

Les grottes d'Azé (Saône-et-Loire, France) : de la roche altérée aux sédiments

Lionel Barriquand, Johan Barriquand, Jean-Marc Baele, Sylvain Dechamps, Ludovic Guillot, Richard Maire, Chantal Nykiel, Séverine Papier, Yves Quinif

Citer ce document / Cite this document :

Barriquand Lionel, Barriquand Johan, Baele Jean-Marc, Dechamps Sylvain, Guillot Ludovic, Maire Richard, Nykiel Chantal, Papier Séverine, Quinif Yves. Les grottes d'Azé (Saône-et-Loire, France) : de la roche altérée aux sédiments. In: Karstologia : revue de karstologie et de spéléologie physique, n°59, 1er semestre 2012. Karst et fantômes de roche. pp. 19-32;

https://www.persee.fr/doc/karst_0751-7688_2012_num_59_1_2713

Fichier pdf généré le 10/12/2018

Abstract

The Azé cave (south Burgundy), from alteration to ghost-rock.

The goal of this study was to gain a better understanding of the formation of the Azé Caves and the relationships which exist at this site between the surrounding rock and the sediments. A detailed study of the limestones from the Late Aalenian to the Early Bathonian which make up the surrounding rock shows that they contain considerable quantities of quartz and hundreds of ppm of manganese. Certain levels contain numerous siliceous cherts. From the Jurassic, the region underwent several phases of immersion. This period was also marked by a tectonic phase of weak amplitude. The faulting which occurred at this time allowed the circulation of meteoric water through the limestone leading to the dissolving of calcium carbonates and to phases of dolomitisation and dédolomitisation. As a result, "ghost rock" was created in the different stratigraphic units. However the hydrodynamism of these flows was weak and the alteration of the rock was isovolumic without evacuation of the alterite. During the Oligocene, the Méconnais region underwent a more severe tectonic phase. The structure of leaning blocks that we see today was put in place and the "ghost rock" was fractured by larger faults. As a result a hydrodynamic potential was created between the different sides of the massifs and the alterite was removed by water thus creating the caves. From that time on bacterial activity was able to develop on the walls of the cavities and in the residual alterite. The bacteria oxidised the manganese and iron contained in the limestone leading to the accumulation of manganese and iron oxide deposits in the limestone and on the walls, often in the form of structured encrustings. These bacteria were still active during certain periods of the Quaternary as shown by the discovery of deposits on bear bones. Under the effect of gravity, the least soluble limestone residues and the conglomerations of manganese formed by bacteria fell to the bottom of the caves or were carried away by flowing water. Depending on the hydrodynamic regime, these residues (clays, sands, gravels, pebbles) were to varying extents transported by water and were removed from or left behind in the caves. As a result, the sandy fractions of sediments deposited at the time of flows with the weakest hydrodynamism are mostly made up of these residues.

Résumé

Cette étude a pour objectif de comprendre la formation des grottes d'Azé et les relations qui existent entre l'encaissant et sédiments. Une étude détaillée des calcaires de l'Aalénien supérieur au Bathonien inférieur qui constituent l'encaissant montre qu'ils sont riches en quartz et contiennent quelques centaines de ppm de manganèse. Certains niveaux contiennent de nombreuses chailles siliceuses. Dès le Jurassique, la région connaît plusieurs phases d'émersion.

Cette période est également marquée par une phase tectonique de faible ampleur. Les failles qui en résultent permettent la circulation d'eau météorique dans les calcaires ce qui entraîne une dissolution des carbonates de calcium et des phases de dolomitisation et de dédolomitisation.

Des « fantômes de roche » se créent alors dans les différentes unités stratigraphiques. L'hydrodynamisme des écoulements est cependant faible, l'altération est iso-volumique et l'altérite n'est pas évacuée. A l'Oligocène, le Méconnais connaît une phase tectonique importante. La structure en blocs basculés actuelle se met en place et des failles importantes traversent les « fantômes de roche ». Un potentiel hydrodynamique se crée alors entre les différents versants des massifs et l'altérite est alors évacuée par l'eau donnant naissance aux grottes.

Dès lors une activité bactérienne peut se développer sur les parois des cavités et dans l'altérite résiduelle. Les bactéries, en oxydant le manganèse et le fer qui se trouvent dans le calcaire, les concentrent sous forme d'oxydes. Des amas et de véritables encroûtements structurés apparaissent dans le calcaire et sur les parois. Ces bactéries sont encore en activité à certaines périodes du Quaternaire comme en témoignent les dépôts découverts sur des ossements d'ours.

Les résidus les moins solubles du calcaire et les agglomérats de manganèse formés par les bactéries tombent par gravité dans les grottes ou sont arrachés au gré des écoulements d'eau. Suivant les régimes hydrodynamiques, ces résidus (argiles, sables, graviers et galets) sont plus ou moins transportés par l'eau et sont ou non évacués des grottes. Ainsi, les fractions sableuses des sédiments déposés lors des écoulements de plus faible hydrodynamisme sont constitués en grande partie de ces résidus.



Lionel BARRIQUAND^{1,2,3},
 Johan BARRIQUAND^{1,2,3},
 Jean-Marc BAELE⁴, Sylvain DECHAMPS⁵,
 Ludovic GUILLET^{2,3},
 Richard MARIÉ, Chantal NYKIEL^{2,3},
 Séverine PAPIER⁶ et Yves QUINIF⁶

(1) Association de Recherche paléocologique en archéologie,
 Département des Sciences de la terre,
 Université Claude Bernard Lyon 1, Géode,
 2 rue Raphaël Dubois, F-69622 Villeurbanne Cédex
 (2) Association Culturelle du Site d'Azé, Rizerolles, F-71260 Azé
 (3) Spéléo club Argilon, Les Lards, F-71170 Saint-Ignon-de-Roche
 (4) Service de géologie fondamentale et appliquée,
 Université de Mons, rue de Houvain, 9 – B7000 Mons
 (5) Laboratoire de Pétrologie sédimentaire, Université de Liège,
 place du 20 Août, 7 – B4000 Liège
 (6) UMR 5185 ADES, Maison des Suds,
 CNRS-Université Bordeaux 3, 12, esplanade des Antilles,
 Domaine Universitaire, F-33607 Pessac cedex

Les grottes d'Azé (Saône-et-Loire, France) : de la roche altérée aux sédiments

RÉSUMÉ : Cette étude a pour objectif de comprendre la formation des grottes d'Azé et les relations qui existent entre encaissant et sédiments. Une étude détaillée des calcaires de l'Aalénien supérieur au Bathonien inférieur qui constituent l'encaissant montre qu'ils sont riches en quartz et contiennent quelques centaines de ppm de manganèse. Certains niveaux contiennent de nombreuses chailles siliceuses. Dès le Jurassique, la région connaît plusieurs phases d'émersion.

Cette période est également marquée par une phase tectonique de faible ampleur. Les failles qui en résultent permettent la circulation d'eau météorique dans les calcaires ce qui entraîne une dissolution des carbonates de calcium et des phases de dolomitisation et de dedolomitisation.

Des « fantômes de roche » se créent alors dans les différentes unités stratigraphiques.

L'hydrodynamisme des écoulements est cependant faible, l'altération est isovolumique et l'altérite n'est pas évacuée.

A l'Oligocène, le Mâconnais connaît une phase tectonique importante. La structure en blocs basculés actuelle se met en place et des failles importantes traversent les « fantômes de roche ». Un potentiel hydrodynamique se crée alors entre les différents versants des massifs et l'altérite est alors évacuée par l'eau donnant naissance aux grottes.

Dès lors une activité bactérienne peut se développer sur les parois des cavités et dans l'altérite résiduelle. Les bactéries, en oxydant le manganèse et le fer qui se trouvent dans le calcaire, les concentrent sous forme d'oxydes. Des amas et de véritables encroûtements structurés apparaissent dans le calcaire et sur les parois. Ces bactéries sont encore en activité

à certaines périodes du Quaternaire comme en témoignent les dépôts découverts sur des ossements d'ours.

Les résidus les moins solubles du calcaire et les agglomérats de manganèse formés par les bactéries tombent par gravité dans les grottes ou sont arrachés au gré des écoulements d'eau. Suivant les régimes hydrodynamiques, ces résidus (argiles, sables, graviers et galets) sont plus ou moins transportés par l'eau et sont ou non évacués des grottes. Ainsi, les fractions sableuses des sédiments déposés lors des écoulements de plus faible hydrodynamisme sont constitués en grande partie de ces résidus.

MOTS-CLÉS : karst, fantôme de roche, altération, manganèse, sédiments, Azé, Mâconnais.

ABSTRACT: THE AZÉ CAVE (SOUTH BURGUNDY), FROM ALTERATION TO GHOST-ROCK. The goal of this study was to gain a better understanding of the formation of the Azé Caves and the relationships which exist at this site between the surrounding rock and the sediments. A detailed study of the limestones from the Late Aalenian to the Early Bathonian which make up the surrounding rock shows that they contain considerable quantities of quartz and hundreds of ppm of manganese. Certain levels contain numerous siliceous cherts. From the Jurassic, the region underwent several phases of immersion. This period was also marked by a tectonic phase of weak amplitude. The faulting which occurred at this time allowed the circulation of meteoric water through the limestone leading to the dissolving of calcium carbonates and to phases of dolomitisation and dedolomitisation. As a result, "ghost

rock" was created in the different stratigraphic units. However the hydrodynamism of these flows was weak and the alteration of the rock was isovolumic without evacuation of the alterite. During the Oligocene, the Mâconnais region underwent a more severe tectonic phase. The structure of leaning blocks that we see today was put in place and the "ghost rock" was fractured by larger faults. As a result a hydrodynamic potential was created between the different sides of the massifs and the alterite was removed by water thus creating the caves.

From that time on bacterial activity was able to develop on the walls of the cavities and in the residual alterite. The bacteria oxidised the manganese and iron contained in the limestone leading to the accumulation of manganese and iron oxide deposits in the limestone and on the walls, often in the form of structured encrustings. These bacteria were still active during certain periods of the Quaternary as shown by the discovery of deposits on bear bones.

Under the effect of gravity, the least soluble limestone residues and the conglomerations of manganese formed by bacteria fell to the bottom of the caves or were carried away by flowing water. Depending on the hydrodynamic regime, these residues (clays, sands, gravels, pebbles) were to varying extents transported by water and were removed from or left behind in the caves. As a result, the sandy fractions of sediments deposited at the time of flows with the weakest hydrodynamism are mostly made up of these residues.

KEY WORDS: karst, ghost rock, alteration, manganese, sediments, Azé, Mâconnais.

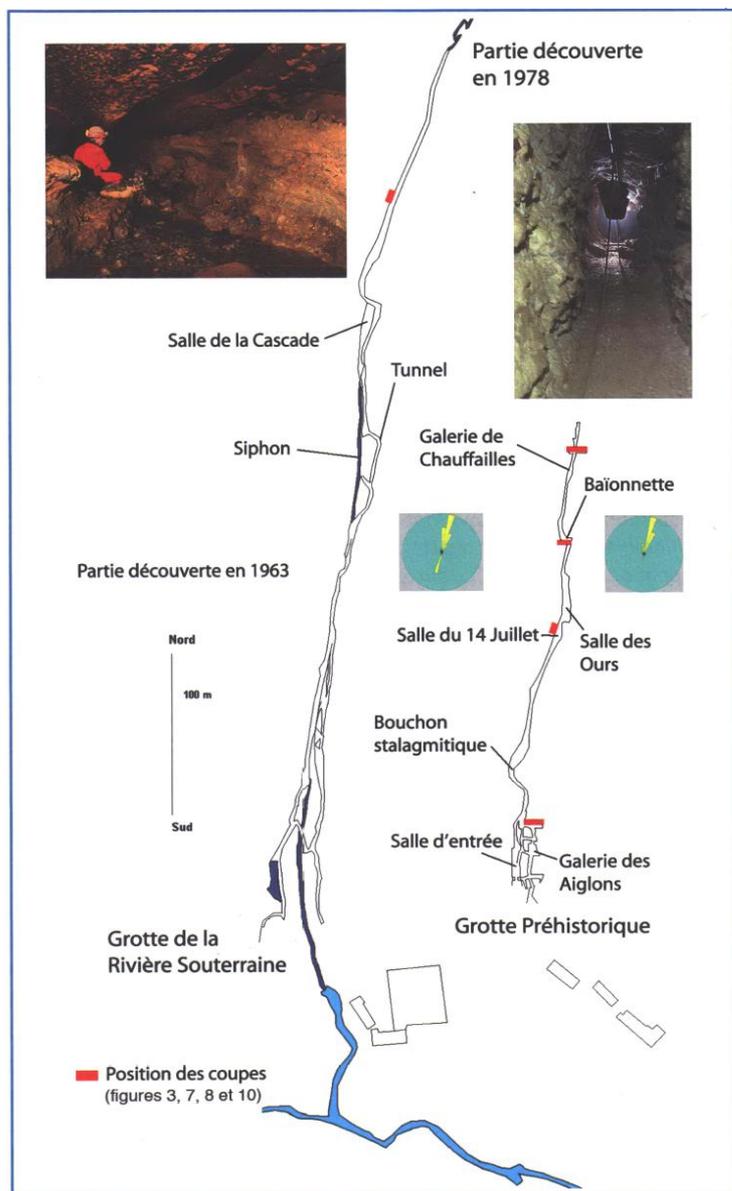
Introduction

Les gisements paléontologiques et préhistoriques découverts sur le site des grottes d'Azé ont fait l'objet de nombreuses études et publications depuis les années 1960. L'importance de ces découvertes a fait que l'étude du milieu karstique n'a été prise en compte

qu'à partir de 1998 avec le début d'une étude systématique des remplissages sédimentaires. Une approche globale de l'étude du site a été initiée en 2006 sous l'impulsion de l'Association Culturelle du Site d'Azé et du Conseil Général de Saône-et-Loire. Des études sur l'encaissant, la formation du karst, les oxydes de

manganèse et les sédiments ont été réalisées grâce à des collaborations entre l'Association Culturelle du Site d'Azé, le Conseil Général de Saône-et-Loire, le Spéléoclub Argilon, les universités de Mons, de Liège et de Bordeaux et l'Association de Recherches Paléocologiques en Archéologie. Celles-ci ont

Figure 1 : Plan du site et des Grottes d'Azé (d'après B. Auboeuf, inédit). Diagrammes des fréquences d'orientation. Grotte Préhistorique, entrée de la Galerie de Chauffailles, cette partie de la cavité a été creusée par les spéléologues en grande partie dans le fantôme de roche et dépôts sédimentaires en amont de la Salle de la Cascade. Clichés L. Guillot. Plan of the Azé site and its caves (after B. Auboeuf, unpublished). Frequency of orientation diagrams. Underground River Cave, sedimentary deposits upstream of the Salle de la Cascade, and Prehistoric Cave, entrance to the Galerie de Chauffailles - this part of the cave was dug out by speleologists mostly through ghost rock.



permis de mettre en évidence les relations qui existent entre la géologie régionale, la karstification et les remplissages sédimentaires qui contiennent les gisements paléontologiques. Cet article a pour objectif de présenter une synthèse des résultats obtenus.

