



**HAL**  
open science

## Dynamique sédimentaire et effet de site en zone noyée du karst : le siphon de Chevaline (Grottes de Choranche, Vercors, France)

Vincent Lignier, Stéphane Jaillet, Anne-Sophie Perroux, Matthieu Thomas,  
Emmanuel Malet, Guillaume Devès, Laurent Morel, Jean-Jacques Delannoy

### ► To cite this version:

Vincent Lignier, Stéphane Jaillet, Anne-Sophie Perroux, Matthieu Thomas, Emmanuel Malet, et al..  
Dynamique sédimentaire et effet de site en zone noyée du karst : le siphon de Chevaline (Grottes de  
Choranche, Vercors, France). *Karstologia*, 2012, Dynamique sédimentaire dans le siphon de Chevaline,  
60, pp.23-44. 10.3406/karst.2012.2727 . hal-03333052

**HAL Id: hal-03333052**

**<https://hal.science/hal-03333052v1>**

Submitted on 30 Apr 2024

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - ShareAlike 4.0 International License

## Dynamique sédimentaire et effets de site en zone noyée du karst : l'exemple du siphon de Chevaline (Grottes de Choranche, Vercors, France)

Vincent Lignier, Stéphane Jaillet, Anne-Sophie Perroux, Matthieu Thomas, Emmanuel Malet, Guillaume Deves, L. Morel, Jean-Jacques Delannoy

---

### Citer ce document / Cite this document :

Lignier Vincent, Jaillet Stéphane, Perroux Anne-Sophie, Thomas Matthieu, Malet Emmanuel, Deves Guillaume, Morel L., Delannoy Jean-Jacques. Dynamique sédimentaire et effets de site en zone noyée du karst : l'exemple du siphon de Chevaline (Grottes de Choranche, Vercors, France). In: Karstologia : revue de karstologie et de spéléologie physique, n°60, 2e semestre 2012. Dynamique sédimentaire dans le siphon de Chevaline. pp. 23-44;

doi : <https://doi.org/10.3406/karst.2012.2727>

[https://www.persee.fr/doc/karst\\_0751-7688\\_2012\\_num\\_60\\_1\\_2727](https://www.persee.fr/doc/karst_0751-7688_2012_num_60_1_2727)

---

Fichier pdf généré le 15/03/2019

## **Abstract**

Sedimentary dynamics and site effects in flooded karstic environment : the example of Chevaline sump.

Downstream of the karst system of Coufin-Chevaline, part of Choranche Caves, the Chevaline sump is a flooded zone forming a sediment trap upstream of the lake of the Cathedral. To study the sediment dynamics and potential site effects of the phreatic endokarstic area, a 234m long gallery was investigated by cave diving. For the first time, a precise geomorphological and sedimentological mapping has been achieved ; sediments and speleothems have also been collected. This flooded part of the network has been equipped with "lurographe" sensors and a flow measurement monitoring system. A sedimentological study, combining mapping analysis, particle sizing, mineralogical and chemical analyse (major elements and radiogenic isotopes) has been conducted to characterize the underground sedimentation in this area. With a very sharp seasonality, alternating between floods and low water periods, the Chevaline sump combines transfers, deposits of detrital sediments and calcite precipitation, in a same place. Sediment sources are both ancient and allochthonous, from the watershed surface, but also recent and autochthonous, coming from the erosion, during floods, of endokarstic travertine precipitated during periods of low water. Distribution and texture of the deposits are strongly induced by gallery geometries and flow variations they imply throughout the flooded area. Although its volume is twice as large as the one of the Lake of the Cathedral, the Chevaline sump traps only part of the sediments. But it exerts a geometrical site effect that separates coarse and fine sequences during flow decline between upstream and downstream and depending on the geometry of the flooded gallery. The localised contribution of carbonates, then eroded in situ, seems to be the cause of a particular grain size signature on CM picture, corresponding to a mineralogical site effect. The nature and variable age of the detrital components of the sediment, a well as the endokarstic context do not seem favourable to the use of short life radionuclides, making it difficult for dating the recent Holocene. The configuration of stepped sediment traps, the successive remobilisation of sediments from upstream to downstream and sediment site effects must be considered and taken into account when studying sedimentary archives, located downstream of a karstic network, for paleoenvironmental studies.

## **Résumé**

A l'aval du système karstique de Coufin-Chevaline dans les grottes de Choranche, le siphon de Chevaline est une zone noyée constituant un piège sédimentaire en amont du lac de la Cathédrale. Afin d'étudier la dynamique sédimentaire et d'éventuels effets de site de la zone noyée endokarstique, une galerie de plus de 200 m de long a été étudiée par plongée souterraine. Une cartographie géomorpho-sédimentologique précise et des prélèvements de sédiments et de concrétions ont été réalisés. Cette partie du réseau a également été équipée de lurographes et d'un système de mesure des débits. Une étude sédimentologique, combinant des analyses cartographiques, granulométriques, minéralogiques et chimiques (éléments majeurs et isotopes radiogéniques) a permis de caractériser la sédimentation souterraine de cette zone noyée. Avec une saisonnalité très marquée, alternant entre période de crues et période d'étiage, le siphon de Chevaline associe transferts, dépôts de sédiments détritiques et précipitations de concrétions phréatiques en un même lieu. Les sources sédimentaires sont à la fois anciennes et allochtones, provenant du bassin versant en surface, mais aussi récentes et autochtones, provenant de l'érosion, lors des crues, des dépôts de travertins endokarstiques précipités durant les périodes d'étiages. La répartition et la texture des dépôts sont fortement conditionnées par la géométrie des galeries et les variations de débits qu'elles entraînent tout au long de la zone noyée. Bien que d'un volume deux fois plus important que celui du lac de la Cathédrale, le siphon de Chevaline ne piège qu'une partie des sédiments, mais exerce un effet de site, un contrôle géométrique qui sépare les séquences grossières des séquences fines de décrue entre l'amont et l'aval et selon les géométries de la galerie noyée. L'apport localisé de carbonates précipités puis érodés in situ semble être à l'origine d'une signature granulométrique particulière en image CM, correspondant à un effet de site minéralogique. La nature et l'âge variable des composantes détritiques du sédiment, ainsi que l'environnement endokarstique ne semblent pas favorables à l'utilisation de radionuclides à courtes périodes, rendant difficile les datations holocènes récentes. La configuration en pièges décanteurs étagés, les remobilisations successives des sédiments de l'amont vers l'aval et les effets de sites

l'étude d'archives sédimentaires à des fins paléoenvironnementales.



Vincent LIGNIER<sup>1-2</sup>,  
Stéphane JAILLET<sup>1</sup>,  
Anne-Sophie PERROUX<sup>1-3</sup>,  
Matthieu THOMAS<sup>1</sup>,  
Emmanuel MALET<sup>1</sup>,  
Guillaume DEVES<sup>4</sup>,  
Laurent MOREL<sup>5</sup> et  
Jean-Jacques DELANNOY<sup>1</sup>

(1) EDYTEM, Université de Savoie,  
(2) PPME Université de la Nouvelle  
Calédonie,  
(3) ADESS, Université de Bordeaux 3,  
(4) CENBG-IPCV Bordeaux,  
(5) Laboratoire Ampère,  
Université de Lyon 1.

Contacts : [vincent.lignier@univ-savoie.fr](mailto:vincent.lignier@univ-savoie.fr),  
[stephane.jaillet@univ-savoie.fr](mailto:stephane.jaillet@univ-savoie.fr)

# Dynamique sédimentaire et effets de site en zone noyée du karst : l'exemple du siphon de Chevaline (Grottes de Choranche, Vercors, France)

RÉSUMÉ : A l'aval du système karstique de Couffin-Chevaline dans les grottes de Choranche, le siphon de Chevaline est une zone noyée constituant un piège sédimentaire en amont du lac de la Cathédrale. Afin d'étudier la dynamique sédimentaire et d'éventuels effets de site de la zone noyée endokarstique, une galerie de plus de 200 m de long a été étudiée par plongée souterraine. Une cartographie géomorpho-sédimentologique précise et des prélèvements de sédiments et de concrétions ont été réalisés. Cette partie du réseau a également été équipée de luirographes et d'un système de mesure des débits. Une étude sédimentologique, combinant des analyses cartographiques, granulométriques, minéralogiques et chimiques (éléments majeurs et isotopes radiogéniques) a permis de caractériser la sédimentation souterraine de cette zone noyée. Avec une saisonnalité très marquée, alternant entre période de crues et période d'étiage, le siphon de Chevaline associe transferts, dépôts de sédiments détritiques et précipitations de concrétions phréatiques en un même lieu. Les sources sédimentaires sont à la fois anciennes et allochtones, provenant du bassin versant en surface, mais aussi récentes et autochtones, provenant de l'érosion, lors des crues, des dépôts de travertins endokarstiques précipités durant les périodes d'étiages. La répartition et la texture des dépôts sont fortement conditionnées par la géométrie des galeries et les variations de débits qu'elles entraînent tout au long de la zone noyée. Bien que d'un volume deux fois plus important que celui du lac de la Cathédrale, le siphon de Chevaline ne piège qu'une partie des sédiments, mais exerce un effet de site, un contrôle géométrique qui sépare les séquences grossières des séquences fines de décrue entre l'amont et l'aval et selon les

géométries de la galerie noyée. L'apport localisé de carbonates précipités puis érodés in situ semble être à l'origine d'une signature granulométrique particulière en image CM, correspondant à un effet de site minéralogique. La nature et l'âge variable des composantes détritiques du sédiment, ainsi que l'environnement endokarstique ne semblent pas favorables à l'utilisation de radionucléides à courtes périodes, rendant difficile les datations holocènes récentes. La configuration en pièges décanteurs étagés, les remobilisations successives des sédiments de l'amont vers l'aval et les effets de sites sédimentaires localisés en aval d'un système karstique doivent être considérés et pris en compte dans l'étude d'archives sédimentaires à des fins paléoenvironnementales.

MOTS-CLÉS : endokarst, siphon, hydrologie, cartographie subaquatique, carottages, sédiments détritiques, précipitation, granulométrie, minéralogie, radionucléides, effet de site.

**ABSTRACT: SEDIMENTARY DYNAMICS AND SITE EFFECTS IN FLOODED KARSTIC ENVIRONMENT: THE EXAMPLE OF CHEVALINE SUMP.** Downstream of the karst system of Couffin-Chevaline, part of Choranche Caves, the Chevaline sump is a flooded zone forming a sediment trap upstream of the lake of the Cathedral. To study the sediment dynamics and potential site effects of the phreatic endokarstic area, a 234m long gallery was investigated by cave diving. For the first time, a precise geomorphological and sedimentological mapping has been achieved; sediments and speleothems have also been collected. This flooded part of the network has been equipped with "luirographe" sensors and a flow measurement monitoring system. A sedimentological study, combining mapping analysis, particle sizing, mineralogical and chemical analyse (major elements and radiogenic isotopes) has been

conducted to characterize the underground sedimentation in this area. With a very sharp seasonality, alternating between floods and low water periods, the Chevaline sump combines transfers, deposits of detrital sediments and calcite precipitation, in a same place. Sediment sources are both ancient and allochthonous, from the watershed surface, but also recent and autochthonous, coming from the erosion, during floods, of endokarstic travertine precipitated during periods of low water. Distribution and texture of the deposits are strongly induced by gallery geometries and flow variations they imply throughout the flooded area. Although its volume is twice as large as the one of the Lake of the Cathedral, the Chevaline sump traps only part of the sediments. But it exerts a geometrical site effect that separates coarse and fine sequences during flow decline between upstream and downstream and depending on the geometry of the flooded gallery. The localised contribution of carbonates, then eroded in situ, seems to be the cause of a particular grain size signature on CM picture, corresponding to a mineralogical site effect. The nature and variable age of the detrital components of the sediment, as well as the endokarstic context do not seem favourable to the use of short life radionuclides, making it difficult for dating the recent Holocene. The configuration of stepped sediment traps, the successive remobilisation of sediments from upstream to downstream and sediment site effects must be considered and taken into account when studying sedimentary archives, located downstream of a karstic network, for paleoenvironmental studies.

**KEYWORDS:** endokarst, sump, hydrology, subaqueous mapping, cores, detrital sediments, grain size, mineralogy, radionuclides, site effect.

## Introduction

Enregistreurs reconnus des variations environnementales, les formes et les dépôts du karst sont fréquemment utilisés depuis deux à trois décennies pour proposer des reconstitutions paléogéographiques à différentes échelles de temps [Delannoy, 1997; Delannoy et al., 2009; Ford and Williams, 2007; Lignier et Desmet, 2002; Palmer, 2007; Quinif and Maire, 1998]. Parmi ces formes et ces dépôts, on a souvent signalé l'existence sous terre de paléo-zone noyée du karst, à partir de la lecture de morphologies de parois et de plafond qui évoquent une genèse en milieu noyé. Dans les karsts de montagne notamment, il a été montré qu'un certain nombre de formes auparavant attribuées aux zones noyées étaient plutôt caractéristiques de zones épinoyées [Audra, 1993], c'est-à-dire temporairement noyées (les tubes ou des conduits en montagnes russes par exemple). Les récentes recherches sur la fantômisiation ont montré une analogie de forme entre celles rencontrées dans les drains noyés du karst et celles issues de processus d'altération de type fantômisiation [Dubois et al., 2011; Quinif and Bruxelles, 2011; Quinif and Maire, 2007; Quinif, 2010; Vergari, 1998,]. Si la prudence est donc de règle quant à l'interprétation des formes, qu'en est-il des dépôts? Il peut être tentant d'associer un type de dépôt à un environnement particulier mais la sédimentation détritique étant contrôlée par l'énergie hydraulique du milieu [Hsü, 1989], peut-elle enregistrer les varia-

tions d'énergie de ce milieu? Sous terre les observations sont réalisables essentiellement sur des systèmes abandonnés par les écoulements, dont les interprétations sont faites par postulat et analogie au milieu fluvial de surface, déjà bien étudié et connu [Bravard, 1983; Peiry, 1994; Salvador et al., 2004]. Mais les conditions d'écoulement dans l'endokarst diffèrent grandement des écoulements de surface, car ils sont fortement contraints par les géométries et de dimensions très variables des galeries souterraines. La sédimentation dans l'endokarst présenterait-elle alors des spécificités et des signatures particulières?

D'autre part, l'utilisation des sédiments endokarstiques à des fins paléo-environnementales et paléo-climatiques [Delannoy et al., 2009; Lignier et Desmet, 2002; Perroux, 2006; Quinif and Maire, 1998; White, 2007] est de plus en plus pratiquée. Les pièges sédimentaires endokarstiques utilisés peuvent-ils l'être de façon analogue à ceux de surface? Les difficultés révélées pour établir des chronologies dans certaines séries endokarstiques holocènes [Perroux, 2005] suggèrent que l'endokarst pourrait être le lieu d'effets de sites particuliers. Difficile d'accès, la zone noyée du karst n'a fait l'objet, à ce jour, que d'observations morphologiques et sédimentologiques lacunaires et indirectes. L'étude présentée ici propose pour la première fois une analyse morphosédimentaire à haute résolution d'un siphon, permettant de caractériser la

dynamique actuelle des dépôts et par conséquent de discuter de l'effet de site endokarstique sur le transfert des sédiments dans l'endokarst de la zone noyée. Ce projet a été réalisé dans le programme Climanthrope (financement ANR n° BLAN06-3-138993), dirigé par Richard Maire et centré sur les effets de sites dans le karst. Le site de Choranche et la rivière souterraine de Chevaline en particulier se sont révélés pertinents pour mettre en œuvre cette approche.

## I. Cadre des grottes de Choranche et problématique; le siphon de Chevaline et le lac de la Cathédrale

Les grottes de Choranche, dans le Vercors, constituent un système de drainage actif d'une partie du Massif des Coulmes, un karst boisé de moyenne montagne. Les conditions de mise en place de ce karst sont connues à la fois sur le temps long [Delannoy, 1997] et sur son fonctionnement actuel [Delannoy, 1984]. Son évolution environnementale holocène a pu être reconnue à partir de l'étude des stalagmites [Perrette, 2000]. La rivière souterraine de Coufin, affluente de Chevaline, est instrumentée depuis 1997, avec un suivi opérationnel des débits, des températures et des conductivités [Perrette et al., 2001]. En outre, le site est exploité pour le tourisme par la société des grottes de Choranche qui a contribué à faciliter la logistique des travaux de recherches sous terre (accessibilité, portage, éclairage etc.).

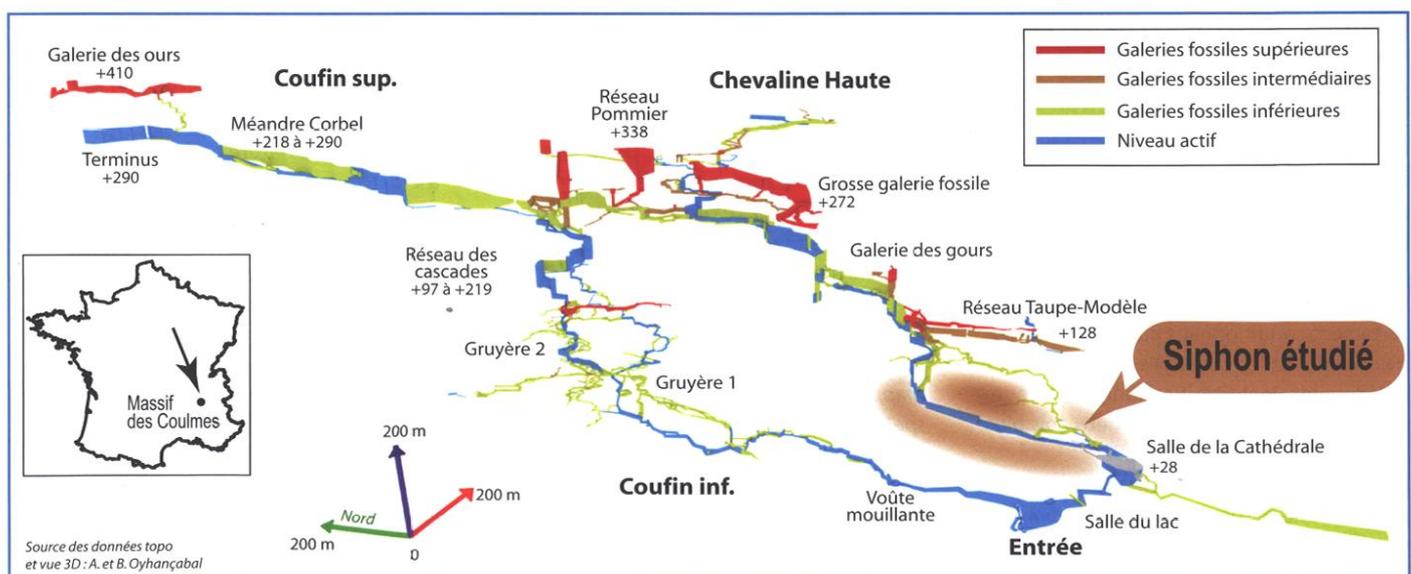
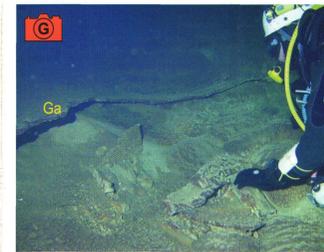
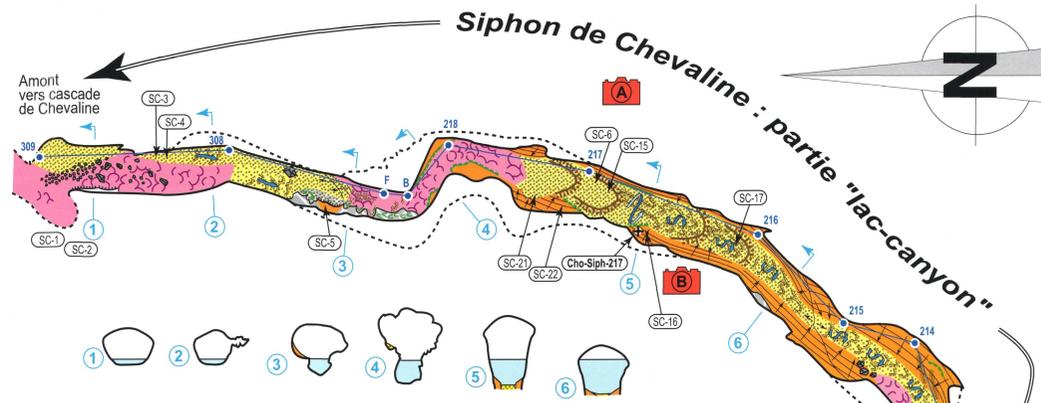
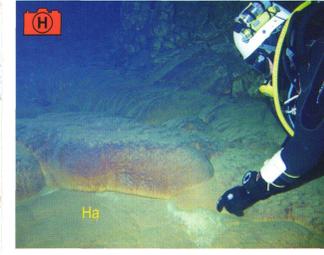
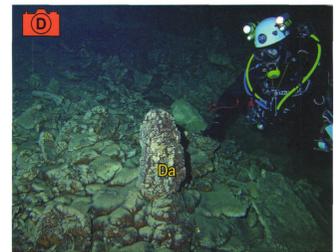


Figure 1: Localisation du site d'étude dans le système karstique de Coufin-Chevaline. Le siphon étudié est immédiatement en amont de la salle de la Cathédrale. Location of the study area, in the Coufin-Chevaline karstic system. The studied sump is located just upstream of the Cathedral chamber.



