



HAL
open science

Les dépôts carbonatés de l'aqueduc de Poitiers-Fleury (Vouneuil-sous-Biard, 86) : l'enregistrement d'une dynamique hydro-sédimentaire instable ?

Christophe Durllet, Jérôme Brenot, Éric Philippe, Julien Curie,
Pierre-Alexandre Teboul, Théophile Cocquerez, Ludovic Bruneau

► To cite this version:

Christophe Durllet, Jérôme Brenot, Éric Philippe, Julien Curie, Pierre-Alexandre Teboul, et al..
Les dépôts carbonatés de l'aqueduc de Poitiers-Fleury (Vouneuil-sous-Biard, 86) : l'enregistrement
d'une dynamique hydro-sédimentaire instable ?. *Archéologie, société et environnement*, 2023, 1 (1),
10.21494/ISTE.OP.2023.0964 . hal-04598086

HAL Id: hal-04598086

<https://u-bourgogne.hal.science/hal-04598086v1>

Submitted on 22 Jul 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.

Les dépôts carbonatés de l'aqueduc de Poitiers-Fleury (Vouneuil-sous-Biard, 86) : l'enregistrement d'une dynamique hydro-sédimentaire instable ?

The carbonate deposits of the Poitiers-Fleury aqueduct (Vouneuil-sous-Biard, 86): an unstable hydro-sedimentary dynamic recording?

Christophe DURLET¹, Jérôme BRENOT², Éric PHILIPPE³, Julien CURIE⁴, Pierre-Alexandre TEBOUL^{1,5}, Théophile COCQUERZ¹ et Ludovic BRUNEAU¹

¹ Université de Bourgogne, UMR 6282 Biogéosciences, christophe.durlet@u-bourgogne.fr

² Éveha-Troyes, jerome.brenot@eveha.fr

³ Éveha-Rennes, eric.philippe@eveha.fr

⁴ UMR 7041 ArScAn, équipe Archéologies environnementales, Paris, France, julien.curie@gmail.com

⁵ Université Aix-Marseille, UMR 7330 CEREGE, pierre-alexandre.teboul@totalenergies.com

RÉSUMÉ. La fouille préventive menée sur un tronçon d'aqueduc antique alimentant la ville de Poitiers sur la commune de Vouneuil-sous-Biard (86) a mis au jour un encroûtement calcitique d'une vingtaine de centimètres d'épaisseur, conservé sur les parois basses d'un canal enterré. Deux types de faciès s'y succèdent, parfois en alternance. A la base de l'encroûtement, les lamines sont majoritairement assimilables à des spéléothèmes qui seraient issus du captage exclusif de sources karstiques. La partie médiane et terminale de l'encroûtement est davantage marquée par des dépôts sous influence microbienne (« microbialites »), moins laminés, qui semblent indiquer des épisodes de passage d'eaux riches en matière organique, probablement en partie issues du captage de ruisseaux de surface. Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ et de $\delta^{13}\text{C}$ de ces divers faciès sont intermédiaires entre celles attendues pour des dépôts de concrétions karstiques et de tufs calcaires, formés dans un conduit obscur avec une faible amplitude thermique saisonnière. Des couples de lamines inframillimétriques, comparables à des couples annuels décrits dans d'autres aqueducs, sont localement bien exprimés, surtout à la base de l'encroûtement. Cependant, dans l'état actuel des investigations, ni leurs caractéristiques pétrographiques, ni leur signature isotopique ne permettent d'attester de leur annualité.

ABSTRACT. Archaeological investigations conducted on an ancient aqueduct supplying the antique town of Poitiers, western France, in the municipality of Vouneuil-sous-Biard (86), has uncovered a 20 cm thick calcitic crust on walls of a buried channel. Two types of facies alternate in this crust. In the lower crust laminae are mostly comparable to speleothems that would be derived from relatively pure karstic waters. The mid and upper parts of the crust are influenced by microbial communities and probably derived from capture of surface streams rich in organic matter. The $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values of these two facies, formed in a dark drain with little seasonal temperature variation, are intermediate between those expected for pure speleothems and tufa deposits. Alternance of very thin dark and light laminae exist, especially at the base of the crust. This may represent annual growths, but isotopic and petrographic existing data do not prove this hypothesis which would need further geochemical investigations.

MOTS-CLÉS. Dépôts calcaires, aqueduc, analyse isotopique.

KEYWORDS. Calcite deposits, aqueduct, isotopic analysis.

1. Introduction

Les dépôts carbonatés préservés au sein de l'aqueduc de Vouneuil, à proximité de Poitiers, dans l'ouest de la France, entrent pleinement dans la problématique des travertins déposés dans les aqueducs antiques et rejoignent la notion de « travertins d'origine anthropique » décrite par Fabre (1986), reprise plus récemment sous la syntaxe de « travertins artificiels » par Pentecost (2005). Les publications concernant ce type de dépôt en contexte archéologique, bien qu'elles demeurent, à l'heure actuelle, relativement rares, ont pu

pleinement montrer le potentiel exceptionnel de ces archives sédimentaires (Curie & Petit, 2014). Ce potentiel a pu s'exprimer tant à travers un questionnement géoarchéologique, comme l'établissement d'une chronologie relative par le comptage de lamines annuelles qui composent le sédiment (l'exemple de l'aqueduc de Cologne, Allemagne (Schulz 1986), la mise en évidence de fuites dans l'aqueduc de Nîmes (Guendon & Vaudour, 2000), l'apport pour comprendre le fonctionnement (captages des sources ; paléodébits) et l'entretien des aqueducs d'Arles (Guendon & Leveau, 2005), de Nîmes (Carbon et al., 2005), ou encore la présence de structures en cuivre supposées (Carlut et al., 2009), que dans une problématique paléoenvironnementale et paléohydrologique (Bobée et al., 2011 ; Dubar, 2006a, 2006b). On peut également évoquer l'archéosismicité et donc la recherche de marqueurs de néotectonique (Aqueducs de Nîmes (Carbon et al. 2005) ou d'Ephèse, Turquie (Passchier et al., 2019).

Dans le cas de l'étude des encroûtements calcaires retrouvés lors de la fouille d'un tronçon de l'aqueduc alimentant la ville de Poitiers, la problématique principale concernait précisément la durée de fonctionnement du canal souterrain, pour lequel les investigations archéologiques et historiographiques ne permettaient pas d'apporter d'éléments de datation précis mais également répondre aux questionnements concernant d'une part le régime hydraulique du conduit, ses variations, la nature des eaux ayant transité. Cet article propose donc de restituer la démarche qui a été mise en œuvre depuis la phase de fouille jusqu'aux analyses pétrographiques et géochimiques afin d'éclairer la dynamique de mise en place des encroûtements calcaires mis au jour.

2. Contexte archéologique de l'aqueduc

2.1. Présentation de l'opération

Le diagnostic archéologique réalisé en janvier 2011 sous la direction de Nadine Béague de l'Inrap dans le cadre du projet de ligne ferroviaire à grande vitesse Sud-Europe Atlantique entre Tours et Bordeaux a mis au jour un tronçon de l'aqueduc de Poitiers-Fleury dans le « Bois de la Queue du Renard » à Vouneuil-sous-Biard (Béague, 2011). Suite à cette découverte, le Service Régional de l'Archéologie de Poitou-Charentes a prescrit une fouille préventive dont l'objectif consistait à étudier la canalisation dans l'emprise du tracé du futur TGV. Cette opération a été confiée au bureau d'études Éveha et s'est déroulée entre le 2 avril et le 25 mai 2012 sous la direction d'Éric Philippe.

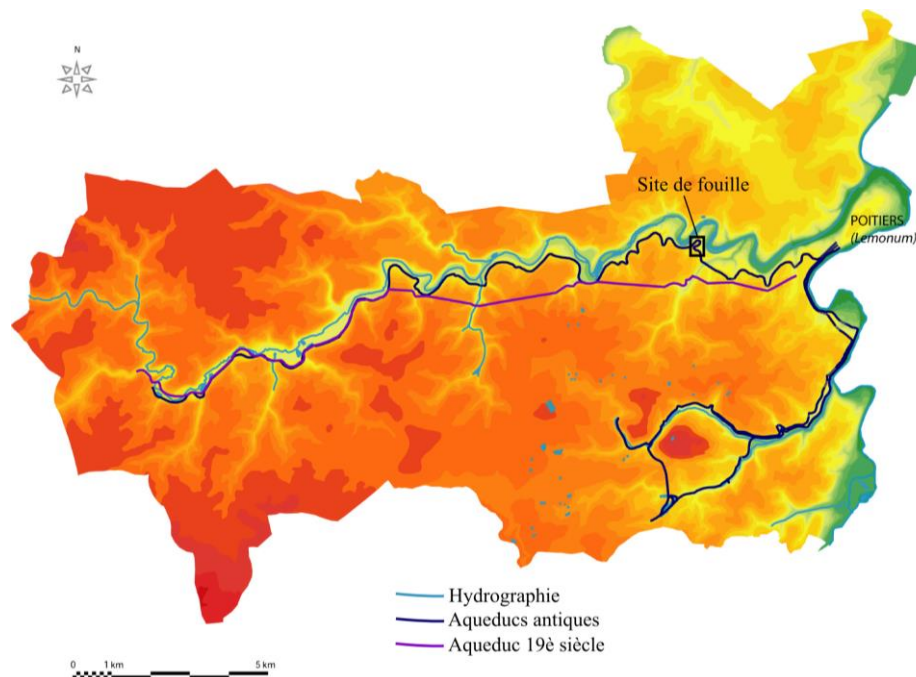


Figure 1. Tracé des aqueducs antiques et modernes alimentant la ville de Poitiers et localisation de la fouille sur le tracé de l'aqueduc « Poitiers-Fleury » qui parcourt 25,5 km. La dénivellée entre les sources captées et l'exutoire de l'aqueduc est d'environ 3 m, soit une pente moyenne proche de 0,12 m/km.

