

Les archives sédimentaires quaternaires de la grotte sous les Sangles (Bas-Bugey, Jura méridional, France). Indices paléoclimatiques et sismo-tectoniques

Vincent Lignier, Marc Desmet

Citer ce document / Cite this document :

Lignier Vincent, Desmet Marc. Les archives sédimentaires quaternaires de la grotte sous les Sangles (Bas-Bugey, Jura méridional, France). Indices paléo-climatiques et sismo-tectoniques. In: Karstologia : revue de karstologie et de spéléologie physique, n°39, 1er semestre 2002. Fantôme de roche (Belgique) et Relations glacier-karst (Jura méridional) pp. 27-46;

doi : <https://doi.org/10.3406/karst.2002.2493>

https://www.persee.fr/doc/karst_0751-7688_2002_num_39_1_2493

Fichier pdf généré le 20/11/2018

Abstract

Quaternary sedimentary archives of the sous les sangles cave (Bas-Bugey, Jura Méridional, France) ; paleo-cumatic and sismo-tectonic evidences.

The " Sous les Sangles " Cave is located in southern part of Jura mountain at the front part of the north western alpine tectonically active massifs. This region was covered by alpine and jurassian glaciers during the Last Glacial Maximum. An old gallery contains stratified fluvial and moraine injection, covered by a 3.5 meters thick deposit of finely laminated silty carbonate and clays. Sedimentological investigation reveals several periods of different water circulations depending on glacial and inter glacial periods. The upper finely laminated sediments correspond to the end of the last glacial maximum according to the exokarstic equivalent of the Cerin lake and the U/Th ages obtained with speleothems. Spectral analysis (using Fourier methods and pass-band mapping technics) on grey-level raw data have been used on the "Sous les Sangles" sediment. The main result shows evidence of a cyclic deposition according to the three main periodicities recognised through the 1.5 m top sequence. The laminated material is affected by plastic and brittle deformations. The entire deposit is characterised by (1) a vertical faulting without apparent dominant relative movement which can be interpreted as tension faults ; (2) an associated soft and brittle deformation similar to thin skin tectonic at centimetre scale affecting the base of the deposit and testified to gravity reworking which could correspond to discrete sismotectonic activity ; (3) brittle deformations associated with fluid escape patterns occurring at two specific levels along the vertical faults, emphasising the earth tremor existence according to several broken speleothems. These observations are highly supported by the geodynamic and tectonic frame of this part of Jura massif which reveal an actual uplift of several millimetre/year, especially in this part of the " Cluse des Hôpitaux" cross valley. Numerous historical earthquakes have been documented in this area. The microtectonic study of the cave shows dominant inverse and strike-slip structures correlated to the general tectonic frame.

Résumé

Située au front des Alpes nord occidentales à la limite entre les parties externe et interne du Jura méridional, la grotte sous les Sangles contient une riche séquence de dépôts détritiques (dépôts glaciaires et fluviaux, formation laminée et rythmée). L'étude morphologique et sédimentologique de la cavité montre que le fonctionnement hydrologique n'est pas le même en périodes glaciaires et interglaciaires. L'analyse à haute résolution des sédiments souterrains laminés, comparée à un équivalent exokarstique du lac de Cerin, souligne la complémentarité entre les varves glacio-lacustres s.s. et les rythmites endokarstiques. Ces deux formations correspondraient de façon synchrone à la déglaciation pléniglaciaire en accord avec les âges radio-chronologiques obtenus à partir des spéléothèmes. Par ailleurs, l'étude micro-tectonique et morphologique des galeries souterraines et des remplissages rythmés permettent de mettre en évidence une notable activité tectonique dans cette région de l'avant-pays alpin depuis le dernier Pléniglaciaire.

Les archives sédimentaires quaternaires de la grotte sous les Sangles

(Bas-Bugey, Jura méridional, France)

Indices paléo-climatiques et sismo-tectoniques

Vincent LIGNIER* et Marc DESMET**

*Laboratoire des Sciences de la Terre - U.M.R. 8515 - Ecole Normale Supérieure de Lyon, 46 allée d'Italie, 69007 Lyon
Vincent.Lignier@ens-lyon.fr

**Laboratoire de Géodynamique des Chaînes Alpines - U.M.R. 5025, Université de Savoie, 73376 Le Bourget du Lac

RÉSUMÉ : Située au front des Alpes nord occidentales à la limite entre les parties externe et interne du Jura méridional, la grotte sous les Sangles contient une riche séquence de dépôts détritiques (dépôts glaciaires et fluviaux, formation laminée et rythmée). L'étude morphologique et sédimentologique de la cavité montre que le fonctionnement hydrologique n'est pas le même en périodes glaciaires et interglaciaires. L'analyse à haute résolution des sédiments souterrains laminés, comparée à un équivalent exokarstique du lac de Cerin, souligne la complémentarité entre les varves glacio-lacustres s.s. et les rythmites endokarstiques. Ces deux formations correspondraient de façon synchrone à la déglaciation pléni-glaciaire en accord avec les âges radio-chronologiques obtenus à partir des spéléothèmes. Par ailleurs, l'étude micro-tectonique et morphologique des galeries souterraines et des remplissages rythmés permettent de mettre en évidence une notable activité tectonique dans cette région de l'avant-pays alpin depuis le dernier Pléni-glaciaire.

MOTS-CLÉS : Karst, remplissage, tectonique, synsédimentaire, rythmites, varves, signal, glaciation.

ABSTRACT : QUATERNARY SEDIMENTARY ARCHIVES OF THE SOUS LES SANGLES CAVE (BAS-BUGEY, JURA MÉRIDIONAL, FRANCE); PALEO-CLIMATIC AND SISMO-TECTONIC EVIDENCES. The "Sous les Sangles" Cave is located in southern part of Jura mountain at the front part of the north

western alpine tectonically active massifs. This region was covered by alpine and jurassian glaciers during the Last Glacial Maximum. An old gallery contains stratified fluvial and moraine injection, covered by a 3.5 meters thick deposit of finely laminated silty carbonate and clays. Sedimentological investigation reveals several periods of different water circulations depending on glacial and inter glacial periods. The upper finely laminated sediments correspond to the end of the last glacial maximum according to the exokarstic equivalent of the Cerin lake and the U/Th ages obtained with speleothems. Spectral analysis (using Fourier methods and pass-band mapping technics) on grey-level raw data have been used on the "Sous les Sangles" sediment. The main result shows evidence of a cyclic deposition according to the three main periodicities recognised through the 1.5 m top sequence. The laminated material is affected by plastic and brittle deformations. The entire deposit is

characterised by (1) a vertical faulting without apparent dominant relative movement which can be interpreted as tension faults; (2) an associated soft and brittle deformation similar to thin skin tectonic at centimetre scale affecting the base of the deposit and testified to gravity reworking which could correspond to discrete sismo-tectonic activity; (3) brittle deformations associated with fluid escape patterns occurring at two specific levels along the vertical faults, emphasising the earth tremor existence according to several broken speleothems. These observations are highly supported by the geodynamic and tectonic frame of this part of Jura massif which reveal an actual uplift of several millimetre/year, especially in this part of the "Cluse des Hôpitaux" cross valley. Numerous historical earthquakes have been documented in this area. The microtectonic study of the cave shows dominant inverse and strike-slip structures correlated to the general tectonic frame.

KEY WORDS : Karst, tectonic, synsédimentaire, rythmites, varves, signal, glaciation.

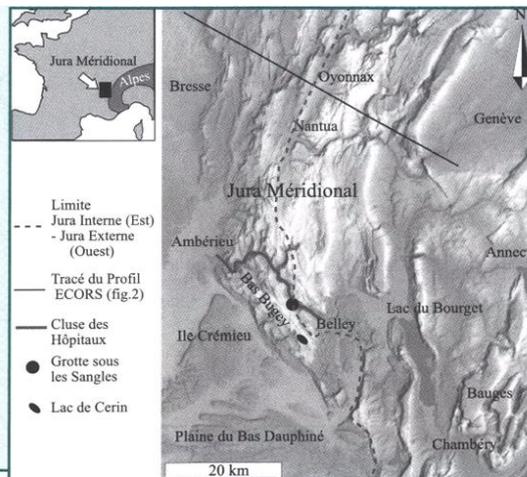


Figure 1 : Cadre géographique. Le Jura constitue le front déformé des Alpes Occidentales. La grotte sous les Sangles se situe dans la Cluse des Hôpitaux à la limite entre les parties externe et interne (Haute Chaîne) du Jura Méridional. Geological frame. The Jura correspond to the strained alpine foreland basin. The "Sous les Sangles" Cave is located in the "Cluse des Hôpitaux" cross valley, at the boundary between external and internal Jura massifs.

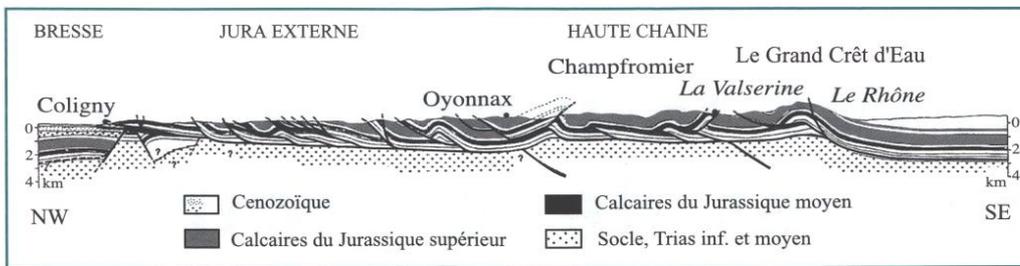
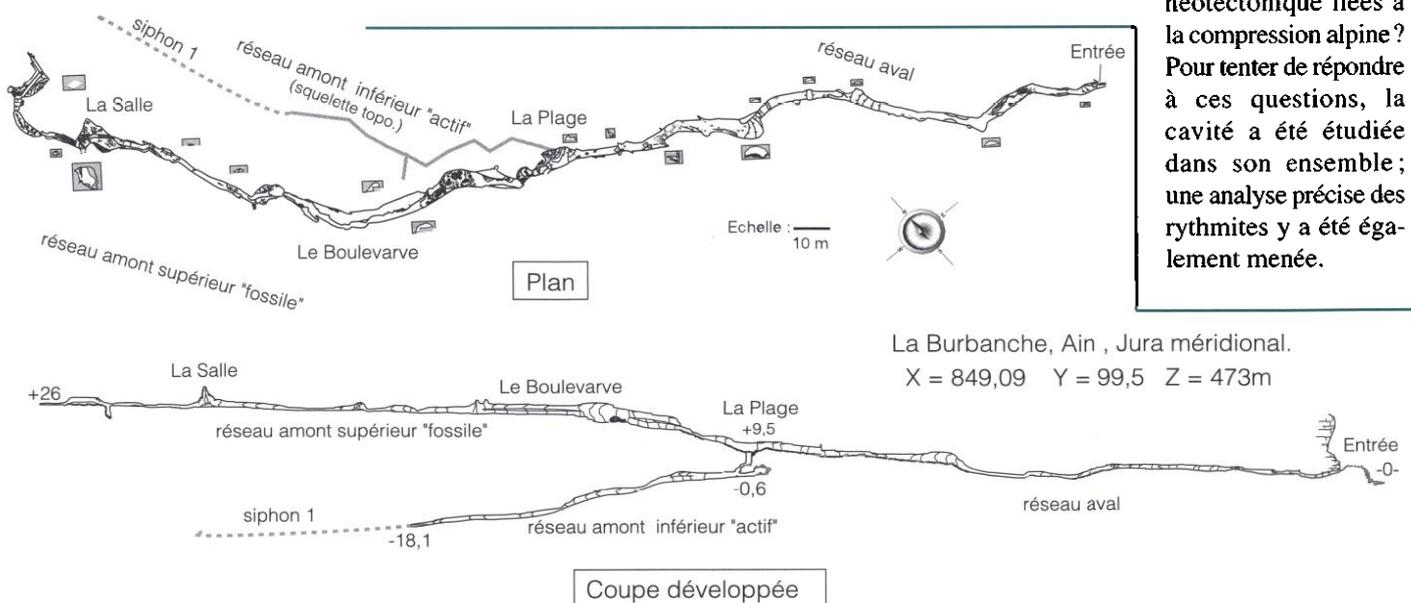


Figure 2 : Coupe géologique équilibrée, le long du profil ECORS [d'après Guellec et al., 1991] (voir figure 1) La tectonique de couverture en raccourcissement mio-pliocène du Jura se traduit par des chevauchements de rampes décollées du socle à la faveur des niveaux d'évaporites et d'argilites du Trias supérieur. Le Jura externe chevauche le fossé tertiaire de la Bresse ; la Haute Chaîne (Jura Interne) correspond à une élévation du socle probablement liée à un chevauchement crustal profond. La grotte sous les Sangles se situe à l'aplomb de ce chevauchement.

Balanced geological cross-section in the light of the ECORS data [from Guellec et al., 1991]. Jura correspond to shortening thin-skin tectonic, by decollement horizons at the base of the sedimentary cover and basement thrusting.

Figure 3 : Topographie et principaux traits spéléomorphologiques de la grotte sous les Sangles. *Topography and main speleomorphological lines of Sous les Sangles Cave.*



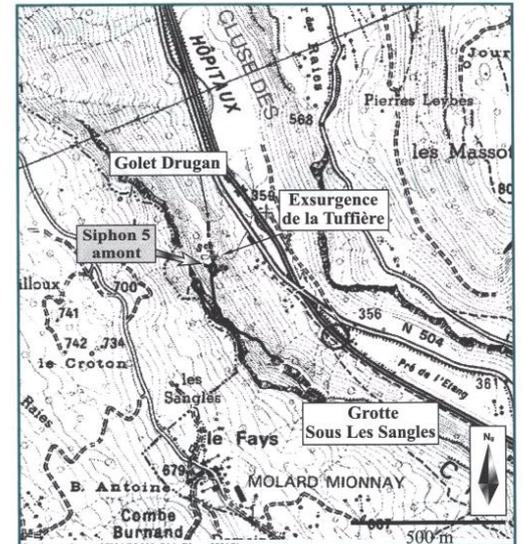
INTRODUCTION

Les dépôts sédimentaires constituent des archives qui sont de plus en plus étudiées pour définir leurs modes de transport et de sédimentation qui sont le plus souvent contrôlés par le climat. Ils sont également étudiés pour déterminer l'existence de mouvements et déformations tectoniques syn- et/ou postérieures à leur sédimentation. Le karst, en piégeant des sédiments d'origine exogène, peut se révéler un exceptionnel conservateur d'archives sédimentaires. Dans une cavité dite "fossile", les conditions de conservation sont idéales : absence de lumière, température et humidité constante, toujours proche de la saturation, absence de ruissellement important et donc d'érosion. L'endokarst permet, dans ces conditions, la conservation de sédiments témoins qui constituent des supports sans pareil pour les reconstitutions paléogéographiques et paléoclimatiques. Cette notion de transfert et de piégeage de sédiments exogènes dans le karst a déjà été relatée par de nombreux auteurs [notamment Quinif & Maire, 1998 ; Maire, 1990 ; Delannoy, 1997]. Ils soulignent l'intérêt des sédiments endokarstiques en tant qu'archives paléoclimatiques.

La Grotte sous les Sangles dans le Jura Méridional (figure 1) renferme un important dépôt "varvé" connu depuis la découverte de la cavité par des spéléologues de l'Ain [Chirol, 1991]. Sbaï et al. [1995] font une première étude de la cavité et de ses remplissages dont

une partie est assimilée à des dépôts glaciaires. L'exceptionnelle conservation d'une séquence sédimentaire rythmée de près de trois mètres d'épaisseur dans une partie de la galerie ("Boulevard"), fait de la grotte sous les Sangles un site d'étude remarquable. De plus, la situation géographique de la cavité lui confère des intérêts climatiques et tectoniques particuliers. Pourquoi et comment une telle accumulation de rythmites a pu se former et être conservée ainsi ? Quelles informations concernant le fonctionnement du karst et l'évolution des conditions paléo-environnementales peuvent-elles apporter ? Ces archives sédimentaires ont-elles pu enregistrer des indices de paléosismicité et de néotectonique liées à la compression alpine ? Pour tenter de répondre à ces questions, la cavité a été étudiée dans son ensemble ; une analyse précise des rythmites y a été également menée.

Figure 4 : Report en surface du plan topographique de la grotte sous les Sangles et du golet Drugan ; relations avec l'émergence de la Tuffière. *Surface projection of the topographic map of the Sous les Sangles Cave and Golet Drugan Cave ; relationship with Tuffière spring.*



Cette étude a été réalisée au sein de l'Université de Savoie dans le cadre d'une thèse de doctorat sur l'enregistrement de la paléosismicité par les sédiments [Lignier, 2001] au sein du Laboratoire de Géodynamique des Chaînes Alpines (U.M.R. 5025) en lien avec le G.D.R. 440 du C.N.R.S "Etude des enregistrements environnementaux et paléo-environnements à haute résolution dans les dépôts rythmés souterrains" auquel participe le Laboratoire de Géographie de l'Université de Savoie (Edytem).

I. CADRE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE RÉGIONAL

A. Une origine et proximité alpine

Le massif du Jura, au front des massifs alpins nord occidentaux (figure 1), correspond à la bordure de l'ancien océan alpin, repris et déformé par la compression alpine. La déformation atteint le Jura au Mio-Pliocène. Elle s'exprime par une tectonique de couverture liée au raccourcissement du socle par des chevauchements profonds (figure 2), au niveau des massifs cristallins externes et probablement pour partie sous la Haute Chaîne du Jura (Jura interne) [Guellec *et al.*, 1991].

