

Étude géochimique des concrétions carbonatées des aqueducs romains de Nîmes et d'Arles (France)

Geochemical study of carbonated formations in the Roman aqueducts of Nîmes and Arles (France)

Yacine BENJELLOUN¹, Jean-François HELIE², Julie CARLUT³

¹ Université Grenoble Alpes, ISTERre, F-38041 Grenoble, France ; CNRS, ISTERre, F-38041 Grenoble, France

² Université du Québec à Montréal, Département des Sciences de la Terre et de l'atmosphère/GEOTOP, Montréal H3C 3P8, Canada

³ Institut de Physique du Globe de Paris, Sorbonne Paris Cité, Université Paris Diderot, UMR CNRS 7154, 75005 Paris, France

RÉSUMÉ. L'objectif de cette étude est de reconstituer les variations climatiques de la région de Nîmes et d'Arles à l'époque romaine en exploitant le contenu en isotopes stables légers (O, C) de cinq dépôts carbonatés provenant des aqueducs alimentant ces deux villes, actifs entre le 1^{er} siècle et le 5^e siècle de notre ère. Les observations en microscopie optique suggèrent une structure en lamines saisonnières, cohérentes avec des mesures de $\delta^{18}\text{O}$ à l'échelle sub-annuelle. Le comptage des lamines donne des estimations de la durée de fonctionnement des aqueducs compatibles avec les données archéologiques. À partir de la mesure de l'épaisseur des lamines est élaboré un modèle d'âge qui permet de situer dans le temps les variations des rapports isotopiques de l'oxygène et du carbone. Malgré la présence de lacunes qui rend la corrélation des échantillons et la chronologie absolue des dépôts incertaines, un schéma des variations climatiques est esquissé du 1^{er} au III^e siècle de notre ère.

ABSTRACT. The aim of this study is to reconstruct the climatic variations of the region of Nîmes and Arles in Roman times by exploiting the light stable isotope content (O, C) of five carbonate deposits from the aqueducts supplying these two cities, active between the 1st and 5th centuries AD. Optical microscopy observations suggest a seasonal laminae structure, consistent with sub-annual-scale $\delta^{18}\text{O}$ measurements. Laminae counts provide estimates of aqueduct operating times consistent with archaeological data. From the measurement of lamina thickness, an age model is developed that allows the variations in oxygen and carbon isotope ratios to be placed in time. Despite the presence of gaps that make the correlation of the samples and the absolute chronology of the deposits uncertain, a pattern of climatic variations is sketched from the 1st to the 3rd century AD.

MOTS-CLÉS. Paléoclimat, Aqueduc, Concrétions, Isotopes stables légers.

KEYWORDS. Paleoclimate, Aqueduct, Concretions, stable light isotopes.

1. Introduction

Des concrétions carbonatées analogues aux travertins de rivière se développent sur les bords et au fond des canaux de certains aqueducs romains acheminant l'eau de sources karstiques. L'intérêt de l'étude de ces concrétions en tant que marqueurs temporels du fonctionnement de l'aqueduc a été reconnu de façon précoce et plusieurs auteurs les ont utilisées pour approcher par exemple l'évolution des paléo-débits, ou distinguer plusieurs phases de fonctionnement (Fabre *et al.*, 2001). L'utilisation de ces dépôts comme archives climatiques s'est fait plus récemment en raison de l'évolution des techniques d'analyse quantitative, et il n'existe à ce jour que deux études portant sur la géochimie de ce type de dépôts. Une analyse en éléments traces réalisée sur des concrétions d'un château de la ville antique d'Ostie en Italie a mis en évidence une structure en lamines alternativement claires et foncées comparable à celle des spéléothèmes et corrélée avec les variations des éléments traces, et a permis d'identifier plusieurs sources d'alimentation successives (Carlut *et al.*, 2009a). L'autre étude, alliant éléments traces et isotopes stables, porte sur des concrétions des aqueducs de Nîmes et d'Arles (Trebaul, 2009).

Notre travail prolonge les conclusions de cette dernière étude grâce à l'analyse d'échantillons supplémentaires. A partir d'observations macroscopiques et microscopiques et de l'utilisation des isotopes stables de l'oxygène et du carbone, notre objectif est de vérifier la nature du signal archivé dans ces dépôts aux échelles sub-annuelle et interannuelle, puis de déterminer si la comparaison des deux aqueducs, qui ont fonctionné à la même époque, permet d'identifier des tendances communes marqueuses de variations climatiques à l'échelle régionale.