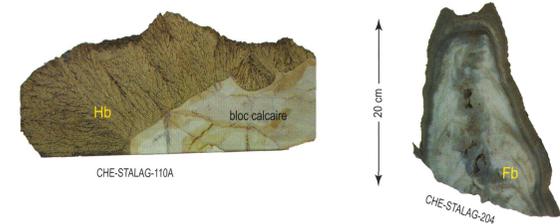
D – E – F : **Des spéléothèmes, aujourd'hui ennoyés** - Ils témoignent des périodes vadose et phréatiques des conduits. Dans le siphon de Chevaline, les datations des stalagmites scellées dans les sédiments permettront de cerner la dernière période vadose et la remontée du niveau d'eau dans les galeries. Une stalagmite sur éboullis, encroûtée (Da), témoigne d'une période vadose antérieure. Une autre, contemporaine est ennoyée dans une banquette latérale de limons fins (Ea). Enfin, cette stalagmite en paroi (Fa) est prélevée puis tranchée (Fb) pour datation U/Th.

**Speleothems submerged today** - They attest of vadose and phreatic periods for the conduits. Inside Chevaline sump, dating of stalagmites covered by sediments will provide a time constraint for the last vadose period and the rise of water level, in the galleries. A stalagmite on scree, now thickly coated (Da), indicates a prior vadose period. An other contemporaneous stalagmite is buried in a lateral fine silt bench (Ea). Finally, this stalagmite on the wall (Fa) has been collected and sliced (Fb) for U/Th dating.



G – H : **Des concrétionnements phréatiques** - Bien différents des spéléothèmes vadose, ces concrétionnements se présentent sous forme d'encroûtements en plancher (Ga) ou en boules (Ha). Leur structure dendritique (Hb) atteste leur croissance dans l'eau. L'érosion de ces concrétionnements, en amont, contribue aux apports endogènes de sédiment (voir Ab). Cette précipitation *in situ* de carbonate témoigne d'une sursaturation des eaux en période d'étiage notamment.

**Phreatic speleothems** - Quite different compared to vadose speleothems, these concretions grow either as thick flowstone (Ga) or as ball shapes (Ha). Their dendritic structure (Hb) attest their growth in water. Erosion of these crusts, upstream, contributes to endogenous sediment supply (Ab). This *in situ* carbonate precipitation indicates water super saturation, in particular during low waters.



**TOPOGRAPHIE ET REPERES / TOPOGRAPHY AND MARKS**

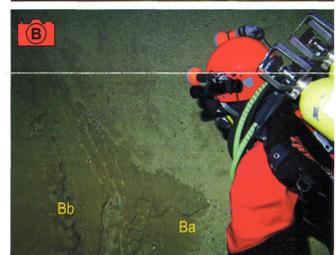
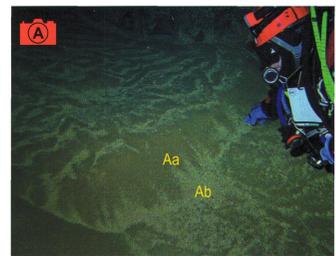
- Paroi / Wall
- Paroi zone exondée (non cartogr.) / Wall above water (not mapped)
- Seuil / Threshold
- Pente topographique / Slope
- Fil d'Ariane et point topo / Topographic wire and point
- Trappe / Sediment trap
- Prélèvement / Sampling
- Carottage / Core
- Localisation des photos / Photo location

**DEPOTS ET REMPLISSAGE / DEPOSIT AND FILLING**

- Calcaire nu / Limestone
- Bloc / block
- Cailloutis / gravel
- Clastes de desquamation / Shedding clasts
- Sable grossier - gravier / Coarse sand / gravel
- Sable fin (dépot épais) / Fine sand (thick deposit)
- Sable fin (dépot mince) / Fine sand (thin deposit)
- Sable fin (dépot épars) / Fine sand (scattered deposit)
- Limon et argile / Silt and clay
- Rides de courant asymétrique / Asymmetric current ripples
- Rides de courant longiforme / Elongated current ripples
- Rides de courant linguoïde / Curved current ripples
- Calcite / Calcite
- Plancher subaquatique / Subaqueous flowstone
- Stalagmite / stalagmite

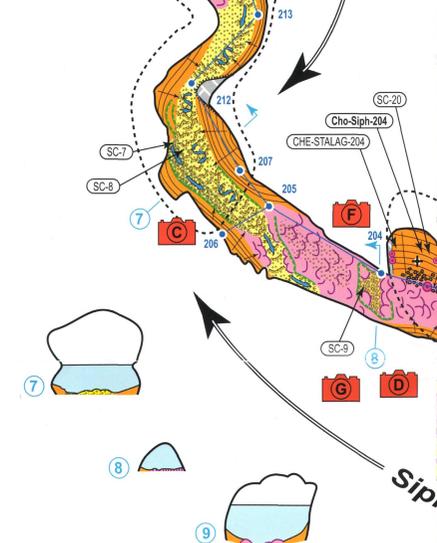
**FORMES D'EROSION / EROSION SHAPES**

- Détente lithostatique / lithostatic crack
- Marmitage subaquatique / Subaqueous pot-shape
- Incision du remplissage / Incised sediment fill
- Cupules subaquatiques / Subaqueous scallops



A – B – C : **Sédimentation détritico terrigène et carbonatée** - Des sables grossiers mixtes sont principalement stockés à l'amont de la zone noyée, sous forme de dunes progardantes. Ils associent des sables issus des couvertures miocènes (Aa : remaniés en surface et injectés dans le karst) et des grains de calcite "endogène", précipitée sur les parois et remaniée dans les galeries (Ab). Ces sables recouvrent, en discordance, une surface d'incision (Ba) dans des niveaux limoneux plus anciens (Bb), attestant d'un changement de dynamique hydrologique et sédimentaire de la galerie, dans le temps.

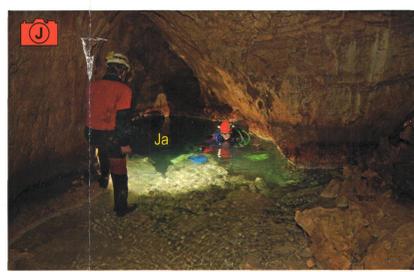
**Carbonated and terrigenous sedimentation** - Mixed coarse sands are mainly stocked upstream of the flooded area, as prograding dunes. They associate sands from the Miocene cover (Aa : reworked at the surface and injected into the karst) and "endogenic" calcite grains, precipitated on the walls, then eroded and reworked into Chevaline galleries (Ab). These sands are covering, by discordance, an incision surface (Ba) in older silt deposits (Bb) which attests a change of hydrological and sedimentological dynamics of the gallery, with time.



0 50 m

I – J : **Morphologie du conduit d'accès** - L'accès à la zone d'étude se fait par un conduit noyé de raccordement, subvertical (Ia) qui constitue l'exutoire aval du siphon (Ja). Il est dépourvu de sédiment.

**Morphology of the access gallery** - The access to the studied area goes through a subvertical flooded connecting conduit (Ia), which constitutes the downstream sump exutory (Ja). It does not contain any sediment.



**Cartographie géomorphologique détaillée du siphon de Chevaline (grottes de Choranche, Vercors)**  
**Detailed geomorphological mapping of Chevaline sump (Choranche caves, Vercors)**

Cette cartographie détaillée du siphon de Chevaline est le document hors texte accompagnant l'article suivant : LIGNIER V., JAILLET S., PERROUX A.-S., THOMAS M., MALET E., DEVES G., MOREL L. & DELANNOY J.-J. (2012) Dynamique sédimentaire et effets de site en zone noyée du karst : l'exemple du siphon de Chevaline (Grottes de Choranche, Vercors, France). Publié dans Karstologia n°60, FFS / AFK.

Financement laboratoire EDYTEM / ANR Climanthrope.

Laboratoire **EDYTEM** ANR CLIMANTHROPE  
 Environnements, Dynamiques et Territoires de la Montagne  
 Relevés topographiques, cartographique et photographiques : S. Jaillet & V. Lignier, 2007, 2008, 2009





Photo 1: Les crues de la rivière de Chevaline à l'aval du siphon sont spectaculaires, notamment au droit de la cascade de la salle de la Cathédrale. Cliché S. Jaillet, 2007. *Downstream from the sump, Chevaline river floods are spectacular, here close to the Cathedral chamber waterfall.*

### A. Un réseau étagé complexe

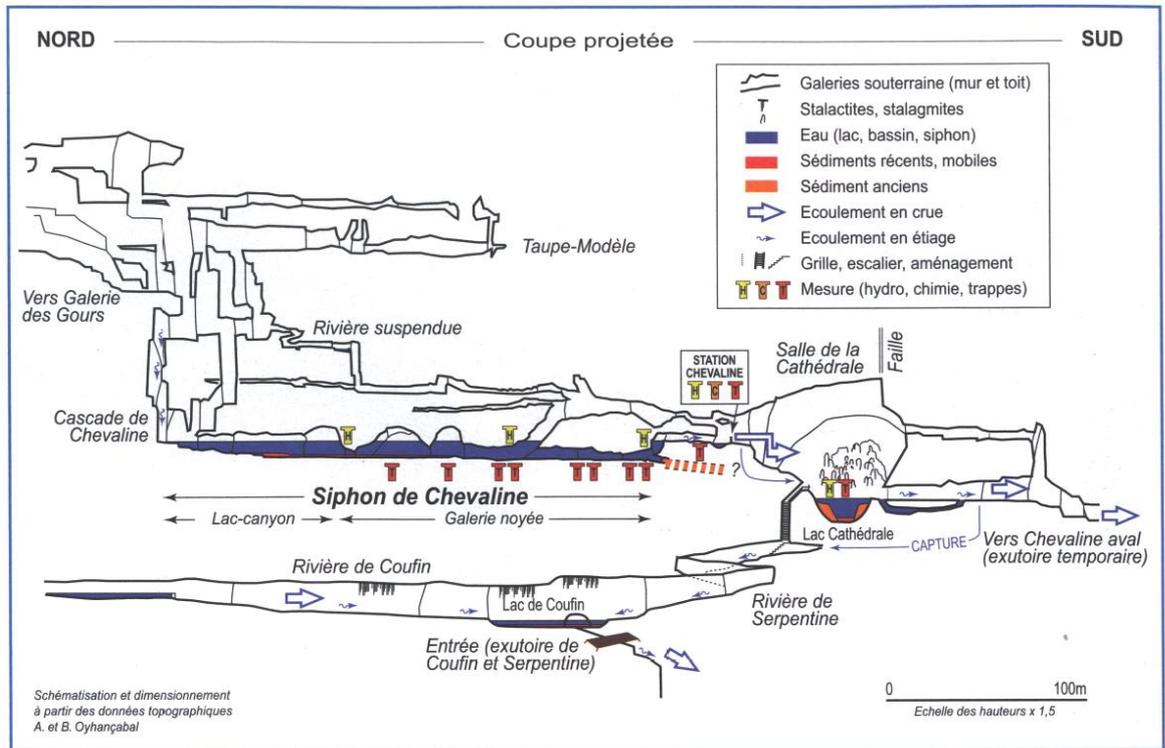
Le réseau Coufin / Chevaline s'organise selon deux systèmes hydrologiques parallèles : la rivière de Coufin et la rivière de Chevaline (figure 1). Toutes deux présentent des profils en long à forte pente et marqués par la succession de haut en bas d'un haut niveau (méandre Corbel dans Coufin, méandre Tafani dans Chevaline...), d'une zone à forte pente (zone des cascades dans Coufin, galerie des Gours dans Chevaline...) et d'une zone finale à nouveau plus horizontale (Coufin, partie touristique, et Chevaline aval). A cette organisation hydrologique actuelle s'ajoute une série de trois niveaux de conduits plus ou moins abandonnés par les écoulements : (i) ensemble supérieur galerie des Ours / Pommier / Grosse Galerie Fossile), (ii) Galeries fossiles intermédiaires (Taupe-Modèle) et (iii) Galeries fossiles inférieures (Gruyère), dont certaines semi-actives (Chevaline aval).

La zone aval est le siège d'une capture active du type capture complexe [Jaillet, 2001]. La rivière de Coufin

(branche occidentale du système) sourd à la grotte de Coufin. La rivière de Chevaline (branche orientale, perchée) se jette dans le lac de la Cathédrale. De là elle file dans Chevaline aval et se perd pour rejoindre la rivière de Serpentine. Cette dernière est un court tronçon à forte pente qui conflue avec Coufin au droit de l'exutoire (figure 2). Ce fonctionnement d'étiage est complexifié en crue (photo 1). En effet lors des périodes d'intumescence hydrique, la rivière de Chevaline s'écoule dans Chevaline aval et rémerge plus au sud à la grotte de Chevaline, formant alors une belle cascade visible depuis Choranche. Cette cascade offre une allure de queue-de-cheval, sans doute à l'origine du toponyme. La rivière de Serpentine est un soutirage de la rivière de Chevaline. Le lac de la Cathédrale et le siphon de Chevaline constituent les deux pièges sédimentaires discutés ici.

Cette organisation et ce fonctionnement posent la question de la diachronie des drains entre eux et des étapes chronologiques ayant permis la mise en place d'un tel dispositif. En effet, il est

possible d'y voir une capture par soutirage : la rivière de Chevaline s'écoulant d'abord dans Chevaline aval serait en cours de capture par Serpentine. L'analyse des morphologies et des gabarits des conduits, la reconnaissance d'éléments clés dans le siphon de Chevaline, laissent supposer plutôt le contraire. Le siphon de Chevaline est un conduit de plusieurs mètres de diamètre, comparable à la rivière Serpentine. La présence de concrétions ennoyées (cf. *infra*), le volume de la salle de la Cathédrale (calée sur une faille), la « fraîcheur » des morphologies et les dimensions modestes des conduits de Chevaline aval, permettent de proposer un scénario plus complexe : dans un premier temps, la rivière de Chevaline, se serait écoulee en régime vadose en rejoignant Serpentine puis Coufin. Un effondrement (non daté) au niveau de la Cathédrale aurait eu pour conséquence : (i) la mise en place d'un volume de vide important et la formation du lac, (ii) le barrage et l'ennoisement du siphon de Chevaline, (iii) l'activation (ou la réactivation) de la branche aval



de Chevaline et (iv) l'abandon de Serpentine, qui n'absorbe plus alors qu'une partie limitée du débit de Chevaline.

Il n'est pas prévu de discuter ici des modalités de cette évolution géomorphologique que seuls des travaux de datations et des compléments géomorphologiques permettront de démêler correctement. Cependant, les conséquences principales des événements de ce scénario, sont la mise en place à un moment donné de deux pièges endokars-

tiques étagés : le lac de la Cathédrale (photo 2) et le siphon de Chevaline.

### B. Deux pièges sédimentaires étagés

La rivière de Chevaline draine un bassin d'alimentation inférieur à 10 km<sup>2</sup>. Elle fonctionne en écoulement libre et cascading jusqu'à, dans sa partie aval, deux étendues d'eau (le siphon perché de Chevaline et le lac souterrain de la Cathédrale) qui constituent des freins hydrauliques favorisant la sédimentation détritique.

A l'aval, le lac de la Cathédrale constitue un piège sédimentaire qui a déjà été en partie étudié [Perroux, 2006, 2005] (figure 2). La caractérisation de la sédimentation lacustre souterraine a permis d'en évaluer le potentiel en termes d'archivage paléo-environnemental et paléo-climatique. Il a notamment été mis en évidence des incohérences stratigraphiques par les datations au radiocarbone ; une partie de la série sédimentaire semble inversée par rapport à la chronologie obtenue par les charbons. L'étude réalisée sur le lac de la Cathédrale soulève la problématique de l'influence des zones à l'amont de la rivière souterraine, sur sa sédimentation en aval. Ces zones à l'amont pourraient-elles exercer un contrôle des transferts sédimentaires vers l'aval ?

En effet, plusieurs dizaines de mètres en amont, le lac de la Cathédrale est alimenté par le déversement du siphon de Chevaline (figure 2). Comment le fonctionnement de ce siphon pourrait-il contrôler la sédimentation dans le lac ? Si le piège le plus à l'aval peut enregistrer les variations environnementales, les sédiments qu'il recueille transitent avant par le piège situé plus en amont. Quel pourrait être le rôle de ce piège supérieur dans la construction de l'accumulation sédimentaire du lac, celui d'un filtre de l'information sédimentaire ou celui d'une accentuation de cette information ?



Photo 2 : Le lac de la Cathédrale et ses banquettes sédimentaires détritiques qui témoignent de son rôle de piège sédimentaire [Perroux, 2006]. Cliché S. Jaillet, 2007. *The Cathedral lake and its clastic sedimentary benches, that reflect its role as sediment trap.*

Y a-t-il un « effet de site » sédimentaire du siphon amont sur le lac en aval ?

Dans le cadre de cette problématique, le siphon de Chevaline, long de plus de 200 mètres, a été étudié, avec pour objectif, la compréhension de son fonctionnement hydrodynamique en lien avec l'organisation des dépôts sédimentaires qu'il renferme. Cette investigation poussée sur ce type d'objet, un siphon, constitue l'originalité de ce travail impliquant un éventail méthodologique adapté.

## II Méthodologie : hydrologie, cartographie et prélèvement de sédiments en zone noyée

Le siphon de Chevaline, étudié ici, est une galerie active de 234 m de longueur constituée vers l'amont d'un lac-canyon de 112 m et vers l'aval d'une galerie noyée de 122 m. Ce conduit est régulièrement soumis aux crues qui se déversent dans le lac de la Cathédrale. Le siphon, accessible en plongée souterraine, a été exploré en 1973 par Robert Jean et repris en 2005 par William Thumy [Oyhançabal, 2005]. Une première reconnaissance scientifique est effectuée par V. Lignier qui rééquipe en 2003 le parcours en fil d'Ariane. Un relevé topographique précis et une cartographie géomorphologique détaillée du siphon de Chevaline ont été réalisés de 2007 à 2009 [Jaillet et Lignier, 2009 et 2010]. Ce travail a nécessité 28 plongées souterraines, totalisant environ douze heures de travail en immersion pour deux, parfois trois plongeurs. Tout le travail a été réalisé sous l'eau, proche du fond, y compris pour la partie lac-canyon, dans la mesure où l'objectif était la cartographie des dépôts au sol du conduit. Parmi ces plongées, certaines ont exclusivement concerné l'équipement et la cartographie du siphon. Les autres plongées ont été menées en réalisant plusieurs tâches (installation de luirographes, de trappes à sédiments, prélèvement de concrétions et de sédiments par carottage, couverture photographique, etc.). La durée des plongées variait entre vingt minutes et deux heures selon la nature des travaux effectués.