© Carte modifiée d'après Lambaré-Vannieuwenhove (2011)

L'aqueduc de Fleury, le plus long des aqueducs antiques de *Lemonum* (actuellement Poitiers), a fait l'objet de descriptions depuis les années 1830. Ces dernières ont été largement complétées par une notice publiée en 1854 par l'ingénieur en chef Duffaud à l'occasion d'un projet de réutilisation des aqueducs antiques pour approvisionner la ville en eau (Duffaud, 1854). Ces travaux ont permis d'établir un certain nombre de caractéristiques des trois adductions qui alimentaient *Lemonum*. Pour l'aqueduc dit de Fleury, Duffaud décrit un conduit de section trapézoïdale, en majorité enterré et construit en béton coffré, qui parcourt près de 25,5 km avec une pente moyenne s'établissant à 0,12 m/km (figure 1). Cette pente extrêmement faible – nettement en deçà des préconisations des auteurs anciens et des pentes observées sur les aqueducs qui ont fait l'objet d'études récentes – n'est pas sans soulever un certain nombre d'interrogations, notamment sur la mise en œuvre et le fonctionnement d'un tel conduit.

Aucune véritable étude archéologique de l'ensemble du conduit n'a été menée depuis le milieu du XIX^e siècle, la datation de l'ouvrage reste donc floue. L'un des objectifs de la fouille de Vouneuil-sous-Biard était d'apporter des éléments de chronologie. Malheureusement aucun élément mobilier datant n'a été mis au jour sur le tronçon étudié. Quelques essais de datation radiocarbone ont été menés sur des prélèvements de charbons issus à la fois de la construction, des dépôts carbonatés et du comblement mais les résultats ne permettent pas de trancher définitivement sur la chronologie absolue de l'ouvrage.

2.2. Origine de l'eau, tracé et pente du tronçon étudié

Le tronçon fouillé, sur une longueur totale de 300 m, est situé à environ 15 km à l'est des sources captées supposées et à 5 km de la ville de Poitiers (figure 1). Aucune donnée archéologique précise ne concerne la ou les zones de captage. Les sources karstiques de « La Preille » et de « Fleury », situées entre les communes de Lavausseau et La Chapelle-Montreuil, sont toutefois situées à une altitude qui permet un fonctionnement sur le principe de l'écoulement gravitaire. En l'absence de vestiges archéologiques, le problème de l'identification des sources pourrait peut-être être approchée par des analyses géochimiques des éléments traces dans une étude future comme celle menée avec succès sur d'autres ouvrages hydrauliques (par ex. Aqueduc de Fréjus, Gébara et J.M. Michel 2002). Le tracé de l'aqueduc est tributaire de la topographie ; il serpente donc dans le paysage selon les courbes de niveau. La construction de l'aqueduc est réalisée par tronçons qui se connectent les uns aux autres en gardant une déclivité nécessaire à l'écoulement de l'eau.



Figure 2. Vue générale d'une section de l'aqueduc en cours de fouille. À noter que les éléments de la voûte ne sont pas conservés dans ce secteur. © E. Philippe, J. Brenot, EVEHA

Dans le « Bois de la Queue du Renard », le tronçon étudié de l'aqueduc de Poitiers-Fleury (**figure 2**), contourne à flanc de versant à la fois un point haut (butte) et un vallon (**figure 3**). Dans le secteur étudié en 2012, le fond du canal se situe autour de la cote 115 NGF (**figure 4**), selon une pente presque nulle qui tend à confirmer les propositions de l'ingénieur DUFFAUD, c'est-à-dire à 0,012 % (soit environ 1 mm/m). Dans la zone de fouille, les constructeurs ont délibérément choisi de s'adapter à une topographie complexe sans réaliser d'ouvrages de franchissement aérien ou souterrain pour réduire la longueur de l'aqueduc et faciliter la mesure d'une pente régulière.



Figure 3. Plan de la fouille (avril-mai 2012). © E. Philippe, J. Brenot, EVEHA

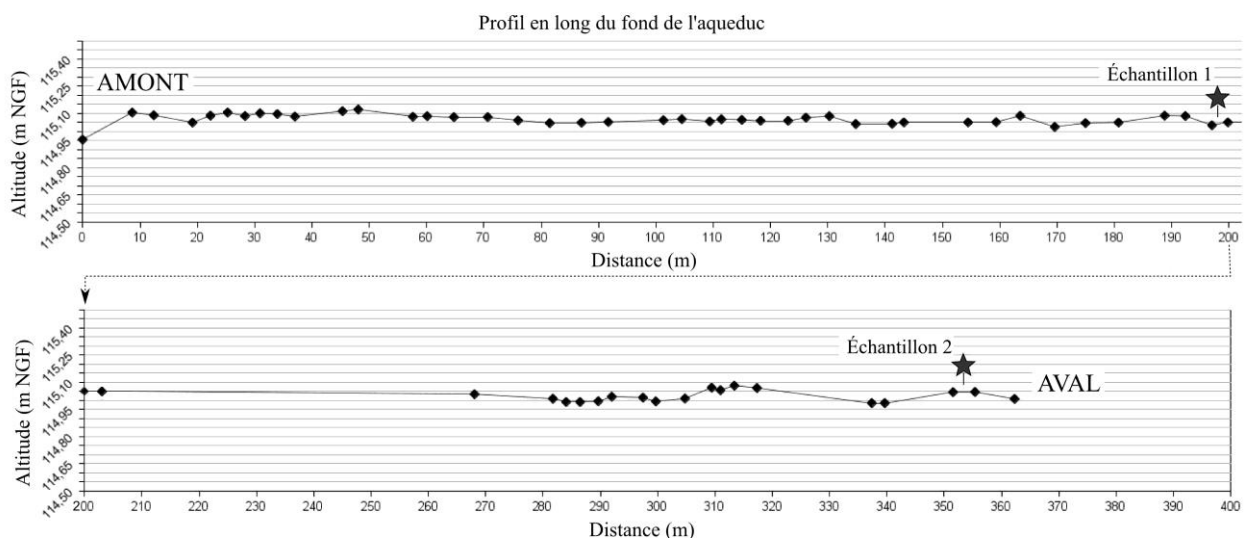


Figure 4. Profil en long mesuré sur la zone de fouille. © E. Philippe, J. Brenot, EVEHA

Le profil en long révèle des irrégularités topographiques du fond de l'aqueduc liées peut-être à des approximations dans le suivi topographique et la réalisation du conduit, mais sans doute aussi à la difficulté de suivre une pente avoisinant 1 mm/m. Ces irrégularités sont représentées par des tronçons sub-horizontaux mais également des pentes négatives traduites par des points hauts. Par ailleurs, certains tronçons de l'aqueduc s'appuient sur une épaisse série colluviale recouvrant les calcaires bajociens qui forment l'ossature du plateau. Ces colluvions, moins stables que les calcaires sous-jacents, ont pu subir des affaissements postérieurs à la construction de l'aqueduc. Ainsi pourrait s'expliquer la première cote, particulièrement basse, mesurée à l'extrême amont de la zone fouillée (**figure 4**). Les petits défauts de pente, s'ils ont existé lors du fonctionnement de l'aqueduc, n'ont pas eu nécessairement d'impact majeur sur l'écoulement de l'eau puisque la section utile du conduit est d'environ 0,64 m² et les concrétions témoignent de cet écoulement dans le canal, mais peut en revanche avoir un impact sur la dynamique de sédimentation carbonatée et sur le flux de particules sédimentaires. Le débit estimé – théorique – de l'aqueduc fouillé est compris entre 7000 et 11000 m³/jour, mais il ne peut pas être confronté aux données actuelles des sources supposées qui alimentaient l'aqueduc car elles nous sont inconnues.

2.3. Mode de construction

La fondation de l'aqueduc est constituée d'une chape de béton coulée sur un hérisson de pierres qui tapisse le fond de la tranchée d'installation (**figure 5**). Sur cette chape, les parois du canal ont été coulées au moyen de coffrages. Un fin enduit de mortier de tuileau parfaitement lissé recouvrait l'intérieur du conduit.

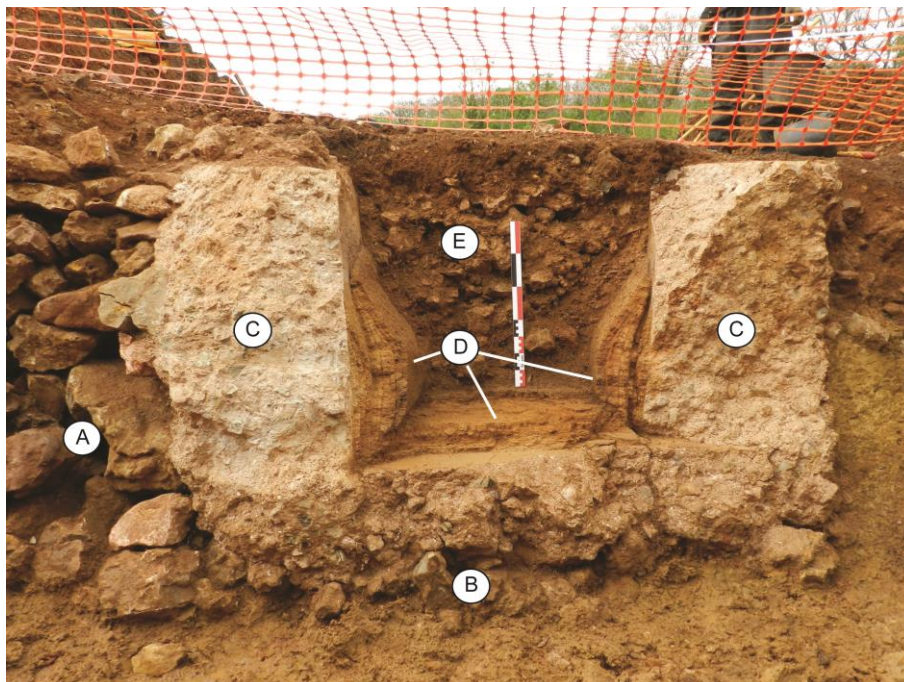


Figure 5. Section de l'aqueduc en cours de fouille (voir localisation en **figure 3**). **A** - Drain extérieur en pierres sèches, uniquement en rive droite, côté relief ; **B** - Hérisson de base recouvert d'un mortier de tuileau ; **C** - Piédroits en béton coffré, recouverts d'un fin enduit de mortier de tuileau ; **D** - Encroutement calcaire sur le fond et la base des parois ; **E** - Comblement de l'aqueduc (remarquer ici l'absence des pierres de la couverture). © E. Philippe, J. Brenot, EVEHA