2. Contexte et objets de l'étude

2.1. Les aqueducs romains du Pont du Gard et de Barbegal

Les dépôts carbonatés étudiés ont été prélevés sur les parois internes de deux aqueducs romains du Sud de la France. Ces deux aqueducs alimentaient respectivement les villes de Nîmes et d'Arles (**figure 1**).

L'aqueduc de Nîmes, célèbre grâce au monument du Pont du Gard, captait les eaux de plusieurs sources pérennes au sein de massifs calcaires du Barrémien. Il fut construit vers 50 apr. J.-C. durant le règne de Claude ou de Néron. Après une période de fonctionnement optimal, son fonctionnement se dégrada dans la première moitié du III^e siècle et il fut partiellement abandonné. Après des essais de réhabilitation entre le IV^e siècle et le début du V^e siècle, son utilisation cessa définitivement entre le V^e et le VII^e siècle (Fabre *et al.*, 2001).

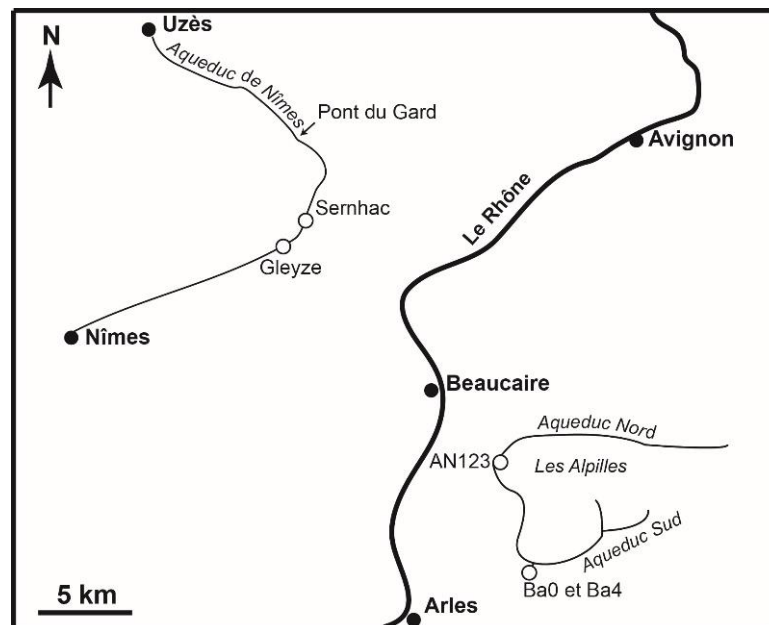


Figure 1. Localisation des aqueducs étudiés. Les lieux de prélèvement d'échantillons sont signalés par les cercles vides. Les tracés des aqueducs sont représentés en traits fins. © DAO : Yacine Benjelloun.

L'aqueduc alimentant la ville d'Arles a une organisation plus complexe, avec deux branches différentes en amont. La première, l'aqueduc Nord, captait les eaux du versant Nord du massif des Alpilles, tandis que la deuxième, l'aqueduc Sud, en parcourait le versant Sud. Les sources captées par ces deux branches se localisent au sein d'un massif karstique formé dans les calcaires marneux de l'Hauterivien (Trebaul, 2009). Les deux branches se rejoignent au niveau d'un bassin de convergence où avait lieu la rencontre des eaux et leur acheminement vers la ville d'Arles grâce à un ultime tronçon. Cette construction initiale daterait du milieu du I^{er} siècle ap. J.-C., sous le règne des Julio-Claudiens. Dans la première moitié du II^e siècle, un autre tronçon fut construit en aval du bassin pour alimenter une meunerie située à Barbegal. Le complexe des moulins de Barbegal a été abandonné au cours du III^e siècle. Quant à l'aqueduc alimentant Arles, après des travaux de grande ampleur au IV^e siècle, il aurait refonctionné dans le courant du V^e siècle (Guendon & Leveau, 2005 ; Carlut *et al.*, 2008, Carlut *et al.*, 2009b).

2.2. Les concrétions carbonatées

La circulation de l'eau dans les aqueducs a entraîné la précipitation de concrétions carbonatées d'épaisseur importante sur les parois du canal. En effet, les eaux de pluies s'infiltrant dans les terrains calcaires de la région sont acidifiées par échange de CO_2 d'origine organique présent en concentration importante dans l'atmosphère du sol. Lorsqu'elles atteignent la roche mère carbonatée, elles la dissolvent partiellement, ce qui est à l'origine d'un réseau de cavités dans la roche, caractéristique du système karstique. Pendant sa circulation dans le karst, dont la durée dépend principalement du climat et de la géométrie du karst, l'eau s'enrichit en calcium dissout. Lorsque ces eaux arrivent en surface et circulent dans l'aqueduc, la baisse de pression partielle en CO_2 subie entraîne un déplacement de l'équilibre chimique des carbonates qui explique la précipitation de dépôts carbonatés.

