

**INCIDENCES MORPHODYNAMIQUES DE LA TRÉPANATION DE L'ENDOKARST PAR DES RACINES DU MANTEAU D'ALTERATION. EXEMPLES DANS DES GROTTES DE LA CRAIE EN EUROPE OCCIDENTALE (FRANCE ET BELGIQUE).**

Joël RODET<sup>1</sup>, Luc WILLEMS<sup>2</sup>, Sylvie OGIER-HALIM<sup>1</sup>, Marie BOURDIN<sup>3</sup>, Jean-Pierre VIARD<sup>4</sup>,  
<sup>1</sup> UMR 6143 CNRS- *Morphodynamique Continentale et Côtière, Laboratoire de Géologie, Université de Rouen,*  
 76821 Mont Saint Aignan, France <joel.rodet@univ-rouen.fr>

<sup>2</sup> *Département de Géologie / Sédimentologie-Pédrologie, University de Liège, Bât. B20, bd du Rectorat 15, 4000*  
 Liège, Belgique

<sup>3</sup> *BRGM, Division Environnement et Processus, 3 avenue Claude Guillemin, 45060 Orléans cedex 2, France*

<sup>4</sup> *CNEK (Centre Normand d'Etude du Karst et des Cavités du Sous-sol), 97 rue du 8 mai, 27400 Montauve,*  
 France

\* pour la correspondance -- joel.rodet@univ-rouen.fr

## Résumé

Le débouché de la zone des puits dans les galeries du karst est considéré traditionnellement comme une suite logique de la pénétration des eaux de surface vers les collecteurs souterrains. C'est pourquoi les observations se limitent généralement à de simples descriptions morphologiques. La mise en évidence de deux ensembles dynamiques distincts, l'introduction des eaux superficielles (karst d'introduction) et la collecte/concentration/restitution aux exurgences des eaux souterraines (karst de restitution), et l'absence de connexion systématique entre karst d'introduction et karst de restitution permettent d'envisager une évolution initialement séparée, voire diachronique, de ces deux ensembles dynamiques. Afin de vérifier cette hypothèse, nous avons étudié l'impact de la trépanation de grottes dans deux réseaux karstiques d'Europe occidentale. Le premier en Normandie (France) se développe dans des craies fines où la porosité de la roche peut atteindre 10 à 15 %. Le second se situe en Basse Meuse liégeoise (Belgique) dans des calcarénites pouvant dépasser 50 % de porosité efficace.

La cavité normande, mature et fossile, est largement comblée de sédiments quaternaires (loess). Elle est reconnue sur plus de 600 m, dont un collecteur de 450 m de développement. La trépanation du collecteur fossile et comblé et son fonctionnement séquentiel ont entraîné une ablation de la partie supérieure du comblement et sa substitution par la charge terrigène introduite par les épisodes d'introduction, avec une sédimentation conforme à la dynamique de l'introduction. Mais l'incidence majeure de ces épisodes est la mise en place d'une morphologie spécifique, organisée de l'amont vers l'aval : effet barrage vers l'amont du drain avec une altération profonde de l'encaissant, ouverture d'une rampe de connexion en toit avec le drain, développement d'un chenal de voûte pénétrable, ouverture d'un grand volume vide - réservoir d'équilibre, creusement d'un chenal de voûte plus petit, qui se réduit en aval au fur et à mesure de l'absorption du flux aqueux par le remplissage et les parois du collecteur. La cavité belge, reconnue sur quelques dizaines de mètres de développement, est comblée de sédiments terrigènes, sans qu'aucune liaison karstique ne soit établie avec une quelconque émergence. L'absence de continuité karstique aval interdit le creusement du chenal de voûte, mais on retrouve le comblement terrigène granoclassé, retouché par les épisodes plus récents, et en aval le développement d'une grande chambre réservoir où la porosité élevée des calcarénites encaissantes absorbe l'eau introduite.