Dans la quasi-totalité du tronçon étudié, un mur en pierres sèches a été édifié entre la paroi située du côté du relief et le bord de la tranchée d'installation. Cet aménagement assurait le drainage des écoulements de surface vers le hérisson qui tapisse le fond de la tranchée d'installation du conduit. Ainsi, l'aqueduc et l'eau destinée à la ville étaient isolés des infiltrations d'eaux de surface. La couverture du canal était cintrée et composée de pierres calcaires grossièrement équarries liées au mortier de tuileau. L'extrados était recouvert d'une couche de mortier de chaux taloché incluant des granulats afin de garantir l'étanchéité du conduit. Dans ce secteur cependant, la couverture a fait l'objet d'une récupération presque systématique comme l'indiquent les nombreux éléments de mortier de tuileau retrouvés à l'intérieur du canal et la quasi-absence de pierres dans le comblement de l'aqueduc (preuve que l'aqueduc était là faiblement enterré, voire sub-

affleurant, ce qui peut avoir des implications sur l'évolution de la qualité des eaux et les interprétations qui sont faites plus loin sur ce sujet. Seuls les départs de voûte sont partiellement conservés sur le sommet des piédroits dans quelques secteurs. Les indices conservés permettent toutefois de confirmer les observations anciennes sur le mode de construction de la couverture. Notons toutefois la présence dans le canal, sur un très court tronçon, d'un effondrement de dalles calcaires appartenant à la voûte (**figure 6**). L'encroûtement des dalles indique que de l'eau saturée en carbonate a continué à circuler ou à stagner dans le conduit après cet effondrement.



Figure 6. Section de l'aqueduc montrant les dalles calcaires issues de l'effondrement de voûte (voir localisation sur la **figure 3**). © E. Philippe, J. Brenot, EVEHA

2.4. Les dépôts carbonatés

Les eaux qui ont transité (ou stagné) dans la canalisation, au moins dans cette partie du tracé de l'aqueduc, ont provoqué une accumulation de dépôts carbonatés sur les parois et le fond du canal (**figure 5**). Aucune trace de curage évidente n'a été observée lors de la fouille dans ces encroûtements carbonatés. Des prélèvements ont été réalisés *in situ* afin de mener des analyses dans le but de tenter de répondre aux questionnements concernant d'une part le régime hydraulique du conduit, ses variations, la nature des eaux ayant transité, et d'autre part la durée de vie de l'adduction et la présence ou non de traces d'entretien.

3. Méthodologie

3.1. Échantillonnage de terrain

Deux échantillons provenant des dépôts de l'aqueduc de Vouneuil sont concernés par cette étude préliminaire : l'échantillon 1 (*Aqueduc-CRG*) et l'échantillon 2 (*Aqueduc-BRD*). Ces échantillons ont été prélevés manuellement par arrachage des concrétions et emballage en bandes plâtrées. La faible cohésion interne des concrétions (faiblesses au niveau des discontinuités sédimentaires) et la forte adhérence des concrétions précoces aux parois ont rendu le prélèvement délicat. L'échantillon 1 présente le début de l'encroûtement, au contact avec le mortier de tuileau de l'aqueduc, sur une épaisseur d'environ 5 cm. L'échantillon 2 montre la suite de l'encroûtement, jusqu'aux dernières précipitations qui ont précédé la destruction et le comblement de l'aqueduc. Ces deux échantillons sont situés dans la zone avale du tronçon de l'aqueduc fouillé (cf. positionnement en **figures 3 et 4**). Avant sciage et fabrication de lames minces de grandes dimensions, ces échantillons ont fait l'objet d'une imprégnation de résine Epoxy à l'atelier de litholamellage de l'Université de Bordeaux (UMR CNRS 5805 EPOC).

3.2. Analyse macro- et microscopique

Après une analyse macroscopique des échantillons non sciés, un scannage des lames minces (**figure 7A**) a permis de révéler la zonation et séquences macrofaciologiques des deux échantillons. Dans un second temps, une analyse microscopique de ces lames minces a été réalisée grâce à un microscope Nikon AZ100 équipé en lumière transmise et réfléchie, polarisée (LPA) et non polarisée (LPNA), couplé à une caméra numérique Zeiss MrC5 (Laboratoire Biogéosciences, Université de Bourgogne). Un rapide examen de ces lames minces a également été effectué sous cathodoluminescence. Cette dernière investigation n'a pas révélé d'informations complémentaires utiles pour la présente étude (luminescence très faible et peu contrastée).

3.3. Analyse géochimique

Les analyses géochimiques des isotopes de l'oxygène et du carbone ont été réalisées au sein du laboratoire Biogéosciences (Plateforme GISMO, Université de Bourgogne). Deux modes opératoires ont été suivis dans les micro-prélèvements pour les isotopes stables de l'oxygène ($\delta^{18}\text{O}$) et du carbone ($\delta^{13}\text{C}$). Dans un premier temps, les prélèvements ont été réalisés au stilet (sous loupe) à un pas de mesure de 1 mm, afin de rechercher un possible enregistrement de séquences d'épaisseur pluri-millimétrique à centimétrique. Cette première série de prélèvements (soit 112 mesures) a été effectuée sur toute l'épaisseur de l'échantillon 1 et sur les deux tiers inférieurs de l'échantillon 2 (**figure 7C**). Dans un second temps, la résolution de l'analyse a été augmentée à un pas de 200 microns afin de rechercher d'éventuels cycles isotopiques d'épaisseur inframillimétrique. Cette opération, réalisée par décaissements successifs tous les 200 microns (20 mesures) d'un front de taille rectiligne de 4 mm de long à l'aide d'une micro-fraiseuse 3D équipée d'une fraise de 400 μm de diamètre à la base de la séquence de l'échantillon 1 (**figures 7A et 7D**). Les poudres micro-prélevées ont été analysées sur un spectromètre ISOPRIME équipé d'un *dual inlet* ISOPRIME étalonné avec les standards NBS19 et NBS18.

4. Résultats

4.1. Résultats de l'analyse macroscopique des faciès

En section, l'encroûtement montre à l'œil nu un faciès ondulé et localement laminé avec une alternance de deux types de macro-faciès : F1 et F2 (**figure 7A**). Le faciès F1, dense et de couleur beige clair (en lumière réfléchie), apparaît peu poreux. Il est formé d'une superposition de lamines inframillimétriques parallèles les unes aux autres. Ces fines lamines sont ondulées, épousant la forme buissonnante sous-jacente. Elles sont organisées en couples de lamines alternativement claires et sombres, les dernières étant vraisemblablement légèrement plus poreuses. Le faciès F2 est beaucoup plus (macro)poreux, avec des buissonnements dendritiques radiaux (botryoïdes dendritiques) qui sont décrits plus en détails dans la partie microfaciologique. Des lamines inframillimétriques y sont également visibles, mais de manière plus ténue et plus irrégulière que dans le type F1. La succession des types F1 et F2 n'apparaît pas aléatoire, elle permet de différencier à l'œil nu et à la loupe six séquences macrofaciologiques dénommées S1 à S6.

- **La séquence S1** est exclusivement constituée du faciès F1. Prenant appui sur le mortier de l'aqueduc (non prélevé dans l'échantillon 1) elle se développe sur une épaisseur de l'ordre d'un centimètre. On y distingue au minimum 9 couples de fines lamines claires/sombres, dont deux ont été micro-échantillonnée pour les mesures isotopiques (figure 7D).
- **Les séquences S2 et S3** sont très semblables, d'épaisseur très irrégulière, en moyenne de l'ordre de huit millimètres. Toutes deux débutent par une micro-discontinuité très accidentée formant un contact net entre le faciès F1 de la séquence sous-jacente et le faciès F2 de base de la séquence. Ce faciès F2 est très peu développé, localement absent, et laisse rapidement place au faciès F1 qui forme l'essentiel des séquences S2 et S3. Huit couples de lamines inframillimétriques sont discernables dans la séquence S2. Dans la séquence S3, la distinction et le décompte de ces fines lamines sont difficiles à cette échelle d'observation.

- **La séquence S4** débute également avec une micro-discontinuité très irrégulière qui épouse la forme des botryoïdes dendritiques de la séquence sous-jacente S3. Elle montre un faciès F2 très épais (jusqu'à 3 cm) suivi d'un faciès F1 moins épais (maximum 5 mm) et même absent ponctuellement. Il est difficile d'y décompter les couples de lamines inframillimétriques, surtout dans le faciès F2. Six de ces couples sont toutefois bien visibles en sommet séquence S4.
- **La séquence S5** est très semblable à la séquence S4, tant en termes de faciès que d'épaisseur. Sa micro-discontinuité basale paraît érosive, avec de possibles arrachements de la partie supérieure de la séquence S4. Six couples de lamines inframillimétriques sont discernables en sommet de séquence.
- **La dernière séquence S6** est la plus épaisse (jusqu'à 6,8 cm dans l'échantillon 2) et exclusivement constituée du faciès F2. Dans le détail, trois sous-séquences strato-croissantes (S6a, S6b et S6c) y sont discernables, en fonction de l'épaisseur et de la coalescence des dendrites calcitiques, ce qui entraîne une modification de la (macro)porosité de l'ensemble. Les couples de fines lamines sont nombreux (plus de 15 couples) mais ils sont très difficiles à discerner dans les intervalles les plus poreux.

A l'échelle de l'ensemble de l'encroûtement, on peut noter que (i) les six séquences sont globalement strato-croissantes et (ii) que le faciès F1, omniprésent à la base, laisse progressivement place au faciès F2 qui est exclusif à son sommet. Ce dernier constitue à lui seul plus de 80 % de l'encroûtement étudié.