### A. Méthodes de mesures hydrologiques

Afin d'obtenir les débits de la rivière de Chevaline à la sortie du siphon et leurs variations au long de l'année, un

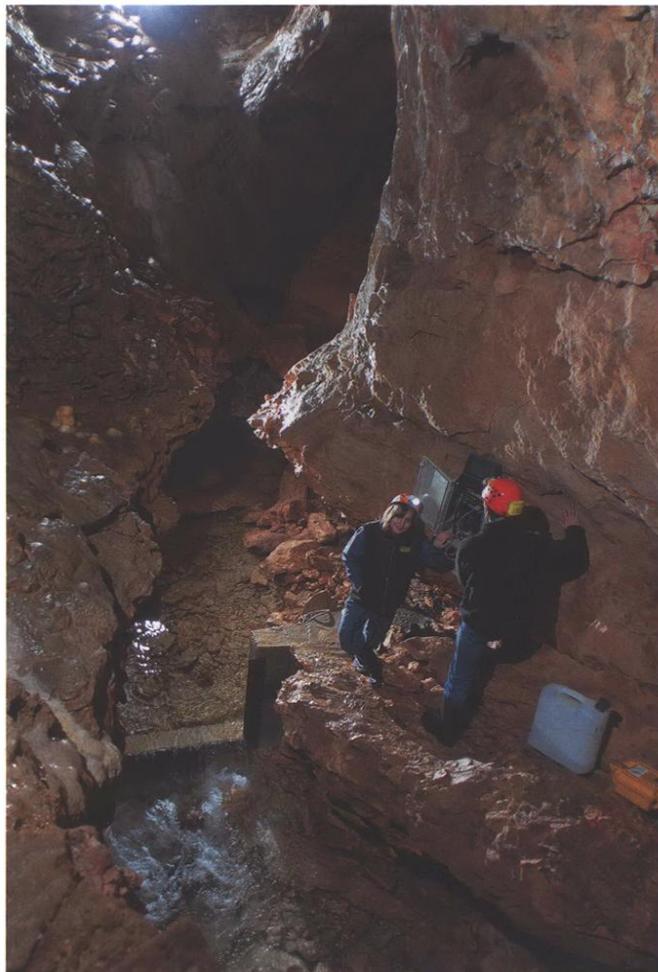


Photo 3 : La station hydrométrique et le seuil calibré de la rivière de Chevaline, mesurant en continu les hauteurs d'eau, transformées en débits, la conductivité et la température. Cliché S. Jaillet, 2012. *Hydrometric station and calibrated threshold of river Chevaline, continuously measuring water depths (converted into flow), conductivity and temperature.*

seuil-déversoir (photo 3) a été construit en mars 2008, par les agents de la société des grottes de Choranche, en aval du siphon, en amont de la cascade de la salle de la Cathédrale. Son étalonnage a permis d'obtenir les débits correspondant à la hauteur d'eau mesurée.

Ce seuil bétonné a été équipé d'un système de mesure (gamme Campbell©) de la hauteur d'eau, d'une sonde de conductivité et de température. L'équipement a été complété d'un

préleveur automatique de l'eau. Ponctuellement, un dispositif expérimental de mesures des dépôts sédimentaires a été testé sur ce site [Morel et al., 2013]. L'instrumentation a été mise en place à la fin de l'année 2008 et relevée au début de l'année 2010. Elle a donc permis de relever des chroniques d'une année complète en 2009. Ce dispositif est toujours en place actuellement et fait l'objet d'un suivi par le laboratoire Edytem.

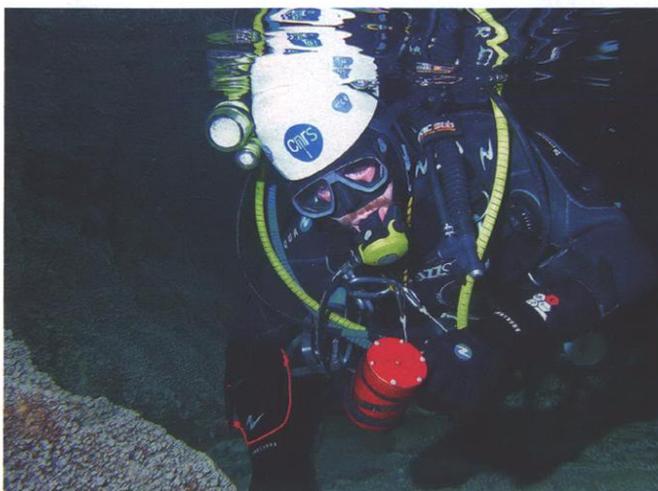


Photo 4 : Pose d'un luirographe dans la partie amont du siphon de Chevaline. Cliché V. Lignier. *Installing a luirographe in the upstream part of the siphon Chevaline.*



Photo 5 : Pose du fil pour la topographie dans le siphon. Chaque point est doté d'une étiquette numérotée qui permet de l'identifier sous l'eau.  
Cliché S. Jaillet, 2008.  
*Setting up the wire for the topographic work in the siphon. Each point has a numbered label to identify it underwater.*

En complément de cette installation, un équipement spécifique du siphon par une série de luirographes a été réalisé dès 2007 (photo 4) en amont, au milieu et en aval (exutoire) de la zone du siphon et dans le lac de la Cathédrale. Le dispositif a permis de mesurer de façon synchrone l'effet des crues le long du parcours souterrain.

### B. Méthode de cartographie géomorpho-sédimentologique en siphon

La galerie noyée, l'obscurité totale du milieu et la température voisine de 8°C nécessitent de travailler selon les techniques et conditions de sécurité de la plongée souterraine, en combinaison sèche.

Les contraintes spéléologiques et subaquatiques du milieu ont nécessité l'élaboration d'une méthode adaptée pour réaliser la cartographie géomorphologique

détaillée. Dans un premier temps, un équipement complet de progression en fil d'Ariane a été effectué tout le long du siphon et du lac-canyon amont. Ce fil a été doublé de chaque côté de la galerie lorsque celle-ci présentait de très larges sections. Ces boucles permettent de contraindre avec plus d'efficacité la polygonale topographique et offrent de meilleurs repères visuels en cas de faible visibilité. Pour les larges (>3 m) et hautes sections, des transects en fils d'Ariane ont été installés réalisant ainsi un large carroyage. Chaque amarrage de fil est numéroté comme une station topographique (photo 5). Au total, sur les 234 m étudiés, 46 stations réparties sur 372 m de fil ont été topographiées. C'est à partir de ce cheminement-carroyage que le relevé cartographique a pu être réalisé. Cette polygonale a été imprimée sur papier résistant à l'eau, à l'échelle de 1/200. Les observations, notées directement sous l'eau, étaient reportées au propre et confrontées le soir même, au sec, entre les opérateurs. Les conditions de lever en milieu subaquatique n'autorisant qu'un temps limité, le report immédiat des données (dans les heures qui suivent) permet de valoriser une bonne part des observations à partir de notes prises *in situ*, sous la contrainte du temps de plongée limité. L'ensemble des données numériques (cheminement et topographie du fil d'Ariane) a été traité sur Visual Topo© puis importé dans le logiciel Adobe Illustrator© pour le report cartographique. L'ensemble des scans a été importé dans le même logiciel. Le résultat de cette cartographie est présenté sur la carte hors-texte.

### C. Méthodes de prélèvements et d'analyses des sédiments

#### *Prélèvements de sédiments : pilulier, trappe à sédiment et carottages courts*

Une fois les galeries et dépôts identifiés, répertoriés et cartographiés, un échantillonnage par pilulier des différents types de sédiments et corps sédimentaires, a été effectué (photo 6) pour permettre une première reconnaissance des sédiments actuels.

Afin d'identifier la charge solide en transit, des trappes à sédiments expérimentales ont été disposées à différents endroits du siphon de Chevaline (photo 7) et du lac de la Cathédrale (photo couv. III) et relevées au bout d'un an. Après plusieurs essais, un modèle de trappe constitué de deux tubes a été utilisé : un tube vertical de 15 cm de haut et 4 cm de diamètre, destiné au piégeage de la décantation à dominante verticale et un tube (de mêmes dimensions) en « T », orienté dans le sens du courant, pour capter la charge

Photo 6 : Echantillonnage d'une "dune" de sable au pilulier.  
Cliché S. Jaillet, 2009.  
*Sampling of a sand dune, with a pill box.*



détritique en déplacement à dominante horizontale. Une première trappe a été testée sur une année (trappe 0 - avril 2007 à avril 2008). L'année suivante, du 27 novembre 2008 au 7 octobre 2009, huit trappes ont été disposées dans le siphon selon un axe longitudinal (trappes 2-3-5-6-7) et, par endroits, selon un transect latéral (trappes 1-2, 3-4, 5-8). Leur localisation figure sur la carte géomorpho-sédimentaire hors-texte). Au relevage des trappes, les tubes sont fermés in situ, puis démontés de leur socle et rapportés au laboratoire.

Des carottages courts (<1 m) ont été réalisés, par tube de PVC de 8 cm de diamètre [Lignier, 2001], plantés dans les banquettes argileuses latérales, pour obtenir des séquences sédimentaires continues (photo 8).

Trois carottes ont pu être prélevées dans le siphon (localisation sur la carte hors-texte) : ChoSiph108 et ChoSiph217 ont été étudiées en détail avec un pas d'échantillonnage de 0,5 cm. La carotte ChoSiph204 a été utilisée pour une datation radiométrique du sédiment ( $^{210}\text{Pb}$  et  $^{137}\text{Cs}$ ).

#### Méthodes analytiques sédimentologiques

La détermination de la nature et de la texture des sédiments, prélevés par piluliers et prélevés au niveau du plancher stalagmitique, a été réalisée par :

- Des observations exoscopiques à la loupe binoculaire et au microscope optique des sédiments les plus grossiers prélevés à différents endroits du siphon (échantillons SC-3, SC-8, SC-6, SC-17, SC-18, SC-23, localisés sur la carte hors-texte).
- Des analyses minéralogiques par diffractomètre à rayons X : un DRX Inel™ avec détecteur courbe CPS 120, sur trois types de sédiments difficilement identifiables à la loupe : grains noirs, argilites des pentes latérales et concrétions pulvérulentes blanches des cascades (échantillons SC-20, SC-10, SC-21).
- Des analyses chimiques avec une micro-XRF pour une fraction de plancher stalagmitique du siphon.
- Des analyses granulométriques avec un granulomètre laser (MasterSizer™ hydroS 2000), des sédiments prélevés à différents endroits du siphon au pilulier (puis par carottage, voir plus loin).

Concernant les sédiments prélevés par carottages et par trappes, la granulométrie des sédiments a été étudiée avec un granulomètre Laser (MasterSizer™ Hydro 200 G) et la nature des sédiments avec un spectromètre à infra-rouge [Bertaux, 1997], modèle Nicolet 380 TF-IR Smart Diffuse Reflectance de

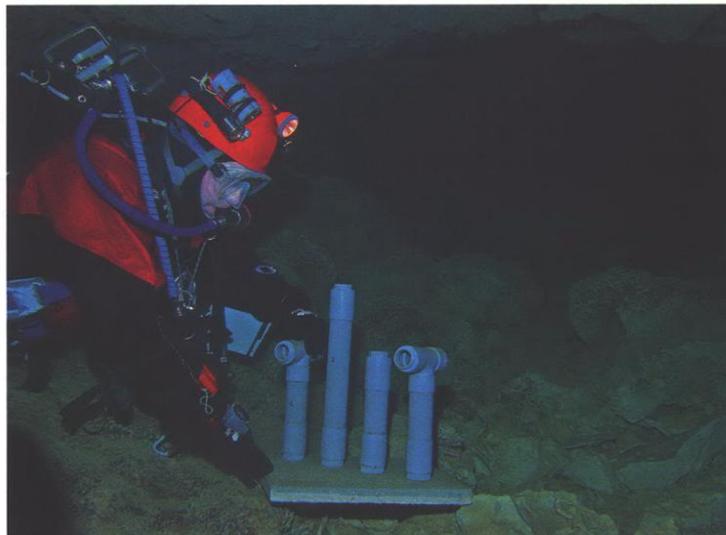


Photo 7 : Pose d'une trappe au point bas du siphon (-7 m). Notez la section réduite du conduit, les dépôts encroûtants (au fond) et les clastes au premier plan. Cliché S. Jaillet, 2008.  
*Laying of a trap at the lowest point of the siphon (deep -7m). Note the reduced section of the duct, encrusting deposits and clasts in the foreground.*

ThermoScientific™. L'échantillonnage des carottes a été effectué avec un pas de 5 mm.

Les analyses granulométriques ont été réalisées avec le logiciel Gradistat version 4.0 [Blott and Pye, 2001], selon la méthode des moments géométriques [Krumbein and Pettijohn, 1938].

#### Méthode de datation

Des mesures de radionucléides à courte période ( $^{210}\text{Pb}$  et  $^{137}\text{Cs}$ ) ont été effectuées au Laboratoire Souterrain de Modane par gamma spectrométrie [Reyss et al., 1995] et utilisées pour déterminer des taux de sédimentation selon la méthode employée en milieu lacustre et littoral [Appleby and Oldfield, 1978; Arnaud et al., 2006; Goldberg, 1963; Schmidt et al., 2007].

Des spéléothèmes noyés (aujourd'hui inactifs) et exondés (toujours actifs) ont été échantillonnés, sous l'eau ou au-dessus du

Photo 8 : Carottage dans une banquette latérale de limon argileux au point 108. Cliché S. Jaillet, 2008.  
*Coring in a lateral benches of silty clay at point 108.*



niveau d'eau, au marteau, pour réaliser des datations U/Th (photos sur la carte hors-texte). Les résultats de ces datations en cours permettront de mieux comprendre les modalités de l'ennoisement du siphon de Chevaline et seront exploités par ailleurs.

### III. Résultats des mesures hydrologiques

#### A. Débit, température et conductivité

Les débits mesurés sont très variables sur une année, allant de quelques décilitres en période d'étiage à

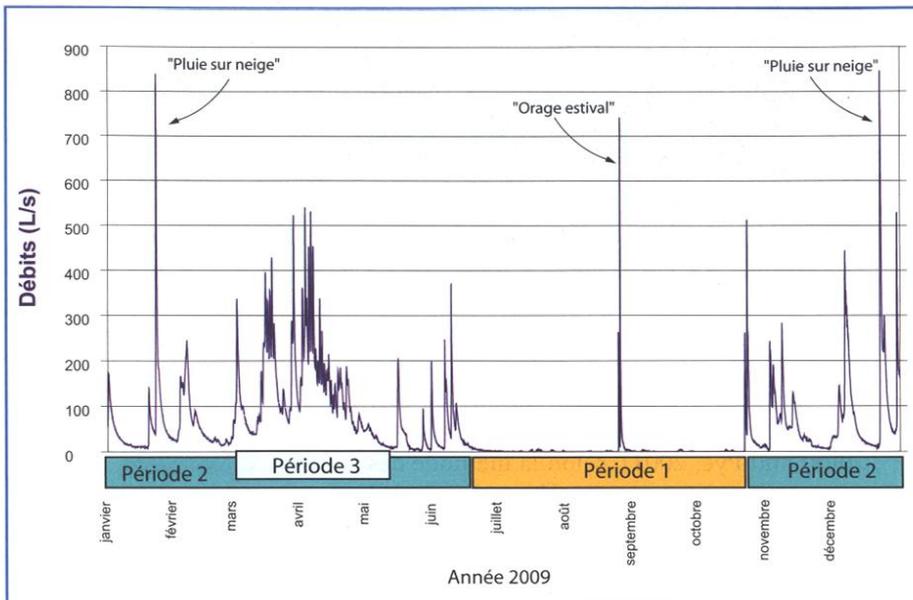


Figure 3: Hydrogramme annuel de la rivière Chevaline et ses principales périodes hydrologiques en 2009. Période 1: l'étiage estival et de début d'automne. Période 2: les hautes eaux de l'automne au printemps. Période 3: les crues de printemps. The annual hydrogram of Chevaline river and its main hydrologic periods in 2009. Period 1: low water during summer and early autumn. Period 2: high water from autumn to spring. Period 3: spring floods.

Chronique 2009	moyenne	minimum	maximum
Débit	55,36 L.s <sup>-1</sup>	< 1 L.s <sup>-1</sup>	845 L.s <sup>-1</sup>
Température	8,46°C	8,05°C	8,75°C
Conductivité	377 μS.cm <sup>-1</sup>	325 μS.cm <sup>-1</sup>	421 μS.cm <sup>-1</sup>

Tableau 1 : Principales données hydrologiques de la rivière de Chevaline en 2009, mesurées entre le siphon de Chevaline et la salle de la Cathédrale: moyenne et extrême des débits, température et conductivité. Main hydro data from Chevaline river, in 2009, measured between Chevaline sump and Cathedral chamber: average and extreme flows, temperature and conductivity.

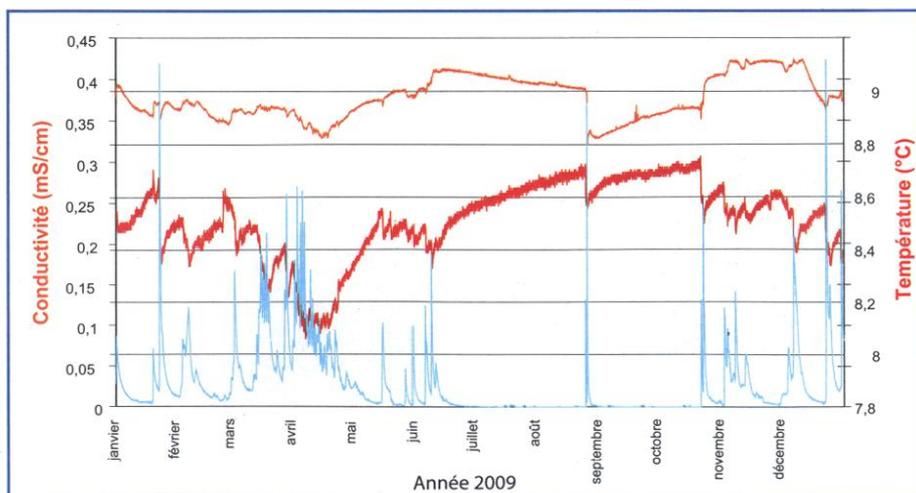


Figure 4: Conductivité et température des eaux souterraines de Chevaline, corrélées à l'hydrogramme (en bleu; voir figure 3). Conductivity and temperature of Chevaline underground waters, correlated with the hydrogram (blue color, cf. fig. 3).

plus de 800 litres par seconde en cas de forte crue (tableau 1 ; figure 3). Le débit moyen de 55,3 litres par seconde n'est pas représentatif en soi des écoulements de la rivière, mais il permet d'estimer le flux d'eau annuel en transit par la rivière à 1,76 million de m<sup>3</sup> d'eau par an.

La température moyenne annuelle des eaux est de 8,46°C. Elle varie entre 8,05°C et 8,75°C des périodes de crues printanières aux périodes d'étiage de fin d'été et d'automne (tableau 1 ; figure 4).