Caractéristiques des reliefs jurassiens, des cluses recourent les structures géologiques. Plusieurs de ces cluses, façonnées par les glaciers, sont actuellement "mortes", comme la Cluse de Nantua et la Cluse des Hôpitaux où s'ouvre la grotte sous les Sangles (figure 1). L'étude topographique de ces anciennes vallées indique qu'elles sont bombées en leur milieu ; il en résulte une divergence des cours d'eau de part et d'autre. Ce bombement médian est l'expression d'une activité tectonique récente, voire actuelle, à l'intérieur de ce massif. L'étude comparative des points de nivellement topographique révèle l'existence de mouvements relatifs récents dans la partie méridionale du Jura et dans la Haute Chaîne, où le taux de soulèvement est de l'ordre de 2 mm.an⁻¹ [Jouanne *et al.*, 1995].

Cette région témoigne également d'une sismicité historique notable ; plusieurs séismes historiques importants ont eu lieu dans la région de Belley, notamment en 1822 [Thouvenot *et al.*, 1990 ; Chapron, 1999].

B. L'empreinte des glaciations

Le Jura méridional est essentiellement composé de roches d'âge secondaire. Hormis les formations superficielles, il est partiellement recouvert de dépôts quaternaires laissés par les glaciers locaux et alpins au cours des épisodes glaciaires successifs. Si les glaciers alpins se sont étendus jusqu'à Lyon au "Riss", ils ne semblent pas avoir dépassé le bassin molassique suisse au "Würm" ;



Photo 1 : Premier siphon de la galerie amont inférieure active. Il s'agit d'un siphon suspendu auquel ne se connecte la rivière active qu'en période de crue. L'eau peut alors remonter de plus de vingt mètres jusqu'à "la Plage" (figure 3).

This flooded lower part of the Sous les Sangles Cave is connected with a subterranean river ; during major flooding, water can rise up to "la Plage", more than twenty metres above this level.

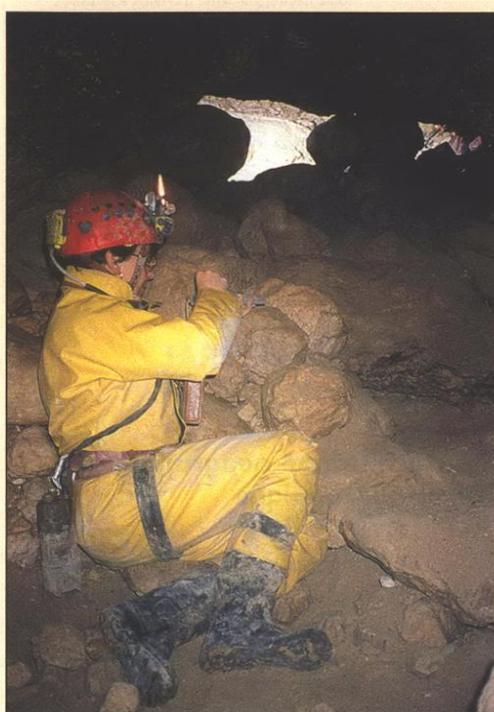


Photo 2 : Remplissage d'injections morainiques claires qui colmate pratiquement la galerie entre "la Plage" et "le Boulevard".
Infill of morainic injections which tend to fill the gallery between "la Plage" and "le Boulevard" areas.

seuls les glaciers locaux occupèrent cette région. Cependant, les limites géographiques et temporelles de la dernière glaciation sont encore mal connues et sujettes à discussions [Schlüchter, 1988 ; Blavoux, 1988 ; Mandier, 1988 ; Nicoud *et al.*, 1993 ; Campy, 1992 ; Magny, 1995 ; Chapron, 1999]. Dans la Cluse des Hôpitaux, les dépôts glaciaires accessibles sont rares en surface et souvent recouverts par des éboulis et des alluvions récentes. L'étude de la grotte sous les Sangles nous fournit des informations peu accessibles en surface.

Photo 3 : Relevé de coupe dans la partie basse du Boulevard. On distingue ici de bas en haut les unités I₁₋₂, I₂₋₃ et G₃ (figure 8). Outcrop of the bottom part of the Boulevard gallery. I₁₋₂, I₂₋₃ and G₃ (figure 8) stratigraphical units can be seen on this photo, from the bottom to the top.



Coupe développée schématique de la Grotte sous Les Sangles

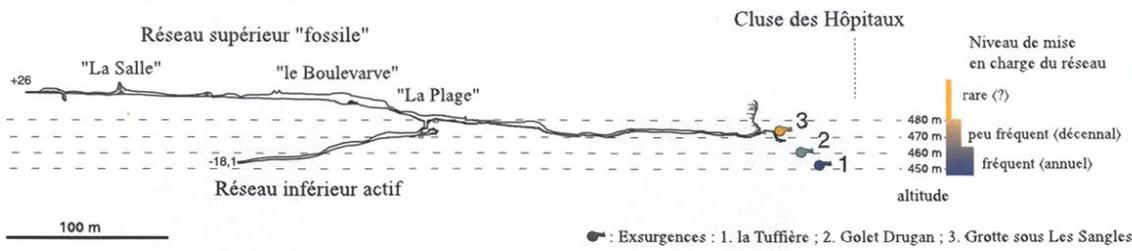


Figure 5 : Fonctionnement hydrologique du système karstique grotte sous les Sangles - La Tuffière - golet Drugan; fréquence et niveau de mise en charge (crue). *Hydrological activity of Sous les Sangles cave - La Tuffière spring - Golet Drugan Cave; flooding levels and frequencies.*

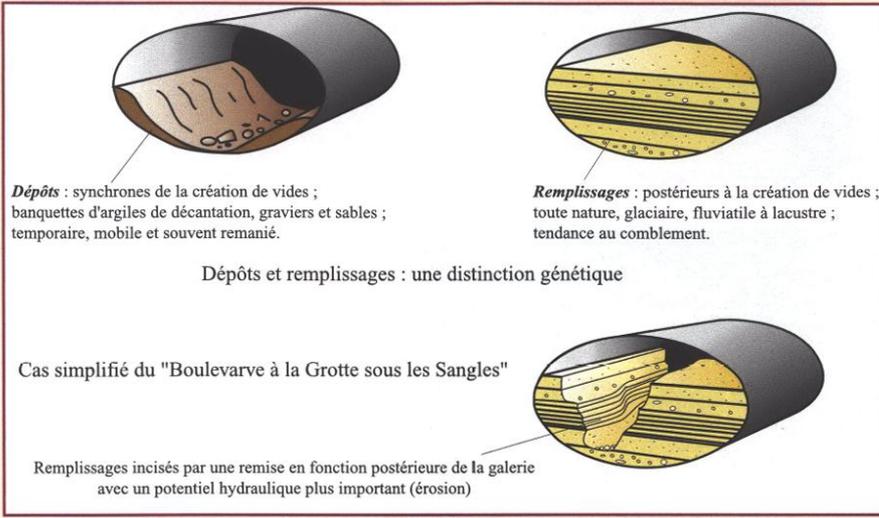


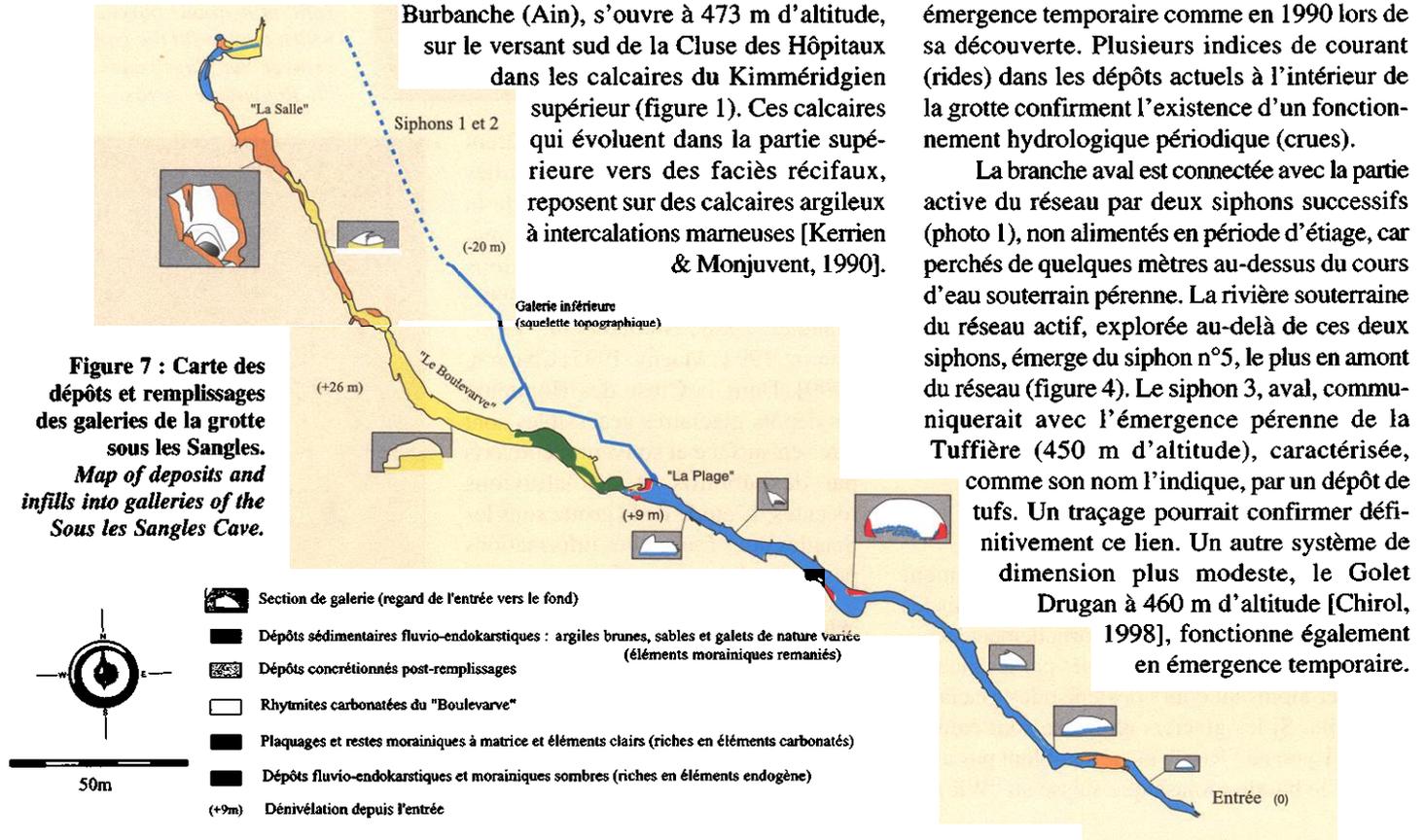
Figure 6 : Distinction génétique entre "dépôts" et "remplissages" endokarstiques, cas de la Galerie du Boulevard de la grotte sous les Sangles. *Genetic distinction between endokarstic "deposits" and "infills"; example of the Boulevard Gallery of the Sous les Sangles Cave.*

II. APERÇU GÉNÉRAL DE LA CAVITÉ

A. Localisation géographique et stratigraphique

La grotte sous les Sangles (x = 849,09; y = 99,5), située sur la commune de La Burbanche (Ain), s'ouvre à 473 m d'altitude, sur le versant sud de la Cluse des Hôpitaux dans les calcaires du Kimméridgien supérieur (figure 1). Ces calcaires qui évoluent dans la partie supérieure vers des faciès récifaux, reposent sur des calcaires argileux à intercalations marnieuses [Kerrien & Monjuvent, 1990].

Figure 7 : Carte des dépôts et remplissages des galeries de la grotte sous les Sangles. *Map of deposits and infills into galleries of the Sous les Sangles Cave.*



B. Développement des conduits endokarstiques

La cavité présente aujourd'hui près d'un kilomètre de développement, suivant principalement la direction nord-ouest (figure 3), pour un dénivelé total de 36 m.

Dans une première partie, de l'entrée jusqu'à "la Plage", la galerie remonte de près de dix mètres malgré quelques points bas.

Au carrefour de "la Plage", une branche amont continue de s'élever jusqu'au lieu-dit "le Boulevard", pour ensuite se développer quasiment à l'horizontale, au-delà de "la Salle", 26 m au-dessus du niveau de l'entrée; une branche amont descendante rejoint la partie active du réseau par des siphons (figure 3; photo 1).

C. Fonctionnement hydrologique actuel du système karstique sous les Sangles - Tuffière - Golet Drugan

La grotte sous les Sangles est aujourd'hui une grotte sèche la plupart du temps. Elle fonctionne, en période de crue exceptionnelle, en émergence temporaire comme en 1990 lors de sa découverte. Plusieurs indices de courant (rides) dans les dépôts actuels à l'intérieur de la grotte confirment l'existence d'un fonctionnement hydrologique périodique (crues).

La branche aval est connectée avec la partie active du réseau par deux siphons successifs (photo 1), non alimentés en période d'étiage, car perchés de quelques mètres au-dessus du cours d'eau souterrain pérenne. La rivière souterraine du réseau actif, explorée au-delà de ces deux siphons, émerge du siphon n°5, le plus en amont du réseau (figure 4). Le siphon 3, aval, communiquerait avec l'émergence pérenne de la Tuffière (450 m d'altitude), caractérisée, comme son nom l'indique, par un dépôt de tufs. Un traçage pourrait confirmer définitivement ce lien. Un autre système de dimension plus modeste, le Golet Drugan à 460 m d'altitude [Chirol, 1998], fonctionne également en émergence temporaire.

Figure 8 : Stratigraphie de la série sédimentaire de la galerie du Boulevardve.
Stratigraphy of the sedimentary infill of Boulevardve gallery.

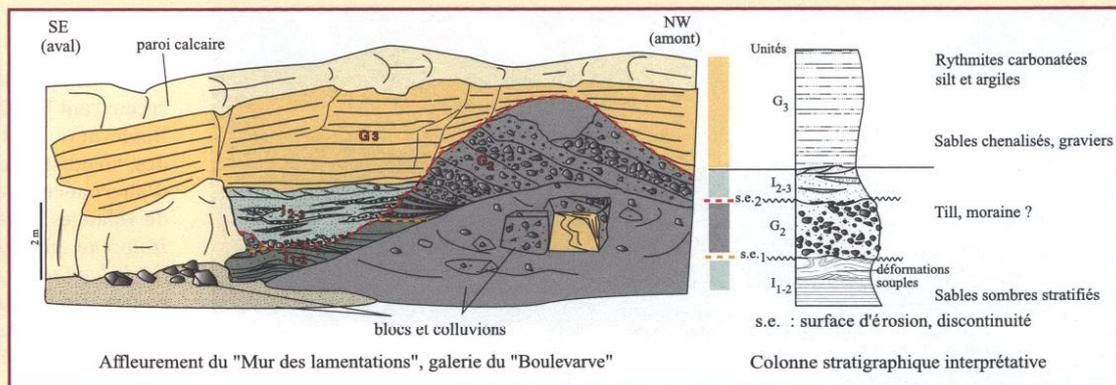
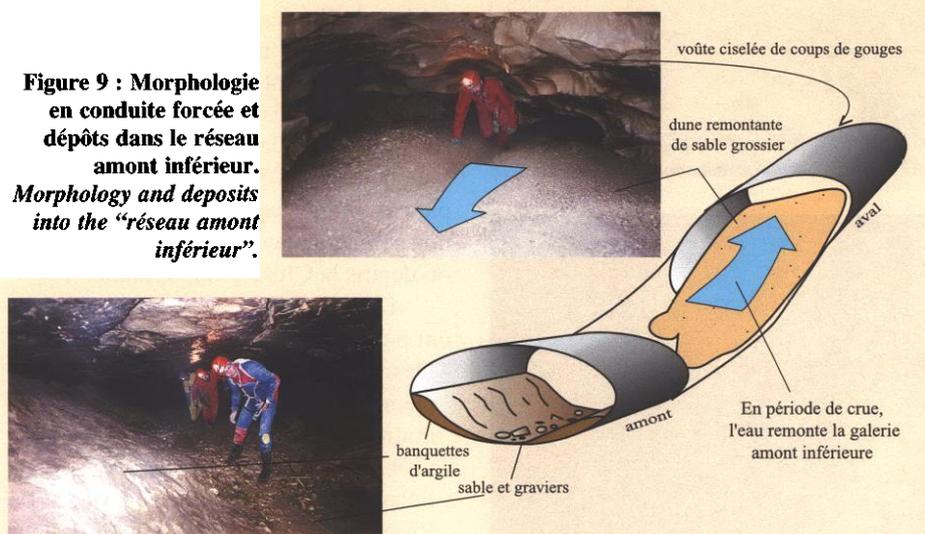


Figure 9 : Morphologie en conduite forcée et dépôts dans le réseau amont inférieur.
Morphology and deposits into the "réseau amont inférieur".



en relation avec les régimes hydrologiques est fondamentale à connaître si l'on veut comprendre le mode de mise en place des sédiments souterrains [Maire, 1990].

Hormis les dépôts clastiques d'origine mécanique dus à l'effondrement de fragments de paroi et de plafonds, les sédiments alluviaux ont principalement deux modes de mise en place :

- en écoulement libre et turbulent, la sédimentation s'effectue en fonction de la vitesse du courant et du débit ;
- en régime d'écoulement noyé lent, les conduits karstiques se comportent comme des pièges à sédiments fins.

La distinction entre dépôt et remplissage est liée à la dynamique karstique durant laquelle les sédiments sont mis en place. On parle de "dépôt" lorsque les sédiments sont contemporains de la création de ces vides, et plutôt de "remplissage", lorsqu'ils se mettent en place postérieurement [Delannoy, 1997] et tendent à combler ces vides (figure 6).

A ces apports, il faut adjoindre les sédiments transitant depuis la surface par les eaux d'infiltration.

Dans la grotte étudiée, on relève plusieurs types de remplissages selon leur nature (effondrement, alluvial, concrétion...) et leur origine (matériel autochtone jurassien, matériel alpin). Certains se sont mis en place durant les épisodes froids

Le 1^{er} octobre 1999, suite à de fortes précipitations, nous avons observé d'importants débits aux émergences de la Tuffière et du Golet Drugan, et une mise en charge d'une dizaine de mètres dans la galerie aval de la grotte sous les Sangles.