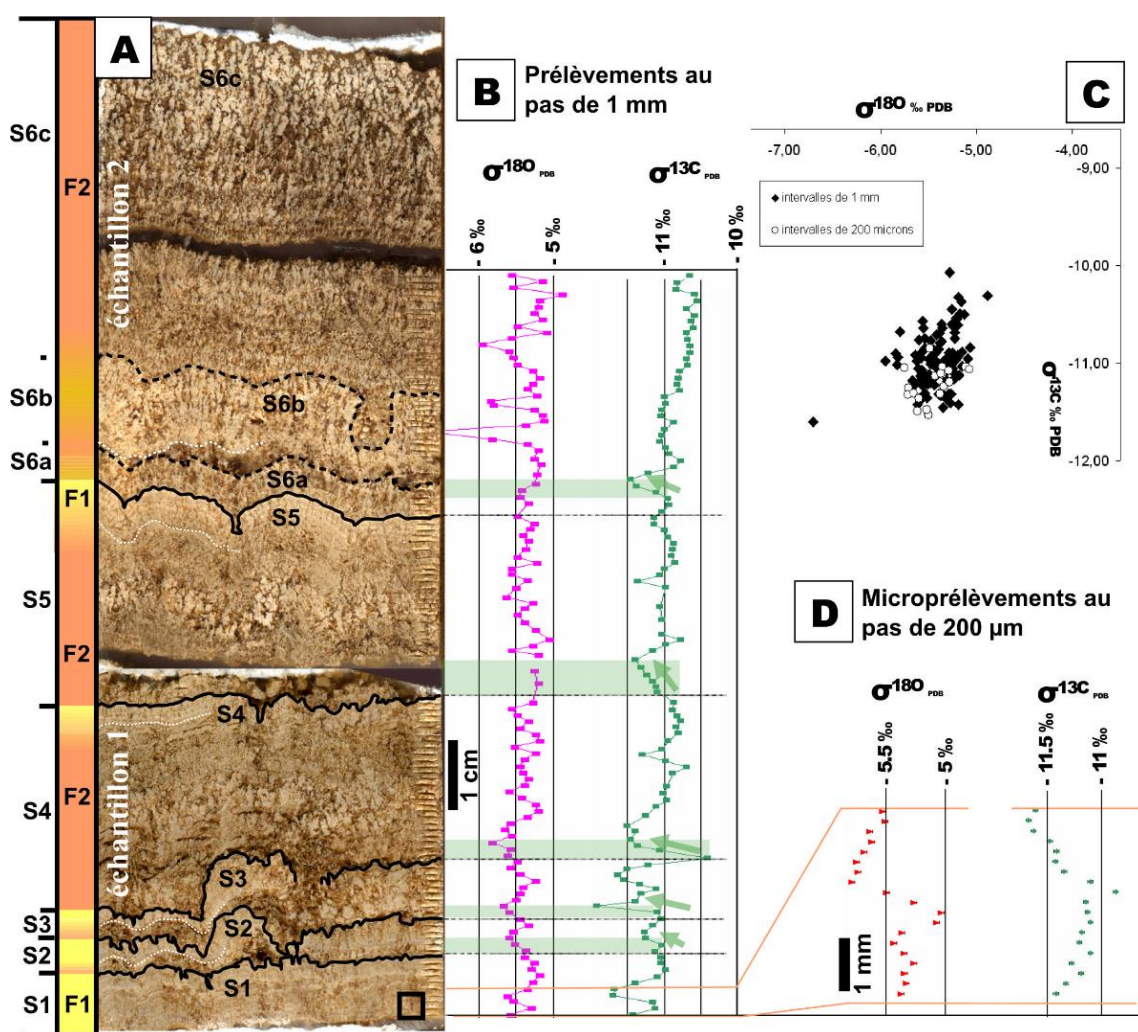


Figure 7. A - Aspect macroscopique des échantillons 1 et 2 de l'encroûtement de l'aqueduc. La colonne de gauche présente la succession des faciès F1 (jaune) et F2 (orange) décrits dans le texte. Cette succession, non aléatoire, permet de définir les séquences S1 à S6. Les micro-discontinuités formant la base des séquences sont surlignées en noir. La séquence S6, la plus épaisse, est divisée en 3 sous-séquences (S6a, S6b et S6c) ici séparées par des pointillés. Les encoches, visibles à droite, correspondent aux prélèvements au pas de 1mm. Le rectangle noir en bas à droite délimite la zone des micro-prélèvements au pas de 200 microns. B - Evolution verticale de δ^{180} et de δ^{13C} pour les prélèvements au pas de 1 mm. Les tranches surlignées en vert clair signalent les décroissances du δ^{13C} à la base des séquences S2 à S6. C - Diagramme δ^{180} versus δ^{13C} des 132 mesures isotopiques sur les prélèvements au pas de 1 mm. Les intervalles de 1 mm sont représentés par des losanges noirs et les intervalles de 200 microns par des cercles blancs. D - Microprélèvements au pas de 200 µm. Evolution verticale de δ^{180} et de δ^{13C} pour les micro-prélèvements au pas de 200 µm.

pas de 1 mm et de 200 microns. **D** - Evolution verticale du $\delta^{18}O$ et du $\delta^{13}C$ pour les micro-prélèvements à pas de 200 microns. Les tendances sont similaires à celles observées pour les prélèvements au pas de 1 mm. © C. Durllet

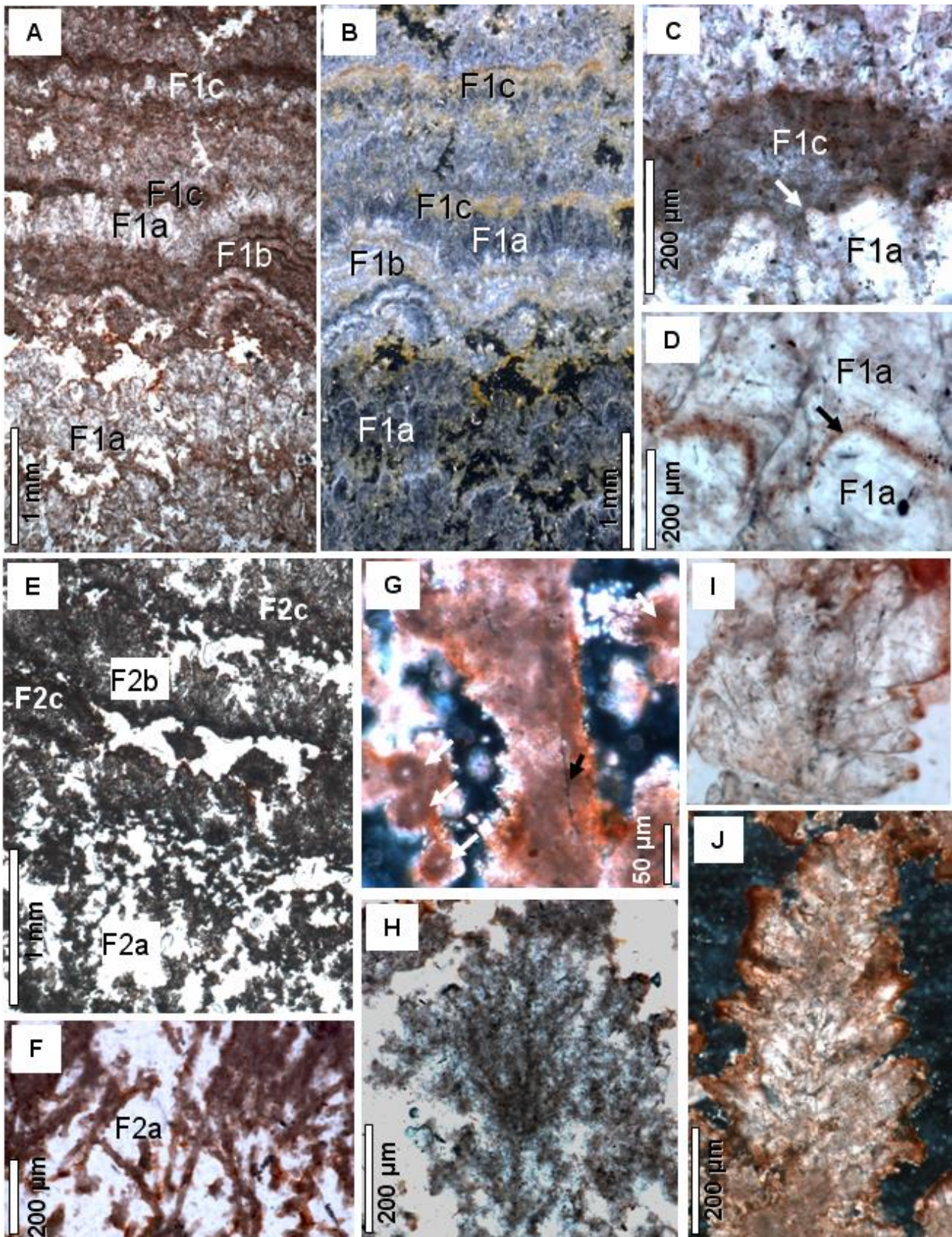


Figure 8. Microfaciès en lames minces. **A et B** - Succession du microfaciès spartitique F1a et micritique F1b en lumière transmise (A) et en lumière réfléchie (B) au sein de la séquence S1. **C** - Une micro-discontinuité (flèche blanche) sépare le microfaciès spartitique F1a du microfaciès micritique F1b (LPNA, séquence S1). **D** - Les prismes spartitiques du microfaciès F1a sont parfois marqués par de très fines bandes d'inclusions solides brunâtres (flèche noire) pouvant correspondre à un « saupoudrage » de particules argileuses ou organiques lors du passage d'eaux

turbides dans l'aqueduc (LPNA, séquence S1). **E** - Alternance des microfaciès F2a, F2b, et F2c au sein de la séquence S6 (LPNA). **F** - Les filaments microbiens à gangue micritique brunâtre du microfaciès F2a ont ici une disposition en éventail et sont dépourvus de cimentation sparitique ou micro-sparitique, expliquant une macroporosité élevée (LPNA, séquence S6). **G** - Détail d'un « manchon » microbien montrant un axe fin et sombre (flèche noire) entouré de sa gangue micritique et environné de coccoïdes à gangue également micritique (flèches blanches) (microfaciès F2a, LPA, séquence S6). **H** - Cet éventail de filaments microbiens est affecté par une cimentation microsparitique (microfaciès F2b) qui n'obture que très partiellement la porosité (LPNA). **I et J** - Des prismes sparitiques se développant « en épis » ont nucléé autour des filaments microbiens (microfaciès F2b, LPNA et LPA). © C. Durlot

4.2. Résultats de l'analyse des micro-faciès

L'examen sous fort grossissement du faciès F1 révèle une superposition de deux microfaciès correspondant à l'alternance des lamines inframillimétriques. Le microfaciès F1a, sombre en lumière réfléchie (**figure 8B**) et clair en lumière transmise (**figure 8A**), est sparitique, c'est-à-dire formé par de « grands » prismes de calcite transparente (**figure 8C et figure 8D**). Pouvant atteindre 800 microns de long pour une largeur comprise entre 100 et 400 microns, ces prismes peuvent être accolés et allongés (suivant l'axe C) parallèlement les uns aux autres. Ils peuvent aussi être légèrement divergents, en particulier lorsqu'ils sont implantés sur des bourgeonnements/excroissances des lamines sous-jacentes. Certains de ces prismes peuvent être turbides, riches en inclusions solides grisâtres à brunâtres, les inclusions pouvant être alignées et concentrées suivant les zones de croissance des cristaux (**figure 8D**). L'espace inter-cristallin (entre les prismes) peut être vide ou comblé par un fin sédiment brunâtre, argileux et/ou micritique. Le microfaciès F1b est d'avantage micritique (petits cristaux de calcite de moins de 30 microns de long) ou argileux, apparaissant brunâtre en lumière transmise (**figure 8A**) et clair en lumière réfléchie (**figure 8B**). Il peut être très finement laminé ou au contraire formé par des « amas » de sédiment très fin reposant sur les prismes calcitiques du microfaciès F1a, parfois par l'intermédiaire d'une micro-discontinuité visiblement érosive (**figure 8C**).