I. Présentation générale du site et de l'exploration

A. Exploration des grottes

Les grottes d'Azé se situent en France dans le sud de la Bourgogne. Il s'agit d'un ensemble de cavités orientées nord-sud dont les deux plus grandes, la grotte Préhistorique et la grotte de la Rivière Souterraine (figure 1), font l'objet d'explorations et de recherches depuis 1950 [Bonnefoy, 2002 ; Guillot, 2005 ; Barriquand et al., 2011a].

Pour ce qui concerne la grotte Préhistorique, jusqu'en 1963 seulement une soixantaine de mètres du réseau étaient acces-

sibles. La cavité se terminait alors sur un ensemble stalagmitique. Son franchissement permit la découverte d'une galerie presque entièrement comblée par des sédiments. La désobstruction plus ou moins partielle de ce réseau débuta dès 1963 et se poursuit toujours aujourd'hui à trois cent vingt mètres du porche. Dans les années 1990, la galerie des Aiglons fut découverte. Il s'agit d'une galerie parallèle à la grotte Préhistorique [Barriquand et al., 2012] complètement comblée de sédiments. En plusieurs points, ce réseau a livré de nombreux vestiges préhistoriques et paléontologiques s'étageant du Paléolithique inférieur jusqu'au Paléolithique supérieur [Barriquand et al., 2011b].

La grotte de la Rivière Souterraine est plus connue dans les milieux spéléologiques du fait des siphons qui ponctuent son développement et qui rendent son exploration difficile. En septembre 1963, après avoir franchi une centaine de mètres dans une galerie totalement immergée les spéléologues découvrent la première partie du réseau. La mise en relation de celui-ci avec l'air libre a lieu en janvier 1965 avec le percement d'un tunnel de jonction. Après avoir franchi un siphon qui constituait le point terminal de la grotte depuis 1963, les spéléologues découvrent en 1978 la deuxième partie du réseau. La jonction entre ces deux parties est aujourd'hui assurée par un tunnel. La partie amont du réseau demeure inconnue, le siphon des Beaunois restant non franchi malgré plusieurs tentatives de plongées et de pompages.

B. Géologie et encaissant

Les grottes d'Azé sont situées dans le massif du Mâconnais. Il s'agit d'un ensemble de cinq chaînons monoclinaux parallèles, orientés N.N.E-S.S.O et de pendage faible (environ 20 degrés est), situés entre le nord-est du Massif Central et la plaine de la Saône [Perthuisot, 1966 ; Barusseau, 1966 ; Rat, 2006 ; Dechamps, 2011].

Le réseau karstique des grottes d'Azé est situé dans les séries carbonatées, datant du Jurassique moyen, du deuxième chaînon. Il comporte à sa base un socle paléozoïque inférieur composé de gneiss et migmatiques, puis de formations sédimentaires détritiques et calcaires et des dépôts volcano-sédimentaires s'étendant du Givétien au Dinantien et enfin des massifs granitiques datant certainement du Carbonifère moyen. Ce socle est surmonté en discordance par une unité sédimentaire du Mésozoïque. Puis après une nouvelle discordance, on trouve des sédiments fluvio-lacustres du Tertiaire.

Il a été procédé à l'étude détaillée de la sédimentologie des calcaires encaissants des

grottes [Dechamps, 2011]¹. La grotte de la Rivière Souterraine se développe dans des calcaires datant de l'Aalénien supérieur (salle de la Cascade) au Bajocien supérieur (salle des Polypiers). Dans la salle de la Cascade, l'ensemble lithologique est composé de bancs décimétriques à pluri-décimétriques de calcaires légèrement grésos-argileux et bioclastiques riches en crinoïdes comportant parfois quelques chailles jusqu'à des calcaires franchement grésos-argileux ou argilo-gréseux, noduleux, pauvres en faune contenant en abondance ou non des chailles. Au microscope optique, on observe tous les intermédiaires entre un grainstone-packstone² légèrement détritique à crinoïdes, lumps, bryozoaires et coquilles diverses (brachiopodes, gastéropodes, bivalves) jusqu'à un packstone grésos-argileux à foraminifères planctoniques, pelloïdes et débris de crinoïdes. La roche présente une répétition d'une séquence présentant à la base un calcaire bioclastique, plus grossier, pauvre en chailles, suivi d'une épaisseur importante de calcaires plus détritiques avec une concentration en bioclastes et chailles variable.

Le calcaire se termine par un banc bioclastique à entroques, fragments de coquilles et oxydes de fer. L'observation au microscope optique indique un grainstone-packstone légèrement gréseux et ferrifère à crinoïdes et brachiopodes pluri-millimétriques, cassés et arrondis, qui présente dans le sommet des pelloïdes et foraminifères planctoniques. Des joints très argileux pluri-centimétriques sont visibles.

Ces calcaires présentent des concentrations en manganèse de l'ordre de 350 à 1300 ppm [Coulon, 1979]. La concentration en quartz peut atteindre 30 % mais elle varie généralement entre 5 et 10 % [Dechamps, 2011]. La concentration en échinodermes peut dépasser les 40 % mais elle varie généralement entre 5 et 30 % [idem].

La Grotte Préhistorique se situe quant à elle dans les calcaires du Bajocien

supérieur (galerie de Chauffailles) et du Bathonien inférieur (salle d'entrée). Au nord de la grotte Préhistorique [Dechamps, 2011], l'ensemble lithologique est composé de bancs pluri-décimétriques très constants en termes d'épaisseur et de lithofaciès. Il s'agit d'un calcaire grésos-argileux pauvre en faune. L'analyse des microfaciès indique un mudstone-wackestone à pelloïdes, foraminifères planctoniques et bioclastes légèrement ferrifère et parfois dolomitisé ou dédolomitisé. Dans la partie supérieure, des oxydes de fer rubanés apparaissent.

Les calcaires du Bajocien supérieur présentent des concentrations en manganèse de l'ordre de 100 à 300 ppm [Coulon, 1979]. La concentration en quartz peut atteindre les 30 % et varie généralement entre 5 et 20 % [Dechamps, 2011].

C. La tectonique régionale

Le Mâconnais a connu deux phases distensives depuis le Secondaire [Quesne, 2000].

La première phase, aaléno-bajocienne, est marquée par des microfailles normales présentant des rejets d'ordre métrique à faible pendage (40 à 60°). Elle est en lien avec le rifting liguro-piémontais. Elle est peu visible car à faible taux d'étirement.

La deuxième phase est oligocène. Elle correspond à la mise en place du fossé bressan en lien avec l'océan alpin. Cette phase distensive de direction est-ouest est responsable de la structure actuelle du Mâconnais en blocs basculés en direction de la Saône (20° E). Ces basculements se font le long de failles normales contraires de direction générale nord-sud (orientation N10-20°E), majoritairement héritées de la période hercynienne et qui rejouent à cette occasion. Ces failles sont fortement pentées (70-80°).

Les grottes d'Azé se sont développées sur ces failles normales contraires. Elles appartiennent aux

fracturations qui ont joué lors de la formation du fossé bressan. Elles déterminent l'axe NNE-SSO des deux grottes (figure 1). Dans la Grotte de la Rivière Souterraine, la faille est très nettement visible et on peut la suivre sur plusieurs dizaines de mètres.

II. La karstification des Grottes d'Azé : « un fantôme de roche » possible

Les deux grottes d'Azé ont connu pendant différentes périodes du Quaternaire des écoulements de type fluvial. Malgré ceux-ci, elles présentent encore des zones où la totalité de l'altérite constituant le fantôme de roche qui est à l'origine de la formation du système karstique n'a pas complètement été emportée.

A. Grotte de la Rivière Souterraine

Au nord de la salle de la Cascade dans la grotte de la Rivière Souterraine, plusieurs témoins de la fantômisiation existent (dans le reste de la grotte les parois ont été « nettoyées » à la lance à eau pour les aménagements touristiques ; ce qui a vraisemblablement provoqué le départ de l'altérite).

De nombreuses chailles siliceuses apparaissent en relief sur les parois (photo 1). Elles sont parfaitement dégagées sur plusieurs dizaines de centimètres et ne présentent généralement pas de cassures alors qu'elles sont connues des spéléologues pour leur fragilité. En plusieurs points du réseau, des chailles complètement dégagées jonchent le sol : tout le calcaire les entourant a disparu. L'examen en coupe de celles-ci montre qu'elles présentent une forte porosité et des vides pouvant atteindre plusieurs centaines de microns (photo 2, à gauche). Des niveaux de chailles non altérées sont accessibles dans le tunnel artificiel qui sert de jonction entre les deux parties du réseau. La masse volumique³ moyenne des chailles prélevées dans le tunnel est de

1. Pour cela un descriptif complet des strates a été effectué. Un échantillon de calcaire a été prélevé tous les 50 centimètres pour préparation d'une lame mince et pour mesure de la susceptibilité magnétique. Un peu plus de 250 lames minces ont été réalisées et ont été analysées par microscopie optique. Cette analyse décrit la texture, la nature des grains ou fossiles, leur taille, abondance, état, classement, la nature du liant, la présence de structures particulières telles que traces de bioturbation, silicifications, joints stylolithiques, porosité, recristallisation, etc. La méthode de coloration développée par Dickson [1966] permettant de différencier la calcite (rouge), la calcite ferrifère (bleue), la dolomite (incolorable) et la dolomite ferrifère (turquoise) a été appliquée aux échantillons. Pour ce faire, les lames ont été plongées environ 45 secondes dans une solution composée de 500 ml d'acide chlorhydrique 2 %, 0,5g d'alizarin rouge-S et 2,5g de ferricyanure de potassium.

2. Classification des calcaires selon leur structure [Durham, 1962] :

- Mudstone : essentiellement constitué de micrite avec moins de 10% d'éléments figurés. - Wackestone : 10% au moins d'éléments figurés non jointifs, noyés dans une micrite.
- Packstone : les éléments figurés sont jointifs, les vides sont remplis de micrite. - Grainstone : les éléments figurés sont jointifs, les vides sont remplis de sparite.

3. La masse volumique des chailles a été déterminée à l'aide d'un pycnomètre à eau sur des échantillons dont la largeur était supérieure à 2 centimètres afin de limiter les intrusions d'eau dans ses pores.

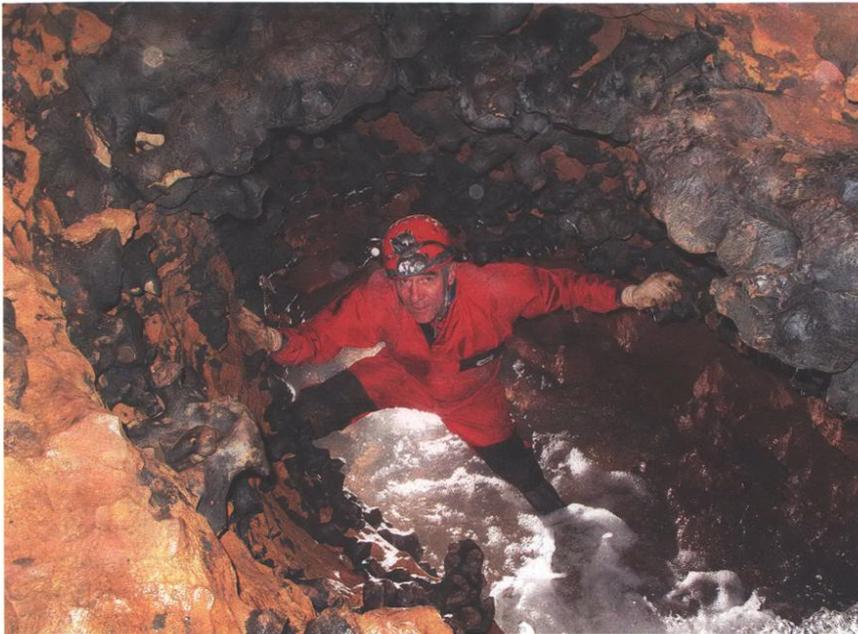


Photo 1 : Azé, Rivière Souterraine, partie nord de la salle de la Cascade. Chaillles siliceuses, recouvertes d'oxyde de manganèse, en relief par rapport aux parois de la grotte. Cliché L. Guillot. *Azé, Underground River Cave, north of the salle de la Cascade. Siliceous cherts, covered with manganese oxide, stand out on the walls of the cave.*

salle de la Cascade. Une analyse de variance sur les deux populations mesurées montre qu'elles sont statistiquement différentes ($P\text{-value} = 0$, $R^2 = 90,5\%$). La perte de masse volumique est donc de l'ordre de 26 % et démontre une forte altération de ces chaillles siliceuses.