La conductivité moyenne des eaux est de 377 μS.cm<sup>-1</sup>. Elle varie de 325 μS.cm<sup>-1</sup> (en période de fonte nivale et lors des pics de crue importante) à 421 μS.cm<sup>-1</sup> (en période d'étiage estival et lors des premières crues d'automne) (tableau 1 ; figure 4).

#### B. Dynamique hydrologique annuelle

L'hydrogramme annuel et les mesures de conductivité - température de la rivière de Chevaline montrent trois périodes hydrologiques caractéristiques: l'étiage, la période des hautes eaux comprenant les crues de printemps (figures 3 et 4).

L'étiage estival se caractérise par des débits globalement très faibles (figure 3), une température élevée et une conductivité maximale des eaux (tableau 1), indiquant qu'elles atteignent, lors de cette période, leur équilibre thermique et chimique avec la roche encaissante. Cette période peut être affectée d'événements très brefs mais violents, des crues d'orage estival pouvant aller, comme près celui 26 août 2009, jusqu'à 750 L.s<sup>-1</sup>.

La période des hautes eaux s'étend du milieu de l'automne au printemps. Elle se caractérise par des successions de crues quasi bimensuelles, d'intensités moyennes (250 à 500 L.s<sup>-1</sup>) à fortes (845 L.s<sup>-1</sup>). Entre ces crues périodiques, le retour du débit se fait quasiment à l'étiage (inférieur à 20 L.s<sup>-1</sup>). Toutes les crues sont marquées par une baisse de température, mais cette baisse est d'autant plus forte qu'elle a lieu l'hiver. Contrairement à la haute montagne, à cette altitude modérée du massif, la couverture neigeuse n'est jamais vraiment stabilisée pendant la période hivernale et les épisodes pluie sur neige peuvent être fréquents. Les premières crues modérées de cette période voient apparaître un maximum de la conduc-

tivité des eaux, qui diminue ensuite au rythme des crues hivernales (figure 4).

La période des crues de printemps s'insère vers la fin de la période des hautes eaux, de début mars jusqu'à mi-mai. Elle se caractérise par des crues modérées quasi journalières d'intensité croissante au début du mois d'avril (400 à 500 L.s<sup>-1</sup>), puis décroissante jusqu'à début mai. Les eaux de ces crues sont les plus froides et les moins conductrices et correspondent à la fonte générale du manteau neigeux.

Les eaux de Chevaline sont donc proches de la saturation et relativement calmes durant l'étiage estival et automnal. Ensuite les débits augmentent au gré des pulsations des crues avec des eaux plus froides et moins minéralisées excepté pour les premières crues d'automne.

### C. Effet de site hydrologique dans le siphon

Les luidrographes, mis en place en différents points du siphon, permettent de mesurer les variations de pression hydrostatique induites par la mise en charge variable des galeries. Le dispositif installé ici visait à déceler d'éventuels diachronismes et différences de mise en charge dans le siphon au cours des crues.

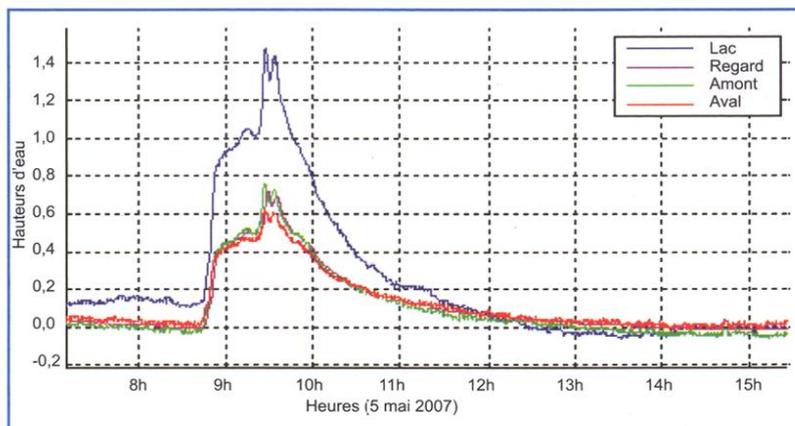
Les relevés hydrométriques réalisés avec ces luidrographes [Morel et al., 2013] ont permis de caractériser les effets du rétrécissement hydraulique du siphon (figure 5). Si la mise en charge de l'aval du réseau semble relativement synchrone entre le lac et le siphon, l'hydrogramme de crue du 5 mai 2007 montre que les hauteurs de mise en charge dans le siphon varient entre l'amont et l'aval au cours de la crue.

Au pic de crue, les zones amont et centrale subissent une mise en charge atteignant  $7,5 \cdot 10^3$  Pa, (eq. 75 cm) tandis qu'au même moment la variation n'est que de  $6 \cdot 10^3$  Pa (eq. 60 cm) à l'aval (figure 5), soit une perte de charge équivalente à 15 cm sur 67 m ce qui revient à une pente piézométrique de 0,22 % induite par le rétrécissement du siphon dans sa partie aval (carte hors-texte).

L'aval du siphon, tel un goulot, exerce un effet de frein hydraulique partiel des écoulements.

## IV. Observations géomorphologiques et morfo-sédimentaires

Le travail de cartographie exhaustive réalisé dans le siphon offre désormais un support clé pour la description géomorphologique et sédimentologique de cet espace noyé.



### A. La galerie du siphon de Chevaline

Le départ de la galerie noyée (de l'exutoire du siphon à son point bas à -7 m) peut être considéré comme un conduit de raccordement « récent » (carte hors-texte, photos I et J). C'est un conduit propre, tubulaire, exempt de sédiment. Il se poursuit, vers l'amont par une galerie variant de 2 à 8 m de diamètre selon les secteurs. Trois cloches d'air de quelques décimètres à quelques mètres de hauteur ponctuent le siphon. Plus en amont encore, la partie du lac-canyon (idem, points 308 à 207) devient plus étroite (1,5 m à 2 m par endroits) que l'aval. La galerie noyée (points 207 à 113) est donc en général plus large avec par endroits quelques rétrécissements temporaires ou dédoublements de galerie (points 106 et 204).

Entre les points 106 et 200 s'ouvre en rive gauche le regard (photo 9). C'est une dune de sable et d'argile rejoignant un conduit supérieur permettant d'accéder au milieu de la zone noyée. L'accumulation sédimentaire

Figure 5: Hydrogramme de la crue du 5 mai 2007 dans le siphon de Chevaline et le lac de la Cathédrale (données Luidrographe). Notez la charge hydraulique entre l'amont et l'aval du siphon, charge liée à l'étranglement du conduit dans la partie aval du siphon. En abscisses: les heures; en ordonnées: la pression en  $10^4$  Pa (équivalent à la hauteur d'eau en mètre).

*Hydrograph of the flood on May 5, 2007 in Chevaline sump and Cathedral lake (Luidrograph data). Note the hydraulic load between upstream and downstream of the sump, due to the constriction of the conduct in the downstream part. X-axis: hours, Y-axis: pressure in  $10^4$  Pa (equivalent to water height in meters).*

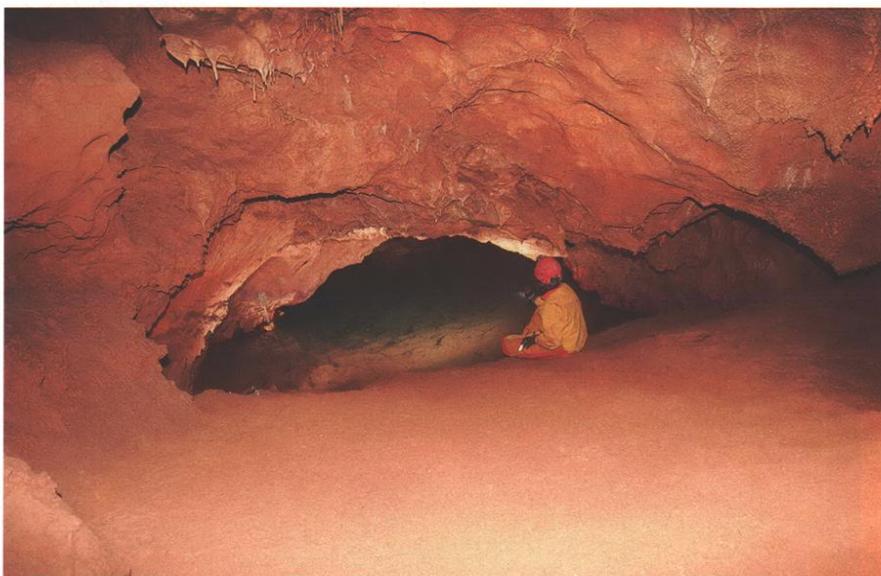


Photo 9: Le regard sur le siphon de Chevaline. Notez l'abondance des dépôts sableux au sol, provenant de variations anciennes de la surface du siphon. Cliché S. Jaillet, 2007. *The aperture on Chevaline sump. Note the abundance of sandy deposits on the ground, from ancient variations of sump surface.*

importante (essentiellement sableuse), présente à ce niveau, laisse supposer des débordements importants et récurrents du siphon dans ce secteur. Malgré la fraîcheur apparente de ce dépôt, aucune mesure ou observation récente ne laisse supposer que ce phénomène (plusieurs mètres de mise en charge) soit encore actif aujourd'hui. Les mesures de hauteur d'eau effectuées dans le siphon y compris à ce point ne dépassent en effet pas les quelques décimètres de mise en charge. Aussi s'agit-il d'un dépôt ancien et donc d'une dynamique sédimentaire ancienne, à raccorder sans doute à l'évolution géomorphologique complexe du site. Ce point n'est pas développé dans le présent article.

Les formes d'érosion sont rares et limitées à quelques secteurs plus resserrés de la galerie, là où justement les vitesses de circulations doivent être plus importantes en période de hautes eaux (photo 10). On note ainsi des formes de marmitage subaquatiques, des cupules dans les parois, mais aussi des entailles et incisions de remplissages affectant autant des dépôts argileux, sableux ou concrétionnés. Dans quelques secteurs, des formes de détente litho-statique, similaires à celles observées dans les galeries de Serpentine et de Coufin, ont été notées. Ces formes ont été cartographiées (carte hors-texte) et se développent essentiellement dans les secteurs les plus étroits de la galerie noyée.

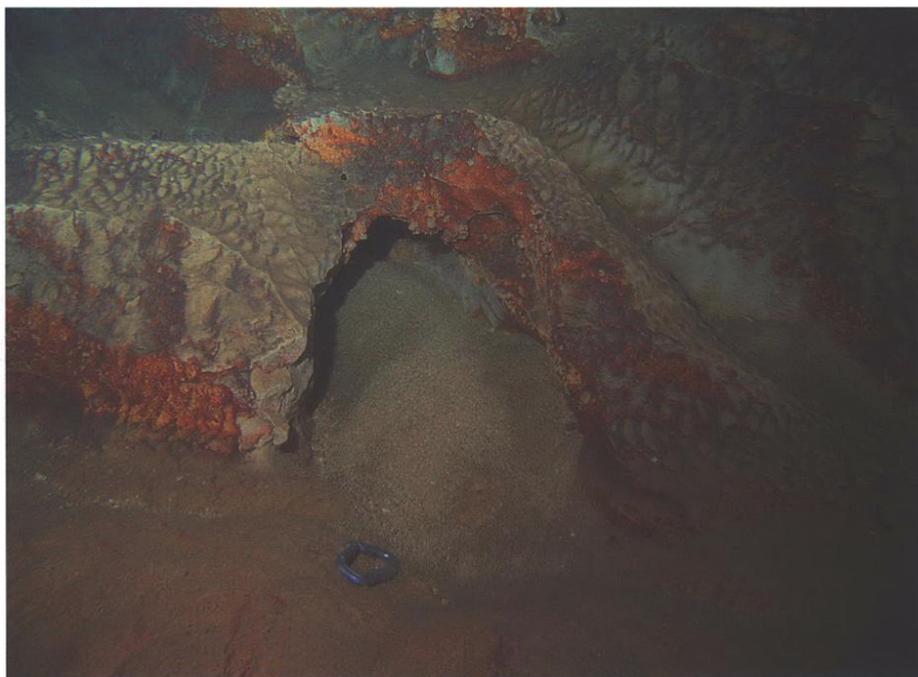


Photo 10 : Marmitages et cupules au point 203. Cliché V. Lignier. *Pot shapes and scallops at point 203.*

A partir des données topographiques et cartographiques, les surfaces des sections de galerie ont pu être calculées : les sections en eau du siphon varient de 25 m<sup>2</sup> à 138 m<sup>2</sup>, le long du siphon. Les volumes en eau des galeries étudiées ont pu être estimés : ils s'élèvent à 3 200 m<sup>3</sup> pour la partie lac-rivière (carte hors-texte : des points 309 à 207) et à 7 100 m<sup>3</sup> d'eau dans la partie galerie noyée (des points 206 à 113), soit un total de 10 300 m<sup>3</sup> d'eau contenue entre la cascade de Chevaline et l'exutoire aval du siphon.

### **B. Les dépôts sédimentaires, leurs morphologies et répartition dans la galerie du siphon**

Les dépôts, observables *in situ*, sont de deux types : des dépôts détritiques, sédimentés sur le fond et les pentes latérales des galeries et des dépôts chimiques, encroûtements carbonatés sur les parois et dans l'axe de la galerie, les blocs au sol et les spéléothèmes ennoyés.

#### *Les dépôts détritiques*

Ils sont de nature mixte, silico-clastique et carbonatée. Leur répartition granulométrique varie de l'amont vers l'aval, globalement des plus grossiers aux plus fins.

Hormis quelques zones à blocs de calcaire, résultant d'anciens éboulis maintenant encroûtés de calcite, les sédiments les plus grossiers sont des

graviers (quartz, calcaire, fragments de fistuleuses) et des galets argileux mous, visibles seulement en rive droite à l'amont du point 206, juste avant le début de la galerie noyée, où la galerie forme un coude à 90°. A cet endroit des résidus de sédiments anciens partiellement indurés, sont érodés.

Les sédiments meubles les plus grossiers sont des sables grossiers et moyens. Ils forment des mégarides progradantes, essentiellement dans la partie lac-canyon et l'amont de la galerie noyée (carte hors-texte, photo A), dans l'axe central de la galerie. Elles sont recouvertes de nombreuses rides linguïdes et dissymétriques (idem, photo C), ripple-marks progradantes vers l'aval. Au milieu de la galerie noyée, les dépôts sableux sont moins conséquents et plus fins ; ils présentent des rides longiformes orientées dans l'axe de la galerie par endroits (point 101) et des rides centimétriques perpendiculaires à l'axe de la galerie, asymétriques progradantes vers l'aval.

L'orientation de ces structures sédimentaires caractérise un écoulement dominant, variable (turbulent à laminaire), de l'amont vers l'aval, dans l'axe de la galerie.

Des limons se sont accumulés tout le long du siphon, principalement sur les bordures et, vers l'aval, dans les concavités latérales où les parois s'élargissent. Ils forment alors des pentes inclinées de 30 à 45° tapissant les bordures (idem, photo E). Aucune trace d'argile peignée n'a été observée dans ces banquettes latérales inclinées, ce qui indique un ennoisement pérenne de la galerie noyée.

En amont de la galerie noyée et dans le lac-canyon, les dépôts argileux semblent plus compacts. Au point 217, ils sont stratifiés et présentent des horizons noirâtres. Ils n'affleurent que latéralement sur de faibles surfaces, creusés de quelques décimètres par les sables grossiers qui les recouvrent de façon discordante, en grande partie par des mégarides progradantes (idem, photo B).

La localisation des dépôts semble fortement dépendante de la géométrie et des dimensions de la galerie. La cartographie réalisée montre tout au long du siphon, de nombreuses zones abritées, latéralement à l'axe de la galerie, permettant l'accumulation de dunes argilo-silteuses tandis que les zones de creusement et de dépôts grossiers sont

restreintes à la partie centrale et aux sections localement rétrécies (carte hors-texte, points 106-203-204). Les parties externes des méandres sont parfois recouvertes de matériaux fins qui présentent localement des surcreusements (points topo 206 à 215).

Les prélèvements et les carottages ont permis de préciser ces observations grâce à des analyses granulométriques et pétrographiques (voir *infra* V.D).

### Les dépôts chimiques

Deux types de dépôts concrétionnés sont observés dans le siphon : d'anciens spéléothèmes de la zone vadose aujourd'hui ennoyés (carte hors-texte, photos D, E et F) et des encroûtements phréatiques sur les parois. Les anciens spéléothèmes ennoyés prouvent que la galerie a connu durant un temps un fonctionnement vadose. L'une d'entre elle (idem, photo Fa) a été prélevée pour datation par U/Th (en cours).

Les parois et les plafonds noyés des zones les plus larges, principalement, sont tapissés de calcite pulvérulente dendritique. Au sol, cette précipitation se traduit, à partir du point 205, sous forme d'un pseudo-plancher stalagmitique, stratifié mais sans gours (idem, photo G). Par endroits, il apparaît recouvrir des formations mamelonnées avec des concrétions en « boules de choux-fleurs » décimétriques (idem, photo H). Du concrétionnement recouvre également les spéléothèmes ennoyés (idem, photo Ea).

Tout à l'amont du lac-canyon (en amont du point 309), au débouché de la cascade de la rivière Chevaline, on observe également ces précipitations sur les parois constamment arrosées par la chute d'eau et ses aérosols. Ces travertins pulvérulents sont régulièrement érodés par les crues de la cascade et alimentent la rivière vers l'aval de débris plurimillimétriques de calcite pulvérulente botryoïde.