Le microfaciès F2 est lui aussi subdivisé en deux pôles microfaciologiques formant les lamines inframillimétriques. Le microfaciès F2a est très poreux et globalement micritique. Il est majoritairement formé par des filaments microbiens ou fongiques mêlés à des amas micritiques et à des coccoïdes (sphérules embryonnaires). Les filaments, non ou faiblement ramifiés, sont souvent divergents, formant des buissonnements bothryoïdaux (**figure 8E et figure 8F**). Pouvant atteindre une longueur de 600 microns, ils montrent parfois un axe sombre, très fin entouré d'une gangue micritique (**figure 8G**). Les coccoïdes, plus rares, ont un cœur clair (microsparitique) entouré d'une gangue également micritique ne dépassant pas 50 microns de diamètre (**figure 8G**). De la micrite et des particules argileuses s'intercalent souvent entre les filaments, formant des amas plus ou moins alignés (**figure 8E**). Le plus souvent, l'espace entre les filaments demeure vide et forme une macroporosité abondante. Le microfaciès F2b possède une trame micritique et microbienne similaire à celle du microfaciès F2a, mais ici une partie de la porosité initiale est colmatée par un ciment microsparitique (**figure 8H**). Une variante montre des prismes de calcite, très riches en inclusions solides, disposés en « épis » autours de filaments (**figure 8J**).

Il est à noter que les divers microfaciès ne contiennent jamais de tiges (ou d'empreintes de tiges) de végétaux vasculaires ou de bryophytes. Ceci s'explique par l'obscurité totale, ou très poussée, qui devait régner dans l'aqueduc lorsqu'il était couvert d'une voute ou de dalles jointées par du mortier.

4.3. Résultats de l'analyse isotopique

Cent trente-deux mesures des isotopes stables de l'oxygène et du carbone ont été effectuées sur les douze premiers centimètres de l'encroûtement carbonaté (à noter que les trois derniers centimètres de l'échantillon 2 n'ont pas été analysés). Sur l'ensemble de ces mesures, le graphique de la **figure 7C** révèle une dispersion relativement faible des valeurs qui sont dans l'ensemble comprises entre -10.2 et -11.5 ‰ pour le $\delta^{13}\text{C}$ et entre -5 et -6 ‰ pour le $\delta^{18}\text{O}$. Une mesure sort toutefois de cet ensemble ($\delta^{13}\text{C} = -11.6$ ‰ PDB et $\delta^{18}\text{O} = -$

6.7 ‰ PDB), probablement du fait de la présence d'une impureté (matière organique ?) probablement intégré lors du prélèvement au stilet.

Ce même graphique de la **figure 7C** montre la mauvaise corrélation entre les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ et celles de $\delta^{18}\text{O}$. Le R^2 n'est en effet que de 0.14 pour les 112 prélèvements au stilet et de 0.29 pour les 20 prélèvements en micro-fraisage. Cette non-corrélation est également flagrante sur le graphique de la **figure 7B** qui montre que, pour les prélèvements au pas d'un millimètre, les pics de $\delta^{18}\text{O}$ et de $\delta^{13}\text{C}$ sont loin d'être systématiquement corrélés ou anti-corrélés. À la base de l'encroûtement, il existe toutefois des tendances communes entre les deux courbes, mais rarement au-delà des trois premiers centimètres.

Si l'on compare les courbes isotopiques avec les séquences de macrofaciès S1 à S6 précédemment décrites, les relations sont visibles mais elles sont complexes. C'est avec la courbe du $\delta^{13}\text{C}$ au pas d'un millimètre que les relations sont les plus marquées. Les séquences S2, S3, S4 et S5 débutent toutes par une décroissance du $\delta^{13}\text{C}$ de l'ordre de 0.5 à 1 ‰ PDB (surlignées en vert sur la **figure 7B**). Pour la séquence S6, cette décroissance du $\delta^{13}\text{C}$ existe mais elle est décalée vers le haut, ne débutant qu'à 3 millimètres au-dessus de la base de la séquence. Pour le $\delta^{18}\text{O}$, les relations sont plus ténues, localement inexistantes. Des décroissances du $\delta^{18}\text{O}$ existent à la base des séquences S2, S3 et S4, mais elles débutent avant les micro-discontinuités marquant la base des séquences. A la base des séquences S5 et S6, cette relation n'existe pas ; les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ sont relativement stables, avec même une légère tendance à la hausse.

Les micro-prélèvements au pas de 200 microns, effectués uniquement à la base de l'encroûtement, dans le faciès F1 de la séquence S1, confirment globalement les tendances discernables au pas d'un millimètre (**figure 7B et figure 7D**). Les amplitudes de valeurs du $\delta^{18}\text{O}$ et du $\delta^{13}\text{C}$ au pas de 200 microns sont toutefois sensiblement plus élevées ; ceci s'explique par les prélèvements au pas de 1 mm qui ont tendance à mélanger davantage de lamines inframillimétriques et donc à moyenner les valeurs. Ici la corrélation entre le $\delta^{18}\text{O}$ et le $\delta^{13}\text{C}$ est meilleure que pour les prélèvements au pas d'un millimètre. En revanche, aucune corrélation n'est observée entre les isotopes et la succession des microfaciès F1a et F1b (cf. discussion).

5. Interprétations et discussion

5.1. Nature et origine de l'encroûtement carbonaté

Les données archéologiques montrent que l'encroûtement carbonaté s'est formé dans un aqueduc qui était couvert, donc dans un aqueduc pouvant être considéré (au moins à l'endroit de la fouille) comme un aqueduc souterrain, avec peu ou pas de lumière. Cette donnée est parfaitement compatible avec les observations des faciès et des micro-faciès qui soulignent l'absence de végétaux ou d'empreintes de végétaux dans l'encroûtement, contrairement à ce qui est le cas général pour les encroûtements de type tuf calcaire formés à la lumière du jour, avec la présence de bryophytes, de végétaux supérieurs, de cyanobactéries... (Pentecost, 2005 ; Jones & Renaut, 2010). Cette couverture supposée du canal est aussi compatible avec le caractère globalement peu détritique de l'encroûtement, qui serait difficile à expliquer dans le cas d'un canal non couvert qui aurait été inévitablement « pollué » par des apports extérieurs, de nature et de granulométrie variable.

Les valeurs isotopiques globales, très resserrées autour de -11 ‰ PDB pour le $\delta^{13}\text{C}$ et de -5,5 ‰ PDB pour le $\delta^{18}\text{O}$ (**figure 7C**) ne sont que partiellement compatibles avec ce qui est attendu pour un encroûtement assimilable à un tuf calcaire. La **figure 9** montre que de telles valeurs sont très en marge de celles habituellement mesurées dans des tufs calcaires actuels et récents issus de sources karstiques non hydrothermales drainant des strates calcaires. Elles ne chevauchent que les valeurs mesurées sur des tufs calcaires situés en Angleterre, à l'ouest de Londres, mais avec une moyenne supérieure pour le $\delta^{18}\text{O}$ et inférieure pour le $\delta^{13}\text{C}$ (Garnett et al., 2004). Pour nuancer cette constatation, la **figure 10**, issue d'un schéma conceptuel proposé par Genty en 2005, montre que les valeurs isotopiques mesurées à Vouneuil sont néanmoins globalement compatibles avec des tufs calcaires, non-hydrothermaux, formés en contexte karstique forestier de moyenne altitude.