Ces deux exemples montrent très clairement que la connexion entre l'introduction des eaux et la restitution karstique n'est pas toujours assurée et surtout que le creusement des formes d'introduction peut se réaliser indépendamment du drainage de restitution. Lorsque ce dernier est trépané alors qu'il n'est plus fonctionnel, il enregistre les effets d'une dynamique d'introduction. La recherche de ces morphologies dans les collecteurs peut alors livrer de sérieuses indications sur l'évolution du système karstique.

## 1. Introduction

Le débouché de la zone des puits dans les galeries du karst est considéré traditionnellement comme une suite logique de la pénétration des eaux de surface vers les collecteurs des rivières souterraines (Maire, 1990). C'est pourquoi les observations se limitent généralement à de simples descriptions morphologiques qui soulignent parfois l'élargissement du volume en raison des courants de convection thermique que génèrent les chutes d'eau. La définition de deux ensembles dynamiques

distincts (Rodet, 1992) que représentent d'une part l'introduction concentrée et/ou diffuse des eaux superficielles et leur descente vers le niveau de base (karst d'introduction) et d'autre part la collecte, la concentration et la restitution aux émergences des eaux souterraines (karst de restitution) permet de comprendre que ces deux ensembles peuvent évoluer indépendamment et que leur connexion n'est pas systématique (Rodet, 1997). C'est ce que démontrent plusieurs études hydrogéologiques menées dans la craie de l'ouest du bassin de Paris et

que confirment les explorations endokarstiques. Souvent, les puits d'introduction trépanent les collecteurs de restitution. Cette évolution diachronique du karst d'introduction et du karst de restitution a été observée dans plusieurs sites en Normandie (Rodet *et al.*, 2006a) et en Belgique (Minguet, 2006 ; Rodet *et al.*, 2006b ; Willems *et al.*, 2007).

## 2. les sites d'observation

Nous avons travaillé sur deux sites différents, the Petites Dales Cave and the CRSOA Cave.:

### 2.1- La grotte des Petites Dales

Il s'agit d'un mono-collecteur mature, large de 2 m en moyenne, qui ondule sur 350 m depuis une salle (l'Espace des Six) jusqu'au porche d'entrée. En amont de cette salle, on observe sur 100 m, depuis une trépanation du conduit par une racine d'altération, le surdimensionnement du chenal de voûte (1 m de large pour 2 m de haut en moyenne) ouvert sur le comblement d'un collecteur d'environ 3 m de largeur, jusqu'au débouché dans la salle. La salle est encombrée de sédiments jusqu'au toit du chenal de voûte, recouverts par des blocs essentiellement crayeux surmontés d'un espace vide sur plus de 2 m de hauteur (fig. 1). Les formes d'altération sont réduites et les formes clastiques dominant (origine de l'éboulis crayeux). En aval le volume se referme soudainement et n'offre qu'un petit chenal de voûte pentu pour évacuation vers l'aval du collecteur. La discontinuité et la diminution des sections de ce chenal de voûte dans l'aval du collecteur semble illustrer une perte de compétence de l'écoulement et son absorption graduelle par l'encaissant et le comblement terrigène (fig. 2).



**Figure 1 :** salle de stockage de l'eau (grotte des Petites Dales). Sur les sédiments terrigènes, on observe l'éboulis de craie et au dessus, l'espace libre (J.-P. Viard).

La caractérisation lithologique du remplissage karstique des Petites Dales montre que les sédiments sont essentiellement constitués de silts

(Laignel *et al.*, 2004). Cependant, il est possible de distinguer trois familles principales de sédiments qui présentent une rythmicité à différentes échelles : des silts argileux marrons, des silts beiges, des silts beige clair. Les comparaisons minéralogiques et chimiques des sédiments karstiques avec les sources potentielles (résidu insoluble de la craie altérée, argiles à silex (CWF) et les loess résultant de l'érosion mécanique) montrent que ces sédiments proviennent essentiellement de l'érosion mécanique des loess en surface. Les particules loessiques sont transportées en suspension par les écoulements d'eau introduits dans le karst par les bétoires, puis déposées dans l'aquifère karstique. Les résidus insolubles produits par l'altération chimique de la craie, bien que parfois présents dans les sédiments karstiques (seulement des silts argileux marrons) ne représentent qu'une faible contribution.



