

Stratigraphie dans la Galerie Ouest de la Grotte de Lorette (Rochefort, Belgique) : Apport de la coupe des gours suspendus

YVES QUINIF^{1*} & MARC LEGROS²

¹ *Equipe Spéléo du Centre et de Mons (ESCM), Université de Mons, Belgium; Yves.quinif2@gmail.com.*

² *Spéléo-club Les Fistuleuses (SCF); fa075646@skynet.be.*

* corresponding author.

ABSTRACT. Stratigraphy of the Lorette Cave (Rochefort, Belgium): Study of the “gours suspendus” section. The Lorette Cave contains a wide variety of deposits within various stratigraphical contexts. This cave is a part of the complex underground meander cut-off of the Wamme and Lomme rivers, between some swallow-holes along their two talwegs near On, Jemelle and Rochefort, and the general resurgence at Eprave. The Lorette Cave is embedded within the Givetian limestone formations of the Calestienne. This cave displays the first part with a labyrinthic structure. Some parts of the karstic network are affected by recent tectonic activity, which dislocates some galleries and provokes collapses. The second part of the cave comprises the West Gallery, which contains the most complete sedimentary series. The “gours suspendus” (hanging gours) section is located at the western end of the gallery.

The cave contains numerous and rich detrital deposits. The oldest sedimentary unit is a diamictite found in several galleries (e.g. Galerie Fontaine-Bagdad, Salle du Cataclisme). It is composed of large decametric-sized quartz and sandstone pebbles coming from the erosion of the Lower Devonian formations of the Ardenne. This deposit is older than the U/Th dating limit, i.e. 350 ka. The West Gallery exposes an area of collapsed blocks and ends in a vast room. This gallery is filled with a thick fluvial series of upper Pleistocene age and capped by speleothems of Tardiglacial to Holocene age. The large terminal chamber is clogged by flooded pits. A tributary gallery shows a sedimentary series in a subsiding pit, the “Fosse aux Lions” (Lions’ Pit). These deposits are made of a diamictite interbedded between two fluvial units, the upper part of which displays oblique stratifications. The dating of a summit stalagmite places this set at 120 ka.

The present paper analyses a section made in the southern flank of the terminal room, close to the junction with the West Gallery: the “gours suspendus” section. A large part of this section consists of a complex fluvial deposit disconformably resting on top of a compact lower clay formation. This fluvial deposit is stratified, comprising mostly diamictites interstratified with thin levels of gravel and clay. It is capped by an upper clay unit and sealed by a flowstone. Thin strata of finer-grained size sediments (coarse sand), as well as clay lenses, occur within the lower clay.

The diamictites indicate a torrential origin of the sediment. At the base, just above the lower clay, some sandy channelling strata testify that one or several fluvial deposition episodes occurred. Then, torrential and probably very short-living events are separated by decantation phases. The pebbles and smaller particles are made of quartz, sandstone and muscovite that most probably originated in the Lower Devonian formations.

The “gours suspendus” section provides a new illustration of the succession of sedimentation and erosion phases in Belgian caves. It is now well demonstrated that speleothems grow mainly during temperate to hot and humid climatic phases and detrital infills are deposited in caves during cold/glacial phases. The physical erosion of sediments with ravine formations should be placed in the climatic history of the region. A gully by a coarse detrital formation like that of the new section is due to a powerful heavily-loaded current. The deposits within caves were therefore available, which can only occur during a cold phase due to the absence of continuous vegetation cover. The sand and clay levels interstratified between levels of pebbles indicate nevertheless distinct flow regimes. However, this torrential lava in the new section seems different from the old diamictite. The deposition of the sedimentary units in the West Gallery seemingly happened during a glacial–interglacial transition. This sedimentological study sets a future perspective for dating flowstones and stalagmites at the top of or embedded within the deposit levels in order to propose a more robust chronological frame for the evolution dynamics of the cave infilling of the Lorette Cave in relation to the climatic history of the region.

KEYWORDS: Endokarst, detrital filling, sedimentology, palaeoclimates.

RESUME. La Grotte Lorette à Rochefort (Belgique) est riche en dépôts sédimentaires variés. Après une caractérisation du site et une description sommaire des divers dépôts sédimentaires dans la grotte, nous décrivons la nouvelle coupe pratiquée dans la salle terminale de la Galerie Ouest : la coupe des gours suspendus. Cette coupe a été pratiquée dans le haut du talus sédimentaire sud sous un plancher stalagmitique. Ces dépôts comportent une unité ravinante sur un socle constitué d’une argile compacte. Cette série ravinante est essentiellement composée de galets décimétriques en faciès compact avec quelques strates argileuses ou sableuses interstratifiées. Ces sédiments proviennent d’une galerie qu’ils colmatent totalement. Nous étudions enfin la relation de cette série sédimentaire avec l’évolution paléoclimatique de la région.

MOTS-CLES : Endokarst, remplissage détritique, sédimentologie, paléoclimats.

1. Introduction

La Grotte Lorette à Rochefort développe sa structure labyrinthique dans les calcaires givétiens, essentiellement inclus dans la Formation du Mont d’Hairs (Bultynck et al., 1991). De ce réseau, une galerie ressort particulièrement : la Galerie Ouest, la dernière à avoir été découverte (Legros et al., 1993). Elle constitue un ancien drain de la Lomme souterraine (Van Den Broeck et al., 1910 ; Ek, 1969), ce que confirme les dépôts trouvés en son sein (Genty et al., 1992). Ceux-ci participent à la très riche panoplie de formations sédimentaires de la grotte (Quinif et al., 2011). Une formation particulière fait l’objet de cette publication. Annexe par rapport à la formation principale de la galerie, elle éclaire d’un jour nouveau certains aspects de l’évolution sédimentaire de la cavité.

2. Le contexte

La Grotte de Lorette fait partie du recoupement souterrain de méandre complexe de la Lomme et de son affluent la Wamme entre On, Jemelle et Eprave (Fig. 1). Il s’agit en fait plus d’autocaptures souterraines successives car le système souterrain se développe parallèlement au cours aérien, excepté pour le méandre de Rochefort, au sein de la bande calcaire givétienne orientée approximativement d’est en ouest. De récents résultats prouvent que deux drains, nord et sud, convergent depuis les premières pertes de la Wamme pour le drain nord et les pertes de la Lomme pour le drain sud vers une confluence souterraine visible dans la Grotte de la Fosse aux Ours (Carlier, 2011). De là, les eaux se dirigent vers la resurgence d’Eprave. Les eaux de la Grotte de Lorette

