karstologia*, 24, 29-36.

QUINIF Y. and LICOUR L. (2012) The karstic phenomenon of Bernissart pit and the geomorphologic situation in the Mesozoic times. In: *Bernissart Dinosaur*, Ed. Pascal Godefroit. Indiana University Press, 50-61.

QUINIF Y., VANDYCKE S. et VERGARI A. (1997) Chronologie et causalité entre tectonique et karstification - l'exemple des paléokarsts crétacés du Hainaut (Belgique). *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 168, 4, 463-472.