**Figure 2 :** chenal de voûte dans la grotte des Petites Dales. En aval de la salle de stockage de l'eau, un chenal plus ou moins bien développé est ouvert au toit du collecteur (J. Rodet).

L'absence de dépôts karstiques alloctones (des CWF) peut surprendre si on considère l'importante couverture d'altérites et les nombreuses racines du manteau d'altération remplies de CWF dans l'aire d'étude. La découverte d'une racine d'altération verticale (à environ 430 m en amont de l'entrée de la grotte) connectée à la galerie principale devrait impliquer l'existence de dépôts karstiques originaires des CWF au pied du remplissage (fig. 3). Comme il n'a pas été observé de CWF au sommet du remplissage, nous émettons l'hypothèse que la racine du manteau d'altération a établi une liaison entre le plateau et l'endokarst. Grâce à cette connexion avec le réseau endokarstique subhorizontal, le contenu meuble de la racine du manteau d'altération (essentiellement des CWF et des loess au-dessus) a été évacué. Une fois les CWF de la racine évacués, il ne reste que les loess qui puissent être érodés, transportés et déposés dans le karst. En fait, il est démontré que la couverture loessique meuble est particulièrement sensible à l'érosion tandis que la couverture de CWF est

souvent comparée à un ciment, hautement résistant



**Figure 3 : argiles à silex (CWF) à la base d'une racine du manteau d'altération (grotte des Petites Dales). Craie à gauche et CWF à droite (J. Rodet).**

à l'érosion. Une telle hypothèse suppose la présence de CWF à la base du comblement mais seuls les deux mètres supérieurs ont été étudiés alors que l'épaisseur totale des dépôts karstiques est de l'ordre de 8 à 10 m. Pour vérifier cette hypothèse, il serait nécessaire d'accéder à la base du remplissage par un sondage (au contact entre le substrat crayeux et le remplissage). Il est ainsi confirmé que le complexe sédimentaire présent dans le milieu karstique a principalement pour origine la surface (Lacroix *et al.*, 2000). La surface se comporte comme un stock sédimentaire, les zones d'infiltration sont surtout des zones de transit et le karst est un milieu de sédimentation.

### 2.2- La grotte du CRSOA

La grotte du CRSOA se développe dans le plateau de la "Montagne Saint Pierre", entre Liège et Maastricht, à la frontière belgo-hollandaise. Il s'agit d'un conduit comblé qui va en s'ouvrant vers le nord et se ferme brutalement, sans qu'on observe de drain d'évacuation (fuites hydrauliques). Le conduit amont semble relativement étroit (1.5 m de large pour 2 m de haut) alors qu'en aval se développe un volume conséquent dont l'essentiel se situe au dessus altitudinalement de la partie étroite. Les mesures de porosité réalisées au Département de Géologie de l'Université de Liège, montrent des valeurs très fortes pour les calcarénites de l'encaissant pouvant dépasser 50 %.

L'étude sédimentologique a identifié 4 sources possibles pour les éléments du remplissage karstique de la Montagne Saint-Pierre : résidus d'altération de la craie/calcarénite (autochtone, altération sur place), sables tongriens, alluvions et loess (allochtone). Les résidus insolubles de la craie ont un mode à 8-10  $\mu\text{m}$ ., les loess 10-50  $\mu\text{m}$  (Lacroix *et al.*, 2000 ; Lacroix *et al.*, 2002), les sables tongriens 100-150  $\mu\text{m}$  (Juvigné & Renard,

1991). La caractérisation lithologique et l'étude paléohydrodynamique des sédiments karstiques (Minguet, 2006), montrent que le remplissage provient d'un mélange entre les résidus d'altération de la craie/calcarénite (CWF) et les sables tongriens. Les sables proviennent obligatoirement de la surface et prouvent l'ouverture du système. Ils nécessitent la vidange d'une racine d'altération (fig. 4) et un transport dans le karst. Le suivi linéaire des comblements montre un classement sédimentaire amont/aval allant de plus grossier près de l'introduction à plus fin vers la salle-réservoir. Les vitesses varient selon la quantité, de sables grossiers à moyens. Plus un échantillon a d'éléments grossiers, plus la vitesse de dépôt sera importante. En général, les échantillons de cette cavité sont caractérisés par un hydrodynamisme faible.