Les calcaires gréséo-argileux comprenant les chaillles présentent également une altération très importante. Généralement, une pointe de couteau peut pénétrer facilement de plusieurs centimètres dans cet encaissant. Un examen au microscope de cette surface (photos 2) montre que la plupart de la micrite a disparu et que seule subsiste de l'altérite composée en grande partie par des cristaux de quartz et de calcite. Plus en profondeur, cette porosité est comblée par des amas de fer et de manganèse (photos 2).

B. Grotte Préhistorique

La désobstruction de la grotte Préhistorique, en cours depuis 1963, est conduite généralement selon un axe nord-sud pour suivre l'axe général de la grotte mais également pour faciliter l'évacuation des déblais. En amont de la salle des Ours, la galerie connaît toutefois un décrochement en baïonnette suivi vraisemblablement quelques mètres après par un deuxième décrochement qui redonne à la galerie son axe initial. Au niveau de ce dernier, les spéléologues ont été désorientés et ont poursuivi leurs travaux de

Photos 2 : Grotte de la Rivière Souterraine, nord de la salle de la Cascade.

En haut à gauche : observation à la loupe binoculaire, sur une surface polie, de la porosité à l'intérieur d'une chaillle siliceuse.

En haut à droite : calcaire très altéré, ou punk rock, ne présentant plus aucune structure solide en surface.

En bas à gauche : observation à la loupe binoculaire de la surface de la roche altérée d'un échantillon non préparé. Forte porosité, la micrite a disparu.

En bas à droite : observation sur lame mince (lumière naturelle) de filaments et amas ferro-bactériens et mangano-bactériens. Grains de quartz à gauche partiellement entourés par ces formations.

Clichés R. Maire.

Underground River Cave, north of the Salle de la Cascade.

Top left: stereo microscope image of a polished surface showing the porous interior of a siliceous chert.

Top right: highly altered limestone, or punk rock, no longer presenting any solid structure at the surface.

Bottom left: stereo microscope image of the surface of an unprepared sample of altered rock. Strong porosity, the micrite has disappeared.

Bottom right: image of a thin section (natural light) showing ferro-bacterial and mangano-bacterial filaments.

2260 kg/m³ (population normale de 33 échantillons, valeur minimum de 2100 kg/m³ et valeur maximum de 2420 kg/m³). Cette masse volumique moyenne n'est plus que de 1670 kg/m³ (population normale de 16 échantillons, valeur minimum de 1540 kg/m³ et valeur maximum de 1920 kg/m³) au niveau des chaillles altérées se trouvant en aval de la

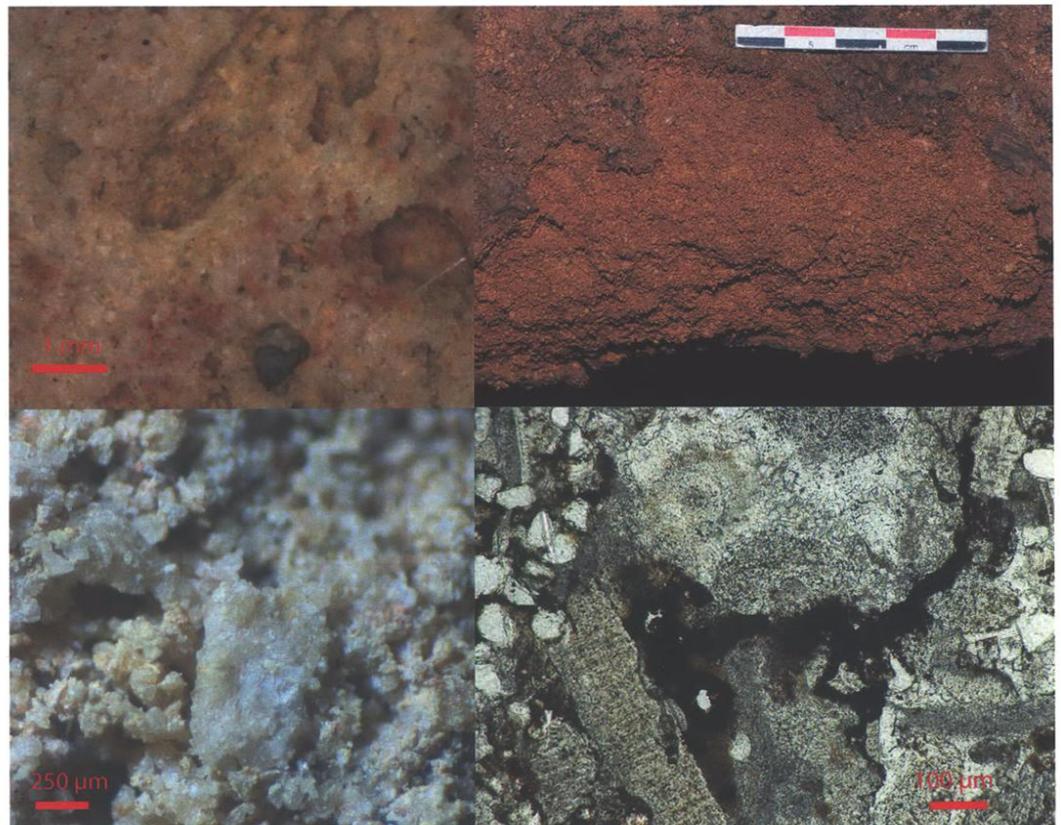
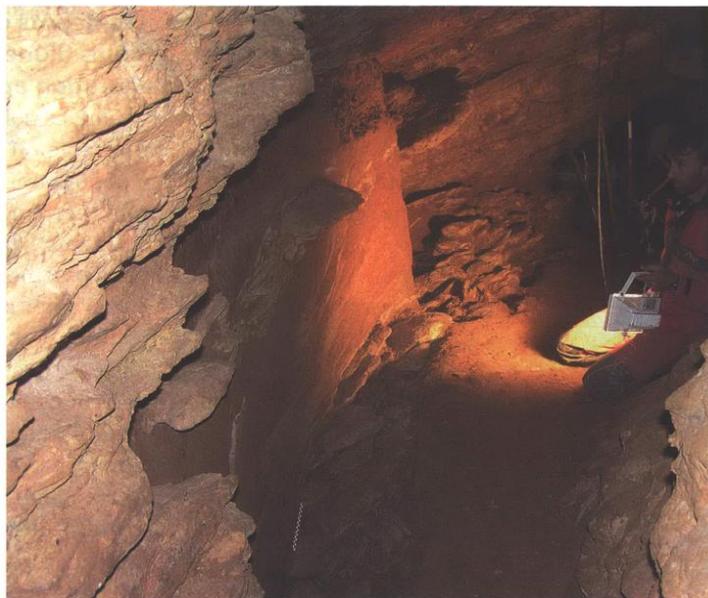


Photo 3 : Grotte Préhistorique, entrée de la galerie de Chauffailles. L'altération du calcaire est importante au plafond mais également au niveau du substratum dont la partie supérieure est constituée par des galets d'altérite résiduelle. Au milieu de la coupe un niveau de galets d'altérite, tombés du plafond, est visible. *Prehistoric Cave, entrance to the galerie de Chauffailles. Considerable alteration of the limestone is evident at the ceiling but also at the level of the substratum whose upper layer is made up of small pieces of residual alterite. Visible in the middle of the section is a layer of pieces of alterite which have fallen from the ceiling.*



désobstruction en direction du nord. Très rapidement, ils se sont retrouvés dans un calcaire très altéré et ont ainsi creusé les 20 premiers mètres de la galerie de Chauffailles (figure 1) dans un fantôme de roche [Quinif, 2010 et 2011]. Deux coupes, orientées N-S, ont été dressées de part et d'autre de l'entrée de cette galerie (photo 3). Elles montrent le contact entre le fantôme de roche et les dépôts sédimentaires qui colmatent entièrement le karst à cet endroit. Le substratum n'apparaît pas nettement. Il est composé de nombreuses dalles de calcaire très altéré qui semblent posées les unes sur les autres. Elles correspondent en fait à des blocs d'altérite résiduelle du substratum qui n'ont pas été évacués par l'eau. Au milieu de la coupe située à l'est de l'entrée, se trouve un « lit » de dalles de calcaire. Là encore il s'agit d'altérite. L'altération est telle que lorsque la coupe a été redressée à l'aide d'un triangle de plâtrier, la résistance mécanique du « fantôme » est la même que celle d'un

sédiment meuble. Après redressage total de la coupe, un bon nombre de ces dalles n'apparaissent pas du tout en relief mais sont « coupées » et se trouvent dans le même plan que les sédiments meubles. Enfin, en hauteur et sur les côtés, on retrouve l'altérite dans laquelle l'entrée de la galerie de Chauffailles a été creusée.

S. Dechamps [2011] a observé deux parties distinctes dans l'unité lithologique où se trouve la galerie de Chauffailles. La partie supérieure de cette unité est marquée par des oxydes de fer alors que dans la partie inférieure, où se trouve la galerie de Chauffailles, ils sont absents. Dans cette partie de la grotte, le calcaire est très altéré en profondeur (photo 4 à gauche). Il se transforme en sédiments sablonneux. Ces calcaires présentent une dolomitisation partielle, voire quasiment totale dans certains échantillons, ainsi qu'une dédolomitisation partielle (photo 4 à droite). Ce phénomène de dédolomitisation est lié au contact entre le calcaire et de l'eau

Photos 4 : Azé, Grotte Préhistorique : Salle des Ours. **A gauche** : observation d'une lame au microscope optique. Vue générale de la transition « zone saine (en haut) – zone altérée (en bas) ». Les éléments lumineux sont des trous liés à l'altération du calcaire. **A droite** : observation au microscope de la partie « saine » de la lame précédente colorée avec une solution de Dickson : calcite en rose, dolomite en verdâtre, calcite ferrifère en bleu-mauve et dolomite ferrifère en turquoise. Calcaire à matrice micritique, microbioclastes. Dolomitisation partielle (presque totale, rhomboédres verdâtres) puis dédolomitisation partielle en calcite donnant des rhomboédres de calcite (rhomboédres rosés) au milieu de la matrice micritique (pseudomorphes de dolomites). Clichés S. Dechamps. *Azé, Prehistoric Cave, Salle des Ours. Left: optical microscope image of a section. General view of the transition from the "sound" zone (top) to the "altered" zone (bottom). The luminous spots are holes arising from the alteration of the limestone. Right: microscope observation of the "sound" part of the previous section coloured with a Dickson solution: calcite (pink); dolomite (greenish); ferriferous calcite (blue-mauve); ferriferous dolomite (turquoise). Limestone with a micritic matrix, microbioclasts. Partial dolomitisation (almost total, greenish rhombohedrons), then partial dedolomitisation into calcite, producing rhombohedrons of calcite (pink rhombohedrons) in the middle of the micritic matrix (pseudomorphs of dolomites).*