## V. Analyses des dépôts sédimentaires et concrétionnés

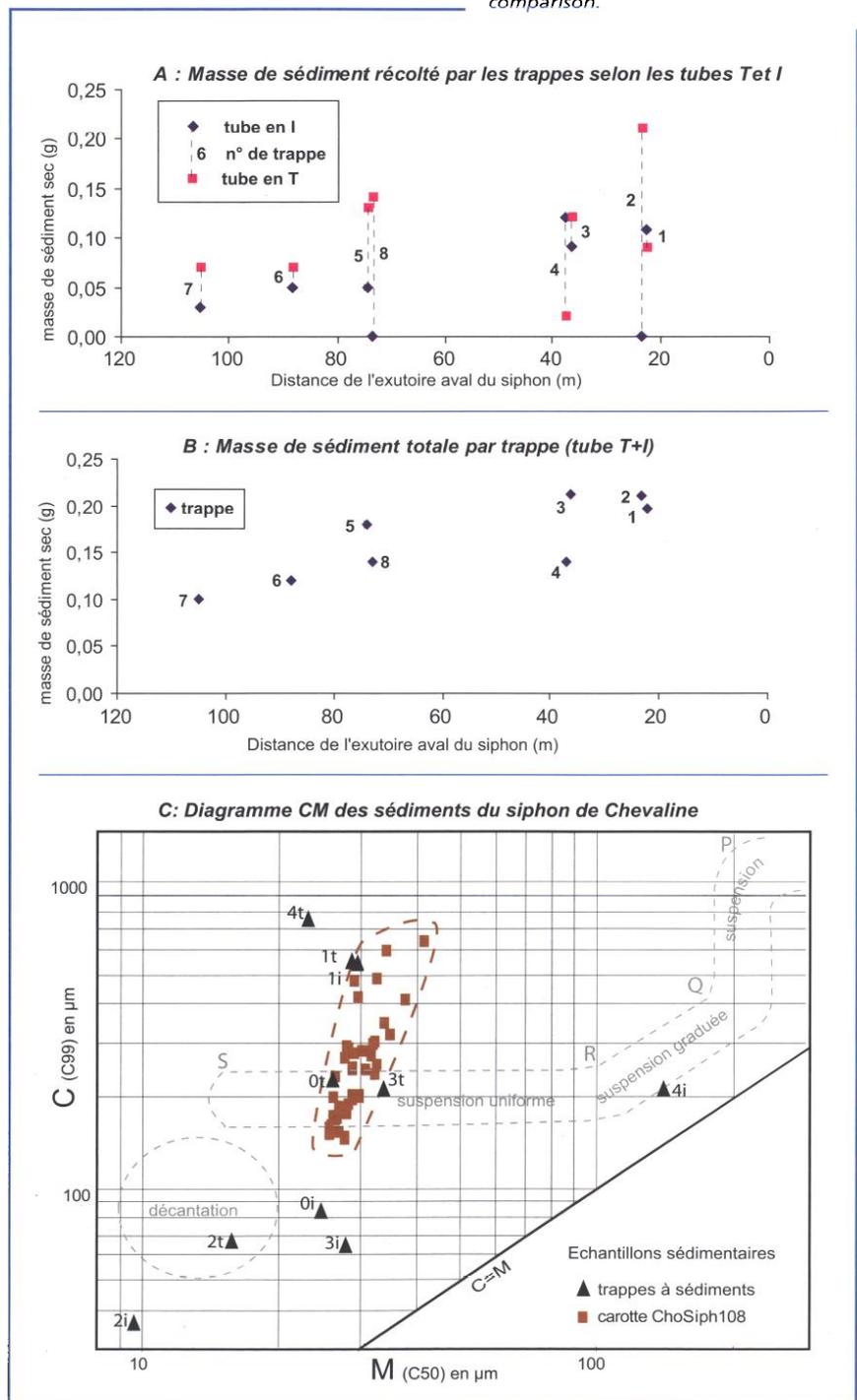
### A. Une approche du transfert sédimentaire actuel *in situ* : les trappes à sédiments

L'objectif de ces trappes à sédiment était d'identifier la charge solide en transit et la sédimentation au cours d'une année. La quantité de sédiment sec récolté entre novembre 2008 et octobre 2009 varie de 0,1 à 0,2 g par trappe (trappes 1 à 8), pour un sédiment à l'origine gorgé d'eau à 80 %. Les trappes situées dans la partie amont du siphon ont récolté le moins de sédiment. La quantité de sédiment piégée dans les trappes augmente

globalement vers l'aval du siphon (figure 6). Les tubes en T récoltent généralement plus de sédiment dans l'axe de galerie (2-3-5-6-7) tandis que les tubes en I récoltent davantage de sédiment vers l'aval dans les zones latérales plus abritées (1-4). Ceci pourrait traduire un transfert horizontal dominant dans l'axe de la galerie et une décantation verticale dominante dans les zones abritées latérales des galeries. La seule exception est la trappe 8 située au carrefour de l'exutoire perché de la galerie des sables.

Figure 6 : Analyses pondérale et granulométrique des sédiments récoltés dans les trappes expérimentales, disposées dans la galerie noyée du siphon de Chevaline (voir texte). En abscisses, M est la médiane, taille du centile médian C50; en ordonnées, C est le centile le plus grossier (C99). Les données de la carotte Chosiph108 ont été reportées à titre de comparaison.

*Weight and size analyses of sediments collected by the experimental traps that have been set up in the flooded gallery of Chevaline sump (see text). X-axis: M is the median percentile size (C50); Y-axis: C is the coarsest percentile (C99). Core data of ChoSiph108 are indicated for comparison.*



La granulométrie n'a pu être réalisée que sur les trappes de l'aval (1 à 4) faute de matériel suffisant pour les trappes de l'amont (5 à 8). Elle montre que les sédiments récoltés par les deux types de tubes (T et I) sont dominés par les silts argileux et se placent près des domaines de la suspension uniforme et de la décantation, proche pour partie, du domaine des banquettes argileuses aval (Chosiph108) dans une image CM (voir *infra* 5.D et figure 6).

## B. Dépôts détritiques récents dans le siphon : nature et texture

### Nature des dépôts récents :

Le prélèvement, *in situ* et par pilulier, de sédiments en surface des corps sédimentaires, dans la rivière amont et le siphon a permis de compléter la cartographie morpho-sédimentaire et d'identifier la nature et la texture des sédiments récemment déposés (cf. *supra* 4.B)

Les sédiments grossiers (sables) ont été échantillonnés à l'amont (SC-3, SC-6, SC-8, SC-17), au milieu du siphon dans les anfractuosités du plancher stalagmitique (SC-9, SC-10), au centre de la galerie (SC-13, SC-19), dans le paléo exutoire latéral au milieu du siphon (SC-23, voir carte hors-texte). Ils sont composés de trois fractions : une fraction terrigène non carbonatée et une fraction carbonatée allochtone (terrigenne et biogène), provenant de la roche encaissante et du bassin versant. La troisième fraction est carbonatée autochtone (précipitée et biogène) formée *in situ* et remaniée dans la cavité.

La fraction terrigène non carbonatée est constituée de :

1. grains de quartz de formes variées (photo 11 A) : ronds mats, émoussés luisants, anguleux peu usés.
2. grains noirs d'oxydes (photo 11 B) : les analyses DRX ont révélé la présence de quartz, d'oxydes de manganèse (birnessite, todorokite et groutellite), d'oxydes de titane et d'oxyde de fer (magnétite).
3. des fragments de charbon (visible à la loupe et identifié sous forme de carbone au DRX). Ils sont peu nombreux et se retrouvent souvent accumulés avec les grains de calcite pulvérulente botryoïde (voir ci-après).

La fraction carbonatée allochtone est constituée :

4. de carbonates détritiques : des lithoclastes, grains de calcaire, avec parfois des dendrites de manganèse, des inclusions de quartz et d'oxydes et des clastes de macrocristaux plus ou moins émoussés et clivés correspondants à l'érosion de calcite drusique (érosion de spéléothèmes) (photo 11 D).
5. de carbonates biogènes hérités (photo 11 C) : bioclastes d'échinoderme, d'éponge calcaire, de coraux, de bryozoaires, de dents de requin et des foraminifères (orbitolinidés).

La fraction carbonatée autochtone est constituée :

6. de carbonates précipités *in situ* et remaniés : des pseudo-lithoclastes (photo 11 D) de grains de calcite pulvérulente, précipitée en pelotes de

myriades de microcristaux. Ils correspondent à des fragments de concrétions que l'on retrouve au niveau des travertins des zones de cascade, dans les zones phréatiques actuelles sur les parois et sur les différentes générations de fil d'Ariane. On trouve aussi des fragments de calcite flottante.

7. une fraction biogène autochtone subactuelle : des coquilles de microgastéropodes stygobies (famille des hydrobiidés principalement, photo 11 E).

Le sable SC-23, prélevé dans le regard au-dessus du siphon, présente la particularité de n'avoir qu'une composante terrigène constituée d'éléments non carbonatés et de lithoclastes. On n'y observe ni pseudo-lithoclastes ni bioclastes. Les grains de quartz non usés sont prédominants.

Les fractions fines ont également été échantillonnées au pilulier sur les banquettes latérales (SC20), en milieu de galerie (SC19 et SC13).

Leur analyse au DRX a permis d'en déterminer la composition minéralogique en SC20 : il s'agit de micrograins de quartz et de calcite, d'argiles (vermiculite, dickite i.e. polymorphe de la kaolinite) et de phosphates de manganèse, de silicium et de magnésium hydraté (Newberyite).

### Granulométrie des dépôts détritiques récents de surface

Les sédiments de la partie amont présentent en majorité une granulométrie grossière unimodale de 300 à plus

Photo 11 : Principaux constituants des sédiments du siphon de Chevaline.

Clichés V. Lignier.  
Main components of Chevaline sump sediments.



Nom de l'échantillon	Type de sédiment	Mode 1 (µm)	Mode 2 (µm)	Médiane (µm)	C99 (µm)	Classement (Sorting σ) (µm)	Asymétrie (skewness Sk) (µm)
SC3	Sable grossier	1025,7	-	985	2187	1,537	-0,194
SC5	Sable fin silteux	295,8	-	224	830	3,512	-1,722
SC8	Sable grossier	590,2	-	635	1900	1,676	-1,753
SC9	Sable moyen silteux	447,7	-	417	1025	3,477	-2,228
SC13	Sable silteux	447,7	56,37	296,8	1437	4,744	-1,148
SC19	Sable fin silteux	257,7	42,76	62	700	4,834	-0,427
SC20fin	Silt sableux	32,44	-	21,57	490	4,293	-0,013
SC20grossier	Sable silteux	295,8	49,10	97,8	705	5,089	-0,639
SC23	Sable grossier	447,7	-	427	1440	2,854	-2,455

Tableau 2 : Caractéristiques granulométriques de sédiments de surface échantillonnés d'amont en aval de la rivière et du siphon de Chevaline. *Grain size characteristics of surface sediments, sampled from upstream to downstream in Chevaline river and sump.*

de 1000 microns et plutôt bien classée, dans les zones de dunes où leur mode et leur médiane sont assez proches (exemple des échantillons SC-3, SC-8, tableau 2). On note cependant des termes plus fins et moins bien classés sur les banquettes latérales (SC-5). Plus en aval dans le siphon la granulométrie est globalement plus fine et bimodale avec un premier mode pouvant aller jusqu'à plus de 400 microns dans l'axe de la galerie, et un second de 40 à 60 microns (SC-19, SC-13). Les anfractuosités du plancher, jouant le rôle de placer, piègent des sédiments plus grossiers (SC-9, point 204) au niveau des sections de galerie plus petites. Les dépôts fins de banquettes latérales présentent aussi une signature bimodale avec une fraction silteuse alternant avec des silts sableux (SC-20 fin et SC-20 grossier) (tableau 2).

Globalement, un tri granulométrique s'opère d'amont en aval en lien avec les sections de galeries contrôlant les variations locales de vitesses. Les élargissements de sections de conduits sont associés à une réduction de granulométrie des dépôts. A l'inverse, les rétrécissements de galerie voient des dépôts plus grossiers et triés, voire quasiment pas de dépôt.

Sur un diagramme CM [Passega and Byramjee, 1969] les sédiments de l'amont du siphon se placent dans le domaine d'un transport par roulement. Les sédiments de banquette latérale en amont de la galerie noyée présentent à la fois des termes fins, et de fines passées plus grossières. L'échantillon SC-20 correspondant se place dans le domaine de la suspension graduée à uniforme, polluée par l'apport de particules plus grossières.

Bien qu'ils soient dépendants du régime d'écoulement notamment [Miedema, 2010], on peut estimer un ordre de grandeur des vitesses du courant dans les différentes parties du siphon [Hjulstrøm, 1939]. En amont du siphon, au pied la cascade de Chevaline, les fortes crues érosives correspondraient à des courants supérieurs à  $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , tandis que les courants de dépôt des dunes de sable avoisineraient  $2\text{ à }5\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ . En revanche, dans la galerie noyée, la finesse des dépôts implique des courants plus lents variant de quelques centimètres à quelques milli-

mètres par seconde. Cela est en accord avec l'augmentation de la section d'écoulement de la cascade de Chevaline, vers le milieu de la partie noyée (voir section 1 à 10, carte hors-texte).

### C. Dépôts concrétionnés récents dans le siphon : nature et structure

Ces dépôts se traduisent principalement par un tapissage des voûtes et des parois du siphon de calcite pulvérulente et au sol, par des concrétions en boules et en pseudo-plancher stalagmitique.

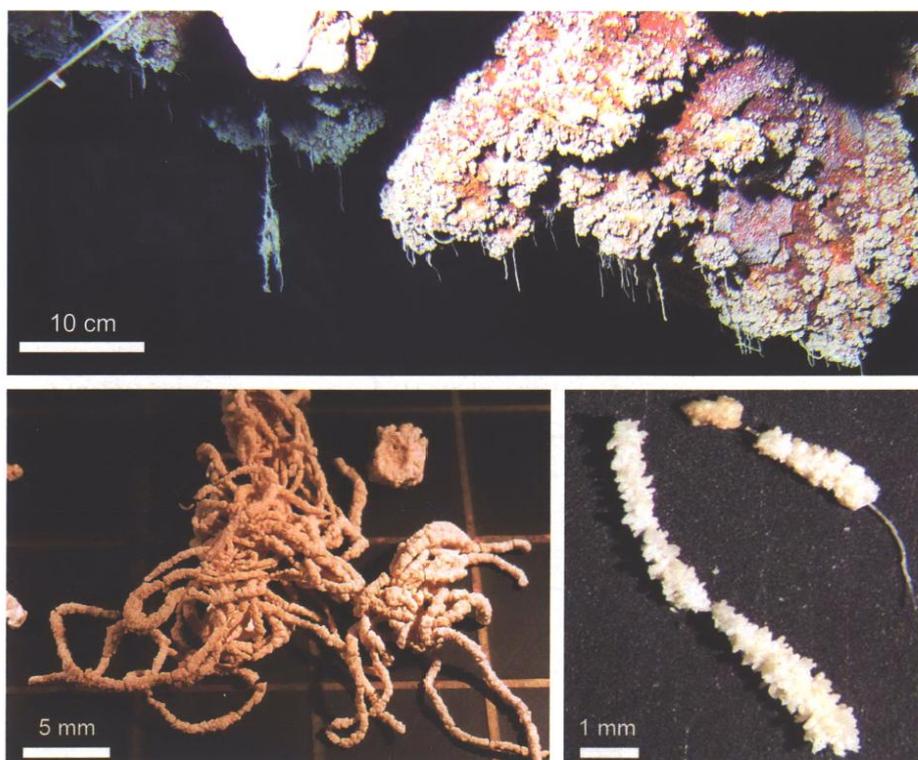
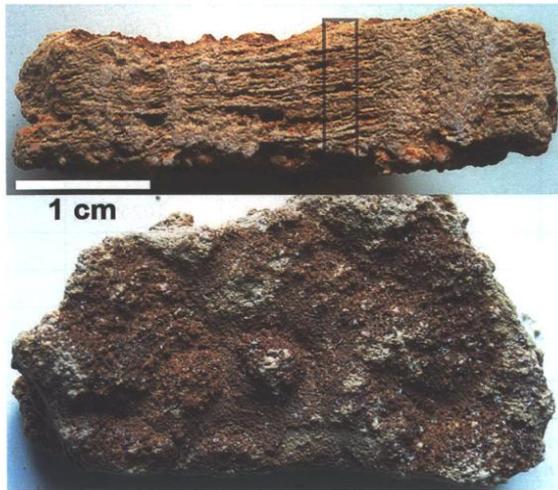


Photo 12 : En haut, encroûtements et filaments au plafond et en paroi du siphon au point topo 304. En bas à gauche : les filaments sont des débris de corde en nylon, encroûtés. En bas à droite : on distingue un filament de nylon et son manchon de calcite. Clichés V. Lignier. *Top, crusts and filaments on ceiling and wall of the sump, at point 304. Bottom left: the filaments are remnants of nylon rope, encrusted. Bottom right: a nylon filament covered by a calcite sleeve.*

Photo 13 : Fragment de pseudo-plancher stalagmitique phréatique. En haut : vue en coupe ; la structure laminée du plancher est due à des cimentations successives *in situ*, du sédiment silteux. En bas : vue de la surface supérieure du plancher ; les microformes globuleuses sont des encroûtements de calcite et d'oxydes des grains originels. Clichés G. Deves.



*Fragment of phreatic pseudo-flowstone.*

*Top: sectional view; the laminated structure is due to successive cementation*

*of silty sediments, in situ.*

*Bottom: view of the upper surface of the flowstone, the globular microforms are calcite and oxides crusts around the original grains.*

Figure 7 : Composition atomique par analyse XRF des lamines du pseudo-plancher stalagmitique du siphon de Chevaline. Elle corrobore une composition minéralogique faite de silicates (quartz, argiles), de calcite et d'oxydes métalliques. La forte teneur en calcium des lamines indurées correspond à une cimentation *in situ*, par de la calcite authigène, des sédiments détritiques.

*XRF analysis: atomic composition of the pseudo-flowstone laminae from Chevaline sump.*

*It confirms a mineralogical composition made of silicate (quartz, clays), calcite and metal oxides. The high calcium content of the hardened laminae indicates *in situ* cementation of detrital sediments, by authigenic calcite.*

### Les dépôts pulvérulents de parois

Ces encroûtements pariétaux témoignent d'une précipitation active et actuelle de carbonates dans le siphon. Le fil d'Ariane posé en 2003 lors d'une première reconnaissance a été en quelques années partiellement encroûté. Des résidus de filaments de nylon, restes d'une vieille corde des années 1960, abandonnée en amont, ont été dispersés par les crues sur les parois et dans les zones de sédimentation. Ils sont également manchonnés de cristaux (photo 12). Ces manchons présentent des myriades de petits cristaux de calcite à croissance centrifuge. Les sables carbonatés retrouvés dans les sédiments correspondent à des fragments de ce type de concrétion.

L'analyse au DRX de ces concrétions pulvérulentes révèle la présence de cristaux de calcite et de phosphate d'aluminium (Berlinite).

### Les concrétions dendritiques en boule

Certaines parties du sol non recouvertes de sédiments, principalement dans l'axe central de la galerie, présentent des formes mamelonnées, semblables à de gros choux-fleurs, décimétriques à métriques (carte hors-texte, photo H). Leurs surfaces ne présentent

aucune microstructure de type gour. Leur structure interne est constituée de gerbes dendritiques de calcite (idem, photo Hb) indiquant une cristallisation centrifuge multidirectionnelle par précipitation en milieu noyé, saturé en carbonate.

### Le pseudo-plancher stalagmitique

Dans les parties plus réduites de galerie, les concrétions en boules sont partiellement recouvertes d'un pseudo-plancher stalagmitique (idem, photo G) de quelques centimètres. Sa surface est rugueuse et irrégulière ; sa structure interne présente une fine lamination silteuse millimétrique alternant des lamines dures et meubles (photo 13).

L'observation à la loupe d'un fragment de pseudo-plancher révèle des lamines silteuses de nature proche de celle des sables du siphon (quartz, calcite, oxydes), alternant avec des lamines indurées par une cimentation apparente des grains.

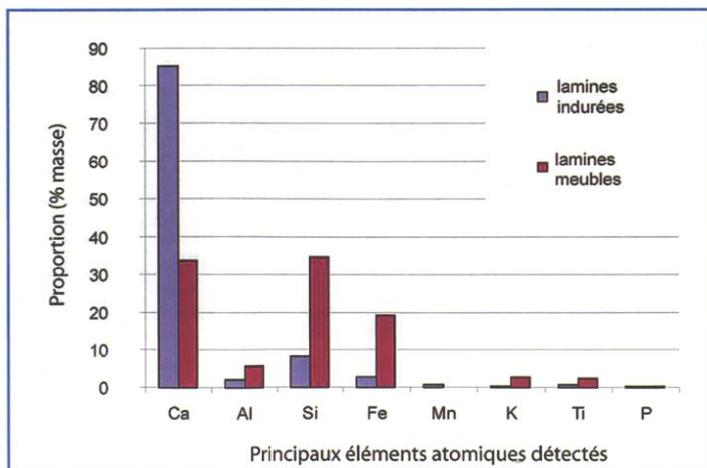
L'étude XRF de ce fragment a permis d'obtenir une analyse quantitative des constituants en éléments majeurs principaux des deux types de lamines (figure 7). Les éléments considérés représentent 99 à 99,8 % du sédiment. Des traces de Zirconium, Strontium, Soufre, Cuivre et Vanadium ont été décelées mais en quantités infimes (<0,15 %) et non présentées ici.

Les lamines meubles sont constituées principalement de Silicium, Calcium, Fer avec en moindre proportion Aluminium, Potassium, Titane et Phosphore. Les lamines indurées présentent une composition relative semblable pour la plupart des composantes à l'exception du calcium largement prépondérant à plus de 80 % de la masse du sédiment.