Ces trois cavités semblent donc appartenir à un même système karstique (figures 4 et 5). Le Golet Drugan et la grotte sous les Sangles fonctionnent en trop-plein de la rivière souterraine de la Tuffière. A l'étiage et en faible crue, seule la Tuffière fonctionne en émergence. En crues moyennes, l'engorgement de la Tuffière entraîne une remontée des eaux dans le système jusqu'au Golet Drugan (fréquence annuelle à pluri annuelle). En cas de fortes crues (fréquence décennale à pluri-décennale ; niveau de mise en charge > 20 m), la grotte sous les Sangles fonctionne temporairement en émergence. La galerie supérieure du "Boulevardve" considérée "fossile", n'a jamais été observée en crue. L'érosion d'une partie des remplissages et l'existence d'un puits à galets et graviers, tout en amont de cette galerie, témoigne de son rôle d'exutoire temporaire, au moins par le passé. Cette mise en charge de plus de 40 m doit être aujourd'hui exceptionnelle si on se réfère à l'état de conservation des remplissages du réseau amont supérieur.

III. DÉPÔTS ET REMPLISSAGES SÉDIMENTAIRES DE LA GROTTÉ SOUS LES SANGLES

A. Conditions hydrodynamiques de dépôts et remplissages

Contrairement aux conditions extérieures, dans le milieu souterrain, les contraintes géométriques exercées par la morphologie de la cavité conditionnent l'hydrodynamisme de dépôt (thèse en cours d'A.S. Perroux). Ces contraintes géométriques, conditionnent la nature et la répartition des sédiments endokarstiques. Cette notion de contrainte géométrique

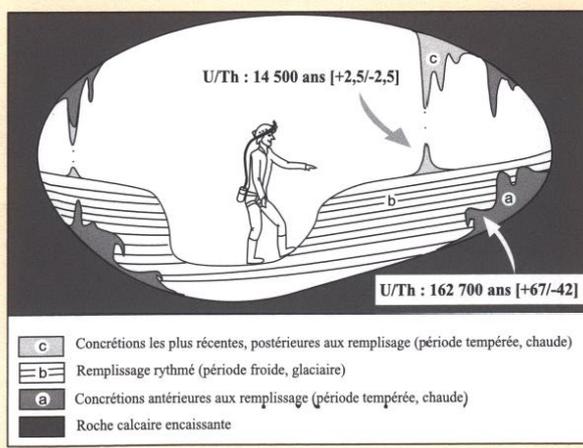


Figure 10 : Relations stratigraphiques entre les remplissages (rythmites) du Boulevardve et les différentes générations de spéléothèmes datés par U/Th.
Stratigraphic relations between the Boulevardve gallery finely laminated sediments and the speleothems dated by the U/Th method.



Photo 4 : Spéléothèmes holocènes recouvrant le toit des rythmites du Boulevardve. Cette surface présente des “dendritic surge marks” témoignant d’alternances d’ennioements et de vidanges lentes durant la sédimentation. *Holocene speleothems on the top of the finely laminated sediments of the Boulevardve gallery. Under, dendritic surge marks can be seen; they suggest periodical gentle flooding during sedimentation.*

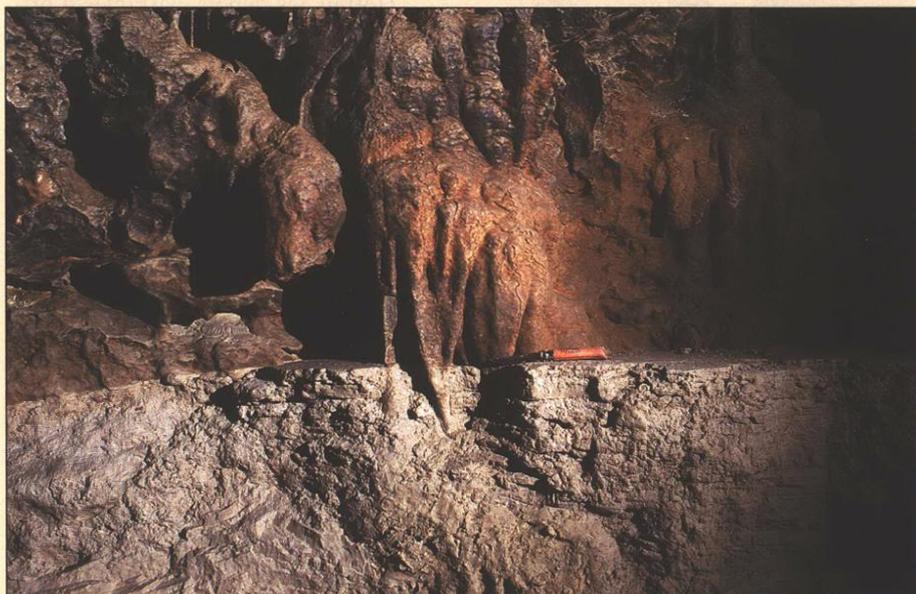


Photo 5 : Spéléothèmes d’une ancienne génération noyés dans les rythmites du Boulevardve. Ils attestent d’un fonctionnement polyphasé de la cavité. *Old speleothems sunk into finely laminated sediments of the Boulevardve gallery.*

quaternaires (remplissages glaciaires, fluvi-glaciaires et glacio-lacustres) alors que d’autres se sont déposés ultérieurement (remplissages carbonatés et remaniements d’anciens remplissages). Ces différents remplissages sont ici rapidement présentés avant d’étudier l’élément central de notre travail : l’étude du “Boulevardve” (figure 7).

B. Les remplissages glaciaires (injections)

Les remplissages d’origine glaciaire se limitent à quelques placages résiduels visibles en différents endroits de la galerie (figure 6). Ils correspondent à des graviers et des blocs peu émoussés, décimétriques, contenus dans une matrice de

sables, de limons (silts) et d’argile. Ces dépôts très mal triés [Sbaï *et al.*, 1995] s’apparenteraient à des moraines ou des coulées de débris provenant d’injections sous-glaciaires dans le karst [Ford, 1992; Saunderson, 1977]. La question soulevée par ces remplissages est le mode d’injection à l’intérieur du karst : depuis la surface ou depuis la Cluse des Hôpitaux ?

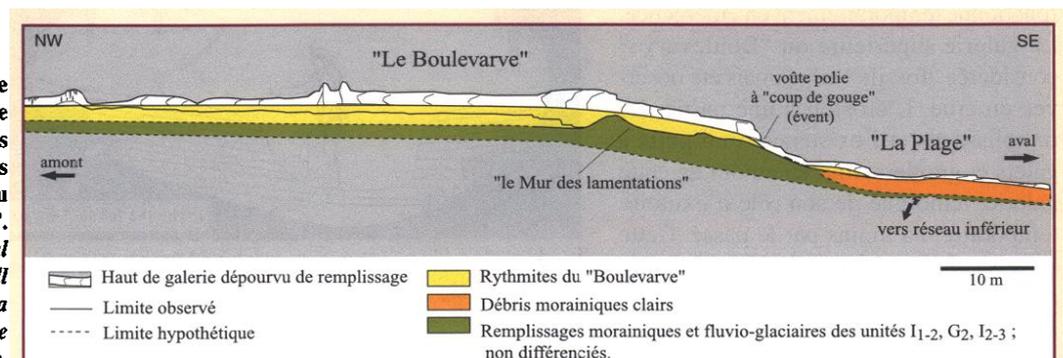
Deux familles de débris morainiques ont pu être distinguées :

- Des débris morainiques clairs : à éléments essentiellement calcaires, et à matrice carbonatée, claire ; ils sont visibles en aval du “Boulevardve” et dans l’élargissement de galerie en aval de “La Plage” (photo 2). Compte tenu de leur composition, des débris sont d’origine autochtone (Jura).
- Des débris morainiques sombres : à éléments mixtes, carbonatés et endogènes (granite, amphibolite, gneiss...), dans une matrice plus sombre (verdâtre), moins riche en carbonates, mais plus riche en minéraux sombres. Ils sont visibles dans la partie aval de la galerie du “Boulevardve”, entre les sables et les rythmites carbonatées. Ces débris sont d’origine allochtone : “protogyne” du Mont-Blanc et des massifs cristallins alpins.

C. Remplissages fluvi-glaciaires

Ils sont observables à la base de la série sédimentaire du “Boulevardve” (photo 3 et figure 8). Il s’agit de sables,

Figure 11 : Coupe morpho-stratigraphique des remplissages sédimentaires de la grotte sous les Sangles dans le secteur du “Boulevardve” et de “la Plage”. *Morphological and stratigraphical section across the sedimentary infill of the “Boulevardve” and the “la Plage” area into the Sous les Sangles Cave.*



graviers et galets de composition variée (endogène et carbonatée). Leur sédimentation stratifiée s'accompagne de chenaux dont l'emboîtement montre le caractère migratoire fréquent. Ces dépôts correspondent à un écoulement libre, suffisamment énergétique pour transporter de grosses particules (graviers et galets). L'absence d'inter-stratification de niveaux fins argileux, la présence de chenaux emboîtés, et la position stratigraphique de ces sédiments rappellent des dépôts de type fluvio-glaciaire ou pro-glaciaire. La forte teneur en carbonate (52 à 70 % de CaCO_3) argue également pour une origine glaciaire des eaux les ayant mis en place (farine glaciaire et écoulements peu agressifs) [Sbaï *et al.*, 1995].

D. Remplissages "glacio-lacustres" ?

La série sédimentaire du "Boulevard" présente plus de trois mètres d'alternances de lamines argileuses et silteuses (figure 8). Ces rythmites carbonatées s'apparentent au premier abord à des "varves" au sens glacio-lacustre [Sbaï *et al.*, 1995]. Mais l'étude de détail, présentée dans cet article, montre que ces rythmites n'ont pas de signification saisonnière semblable à celle des varves glacio-lacustres externes [Campy, 1982]; cela a déjà été constaté dans d'autres cavités alpines et pyrénéennes [Maire, 1990; Audra, 1994; Delannoy, 1997].

Les dépôts du "Boulevard", préservés en grande partie de la dynamique hydrologique actuelle de la cavité, constituent une véritable archive de l'histoire sédimentaire du site. Quelles ont été les conditions de dépôts de ces rythmites? Comment interpréter les déformations syndé debates observées dans les lamines ?

E. Les remaniements fluviaux

Les remplissages contemporains des glaciations quaternaires ont été dans certains secteurs conservés (Boulevard) et dans d'autres érodés et remaniés par les écoulements post-glaciaires et actuels (mise en charge et fonctionnement temporaire de la grotte).

1. De l'entrée à "la Plage"

Les dépôts détritiques présents dans cette partie de la grotte concernent toutes les classes granulométriques : des galets aux argiles. Compte tenu de l'activité très

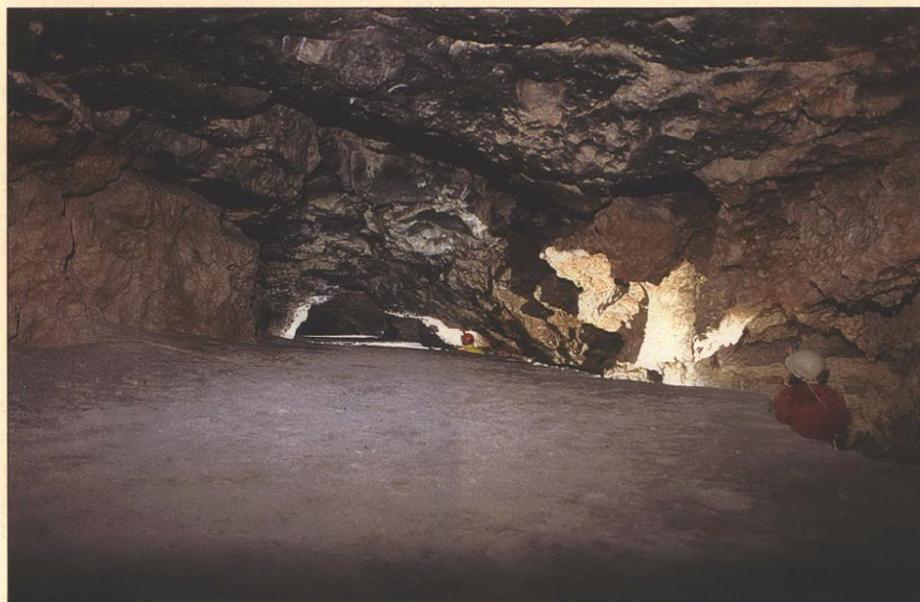


Photo 6 : La galerie du Boulevard est quasiment comblée par plus de trois mètres de rythmites. Un canyon naturel (à droite sur la photo) en offre une bonne coupe verticale.

The Boulevard gallery is partially full of more than three meters of finely laminated sediments. A natural canyon (on the right on this photo) give a good cross-section.

temporaire de la grotte, ces dépôts remanient d'anciens remplissages comme en témoigne leur diversité pétrographique (cristalline et carbonatée). Les sables et argiles sédimentent dans les parties les

plus basses alors que les galets se situent dans les secteurs de plus forte vélocité hydrologique, comme l'"entonnoir à galets". Les dépôts fins sont relativement peu carbonatés (43,54 % de CaCO_3)

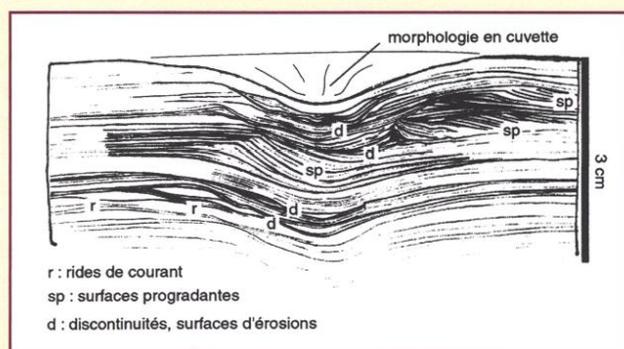


Figure 12 : Structure syndé debate d'impacts de gouttes dans les rythmites argilo-silteuses du Boulevard. *Synsedimentary structure of water drop on the argillaceous and silty finely layered sediment of the Boulevard gallery.*

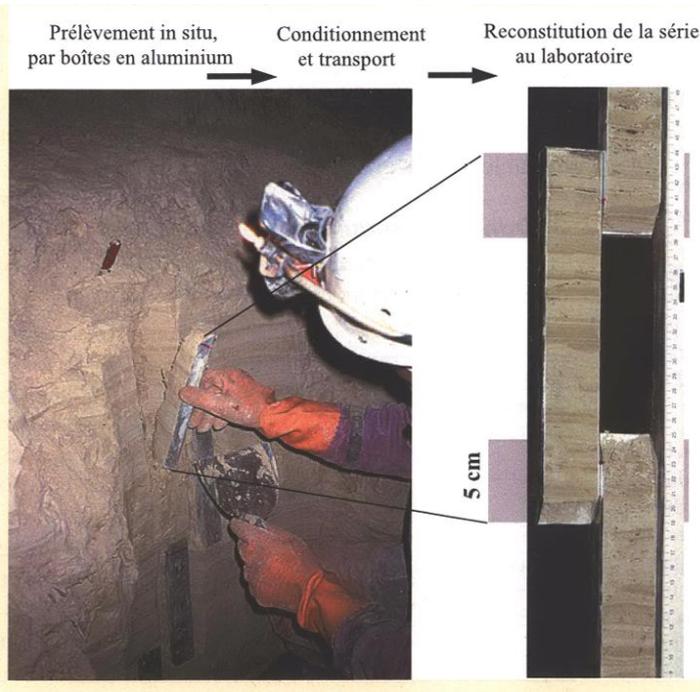


Figure 13 : Mode d'échantillonnage des rythmites du Boulevard. *Technique used for the Boulevard finely layered sediments sampling.*

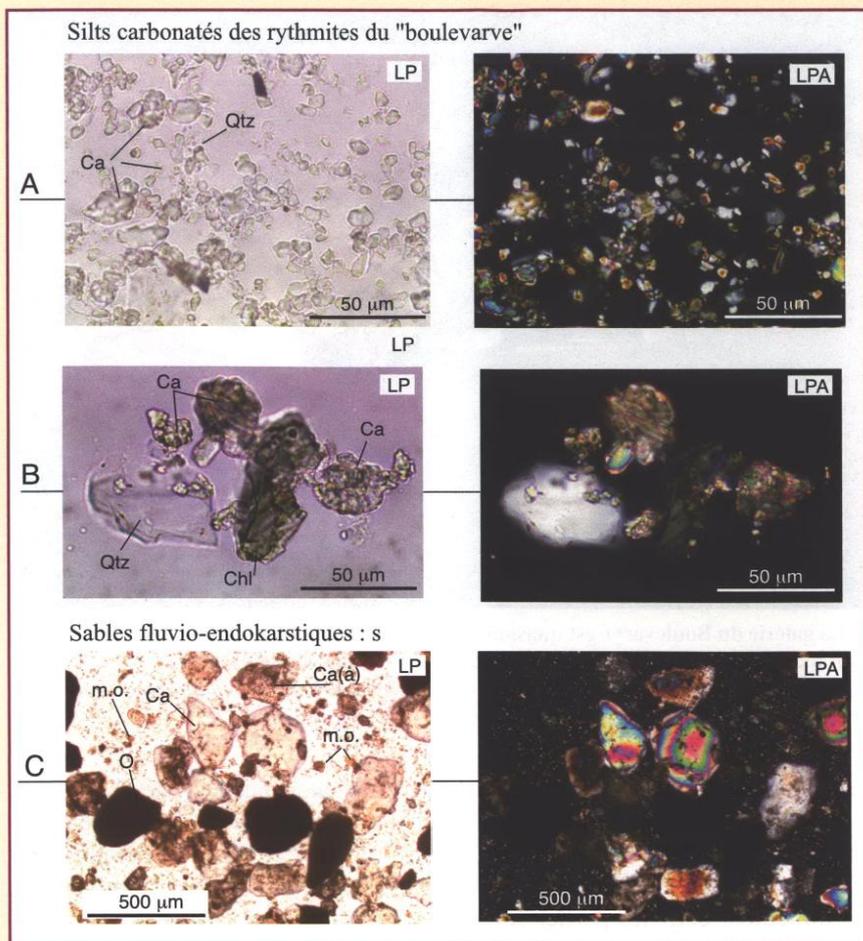


Figure 14 : Vue au microscope polarisant de frottis de sédiments de la grotte sous les Sangles. A : silts fins des rythmites du Boulevardve; B : silts grossiers des rythmites du Boulevardve; C : sables fluvio - endokarstiques prélevés dans la galerie aval entre l'entrée et "la Plage";

Ca = carbonates; Ca (a) = carbonates altérés; Qtz = Quartz; Ch = Chlorite; O = oxydes; m.o. = matière organique; LP : en lumière polarisée; LPA en lumière polarisée et analysée.