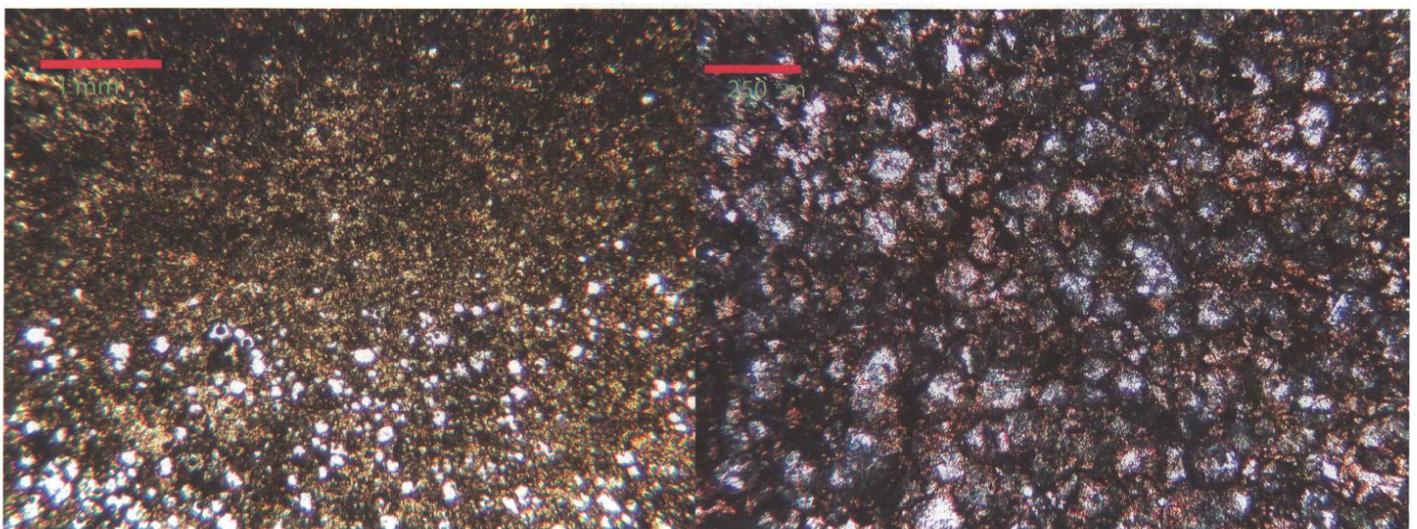
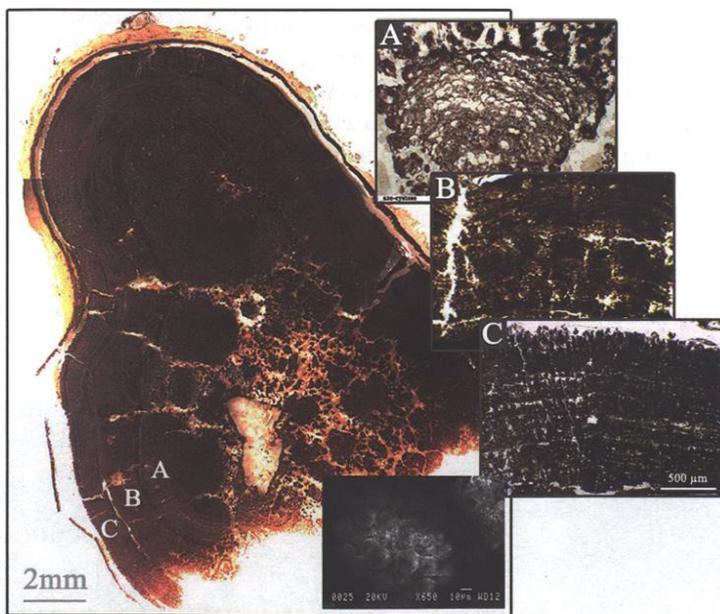
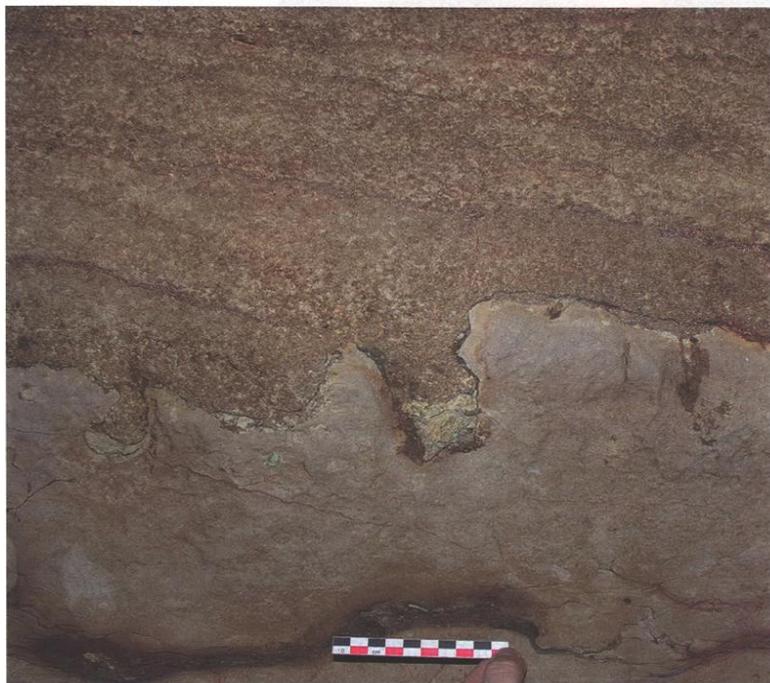


Photo 5 : Grotte de la Rivière Souterraine. Paléo-lapiaz dans les calcaires du Bajocien inférieur.
Underground River Cave. Palaeo karren in Early Bajocian limestones.



Photos 6 : Lame mince d'un dépôt centimétrique de manganèse montrant son architecture interne. Une séquence morphologique est observée. Celle-ci comprend des structures de type dans la couche intérieure (A), des microstromatolithes colonnaires dans la couche intermédiaire (B) et des microstromatolithes laminaires dans la couche extérieure (C).

En bas au centre : microphotographie au microscope électronique à balayage des dépôts noirs d'Azé, groupement de framboides d'oxyde de fer.

Thin section of a cm-thick manganese deposit showing its internal architecture. A morphological sequence is observed, which includes "cystose" like structures in the inner layer (A), columnar microstromatolites in the mid layer (B) and laminated microstromatolites in the outer layer (C). Bottom centre: scanning electron microscope micrograph of the black Azé deposits, group of iron oxide framboids.

C. Les dépôts de manganèse : témoins d'une deuxième étape d'altération après la fantômisation

Que ce soit dans la grotte de la Rivière Souterraine ou dans la grotte Préhistorique, des dépôts noirs sont omniprésents sur les parois (perpendiculairement au pendage de l'encaissant), dans les sédiments voire même sur des ossements.

S. Papier a montré que ces dépôts sont constitués d'un mélange d'oxyde de fer et de manganèse. L'étude lithologique effectuée par S. Dechamps, sur l'ensemble des strates s'étendant de l'Aalénien supérieur au Bathonien inférieur, a montré une seule concentration en fer et manganèse liée au processus de formation des calcaires. Celle-ci est située dans les marno-calcaires du Bajocien supérieur qui sépare les deux grottes et ne concerne donc pas l'encaissant des cavités.

Une observation au microscope optique a mis en évidence l'existence d'une architecture interne (photos 6) dans ces dépôts qui sont constitués par des structures de type cystose dans la couche intérieure, des microstromatolithes colonnaires dans la couche intermédiaire et des microstromatolithes laminaires dans la couche extérieure [Papier *et al.*, 2011]. Une observation au microscope électronique à balayage a permis de mettre en évidence la présence de pyrite framboïde (photos 6) qui est caractéristique d'une action bactérienne. Enfin la présence de filaments bactériens a été prouvée par observation au microscope électronique à balayage et par coloration DAPI [idem]. Ces études nous permettent de penser que ces dépôts sont d'origine bactérienne. Une étude du séquençage ADN de ces bactéries est actuellement en cours mais ce type de formation a été trouvé dans plusieurs grottes du Nouveau-Mexique aux Etats-Unis [Northup *et al.*, 2000 et 2003 ; Spilde *et al.*, 2005 et 2006] où les bactéries ont été identifiées comme étant chimiolithotrophes. Même si cela n'a pas encore été formellement démontré, il y a une forte probabilité que les dépôts se trouvant dans les grottes d'Azé soient d'origine bactérienne. Ces bactéries vivent dans des milieux totalement clos où la photosynthèse est inexistante, en tirant l'énergie qui leur est nécessaire en oxydant le fer et le manganèse présents dans les calcaires [Konhauser, 2007]. La précipitation du manganèse soluble se fait avec libération de quatre protons [idem] qui peuvent participer à la dissolution des carbonates de calcium de l'encaissant.

Dans la rivière souterraine, les dépôts de manganèse sont présents de manière systématique sur la surface dégagée des chailles siliceuses, partie en contact avec le calcaire,

mais jamais à l'intérieur de celles-ci. Ces dépôts sont également abondants sur les parois de la cavité où ils forment des croûtes d'épaisseur parfois pluri-centimétriques (photo 7). En de nombreuses zones, de surfaces pluri-décimétriques, ces formations se détachent ou se sont détachées de la paroi vraisemblablement sous l'effet de leur masse laissant alors apparaître la roche totalement altérée ou « punk-rock » [Hill, 1987].

Dans la grotte Préhistorique, les dépôts de manganèse devaient également recouvrir en grande partie les parois de la cavité mais du fait des remplissages sédimentaires ils sont aujourd'hui moins visibles. En plusieurs points ils apparaissent encore également sous forme de couches millimétriques à pluri-centimétriques comme dans la partie nord de la salle des Ours, à la Baionnette... (photos 8). D'autres témoins de leur existence existent dans les remplissages sous forme de dalles de calcaire tombées du plafond et dont seulement la partie inférieure est recouverte de manganèse (photos 8) mais également sous forme de blocs de substratum, dont seul l'altérite résiduelle subsiste, et qui sont plus ou moins incrustés d'oxyde de manganèse (photos 8).

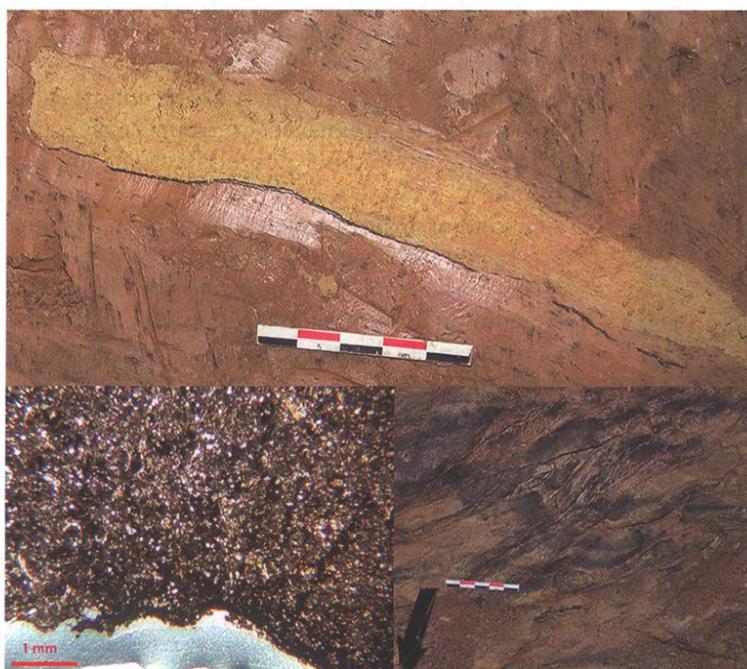
Le schéma de karstification doit donc être complété par une action bactérienne. Après l'évacuation d'une partie du fantôme par l'eau, l'activité bactérienne se développe dans l'altérite résiduelle. Les bactéries utilisent la porosité de cette dernière pour progresser dans le calcaire. Les oxydes de fer et de manganèse résidus de cette activité sont concentrés en surface ou dans des zones de grande porosité de l'encaissant.



Photo 7 : Grotte de la Rivière Souterraine, nord de la salle de la Cascade. Encroûtement centimétrique d'oxydes de manganèse en surface du punk-rock qui apparaît lorsque la croûte est tombée par gravité. *Underground River Cave, north of the salle de la Cascade. Centimetre thick encrusting of manganese oxides on the surface of punk rock which becomes visible when gravity causes the encrusting to fall off.*

D. De l'altérite au sédiment

Nous avons établi un protocole analytique basé sur des prélèvements d'échantillons et sur leur traitement analytique. Ce travail a été mené sur les calcaires de l'Aalénien supérieur et sur les calcaires du Bajocien supérieur. La technique de prélèvement est celle du raclage de « punk-rock ». Les échantillons sont ensuite observés au microscope optique, puis traités pour une analyse granulométrique. Des analyses par diffraction X (DRX) ont été menées sur les échantillons des calcaires du Bajocien supérieur.



Photos 8 : Grotte Préhistorique d'Azé.

En bas à gauche : observation au microscope optique d'une lame mince. Dépôts d'oxydes de manganèse en surface et dans les zones altérées du calcaire. Les points lumineux sont des cristaux de quartz. *Cliché S. Dechamps.*

En haut : coupe est-ouest, nord de la Galerie de Chauffailles. Blocs de calcaires tombés du plafond, se trouvant dans le remplissage sédimentaire, et présentant dans leur partie inférieure des dépôts d'oxyde de manganèse.

En bas à droite : coupe est-ouest, nord de la Galerie de Chauffailles. Substratum complètement altéré (ayant la texture d'un sédiment meuble) et se présentant sous la forme de galets. Présence d'un encroûtement de manganèse en surface et à l'intérieur de la porosité de ces galets. *Prehistoric Cave, Azé.*

Bottom left: optical microscope image of a thin section. Manganese oxide deposits on the surface and in the altered zones of the limestone. The luminous points are quartz crystals.

Top: east-west section, northern end of the Galerie de Chauffailles. Embedded in sedimentary filling, blocks of limestone which have fallen from the ceiling. Deposits of manganese oxide are visible on their lower surface.

Bottom right: east-west section, northern end of the Galerie de Chauffailles. Completely altered substratum (with the texture of a loose sediment) having the appearance of a layer of stones. Manganese is present as an encrusting on the surface and in the porous interior of these stones.

Figure 2 : Grotte de la Rivière Souterraine. Diagramme bilogarithmique du premier centile en fonction de la médiane [d'après Passega in Rivière, 1977].

SR : dépôts de suspension uniforme traduisant une vitesse de fond trop faible pour produire un classement quelconque ;
RQ : dépôts de suspension gradée apparaissant lorsque la charge dépasse la capacité de transport ;
QP : dépôts de sédiments transportés par roulement avec une part de suspension (courant pas encore assez capacitif) ;
PO : dépôts comprenant de plus en plus de grains roulés ;
ON : dépôts des seuls éléments roulés, les suspensions étant entraînées.

En vert : altérites résiduelles prélevées sur les parois de cette galerie (A399 et A400).

En bleu : dépôts sédimentaires de la Rivière Souterraine (fig. 12) :

Losanges : dépôts silto-argileux (A134 et A139).