Ces observations corroborent les analyses minéralogiques des sables et des concrétions du siphon. Le pseudo-plancher correspond à des dépôts silteux de sédiments silicatés (quartz, argiles), carbonatés et d'oxydes métalliques régulièrement cimentés, encroûtés de calcite authigène (et d'un peu de phosphates), formant ainsi des lamines indurées successives. Un comptage grossier à la loupe en évalue la fréquence à une vingtaine de lamines par centimètre de pseudo-plancher.

### D. Dépôts détritiques anciens : signal, granulométrie, contenu minéralogique et radio-isotopique

Sont considérés ici comme « anciens », les sédiments situés sous la surface sédimentaire actuelle, constituant des séquences d'accumulation de plusieurs décimètres. Ils sont principalement accumulés dans les concavités latérales de galeries et peuvent être recouverts par l'érosion en amont (carte hors-



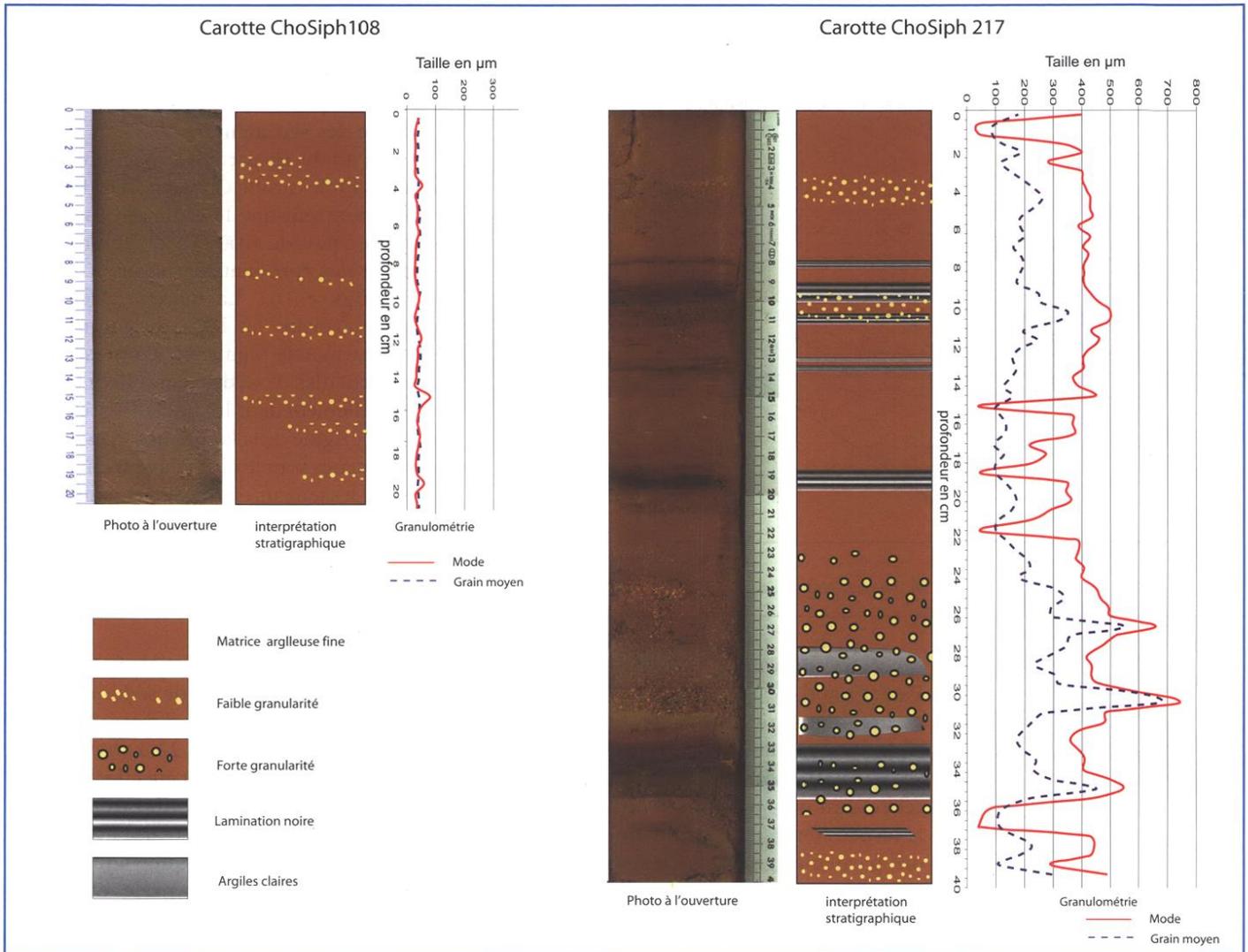


Figure 8 : Carottes ChoSiph217 et ChoSiph108 : description stratigraphique et granulométrique. Cores ChoSiph217 and ChoSiph108: stratigraphy and grain size description.

texte, photo B). Offrant les principales séquences stratigraphiques sédimentaires (archives potentielles) du siphon, ils ont été carottés afin de permettre leur étude en laboratoire.

#### Analyse des carottages sédimentaires ChoSiph 217-204 et 108

##### • Signal sédimentaire et granulométrie (carottes ChoSiph217 et ChoSiph108)

La carotte ChoSiph217 a été prélevée dans la partie amont du siphon (Lacanyon) et ChoSiph108 dans la partie aval du siphon (galerie noyée) [Lignier et Jaillet, 2010; Thomas, 2010]. Ces deux séquences se différencient nettement tant d'un point de vue granulométrique que du signal sédimentaire (figure 8).

La carotte ChoSiph217 présente une séquence de 40 cm stratifiée, dominée par les sables et les silts avec de grandes variations (tableau 3). Elle est marquée de niveaux noirs et de passées grossières à la base de la séquence. La lamination

observée semble en partie indépendante de la granulométrie. Les écarts entre le mode et le grain moyen [Blott and Pye, 2001; Krumbein and Pettijohn, 1938] dans l'essentiel de la séquence soulignent la répartition bimodale des grains entre les silts et les sables. Seules les passées sableuses grossières voient le mode et le grain moyen se rejoindre attestant d'événements de plus haute énergie. Quelques niveaux non visibles à l'œil révèlent un grain moyen supérieur au mode indiquant des épisodes dominés par les silts (figure 8).

La carotte ChoSiph108, prélevée à l'aval, semble quasiment homogène, tant d'un point de vue de la couleur que de la granulométrie. La séquence est essentiellement silto-argileuse et présente une constance remarquable. Quelques passées finement granuleuses apparaissent visuellement mais ne se traduisent pas par des fortes variations granulométriques (figure 8). La granulométrie présente tout le long de la carotte une répartition unimodale centrée sur les silts (tableau 3).

	ChoSiph108 (aval)			ChoSiph 217 (amont)		
	moyenne	Ecart-type	min-max	moyenne	Ecart-type	min-max
Sable	20,6 %	4.8	15 %-35 %	49 %	13.1	25 %-80 %
Silt	64,4 %	4	50 %-70 %	30 %	9,7	5 %-48 %
argile	25,3 %	1.3	21 %-30 %	13 %	5	3 %-25 %

Tableau 3 : Proportions volumiques statistiques des principales fractions granulométriques des carottes ChoSiph108 et ChoSiph217. Volume statistics of the main sediment fractions of cores Chosiph108 and ChoSiph217.

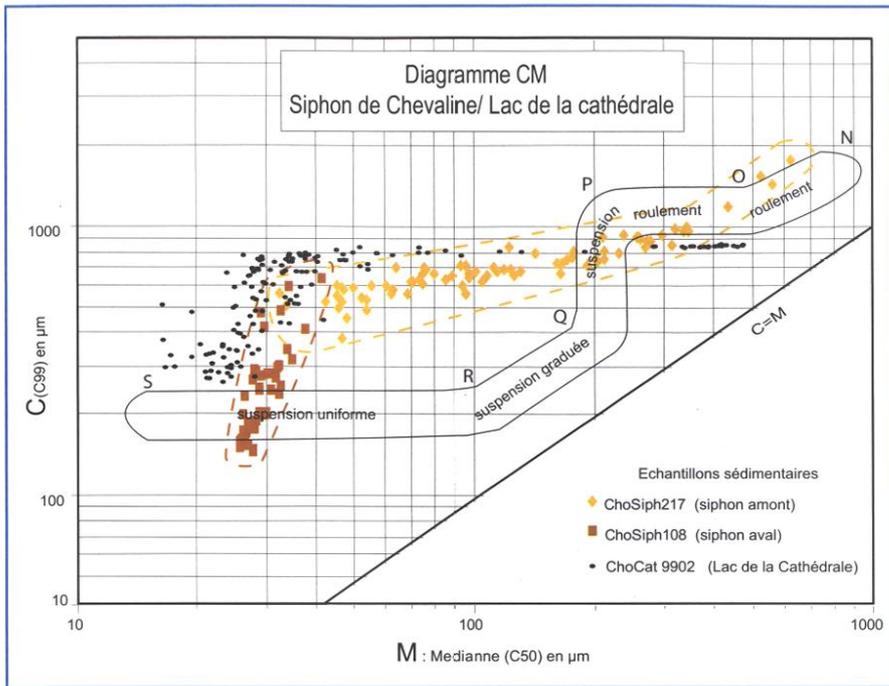


Figure 9 : Diagramme CM [d'après Passega, 1964] des sédiments carottés du siphon de Chevaline et du lac de la Cathédrale. CM diagram [from Passega, 1964] of cored sediments from Chevaline sump and Cathedral lake.

Sur une image CM [Passega, 1964 ; Passega and Byramjee, 1969], la différence de granulométrie entre l'amont et l'aval du siphon est aisément décelable (figure 9). La sédimentation dans la partie amont peut être reliée à un transport variant du roulement à la suspension graduée et uniforme, polluée par des particules grossières. La sédimentation en aval correspond à un transport plus calme,

se localisant vers la suspension uniforme également polluée de temps à autre par des particules grossières.

#### • Nature des sédiments

Les analyses par spectroscopie IR-TF réalisées sur la carotte ChoSiph 217 [Thomas, 2010] montrent que le sédiment est silico-clastique à plus de 40 à 45 % du volume, puis contient des carbonates à hauteur de 20 à 30 % (figure 10). La matière organique présente avoisine les 10 % du volume avec une remarquable régularité. La présence de fines particules d'oxydes, par ailleurs observés visuellement dans les fractions grossières, serait à l'origine de la lamination. Les teneurs en carbonates sont le plus souvent en opposition avec les teneurs en silicates et dominantes dans la plupart des épisodes grossiers du signal. Cette corrélation n'est plus vraiment valable dans les granulométries intermédiaires (< 0,4 mm).

#### • Mesures radio-isotopiques des sédiments

Afin obtenir un taux de sédimentation, des mesures de radionucléides à courte période,  $^{210}\text{Pb}$  (demi-vie = 22,3 ans) et  $^{137}\text{Cs}$  (demi-vie = 30,15 ans), ont été effectuées sur la carotte ChoSiph204. Cette carotte située entre les points 217 et 108 (carte hors-texte) présente des caractéristiques similaires à la carotte ChoSiph108 : prélevé sur les

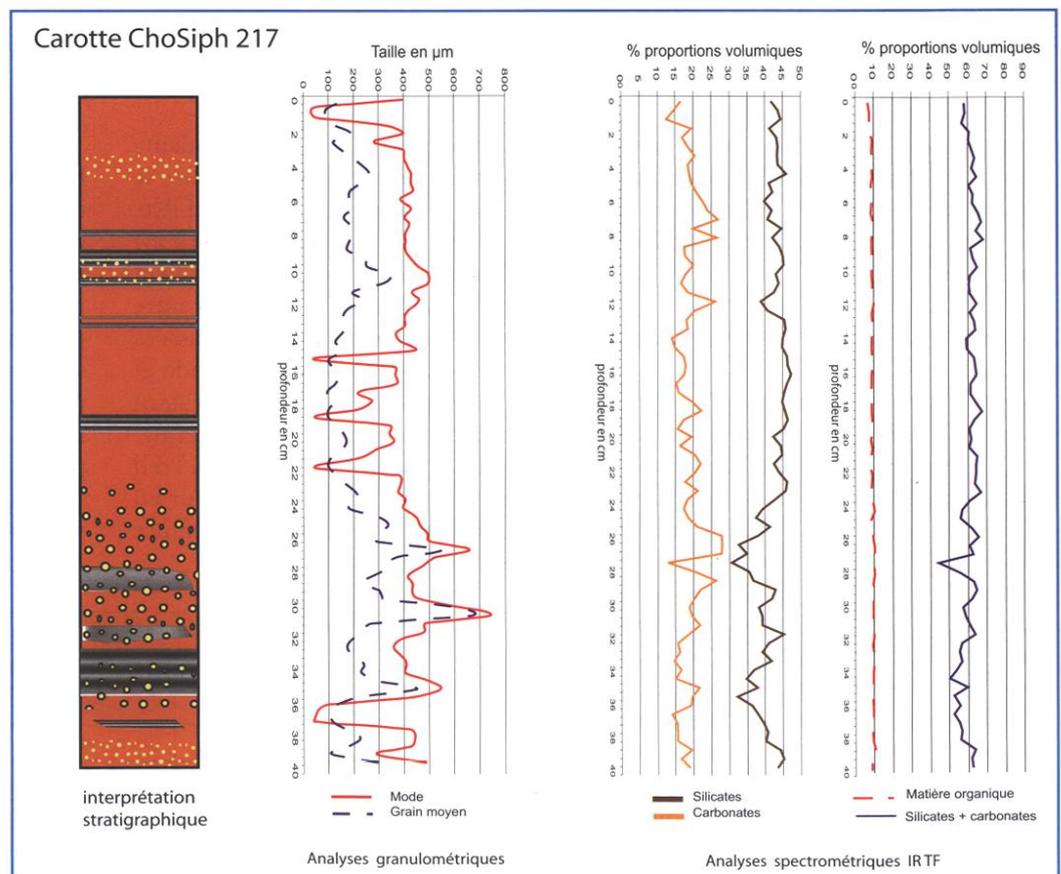


Figure 10 : Carotte ChoSiph217 : granulométrie et composition minéralogique (par spectroscopie IR-TF) des sédiments de la zone à l'amont du siphon de Chevaline (lac-canyon). ChoSiph217 core: grain size and mineralogical composition (by IR-TF spectroscopy) of sediments from the zone upstream of Chevaline sump (canyon-lake).

banquettes latérales inclinées, ce sédiment ne présente pas de lamination mais une granulométrie constante dominée par les silts argileux.

Dans cette méthode radio chronologique, on mesure la quantité de  $^{210}\text{Pb}$  dans le sédiment. Cette quantité contient le  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  dit « en excès » issu de l'atmosphère, dont la valeur décroît de façon exponentielle en un peu plus d'un siècle et le  $^{210}\text{Pb}$  « supporté » de valeur constante, issu des sédiments eux-mêmes. Si la décroissance du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  permet de calculer l'âge du sédiment, le  $^{210}\text{Pb}$  « supporté » constitue le bruit de fond du signal. Ici, les mesures de radionucléides montrent une activité du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  relativement faible (figure 11 & tableau 4) comparée à celle que l'on trouve dans la littérature [Arnaud et al., 2006 ; Schmidt et al., 2007 ; Wilhelm et al., 2012]. Les mesures de  $^{137}\text{Cs}$  montrent également de très faibles valeurs à la limite de détection (tableau 4).

## VI. Interprétation fonctionnelle de la sédimentation endokarstique et discussion des résultats dans le cadre d'études paléoclimatiques et paléoenvironnementales

Les observations et les données obtenues par cette étude approfondie du siphon de Chevaline, nous permettent d'envisager les modalités de la dynamique sédimentaire dans le siphon et de caractériser des effets de sites endokarstiques sur la sédimentation. Elles permettent également de préciser le rôle de cette zone siphonnante dans le transfert de sédiment plus en aval, vers le lac de la Cathédrale et de discuter de ses conséquences sur l'utilisation des sédiments détritiques souterrains comme archives paléoenvironnementales.

### A. Modalités de fonctionnement hydrologique et sédimentaire du siphon de Chevaline

#### Mode de fonctionnement hydrologique de la rivière et du siphon de Chevaline

Les données hydrologiques n'ont pour l'instant pu être traitées que sur l'année 2008-09, mais les caractéristiques de l'hydrogramme de la rivière de Chevaline (figure 3) reflètent assez bien les principales périodes hydrologiques annuelles.

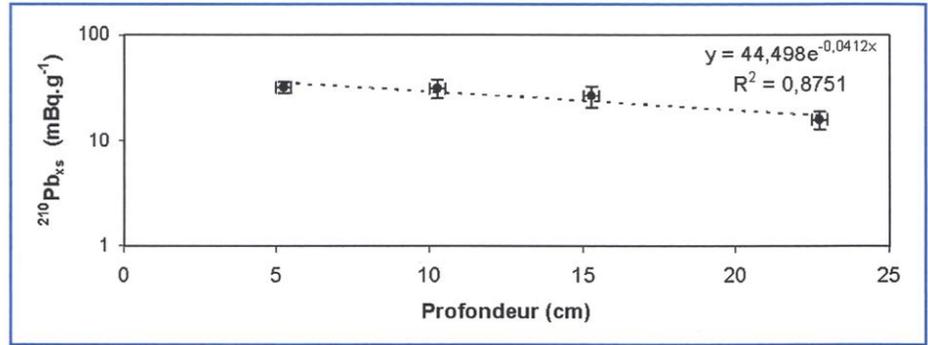


Figure 11 : Profil d'activité du  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  dans la carotte ChoSiph204. Ces valeurs sont très faibles et s'approchent des valeurs de  $^{210}\text{Pb}$  supporté dans les sédiments lacustres de surface, ce qui pourrait indiquer un sédiment relativement ancien (plus de 150 ans) en dessous de 5 cm de profondeur.  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  activity profile in the ChoSiph204 core. These values are very low and are close to values of supported  $^{210}\text{Pb}$  which are higher than those in lake surface sediments. This may indicate a quite old sediment (more than 150 years) below 5 centimeters deep.

Profondeur (cm)	$^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ en mBq.g <sup>-1</sup>		$^{137}\text{Cs}$ en mBq.g <sup>-1</sup>	
5,25	32,2	±3,79	-	±0,1
10,25	31,5	±6,43	0,1	±0,1
15,25	26,8	±6,10	0,2	±0,1
22,75	15,9	±3,06	-	±0,3

Tableau 4 : Valeurs d'activité du  $^{210}\text{Pb}$  et  $^{137}\text{Cs}$  à différentes profondeurs de la carotte ChoSiph204, prélevée dans une banquette argileuse du siphon de chevaline (mesures B. Wilhelm et J.-L. Reyss). Activity values of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  at different depth in the ChoSiph204 core, collected into a lateral silty bench of the Chevaline sump.

La période d'étiage s'étale principalement de la fin du printemps au début de l'automne. Elle se caractérise par un transit lent des eaux qui se minéralisent par infiltration dans l'épikarst puis l'endokarst. Ces eaux interstitielles fortement saturées, sont drainées vers la rivière souterraine et précipitent alors une partie de leurs carbonates vers l'aval du réseau. Dans les zones de cascades, malgré les faibles débits, se produisent des aérosols favorables au dégazage du  $\text{CO}_2$  et à la précipitation du carbonate de calcium formant des encroûtements travertineux plus ou moins pulvérulents et friables sur les parois. Les premières grandes pluies d'automne, purgent ensuite rapidement les eaux interstitielles vers l'aval en provoquant les premières séries de crues, plus « minéralisées » que celles d'hiver (figure 4). On peut reconnaître là un effet piston des pluies d'automne qui « chassent » les eaux du karst, minéralisées durant l'étiage estival dans le réseau [Aquilina et al., 2006].