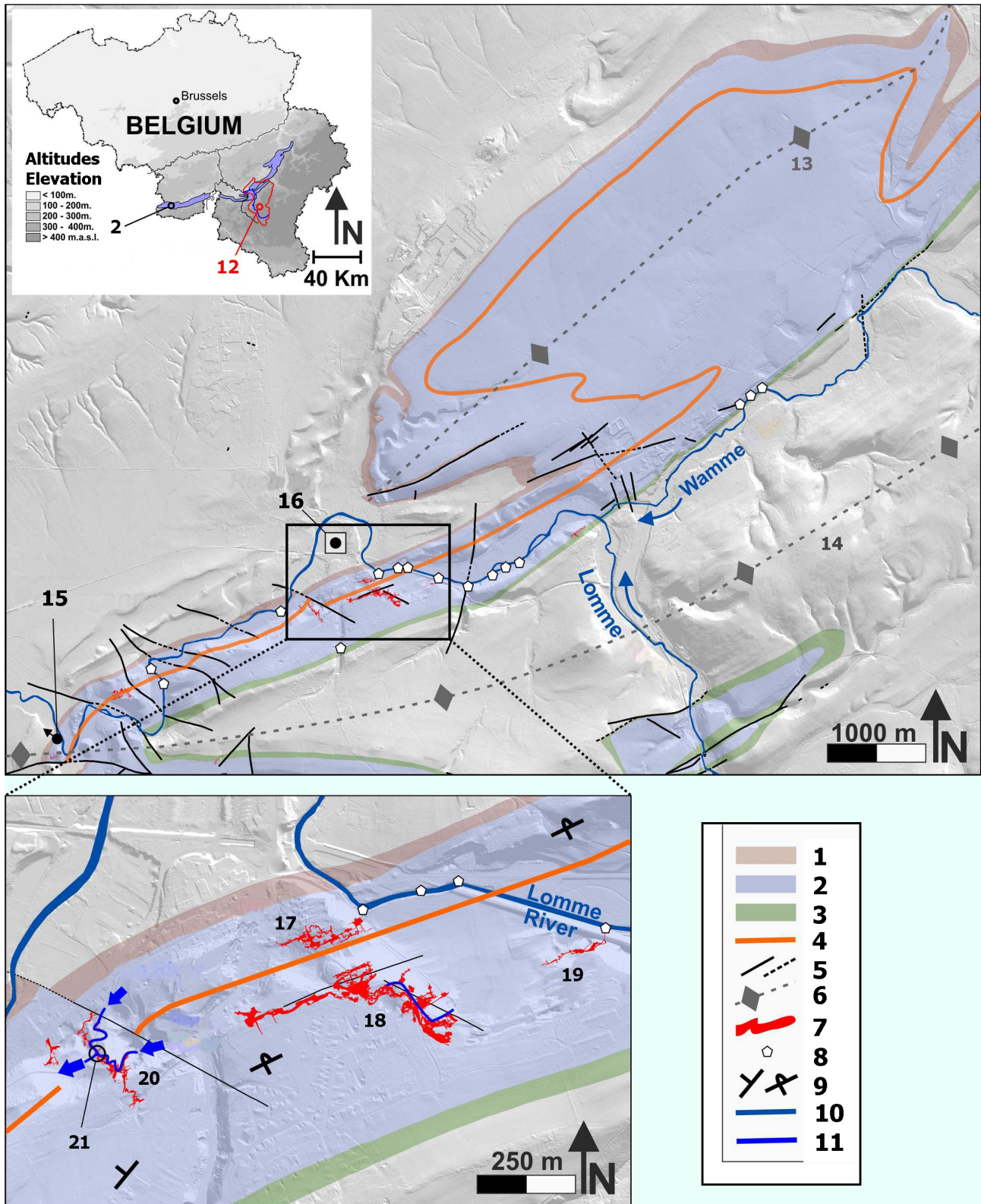


Figure 1. Cadre géographique, géologique et hydrogéologique du Système karstique de Rochefort, d'après Poulain, 2017. 1. Schistes frasniens. 2. Calcaires givétiens. 3. Schistes eifeliens. 4. Membre schisteux de Flohimont. 5. Failles (observées, supposées). 6. Axe anticlinal. 7. Réseaux karstiques. 8. Pertes. 9. Pendage. 10. Réseau hydrologique. 11. Rivières souterraines. 12. Bassin de la Lomme. 13. Anticlinal du Gerny. 14. Anticlinal de Sainte-Odile. 15. Résurgence d'Eprave. 16. Ville de Rochefort. 17. Grotte du Nou-Maulin. 18. Grotte de Lorette. 19. Grotte du Pré-au-Tonneau. 20. Grotte de la Fosse aux Ours. 21. Confluence des rivières souterraines.

Figure 1. Geographical, geological and hydrogeological framework of the Rochefort karst system, following Poulain, 2017. 1. Frasnian shales. 2. Givetian limestones. 3. Eifelian shales. 4. Flohimont shaly Member. 5. Faults (observed, supposed). 6. Anticline axis. 7. Karst networks. 8. Sinkhole. 9. Strike-dip. 10. Hydrological network. 11. Underground rivers. 12. Lomme catchment. 13. Gerny Anticline. 14. Sainte-Odile Anticline. 15. Eprave Resurgence. 16. Rochefort city. 17. Nou-Maulin Cave. 18. Lorette Cave. 19. Pré-au-Tonneau Cave. 20. Fosse aux Ours Cave. 21. Confluence of the underground rivers.

appartiennent au réseau sud (Poulain, 2017).

La grotte est de type labyrinthique, avec néanmoins des galeries bien individualisées dont la Galerie Ouest qui est concernée par cet article (Fig. 2). Nous pouvons distinguer les formes suivantes. (i) Les galeries de type drain comme la Galerie Ouest présentent des formes pariétales arrondies de type coupoles (Legros et al., 1993). Elles sont souvent de grandes tailles, plurimétriques en largeur et hauteur et souvent encombrées par d'épaisses accumulations sédimentaires (Sagot, 1995 ; Quinif et al., 2011). (ii) Les galeries appartenant aux réseaux de type treillis comme les annexes à la Galerie Fontaine-Bagdad ou le réseau des Arcades au-dessus de la rivière. Certaines de ces galeries présentent des coups de gouge témoignant d'un courant d'eau mais gardent les traces de la phase de fantômisiation sous la forme de racines d'altération. (iii) Les grandes salles sont encombrées de cônes d'éboulis parfois non stabilisés à cause des mouvements tectoniques récents (Camelbeeck et al., 2012), parfois à l'équilibre. Les voûtes sont à faces anguleuses dues à l'arrachement des blocs éboulés. Dans ce contexte, le grand vide qui termine la Galerie Ouest et dont nous allons reparler n'est pas une salle à proprement parler car, même si quelques blocs l'encombrent, elle est surtout dans le chemin de l'eau comme le démontrent les dépôts.

Il faut aussi noter que la Grotte de Lorette se singularise par des mouvements tectoniques récents. Plusieurs failles actives ont été reconnues, comme par exemple la faille Fontaine-Bagdad qui déforme la galerie du même nom. Ce phénomène est investigué depuis plus de 20 ans et le mouvement de ces failles a été quantifié par des extensomètres (Camelbeeck et al., 2012). Ce sont ces mouvements qui sont à l'origine de colmatage d'éboulis toujours instables dans la Galerie Fontaine-Bagdad, contexte inhabituel pour ce type de forme

3. Les différents dépôts souterrains

Avant d'examiner la coupe des gours suspendus proprement dite, passons en revue brièvement les différents dépôts de la

grotte pour pouvoir les intégrer dans une synthèse en guise de conclusion (Quinif, 2016).

3.1. La diamicrite ancienne (lave torrentielle 1).

Conformément à la définition classique, ces diamicrites sont des roches terrigènes dont les éléments sont mal classés et de tailles diverses (Foucault & Raoult, 2010). La principale formation se retrouve dans les galeries entourant la Salle du Val d'Enfer et la Salle du Cataclysme. Les galets, de tailles diverses, sont constitués en grande proportion de grès provenant très vraisemblablement de la Formation de la Lomme, parfois de quartz, rarement de calcaire. Ils ne sont pas orientés (Sagot, 1995). La formation ne montre pas de stratification. Il s'agit d'une lave torrentielle qui a colmaté en un épisode les vides de la grotte jusqu'à l'altitude figurée dans la Galerie Fontaine-Bagdad par une surface supérieure dite « ancienne » recouverte de spéléothèmes datés de plus de 350.000 ans. Dans les galeries qui mènent au Val d'Enfer, on retrouve des témoins de ces gros galets, montrant l'obstruction totale des vides de la grotte sous la surface supérieure ancienne.