Ronds : dépôts de graviers (A124, A131, A136, A137, A138 et A140).

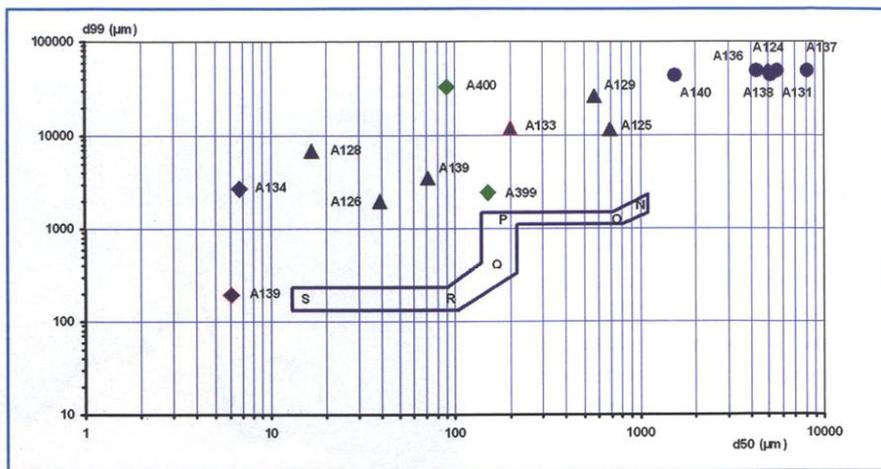
Contours rouges : sédiments dont les fractions les plus fines des sables grossiers sont constituées en majorité par des cristaux de calcite cimentant des cristaux de quartz (A133 et A139).

Contours noirs : sédiments dont les sables grossiers et les graviers contiennent une grande quantité d'échinodermes, brachiopodes, lamellibranches et bryozoaires (A125, A126, A128, A129, A133, 135).

Underground River Cave.

Bilogarithmic diagram of the first centile as a function of the median [after Passega in Rivière, 1977].

SR: Deposits from a uniform suspension reflecting a velocity at the bottom too weak to produce any classification;



RQ: Deposits from a graded suspension appearing when the load exceeds the transport capacity;

QP: deposits of sediments transported by rolling, together with a suspended component (current not yet having sufficient capacity);

PO: deposits consisting of more and more grains transported by rolling; **ON**: deposits only of rolled elements, the suspensions having been carried away.

In green: residual alterites taken from the walls of this gallery (A399 and A400).

In blue: sedimentary deposits from the Underground River Cave (Fig. 12):

Diamonds: clayey silt deposits (A134 and A139).

Discs: gravel deposits (A124, A131, A136, A137, A138 and A140).

Outlined in red: sediments of which the finest fractions of the coarse sands consist mainly of calcite crystals cementing together quartz (A133 and A139).

Outlined in black: sediments whose coarse sands and gravels contain many echinoderms, brachiopods, lamellibranchs and bryozoa (A125, A126, A128, A129, A133, 135).

1. Calcaires de l'Aalénien supérieur

Nous avons prélevé par simple raclage deux échantillons de « punk-rock » se trouvant en surface des parois en amont de la salle de la Cascade de la grotte de la Rivière Souterraine (échantillons A399 et A400). Ces échantillons ne présentant aucune structure solide, ils ont été traités comme des sédiments meubles. Leur analyse granulométrique nous montre qu'ils sont essentiellement composés de silts (entre 20 et 25 % massique) et de sables fins à grossiers (60 à 70 % massique). Un des deux échantillons a livré un galet. Si nous positionnons les caractéristiques granulométriques⁴ de ces échantillons sur un diagramme de Passega (figure 2) nous voyons que leur transport peut être assuré dans des conditions d'hydrodynamisme laissant des dépôts de suspensions gradées, voire des dépôts correspondant à un mixte de suspensions gradées et de roulement.

L'observation au microscope optique des fractions de diamètre supérieur à 50 µm de ces sédiments montre qu'ils sont composés par quatre constituants distincts :

- **Constituant 1** : il correspond aux sables fins composés de cristaux de quartz, de calcite et d'agglomérats d'oxyde de manganèse.
- **Constituant 2** : il correspond aux fractions les plus fines des sables grossiers et est composé de grains de calcite cimentant des cristaux de quartz (photo 9).
- **Constituant 3** : il correspond aux fractions les plus grosses des sables grossiers et est composé d'éléments bioclastiques (échinodermes, brachiopodes, lamellibranches et bryozoaires essentiellement).
- **Constituant 4** : il correspond au galet qui est extrêmement altéré.

4. Les analyses granulométriques ont été réalisées selon la procédure suivante : séchage de l'échantillon à une température de 120°C pendant 12 heures dans une étuve ventilée. Mise en suspension d'une masse donnée de sédiment sec dans une solution d'hexaméthaphosphate de sodium à 1 g/l par agitation à l'aide d'un mélangeur à rouleaux pendant 1 heure. Séparation en deux parties de la suspension à l'aide d'un tamis de maille 50 microns. Le passant (argiles et silts) a été analysé par granulométrie Laser à l'aide d'un granulomètre Malvern 2000. Le résidu a été séché à 120°C à l'aide d'une étuve ventilée pendant 4 heures et sa répartition granulométrique a ensuite été déterminée par tamisage sur colonne de tamis de 200 mm de diamètre.



Photo 9 : Grotte de la Rivière Souterraine, fractions les plus fines des sables grossiers composées de grains de calcite cimentant des cristaux de quartz. *Underground River Cave, finest fractions of the coarse sands consist mainly of calcite grains cementing together quartz crystals.*

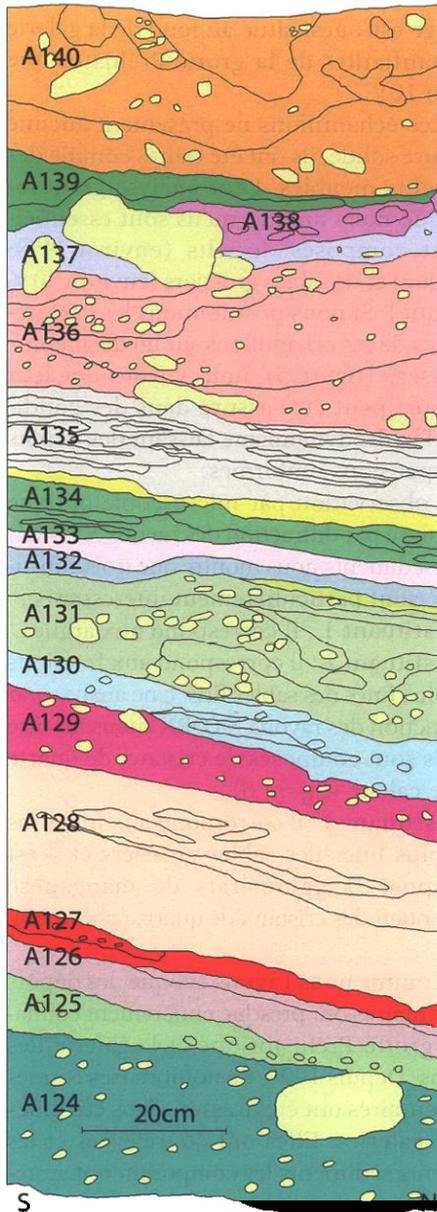
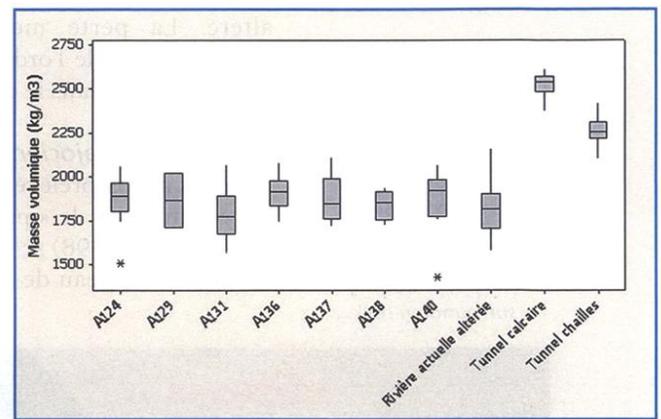


Figure 3 : Grotte de la Rivière Souterraine, relevé de la coupe nord-sud en amont de la Salle de la Cascade. Position des différents sédiments étudiés. *Underground River Cave, diagram of the north-south section upstream of the Salle de la Cascade. Position of the different sediments studied.*

Les dépôts sédimentaires sont peu nombreux dans la grotte de la Rivière Souterraine. Un résidu de dépôts subsiste toutefois au nord de la salle de la Cascade (photo 9). La coupe présente une succession de dix-sept niveaux sédimentaires distincts les uns des autres (figure 3) sur une épaisseur totale d'environ 1,5 mètre. Un échantillon de chacun de ces niveaux (A124 à A140) a été prélevé et a fait l'objet d'une analyse granulométrique.

Les classes granulométriques des sédiments vont de silto-argileuses (A134 et A139) à graviers (A124, A131, A136,

Figure 4 : Grotte de la Rivière Souterraine, diagramme box-plot des populations de masses volumiques mesurées sur des échantillons de galets altérés provenant du lit de la rivière actuelle, des différentes phases constituant le dépôt sédimentaire se trouvant au nord de la Salle de la Cascade en comparaison avec les masses volumiques de chailles et de calcaires non altérés prélevés dans le tunnel de by-pass du siphon. Le trait vertical représente la dispersion des mesures, le premier trait horizontal en partant du bas : le premier quartile, le deuxième : la médiane, le troisième : le troisième quartile et les étoiles les mesures statistiquement aberrantes. *Underground River Cave, box-plot diagram of the range of densities of stones of the section at the northern end of the Salle de la Cascade (representing different phases of sedimentation), in comparison with the densities of altered stones from the bed of the present-day river, and with cherts and non-altered limestone from the siphon by-pass tunnel. The vertical line represents the dispersion of the measurements, the first horizontal line from the bottom: the first quartile, the second: the median, the third: the third quartile and the asterisks the statistically aberrant measurements.*



A137, A138 et A140). Le diagramme de Passega (figure 2) montre des conditions hydrodynamiques de formation des dépôts allant d'un hydrodynamisme faible à des régimes de crues.

Il s'avère donc que suivant les conditions de formation des différents niveaux sédimentaires, l'altérite résiduelle de l'encaissant a pu être conservée dans les remplissages ou elle a pu être évacuée. Si nous comparons le contenu de ces sédiments aux constituants de l'altérite de l'encaissant (A399 et A400), nous constatons que :

- Les grains de calcite cimentant des cristaux de quartz, correspondant au constituant 2 de l'altérite, sont présents dans tous les niveaux du remplissage sédimentaire où ils représentent généralement entre 15 à 50 % de la fraction granulométrique comprise entre 300 et 400 µm. Dans le cas des échantillons A133 et A139, ils constituent entre 75 et 90 % de cette même fraction granulométrique.
- Les diagrammes d'abondance des sables grossiers et graviers montrent que les échantillons A125, A126, A128, A129, A133, 135 contiennent une grande quantité d'échinodermes, brachiopodes, lamelibranches et bryozoaires. Nous retrouvons donc dans les sédiments le constituant 3 mis en évidence dans l'altérite de l'encaissant. La position de ces échantillons sur le diagramme de Passega montre qu'ils se sont mis en place dans des conditions hydrodynamiques correspondant à des dépôts de suspen-

sion uniforme voire à des dépôts de sédiments transportés par roulement avec une part de suspension. Les conditions hydrodynamiques de mise en place des dépôts correspondant aux échantillons A126, A133 et A135 sont particulièrement similaires à celles nécessaires pour obtenir le transport de l'altérite de l'encaissant.

- Les dépôts correspondant aux conditions hydrodynamiques les plus fortes, échantillons A124, A129, A131, A136, A137, A138 et A139, contiennent des galets de calcaires et chailles siliceuses altérés. Ils correspondent au constituant 4 provenant de l'altérite de l'encaissant. La masse volumique de ces galets ainsi que celles de galets altérés provenant du lit de la rivière actuelle ont été comparées à la masse volumique d'échantillons de calcaires et de chailles non altérés provenant de l'encaissant (prélèvement dans le tunnel de jonction reliant les deux parties du réseau séparées par un siphon). Les valeurs de masses volumiques mesurées ont fait l'objet d'une étude statistique nous montrant tout d'abord que les répartitions par provenance sont normales et représentent donc des ensembles homogènes. Une analyse de variance sur ces ensembles (figure 4) nous montre que les masses volumiques des échantillons provenant des sédiments et du lit actuel de la rivière sont identiques et qu'elles sont significativement inférieures à celles des échantillons provenant de l'encaissant non

altéré. La perte moyenne de masse volumique est de l'ordre de 27 % et peut atteindre 45 % dans le cas le plus extrême.

sondage est-ouest situé au fond de la galerie de Chauffailles de la grotte Préhistorique (photo 10).

Photo 10 : Grotte Préhistorique, Baïonnette, raclage du « punk rock » de l'encaissant.
Prehistoric Cave, Baïonnette, scraping of the "punk rock" component of the surrounding rock.