La période des crues se prolonge ensuite de l'hiver au printemps avec un transit rapide dans l'endokarst d'eaux peu saturées et à débits très variables provenant des pluies et fontes nivales.

Ces eaux de ruissellement énergiques transportent des sédiments de l'amont vers l'aval mais érodent également les travertins pariétaux fragiles des zones de cascades souterraines, concrétionnées durant les écoulements d'étiage.

Le siphon ne présente pas de mises en charge très importantes, comme l'attestent les données des luirographes. Il génère cependant un frein hydraulique par ses variations de section et de volume en aval de la rivière dont il ralentit le courant, avant qu'elle ne reprenne un cours tumultueux jusqu'au lac de la Cathédrale plus en aval.

#### Nature et origine des sédiments

L'observation des constituants des sédiments, de leur nature et de leur forme, atteste leurs origines multiples.

Une partie des apports est extérieure à l'endokarst, issue de la surface du bassin versant et de l'érosion de l'encaissant d'âge crétacé ; l'autre partie, interne, provient de la production *in situ* par l'érosion des travertins des zones de cascades (photo de couverture).

Les apports externes sont injectés et transférés au gré des ruissellements sur le bassin versant et par des remobilisations de pièges sédimentaires en

amont dans le réseau souterrain. La similitude des sédiments des grandes galeries des réseaux supérieurs abonde en ce sens [Delannoy, 1997]. Les sédiments du lac de la Cathédrale sont tout à fait semblables [Perroux, 2005]. Les lithoclastes et les grains de quartz usés proviendraient de sources céno-mésozoïques, notamment des sables du Miocène et/ou de l'Albien. Ils sont diffusés avec effet retard vers l'aval du réseau bien que leurs sources originelles aient disparu depuis longtemps. Les grains d'oxydes, d'origine pédogénétique, proviendraient des altérites des dolines du plateau des Coulmes, associés à des argiles de décarbonatation et des sols [Delannoy, 1997 ; Perroux, 2005]. Les grains de quartz non usés, signent probablement des apports glaciaires quaternaires locaux. Ces quartz non usés ont gardé leur forme originelle et attestent donc une faible maturation des sédiments exogènes au cours de leur transport dans le réseau souterrain. Les fragments de charbons proviendraient en partie des activités de charbonnage médiéval, fréquentes sur le plateau et dont l'empreinte a été retrouvée également dans les spéléothèmes du réseau des grottes de Choranche [Delannoy, 1997 ; Perrette, 2000].

La partie endokarstique du sédiment est principalement constituée des grains de calcite drusique et de calcite pulvérulente. Cette dernière constitue une grande partie du sédiment déposé, notamment vers l'amont, dans les dunes de sables et ripple-marks du siphon (carte hors-texte, photos A-B-C). Si les fragments de calcite drusique proviennent de l'érosion d'anciens spéléothèmes (planchers stalagmitiques, stalagmites) de l'amont du réseau [Delannoy, 1997 et 1984], la calcite pulvérulente provient de l'érosion des travertins actuels des cascades juste en amont du siphon. On en retrouve de gros fragments au pied de la cascade au nord de la zone cartographiée (carte hors-texte, point SC1), et en grains de sable plus ou moins grossier tout le long de la rivière jusqu'au siphon. La présence de phosphates dans les eaux karstiques, exprimée dans les concrétions du siphon et dans les sédiments, est assez fréquente dans les milieux karstiques. La nature très variée des sédiments se caractérise donc par un mélange de sources allochtones de surface anciennes et de source autochtone endokarstique subactuelle.

### *Modalités et dynamique sédimentaire*

Les larges variations de débits rapportées par l'hydrogramme de la rivière de Chevaline, impliquent de forts contrastes de courant entre les périodes de crue, de décrue et d'étiage. Les sections de galerie présentent également des variations notables d'amont vers l'aval.

En périodes de crue, les eaux érodent les travertins des cascades souterraines et charrient toutes les granulométries et natures de grains jusqu'à la rivière et au siphon. Avec l'approfondissement et l'élargissement de la rivière juste à l'amont de la zone noyée, pour un même débit, la vitesse du courant diminue et les plus fortes granulométries sableuses sont déposées sur place au niveau des rides progradantes (carte hors-texte). Plus en aval, l'élargissement des sections des conduits induisent, à débit identique, une diminution de la vitesse.

Les sédiments dans l'axe de la zone noyée ont une signature granulométrique bimodale et mal classée. Il s'agit là de deux types de dépôts successifs (mélangés par l'échantillonnage au pilulier), alternant lamines de sable et de silts correspondant aux cycles de crue-décru. Les encoches latérales de galeries voient par contre l'accumulation de termes franchement silteux plus homogènes, caractérisant de fortes variations latérales de courant. Ces renforcements de galerie sont sujets à des courants « morts » plus ou moins isolés du flux principal de l'axe de la galerie. Plus en aval, les banquettes latérales dans la galerie sont dominées par les silts fins impliquant un transport dominé par la suspension uniforme et la décantation (carte hors-texte, Che-Sed108).

Les séquences carottées, comme l'analyse des sédiments de surface, montrent qu'un tri granulométrique s'opère d'amont vers l'aval. Il se traduit par un stockage hétérogène dans le temps et l'espace lié à la configuration des conduits : les sédiments grossiers sont essentiellement piégés à l'amont du siphon (lac-canyon) tandis que la plupart des fines transite par le siphon vers le lac de la Cathédrale en aval. Lors de la décrue, le courant ne permet pas encore le dépôt de fines en amont où les variations de direction et de section de la galerie sont notables avec de

probables écoulements turbulents à l'entrée de la zone noyée. Mais avec l'élargissement des conduits dans la zone noyée, les fines se déposent finalement plus facilement, en particulier dans les zones abritées. Vers l'aval, la réduction de section de la galerie réaccélère le courant et entraîne à nouveau un transit des sables fins et des fractions fines, sauf en toute fin de crue et début d'étiage où la sédimentation se fait par suspension uniforme et décantation dans les zones abritées de la galerie noyée (carte hors-texte, sections 11 à 15).

A l'étiage, avec de très faibles courants, des eaux déchargées de particules terrigènes et fortement saturées en carbonate, entraînent au centre de la galerie la cimentation des dépôts résiduels sableux sous forme de pseudo-plancher stalagmitique et la croissance des formations en boules (idem, photos G, H et D) ainsi que des encroûtements des plafonds. Les zones latérales ne sont que peu encroûtées par ces concrétions phréatiques (idem, photo Ea), probablement à cause de l'absence de courant et du non-renouvellement des ions pouvant précipiter.

En résumé, lors des crues, les dépôts sont essentiellement détritiques : l'amont piège les particules les plus grossières, tandis que les fines transitent directement sans dépôt par le siphon. Lors des décrues, le courant amoindri ne transporte plus que les fines qui se déposent plus en l'aval dans le siphon, surtout dans les renforcements de galerie, abrités du flux principal, entraînant des courants morts. A l'étiage l'eau sursaturée, circulant à très faible débit, dénuée de charge solide, précipite des dépôts de calcite sur le fond et les parois dans l'axe de la galerie. Dans les renforcements de galerie, le faible renouvellement de l'eau limite cette précipitation.

Les carottages effectués durant cette étude attestent ce fonctionnement dans le temps, probablement depuis le début de l'ennoisement du siphon.

Si les trappes à sédiments expérimentées ici permettent d'identifier en partie la charge solide en transit, elles ne reflètent que partiellement les dépôts en place. Elles corroborent cependant les mécanismes de dépôts dominant dans les différentes parties de la galerie : traction roulement dans l'axe de la galerie et suspension-décantation sur les banquettes latérales.

### **Une difficile datation des sédiments**

L'étude des radio-isotopes à courte période dans les sédiments de la carotte ChoSiph204 visait à déterminer un taux de sédimentation dans le siphon. Le calcul du taux de sédimentation selon le modèle CFCS « Constant Flux / Constant Sedimentation » [Appleby and Oldfield, 1978; Goldberg, 1963; Wilhelm et al., 2012] donne une valeur de 7,56 +/- 1,5 mm.an<sup>-1</sup>.

Les valeurs radiométriques de <sup>210</sup>Pb à 5 cm sont deux fois moins importantes que les valeurs décrites en milieu lacustre d'altitude ou côtier actuels [Arnaud et al., 2006; Schmidt et al., 2007; Wilhelm et al., 2012]. La pente de décroissance est également bien plus faible.

Le taux calculé est de ce fait anormalement élevé et peu cohérent au regard des contenus des trappes à sédiment. En effet d'après les trappes, le sédiment déposé équivaut à un taux de sédimentation de 1,5.10<sup>-2</sup>g.cm<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup>, ce qui revient, pour cette boue gorgée d'eau à 80 %, à un taux d'accumulation de 0,2 à 0,4 mm.an<sup>-1</sup>.

Si les trappes à sédiments expérimentées dans le siphon permettent d'identifier partiellement les matières solides en suspension, il n'est toutefois pas certain qu'elles soient adaptées pour estimer le taux de sédimentation. Elles pourraient ne piéger que partiellement les particules en transit sur le fond de la galerie et ne prélever que des sédiments en déplacement à plus de 15 cm de hauteur, ce qui exclurait les grains grossiers qui transitent par roulement et faible saltation sur le fond. Pour le vérifier, les résultats de la datation de la stalagmite ennoyée du point 204 (carte hors-texte, photo F) associés à un sondage de la base des sédiments, au même endroit, permettraient d'estimer un taux de sédimentation moyen sur l'ensemble de la séquence des banquettes latérales silteuses.

Selon les données radio-isotopiques présentées ici, le sédiment serait probablement âgé et la forte décroissance pourrait s'effectuer dans les premiers millimètres de sédiment non analysés cette fois-ci. Il est également fort probable que les valeurs observées correspondent au bruit de fond du <sup>210</sup>Pb supporté, qui pourrait être plus élevé que dans les lacs. En effet le radon, gaz à l'origine du <sup>210</sup>Pb, peut avoir de fortes

concentrations naturelles dans le karst, issu des roches encaissantes [Froidevaux et al., 2010; Parriaux et al., 2010; Von Gunten et al., 1996]. De nouvelles mesures avec une plus fine résolution dès les premiers millimètres ainsi qu'une évaluation du plomb supporté à plusieurs dizaines de centimètres de profondeur seraient nécessaires pour obtenir des datations plus fiables.

Les datations radio-isotopiques sur la carotte ChoSiph204 n'ont pas été concluantes, en partie parce que trop peu de radioéléments ont été détectés. Ceci peut être aussi expliqué de deux façons [Pourchet et al., 1997] : une production autochtone à l'abri des pollutions atmosphériques et un enfouissement ancien des sédiments, d'un âge supérieur à la période de désintégration du <sup>210</sup>Pb et du <sup>137</sup>Cs. Ces deux arguments sont corroborés par la nature avérée des constituants des sédiments : une source allochtone ancienne probablement stockée auparavant dans les amonts du réseau et de la calcite pulvérulente autochtone récente. A cela s'ajoute que l'origine et le caractère remanié des charbons, leur utilisation radiochronologique pour dater le sédiment, nécessitent la plus grande prudence.

### **B. Effets de site endokarstiques**

Tout comme dans les systèmes fluviaux de surface, les rivières souterraines transfèrent des sédiments des bassins versants de l'amont vers des zones de dépôt en aval. Mais dans le cas du siphon étudié, des effets de site endokarstiques signent les dépôts sédimentaires au cours de leur transfert.

#### **Un effet de site minéralogique : une évolution in situ du sédiment**

Si la fraction en provenance de la surface ne semble pas subir de maturation importante (peu d'usure ou de transformation des grains provenant de l'extérieur), l'apport de grains carbonatés (calcite pulvérulente) formés et érodés dans l'endokarst modifie sensiblement la composition du sédiment. En voyageant dans le karst, les sédiments sont enrichis en carbonates détritiques autochtones. La précipitation de calcite et la cimentation de sédiment *in situ* aboutissent également à des formations particulières en zones phréatiques comme les pseudo-planchers stalagmitiques et les concrétions en boules.

#### **Des effets de site géométrique : des pièges à sédiments très variés**

Dans l'endokarst la disposition des dépôts sédimentaires est contrôlée par la pente d'écoulement mais surtout par la géométrie des conduits avec un effet des variations de section sur la vitesse du courant et par conséquent sur la diversité granulométrique et spatiale des dépôts. Les rapides variations de pente et les alternances de sections vadose (rivière-lac) et noyée (siphon), entraînent à débit constant, de fortes variations de courant. Les larges zones noyées à faible pente exercent un effet de « décanteur à sédiment » le long du cours d'eau souterrain. Cet effet de site géométrique se traduit également par un contrôle spatial de la granulométrie et des structures des dépôts. Ainsi, la variabilité géométrique des sections du siphon induit une grande diversité de formes et de dépôts sédimentaires tout au long du siphon (carte hors-texte). Une complexité similaire peut être observée dans les torrents de montagne [Ployon, 2006]

#### **Des effets de site : une signature granulométrique endokarstique ?**

##### **Effet de site géométrique et spatialisation des séquences de crue**

Dans le lac de la Cathédrale, les séquences de crues se caractérisent par des alternances de lamines grossières à fines plus ou moins grano-décroissantes, empilées à la verticale [Perroux, 2005; Perroux et al., 2010]. Les séquences sédimentaires observées par carottage dans le siphon montrent que les sédiments sont globalement les mêmes que dans le lac, mais ne sont pas accumulés au même endroit. L'amont du siphon (ChoSiph217) ne piège que les séquences de fractions grossières de début de crue tandis que l'aval (ChoSiph108) n'accumule que les séquences de fractions fines de fin de crue. Les deux termes comparables à ceux du lac de la Cathédrale sur un diagramme CM sont ici séparés spatialement dans le siphon (figure 8). Si les sédiments endokarstiques sont de natures identiques, leurs modes de dépôt diffèrent selon les pièges sédimentaires lacustre ou siphonnant.

##### **Effet de site minéralogique et signature CM endokarstique**

La signature CM des sédiments endokarstiques de Choranche (diagramme reportant la taille du centile le plus

grossier (C99) en fonction de celle de la médiane M (=C50) ; figure 6), qu'ils soient du lac [Perroux, 2005] ou du siphon ne suivent pas les tronçons habituels définis par Passega [1964] (figure 8). Le domaine de la suspension graduée correspondant au tronçon Q-R n'est pas du tout couvert par les sédiments endokarstiques étudiés ici. D'autres sédiments détritiques endokarstiques, à l'aven d'Ornac notamment présentent les mêmes caractéristiques [Perroux, 2005]. Quelle peut être l'origine de cette signature CM particulière ? Dans l'évolution du sédiment présentée par Passega, la diminution de la médiane s'accompagne d'une diminution de la taille du centile le plus grossier (C99). Dans le cas des sédiments de Choranche, au cours de la décrue, la diminution de la médiane s'effectue avec un C99 quasiment constant avant une chute de C99 vers les termes les plus fins (figure 8). Ce qui signifie que si la majeure partie des grains du sédiment diminue de taille, une faible fraction reste grossière. Autrement dit, alors qu'une majeure partie du sédiment, plus fin, se dépose à partir d'un transport en suspension, quelques grains plus gros continueraient à rouler, ce qui impliquerait que leur densité soit plus faible que la majeure partie du sédiment. Or dans le siphon de Chevaline, ces deux termes sont clairement identifiés : les échantillons à fort C99 correspondent à la sédimentation grossière de l'amont, riche en clastes de calcite pulvérulente, tandis que les sédiments plus fins à faible C99 correspondent à la décantation en aval dépourvue de ces éléments. La calcite pulvérulente étant composée de pelotes de cristaux microscopiques de calcite

avec de nombreux pores entre eux, elle est de fait moins dense que le reste des grains du sédiment. Lors de la diminution du courant, les grains de calcite moins denses se déposeraient en même temps que les grains plus fins de la majeure partie du sédiment.

Cette signature granulométrique des sédiments endokarstiques de moyenne montagne révélerait donc la contribution autochtone de l'endokarst dans la composition du sédiment, par apport de calcite détritique, précipitée et remaniée *in situ*.

### C. Implications des effets de site et des pièges étagés, sur la pertinence de la sédimentation détritique comme archive paléoclimatique et paléoenvironnementale

L'étude des accumulations sédimentaires piégées dans l'endokarst à des fins paléoenvironnementales peut se baser sur des méthodes et postulats empruntés à l'étude des milieux de surface relativement stables comme les milieux lacustres ou palustres [Perroux, 2006]. Le fonctionnement des écoulements et de la sédimentation dans l'endokarst est modulé ici par l'étagement de pièges successifs. Dans quelle mesure les sédiments du lac de la Cathédrale ont-ils enregistré les variations environnementales du plateau des Coulmes ? Si les transferts d'eau semblent quasiment instantanés à l'échelle séculaire, il ne semble pas qu'il en soit de même pour les sédiments, transitant par de probables multiples zones de dépôts, remaniés plusieurs fois de l'amont vers l'aval au cours des crues successives. Si les études réalisées sur de grandes périodes de temps avec des

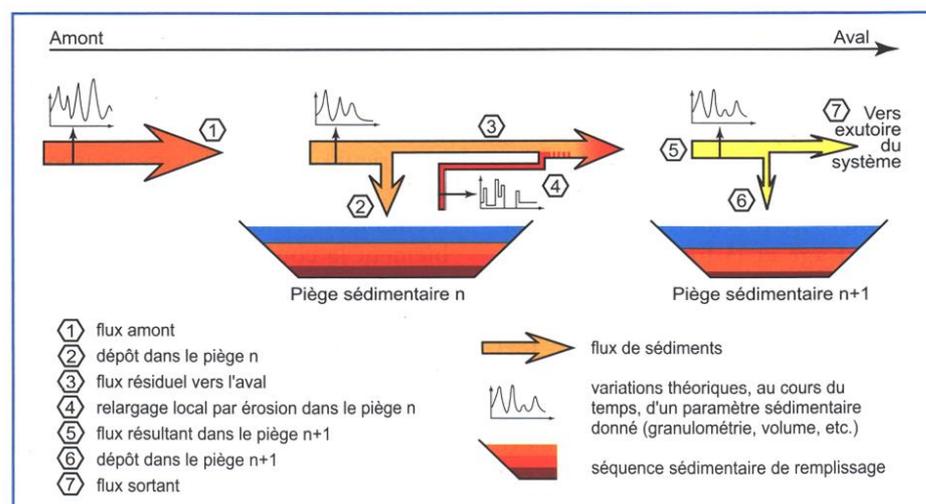
âges anciens semblent concluantes [Ford, 2006 ; Granger and Muzikar, 2001 ; Quinif and Maire, 1998 ; White, 2007], l'utilisation de sédiments détritiques endokarstiques plus récents semble délicate en tant qu'archives holocènes [Perroux, 2005 et 2008]. Les temps de résidence des sédiments exogènes dans l'endokarst pouvant être variables, le choix des radionucléides doit être adapté en conséquence. Ainsi, les radio-isotopes à courte période comme le  $^{210}\text{Pb}$  et  $^{137}\text{Cs}$  ne peuvent être utilisés que sur des sédiments dont le transfert a été rapide et le temps de résidence court dans l'endokarst amont, avant leur accumulation dans le piège sédimentaire final en aval. Des expériences de traçages minéralogiques pourraient être envisagées pour déterminer ces temps de transfert en fonction des classes granulométriques notamment.

D'autre part, la succession de pièges décanteurs, traversés par des flux érosifs réguliers peut entraîner un mélange chronologique des sédiments et rendre caduque les principes stratigraphiques utilisés pour les datations radiochronologiques (figure 12).