3.2. Les dépôts de la Galerie Ouest

Cette importante galerie est en grande partie colmatée par un remplissage épais de plus de cinq mètres. Un sondage a permis d'en relever la succession lithostratigraphique jusqu'à la roche mère. Totalement détritique, ces sédiments vont de sables fins aux argiles, témoignant de courants fluviaux plutôt lents. Des fragments de charbon de bois collectés dans la couche sableuse inférieure donnent, sans certitude, un âge qui se situe à la limite de la méthode au radiocarbone, approximativement 40.000 ans BP (D. Genty, communication orale). Ce remplissage est scellé par un complexe stalagmitique comprenant des planchers stalagmitiques et des stalagmites dont la plus vieille date de 12.250 ± 1.190 années BP (Genty et al., 1992). Durant le Tardiglaciaire et l'Holocène, se sont succédé des phases de concrétionnement et de recréusement. Actuellement, les crues

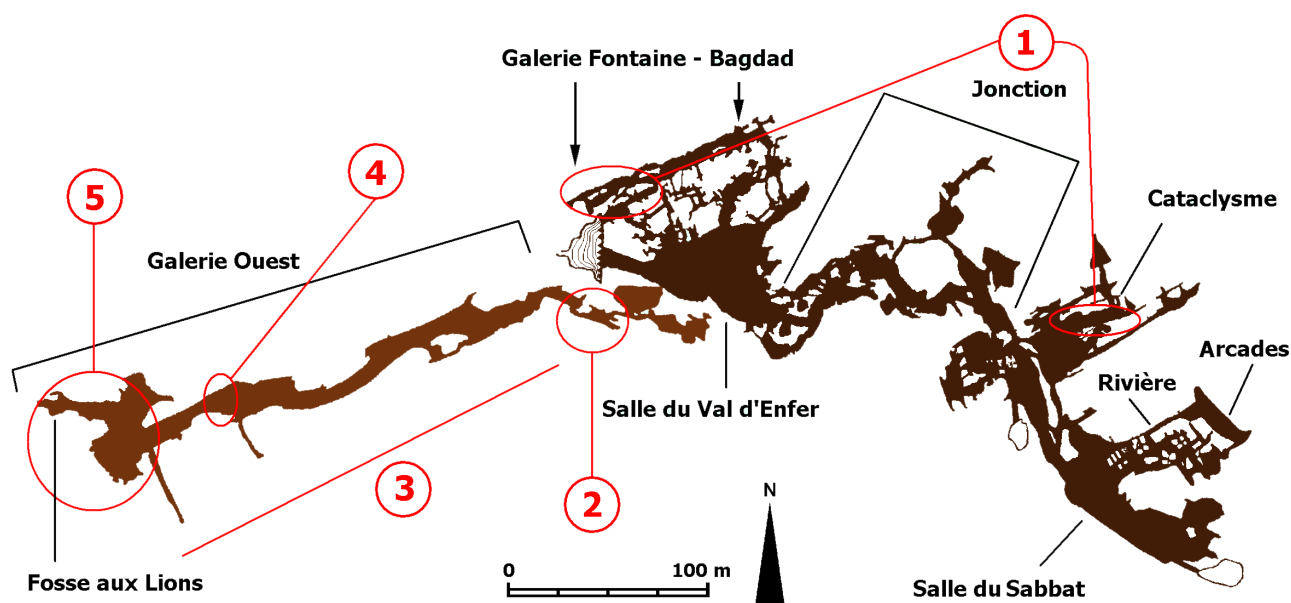


Figure 2. Plan de la Grotte de Lorette. 1. Lave torrentielle 1. 2. Spéléothèmes de la Galerie du Robinet. 3. Dépôts de la Galerie Ouest. 4. Obstruction stalagmitique holocène. 5. Dépôts de la Fosse aux Lions et des gours suspendus.

Figure 2. Map of the Lorette Cave. 1. Diamicrite 1. 2. Speleothems in the "Galerie du Robinet". 3. Deposits of the West Gallery. 4. Holocene stalagmitic obstruction. 5. Deposits from the "Fosse aux Lions" and of the "gours suspendus" section.

continuent à recréer le sommet du remplissage au voisinage de la salle terminale, tandis que la phase terminale de la sédimentation est représentée par des stalagmites holocènes (« obstruction stalagmitique » de la Fig. 2).

3.3. Les dépôts de la « Fosse aux Lions »

La salle de la « Fosse aux Lions », accessible par une galerie remontante annexe à la salle terminale et se terminant sur des colmatages, est occupée par un puits de quelques mètres de profondeur totalement creusé dans des sédiments complexes et variés (Fig. 4). On y trouve une diamicrite interstratifiée entre deux ensembles fluviatiles dont la partie supérieure est affectée de stratifications obliques. La datation d'une stalagmite sommitale situe cet ensemble antérieurement à 120.000 ans (analyse CERAK non publiée).

3.4. Les spéléothèmes de la Galerie du Robinet

La Galerie du Robinet qui précède la grande zone d'éboulis est déformée par des mouvements tectoniques récents (Quinif, 2002). Les deux parois se rapprochent et ont broyé des blocs à l'endroit le plus étroit. Ces blocs sont en réalité des morceaux de spéléothèmes ; certains sont restés coincés entre les parois, d'autres sont tombés sur le sol de la galerie (Fig. 2). Plusieurs datations ont été réalisées. Les plus vieilles sont au-delà de 400.000 ans. Il s'agit notamment du bloc coincé entre les parois, ainsi qu'un autre sur le sol. D'autres échantillons ont été datés dans les environs de 220 à 260.000 ans (222,6[+22,6/-18,9] /

266,9[+109/-56] ka). Enfin, certains sont plus jeunes : 30.4 (+2.1/-2.0) ka, 39.1 (+0.6/-0.6) ka, 35.6 (+0.7/-0.6) ka, 149.9 (+4.4/-4.2) ka (Quinif, 2002).

4. La coupe des gours suspendus

La paroi sud de la salle terminale s'est révélée être une accumulation sédimentaire allant quasiment jusqu'à la voûte (Figs 3, 4, 5 & 6), la base étant inconnue mais probablement à plus de 10 m de profondeur, puisque la pente sculptée dans les sédiments se prolonge jusqu'au siphon.

4.1. Lithostratigraphie

La plus grande partie de la coupe se compose d'une formation complexe à base ravinante sur une formation argileuse inférieure compacte (Figs 5 & 6). La formation à base ravinante est stratifiée, comprenant surtout des diamicrites entrecoupées de minces strates de graviers et d'argile. Elle est coiffée d'une formation argileuse supérieure et scellée par un plancher stalagmitique duquel les sédiments détritiques se sont décollés. La base de ces formations se situe au contact de l'argile inférieure autour de la surface ravinante. On peut y voir de minces strates de granulométrie plus fine (sable grossier), ainsi que des lentilles argileuses décollées par érosion de l'argile inférieure (Figs 6 & 7).



Figure 3. Coupe des gours suspendus. Elle est située devant le spéléologue. Remarquons vers le haut le grand plancher stalagmitique.

Figure 3. "Gours suspendus" section. It is located in front of the speleologist. Notice the large flowstone upwards.