Views by polarising microscopy of sediments of Sous les Sangles Cave. A : fine silts of the Boulevardve finely laminated sediments; B : coarse silts of the Boulevardve finely laminated sediments; C : endokarstic fluvial sands from the gallery between the entrance and "la Plage".

Photo 7 : Ride asymétrique dans les rythmites indiquant un courant modéré de droite à gauche, c'est dire remontant la galerie.

This sedimentary structure of current indicates a gentle current from the left to the right, rising up the gallery.

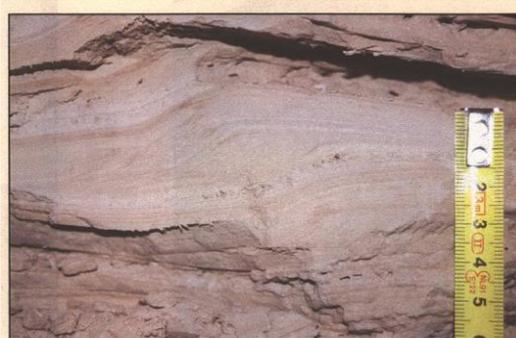
comparés aux autres sédiments de la cavité [Sbaï *et al.*, 1995]. Cela témoigne du remaniement de formations fluvio-glaciaires et glaciolacustres, décarbonatées par les eaux actuelles plus agressives, plus riches en CO₂.

2. Dans le réseau amont inférieur

C'est la partie la plus fréquemment noyée, comme en témoignent les niveaux de mise en charge (pellicule argileuse sur les parois). Dans les parties subhorizontales de la galerie, les principaux dépôts sont argileux, sous forme de banquettes latérales inclinées vers le centre du conduit (figure 9). Au niveau des élargissements, dans la partie remontante de plus forte pente, les dépôts sont essentiellement des dunes de sables et des graviers.

3. Dans le réseau amont supérieur

Cette partie du réseau présente des dépôts de galets, de graviers et de sables. Le "puits à



graviers", au-delà de "la Salle" (figure 3), montre un fonctionnement analogue, en miniature, de l'"entonnoir à galet" (à "la Plage") : il est le lieu d'émergence temporaire le plus en amont connu. Ces accumulations de graviers sont partiellement consolidées par un ciment carbonaté.

F. Dépôts d'effondrement

Ces remplissages répondent à une autre logique (détente mécanique, écroulement, séismes, rejeux tectoniques...) que les précédents. Ils sont particulièrement abondants en aval de "la Plage". De taille décimétrique à plurimétrique, ils proviennent d'effondrement de voûte, le plus souvent selon les strates et les plans de failles bien visibles dans cette partie de la galerie.

Sous l'"entonnoir à galet", observable depuis le réseau inférieur, des dalles et blocs calcaires plurimétriques forment une trémie, pénétrable sur quelques mètres de hauteur, qui témoignerait d'un effondrement majeur.

G. Les concrétions

Bien que périodiquement drainée par des écoulements, cette cavité possède un concrétionnement relativement abondant. Celui-ci est pour l'essentiel post-glaciaire ; on relève cependant quelques témoins d'anciennes phases de concrétionnement.

1. Un concrétionnement holocène

Il se présente sous forme de stalactites et stalagmites, mais aussi de planchers qui recouvrent en partie les sédiments sous-jacents. Les secteurs les plus concrétionnés sont la zone d'entrée, et "la salle" du réseau amont supérieur (figure 6). Dans la partie amont du "Boulevardve", des spéléothèmes recouvrent le toit des dépôts rythmés (photo 4) ; leur âge obtenu par U/Th atteste d'un début de croissance au Dryas Ancien (figure 10).

On relève que la plupart des concrétions s'initient sur des fractures correspondant à des failles inverses orientées N150 ; ceci est bien visible vers la zone d'entrée.

2. Une génération plus ancienne

Essentiellement visibles dans les parties hautes du "Boulevardve" et par endroits, fossilisées dans les rythmites (photo 5 et figure 10), ces concrétions de teinte plus foncée (patine d'oxydes) pourraient correspondre à l'Eémien.

A partir de ces différents types de remplissages, de leurs emboîtements et de l'étude détaillée de la formation rythmée du "Boulevardve", une reconstitution hydro-karstique de cette cavité peut être proposée durant et après les glaciations quaternaires.



Photo 8 : Le lac de Cerin. L'“œil” constitue la partie résiduelle du lac, dont la majeure partie du bassin (ocre clair) est aujourd'hui comblée par la tourbière. Un carottage à une dizaine de mètres de profondeur nous a permis d'accéder aux trois mètres de varves pléni-glaciaires qui reposent sur les moraines würmiennes (fig. 20).
The lake of Cerin. The “eye” correspond to the residual part of the lake which tend to be totally filled by the actual peat-bog activity. A ten meters deep core reached underlying sediments : three meters of varves which lie on würmian moraines.

IV. LES REMPLISSAGES RYTHMÉS DU “BOULEVARVE”

A. Stratigraphie des remplissages

Plusieurs affleurements, dans la cavité, permettent de voir les différents types de remplissages précédemment décrits. Leur relation stratigraphique est particulièrement perceptible sur le site dit “Mur des lamentations” (figure 8), en rive droite aval du “Boulevardve”.

Quatre unités successives peuvent être distinguées du bas vers le haut :

Unité I_{1-2} : elle est constituée de sables fins et moyens, sombres verdâtres, stratifiés et riches en quartz (25 % du volume) non usés (90 à 100 % du nombre) [Sbaï *et al.*, 1995]. Le toit de cette unité présente des déformations plastiques (plis, figures de charge, rampes chevauchantes ascendantes), semblables à des déformations de type glacio-tectonique [Brodzikowski & Van Loon, 1991] qui pourraient provenir de la mise en place de l'unité grossière sus-jacente.

Unité G_2 : elle repose en discontinuité sur l'unité I_{1-2} . Elle est composée d'éléments rocheux décimétriques à centimétriques, dans une matrice, très mal triée, constituée de sables, de limons et d'argile. Une stratification oblique d'environ 30° est perceptible grâce à des niveaux plus riches en blocs.

Unité I_{2-3} : elle repose en discontinuité, sur les deux unités précédentes. Elle est constituée de sables moyens à

grossiers, avec une stratification moins perceptible que dans l'unité I_{1-2} . Dans les niveaux sableux se développent des lentilles sablo-graveleuses, de taille métrique en largeur et décimétrique en hauteur. Ces lentilles témoignent d'anciens petits chenaux. Certaines lentilles semblent nourries latéralement par l'érosion des unités sous-jacentes, contre lesquelles elles se développent.

Unité G_3 : cette unité est la plus facilement observable car elle s'étend sur l'ensemble du “Boulevardve” (photo 6). Elle consiste en des alternances millimétriques à pluri-centimétriques de silts carbonatés et d'argiles claires. Ces rythmites présentent par endroit plus de trois mètres d'épaisseur et atteignent quasiment la voûte de la galerie dans les passages bas. Elles reposent sans discordance apparente sur l'unité I_{2-3} et nappent les surfaces d'érosion des autres unités sous-jacentes.

Les débris morainiques clairs (cf. § précédent) ne sont visibles qu'en aval du “Boulevardve”. Leur position

Photo 9 : Carotte de rythmites glacio-lacustres du lac de Cerin (figure 20).

On distingue nettement les couplets clairs et sombres qui correspondent à des varves s.s.
A core of glacio-lacustrine varves s.s. of lake of Cerin. Each lamina of varve doublet can be seen.

Photo 10 : Fracture dans la partie supérieure horizontale des rythmites du Boulevardve.
Fault in the upper horizontal part of the Boulevardve gallery finely laminated sediments.



Photo 11 : Dans la partie inférieure des rythmites, des structures synsédimentaires affectent les lamines en blocs basculés vers les bords de la galerie.

Synsedimentary tilted blocs structures appears in the bottom part of the finely laminated sediments near the border of the Boulevarve gallery.



Photo 12 : Dans la partie inférieure des rythmites, des structures synsédimentaires de raccourcissement par chevauchement de rampes affectent les lamines vers le centre de la galerie. Noter la remarquable similitude de géométrie de ces déformations avec celle des objets pluri-kilométriques de la figure 2.

Synsedimentary thin-skin tectonic structures appears in the bottom part of the finely laminated sediments near the centre of the Boulevarve gallery.

Notice the similarity of these shortening deformation structures with those of several kilometres scale objects of the figure 2.



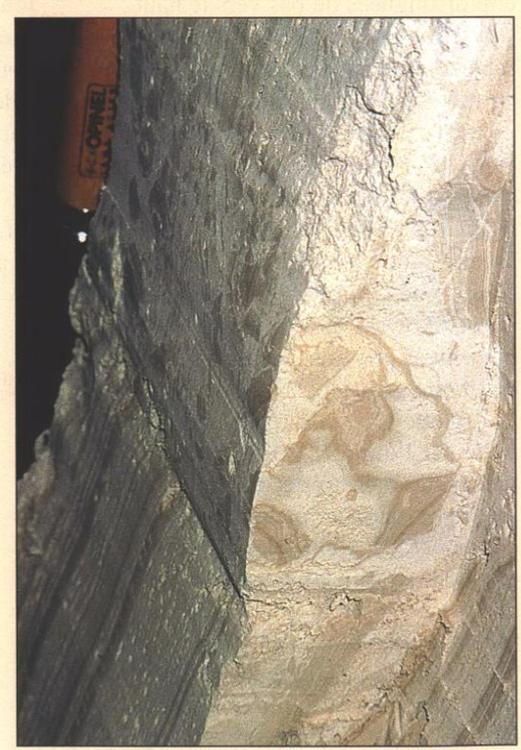
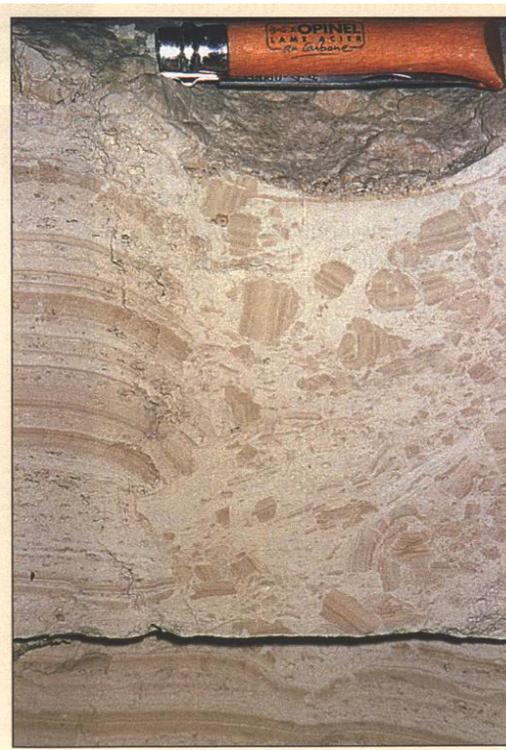
Photo 13 : A - "Volcan" de silts et de brèches de lamines, en coupe verticale; ces structures synsédimentaires d'expulsion de sédiment liquéfié affectent la partie supérieure horizontale des rythmites du Boulevarve.

Elles attestent de secousses brutales instantanées du sédiment.

B - Vue horizontale, par-dessous, de la cheminée du "volcan" de sédiment; elle se développe le long d'une fracture verticale (photo 10).

A - Silty breccia volcano; vertical section. These synsedimentary structures indicate a sediment liquefaction phenomenon in the upper horizontal part of the finely laminated sediment of the Boulevarve gallery. It corresponds to a strong sediments shaking.

B - Horizontal view of the sediment volcano pipe which occurs along a vertical fracture (photo 10).



stratigraphique et leur nature essentiellement carbonatée, similaires à celles de rythmites nous incitent à les relier à un "seul" et "même" épisode glaciaire. Ils correspondraient à une variation de faciès (faciès plus proximal) de l'unité G₃, dont l'origine des matériaux est essentiellement locale (calcaires du Jura).

B. Analyse morphologique et conditions de mise en place des rythmites

Le toit de cette formation rythmée présente une pente longitudinale proche de l'horizontale dans la partie amont du "Boulevarve" (figure 11 et photo 6). En revanche, vers l'aval de la galerie, la surface des rythmites s'incline progressivement jusqu'à une pente proche de 20°, rejoignant l'ouverture réduite de la galerie en direction de "la Plage". Ce rétrécissement du volume de la galerie est en partie dû à l'abaissement de la voûte et aux remplissages. La voûte présente à cet endroit une surface particulièrement polie, avec des formes de "coups de gouges" décimétriques, caractérisant une

fonction d'évent de ce passage (une voûte de morphologie semblable est toujours fonctionnelle dans le réseau inférieur, figure 9). La disposition des rythmites et la direction indiquée par la morphologie de la voûte impliqueraient un écoulement remontant de l'aval vers l'amont, lors de la mise en place de ces dépôts.

A "la Plage", les débris morainiques clairs se réduisent à des placages latéraux. Les méandres de voûte teintés par des patines d'oxydes indiquent que les remplissages ont atteint le plafond, ne laissant au passage de l'eau que quelques espaces en chenaux.

Lors du dépôt de l'unité G₃, les eaux, circulant d'aval en amont, passaient donc des volumes restreints des chenaux de voûte de "la Plage" (de section de 1 à 2 m de large) aux volumes beaucoup plus importants du "Boulevard" (plus de 10 m de haut par endroit et 4 à 5 m de large). Ainsi, lors de la mise en place des rythmites, l'eau remontant la galerie devait subir une brusque chute de courant imposée, à débit constant, par l'élargissement morphologique du conduit au niveau du "Boulevard".

Les remplissages (injection de débris sous-glaciaires) et la morphologie des conduits semblent donc ici responsables des variations hydrodynamiques endokarstiques à l'origine du dépôt des rythmites dans la galerie du "Boulevard".

C. Structures synsédimentaires de dépôt

1. Indications de courant

Dans l'unité G₃, vers le toit des rythmites, observables dans la partie amont du "Boulevard" où le volume de la galerie s'amointrit, plusieurs rides décimétriques progradantes indiquent un courant remontant de l'aval vers l'amont, en cohérence avec les données morphologiques du toit du remplissage (photo 7).

Par contre, à la base de cette unité, dans les graviers et galets de l'unité I₂₋₃, l'inclinaison des galets semble indiquer un écoulement de l'amont vers l'aval. Une étude statistique serait nécessaire pour confirmer cette observation. Les rides de courant observées dans les dépôts de sables fluvio-endokarstiques, indiquent également un fonctionnement dans ce sens.

La cavité semble donc fonctionner par écoulements opposés selon les périodes.

2. Indications de fonctionnement vadose

De petites structures particulières ont retenu notre attention dans l'observation de profil des rythmites de la partie amont du "Boulevard". Il s'agit de petits creux coniques de 2 cm de large pour 1 cm de profondeur. Ces formes qui creusent et aplatissent légèrement les lamines à leur apex, sont souvent comblées par des lamines inclinées progradantes de silt (figure 12). Elles se retrouvent le plus souvent sur une même verticale dans la stratification. Observées en trois dimensions, elles sont comparables aux impacts de gouttes sur les argiles et limons actuels.

Ces impacts de gouttes témoignent d'assèchements consécutifs aux ennoissements périodiques de la cavité durant cet épisode de sédimentation.

Dans la petite salle en amont du "Boulevard", la partie observable des rythmites présente des cannelures dendritiques (ou dendritic surge marks). Ces structures synsédimentaires indiquent des phases périodiques de vidanges lentes [Bini *et al.*, 1998] (photo 4).

3. Conséquences de ces observations sur la modalité de dépôt du "Boulevard"

Il semble que le dépôt des rythmites du "Boulevard" ait eu lieu par une succession d'ennoiements et de vidanges lentes de la galerie souterraine. Contrairement aux varves dans un contexte lacustre, la surface des rythmites devait s'assécher périodiquement. Il est alors compréhensible de ne pas retrouver la dualité régulière des varves. Dans un lac qui ne s'assèche pas, la période hivernale est marquée par une stagnation des eaux et la décantation d'une lamine argileuse : on distingue dans ce cas une double lamine annuelle sablo-argileuse. Dans le cas des rythmites du "Boulevard", les assèchements périodiques de la cavité, entraînent des lacunes de sédimentation ; c'est pour cela que les rythmites ne peuvent correspondre à des varves au sens strict. De ce fait, ce signal sédimentaire ne peut pas être directement utilisable par une interprétation annuelle des doublets silto-argileux. Pour comprendre l'évolution temporelle de cette sédimentation rythmée, une étude plus détaillée du sédiment et du signal sédimentaire a été réalisée.