2. Calcaires du Bajocien supérieur

Nous avons prélevé par simple raclage deux échantillons de « punk-rock » (échantillons A397 et A398) se trouvant en surface des parois au niveau de la Baïonnette et du

Ces échantillons ne présentant aucune structure solide, ils ont été traités comme des sédiments meubles. Leur analyse granulométrique nous montre qu'ils sont essentiellement composés de silts (environ 45% massique) et de sables grossiers (environ 30% massique). Si nous positionnons les caractéristiques de ces échantillons sur un diagramme de Passega (figure 5), nous voyons que leur transport peut être assuré dans des conditions d'hydrodynamisme laissant des dépôts de suspensions uniformes.

L'observation par microscopie optique et l'analyse par diffraction des rayons X (DRX) de ces sédiments nous montre que trois constituants sont particulièrement intéressants :

- **Constituant 1** : il correspond aux argiles.
- **Constituant 2** : il correspond aux fractions les plus fines des sables fins. Une analyse par diffraction des rayons X (DRX) nous montre qu'ils sont composés de cristaux de quartz et de calcite (figure 6).
- **Constituant 3** : il correspond aux fractions les plus fines des sables grossiers et il est composé d'agglomérats de manganèse cimentant des cristaux de quartz (photo 11).

Comme nous l'avons évoqué, les dépôts sédimentaires ont presque entièrement colmatés la grotte Préhistorique et la galerie des Aiglons. Depuis 1998, de nombreuses coupes sédimentaires ont été dressées dans ces différentes galeries. Elles ont été relevées et les différents sédiments les composant ont systématiquement fait l'objet d'analyses granulométriques et d'observations au microscope optique. Des analyses par diffraction des rayons X ont également été menées ponctuellement afin de déterminer la nature des argiles qu'ils contiennent. Ceci nous a permis de mettre en relation les constituants de l'altérite précédemment décrits et ceux contenus dans les sédiments obstruant la grotte.

Pour le constituant 1

La détermination par diffraction de rayons X de quinze échantillons d'argiles contenues dans les sédiments de la grotte Préhistorique a été réalisée [Barriquand et al., 2011]. Afin de couvrir le maximum du remplissage sédimentaire, les échantillons ont été prélevés dans deux coupes différentes :

- les sédiments les plus anciens proviennent de la coupe nord-sud côté est située entre la salle des Ours et la Baïonnette ;
- les sédiments les plus récents proviennent de la coupe témoin de la salle du 14 Juillet (prélèvements A. et J. Argant).

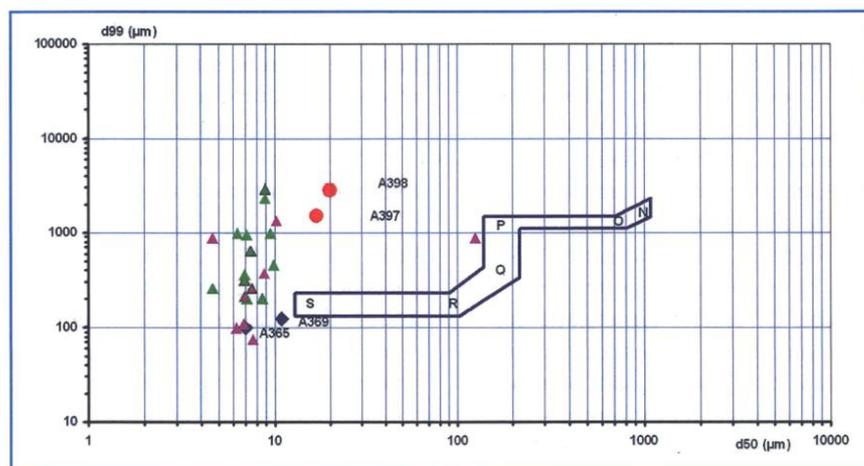


Figure 5 : Grotte de la Rivière Souterraine. Diagramme bilogarithmique du premier centile en fonction de la médiane [d'après Passega in Rivière, 1977].

En rouge : altérites résiduelles prélevées sur les parois de cette galerie (A397 et A398).

En bleu : dépôts sédimentaires provenant de la coupe E-O, nord de la Galerie de Chauffailles (fig.18). Dépôts présentant les fractions les plus fines des sables fins composées de cristaux de quartz provenant de l'encaissant.

En vert : dépôts sédimentaires de la phase 10 de la coupe nord de la Galerie des Aiglons.

En rose : dépôts sédimentaires de la phase 11 de la coupe nord de la Galerie des Aiglons.

Contours vert foncé : sédiments dont la concentration en agglomérats cimentés par des oxydes de manganèse est comprise entre 10 et 20g/kg de sédiment.

Contours noirs : sédiments dont la concentration en agglomérats cimentés par des oxydes de manganèse est comprise entre 30 et 40 g/kg de sédiment.

Underground River Cave. Bilogarithmic diagram of the first centile as a function of the median [after Passega in Rivière, 1977]. In red: residual alterites taken from the walls of this gallery (A397 and A398).

In blue: sedimentary deposits from the east-west section, northern end of the Galerie de Chauffailles (Fig. 18). The finest fractions of the fine sands are made up of quartz crystals which have come from the surrounding rock.

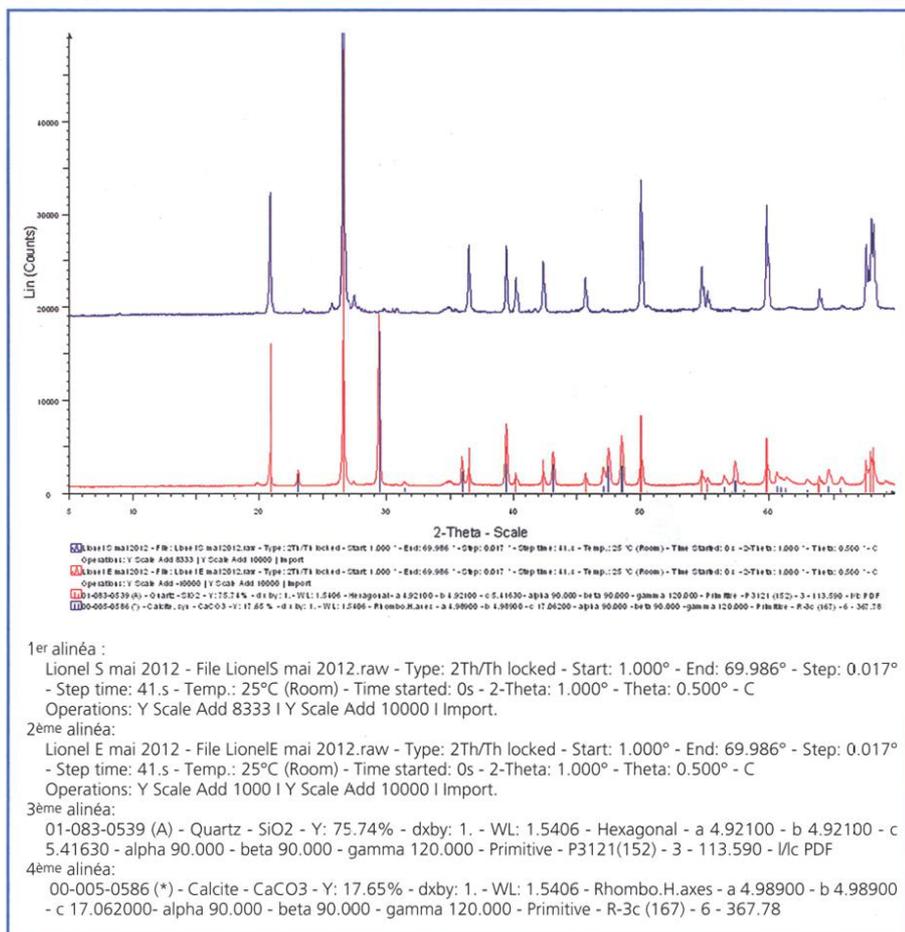
In green: sedimentary deposits from Phase 10 of the section at the northern end of the Galerie des Aiglons.

In pink: sedimentary deposits from Phase 11 of the section at the northern end of the Galerie des Aiglons.

Outlined in dark green: sediments in which conglomerations cemented by manganese oxides make up between 10 and 20 g/kg of the sediment.

Outlined in black: sediments in which conglomerations cemented by manganese oxides make up between 30 and 40 g/kg of the sediment.

Figure 6 : Grotte Préhistorique d'Azé, coupe E-O fond de la Galerie de Chauffailles, analyses par diffraction des rayons X (DRX) de l'altérite résiduelle de l'encaissant (en bas) et de l'échantillon A369 provenant de cette coupe (en haut). L'altérite de l'encaissant contient du quartz (en rouge) et de la calcite (en bleu). Le sédiment (échantillon A369) est constitué uniquement par du quartz (en bleu). *Prehistoric Cave, Azé, east-west section, far end of the Galerie de Chauffailles, analysis by X-ray diffraction (XRD) of the residual alterite in the surrounding rock (bottom) and of sample A369 from this section (top). The alterite in the surrounding rock contains quartz (in red) and calcite (in blue). The sediment (sample A369) contains only quartz (in blue).*



Ces analyses montrent que nous sommes systématiquement en présence d'un mélange de quartz, kaolinite, illite et smectite. Trois échantillons contiennent de la muscovite et trois autres de la goéthite.

D'après Perthuisot [1967], l'altération des terrains primaires se trouvant aux environs d'Azé fournit de la kaolinite. La présence de goéthite et d'hollandite dans les encroûtements noirs de la Rivière Souterraine a été mise en évidence [Papier, 2011]. Enfin Spilde et al. [2006] montrent qu'à partir d'un encaissant sain contenant uniquement des traces (<1 %) de kaolinite et d'illite, le « punk-rock » associé contient des quantités mineures (<10 %) de kaolinite et majeures (>10 %) d'illite et de goéthite.

Si la présence de kaolinite est ambiguë, il semblerait que la présence d'illite et de goéthite indique qu'une partie des argiles contenues dans les sédiments est issue du résidu d'altération de l'encaissant.

Pour le constituant 2

Les échantillons A365 et A369 prélevés dans la coupe se trouvant au nord de la galerie de Chauffailles (figures 1 et 7) sont particulièrement intéressants :

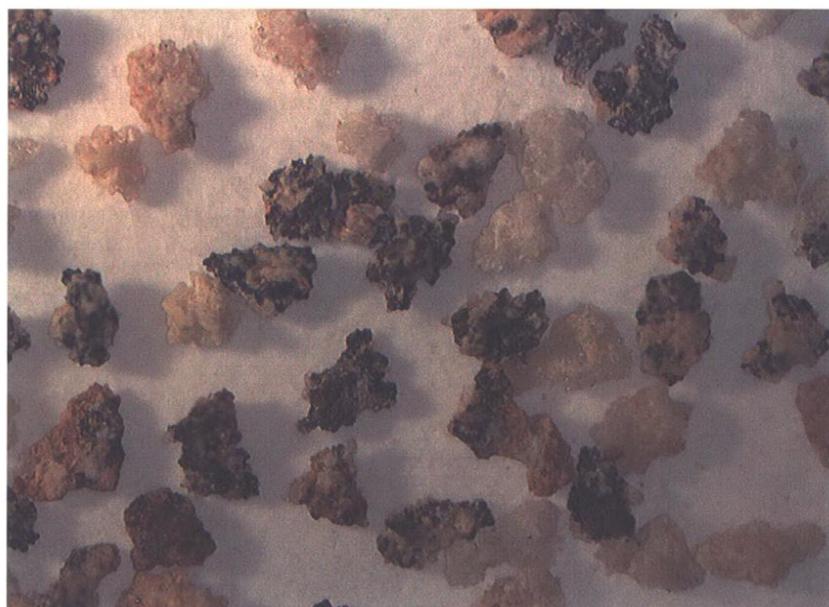
- L'échantillon A365 (figure 7) est constitué par des couches de sables fins alternant avec des lamines silto-argileuses qui soulignent le litage. La couleur des niveaux sableux est 10 YR 6/4 *light yellowish brown* et celle des lamines silto-argileuses est 7,5 YR 5/6 *strong brown*.
- L'échantillon A369 est quant à lui constitué de sables fins. Il ne présente pas de litage ni de pendage. Cette couche s'est infiltrée dans les fissures du niveau précédent (échantillon A368) et contient de très nombreux éléments anguleux de l'échantillon A368 (figure 7). La couleur des sédiments sableux est 10 YR 6/6 *brownish yellow*.

Ces niveaux sableux sont remarquables dans la coupe du fait de leur aspect qui est similaire en texture et en couleur à celui de l'encaissant altéré à cet endroit. Le position-

nement des caractéristiques granulométriques de ces sédiments sur le diagramme de Passega (figure 5) montre qu'ils se sont mis en place dans des conditions d'hydrodynamisme faibles et légèrement inférieures à celles nécessaires pour assurer le transport de l'altérite de l'encaissant.