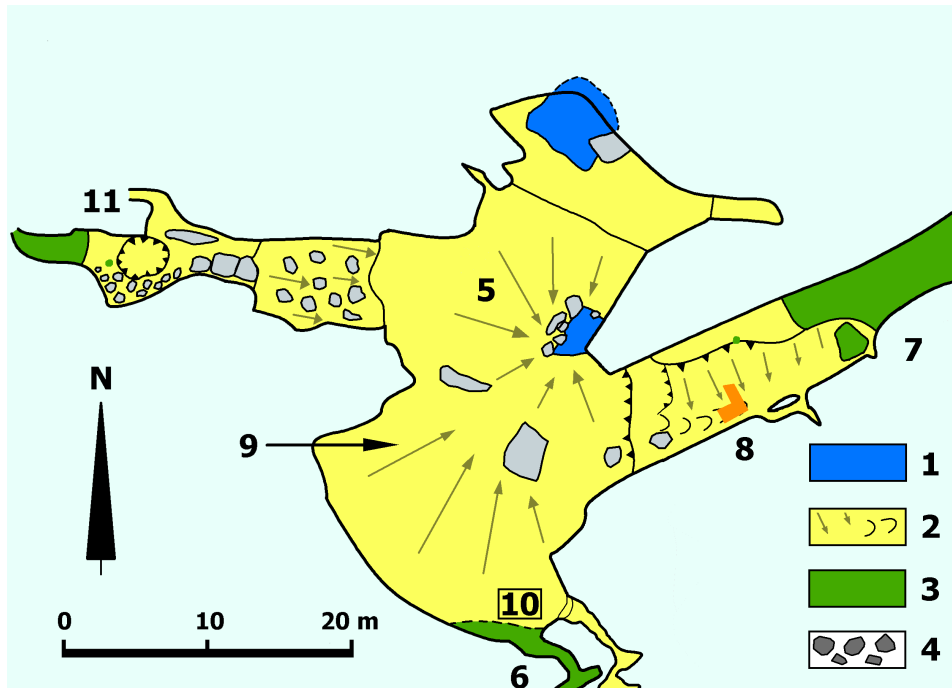


Figure 4. Localisation de la coupe des gours suspendus. 1. Siphons (surface piézométrique). 2. Sédiments limoneux, avec indication de la pente et recouvrement. 3. Spéléothèmes. 4. Eboulis. 5. Sol de sédiments indifférenciés. 6. Galerie désobstruée dans les sédiments étudiés. 7. Galerie d'arrivée. 8. Sondage dans les sédiments de la Galerie Ouest. 9. Grande salle terminale. 10. Coupe des gours suspendus. 11. « Fosse aux Lions ».

Figure 4. Location of the "gours suspendus" section. 1. Flooded pits (water table). 2. Silty sediments, with the indication of the slope and digging. 3. Speleothems. 4. Fallen blocks. 5. Soil of undifferentiated sediments. 6. Gallery unclogged in the sediments studied. 7. Arrival gallery. 8. Section through the sediments of the West Gallery. 9. Large terminal room. 10. "Gours suspendus" section. 11. "Fosse aux Lions".



Figure 5. Coupe des gours suspendus. La pelle donne l'échelle.

Figure 5. "Gours suspendus" section. The shovel gives the scale.

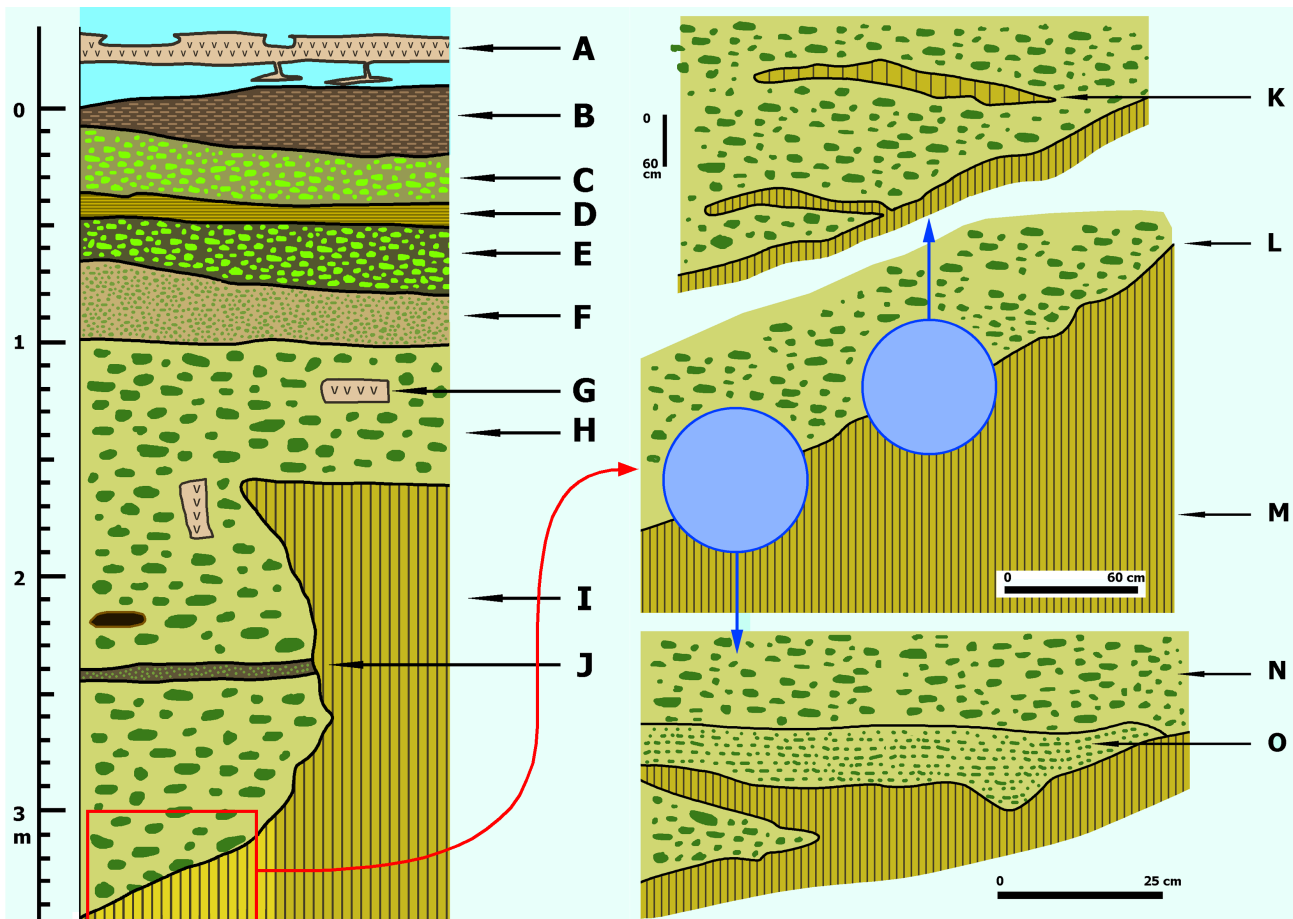


Figure 6. A gauche, lithostratigraphie de la coupe des gours suspendus. A. Plancher stalagmitique sommital. B. Membre argileux supérieur (GS1). C. Diamictite supérieure. D. Strate argileuse (GS5). E. Diamictite à gros galets (GS2). F. Diamictite à petits galets. G. Morceau de spéléothème remanié (GS4). H. Diamictite inférieure. I. Formation argileuse inférieure (GS6). J. Strate de graviers (GS7). A droite, détails près de la surface ravinante. K. Lentille argileuse. L. Base du ravinement. M. Formation argileuse inférieure (GS8). N. Diamictite inférieure. O. Sable grossier (GS9).

Figure 6. On the left, lithostratigraphy of the “gours suspendus” section. A. Summit flowstone. B. Upper clay member (GS1). C. Upper diamictite. D. Clayey stratum (GS5). E. Coarse pebble diamictite (GS2). F. Small pebble diamictite. G. Piece of reworked speleothem (GS4). H. Lower diamictite. I. Lower clay formation (GS6). J. Gravel stratum (GS7). On the right, details near the gully surface. K. Clay lens. L. Base of the gully. M. Lower clay formation (GS8). N. Lower diamictite. O. Coarse sand (GS9).

4.2. Granulométrie

4.2.1. Méthodologie

Les échantillons sont séchés et décarbonatés, une fraction de 100 grammes est prélevée, placée dans un bain de dispersant (hexamétophosphate de sodium) et lavée sur une colonne comprenant les tamis de 20-25-32-40-50-63 et 80 μm . Le refus à 80 μm est séché et tamisé à sec sur une colonne comprenant les tamis de 100-125-160-180-200-250-310-400-500-630-800-1000-1250-1600-1800-2000-2500-3150-4000 μm . Chaque fraction est pesée et gardée pour l'examen minéralogique et morphologique. Les poids des fractions inférieures à 20 μm sont estimés par extrapolation mathématique au moyen d'un polynôme du troisième degré testé sur des échantillons témoins par la méthode par décantation. Cela permet de calculer la médiane avec une bonne précision, largement utilisée pour l'interprétation de Passega. Le cas des diamictites est plus complexe que celui des sables et limons car la grosseur des éléments nécessite de travailler sur de plus grandes quantités. Cela a été fait dans la mesure des possibilités techniques. Nous les avons considérés globalement (Fig. 8, Tableau 1).