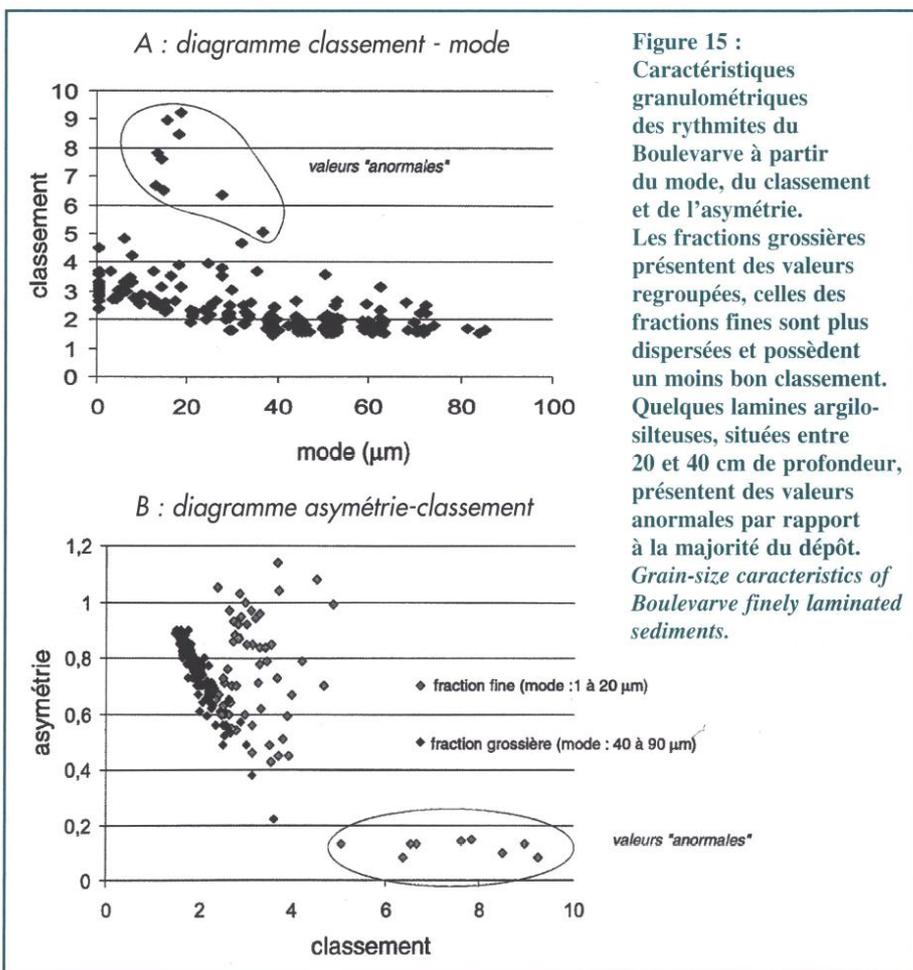


Figure 15 : Caractéristiques granulométriques des rythmites du Boulevard à partir du mode, du classement et de l'asymétrie. Les fractions grossières présentent des valeurs regroupées, celles des fractions fines sont plus dispersées et possèdent un moins bon classement. Quelques lamines argilo-silteuses, situées entre 20 et 40 cm de profondeur, présentent des valeurs anormales par rapport à la majorité du dépôt. *Grain-size characteristics of Boulevard finely laminated sediments.*

Minéralogies des argiles	Illite	Chlorite	Smectite [Is/10-14s]	Kaolinite
Rythmites du "Boulevard" grotte sous les Sangles	34 à 40%	28 à 30%	24 à 28%	12 à 14%
Varves glacio-lacustres du lac de Cerin	36 à 46%	21 à 25%	17 à 33%	10 à 12%

Tableau 1 : Composition minéralogique des argiles des rythmites du Boulevard de la grotte sous les Sangles et du lac de Cerin.

Mineralogical composition of the clays of the finely laminated sediments of the Boulevard gallery; Sous les Sangles Cave and Cerin lake.

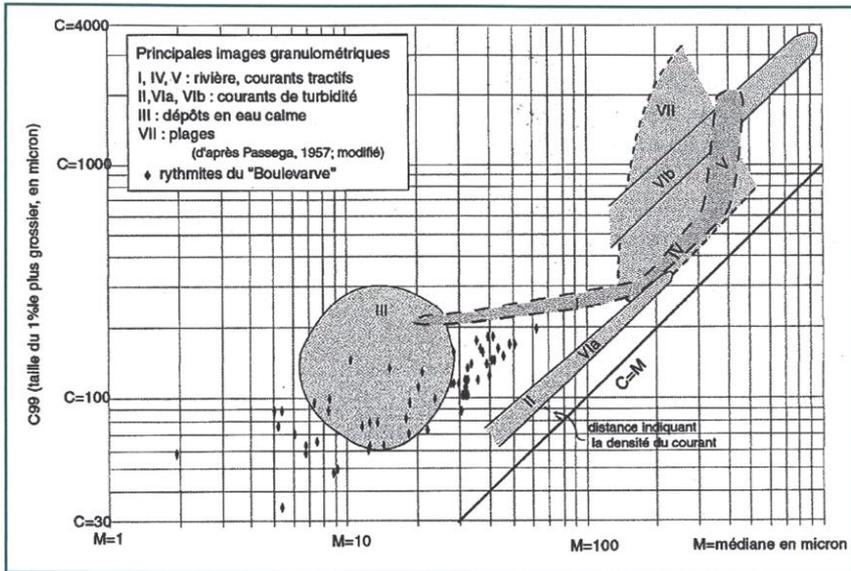
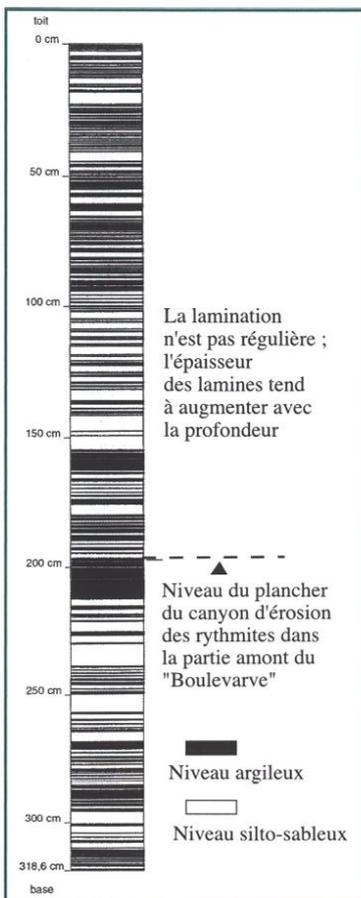


Figure 16 : Position des rythmites du Boulevard sur la représentation CM selon Passega [1957]. Position of the finely laminated sediments of the Boulevard gallery on a CM graphic, according to Passega [1957].



D. Méthode d'échantillonnage

Etat donné que les sédiments fins des rythmites sont très friables et très fragiles, un carottage vertical était peu approprié pour le prélèvement de ces sédiments et leur analyse en laboratoire. C'est pourquoi nous avons échantillonné les rythmites dans la coupe naturelle du canyon d'érosion à l'aide de boîtes parallélépipédiques (2 x 4 x 20 cm). Enfoncées horizontalement, ces boîtes ont été dégagées délicatement à la spatule. L'échantillonnage est effectué avec un pas de recouvrement de 5 cm permettant la corrélation des boîtes (figure 13). Celles-ci sont ensuite soigneusement emballées pour leur transport jusqu'au laboratoire où leur contenu est analysé.

Figure 17 : Stratigraphie schématique des rythmites du Boulevard [d'après Gerbaud, 1999]. Simplified stratigraphy of the finely laminated sediments of the Boulevard gallery [from Gerbaud, 1999].

E. Caractérisation minéralogique et texturale : origine et conditions de dépôt

L'observation des rythmites du "Boulevard" indique qu'elles sont constituées d'une succession de lamines pluricentimétriques à inframillimétriques. Les lamines claires sont les plus grossières (silts) et les plus sombres correspondent aux lamines argileuses. L'observation au frottis, les analyses calcimétriques et granulométriques permettent de sortir un certain nombre de données sur leur mise en place et le contexte environnemental.

1. L'observation de frottis (figure 14)

Cette observation indique que les silts sont essentiellement constitués de grains de carbonates et de quartz. Quelques minéraux métamorphiques comme le chlorite y sont parfois visibles.

Par comparaison aux sables actuels déposés dans la partie aval du réseau, les silts des rythmites présentent des grains moins émoussés, une grande abondance de carbonates peu altérés. On ne note pas de présence d'oxydes ni de matière organique. Ces grains ont donc été transportés dans des eaux moins agressives (moins riches en CO₂) qu'à l'actuel. Leur faible émoussé indique qu'ils ont été transportés par les eaux sur une faible distance. Leur similitude aux "farines glaciaires" confirme leur probable origine glaciaire locale.

2. L'analyse calcimétrique

Réalisée par la méthode du calcimètre Bernard, elle montre des valeurs comprises entre 65 et 76 % (de la masse totale) dans la première moitié inférieure du remplissage, puis de 58 à 65 % dans la moitié supérieure [Gerbaud, 1999; Sbaï *et al.*, 1995]. Ces analyses, avec les observations de frottis, confirment une probable origine glaciaire des eaux ayant apporté les particules qui composent les rythmites.

3. L'analyse des minéraux argileux

Elle a été réalisée par diffraction X en collaboration avec P. Recourt du L.S.G. de l'Université de Lille-I. Elle indique un cortège argileux dominé par l'illite et le chlorite, mais possédant de la smectite et de la kaolinite.

L'abondance d'illite et de chlorite peut être attribuée à une provenance des Alpes internes des matériaux, mais aussi à un contexte climatique de type glaciaire (climat froid, hydrolyse peu poussée). La fraction de kaolinite, apporte la signature locale d'une partie des matériaux, provenant des résidus de dissolution des carbonates du substratum (Jurassique inf. et Crétacé sup.).

4. L'analyse granulométrique

Une analyse fine a été réalisée tout au long de la série, à partir des boîtes échantillonnées et d'un granulomètre laser MALVERN™. Seules les lamines supérieures à 2 mm ont pu être échantillonnées correctement. L'analyse a porté sur des couples de lamines claires et sombres successives [Gerbaud, 1999].

Les lamines les plus grossières présentent un mode compris entre 40 et 80 µm et un bon classement, tandis que les lamines les plus sombres, de texture plus fine, présentent un mode de 1 à 40 µm, un classement moins bon et plus variable.

Les différences de texture entre ces deux populations de grains ressortent également bien dans la relation asymétrie-classement (figure 15). Entre 20 et 40 cm de profondeur (depuis le toit du dépôt), plusieurs niveaux fins et sombres présentent des valeurs anormales avec un très mauvais classement et une forte asymétrie vers particules grossières.

Sur un diagramme de type Passega (figure 16), les fractions grossières se situent entre le domaine des courants tractifs et des courants turbides, tandis que les fractions fines correspondent à des dépôts en eau calme, avec des valeurs plus dispersées.

D'après l'analyse granulométrique, les dépôts rythmés correspondent donc à des alternances de courants lents (de l'ordre de 10^{-3} m.s⁻¹ d'après le diagramme de Hulström) et d'eau stagnante sujette à décantation

L'échantillonnage granulométrique n'a pas été réalisé à pas constant, les lamines les plus fines n'ayant pas pu être échantillonnées, en raison de leur trop faible épaisseur. Devant la difficulté d'analyser ces différentes lamines, notamment les plus fines, nous avons procédé à un autre type d'analyse : l'analyse du signal sédimentaire en niveau de gris.

V. SIGNAL SÉDIMENTAIRE DES RYTHMITES DE LA GROTTÉ SOUS LES SANGLES ; COMPARAISON AVEC LE REMPLISSAGE GLACIO-LACUSTRE DE CERIN

A. Cas des rythmites du "Boulevard"

1. Apparence visuelle de la rythmicité de la lamination

Si l'alternance de lamines sombres et claires qui marquent la rythmicité du dépôt est bien visible, la régularité des doublets l'est beaucoup moins. La succession et l'épaisseur des lamines sont relativement irrégulières, surtout à la base du dépôt. Néanmoins, sur l'ensemble de la série, la lamination s'affine vers le haut de la séquence (figure 17).

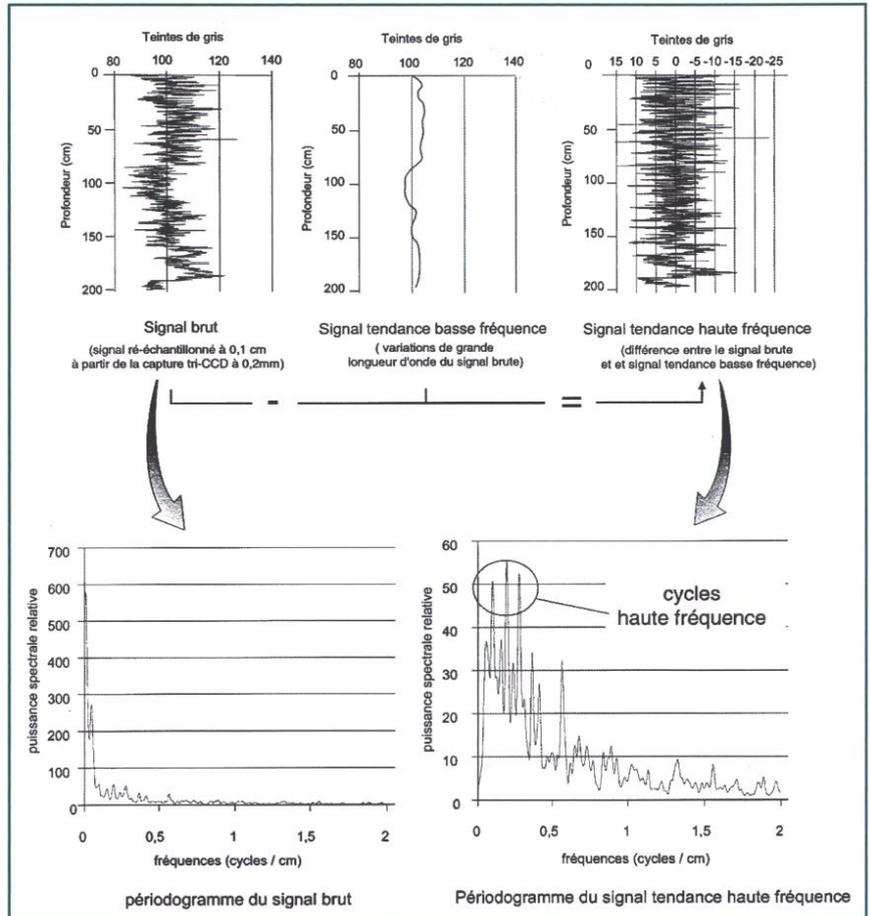


Figure 18 : Analyse spectrale du signal sédimentaire codé en niveau de gris, des rythmites du Boulevard. Spectral analysis of the sedimentary grey levels signal; finely laminated sediment of Boulevard gallery.

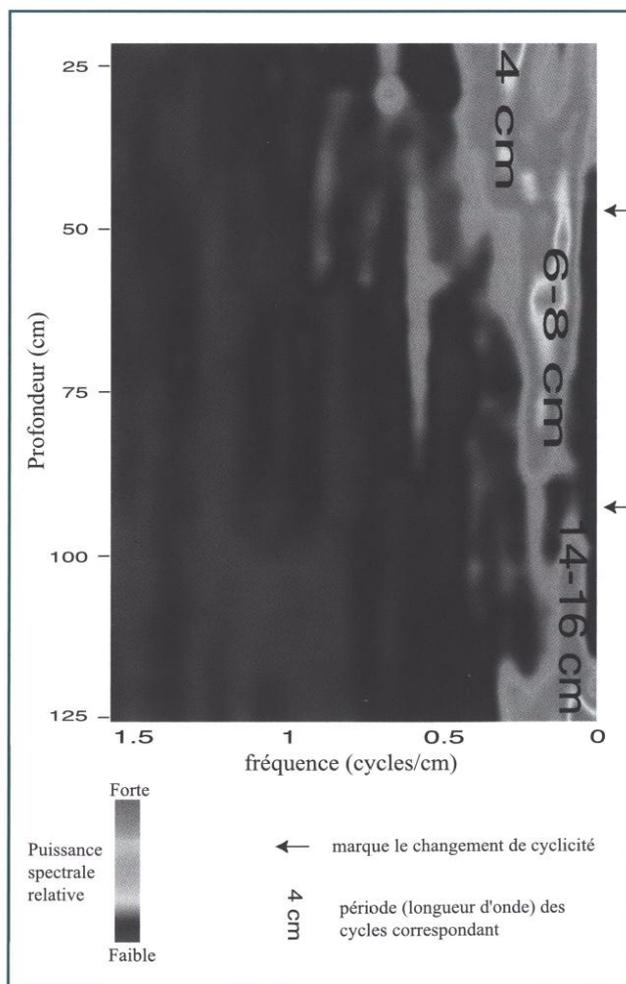
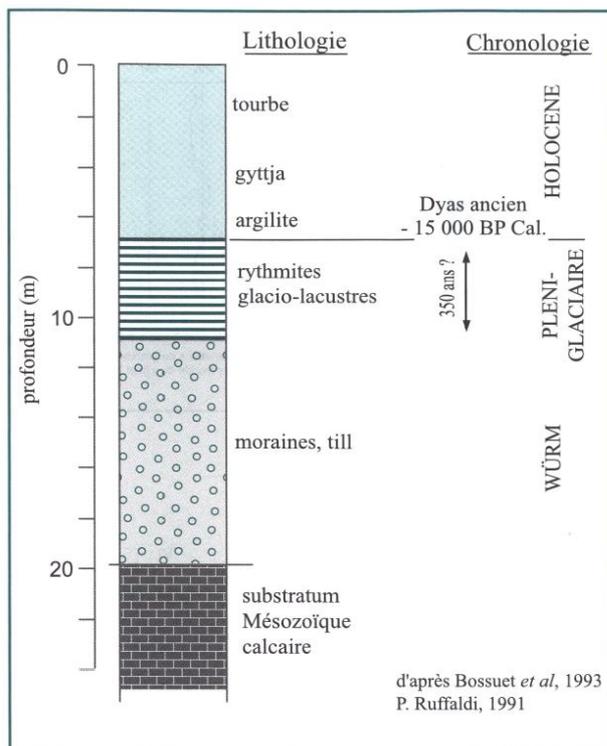


Figure 19 : Carte de périodogrammes du signal sédimentaire codé en niveaux de gris des rythmites du Boulevard. Pass-band mapping of grey levels signal of the finely laminated sediments of the Boulevard gallery.