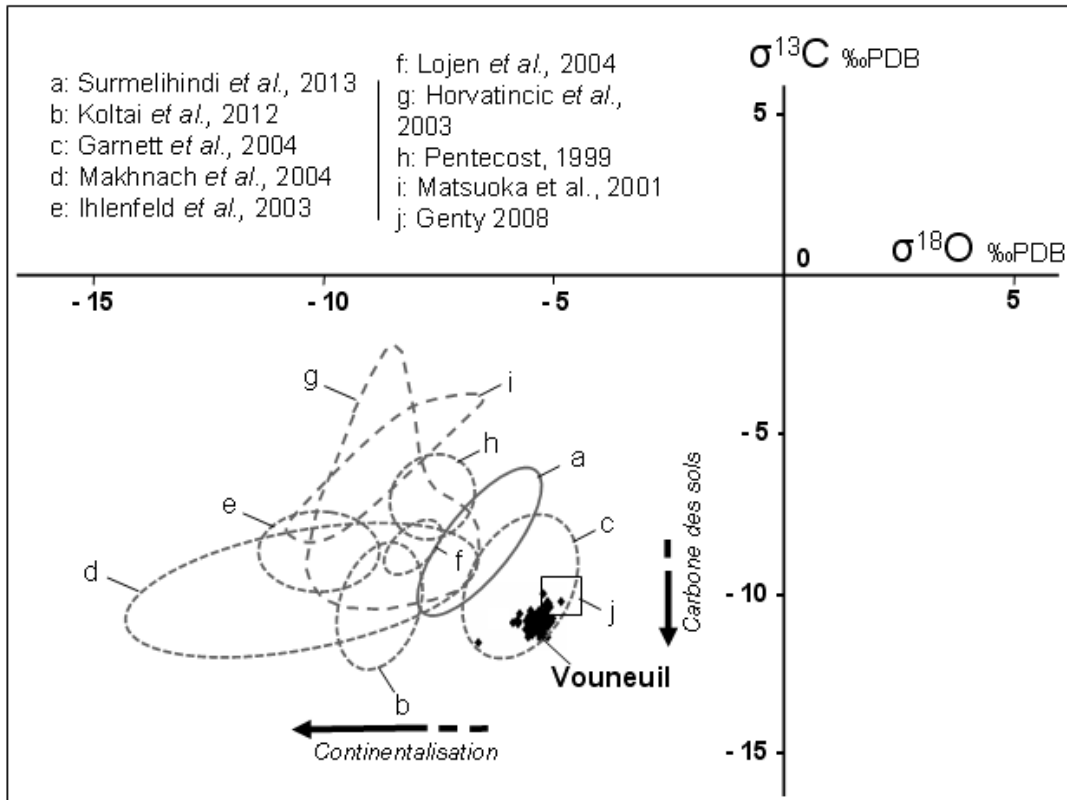


Figure 9. Comparaison entre les mesures de $\delta^{18}\text{O}$ et du $\delta^{13}\text{C}$ de l'encroûtement carbonaté de l'aqueduc de Vouneuil avec les mesures isotopiques effectuées sur divers tufs calcaires actuels ou sub-actuels issus de sources karstiques non-hydrothermales (b à j) (Genty, 2005). La plage de données (a) de Sürmelihiñdi *et al.*, 2013 concerne les encroûtements carbonatés de l'aqueduc antique de Patara sur la côte sud de l'Anatolie. L'ellipse c correspond à des tufs calcaires de la région de Londres (Garnett *et al.*, 2004). Le carré j englobe les valeurs isotopiques mesurées sur des spéléothèmes récents (moins d'un siècle) de la grotte de Villars (Genty, 2008), à 130 kilomètres au sud-sud-ouest de Poitiers. © C. Durelet

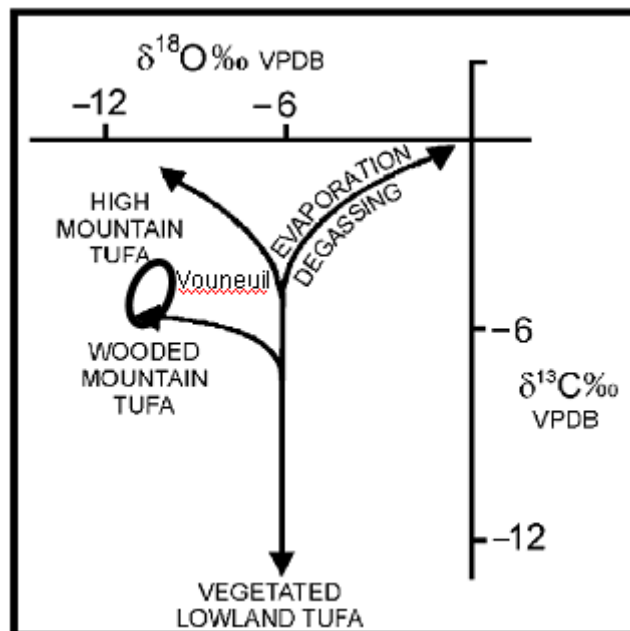


Figure 10. Les mesures de $\delta^{18}\text{O}$ et de $\delta^{13}\text{C}$ de l'encroûtement carbonaté de l'aqueduc de Vouneuil (ovale noir) coïncident en partie avec celles attendues pour des tufs calcaires formés dans des eaux non hydrothermales de régions karstiques boisées de moyenne altitude en Europe de l'Ouest. © Modèle modifié d'après Andrews, 2005

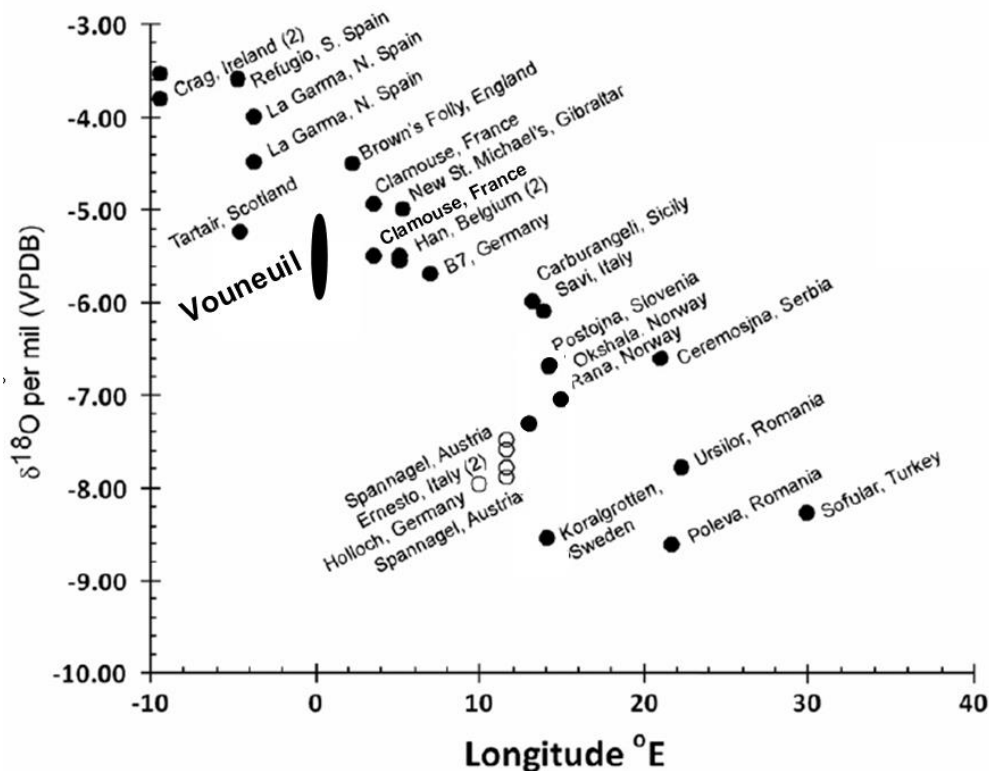


Figure 11. Avec des valeurs de $\delta^{18}O$ globalement comprises entre -6 et -5 ‰ PDB, pour une latitude actuelle de $0^{\circ}17'E$, l'encroûtement carbonaté de l'aqueduc de Vouneuil se rapproche, d'un point de vue isotopique, des valeurs mesurées dans des spéléothèmes européens de latitude comparable © modifié d'après [Mcdermott et al., 2011](#)

Compte-tenu de son caractère souterrain et du fait que l'aqueduc était vraisemblablement alimenté, au moins en partie, par les sources karstiques de « La Preille » et de « Fleury » (communes de Lavausseau et La Chapelle-Montreuil) drainant des plateaux à ossature de calcaires bajociens, il est légitime de les comparer à des spéléothèmes. Ainsi, sur la **figure 9**, le champ des valeurs isotopiques mesurées sur des concrétions karstiques très récentes (quelques siècles au maximum) de la grotte aménagée de Villars ([Genty, 2008](#)), à 130 km au SSE de Vouneuil, est représenté par un rectangle qui chevauche les valeurs les plus élevées mesurées à Vouneuil. Il faut noter que cette grotte draine principalement des calcaires d'âge bajocien, tout comme la rivière et les sources karstiques qui étaient susceptibles d'alimenter l'aqueduc de Vouneuil. En généralisant à l'échelle européenne (**figure 11**), les valeurs du $\delta^{18}O$ de l'encroûtement de Vouneuil, à une longitude de $0^{\circ}17''$ Est, sont dans la gamme de celles attendues pour des spéléothèmes de latitude comparable, à une distance peu élevée (ici environ 120 kilomètres) de la côte atlantique.

Cette comparaison avec des spéléothèmes sur la base des valeurs isotopiques doit toutefois être confrontée à la pétrographie des différents microfaciès qui constituent les lamines de Vouneuil. Elle paraît relativement pertinente pour les microfaciès les plus finement laminés (F1b) ou les plus massivement sparitiques (F1a) car ils sont très semblables à des spéléothèmes communs tels que des planchers stalagmitiques ou des parois de gours. Elle reste discutable pour les microfaciès à coccoïdes et filaments microbiens ou fongiques (F2a, F2b) ; en effet, ces derniers existent aussi dans les systèmes karstiques bien qu'ils y soient moins fréquemment décrits ([Barton et al., 2001](#) ; [Baskar et al., 2008](#) ; [Caccion et al., 2014](#)). Dans le karst, des filaments similaires, parfois associés à des oxydes et hydroxydes de fer et de manganèse ([Papier et al., 2011](#)), peuvent se former sur les parois de conduits parcourus par des eaux riches en nutriments et en matière organique, parfois en contexte dysoxique (appauvri en oxygène). Sous terre, ceci survient fréquemment dans des galeries dites « polluées », alimentées directement par des pertes karstiques absorbant des eaux de surface chargées en matière organique et substances nutritives. Les communautés microbiennes et fongiques incorporées dans les spéléothèmes sont aussi couramment observées dans les cavités et microcavités épikarstiques situées à quelques décimètres ou mètres sous des sols forestiers, par exemple dans le cas des « lapiaz couverts ».