4.2.2. Les sédiments fins

D'une manière générale, les analyses granulométriques reflètent les observations de terrain. L'argile basale répond aux critères d'un sédiment très fin. Une des caractéristiques retenues est le refus à 50 μm . Avec un pourcentage de 2 %, cette argile est une des plus fines rencontrées dans la cavité. Cette argile basale se distingue du membre argileux supérieur qui a un refus à 50 μm de 14 % (Fig. 8). Notons qu'un second échantillon de l'argile basale montre un refus de 9 % attribuable à une pollution lors de l'échantillonnage. L'argile supérieure possède une courbe plurimodale avec deux modes à 58 et 28 μm , ce dernier représentant une fraction loessique remaniée. Ce sédiment est donc d'origine et de mise en place plus complexe que l'argile basale. Les résultats de la strate argileuse GS5 ne peuvent être retenus parce que les difficultés d'échantillonnage ont provoqué des pollutions de la part des strates encadrantes.

4.2.3. Les sables et galets

L'échantillon GS2 (une diamictite typique) possède un refus à 50 μm de 91 % pour une masse de 200 grammes avec une médiane à 4328 μm , indiquant par là une dominance écrasante



Figure 7. La photo montre le détail de la base de la coupe des gours suspendus. Le marteau donne l'échelle. La flèche blanche indique l'échantillonnage de la strate de sable grossier en position ravinante sur la formation d'argile inférieure.

Figure 7. Detail of the base of the “gours suspendus” section. The hammer gives the scale. The white arrow indicates the sampling point of the coarse sand stratum erosive on the lower clay formation.

Tableau 1. Paramètres granulométriques.

Table 1. Granulometric parameters.

Echantillon	Nature	Refus à 50 µm (%)	Folk & Ward			Méthode des moments				
			Fractile 1	Médiane	Qdphi	Moyenne	Sigma	Sig/moy (%)	Skewness	Curtosis
GS1	limon	13,5	90,00	15,8	1,24	22,8	22,7	99,0	2,90	30,00
GS2	galets - TOUT	91,0	4986,00	4328,0	0,01	3823,0	1360,0	35,6	-1,80	4,78
GS6	argile basale	9,0	118,00	12,2	1,26	26,9	122,0	453,0	19,00	418,00
GS9	sable	78,0	4004,00	585,0	2,12	909,0	969,0	107,0	1,28	4,31
GS8	argile basale	2,2	65,55	12,2	0,92	15,6	17,4	112,0	9,40	169,00

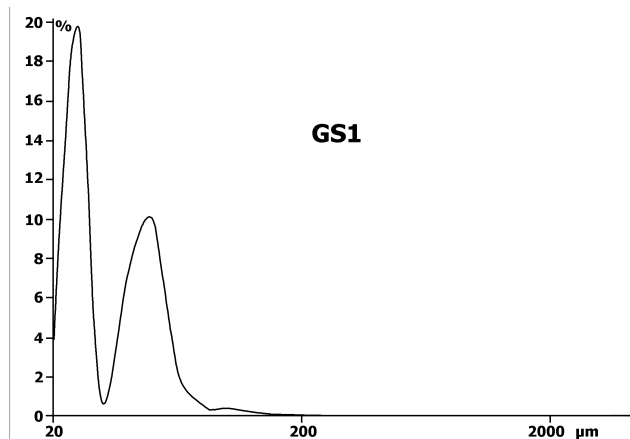


Figure 8. Courbe granulométrique du membre argileux supérieur.

Figure 8. Granulometric curve of the upper clay member.

des galets. La courbe granulométrique n'existe que par les éléments supérieurs à 4000 μm , desquels ont été extraits de plus les cailloux de taille largement supérieure aux galets arrondis les plus gros. En excluant la fraction supérieure à 4000 μm , la courbe ne montre aucun classement, attestant une origine de type lave torrentielle (Fig. 9).

L'échantillon GS9 est le sable grossier basal déposé sur la surface de transgression sous forme de lentille. Il témoigne donc de certaines conditions de mise en place lors du ravinement. Il est assez mal classé, avec un mode principal à 1400 μm . Son refus à 50 μm de 76 % rend compte d'un sable bien lavé, indice d'une absence de décantation après son dépôt. Néanmoins, sa présence signifie qu'avant la mise en place de la diamictite principale, il y eut une période, sans doute courte, d'écoulement de type fluviatile sur le ravinement (Fig. 10).

4.2.4. Méthode de Passega

La méthode synthétique dite de Passega (Passega, 1957 ; 1964 ; 1977 ; Passega & Byramjee, 1969) permet une bonne interprétation de l'hydrodynamisme grâce à un diagramme bilogarithmique entre le premier centile (1C) et la médiane (Me). Le premier centile représente la dimension des grains de telle façon que 1 % de l'échantillon soit plus grand que cette taille, ce paramètre étant une approximation de la taille maximale des grains transportés par le courant avant leur dépôt. La médiane (Me), qui représente la dimension des grains telle que 50 % de l'échantillon soit plus grand et plus petit que cette taille, caractérise la distribution globale des grains car elle divise la distribution en deux parties de même masse. Elle est fonction de la turbulence du courant durant le dépôt. Rivière (1977) démontre que cette représentation est significative car une grande partie de l'information se retrouve dans deux paramètres : le premier centile et la moyenne arithmétique. Comme il existe une très forte corrélation linéaire entre cette moyenne arithmétique et la médiane, on retrouve ainsi la représentation de Passega.

Plusieurs zones apparaissent dans le diagramme de Passega lorsque l'on applique cette relation (percentile-médiane) sur les échantillons étudiés. La « suspension gradée » représente les courants de fond (branche QR). La dimension des particules transportées et leur concentration diminue de bas en haut. Ce dépôt se met en place quand la charge dépasse la capacité de transport. La « suspension uniforme » se place au-dessus de la suspension gradée (branche SR) ; dimensions et concentration des particules sont uniformes. Lorsque le courant diminue, ces particules passent dans la suspension gradée. Leur dépôt correspond à des dépôts de type lit majeur, lorsque les conditions de décantation prédominent, entraînant une dispersion de la médiane pour un même domaine des premiers centiles. La branche PO exprime le dépôt de grains de plus en plus grossiers, avec entrainement de la partie fine. La médiane augmente alors que le premier centile reste constant. La branche PQ constitue la transition où on observe un apport de grains grossiers. Enfin, la dernière branche regroupe des grains grossiers dans un contexte d'évacuation des fines et de dépôts d'éléments transportés par roulement. Les plages séparées dans les domaines très fins correspondent à des conditions de décantation totale.

Dans le cas étudié, l'approche de Passega permet d'aborder une grande variété de sédiments (Fig. 11). Assez classiquement en milieu souterrain, l'argile basale et celle interstratifiée dans les galets se situent entre la branche SR et la plage TC, indiquant par là des conditions de décantation quasiment totale un peu perturbée par quelques courants. Le sable basal GS9 a une position supérieure au-dessus des branches de transport de grains grossiers. Néanmoins, sa déconvolution exprime

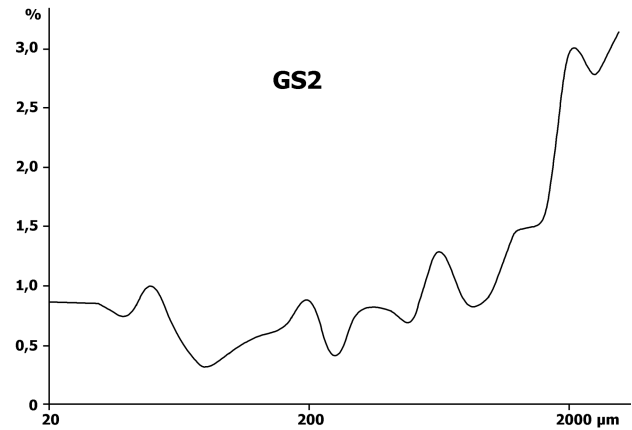


Figure 9. Courbe granulométrique de la diamictite à gros galets, en ayant exclu les fractions supérieures à 4000 μm .