La comparaison au microscope optique des sables de ces deux échantillons avec les

Photo 11 : Grotte préhistorique d'Azé, Baionnette, échantillon A398, fraction granulométrique 250-300 µm : agglomérats de grains de quartz dans un ciment d'oxydes de manganèse. *Prehistoric Cave, Azé, Baionnette, sample A398, granulometric fraction 250-300 µm: conglomerations of quartz grains in a cement of manganese oxides.*



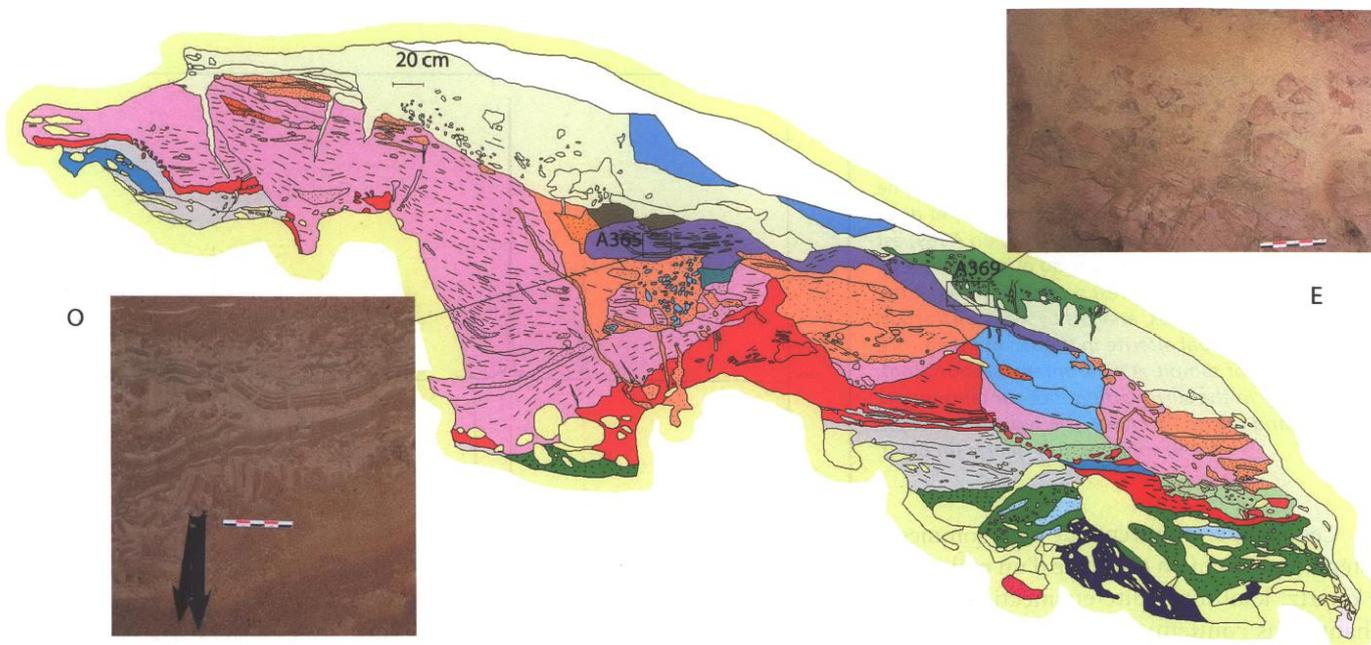


Figure 7 : Relevé de la coupe est-ouest nord de la Galerie de Chauffailles. Position dans le remplissage des niveaux A365 et A369 (relevés J. et L. Barriquand, L. Guillot et C. Nykiel). Coupe est-ouest nord de la Galerie de Chauffailles, niveau A365. Coupe est-ouest nord de la Galerie de Chauffailles, niveau A369 et partie supérieure du niveau A368. Diagram of the east-west section at the northern end of the Galerie de Chauffailles. Position in the fillings of layers A365 and A369 (drawn by J. and L. Barriquand, L. Guillot and C. Nykiel). O (west): layer A365. E (east): layer A369 and upper part of layer A368.

sables d'autres sédiments de la coupe montre qu'ils se distinguent par le fait qu'ils ne contiennent pas d'orthose. Une analyse par diffraction des rayons X (figure 6) montre que ces sables sont uniquement constitués par du quartz. Il est donc fort probable que ce sable provienne uniquement de l'altérite résiduelle de l'encaissant, la calcite ayant été éliminée par une altération conjuguée à une ségrégation liée à la différence de densité pouvant exister entre le quartz et la calcite altérée.

Pour le constituant 3

Les échantillons A147 à A199 des remplissages sédimentaires de la coupe nord de la Galerie des Aiglons (figures 1 et 8) forment une séquence remarquable. Leur étude a montré qu'ils se sont déposés lors de douze phases distinctes [Barriquand et al., 2004].

Dans quasiment toutes les fractions les plus fines des sables grossiers, les agglomérats de cristaux de quartz cimentés par du manganèse sont présents (figure 9). Ils sont particulièrement abondants

dans les sédiments constituant les phases 10 (échantillons A179 à A190) et 11 (échantillons A191 et A199) du remplissage. Le positionnement des caractéristiques granulométriques de ces sédiments sur le diagramme de Passega (figure 5) montre qu'ils se sont mis en place dans des conditions d'hydrodynamisme faibles et comparables à celles nécessaires au transport des échantillons d'altérite prélevés en surface de l'encaissant à la Baionnette et au fond de la galerie de Chauffailles.

Dans plusieurs de ces niveaux, ces agglomérats sont le constituant unique des sables grossiers ; ce qui permet d'évaluer leur concentration minimum dans le sédiment (en se basant uniquement sur les fractions constituées par ces sédiments). Elles varient entre 10 et 20 g/kg de sédiment pour les échantillons A182, A183, A186 et A195 pour atteindre une concentration comprise entre 30 et 40 g/kg de sédiment dans les échantillons A181, A184, A185 et A193.

A ces trois fractions, s'ajoutent les galets. Ils sont particulièrement abondants dans les niveaux inférieurs des remplissages visibles

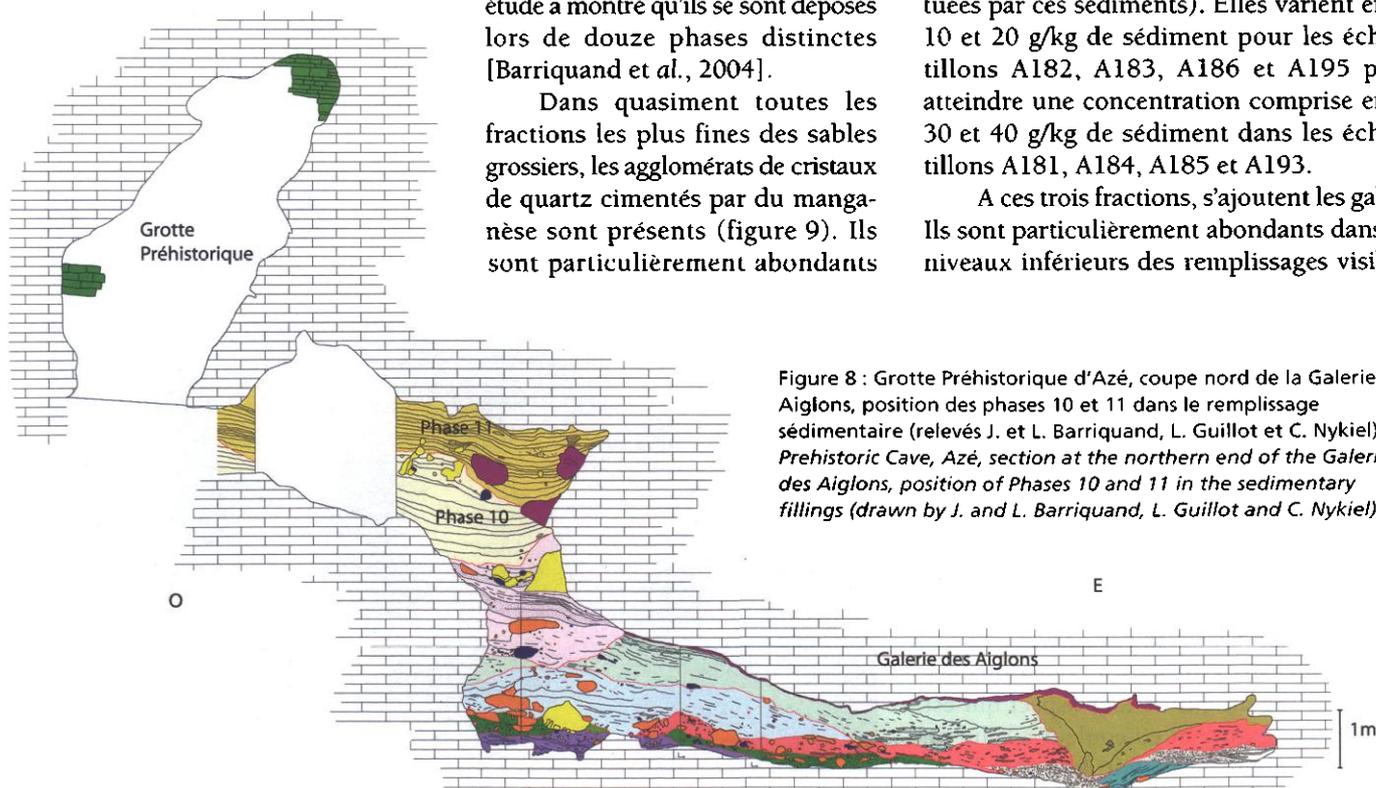


Figure 8 : Grotte Préhistorique d'Azé, coupe nord de la Galerie des Aiglons, position des phases 10 et 11 dans le remplissage sédimentaire (relevés J. et L. Barriquand, L. Guillot et C. Nykiel). Prehistoric Cave, Azé, section at the northern end of the Galerie des Aiglons, position of Phases 10 and 11 in the sedimentary fillings (drawn by J. and L. Barriquand, L. Guillot and C. Nykiel).

sur les coupes se trouvant à la Baionnette (figures 1 et 10). L'observation des coupes réalisées au niveau de la Baionnette et de la galerie de Chauffailles montre que ces galets sont en fait des résidus de l'encaissant. Ils sont très altérés et présentent parfois un gradient d'altération entre leur surface (partie la plus altérée) et leur cœur (photo de couverture). Une explication possible à leur formation est une désolidarisation du galet de l'encaissant par une rupture mécanique de l'altérite la plus altérée (celle-ci subissant une contrainte liée à la masse plus importante du cœur non altéré).

Ces galets, dont l'étude est en cours (J.-M. Baële, Université de Mons), contiennent généralement des dépôts d'oxyde de manganèse en leur sein.

3. Origine des sédiments

Les observations précédentes permettent d'affirmer qu'une grande partie des sédiments qui se trouvent dans la grotte de la Rivière Souterraine et qui comblent quasiment entièrement la grotte Préhistorique sont d'origine autochtone : soit ils proviennent de l'altérite résiduelle de l'encaissant, soit ils sont le résultat de l'action bactérienne.

Les conditions hydrodynamiques nécessaires à leur « arrachage » de l'encaissant correspondent à des niveaux moyens d'écoulement d'après les diagrammes de Passega.

En fonction du type d'écoulement ayant entraîné la formation des dépôts, la présence de l'altérite est plus ou moins marquée. Dans le cas des écoulements les plus calmes, la fraction la plus grossière des dépôts peut être constituée intégralement par des sédiments issus de l'encaissant.

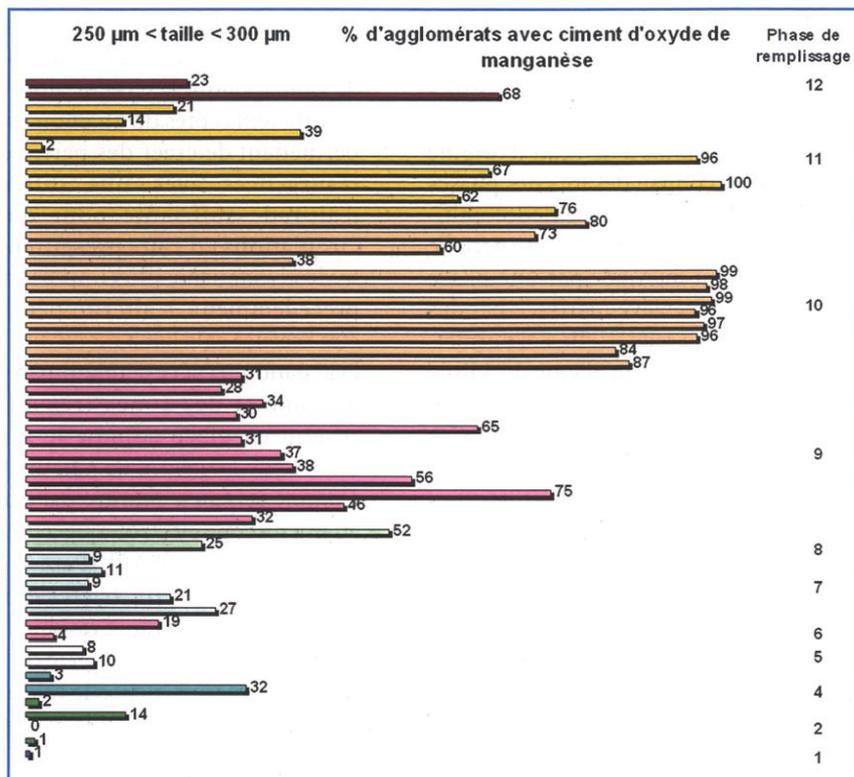


Figure 9 : Grotte Préhistorique d'Azé, coupe nord de la Galerie des Aiglons. Concentration en agglomérats de cristaux de quartz cimentés par des oxydes de manganèse dans la fraction granulométrique 250 à 300 µm en fonction des différentes phases du remplissage. *Prehistoric Cave, Azé, section at the northern end of the Galerie des Aiglons. Concentrations of conglomerations of quartz crystals cemented together by manganese oxides in the granulometric fraction 250 to 300 µm as a function of the different phases of filling.*

Conclusion

Le contexte géologique régional, l'étude détaillée de l'encaissant, l'étude du karst et des remplissages sédimentaires qu'il contient permettent de proposer le processus d'évolution du système karstique suivant :

- L'encaissant des grottes d'Azé est constitué par des calcaires formés entre l'Aalénien et le Bathonien inférieur. L'étude lithologique réalisée par S. Dechamps a permis de mettre en évidence les différences qui existent entre ces formations.