De ces comparaisons, il peut être proposé que les carbonates de faciès F1 de l'aqueduc auraient précipité à l'abri de la lumière, tels des spéléothèmes conventionnels, à partir d'eaux sursaturées en carbonate, majoritairement captées à partir d'exutoires karstiques. Dans cette hypothèse, les fines plages micritiques et micro-détritiques du microfaciès F1b (**figure 8C**), ainsi que les petites bandes brunes intercalées dans les prismes du microfaciès F1a (**figure 8D**), pourraient être l'expression de périodes de crues associées à la turbidité momentanée des eaux issues des exurgences karstiques. En revanche, le faciès F2 que l'on peut assimiler à des microbialites, serait l'expression du passage (ou de la stagnation) dans l'aqueduc d'une eau chargée en matière organique et plus faiblement sursaturée en carbonate. Cette eau, plus trouble, et probablement moins apte à la consommation humaine, aurait donc prédominé vers la fin du fonctionnement de l'aqueduc, puisque le faciès F2 est observé exclusivement au sommet de l'encroûtement. Une telle eau pourrait être issue de percolations dans les sols environnants et traduirait alors des défauts d'étanchéité de l'aqueduc. L'hypothèse la plus vraisemblable est donc qu'une rivière ou un ruisseau de surface ait alors contribué à l'alimentation de l'aqueduc. La rivière principale, située dans la partie amont connue de l'aqueduc antique est la Boivre. A cet endroit, elle est cependant située à une altitude trop basse pour avoir été captée par gravité. En revanche, dans son tracé l'aqueduc croise le passage de petits affluents de la Boivre. Ont-ils été captés volontairement pour augmenter le débit de l'aqueduc ? Ici, seules des données archéologiques nouvelles impliquant l'étude du conduit sur la totalité de son tracé, pourraient apporter des informations tangibles.

5.2. Signification des séquences

Les séquences de faciès S1 à S6 (**figure 7A**) ont été distinguées sur la base de micro-discontinuités basales correspondant à des ruptures entre des faciès F1 à F2 et sur la base de décroissances globales mais subtiles du $\delta^{13}\text{C}$ à la base de chaque séquence (sauf F1). D'un point de vue paléo-environnemental et géoarchéologique, il convient de discuter de la signification de ces séquences.

En référence au modèle proposé précédemment, faisant intervenir soit des eaux karstiques captées directement à leur source, soit des eaux de rivières moins pures, plus chargées en matières organiques et particules variées, il peut être proposé que les séquences S1 à S2 marquent des alternances, ou des ruptures, dans l'hydrologie de l'aqueduc, donc dans son exploitation antique. Dans ce sens, la séquence S1, ainsi que le sommet des séquences S2, S3, S4 S5 seraient des périodes où l'homme s'est efforcé de faire circuler des eaux les plus pures possibles, en privilégiant les captages karstiques. A l'opposé, la base des séquences S2, S3, S4, S5 et la quasi-totalité de la séquence S6 seraient des périodes dominées par la circulation (ou la stagnation) d'eaux issues d'affluents de la Boivre. Une incorporation plus importante de carbone organique à faible $\delta^{13}\text{C}$ issus du lessivage des sols expliquerait alors la décroissance de ce $\delta^{13}\text{C}$ à la base de chaque séquence. Si cette hypothèse s'avérait exacte, il resterait à établir si une telle alternance dans le fonctionnement hydrologique de l'aqueduc est le fait soit (i) d'une gestion fluctuante de la zone de captage ; (ii) de périodes de curage (même si sur le terrain ces dernières n'ont pas été détectées, soit parce qu'elles étaient très discrètes, soit parce que les curages n'ont été effectués au niveaux des zones fouillées et prélevées) et/ou de réfection de l'aqueduc ; (iii) de modifications anthropiques de la couverture végétale du bassin versant (tels que des déboisements chroniques) ; (iv) de variations climatiques naturelles.

Les éléments tangibles pour débattre de ces facteurs de contrôle sont pour l'instant trop ténus pour aller plus loin, faute notamment d'investigations archéologiques dans les secteurs amonts de l'aqueduc. D'autant que, comme nous allons le montrer, il demeure des incertitudes sur la durée de fonctionnement de l'aqueduc.

5.3. Signification des fines lamines et durée de fonctionnement de l'aqueduc

L'objectif principal de l'étude ici entreprise était de contraindre la durée de fonctionnement de l'aqueduc. Ceci pouvait être assimilé à la durée nécessaire pour former l'encroûtement car, à l'endroit de la fouille, aucun indice archéologique n'indique qu'un curage avec arrachement de l'encroûtement carbonaté réduisant le gabarit du conduit ait été effectué.

Les vitesses de précipitation des tufs calcaires ou des travertins constatés en Europe sont rarement supérieures au centimètre par an. Dans la majorité des cas elles sont d'ordre millimétrique ou infra-millimétrique. Les exceptions ne concernent que des travertins hydrothermaux, non comparables avec le présent contexte géologique, où des dépôts d'extension très limitée situés au niveau d'exurgences et de cascades. À Vouneuil, la longueur de l'aqueduc (de l'ordre de 25 kilomètres) est loin de représenter un site de précipitation ponctuelle bien que l'on ait peu d'informations sur les encroûtements situés en dehors de la fouille récente. De ce fait, il paraît peu vraisemblable que les séquences S1 à S6, ici épaisses de 0,6 à 6,8 centimètres, soient l'expression de cycles annuels. L'absence de relation nette et constante entre les tendances du $\delta^{18}\text{O}$ et la position de ces séquences (**figure 7**) tend à confirmer cette interprétation.

La réflexion doit davantage être portée sur l'origine des couples de lamines infra-millimétriques, en relation avec l'alternance de microfaciès F1a, F1b, F2a et F2b. De telles couples de lamines sont souvent interprétés comme annuels dans les aqueducs antiques, même si la démonstration de leur annualité n'est que trop rarement argumentée par des analyses isotopiques effectuées avec un pas suffisamment fin pour raisonner à cette échelle de temps (Gébara & Michel, 2012 ; Sürmelihindi, 2013 ; Sürmelihindi et al., 2013a, 2013b). Dans le cas de l'aqueduc de Vouneuil, les prélèvements isotopiques effectués au pas de 200 microns, uniquement à la base de l'encroûtement, n'ont pas permis d'établir de liens entre les microfaciès et les tendances du $\delta^{18}\text{O}$ et du $\delta^{13}\text{C}$. Ceci est peut-être dû au fait que les lamines infra-millimétriques sont à cet endroit peu marquées et très ondulées, et qu'il n'a donc pas été possible de les suivre précisément lors des prélèvements par micro-fraises avec fronts de taille rectilignes. Une autre explication, non liée à un problème analytique, fait intervenir le caractère souterrain du conduit. Malgré son faible enfouissement (moins de 1 mètre), il est vraisemblable que les fluctuations journalières et saisonnières de la température étaient très estompées par rapport à la surface. Il en va de même de l'humidité de l'air du conduit et donc du potentiel d'évaporation de l'eau du conduit. Par conséquent, il ne peut y être attendu de fortes amplitudes du $\delta^{18}\text{O}$ en relation avec des fluctuations saisonnières de la température et de l'humidité. L'amplitude du $\delta^{18}\text{O}$ de seulement 0,8 ‰ PDB constatée sur l'épaisseur des 4 premiers millimètres de l'encroûtement pourrait ainsi être dû à des écarts de températures moyennes entre l'hiver et l'été de seulement 4 °C dans le conduit. Pour aller plus loin, d'autres micro-prélèvements au pas de 200 microns, ou mieux encore des analyses ponctuelles avec une microsonde ionique, devront être effectués, notamment dans les zones de l'encroûtement ou les lamines infra-millimétriques sont mieux exprimées et plus rectilignes.

Au final, ni les données pétrographiques, ni les données isotopiques actuellement disponibles ne permettent de trancher sur la durée de fonctionnement de l'aqueduc. Pour cela, il faudrait admettre que les couples de lamines infra-millimétriques sont annuels. Dans ce cas, au vu du nombre de lamines claires visibles sur la section polie (**figure 7A**), il serait estimé que les séquences S1 à S5 ont nécessité de 25 à 30 années pour se déposer, sans compter le temps non quantifiable pour déposer le faciès F2 de ces séquences. Le faciès poreux F2 est en effet laminé de manière trop ténue et trop peu contrainte pour estimer une durée de dépôt. Il en irait de même pour la durée non estimable de l'épaisse séquence S6, uniquement constituée du faciès F2. Comme cela a déjà été mis en évidence pour d'autres sites (Sürmelihindi, 2013), il est courant que le comptage de lamines annuelles dans l'encroûtement carbonaté d'aqueducs antiques ne soit possible qu'en certains points du tracé d'un l'aqueduc, et non sur toute sa longueur.

6. Conclusion

Un aqueduc enterré, long d'environ 25 kilomètres, a relié l'agglomération antique de Poitiers (*Lemonum*) à des ruisseaux et/ou à des sources karstiques situées à l'ouest de la ville, mais à une altitude à peine supérieure à celle-ci. De ce fait, la pente de l'aqueduc est très faible, proche de 0,12 m/km. Cette pente extrêmement faible est nettement en deçà des préconisations des auteurs anciens et des pentes observées sur les aqueducs qui ont fait l'objet d'études récentes, même si des exceptions apparaissent dans certaines structures.

Pour estimer son mode et sa durée de fonctionnement, qui ne sont ici contraints ni par des données archéologiques, ni par des textes, une étude pétrographique et isotopique a été entreprise sur l'encroûtement calcitique, épais d'une vingtaine de centimètres, qui tapisse les parois verticales basses de l'aqueduc.

L'étude des faciès et des microfaciès met en évidence des dépôts semblables à des spéléothèmes laminés au début de l'encroûtement, et des microbialites à filaments et coccoïdes vers la fin de l'encroûtement. Ces derniers évoquent les encroûtements de parois de rivières souterraines situées en aval de pertes karstiques absorbant des eaux de surfaces riches en substances nutritives et en matière organique.

Le signal isotopique global de l'oxygène et du carbone montre des valeurs assez resserrées, centrées autour de -11 ‰ PDB pour le $\delta^{13}\text{C}$ et de -5,5 ‰ PDB pour le $\delta^{18}\text{O}$. De telles valeurs sont intermédiaires entre celles attendues soit pour des tufs calcaires non hydrothermaux, soit pour des spéléothèmes de régions boisées de moyenne altitude.

Mis en regard avec la superposition des faciès, 6 périodes de décroissance régulière mais ténue du $\delta^{13}\text{C}$ définissent l'existence de 6 séquences (S1 à S6) sur toute l'épaisseur de l'encroûtement. Ces dernières ont une origine qui demeure incertaine. Elles pourraient être liées à (i) des variations dans le temps de la gestion du captage soit de sources karstiques, soit d'eaux superficielles prélevées dans des ruisseaux ; (ii) des réfections ou curages de l'aqueduc en amont du site fouillé ; (iii) des épisodes de déforestations sur les bassins versants ; (iv) des cycles climatiques haute fréquence se traduisant par des crues plus ou moins fréquentes. Des données géoarchéologiques et archéologiques complémentaires, situées en plusieurs points du système source-aqueduc-agglomération seraient nécessaires pour mieux contraindre ces hypothèses.