Figure 9. Granulometric curve of the coarse pebble diamictite, having excluded fractions greater than 4000 μm .

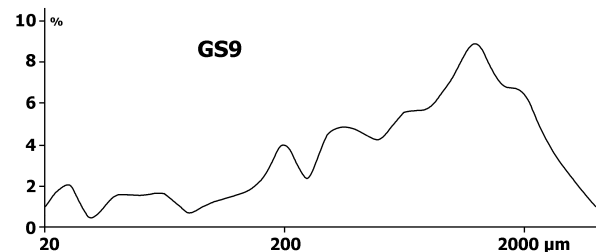


Figure 10. Courbe granulométrique du sable grossier basal.

Figure 10. Granulometric curve of coarse basal sand.

plusieurs pics dont le plus fin se situe dans la branche QR. Sans surprise, la diamictite GS2 a un point au-delà de la branche NO.

4.3. Examen morphoscopique

Cet examen donne accès à la nature et la morphologie des grains. Elle a été réalisée sous la loupe binoculaire sous différents grossissements.

Pour le membre argileux supérieur (GS1), la classe des 20 μm renferme des grains de quartz, blancs à ocres, transparents à translucides. Les formes sont souvent irrégulières, certains grains sont émoussés. La classe supérieure à 80 μm montre des grains qui sont blancs et jaunes. Ils restent irréguliers, certains pouvant être qualifiés d'émoussés. Certains grains sont à surface mamelonnée. Il y a aussi des cristaux plats de calcite. Enfin, à 63 μm , on décèle quelques micas blancs. Il y a encore quelques cristaux plats de calcite et des grains à surface mamelonnée. La majorité des grains est néanmoins du quartz.

En ce qui concerne le niveau de sable grossier basal (GS9), les grains sont surtout constitués de grès entre 400 et 630 μm . Peu de grains sont en quartz pur. Les surfaces de grains sont rugueuses mais l'ensemble des grains est arrondi. Les particules les plus grosses sont en grès ; des grains de quartz hérissent certaines surfaces. Dans les catégories fines, les grains de quartz sont plus nombreux. A 20 μm , tous les grains, de forme irrégulière, sont en quartz.

Au niveau de la formation argileuse de base (GS8), les grains de quartz sont majoritaires, transparents à translucides à

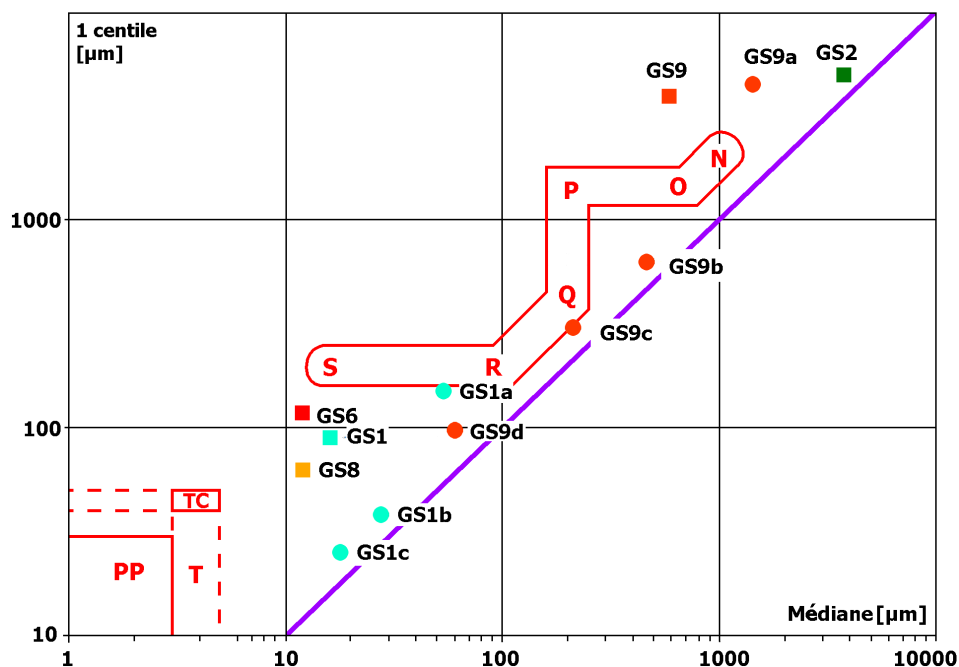


Figure 11. Graphique de Passega. Les échantillons notés avec des lettres (GS9a, b...) représentent les modes de l'échantillon total (GS9). Les strates argileuses et l'argile basale se situent entre la plage SR et la plage TC, proches donc des conditions de décantation totale.

Figure 11. Passega graph. The samples noted with letters (GS9a, b...) represent the modes of the total sample (GS9). The clay strata and basal clay lie between the SR range and the TC range, therefore close to the conditions of total settling.

50 µm. Quelques pourcents de grains sont en muscovite. Il y a aussi quelques grains noirs. En revanche, à 20 µm, presque tous les grains sont en quartz transparent à translucide, certains mats. Si aucun grain ne réagit à l'acide, quelques grains se dissolvent sans réaction. On peut penser à du gypse néoformé à partir de l'oxydation de sulfures compris dans l'encaissant.

L'abondance des grains de quartz est habituelle. Les galets en grès témoignent de la zone d'alimentation : le grès de la Formation de la Lomme qui constitue le cœur de l'anticlinal de Sainte-Odile, situé au sud du système karstique de Rochefort, et qui constitue une zone d'alimentation du système. Les micas sont aussi marqueur de cette formation détritique. Remarquons que la nature des galets de la diamictite ancienne est variée, puisqu'ils proviennent du bassin d'alimentation de la Lomme.

5. La coupe dans le contexte évolutif de la grotte

Trois principaux ensembles fluviaux ont été identifiés, décrits et replacés dans une chronologie. La plus ancienne formation est une diamictite antérieure à 350.000–400.000 ans. Suit un ensemble fluvial comprenant également une diamictite, antérieure à la dernière glaciation, et enfin un ensemble de la fin de la dernière glaciation comprenant une formation détritique inférieure surmontée d'un complexe stalagmitique Alleröd–Holocène. Enfin, la datation de spéléothèmes proches de l'altitude actuelle de la Lomme au-delà de la limite de la méthode (350.000–400.000 ans) prouve le positionnement de la rivière à cette altitude depuis au moins 350.000 à 400.000 ans.

5.1. Structuration temporelle de la sédimentation

Les facteurs de la sédimentation souterraine en Belgique ont été décrits dans des publications antérieures (Quinif, 2006). L'influence des paléoclimats est prédominante ce qui permet d'étudier ces anciens environnements à partir de l'étude des sédiments souterrains (Quinif et al., 1979 ; Bastin et al., 1988 ; Blockmans et al., 1999). D'une manière générale, les séquences reflètent l'évolution sédimentaire au travers des phases climatiques glaciaires, interstadières et interglaciaires. La Figure 12 résume cette dépendance de façon simplifiée. Cette interprétation est basée sur la théorie de la biorhexistase (Erhart, 1967). Durant les phases climatiques rigoureuses, les

sols sont dépourvus de végétation protectrice et sont mécaniquement érodés par le gel et les coulées de boue. Les écoulements de surface sont chargés et la sédimentation détritico souterraine a lieu à l'encontre du développement des spéléothèmes qui est stoppé ou fortement ralenti. Durant les phases climatiques tempérées, la couverture végétale protège les sols et entretient l'altération chimique du calcaire grâce à la forte concentration en dioxyde de carbone des sols. Ces eaux d'infiltration très minéralisées sont à l'origine du développement des spéléothèmes. Ce schéma évolutif a été construit sur base de plusieurs coupes de remplissage détritico dans les grottes belges (Grottes de la Vilaine Source, de Bohon et de Han-sur-Lesse) où l'utilisation de la palynologie a été une méthode déterminante (Bastin, 1978 ; 1982 ; 1990 ; Quinif & Bastin, 1989 ; 1994).