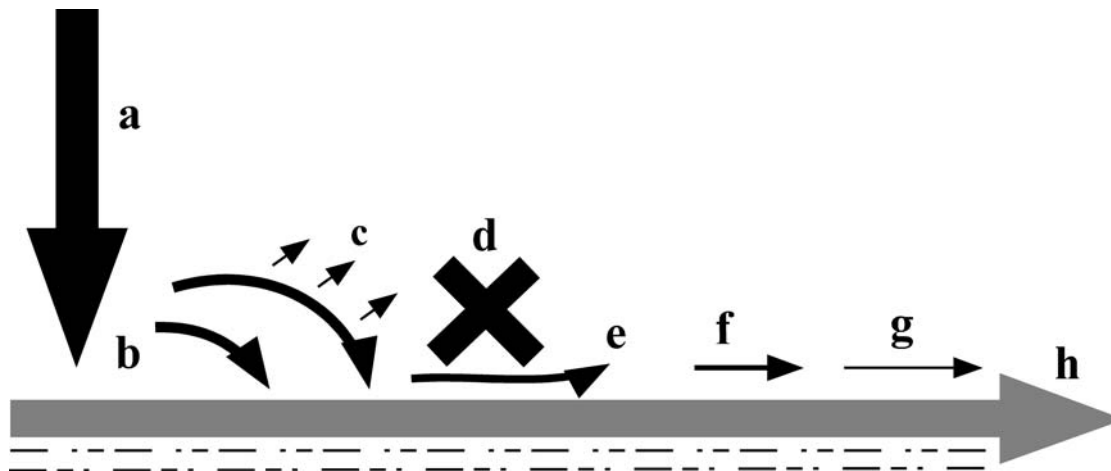
**Figure 4 : racine du manteau d'altération et son comblement en amont de la grotte du CRSOA. Les racines végétales indiquent la proximité de la surface du plateau (L. Willems).**

### 3. le fonctionnement

Dans les deux cas, on observe le développement d'une racine d'altération à l'amont hydraulique du vide karstifié. Dans les deux cas, il semble clairement que cette racine 1) est plus récente que le vide horizontal, 2) s'est déversée dans le vide en le trépanant. Dans les deux cas aussi, les analyses sédimentologiques (granulométrie, chimie, minéralogie) ont clairement indiqué l'origine exogène des comblements et donc leur apport par la trépanation. De même l'étude spatialisée montre un classement longitudinal, les éléments les plus grossiers étant sédimentés plus en amont que les éléments les plus fins. Ce classement granulométrique démontre clairement un écoulement orienté, et identifie la source en la racine d'altération. Dans les deux cas la taille des particules montre une compétence originelle élevée alors qu'en aval les sédiments fins prédominent largement. Nous en concluons donc qu'il y a une perte de compétence dynamique assez rapide qui

autorise le grano-classement longitudinal, mais aussi que ce mécanisme d'introduction soudaine est répétitif, entraînant des épisodes de ravinement

dans les dépôts terrigènes qui canalisent les écoulements (Minguet, 2006), donnant des organisations sédimentaires complexes.



*fig. 5 - modèle conceptuel de la trépanation de la grotte des Petites Dales. Sur un drain fossile et comblé (h), une trépanation (a) introduit, en plusieurs séquences, des éléments meubles terrigènes et surtout d'énormes quantités d'eau (b). L'effet "chasse d'eau" pousse partiellement le comblement jusqu'à ce qu'il forme bouchon (d). En amont du bouchon se développe une morphologie de stockage, de type "cheminée d'équilibre" (c). Sa forme plus allongée que haute s'explique par l'utilisation des fissures installées dans l'axe du drain karstique. Une partie réduite des introductions (e) parvient périodiquement à dépasser le bouchon et inscrit peu à peu, à la voûte du collecteur, un chenal (f) qui s'atténue (g) au fur et à mesure qu'on s'éloigne du bouchon. En se fondant sur les dimensions du chenal de voûte, on peut estimer que la moitié du débit est évacué par le chenal en aval du bouchon. Le reste est évacué par la porosité et surtout par des fuites latérales.*