L'examen sous microscope montre des couples clairs-sombres de lamines infra-millimétriques formées par une alternance de 4 types de microfaciès, microbiens et non-microbiens. Ces lamines, très fines et ondulées, n'ont pas pu être convenablement micro-échantillonnées pour les analyses isotopiques. Elles pourraient être l'expression de cycles annuels, comme cela est suggéré (mais rarement prouvé) pour d'autres encroûtements calcaires d'aqueducs antiques. Dans le faciès F1, semblable à des spéléothèmes, 25 à 30 de ces couples clairs-sombres sont discernables. Malheureusement, dans le faciès microbien F2, qui constitue au moins 80 % de l'épaisseur totale de l'encroûtement, ces couples sont peu discernables, ce qui empêche toute évaluation de la durée de fonctionnement de l'aqueduc.

Conflit d'intérêts

Les auteurs n'ont aucun conflit d'intérêt à déclarer.

Évaluation

Les deux rapporteurs de cet article sont Christophe Petit et Jean-Louis Guendon.

Responsabilités des évaluateurs externes

Les évaluations des examinateurs externes sont prises en considération de façon sérieuse par les éditeurs et les auteurs dans la préparation des manuscrits pour publication. Toutefois, être nommé comme examinateur n'indique pas nécessairement l'approbation de ce manuscrit. Les éditeurs d'Archéologie, Société, Environnement assument l'entière responsabilité de l'acceptation finale de la publication d'un article.

Références bibliographiques

Andrews, J.E., Brasier, A.T., 2005. Seasonal records of climatic change in annually laminated tufas: short review and future prospects. *Journal of Quaternary Science*. 20, 411-421.

- Barton, H.A, Spear, J.R., Pace, N.R., 2001. Microbial life in the underworld: Biogenicity in secondary mineral formations. *Geomicrobiology Journal*. 18, 359-358.
- Baskar, S., Baskar, R., Lee, N., Kaushk, A., Theophilus, P.K., 2008. Precipitation of iron in microbial mats of the spring waters of Borra Caves, Vishakapatnam, India: some geomicrobiological aspects. *Environmental Geology*, 56, 237-243.
- Béague, N., 2011. Fontaine-le-Comte, Vouneuil-sous-Biard, Vienne. LGV SEA 2 – Phase 37. PK 97,0 – PK 102,0, rapport final d'opération de diagnostic archéologique, INRAP/SRA Poitou-Charentes, inédit.
- Bobbée, C., Huon, S., Salomon, J., Gebara, C., Michel, J.-M., Regert, M., Guendon, J.-L., 2011. High-resolution (PIXE) analyses of carbonates deposits in a roman aqueduct (Fréjus, France): Implications for the study of palaeohydrological variability and water resources management in Southern Gaul during the Roman period. *Archaeometry*. 53(2), 241-260.
- Cacchio, G., Ferrini, C., Ercole, M., Del Gallo, M., Lepidi, A., 2014. Biogenicity and characterization of moonmilk in the Grotta Nera (Majella National Park, Abruzzi, central Italy). *Journal of Cave and Karst Studies*. 76, 88–103.
- Carbon, D., Fabre G., Volant P., Fiches J.L, Levret A., & P. Combes, 2005. L'aqueduc de Nîmes dans la haute Vistrenque, Analyse interdisciplinaire d'un tronçon souterrain Gallia, 62, 2005, p. 69-86.
- Carlut, J., Chazot, G., Dessalles, H., Letellier, E., 2009. Trace element variations in an archaeological carbonate deposit from the antique city of Ostia: Environmental and archaeological implications. *C. R. Geoscience*. 341, Geochemistry (Isotopic Geochemistry), 10-20.
- Curie, J., Petit, C., 2014. Geoarchaeology of “anthropogenic” travertine: a story of water and life etched in stone. *European Geologist*. 38, 21-24.
- Dubar, M., 2006a. Approche climatique de la période romaine dans l'est du Var : recherche et analyses des composantes périodiques sur un concrétionnement centennal (Ier-IIe siècle apr.J.-C.) de l'aqueduc de Fréjus. *ArchéoSciences*. 30, 163-171.
- Dubar, M., 2006b. Recherche et interprétation climatique des microcycles du concrétionnement travertineux de l'aqueduc romain de Fréjus (Var, France). *Quaternaire*. 17(2), 79-85.
- Duffaud M. (1854), « Notice sur les aqueducs romains de Poitiers », Mémoires de la Société des Antiquaires de l'Ouest, 1ère série, t. 21, p. 55-83.
- Fabre, G., 1986. Tufs et travertins du Languedoc et des Causses majeurs. Méditerranée. 57(1-2), 66-70.
- Garnett, E. R., Andrews, J. E., Preece, R. C., Dennis, P. F., 2004. Climatic change recorded by stable isotopes and trace elements in a British Holocene tufa. *Journal of Quaternary Science*. 19-3, 251–262.
- Gébara, C & Michel, J.M., 2002. L'aqueduc romain de Fréjus. Sa description, son histoire et son environnement., *Revue Archéologique de la Narbonnaise*, Supp. 33, 320 p.
- Genty, D., 2008. Palaeoclimate Research in Villars Cave (Dordogne, SW-France). *International Journal of Speleology*. 37(3), 173-191.
- Guendon, J.-L., Vaudour, J., 2000. Concrétions et fonctionnement de l'aqueduc : étude morphostratigraphique. in Fabre, G. , Fiches, J.-L. , Paillet, J.-L. (Dir.), L'aqueduc antique de Nîmes et le Pont du Gard : archéologie, géosystème et histoire, 2è éd. Revue et augmentée. Paris. CNRS Editions, 233-248.
- Guendon, J.-L., Leveau, P., 2005. Dépôts carbonatés et fonctionnement des aqueducs romains : Le bassin amont du vallon des Arcs sur l'aqueduc d'Arles (Bouches-du-Rhône). *Gallia*. 62, 87-96.
- Horvatinčić, N., Krajcar Bronić I., Obelić, B., 2003. Differences in the ^{14}C age, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of Holocene tufa and speleothem in the Dinaric Karst. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 193, 139-157
- Ihlenfeld, C., Norman, M.D., Gagan, M.K., Drysdale, R.N., Maas, R., Webb, J., 2003. Climatic significance of seasonal trace element and stable isotope variations in a modern freshwater tufa. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 37, 1563–1586
- Jones, B., Renaut, R.W., 2010. Calcareous spring deposits in continental settings. In: Alonso-Zarza, A. M. & Tanner, L. H. (eds) Carbonates in Continental Settings. Developments in Sedimentology, 61. Elsevier, Amsterdam, 177–224.

- Koltai, G., Kele, S., Bárányi-Keve, I., 2012. Preliminary studies of freshwater tufa deposits in Mecsek mts., Hungary. *Acta Climatologica et Chorologica, Universitatis Szegediensis*, 46, 143-151.
- Lambaré-Vannieuwenhove, C., 2011. Le réseau d'aqueducs alimentant Poitiers en eau dans l'Antiquité. Mémoire de Master, Université de Poitiers, non-publié.
- Lojen, S., Dolenc, T., Vokal, B., Cukrov, N., Mihelčić, G., Papesch, W., 2004. C and O stable isotope variability in recent freshwater carbonates (River Krka, Croatia). *Sedimentology*, 51(2), 361–375.
- Makhnach, N., Zernitskaya, V., Kolosov, I., Simakova, G., 2004. Stable oxygen and carbon isotopes in Late Glacial Holocene freshwater carbonates from Belarus and their palaeoclimatic implication. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 209, 73-101
- Matsuoka, J., Kano, A., Oba, T., Watanabe, T., Sakai, S. et Seto, K., 2001. Seasonal variation of stable isotopic compositions recorded in a laminated tufa, SW Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, 192, 31-44.
- Mcdermott, F., Atkinson, T., Fairchild, I.J., Baldini, L.M., Matthey, D.P., 2011. A first evaluation of the spatial gradients in ¹⁸O recorded by European Holocene speleothems. *Global and Planetary Change*, 79(3-4), 275-287.
- Papier, S., Baele, J.M., Gillan, D.C., Barriquand, L., Barriquand, J., 2011. Géomicrobiologie du manganèse en milieu karstique : données préliminaires sur les dépôts noirs de la grotte d'Azé (Saône-et-Loire, France). *Quaternaire*, Hors-série n°4, 297-305.
- Passchier, C.W., Wiplinger, G., Güngör, T., Kessener, P., Sürmelihindi, G., 2013. Normal fault displacement dislocating a Roman aqueduct of Ephesos, western Turkey. *Terra Nova* 25, 292-297.
- Pentecost, A., 1999. The origin and development of the travertines and associated thermal waters at Matlock Bath, Derbyshire. *Proc. Geol. Ass.*, 110, 217-32.
- Pentecost, A., 2005. Travertine. Springer Edition, 445 p.
- Schulz, H.D., 1986. Schichtungen im Kalsinter der römischen Wasserleitung nach Köln. Eine Hilfe zur relativen Datierung. In Grewe, K. (Ed.), *Atlas der römischen Wasserleitungen nach Köln*, Köln, Rheinland-Verlag. Bonn, Habelt, 263-268.
- Sürmelihindi, G., 2013. Roman aqueducts and calcareous sinter deposits as a proxy for environmental changes. Mémoire de PhD, Université de Mainz, 129 p.
- Sürmelihindi, G., Passchier, C.W., Spötl, C., Kessener, P., Bestmann, M., Jacob, D.E., Baykan, O.N., 2013a. Laminated carbonate deposits in Roman aqueducts; origin, processes and implications. *Sedimentology*, 60-4, 961-982.
- Sürmelihindi, G., Passchier, C.W., Baykan, O.N., Spötl, C., Kessener, P., 2013b. Environmental and depositional controls on laminated freshwater carbonates: An example from the Roman aqueduct of Patara, Turkey. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 386, 321-335.