Une bonne compréhension du fonctionnement d'éventuels pièges étagés est donc nécessaire pour pouvoir appréhender la pertinence des enregistrements sédimentaires en aval d'un réseau karstique.

Dans le cas présent, le siphon de Chevaline semble jouer un rôle de décanteur sédimentaire en amont du lac de Choranche. En dépit des apparences, son volume en eau, qui avoisine les 7 100 m<sup>3</sup>, est deux fois plus important que celui du lac de la Cathédrale estimé

Figure 12 : Schéma conceptuel de fonctionnement de pièges sédimentaires étagés d'une rivière souterraine comme celle de Chevaline [modifié d'après Jaillet et Lignier, 2009]. Noter la série sédimentaire dans le piège n et celle « retournée » dans le piège n+1. Noter de même l'évolution des signaux sédimentaires détritiques en fonction de la variabilité du contrôle géométrique de certains tronçons de galerie. *Conceptual sketch of the functioning of stepped sediment traps in an underground river as the Chevaline river [modified after Jaillet & Lignier, 2009]. Note the reversal of sedimentary series between the two traps. Note as well the evolution of detrital sedimentary signals depending on the geometric controls of successive gallery parts.*



à 3 200 m<sup>3</sup>. Il piège visiblement l'essentiel de la fraction grossière provenant de l'amont mais une grande partie de la fraction fine semble cependant transiter vers l'aval. Ainsi le signal environnemental provenant de l'amont du système pourrait-il être modifié, par piégeage temporaire et relargage complexe depuis le piège sédimentaire n (ici le siphon de Chevaline) vers le piège n+1 (le lac de la Cathédrale) (figure 12). Ce transit des fractions fines par les crues est difficile à estimer. Seule une étude par prélèvement systématique des matières en suspension lors de ces crues sur une chronique annuelle permettrait de le quantifier.

Ce contrôle de la sédimentation du piège n+1 par le piège n génère des possibles retournements des séquences sédimentaires, ce qui pourrait expliquer les incohérences stratigraphiques des datations obtenues sur le lac de la Cathédrale [Perroux, 2006]. Les modalités de relargage (n°4, figure 12) des sédiments depuis le piège n vers le piège n+1 pourraient être contrôlées autant par les épisodes exceptionnels (contrôle externe) que par l'évolution propre du système (contrôle interne). L'évolution du gabarit du conduit à l'aval du siphon, par exemple, pourrait conditionner ce relargage. De même, une séquence sédimentaire accumulée dans le siphon (piège n) atteignant un certain seuil au cours du temps pourrait être remobilisée drastiquement au cours d'un simple épisode de crue, par cet effet de seuil. Ainsi un signal donné (variation continue ou régulière d'un paramètre donné) en entrée du système peut-il être modifié par un enregistrement discontinu, contrôlé par le système lui-même. C'est « l'effet de site », c'est-à-dire le contrôle interne, par le karst lui-même, de l'enregistrement sédimentaire de paramètres externes.

Malgré ce filtre, les sédiments du lac de la Cathédrale présentent des fractions grossières carbonatées (figure 8) [Perroux, 2005, 2006]. Cette fraction de carbonate grossier peut provenir du siphon mais pourrait aussi

provenir en partie de la zone cascadiante en aval de ce siphon, juste en amont du lac de la Cathédrale (figure 2). Cet espace intermédiaire, soumis comme la cascade de Chevaline à d'importantes précipitations carbonatées, pourrait donc aussi jouer le rôle de zone de « recharge » en particules grossières. Dans les deux cas, l'apport de ces particules dans la séquence sédimentaire du lac implique des crues suffisamment érosives mais aussi des temps minimum de reconstitution soit des travertins pulvérulents au cours de conditions physico-chimiques des eaux favorables, soit de la charge accumulée dans le siphon. Or ces conditions dépendent principalement des conditions climatiques extérieures (température, végétation). Ces particules ne semblent pas voyager loin, étant piégées par le premier « décanteur » en aval, contrairement aux sédiments allochtones fins. Elles pourraient constituer une piste d'étude intéressante, leur chimie étant relativement synchrone de celle des flux d'eaux dans le karst, comme les spéléothèmes. Elles pourraient constituer un indicateur paléoenvironnemental à tester. Auquel cas, l'étude de la fraction carbonatée endokarstique du sédiment détritique pourrait faire l'objet d'études ciblées.

### Conclusion

Il s'agit de la première étude exhaustive *in situ* de la sédimentation actuelle en zone noyée du karst, associant les approches géomorphologiques et sédimentologiques. Les investigations menées par plongée souterraine ont nécessité des adaptations méthodologiques sur le terrain.

La réalisation d'une cartographie morphosédimentaire du siphon de Chevaline a été le point de départ de cette étude et indispensable à l'analyse et la compréhension de la disposition des corps sédimentaires. Elle révèle au premier abord une grande variété de formes et de sédiments différents mais contemporains. Cette diversité apparente peut s'expliquer par les processus

dynamiques et chimiques qui affectent les eaux de l'endokarst au cours de l'année. La sédimentation détritique souterraine de Choranche est alimentée par des apports externes, issus du bassin d'alimentation du plateau des Coulmes. Elle est enrichie de carbonates, précipités et érodés *in situ*, sous forme de sables, au cours des alternances de périodes d'étiages et de crues. La géométrie des galeries, de la rivière et du siphon, conditionne la géométrie des dépôts et des tris granulométriques entre l'amont et l'aval à l'échelle du réseau. Le siphon, jouant le rôle de décanteur, piège dès l'amont, et restitue potentiellement, une partie des sédiments vers le lac de la Cathédrale. L'endokarst exerce des effets de sites géométriques et sédimentologiques tant sur la disposition, que sur la nature et la texture des dépôts.

La signature endokarstique de ces sédiments est originale et peut être expliquée par la dynamique des clastes de carbonates autochtones dans la sédimentation. Le type de piège, lac ou siphon, conditionne également la construction des séquences sédimentaires, le lac accumulant sur une verticale les séquences de crues, tandis que le siphon les sépare dans l'espace longitudinal, entre l'amont et l'aval.

La dynamique de la sédimentation décrite ici, explique en partie la difficulté d'obtenir des datations fiables de ces dépôts. Les dépôts sédimentaires étant probablement assez faibles, les temps de séjours, probablement élevés, des sédiments dans le karst limitent l'utilisation de radionucléides à courtes périodes à des fins chronologiques. En revanche, la genèse de gros grains carbonatés *in situ* correspond à des périodes de sursaturation en étiage. Ils pourraient être un indicateur climatique intéressant, constituant une piste d'étude à explorer. De nouvelles mesures plus fines des radionucléides seraient nécessaires pour établir plus clairement des taux de sédimentation fiables et mieux contraindre la dynamique de la mise en place de ces dépôts.

### Remerciements

Nous tenons à remercier la société des grottes de Choranche, Laurent Garnier son gérant et l'ensemble du personnel pour son accueil et les facilités apportées pour le bon déroulement des missions en plongée en amont de la partie touristique ou dans le lac de la Cathédrale lui-même. Merci à Carlos Placido pour son aide précieuse sur certaines plongées et à Isabelle Couchoud pour son assistance et son aide à l'amélioration de l'anglais. Jean-Louis Reyss et Bruno Wilhem nous ont permis d'obtenir les données radio-isotopiques sur les échantillons de sédiment et Bernard Fanget nous a aidés sur les mesures issues des trappes à sédiments. Nous tenons également à remercier vivement Richard Maire et Benoît Losson, pour la pertinence de leur relecture et leur participation à l'amélioration de l'article.

- APPLEBY P.G. and OLDFIELD F., 1978** - The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported 210Pb to the sediment. *CATENA* 5, 1-8.
- AQUILINA L., LADOUÇHE B. and DÖRFLIGER N., 2006** - Water storage and transfer in the épikarst of karstic systems during high flow periods. *Journal of Hydrology* 327, 472-485.
- ARNAUD F., MAGAND O., CHAPRON E., BERTRAND S., BOËS X., CHARLET F. and MÉLIÈRES M.-A., 2006** - Radionuclide dating (210Pb, 137Cs, 241Am) of recent lake sediments in a highly active geodynamic setting (Lakes Puyehue and Icalma-Chilean Lake District). *Science of The Total Environment* 366, 837-850.
- AUDRA P., 1994** - Karsts alpins, genèse de grands réseaux souterrains : exemples, les Tennengebirge (Autriche), l'île de Crémieu, la Chartreuse et le Vercors (France). *Karstologia-Mémoires* n° 5, 280 p.
- BERTAUX J., 1997** - Analyse minéralogique quantitative des sols et sédiments par spectrométrie IR-TF, in Rambaud, D. (Ed.), *L'échantillonnage : du prélèvement à l'analyse*, Colloques et Séminaires. ORSTOM, Paris, pp. 93-97.
- BLOTT S.J. and PYE K., 2001** - Gradistat: a grain size distribution and statistic package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms* 1237-1248.
- BRAVARD J.-P., 1983** - Les sédiments fins des plaines d'inondation dans la vallée du Haut-Rhône. *Revue de géographie alpine* 71, 363-379.
- DELANNOY J.-J., 1984** - Le Vercors: un massif de moyenne montagne alpine. *Karstologia* n° 3, 34-45.
- DELANNOY J.-J., 1997** - Recherches géomorphologiques sur les massifs karstiques du Vercors et de la transversale de Ronda (Andalousie) : les apports morphogéniques du karst. Université Joseph-Fourier-Grenoble I.
- DELANNOY J.-J., GAUCHON C., HOBLÉA F., JAILLET S., MAIRE R., PERRETTE Y., PERROUX A.-S., PLOYON E. et VANARA N., 2009** - Karst: from palaeogeographic archives to environmental indicators. *Géomorphologie: relief, processus, environnement* 83-94.
- DUBOIS C., LANS B., KAUFMANN O., MAIRE R. et QUINIF Y., 2011** - Karstification de type fantômes de roche en Entre-deux-Mers (Gironde, France). *Karstologia* n° 57, 19-21.
- FORD D.C., 2006** - Karst geomorphology, caves and cave deposits: A review of North American contributions during the past half century. *Special Papers-Geological Society of America* 404, 1.
- FORD D. and WILLIAMS P.W., 2007** - Karst hydrogeology and geomorphology. John Wiley & Sons, Chichester, England; A Hoboken, NJ.
- FROIDEVAUX P., STEINMANN P. and POURCELOT, L., 2010** - Long-Term and Long-Range Migration of Radioactive Fallout in a Karst System. *Environ. Sci. Technol.* 44, 8479-8484.
- GOLDBERG E.D., 1963** - Geochronology with 210Pb, in *Radioactive Dating*. Presented at the IAEA, Vienna, Austria, pp. 121-131.
- GRANGER D.E., FABEL D. and PALMER A.N., 2001** - Pliocene-Pleistocene incision of the Green River, Kentucky, determined from radioactive decay of cosmogenic 26Al and 10Be in Mammoth Cave sediments. *Geological Society of America Bulletin* 113, 825-836.
- GRANGER D.E. and MUZIKAR P.F., 2001** - Dating sediment burial with in situ-produced cosmogenic nuclides: theory, techniques, and limitations. *Earth and Planetary Science Letters* 188, 269-281.
- HJULSTRÖM F., 1939** - Transportation of debris by moving water. In: *Recent Marine Sediments*. Presented at the *A Symposium: Tulsa, Oklahoma*, American Association of Petroleum Geologists, Trask, Parker Davies. National Research Council (U.S.). Committee on Sedimentation, pp. 5-31.
- HSÜ K.J., 1989** - *Physical principles of sedimentology: a readable textbook for beginners and experts*. Springer-Verlag.
- JAILLET S., 2001** - Capture et réorganisations des écoulements souterrains dans le système karstique du Rupt-du-Puits (Lorraine-Champagne, France), in *Actes de la 11ème rencontre d'octobre*, Lisle-en-Rigault, pp. 123-145.
- JAILLET S. et LIGNIER V., 2009** - Premières observations géomorphologiques et sédimentologiques dans le siphon de Chevaline (Grottes de Choranche, Vercors), in *Actes Des Rencontres d'Octobre* n°19, Spéléo-Club de Paris, Saint Laurent-en-Royans, 81-88.
- KRUMBEIN W.C. and PETTIJOHN F.J., 1938** - *Manual of Sedimentary Petrography*. Appleton-Century-Crofts, New York.
- LIGNIER V., 2001** - Les sédiments lacustres et l'enregistrement de la paléosismicité: étude comparative de différents cas dans le Quaternaire des Alpes Nord-Occidentales et du Tien-Shan Kyrghyze. Thèse géologie, Univ. Savoie.
- LIGNIER V. et DESMET M., 2002** - Les archives sédimentaires quaternaires de la grotte Sous les Sangles (Bas-Bugey, Jura méridional, France) ; indices paléo-climatiques et sismo-tectoniques. *Karstologia* n° 39, 27-46.
- LIGNIER V. et JAILLET S., 2010** - Effet de site en zone noyée du karst: une cartographie morphosédimentaire à haute résolution du siphon de Chevaline des grottes de Choranche (Vercors, France), in *23ème Réunion des Sciences de la Terre*. Bordeaux, France.
- MIEDEMA S.A., 2010** - Constructing the Shields curve, a new theoretical approach and its applications. In: *Proceedings of the 19th World Dredging Congress*. Presented at the *WODCON XIX*, J Dobson, Beijing China, pp. pp. 732-750.
- MOREL L., JAILLET S., LIGNIER V. et MAIRE R., 2013** - Développement de pièges à sédiment pour l'étude des dépôts sédimentaires dans les grottes. *6ème Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation (C2I)*, CNRS, ESCPE Lyon.
- OYHANÇABAL B., 2005** - Explos à Couffin Chevaline 2001-2005. *Speleos*, bulletin du Groupe Spéléologique Valentinien n°94, pp.13-43.
- PALMER A.N., 2007** - *Cave geology*. Cave books Dayton, Ohio.
- PARRIAUX A., TURBERG P. et GANDOLLA M., 2010** - *Géologie et santé publique: contamination au radon, Tracés*. SEATU.
- PASSEGA R., 1964** - Grain size representation by CM patterns as a geological tool. *Journal of Sedimentary Research* 34.
- PASSEGA R. and BYRAMJEE R., 1969** - Grain-Size Image of Clastic Deposits. *Sedimentology* 13, 233-252.
- PEIRY J.-L., 1994** - Application de l'analyse statistique multivariée et de l'image CM des dépôts fluviaux à la reconstitution des paléoenvironnements fluviaux. L'exemple d'un bras mort du Rhône en amont de Lyon. *Quaternaire* 5, 59-67.
- PERRETTE Y., 2000** - *Etude de la structure interne des stalagmites: contribution à la connaissance géographique des évolutions environnementales du Vercors (France)*, Thèse Géographie, Univ. Savoie.
- PERRETTE Y., DELANNOY J.-J., DESTOMBES J.-L. et PEIRY J.-L., 2001** - Différents modes d'écoulement de la zone vadose du système de Choranche (Massif du Vercors, France). *Sciences et techniques de l'environnement*. Mémoire hors-série 269-272.
- PERROUX A.-S., 2005** - *Les remplissages détritiques endokarstiques. Contribution méthodologique à la lecture des mémoires paléogéographiques et environnementales. Application aux systèmes karstiques de Choranche (Vercors) et d'Ornagn (Bas-Vivaraïs)*. Thèse Géographie, Univ. de Savoie.
- PERROUX A.-S., 2006** - Intérêt des sédiments détritiques endokarstiques en tant qu'archive naturelle? Discussion autour des dépôts lacustres souterrains (Grottes de Choranche-Vercors). *Karstologia*, n° 47, 7-20.
- PERROUX A.-S., 2008** - *Caractérisation de l'effet de site dans l'enregistrement du signal climatique et anthropique dans les sédiments de grotte: de l'actuel à la préhistoire*. Rapport de Post-doc., laboratoire ADES UMR 5185 CNRS.
- PERROUX A.-S., MAIRE R., DELANNOY J.-J. et LIGNIER V., 2010** - Les sédiments détritiques endokarstiques. *Grottes et karsts de France*, *Karstologia-Mémoires*, n° 19, 78-79.
- PLOYON E., 2006** - Dynamique des potentialités d'archivage sédimentaire dans les systèmes fluviaux de montagne: approche morphologique. L'exemple de la Gresse (Isère, France) in *L'érosion entre société, climat et paléoenvironnement*, p.120-126.
- POURCHET M., PINGLOT J.-F. and MÉLIÈRES M.-A., 1989** - Cesium 137 and Lead 210 in alpine lake sediments: measurements and modeling of mixing processes. *Journal of Geophysical Research* 94, 12761-12.
- POURCHET M., MÉLIÈRES M.-A., SILVESTRU E., LOIZEAU J.-L., RAJKA G., CANDAUDAP F. and CARBONNEL J.P., 1997** - Radionuclides in a cave sediment core from Ghetarul de sub Zgurasti (Romania). Presented at the *Symposium International OM2, Observation de l'environnement de montagne en Europe*, Bulgarie, pp. 259-266.
- QUINIF Y., 2010** - *Fantômes de roche et fantômi-sation. Essai sur un nouveau paradigme en karstogénèse*. *Karstologia-Mémoires* n° 19, Mons, 196 p.
- QUINIF Y. and MAIRE R., 1998** - Pleistocene Deposits in Pierre Saint-Martin Cave, French Pyrenees. *Quaternary Research* 49, 37-50.
- QUINIF Y. et MAIRE R., 2007** - La grotte Quentin (Hainaut, Belgique) : un modèle d'évolution des fantômes de roche. In *Le karst, indicateur performant des environnements passés et actuels*, *Karstologia-Mémoires* n° 17, p. 214-218.
- QUINIF Y. et BRUXELLES L., 2011** - L'altération de type « fantôme de roche » : processus, évolution et implications pour la karstification. *Géomorphologie: relief, processus, environnement* 349-358.
- REYSS J.-L., SCHMIDT S., LEGELEUX F. and BONTÉ P., 1995** - Large, low background well-type detectors for measurements of environmental radioactivity. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 357, 391-397.
- SALVADOR P.-G., BERGER J.-F., GAUTHIER E. and VANNIERE B., 2004** - Holocene fluctuations of the Rhône River in the alluvial plain of the Basses Terres (Isère, Ain, France). *Quaternaire* 15, 177-186.
- SCHMIDT S., JOUANNEAU J.-M., WEBER O., LECROART P., RADAKOVITCH O., GILBERT F. and JÉZÉQUEL D., 2007** - Sedimentary processes in the Thau Lagoon (France): From seasonal to century time scales. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 72, 534-542.
- THOMAS M., 2010** - *Les pièges endokarstiques à sédiments détritiques fins. Fonctionnement, typologie et intérêt. Apport aux études paléogéographiques et paléoenvironnementales*, Mémoire de Master de Géographie, Univ. de Savoie.
- VERGARI A., 1998** - Nouveau regard sur la spéléogénèse: le « pseudo-endokarst » du Tournaisis (Hainaut, Belgique). *Karstologia* n° 31, 12-18.
- VON GÜNTEN H.R., SURBECK H. and RÖSSLER E., 1996** - Uranium series disequilibrium and high thorium and radium enrichments in karst formations. *Environ. Sci. Technol.* 30, 1268-1274.
- WHITE W.B., 2007** - Cave sediments and paleoclimate. *Journal of Cave and Karst Studies* 69, 76-93.
- WILHELM B., ARNAUD F., SABATIER P., CROUZET C., BRISSET E., CHAUMILLON E., DISNAR J.-R., GUITER F., MALET E., REYSS J.-L., TACHIKAWA K., BARD E. and DELANNOY, J.-J., 2012** - 1400 years of extreme precipitation patterns over the Mediterranean French Alps and possible forcing mechanisms. *Quaternary Research* 78, 1-12.