Figure 20 : Stratigraphie du remplissage de la cuvette glaciaire et lacustre de la tourbière de Cerin. *The infill stratigraphy of glacial and lacustrine of the peat-bog of Cerin depression.*



2. Méthode d'échantillonnage et d'analyse d'image

A partir des échantillons prélevés, des images ont été prises à l'aide d'une caméra tri-CCD. La capture a été réalisée avec une résolution de 0,2 mm (pixel). Ces images ont ensuite été codées en niveaux de gris. Des profils réalisés sur ces images ont permis d'obtenir un signal

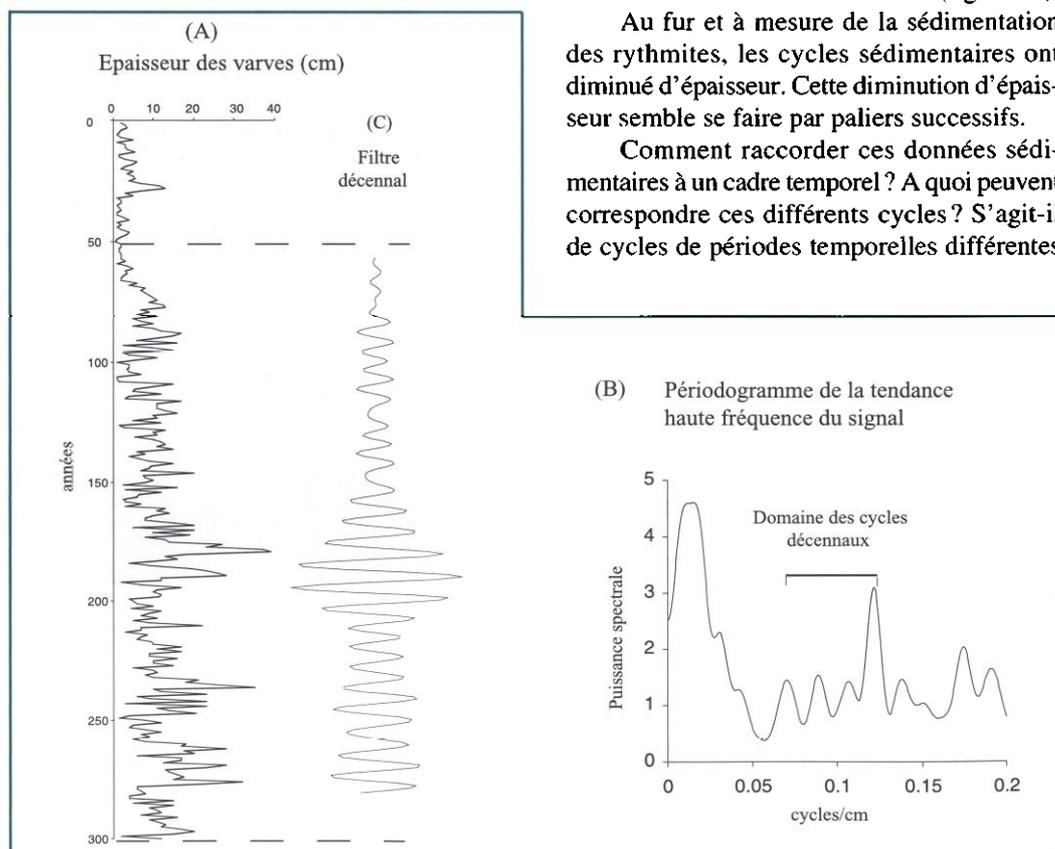
Figure 21 : Analyse spectrale du signal sédimentaire des varves pléniglaciaires du lac de Cerin [d'après Gauthier, 1998; Lignier et al., 1999]

(A) : Le signal initial est obtenu par la mesure des épaisseurs de varves. (B) : La méthode de Blackmann-Tuckey permet d'obtenir un périodogramme à partir de la tendance haute fréquence du signal.

(C) : Un filtre gaussien, centré sur la période décennale, est appliqué au signal haute fréquence; il montre l'expression particulière des cycles décennaux entre les varves 50 et 300.

Spectral analysis of the pleniglacial varves of the Cerin lake [from Gauthier, 1998; Lignier et al., 1999].

(A) : varves thickness signal. (B) : spectral power versus cycles frequency representation of the high frequency part of the signal. (C) : decadal gaussian filter on high frequencies part of the signal.



continu de la lamination en valeur de niveaux de gris. Les deux mètres supérieurs du dépôt ont ainsi pu être traités.

3. Analyse spectrale du signal sédimentaire (figure 18)

L'analyse spectrale du signal sédimentaire, selon la méthode de Blackman-Tuckey [Desmet, 1995], permet d'établir un périodogramme déterminant la fréquence de cycles éventuels dominant le signal sédimentaire. Le périodogramme réalisé à partir du signal brut n'a pas permis de mettre en avant une cyclicité dominante (figure 18). Afin de limiter l'influence des variations de basse fréquence du signal, celle-ci a été soustraite au signal brut. On obtient ainsi une tendance haute fréquence du signal sédimentaire.

Le périodogramme, réalisé sur ce signal des hautes fréquences, révèle une dominance de certaines hautes fréquences. Trois cyclicités de puissance spectrale semblable dominent le signal sédimentaire à 4 cm, 7 cm et 15 cm. Afin de localiser la dominance de ces cycles dans la séquence sédimentaire, une carte de périodogramme [pass-band mapping] du signal a été établie par la méthode des fenêtres glissantes. Des fenêtres de 40 cm de longueur ont été analysées avec un pas de glissement de 4 cm.

La carte obtenue à partir des deux mètres supérieurs du signal sédimentaire, montre l'existence de trois cycles dominants dans un ordre décroissant de période (14-16 cm, 6-8 cm, 4 cm), en direction du sommet de la série (figure 19).

Au fur et à mesure de la sédimentation des rythmites, les cycles sédimentaires ont diminué d'épaisseur. Cette diminution d'épaisseur semble se faire par paliers successifs.

Comment raccorder ces données sédimentaires à un cadre temporel? A quoi peuvent correspondre ces différents cycles? S'agit-il de cycles de périodes temporelles différentes

ou de variations de taux de sédimentation d'un même cycle temporel ? Pour pouvoir répondre à ces questionnements, nous avons comparé les rythmites de la grotte aux sédiments varvés du Lac de Cérin situé à la surface du plateau d'Innimond-Ordonnaz.

B. Le cas des "varves vraies" du lac de Cérin

1. Situation et caractéristiques du lac de Cérin

Le lac de Cérin (photo 8) se développe à 764 m d'altitude, à une dizaine de kilomètres au sud-est de la grotte sous les Sangles (figure 1).

Cette cuvette lacustre isolée est alimentée surtout par les écoulements superficiels d'un bassin d'alimentation réduit. Logée au cœur d'une structure synclinale formée de calcaires du Jurassique supérieur, elle a commencé à se combler dès le retrait des derniers glaciers würmiens. Elle présente aujourd'hui une séquence stratigraphique typique des remplissages tardiglaciaires holocènes des lacs jurassiens [Campy & Richard, 1988] : une sédimentation détritique à la base (moraines, silt & argiles), puis

biochimique (craies lacustres), et enfin organique au sommet (tourbes et gyttja) (figure 20). Aujourd'hui, ce lac correspond à une tourbière.

Les moraines à la base de la série sont composées en grande partie d'éléments locaux (calcaires jurassiques) avec une faible proportion de roches cristallines alpines [Kerrien *et al.*, 1990]. Les rythmites qui les recouvrent comportent de nombreuses similitudes avec les rythmites endokarstiques de la grotte sous les Sangles ; elles constituent donc un intéressant élément de comparaison avec ces dernières.

Plusieurs études, notamment palynologiques, ont été réalisées sur la partie holocène du remplissage du lac de Cérin [Bossuet *et al.*, 1993 ; Bossuet *et al.*, 1996 ; Ruffaldi, 1991 ; Ruffaldi, 1993]. Celles-ci ont permis de dater le toit des rythmites à environ 15 000 BP. Cal.

Afin de préciser les modalités de formations des rythmites, deux carottages ont été réalisés en 1997 ; l'un a pu être étudié plus en détail (photo 9).

2. Les rythmites carbonatées du lac de Cérin

Ces rythmites plus ou moins complexes présentent également une variation d'épaisseur de lamines. A la différence des rythmites endokarstiques de la grotte sous les Sangles, les rythmites de Cérin présentent toujours des doublets de lamines de silt et d'argile bien distincts. Elles correspondent à des varves annuelles au sens glacio-lacustre [Campy, 1982 ; Buonchristiani, 1997]. Ces varves possèdent toujours une base claire de texture grossière, surmontée d'une lamine argileuse sombre dont la transition avec la lamine claire supérieure est très nette.

Les caractéristiques granulométriques des varves de Cérin sont très proches de celles des rythmites de la grotte sous les Sangles : les lamines claires sont composées à plus de 70 % (volume) de silts pour 30 % d'argile, tandis que les lamines sombres sont composées de 90 % d'argiles et 10 % de silt [Gauthier, 1998]. Les relations entre la couleur et les caractéristiques granulométriques des lamines sont donc similaires dans les deux cas.

Les analyses calcimétriques (méthode du calcimètre Bernard) donnent 50 à 60 % (de la masse totale) de carbonates pour les lamines argileuses et 64 à 70 % pour les lamines silteuses.

Les cortèges argileux sont également similaires (tableau 1).

3. L'analyse du signal sédimentaire par comptage de varves, analyse d'image et traitement du signal :

Comme pour les rythmites du "Boulevard" (grotte sous les Sangles), la nature du matériel reste homogène sur l'ensemble du dépôt. La variation de granulométrie se traduit par des lamines claires, de texture silteuse, et des lamines sombres de texture argileuse. Leur disposition régulière en doublets a permis leur comptage en tant que varves. S. Gauthier [1998] a pu ainsi en compter 344 sur l'ensemble du dépôt rythmé, ce qui correspondrait à 344 ans. L'étude de l'épaisseur des varves montre des doublets plus épais à la base du dépôt. Comme pour les rythmites de la grotte sous les Sangles, l'épaisseur des lamines diminue vers le toit de la séquence rythmée. A Cérin, la base de la séquence compte 30 varves par mètre

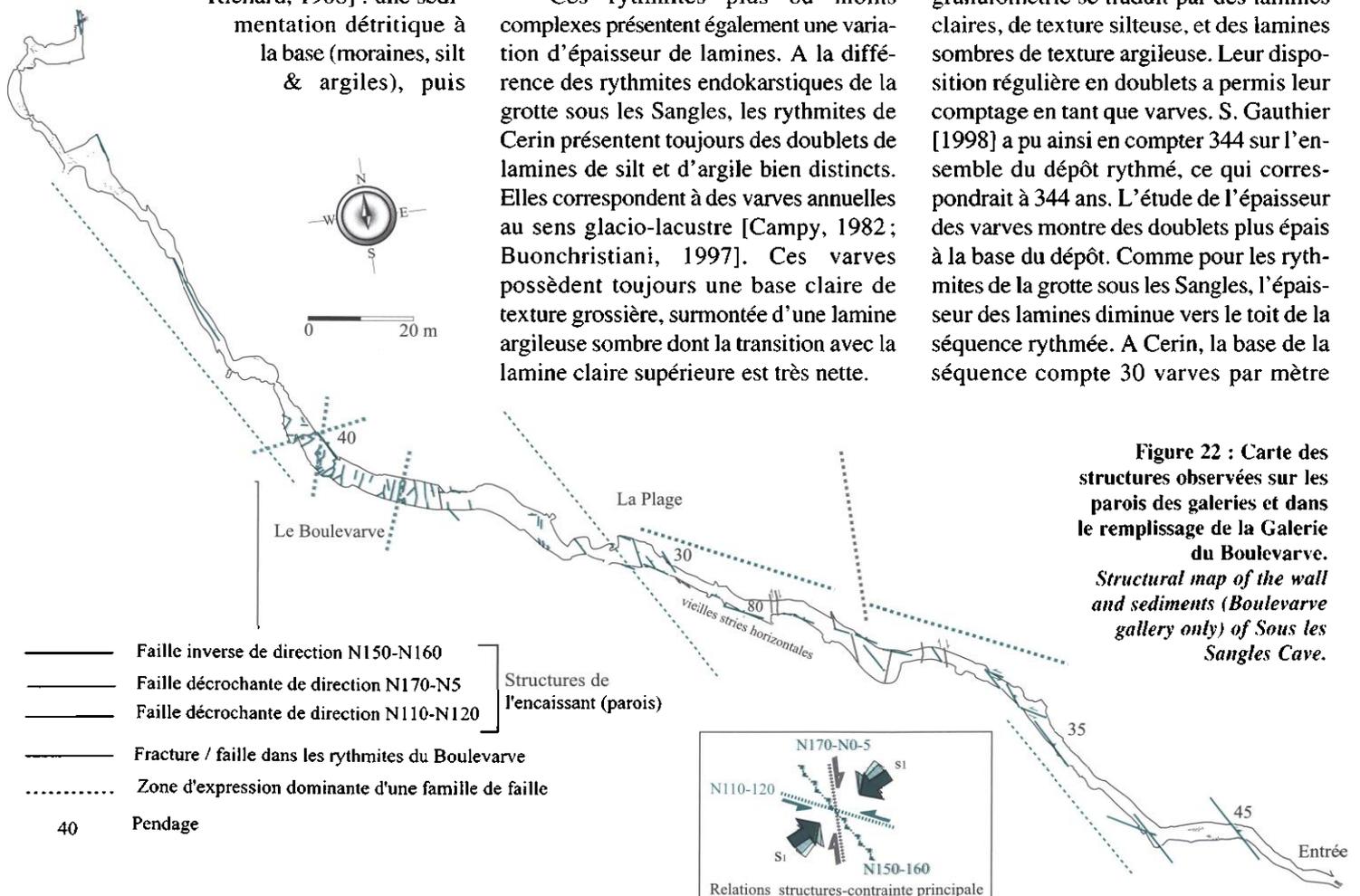
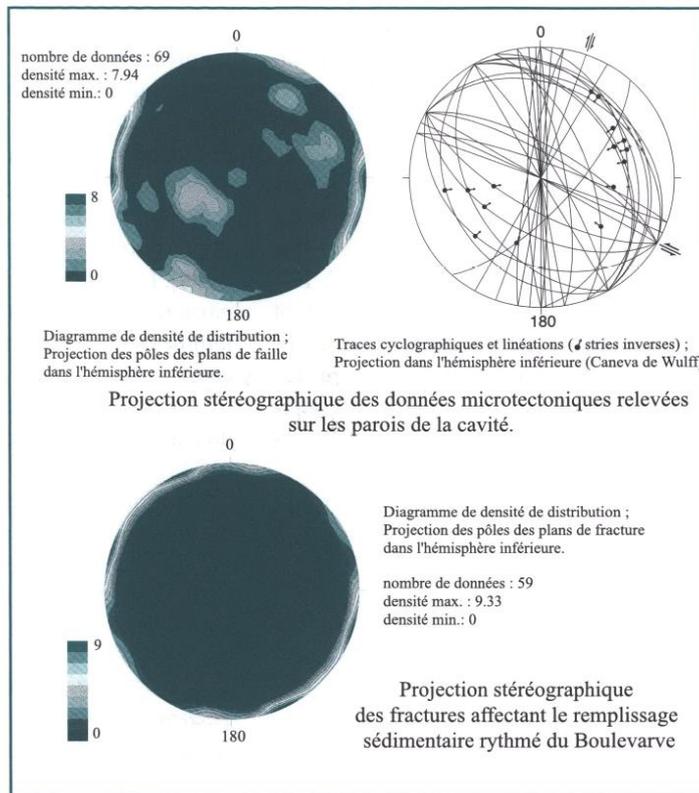


Figure 22 : Carte des structures observées sur les parois des galeries et dans le remplissage de la Galerie du Boulevard. Structural map of the wall and sediments (Boulevard gallery only) of Sous les Sangles Cave.

Figure 23 :
Représentations
stéréographiques
des observations
tectoniques
réalisées sur les
parois et dans les
sédiments de la
grotte sous les
Sangle.
Stereographic
projection
(distribution density
diagram) of the
microtectonic data
collected on the
wall (top) and in
the sediments
(bottom) of Sous
les Sangles Cave.



contre 150 varves par mètre au toit de la séquence.

L'analyse du signal a pu être réalisée à partir du signal de l'épaisseur des varves et d'analyse d'images codées en niveaux de gris de façon similaire à celle réalisée sur les rythmites du "Boulevardve". Cette analyse a pu ainsi mettre en évidence la dominance de cycles de haute fréquence de période de 5 à 14 ans [Gauthier, 1998]. Les cycles décennaux sont particulièrement bien exprimés dans la partie centrale du dépôt (entre les varves 50 et 300) (figure 21).

L'analyse en niveaux de gris a permis de mettre en évidence des cycles de haute

fréquence, de période de 6, 8 et 12 cm. Il n'est, cependant, pas possible de les corrélérer directement aux cycles décennaux des varves.

La dominance du signal des varves et leur diminution d'épaisseur vers le haut du dépôt nous montrent que le taux de sédimentation annuel a fortement décliné dans la cuvette de Cerin, au Tardiglaciaire, suite au retrait du glacier. Il est passé de 3 cm.an^{-1} à $0,6 \text{ cm.an}^{-1}$, soit une diminution du taux de sédimentation d'un facteur 5 (utilisation de moyennes arithmétiques).