#### 4. Le problème de l'aval hydraulique

Dans le système karstique mature des Petites Dales, il existe un aval hydraulique bien matérialisé par le collecteur mais celui-ci était comblé avant l'intervention des spéléologues. Dans les coupes dégagées, on note des surfaces d'érosion, des basculements et des dépôts en "paquet". Les surfaces d'érosion prouvent la succession de drainages puissants érosifs, les basculements suggèrent des déstabilisations des sédiments par coup de bélier ou par surcreusement de la base des éléments basculés, les dépôts en paquet semblent illustrer une perte soudaine de compétence par arrêt du flot hydrique. Il en ressort donc une morphologie illustrant une succession de dynamiques soudaines, rapides et limitées spatialement, succession pouvant illustrer un mécanisme d'introductions soudaines, violentes et de courte durée dans le drainage (fig. 5). Cette dynamique semble compatible avec un mécanisme de crevaisons répétitives à partir d'une racine d'altération dans un drain karstique comblé.

Dans la grotte du CRSOA, la partie aval vis-à-vis de la racine d'altération offre un élargissement conséquent tant en largeur qu'en hauteur, mais toutes les parois se terminent sur des alvéoles décimétriques desquelles aucune fuite ne semble

s'échapper. La fuite aval n'est donc pas évidente et il semble que l'essentiel des flots introduits soit absorbé par l'encaissant. Si c'est le cas, cela signifie que l'aval hydraulique n'est pas organisé et donc que le vide fasse fonction de réservoir souterrain des introductions (fig. 6). Ce rôle de stockage peut alors expliquer le surdimensionnement du vide souterrain par rapport au conduit initial et surtout par rapport aux fuites.

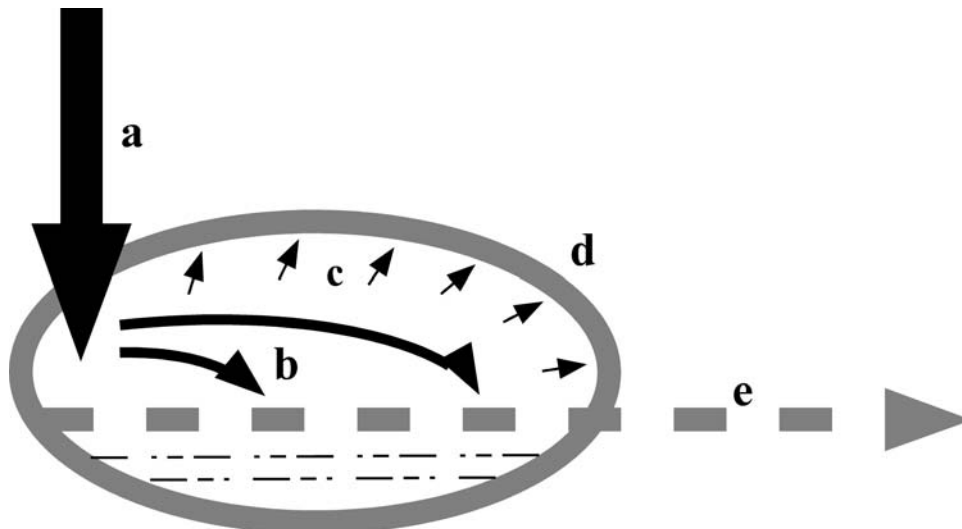
Dans l'un et l'autre cas, il se révèle que l'aval est sous-dimensionné par rapport aux introductions et donc que l'espace intermédiaire est sur-dimensionné afin de stocker temporairement l'apport hydrique.

#### 5. Conclusions

Les deux exemples examinés concernent des introductions dans des ensembles souterrains non drainés et sans liaison directe évidente avec les émergences ce qui génère un comportement spécifique de type "embâcle". Il faudrait examiner des exemples de trépanation dans des réseaux ouverts mais leur statut "ouvert" n'est pas favorable à l'examen post-événementiel du mécanisme. Il faudrait aussi examiner nouvellement les liaisons "classiques" et plus particulièrement la succession

morphologique des volumes à l'aval immédiat de la connexion. Assurément des informations nouvelles

permettraient ainsi de relativiser nos observations.