5.2. Les sédiments de la coupe des gours suspendus

La configuration de base révélée par cette coupe se résume en un ensemble ravinant sur un colmatage d'argile massive et homogène. La formation à base ravinante mise en place dans un contexte de circulation fluviale à haute énergie provient d'une galerie affluente complètement colmatée par ladite formation surmontée d'un ensemble stalagmitique uniquement visible sur sa face inférieure. Dans l'impossibilité d'investiguer la base rocheuse de la coupe, on ne peut que penser raisonnable un remplissage très important de la salle terminale par cette argile massive. Il en résulte que, dans ce schéma évolutif, la salle contenant la coupe des gours suspendus a été plusieurs fois quasiment totalement colmatée au cours de son histoire, avant une reprise d'érosion au moins partielle de ce colmatage.

En partant des sédiments les plus jeunes, à savoir ceux de la grande Galerie Ouest appartenant au Pléistocène supérieur, les sédiments de la coupe des gours suspendus sont plus anciens. Ils ont probablement été érodés par la rivière ayant mis en place les sédiments pléistocènes. Par rapport aux sédiments de la Fosse aux Lions, la succession plus complexe comprenant la diamictite ne ressemble en rien à ceux étudiés ici. Il est difficile de connaître son soubassement plus profond. Une hypothèse plausible est de considérer les deux venues comme ravinantes sur l'argile de base compacte de la coupe des gours suspendus, deux rivières affluentes provenant de deux alimentations

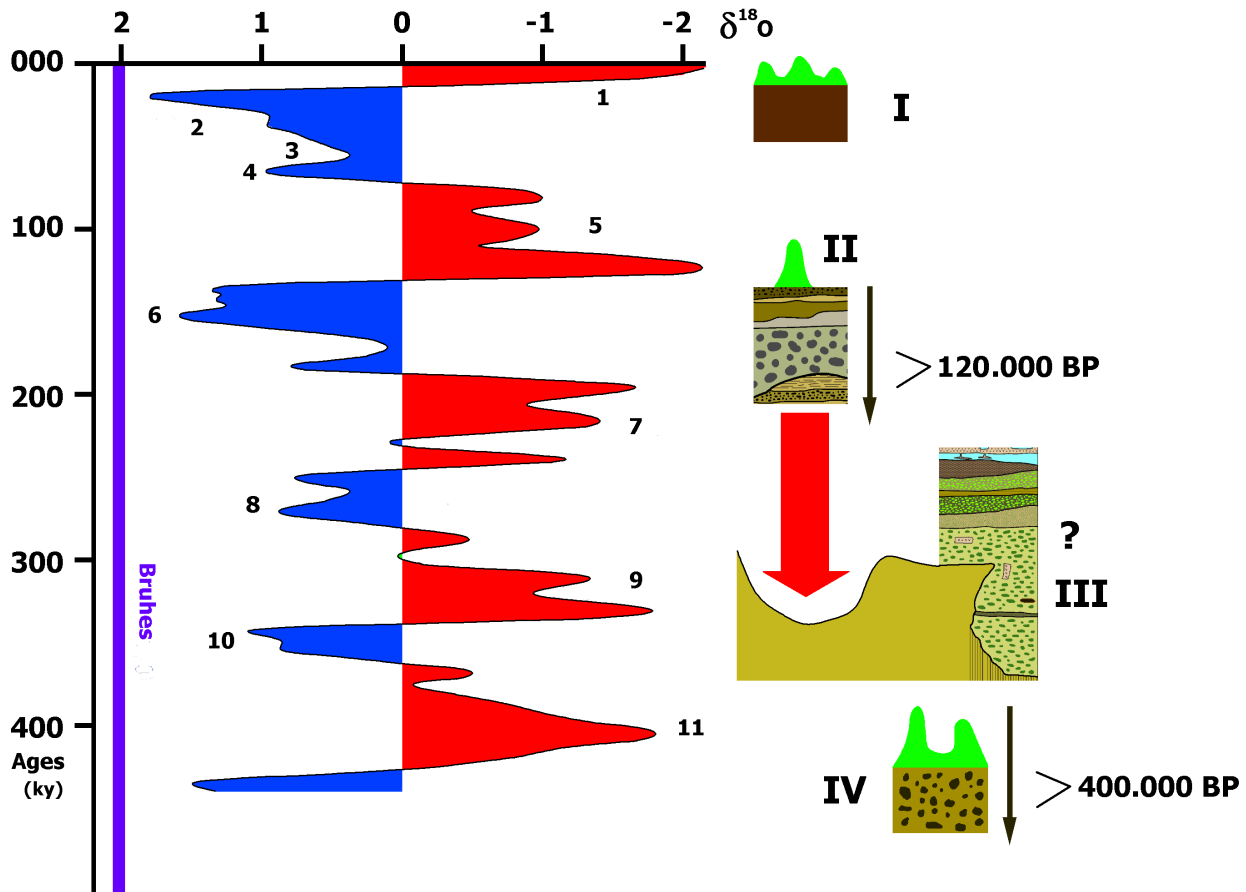


Figure 12. Positionnement temporel des ensembles sédimentaires en rapport avec la courbe isotopique océanique (SPECMAP, Martinson et al., 1987). Les phases chaudes sont illustrées par la couleur rouge, les froides par la couleur bleue. 1, 2, 3... : stades isotopiques. I. Ensemble sédimentaire de la Galerie Ouest. II. Ensemble sédimentaire de la « Fosse aux Lions ». III. Coupe des gours suspendus. IV. Diamictite ancienne. Les ensembles II et III sont discordants sur une argile de base.

Figure 12. Temporal positioning of sedimentary groups in relation to the oceanic isotope curve (SPECMAP, Martinson et al., 1987). The hot phases are illustrated by the red colour, the cold by the blue colour. 1, 2, 3... : isotopic stages. I. Sedimentary complex of the West Gallery. II. Sedimentary complex of the "Fosse aux Lions". III. Sedimentary complex of the "gours suspendus" section. IV. Ancient diamicrite. Sets II and III are discordant on a base clay.

différentes. Enfin, ces deux diamictites sont également très différentes de la diamictite ancienne (lave torrentielle 1) datée de plus de 400.000 ans. Tous ces arguments situeraient l'ensemble à base ravinante de la coupe des gours suspendus au Pléistocène moyen, sans pouvoir trancher par rapport à l'ensemble de la Fosse aux Lions.

6. Conclusion

Les sédiments de la coupe des gours suspendus apportent une nouvelle illustration de la succession de phases de dépôts et d'érosion dans les grottes (Quinif, 1994). S'il est maintenant bien démontré que les spéléothèmes croissent essentiellement durant des phases climatiques tempérées à chaudes et humides et que les sédiments détritiques sont issus de phases froides, les phénomènes de recouvrement de sédiments avec formations à base ravinante sont à replacer dans l'histoire climatique d'une région (Fig. 12). Un ravinement par une formation détritique grossière comme celle de la coupe des gours suspendus est dû à un courant puissant très chargé. Les sédiments étaient donc disponibles, ce qui ne peut se présenter que lors d'une phase froide avec absence de couverture végétale continue. L'hypothèse d'un flash flood en phase chaude est moins probable, vu d'abord la complexité de la coupe mais également en regard des travaux de Bruno Bastin en palynologie des

dépôts souterrains (Quinif et al., 1979 ; Bastin et al., 1988 ; Quinif & Bastin, 1989 ; Quinif, 1997). La stratification différenciée avec sables et argiles s'interstratifiant entre les galets indique néanmoins des écoulements différenciés. L'hypothèse d'une lave torrentielle comme la lave torrentielle 1 nous semble exclue. Il est plus probable de situer la mise en place des sédiments de la coupe des gours suspendus lors d'une transition glaciaire-interglaciaire. La suite devra consister en des datations de la stalagmite sommitale et d'un fragment de stalagmite trouvé dans les galets.

7. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les reviewers Julien Denayer, Laurent Bruxelles ainsi qu'un reviewer anonyme pour leurs commentaires très constructifs.

8. Références

- Bastin, B., 1978. L'analyse pollinique des stalagmites : une nouvelle possibilité d'approche des fluctuations climatiques du Quaternaire. *Annales de la Société géologique de Belgique*, 101, 13–19.
- Bastin, B., 1982. Premier bilan de l'analyse pollinique de stalagmites holocènes en provenance de grottes belges. *Revue belge de Géographie*, 106/1, 87–97.

- Bastin, B., 1990. L'analyse pollinique des concrétions stalagmitiques : méthodologie et résultats en provenance des grottes belges. *Karstologia Mémoires*, 2, 3–10.
- Bastin, B., Quinif, Y., Dupuis, C. & Gascoyne, M., 1988. La séquence sédimentaire de la Grotte de Bohon (Belgique). *Annales de la Société géologique de Belgique*, 111/1, 51–60.
- Blockmans, S., Quinif, Y., Bini, A. & Zuccoli, L., 1999. Dynamique sédimentaire et paléoenvironnements durant la transition Weichsélien – Holocène à partir des dépôts endokarstiques de la Grotte de Han-sur-Lesse (Belgique). *Bulletin de la Société géologique de France*, 170/6, 841–852.
- Bultynck, P., Coen-Aubert, M., Dejonghe, L., Godefroid, J., Hance, L., Lacroix, D., Prétat, A., Stainier, P., Steemans, Ph., Streel, M. & Tourneur, F., 1991. Les formations du Dévonien moyen de la Belgique. *Mémoires pour servir à l'Explication des Cartes géologiques et minières de la Belgique*, 30, 105 p.
- Camelbeeck, T., van Ruymbeke, M., Quinif, Y., Vanduycke, S., de Kerchove, E. & Ping, Z., 2012. Observation and interpretation of fault activity in the Rochefort cave (Belgium). *Tectonophysics*, 581, 48–61. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.09.027>
- Carlier, K., 2011. Exploratie Fosse aux Ours krijgt nieuwe wending. Niet één maar twee ondergrondse rivieren. *Spelerpes*, 2, 12–13.
- Ek, C., 1969. Facteurs, processus et morphologie karstiques dans les calcaires paléozoïques de la Belgique. Thèse de doctorat inédite, Université de Liège, Liège, 2 vol.
- Erhart, H., 1967. La genèse des sols en tant que phénomène géologique : esquisse d'une théorie géologique et géochimique, biostase et rhexistase. Masson, Paris, *Evolution des sciences*, 177 p.
- Foucault, A. & Raoult, J.-F., 2010. *Dictionnaire de géologie*. 7^e éd. Dunod, Paris, 388 p.
- Genty, D., Quinif, Y. & Bastin, B., 1992. Un remplissage endokarstique tardiglaciaire et holocène (nouvelle galerie de la Grotte de Rochefort). *Speleochronos*, 4, 31–40.
- Legros, M., Nandance, J.-L., Pauwels, M., Quinif, Y. & Maboge, B., 1993. La nouvelle galerie de Rochefort. *Regards*, 11, 18–22.
- Martinson, D.G., Pisias, N.G., Hays, J.D., Imbrie, J., Moore, T.C. & Shackleton, N.J., 1987. Age dating and the orbital theory of the ice ages: development of a high resolution 0 to 300,000-year chronostratigraphy. *Quaternary Research*, 27, 1–29. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(87\)90046-9](https://doi.org/10.1016/0033-5894(87)90046-9)
- Passega, R., 1957. Texture as characteristic of clastic deposition. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 41/9, 1952–1984. <https://doi.org/10.1306/0BDA594E-16BD-11D7-8645000102C1865D>
- Passega, R., 1964. Grain size representation by CM patterns as a geological tool. *Journal of Sedimentary Petrology*, 34/4, 830–847. <https://doi.org/10.1306/74D711A4-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Passega, R., 1977. Significance of CM diagrams of sediments deposited by suspensions. *Sedimentology*, 24, 723–733. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1977.tb00267.x>
- Passega, R. & Byramjee, R., 1969. Grain-size image of clastic deposits. *Sedimentology*, 13, 233–252. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1969.tb00171.x>
- Poulain, A., 2017. Flow and transport characterization in vadose and phreatic zones of karst aquifers: Experimental approaches in the Givetian limestones of South Belgium. Unpublished Ph.D. Thesis, University of Namur, Namur, Belgium, 226 p.
- Quinif, Y., 1994. Les dépôts karstiques : concepts et méthodologies. In Maire, R., Pomel, S. & Salomon, J.-N. (eds), *Enregistreur et Indicateurs de l'Evolution de l'Environnement en Zone tropicale*. Pessac (France), Presses Universitaires de Bordeaux, 55–72.
- Quinif, Y., 1997. Les recherches de Bruno Bastin dans le karst. *Bulletin de la Société belge de Géologie*, 106, 13–18.
- Quinif, Y., 2002. U/Th dating of speleothems and Ardenne rivers incision. The example of the Lomme River and the Rochefort Caves. *Proceedings of the first Geologica Belgica International Meeting*, Leuven, 11-15 September. *Aardkundige Mededelingen*, 12, 141–143.
- Quinif, Y., 2006. Complex stratigraphic sequences in Belgian caves: Correlation with climatic changes during the middle, the upper Pleistocene, and the Holocene. *Geologica Belgica*, 9/3-4, 231–244.
- Quinif, Y., 2016. Etagement dans la grotte de Lorette (Rochefort) – Relation avec les dépôts souterrains. *Regards*, 81, 60–69.
- Quinif, Y., Dupuis, C., Bastin, B. & Juvigné, E., 1979. Etude d'une coupe dans les sédiments quaternaires de la grotte de la Vilaine Source (Arbre, Belgique). *Annales de la Société géologique de Belgique*, 102, 229–241.
- Quinif, Y. & Bastin, B., 1989. Modalités et chronologie de la sédimentation souterraine en Belgique au Pléistocène moyen et supérieur. *Acta Carsologica*, 18, 71–87.
- Quinif, Y. & Bastin, B., 1994. Datation uranium/thorium et analyse pollinique d'une séquence stalagmitique du stade isotopique 5 (Galerie des Verviétos, Grotte de Han-sur-Lesse, Belgique). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, série II*, 318, 211–217.
- Quinif, Y., Kaufmann, O. & Sagot, D., 2011. Les dépôts de la grotte de Lorette (Rochefort). *Geological Survey of Belgium professional paper*, 2011/2, 309, 55–63.
- Rivière, A., 1977. *Méthodes granulométriques. Techniques et interprétations*. Masson, Paris, 167 p.
- Sagot, D., 1995. Les phénomènes karstiques du bassin Wamme-Lomme, région de Rochefort, Belgique. *Organisation des écoulements et indices sur la nature des paléocourants. Mémoire de maîtrise de géographie*, Inédit, UFR de géographie et d'aménagement du territoire, Université des sciences et technologies de Lille 1, Lille, 110 p.
- Van Den Broeck, E., Martel, E.A. & Rahir, E., 1910. *Les cavernes et les rivières souterraines de Belgique*. H. Lamertin, Bruxelles, 2 vol., 1592 p.

Manuscrit reçu le 12 décembre 2020, accepté dans sa forme revue le 27 septembre 2021, disponible en ligne le 28 décembre 2021.

Manuscript received 12.12.2020, accepted in revised form 27.09.2021, available online 28.12.2021.