La dominance des cycles décennaux dans le dépôt nous incite à attribuer la diminution des périodes des cycles de 12

puis 8 puis 6 cm (révélées par l'analyse en niveau de gris) à la diminution du taux de sédimentation et non à l'expression de forçages de différentes périodes temporelles. Nous proposons ainsi d'attribuer ces cycles de 6, 8 et 12 cm aux cycles décennaux, dont l'expression sédimentaire se traduit par une diminution d'épaisseur de sédiment déposé à chaque cycle.

C. Les varves de Cerin, une clé pour comprendre les rythmites de la grotte sous les Sangles ?

De nombreux points communs rapprochent les rythmites hypogées de la grotte sous les Sangles et les varves glacio-lacustres de Cerin : leur proximité géographique, leur composition pétrographique, leurs variations de texture sous forme de lamines rythmées, leur épaisseur totale de dépôt.

L'évolution du signal sédimentaire (par des niveaux de gris) dans les rythmites hypogées de la grotte sous les Sangles est également semblable à celle des varves de Cerin.

Par analogie, dans les deux cas, le signal temporel enregistré par la sédimentation peut être considéré de même période. Les cycles de 4, 6-8 cm et 14-16 cm des rythmites hypogées pourraient correspondre, comme cycles de 6, 7 et 12 cm des varves glacio-lacustres, à des cycles décennaux, solaires [Chapron *et al.*, 1998 ; Levy *et al.*, 1991].

La constance de texture des lamines tout au long des deux ensembles sédimentaires, atteste que les conditions hydrodynamiques n'ont guère changé au cours du temps. C'est donc la quantité de matériel apporté qui diminue à chaque fois, et donc la quantité de matériaux disponible, mobilisable par le flux hydrique qui semble diminuer au cours du temps. La similitude d'évolution du taux de sédimentation est remarquable : il diminue d'un facteur de 4 à 5 dans les deux cas.

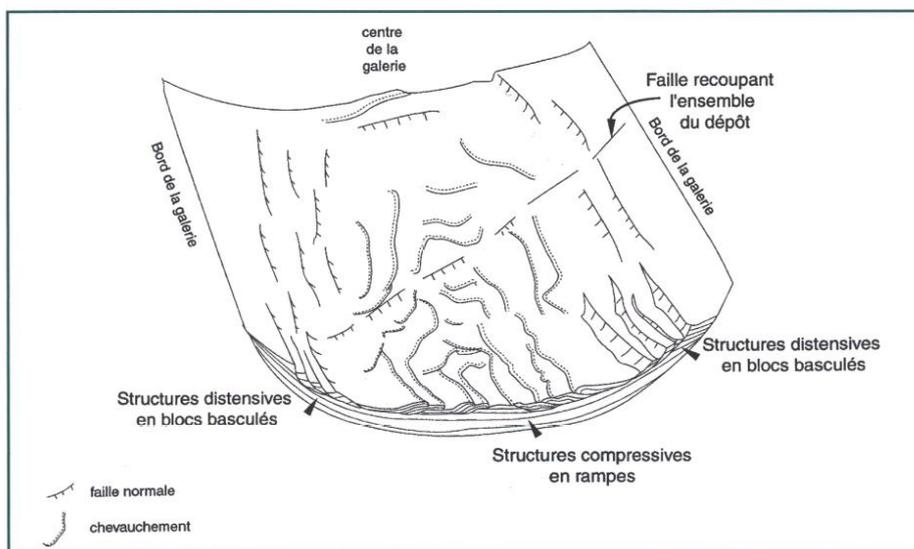


Figure 24 : Bloc diagramme schématique interprétatif, remplaçant les différentes structures de déformations gravitaires synsédimentaires des rythmites, dans la partie médiane du Boulevardve (la taille des structures est exagérée par rapport aux dimensions de la galerie.).
Interpretative 3D sketch of the different syn-sedimentary strain structures observed in the fined laminated sediments of the Boulevardve gallery.

Le dépôt des varves correspond à la déglaciation du site de Cerin au Pléniglaciaire. Au début du retrait glaciaire, la quantité de matériel disponible (moraines) est très importante. Au cours du temps, cette quantité diminue d'autant que les sols qui commencent à se développer tendent à retenir les particules du ruissellement.

A partir de l'ensemble de ces données, nous proposons de corréler les rythmites de la grotte sous les Sangles à celles du lac de Cerin. Les datations absolues appuient cette interprétation (figure 10).

L'étude des remplissages souterrains de la grotte sous les Sangles a permis de reconstituer une page de fonctionnement du karst durant et après la dernière glaciation quaternaire. L'analyse de ces remplissages a également permis de relever des indices sismo-tectoniques.

VI. INDICES STRUCTURAUX SISMO-TECTONIQUES

Deux types de déformations ont été relevés, celles affectant l'ensemble du remplissage des rythmites, et celles affectant les parois calcaires de la cavité.

A. Structures tectoniques dans les sédiments

Les rythmites du "Boulevard" sont affectées de déformations bien visibles. Des fractures métriques à plurimétriques traversent quasiment toute la hauteur des sédiments dans toute la partie du "Boulevard". Elles ne présentent pas de continuité avec les parois. Ces fractures ont été cartographiées (figure 22). Les relations entre ces fractures et les déformations synsédimentaires attestent qu'elles se sont activées à plusieurs reprises au moins pour certaines d'entre elles. La plupart affectent la surface des rythmites et ont donc fonctionné après le dépôt. Ces fractures sont quasiment toujours verticales et ne présentent pas de rejet vertical apparent (photo 10). Leur ouverture centimétrique à pluricentimétrique et leur direction (perpendiculaire à l'axe de la galerie) pourraient suggérer une extension d'origine gravitaire des sédiments.

Cependant, la géométrie de certaines zones de rupture et les indices relevés aux parois de la cavité suggèrent un autre type de déformation : une déformation par "serrage" des parois ; d'ailleurs, certaines d'entre elles sont associées à des

déformations plicatives. Cela est confirmé par la projection stéréographique des fractures des rythmites qui présente de nombreuses similitudes d'orientation avec les failles verticales d'ouverture (N170-N5), ou décrochantes observées aux parois (figure 22 et 23).

L'étude morphologique du remplissage montre, enfin, une dissymétrie de pente transversale, dans les parties médiane et amont du "Boulevard". Le bord NE du remplissage est plus élevé que le bord SW. Cette morphologie a, d'ailleurs, guidé les eaux de ruissellement responsables de l'entaille d'érosion du remplissage dans cette partie (coupe naturelle). Des essais de quantification et de modélisation de la surface des varves ont été tentés à l'aide de mesures par distance-mètre laser et théodolite. Ils n'ont pas encore pu aboutir pour des raisons techniques, mais devraient être renouvelés.

B. Structures de déformations synsédimentaires

D'autres structures, plus petites et localisées dans la stratigraphie, ont été observées. Elles correspondent à des épisodes brefs durant la sédimentation.

1. Failles d'effondrement

Dans la zone d'entrée du "Boulevard", proche de l'évent, le remplissage est moins épais (moins de deux mètres). Les lamines du toit des rythmites drapent en discordance la base du dépôt affectée de failles pluri-décimétriques. Cette géométrie en blocs basculés témoigne d'effondrements du sédiment en direction de la zone d'entrée.

Dans la partie centrale du "Boulevard", deux types de déformations synsédimentaires (scellées par la lamination) ont retenu notre attention.

2. Tectonique tégumentaire synsédimentaire

A la base du remplissage, entre 2,5 et 3 m de profondeur (depuis le toit des rythmites), deux séquences de lamines présentent des structures de déformation de type "thin-skin tectonic" plus connues habituellement à l'échelle des modèles analogiques de déformation crustale. Ces déformations n'affectent à chaque fois qu'un même ensemble cohérent de lamines qui, à la faveur d'un plan de décollement, se déforment en blocs basculés (photo 11) et en rampes de chevauchement (photo 12). Les structures

en extension sont localisées vers les bords du remplissage où les lamines présentent un pendage d'environ 20° vers le centre de la galerie. Les structures de raccourcissement se développent au centre de la galerie où les lamines ne présentent quasiment plus de pendage.

Ces deux niveaux de déformation témoignent de deux événements momentanés de déstabilisation des sédiments qui ont glissé des bordures (pentes) vers le centre de la galerie (figure 24).

3. Des "volcans" de sédiments :

Dans la partie supérieure du dépôt (premier mètre), les rythmites présentent des cônes de brèches de lamines, à matrice silto-argileuse, remplissant des fractures verticales. Alignées le long des grandes fractures, qui affectent toute la largeur du remplissage ; ces brèches forment des structures de "volcans" sédimentaires, avec cheminées et cratères (photo 13). Ces "volcans" peuvent être effusifs et associés à des structures compressives dans les lamines aux épontes de la cheminée ; ils expulsent et répandent une partie de leur contenu en surface. Un autre type, non effusif, est associé à de rares structures d'extension et un cratère en creux en surface.

Deux générations de volcans ont été observées dans la stratigraphie. Ils sont associés latéralement à des structures de déformation intra-laminaire, d'extension ou de raccourcissement, parfois en association [Lignier, 2001].

Ces structures gravitaires et d'échappements fluides, de la base au toit des rythmites sont liées aux grandes fractures qui affectent l'ensemble du remplissage et ont donc fonctionné en plusieurs épisodes durant la sédimentation et postérieurement.

4. Interprétation et discussion sur l'origine probable de ces structures de déformations synsédimentaires

Au début du remplissage par les rythmites, celles-ci sont peu épaisses et possèdent une pente importante, la modification rhéologique de certaines lamines silteuses, liée à l'excès de pression de fluide, permet le "décollement" du paquet de lamines sus-jacent. Les forces de friction étant plus réduites sur le niveau de décollement, ce paquet de lamines glisse par gravité vers le point bas de la surface des rythmites, au centre de la galerie

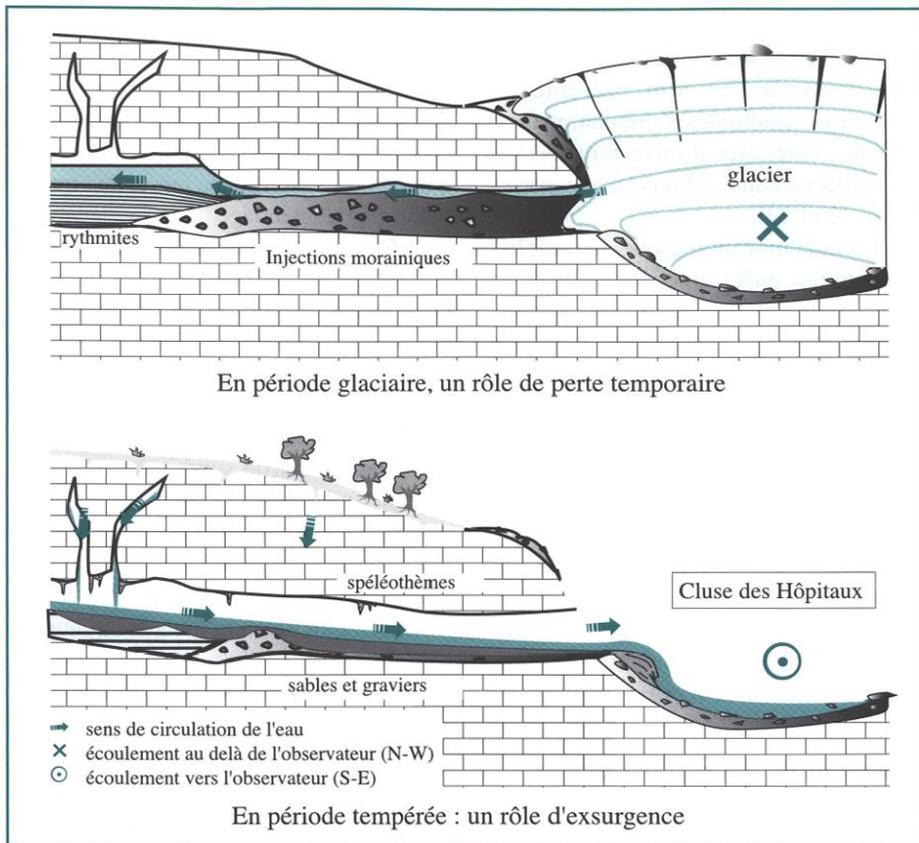


Figure 25 : Modèle de fonctionnement de la grotte sous les Sangles en fonction de la période climatique et type de sédimentation associée.
Sous les Sangles Cave functioning model, considering climatic period and associated type of sedimentation.

(figure 24). Vers le haut du remplissage, l'absence de pente, ne permet pas le glissement de lamines. L'excès de pression du fluide interstitiel dans certaines lamines silteuses, entraîne une migration brutale du fluide vers la surface, à la faveur de zones de ruptures. Cette éruption de fluide fracture les lamines aux épontes de la fissure, qui joue le rôle de cheminée d'expulsion du mélange de sédiments fluidifiés et de fragments de lamines, vers la surface.

Plusieurs facteurs peuvent être attribués à l'origine de ces déformations : des facteurs propres aux sédiments et à leur contexte de mise en place, ou bien des facteurs externes indépendants de la sédimentation.

La rythmicité des lamines, même en absence de varves est relativement régulière. Les niveaux affectés de glissements pelliculaires ne sont observables que sur des niveaux restreints, impliquant des événements relativement exceptionnels. Ces niveaux déformés ne diffèrent pas des niveaux sus- et sous-jacents, ni dans leur composition, ni dans leur lamination. L'hypothèse de rupture des paquets de lamines sous leur propre poids paraît donc peu probable. L'apparition discrète de ces

déformations suggère plutôt l'existence d'un phénomène déclencheur instantané. Ce phénomène à l'origine d'une variation brutale de la pression de fluide dans le sédiment, entraîne des structures impliquant des contraintes opposées au même endroit en un temps très court (failles en extension et compression au même endroit dans les mêmes directions). Ces observations suggèrent également un phénomène oscillatoire (back and forth oscillation).

"Volcans" de sables et brèches syndépendimentaires sont des structures qui ont été observées dans d'autres formations sédimentaires [Audemar & De Santis, 1991 ; Davenport *et al.*, 1994 ; Lignier, 2001] et correspondent à des échappements brutaux de fluides interstitiels du sédiment. Ils sont très souvent reliés à une cause sismique ; dans l'actuel, ces phénomènes sont effectivement fréquemment associés aux séismes contemporains de forte magnitude [Guiraud & Plaziat, 1991 ; Obermeier, 1999 ; Lignier, 2001]. L'hypothèse d'un déclenchement sismique pour appréhender les déformations des sédiments de la grotte de sous les Sangles apparaît dès lors probable. Si les sédiments du "Boulevard" ont pu être déformés par

des séismes, l'ensemble de la cavité a pu en être également affecté. L'analyse d'autres indices tend à confirmer cette hypothèse.

C. Structures tectoniques sur les parois - analyse microtectonique

De nombreux plans de failles et de fractures sont visibles aux parois de la cavité. Plusieurs d'entre eux présentent également des stries de déplacement (figures 22 et 23).

Trois familles de failles apparaissent nettement : deux familles concernent les plans sub-verticaux des failles senestres et des fractures orientées N110-N120 ; elles se conjuguent à des failles dextres d'orientation N170-N5. Enfin, des plans orientés N150-N160, à pendage vers le NE ou le SW présentent des jeux inverses.

L'ensemble de ces données, relativement cohérent, atteste d'un serrage NE-SW du massif calcaire dans lequel se développe la cavité. Plusieurs générations de stries ont été observées, ce qui atteste d'un fonctionnement polyphasé de ces accidents.

Deux directions tectoniques semblent guider le développement de la cavité. Les directions de galeries s'orientent principalement le long des accidents inverses et senestres (figure 22). La troisième famille se traduit très fréquemment en cheminées oblongues transversales à la galerie ; ceci est particulièrement visible avant "La Plage". Certains plans striés semblent anciens, car patinés. D'autres en revanche semblent plus frais, c'est principalement le cas des failles inverses, dégagées à la faveur d'effondrements partiels de la voûte. Ils restent, cependant, difficiles à dater, sauf dans quelques cas. Dans la partie amont du "Boulevard", la paroi NE est un miroir de faille inverse, dont l'éponte inférieure s'est partiellement écroulée sur le toit des rythmites. Certaines morphologies, comme la voûte de l'évent d'accès au "Boulevard", considérée contemporaine des rythmites, ou les spéléothèmes récents sont également disloqués par ces plans de faille. Ils attestent d'un fonctionnement récent (holocène) de ces failles. Plusieurs spéléothèmes déformés reposent sur des remplissages ; il faut, cependant, rester prudent sur l'interprétation tectonique de leur déformation [Delannoy, 1997], celle-ci pouvant être liée aux phénomènes de tassement des sédiments. En revanche d'autres spéléothèmes

suspendus, sans contact avec les remplissages, comme à "la Salle" excluent ce type de processus et pourraient impliquer une origine tectonique, voir sismique [Carbon *et al.*, 1998].

VII. LES APPORTS PALÉOGÉOGRAPHIQUES, PALÉOCLIMATIQUES ET TECTONIQUES DES SÉDIMENTS DÉTRITIQUES DE LA CAVITÉ

A. Climat, karstification et remplissage sédimentaire

Comme pour de nombreuses cavités régionales, le creusement de la grotte sous les Sangles peut-être considéré au moins d'âge pliocène [Audra, 1994; Delannoy, 1997]. La cavité a ensuite subi plusieurs phases de comblement comme en témoigne la stratigraphie des remplissages du "Boulevard". Si les rythmites peuvent être attribuées dans ce cas à la déglaciation pléniglaciaire, les unités sous-jacentes sont plus difficiles à dater, puisqu'elles sont séparées les unes des autres par des discontinuités de sédimentation dont nous ne pouvons pas connaître la valeur temporelle. Elles peuvent, néanmoins, être attribuées à des pulsations würmiennes ou à des événements glaciaires plus anciens. La coupe stratigraphique du "Boulevard" (figure 8) semble indiquer des alternances de périodes d'écoulement libre, relativement énergiques, alternant avec des périodes d'injection morainique et d'ennoiement de la cavité en période glaciaire.