**fig. 6 - modèle conceptuel de la trépanation de la grotte du CRSOA.** Dans un noyau d'altération au sein des calcarénites, une trépanation (a) introduit, en plusieurs séquences, des éléments meubles terrigènes et surtout d'énormes quantités d'eau (b). L'effet "chasse d'eau" se heurte aux parois sans évacuation rapide qui génère une chute rapide des matières solides transportées. Au-dessus, l'eau stockée exerce une pression périphérique sur les parois du noyau d'altération, et établie peu à peu une morphologie de stockage de type "cheminée d'équilibre" (c). On note une stratification verticale : à la base, le comblement sédimentaire partiellement trié longitudinalement, au-dessus au toit de l'ennoisement "pérenne" (le plus fréquent), se réalise le maximum d'ouverture latérale par installation d'alvéoles périphériques, et au sommet se développe un vaste espace vide (d), stockage des excédents hydriques. L'essentiel des eaux évacuées passe par la porosité de l'encaissant (e).

#### References:

- JUVIGNÉ, E & F. RENARD (1991). les formations post-crétaées de la carrière CBR à Lixhe/Visé (Belgique). *Bulletin de la Société Belge de Géologie* : 163-175.
- LACROIX, M., J. RODET, H.Q. WANG, N. MASSEI, and J.-P. DUPONT (2000). Origine des matières en suspension dans un système aquifère karstique : apports de la microgranulométrie. *CRAS*, **330** : 347-354, Paris.
- LACROIX, M., J. RODET, H.Q. WANG, N. MASSEI, and J.-P. DUPONT (2002). Microgranulometric approach to a chalk karst, western Paris Basin. *Geomorphology*, **44** : 1-17.
- LAIGNEL, B., E. DUPUIS, J. RODET, M. LACROIX, and N. MASSEI (2004). An example of sedimentary filling in the chalky karst of the Western Paris Basin: Characterization, origins and hydrosedimentary behaviour. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.*, **48** (2), 219-243.
- MAIRE, R. (1990). La haute montagne calcaire : karsts, cavités, remplissages, Quaternaire, paléoclimats. *Karstologia-Mémoires*, 3, 731 p.
- MINGUET, M. (2006). *Un exemple de remplissage sédimentaire dans le karst de la craie de Belgique (Montagne Saint-Pierre) : caractérisation, origine et fonctionnement hydro-sédimentaire*. Master dissertation, University of Rouen, 42 p.
- RODET, J. (1992). *La craie et ses karsts*. Ed. CNEK-Groupe Seine, CNRS, Caen., 560 p.
- RODET, J. (1997). Typologie des karsts dans la craie du bassin de Paris. *Annales-de-la-Société-Géologique-du-Nord*, **5** (2ème série) : 351-359.
- RODET, J., B. LAIGNEL, E. DUPUIS, G. BROCARD, N. MASSEI, and J.-P. VIARD (2006a). Contribution of a sedimentary study to the karstic evolution concept of a chalk cave of the Western Paris Basin (Normandy, France). *Geologica Belgica*, **9** (3-4) : 287-296.
- RODET, J., M. MINGUET, M. FOURNIER, B. LAIGNEL, and L. WILLEMS (2006b). Caractérisation, origine et fonctionnement hydro-sédimentaire d'un remplissage sédimentaire du karst de la craie de Belgique : La grotte du C.R.S.O.A. (Montagne Saint Pierre). *10èmes Journées de Spéléologie Scientifique*, Han sur Lesse (Belgique), 18-19 novembre 2006 : 1 p.
- WILLEMS, L., J. RODET, M. FOURNIER, B. LAIGNEL, M. DUSAR, D. LAGROU, A. POUCKET, N. MASSEI, L. DUSSART-BAPTISTA, P. COMPERE, and C. EK (2007). Polyphase karst in Cretaceous chinks and calcarenites of the Belgian-Dutch border. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.*, **51** (3) : 361-376.