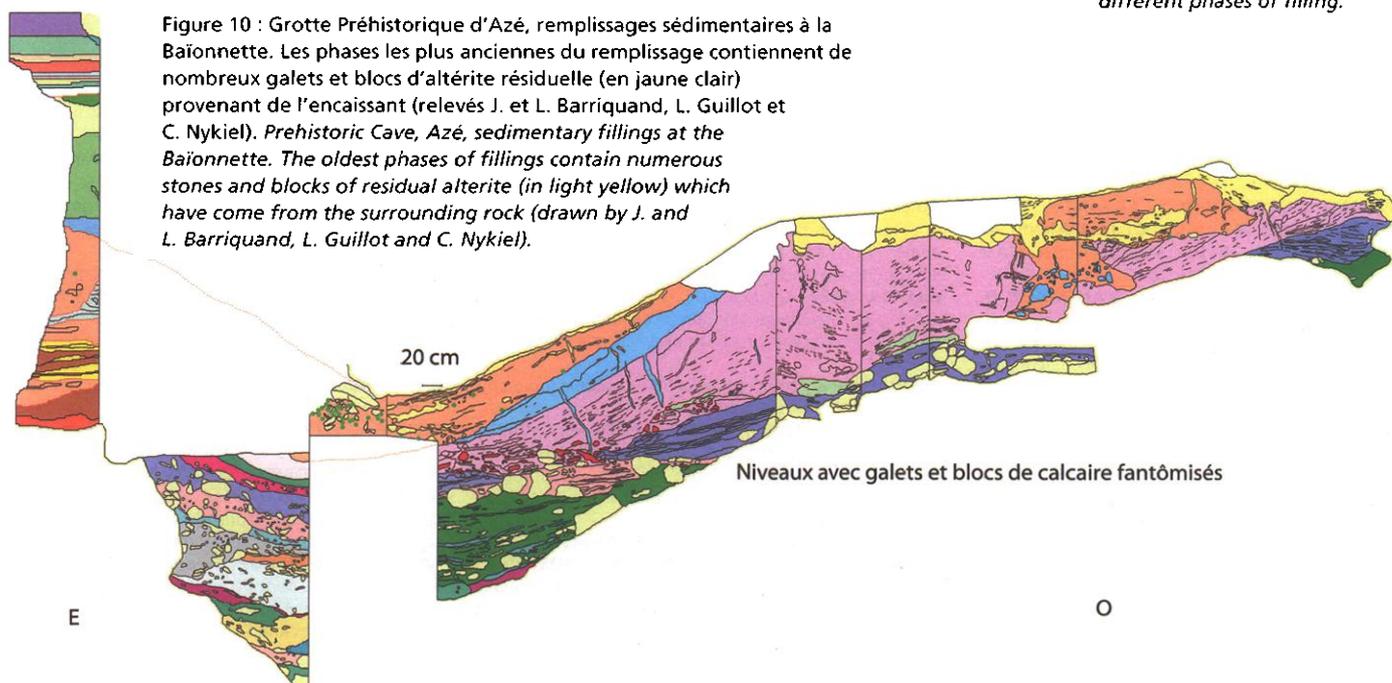


Figure 10 : Grotte Préhistorique d'Azé, remplissages sédimentaires à la Baionnette. Les phases les plus anciennes du remplissage contiennent de nombreux galets et blocs d'altérite résiduelle (en jaune clair) provenant de l'encaissant (relevés J. et L. Barriquand, L. Guillot et C. Nykiel). *Prehistoric Cave, Azé, sedimentary fillings at the Baionnette. The oldest phases of fillings contain numerous stones and blocks of residual alterite (in light yellow) which have come from the surrounding rock (drawn by J. and L. Barriquand, L. Guillot and C. Nykiel).*

- Dès le Jurassique moyen, la région connaît des périodes d'émersion comme en témoignent les paléo-lapiaz visibles dans la grotte de la Rivière Souterraine. Le calcaire soumis à de l'eau d'origine météorique connaît dès lors des phases de dolomitisation puis de dédolomitisation [Dechamps, 2011]. Cette période est également marquée par une phase tectonique extensive marquée par des failles de faible rejet. Celles-ci permettent une circulation d'eau de faible hydrodynamisme qui entraîne la dissolution partielle des carbonates. Ces deux facteurs entraînent la formation ponctuelle de zones altérées. Elles sont caractérisées par des masses volumiques nettement plus faibles. Ces différentes zones ne présentent pas de variation de volume entre les parties altérées et non altérées comme en témoigne l'entrée de la galerie de Chauffailles. Cette altération se poursuit jusqu'à la fin du Crétacé, période à laquelle le Mâconnais émerge définitivement.
- À l'Oligocène, la région connaît une grande phase tectonique distensive. Les blocs basculent vers le fossé bressan et la région prend sa morphologie actuelle. Des failles de rejet important apparaissent. Les fantômes de roches peuvent être traversés par celles-ci comme c'est le cas dans la

grotte de la Rivière Souterraine d'Azé. À Azé, la fracturation et les différences de potentiel qui se créent alors entre les différents côtés du chaînon calcaire permettent de créer des pertes et des résurgences avec une différence d'altitude suffisante pour que les circulations d'eau présentent un hydrodynamisme plus important que précédemment. L'altérite peut alors être évacuée et le karst est ouvert. Cette évacuation n'est cependant pas systématique et des zones très altérées restent en place comme le montre l'entrée de la galerie de Chauffailles.

- Comme cela a été montré par examen au microscope électronique à balayage et par coloration DAPI [Papier et al., 2011], une activité bactérienne se développe dans l'altérite résiduelle. Les bactéries utilisent la porosité de l'altérite pour progresser dans le calcaire. Le relargage de protons qui accompagne leur action oxydante sur le fer et le manganèse permet la poursuite de l'altération de l'encaissant. Les oxydes de fer et de manganèse résiduels de cette activité sont concentrés sur les parois du karst sous forme de croûtes présentant différents types d'architecture ou dans des zones de grande porosité de l'encaissant. La présence de ces dépôts sur des ossements d'ours montre que cette activité bactérienne existe encore

pendant certaines périodes du Quaternaire.

- Les résidus d'altération : chailles, galets, cristaux de quartz et de calcite, agglomérats cimentés par de l'oxyde de manganèse, argiles subsistent en plusieurs zones des grottes. En fonction de l'hydrodynamisme des écoulements, ceux-ci peuvent tomber par gravité ou sont « arrachés » et entraînés par les écoulements d'eau. Pour cela un faible hydrodynamisme correspondant à des dépôts de suspension uniforme voire à des dépôts de sédiments transportés par roulement avec une part de suspension, selon Passega, est suffisant.
- En fonction de l'hydrodynamisme de l'écoulement, ces résidus sont soit évacués du système karstique soit stockés dans une partie plus en aval du karst comme le montrent les phases 10 et 11 du remplissage de la galerie des Aiglons.

Remerciements

A tous les bénévoles qui œuvrent depuis 1953 pour la découverte et la connaissance du site des grottes d'Azé. A Bob Norington pour les traductions. Tous nos remerciements pour leur soutien au Conseil Général de Saône-et-Loire, à la DRAC Bourgogne, à la municipalité d'Azé, aux comités départementaux d'Archéologie et de Spéléologie, à l'Institut de Recherche du Val de Saône Mâconnais, au Spéléoclub Argillon et à l'Association Culturelle du Site d'Azé.

BARRIQUAND J., BARRIQUAND L. et ARGANT A., 2004 - Histoire d'un remplissage : Grotte Préhistorique d'Azé (Saône-et-Loire, France). *Cahiers Scientifiques. Départements du Rhône*. Muséum, Lyon, Hors série n°2, 145-148.

BARRIQUAND L., BARRIQUAND J. et DEBARD E., 2010 - Analyse des argiles de la Grotte Préhistorique d'Azé. Saône-et-Loire (France). Rapport DRAC Bourgogne.

BARRIQUAND J., BARRIQUAND L., GUILLOT L. et NYKIEL C., 2011A - Le site des grottes d'Azé, 60 ans de recherches dans le karst du massif de Rochebin (Saône-et-Loire). *Spelunca*, 123, p. 7-16.

BARRIQUAND J., BARRIQUAND L., ARGANT A., FLOSS H., GAILLAY A., GUERIN C., GUILLOT L., JEANNET M., NYKIEL C. et QUINIF Y., 2011B - Le site des Grottes d'Azé. Quaternaire, Hors-série, (4), 2011, 15-25.

BARRIQUAND L., BARRIQUAND J., KAUFFMANN O., AUBOEU F. et DECEUSTER J., 2012 - Analysis by electrical tomography of the Azé 1 fillings: results of the Azé 1 locus taphonomy. *Braunschweiger Naturkundliche Schriften*, Allemagne, sous-presses.

BARUSSEAU M., 1966 - Les changements de faciès du Jurassique Moyen dans les Monts du Mâconnais. Laboratoire de Géologie de l'Ecole Normale Supérieure, Paris.

BONNEFOY M., 2002 - A 300 pieds sous les vignes de Rochebin. L'exploration et les travaux d'aménagement des Grottes d'Azé. Association Culturelle des Grottes d'Azé, 153 p.

COULON M., 1979 - Milieux de sédimentation, strontium et manganèse dans les calcaires à entroques de Bourgogne (Jurassique moyen). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 7^{ème} série, tome XXI, n°6, 681-685.

DECHAMPS S., 2011 - *Sédimentologie du Bajocien et du Bathonien des grottes d'Azé (France), et comparaison avec le Luxembourg*. Mémoire de maîtrise en Sciences Géologiques, Université de Liège.

DICKSON J.A.D., 1966 - Carbonate identification and genesis as revealed by staining. *Journal of sedimentary petrology*. Vol. 36, n°2, p. 491-505.

DUNHAM R.-J., 1962 - Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In Ham, *Classification of carbonate rocks*. American Association of Petroleum Geologists Memoirs, 108-121.

GUILLOT L., MOREL J. et SIMONNOT G., 2005 - Gouffres et cavernes des Monts du Mâconnais. *Sous le plancher, numéro hors-série*. Bulletin des Ligues spéléologiques de Bourgogne et Franche-Comté, 34-42.

HILL C.A., 1967 - *Geology of Carlsbad Cavern and others caves in the Guadalupe Mountains New Mexico and Texas*. New Mexico Bureau of Miner and Mineral Resources. Bulletin 117.

KONHAUSER K., 2007 - *Introduction to geomicrobiology*. Blackwell Publishing (ed), 425 p.

NORTHUP D., DAIHM C., HENRIET L., SPILDE M., CROSSEY L., LAVOIE K., MALLORY L., BOSTON P., CROSSLAND K. and BARNES S., 2006 - Evidence for geomicrobiological interactions in Guadalupe Caves. *Journal of Cave and Karst Studies*, n°62, 80-90.

NORTHUP D.-E., BARNES S., YU L.-E., SPILDE M., SHELLENBERG R., DANG K., CROSSEY L., CONNOLLY C., BOSTON P., NATVIG D. and DAIHM C., 2003 - Diverse microbial communities inhabiting ferromanganese deposits in Lechugilla and Spider Caves. *Environmental Microbiology*, 5(11), 1071-1086.

PAPIER S., BAELE J.-M., GILLIAN D., BARRIQUAND J. and BARRIQUAND L., 2011 - Manganese geomicrobiology of the black deposits from the Azé Cave, Saône-et-Loire, France. *Quaternaire*, Hors-série, (4), 2011, 297-305.

PERTHUISOT J.-P., 1966 - Contribution à l'étude géologique des Monts du Mâconnais (feuilles Tourinus n°5 et Tourmus n°6). Laboratoire de Géologie de l'Ecole Normale Supérieure, Paris.

QUESNE D., GUIRAUD M., GARCIA J.-P., THIERRY J., LATHUILLE S. et AUDEBERT N., 2000 - Marqueurs d'une structuration extensive jurassique en arrière de la marge nord-téthysienne (Monts de Mâconnais, Bourgogne, France). *C.R. Académie des Sciences de Paris, Sciences de la Terre et des planètes* 330, p. 623-629.

QUINIF Y., 2010 - Fantômes de roche et fantômisation - Essai sur un nouveau paradigme en karstogénèse. *Karstologia Mémoires*, n° 18, 196 p.

QUINIF Y., 2011 - Ghost-rock structures and the nature of Azé Caves. *Quaternaire*, Hors-série n°4, p. 7-14.

RAT P., 2006 - *Guide Géologique Bourgogne-Morvan*. Guides géologiques régionaux, Dunod.

RIVIÈRE A., 1977 - *Méthodes granulométriques, techniques et interprétation*, Paris, Masson, 170 p.

SPILDE M., NORTHUP D., BOSTON P., SCHELBLE R., DANG K., CROSSEY L. and DAIHM C., 2005 - Geomicrobiology of cave ferromanganese deposits: a field and laboratory investigation. *Geomicrobiology Journal*, n°22, p. 99-116.

SPILDE M., NORTHUP D. and BOSTON P., 2006 - Ferromanganese deposits in the caves of the Guadalupe Mountains. *New Mexico Society Guidebook*, 57th Field Conference, Caves and Karst of Southeastern New Mexico, p. 161-166.