Les indications de courant dans les dépôts et remplissages indiquent deux sens d'écoulement opposés.

En période glaciaire, les glaciers alpins et locaux remplissent la Cluse des Hôpitaux, leurs moraines sont injectées dans les cavités karstiques et leurs eaux de fonte les ennoient, tendant à les colmater par leurs apports (figure 25). Le remplissage des vallées par les glaciers semble localement inverser les gradients hydrauliques entraînant des inversions des écoulements endokarstiques [Delannoy, 2002]. Des situations semblables ont été décrites dans d'autres karsts alpins [Jeannin, 1991; Bini *et al.*, 1998].

En période tempérée, plus chaude, la vallée libre de glace redevient le point bas des écoulements, et les eaux drainant le massif, s'écoulent à nouveau d'amont

en aval de la cavité. Elles remobilisent les remplissages et reprennent leur érosion, notamment par une dissolution plus active comme en témoignent la formation de spéléothèmes et la faible teneur en carbonate des sédiments.

La grotte sous les Sangles semble donc fonctionner différemment en période glaciaire et interglaciaire. Cette seconde période est plus propice à la formation d'archives sédimentaires.

B. Indices de néotectonique et de paléosismicité

Plusieurs éboulements de blocs sont visibles dans différents endroits du réseau. Si le phénomène d'éboulement peut être associé à un phénomène de détente mécanique des parois [Maire, 1990; Audra, 1994; Delannoy, 1997], ou d'"appel au vide" lié à la proximité du rebord de versant, la configuration de la grotte sous les Sangles invite à une approche plus tectonique. La plupart de ces effondrements de paroi laissent, en effet, apparaître des plans de faille striés, en cohérence avec le schéma tectonique régional actuel. Des formes héritées du fonctionnement hydrologique de la cavité à la fin de la dernière glaciation (environ 14.500 B.P.), telle la voûte d'accès au "Boulevard", sont affectées par le jeu de ces failles, ce qui indique qu'une partie au moins de ces plans de faille ont joué depuis le début de l'Holocène et peuvent être considérés comme toujours potentiellement actifs. Les récents travaux de nivellement réalisés dans le massif du Jura impliquent une déformation active mise en évidence par une surrection locale estimée à plus d'un millimètre par an, notamment dans ce secteur de la Cluse des Hôpitaux [Jouanne *et al.*, 1994].

Les déformations observées dans les sédiments du "Boulevard", par leur interprétation tectonique semblent indiquer qu'à la fin de la dernière glaciation, la déformation régionale du massif a pu être sismogénique. Dans ce cas, quatre séismes au moins auraient laissé leur trace dans les rythmites du "Boulevard". En estimant la durée de sédimentation par analogie au système glacio-lacustre de Cerin à 350 ans, cela représenterait, en moyenne, plus d'un séisme par siècle durant cette période. Certains auteurs évoquent une sismicité accrue lors du retrait des glaciers, attribuée au phénomène de rebond post-glaciaire [Beck *et al.*, 1996].

CONCLUSIONS

L'étude de la grotte sous les Sangles dans son ensemble, par des approches géomorphologiques, sédimentologiques et tectoniques a permis de mieux comprendre l'origine et l'évolution de la cavité et de ses remplissages. La cavité s'est formée à la faveur des directions tectoniques régionales correspondant aux principales familles de failles. Ses conduits continuent d'être déformés depuis la dernière glaciation. Les remplissages de la cavité attestent de son fonctionnement polyphasé, alterné selon les dernières périodes glaciaires et interglaciaires. Les rythmites du Boulevard pourraient correspondre comme leur équivalent varvé de Cerin à quelques centaines d'années consécutives de la fonte des glaciers locaux, en accord avec les datations de spéléothèmes.

Les structures synsédimentaires qu'elles renferment, replacées dans leur cadre chronologique, semblent indiquer une activité sismique durant cette période, en accord avec les observations tectoniques et le cadre géodynamique récent. La grotte sous les Sangles et ses remplissages attestent ainsi des potentialités non négligeables du karst dans l'enregistrement des variations paléoclimatiques et sismo-tectoniques.

Une extension de ce type d'approche à d'autres cavités régionales des parties externes et de la Haute Chaîne du Jura notamment, permettrait de soulever d'éventuelles différences dans l'évolution climatique et tectonique de cette région.

Remerciements :

C. Beck (L.G.C.A. - Univ. de Savoie) et P. Recourt M. (Univ. Lille 1) pour leur contribution à l'analyse des argiles; J.-J. Delannoy et Y. Perrette (EDYTEM - Univ. de Savoie) pour les prélèvements de spéléothèmes à dater et leurs discussions; G. Menard (L.G.C.A. - Univ. de Savoie), pour ses discussions et réflexions sur la tectonique; Y. Quinif pour les datations U/Th; G. Gerbaud pour sa contribution sous terre et au laboratoire; H. Richard, M. Magny et G. Bossuet (Lab. Chrono-Ecologie - Univ. de Besançon) pour la réalisation des carottages du lac de Cerin; et le Groupe Ulysse Spéléo pour sa participation aux relevés topographiques et en particulier Y. Robin pour les reports, E. Varrel et V. Shaeffer pour les photographies.

BIBLIOGRAPHIE

- AUDEMARD F. & DE SANTIS F., 1991 - Survey of liquefaction structures induced by recent moderate earthquakes. *Bull. Intern. Assoc. Eng. Geol.*, 44, p. 5-16.
- AUDRA P., 1994 - Karsts alpins. Genèse de grands réseaux souterrains. Exemples : le Tennenengebirge (Autriche), l'Île Crémieu, la Chartreuse et le Vercors (France). *Thèse d'Université. Karstologia Mémoires*, n°5, 279 p.
- BECK C., MANALT F., CHAPRON E., VAN RENSBERGEN P., DE BATIST M., 1996 - Enhanced seismicity in the early post-glacial period : evidence from the post-Würm sediments of Lake Annecy, NW Alps. *J. Geodynamics*, 22, p. 155-171.
- BECK C., DE BATIST M., DESMET M., CHAPRON M., GAUTHIER S., LIGNIER V., MAGNY M., MANALT F., RICHARD H., VAN RENSBERGEN P., 1999 - L'épisode varvé s.s. infra-tardiglaciaire des Alpes Nord-Occidentales : processus de dépôt, géométrie d'ensemble, chronologie. Implications paléoclimatiques. *7e Congrès Français de Sédimentologie - Livre des résumés Pbl.*, ASF, Paris, n°33, p.25.
- BINI A., TOGNINI P., ZUCCOLI L., 1998 - Rapport entre karst et glaciers durant les glaciations dans les vallées préalpines du Sud des Alpes. *Karstologia*, n°32, p.7-26.
- BLAVOUX B., 1988 - L'occupation de la cuvette lémanique par le glacier du Rhône au cours du Würm. *Bull. A.F.E.Q.*, 2/3, p. 69-79.
- BOSSUET G., RUFFALDI P., MARTIN J., CHOQUIER A., MIGNIOT C., 1993 - Reconnaissance du contexte géologique et de la nature du remplissage d'un bassin lacustre du Jura Méridional. Le Lac de Cerin (Ain, France). *Eclogae geol. Helv.* 86/2 : 355-376.
- BOSSUET G., RUFFALDI P., MAGNY M., RICHARD H., MOUTHON J., 1996 - Dynamique et approche quantitative des remplissages fini- et postwürmiens du bassin lacustre de Cerin (Jura, France). *Bull. Soc. Géol. France*, t.167, n°4, pp. 483-494.
- BRODZIKOWSKI K., VAN LOON A.J., 1991 - Glacigenic sediments. Elsevier, 674 p.
- BUONCRISTIANI J.F., 1997 - Production sédimentaire détritico des systèmes glaciaires. Quantification des produits stockés dans un lac proglaciaire durant la dernière glaciation : exemple du lac de la Combe d'Ain (Jura, France). *Thèse de doctorat, Univ. de Bourgogne*, 232 p.
- CAMPY M., 1982 - Le Quaternaire franc-comtois : essai chronologique et paléoclimatique. *Thèse d'état, Univ. de Franche-Comté*, 575 p.
- CAMPY M., 1992 - Paleogeographical relationships between Alpine and Jura glaciers during the two last Pleistocene glaciations. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 93, p. 1-12.
- CAMPY, RICHARD H., 1988 - Modalités et chronologie de la déglaciation würmienne dans la chaîne jurassienne. *Bull. A.F.E.Q.*, 2/3, p. 81-90.
- CARBON D., CUSHING M., LEMEILLE F., GRELLET B., BITTERLI T., FLEHOC C. & INNOCENT C., 1998 - Ruptures et déformations cosismiques enregistrées par les spéléothèmes dans la zone épicertrale du séisme de Bâle. *Karst & Tectonics*, Spéléochronos hors-série, p. 32-34.
- CHAPRON M., 1999 - Contrôles climatiques et sismo-tectonique de la sédimentation lacustre dans l'Avant-Pays Alpin (Lac du Bourget) durant le Quaternaire récent. *Géologie Alpine, Mémoire H.S.* n°30, Université Joseph Fourier, 261p.
- CHIROL B., 1991 - La Grotte Sous les Sangles à la Burbanche. *Spéléo 01, Comité Départemental de Spéléologie de l'Ain*, 14, 65-68 et 15, 1992, p.52.
- CHIROL B., 1998 - La Burbanche. *Spéléo 01, Comité Départemental de Spéléologie de l'Ain*, 21, p.64.
- COLLIGNON B., 1988 - Spéléologie, approches scientifiques, *Edisud*, 236 p.
- DAVENPORT C.A., LAP J.M.J., MAUREN-BRECHER P.M., PRICE D.G., 1994 - Liquefaction potential and dewatering injection structures at Herkenbosch : field investigations of the effects of the 1992 Roermond earthquake, the Netherlands. *Geologie en Minjnbouw*, 73, p. 365-374.
- DELANNOY J.J., 1997 - Recherches géomorphologiques sur les massifs karstiques du Vercors et de la Transversale de Ronda (Andalousie). Les apports morphogéniques du karst. *Thèse de doctorat d'état, Géographie, Institut de Géographie Alpine, Grenoble*, 678 p.
- DELANNOY J.J., 2002 - Glaciations quaternaires et karstogénèse. Exemple des Alpes nord-occidentales. Livret Guide de l'excursion annuelle de l'AFEQ : Le front würmien à la périphérie du Jura et des Alpes, 8-11 mai 2002, pp. 138-148.
- DESMET M., 1995 - Paléo-océanographie du Pacifique Est Equatorial. *Thèse de doctorat Université Louis Pasteur*, 165 p.
- FORD D., 1992 - Karst et glaciation au Canada, in Salomon J.N. & Maire R., 1992. Karst et évolutions climatiques. *Presses Universitaires de Bordeaux*, 520 p., p. 249-266.
- GAUTHIER S., 1998 - Analyse d'un signal sédimentaire à haute résolution dans un dépôt lacustre tardiglaciaire, le lac de Cerin (Ain, France). *Mem. Maîtrise, Univ. Joseph Fourier, Grenoble*, 43 p.
- GERBAUD G., 1999 - Etude de dépôts glacioclastiques en contexte karstique : les Varves de la Grotte Sous les Sangles (Ain). *Université de Savoie - Université Joseph Fourier de Grenoble*.
- GUELLEC S., MUGNIER J.L., TARDY M., ROURE F., 1990 - Neogene evolution of the western Alpine foreland in the light of ECORS data and balanced cross-section, in : Roure F., Heitzmann P., Polino R., Eds., Deep structure of the Alps. - *Mém. Soc. géol. Fr.*, Paris, 156; *Mém. Soc. Géol. Suisse*, Zürich, 1; Vol. spec. *Soc. Geol. It.*, Roma, 1, pp. 165-184
- GUIRAUD M. & PLAZIAT J.-CL., 1993 - Seismites in fluvial Bima sandstones : identification of paleoseisms and discussion of their magnitudes in Cretaceous synsedimentary strike-slip basin (Upper Benue, Nigeria). *Tectonophysics*, 225 : 493-522.
- JEANNIN P.Y., 1991 - Mise en évidence d'importantes glaciations anciennes par l'étude des remplissages karstiques du Réseau des Sieben Hengste [Chaîne borbidière helvétique]. *Eclogae Geol. Helv.* 84.1, p. 207-221.
- JOUANNE F., MENNARD G. & JAULT D., 1994 - Present-day vertical deformation of the French northwestern Alps/Southern Jura mountains : comparison between historical triangulations. *Geophys. J. Int.* 119, p. 151-165.
- JOUANNE F., MENNARD G. & DARMENDRAIL X., 1995 - Present-day vertical displacement in the north-western Alps and southern Jura Mountains : data from leveling comparisons. *Tectonics*, 14, 3, p. 606-616.
- KERRIEN Y., MONJUVENT G., 1990 - Carte géologique de la France, feuille de Belley (n°700) au 1/50.000. BRGM édit., Orléans, Notice Explicative, 73 p.
- LEVY E.H., RUZMAIKINA A.A. & RUZMAIKINA T.V., 1991 - Magnetic history of the sun. *The Sun in Time*, C.P. Sonett, M. S. Guimpapa, M.S. Matthews, Eds., *The University of Arizona Press*, Tucson, p. 589-632.
- LIGNIER V., 2001 - Les sédiments lacustres et l'enregistrement de la paléosismicité. *Thèse de Doctorat, 3e cycle, Université de Savoie*. 2 vol., 381 p.
- LIGNIER V., DESMET M., GERBAUD G., BECK C., MENARD G., DELANNOY J.J., QUINIF Y., Groupe Ulysse Spéléo, 1999 - Contrôle climatique et tectonique d'un dépôt rythmé endokarstique quaternaire, dans une cavité du Jura méridional : La Grotte sous les Sangles [la Burbanche, Ain]. *7e Congrès Français de Sédimentologie, livre des résumés, Publ. ASF, Paris*, n°33, p. 217-218.
- LIGNIER V., DESMET M., GERBAUD G., BECK C., MENARD G., DELANNOY J.J., QUINIF Y., Groupe Ulysse Spéléo, 1999 - Climatic and tectonic control of varved deposits in a jura cave [Grotte sous Les Sangles, Burbanche]. *Actes colloque Karst 99, Mende*.
- MAGNY M., 1995 - Une histoire du climat. Errance Ed., 176 p.
- MAIRE R., 1990 - La haute montagne calcaire. Karsts, cavités, remplissages, quaternaire, paléoclimats, *Karstologia Mémoires*, n°3, 731p.
- MANALT F., 1998 - Enregistrement lacustre de la dernière déglaciation dans les Alpes Nord-Occidentales, le remplissage sédimentaire du lac d'Annecy [Haute-Savoie]. *Thèse de Doctorat, Université de Savoie*, 227 p.
- MANDIER P., 1988 - Les problèmes chronologiques posés par les phases de la récession würmienne dans la moyenne vallée du Rhône. *Bull. A.F.E.Q.*, 2/3, p. 123-128.
- NICOUD G., CODDET E., BLAVOUX B., DRAY M., 1993 - Les complexes détritiques de marge glaciaire active dans le Bas-Chablais [Bassin Lémanique, France]. Implications hydrogéologiques. *Quaternaire*, 4, p. 69-76.
- OBBERMEIER S.F., POND E.C., 1999 - Issues in using liquefaction features for paleoseismic analysis. *Seismological Research Letters*, vol. 70, n°1, p.34-58.
- PASSEGA R., 1957 - Texture as characteristic of clastic deposition. *Am. Assoc. Petroleum Geologist Bull.* 41/9, 1952-1984.
- QUINIF Y., MAIRE R., 1998 - Pleistocene deposits in Pierre Saint-Martin Cave, French Pyrenees. *Quaternary research*, n°49, p.37-50.
- RENAULT P., 1967-1968 - Contribution à l'étude des actions mécaniques et sédimentologiques dans la spéléogénèse. *Thèse d'état, CNRS, Paris, Annales de spéléologie* 23/1, pp.259-308.
- RUFFALDI P., 1991 - Première contribution à l'étude de la végétation tardiglaciaire et holocène du Bugey : l'exemple de la tourbière du lac de Cerin (Ain, France). *Revue de paléobiologie*, vol.10, n°1, p.137-149.
- RUFFALDI P., 1993 - Histoire de la végétation du Jura méridional depuis le retrait du glacier würmien à partir des analyses palynologiques du lac de Cerin (Ain, France), *Thèse de troisième cycle, Faculté de Franche Comté, Laboratoire de Chrono-Ecologie de Besançon*, France.
- SAUNDERSON H.C., 1977 - The sliding bed facies in esker sands and gravels : a criterion for full-pipe (tunnel) flow? *Sedimentology*, n°24, p.623-638.
- SBAI A., EK C., DROUIN P., CHIROL B., ARIAGNO J.C., PELISSON A., QUINIF Y., 1995 - Les remplissages de la Grotte Sous les Sangles : sédimentologie et évolution spéléomorphologique d'une Grotte du Jura Méridional (France). *Quaternaire*, 6, [1], 35-45.
- SCHLUCHTER C., 1988 - The deglaciation of the Swiss-Alps : a paleoclimatic event with chronological problems. *Bull. A.F.E.Q.*, 2/3, p. 141-145.
- THOUVENOT F., FRECHET J., GUYOTON F., GUIGUET R., JENATTON L., 1990 - SIS-MALP : an automatic phone-interrogated seismic network for the western Alps. *Cahier du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, 1, p. 1-10.