Parmi les séries de concrétions qui font l'objet de cette étude, deux ont été prélevées en deux points de l'aqueduc de Nîmes, aux lieux-dits Sernhac et Mas de Gleyze. Trois ont été prélevées sur l'aqueduc d'Arles : les échantillons AN1, AN2, et AN3 qui constituent une même série ont été prélevés sur l'aqueduc Nord à proximité de Saint-Gabriel, tandis que les échantillons Ba0 et Ba4 ont été prélevés sur les parois d'un des biefs faisant fonctionner les moulins. Ba0 provient du fond du bief, tandis que Ba4 se situait au sommet de la surface du mur couverte par les concrétions. Par ailleurs, les échantillons Sernhac, Gleyze et AN123 ont précipité dans des parties souterraines des aqueducs, tandis que le bief de Ba0 et Ba4 n'était pas couvert.

Tableau 1. *Épaisseur des concrétions étudiées.*

Echantillon	Épaisseur (cm)
Sernhac	28
Gleyze	22
AN123	15
Ba0	7
Ba4	6,5

Le **tableau 1** présente les épaisseurs de ces échantillons. Les concrétions de l'aqueduc de Nîmes sont bien plus épaisses que celles de l'aqueduc d'Arles, et notamment celles des biefs, ce qui s'explique par un fonctionnement plus long. Toutefois, les concrétions de l'aqueduc de Nîmes devraient avoir une épaisseur comparable sinon inférieure à celles de l'aqueduc Nord, qui aurait fonctionné trois siècles. Une mission réalisée à Saint-Gabriel avec Philippe Leveau en 2012 a permis de prélever un bloc de concrétions d'une épaisseur considérable qui ferait suite à AN123. L'ensemble de la série dépasse 30 cm. Malheureusement, cet échantillon n'a pas pu être intégré à cette étude.

Les échantillons sont présentés en **figure 2** et **figure 3**. A l'œil nu, ils sont constitués d'une succession de bandes claires ou sombres. En microscopie optique, on remarque très clairement une succession de lamines alternativement claires et sombres, un doublet de lamines mesurant autour d'un millimètre environ. Cette structure existe dans d'autres dépôts carbonatés continentaux comme les travertins de rivière et les spéléothèmes. Il a été mis en évidence que de dans de nombreux cas, cette lamination était annuelle, l'alternance lamine claire/lamine sombre reflétant la saisonnalité des précipitations (Genty & Quinif, 1996). Dans la région d'Arles, le climat est méditerranéen à sécheresse estivale marquée et à fortes précipitations hivernales. Une étude sur les travertins de rivière actuels de la région a détaillé leur croissance au cours de l'année : le concrétionnement hivernal est faible en dépit de forts débits car les eaux sont moins minéralisées, il augmente au printemps et régresse en été, tandis qu'en automne, la présence à la fois de périodes calmes et de crues violentes entraîne une évolution composite mais plutôt limitée par la turbidité (Nicod, 2010). Ce régime de pluies est pérenne depuis au moins le milieu de l'Holocène (Dubar, 2006).

Si l'on supposait une annualité des doublets de lamines des concrétions, l'alternance lamine claire/lamine sombre pourrait correspondre aux périodes hiver-printemps et été-automne. On remarque toutefois que cette structure laminaire est parfois perturbée et apparaît mamelonnée, voire invisible, comme c'est le cas des

parties terminales des concrétions de l'aqueduc de Nîmes et de Ba4, plus sombres et poreuses. Cet aspect peut refléter une dégradation de la qualité de l'écoulement, et éventuellement l'intervention de végétaux.

3. Méthodes

3.1. Étude morphologique et établissement d'un modèle d'âge

À partir de lames minces des échantillons, à l'exception de Ba0, trop peu épais et trop fragile pour réaliser une lame mince, les alternances de lamines claires et sombres ont été comptées avec une loupe binoculaire Olympus SZ60, et leurs épaisseurs respectives ont été mesurées pour chaque doublet, avec une limite de 0,07 mm.

À partir de ces observations, et en supposant l'annualité du doublet de lamines, un modèle d'âge a été établi pour chaque échantillon et les points de prélèvement de poudres pour l'analyse des isotopes stables de l'oxygène et du carbone ont été datés de façon relative à partir de ces modèles, grâce à un algorithme réalisé avec le logiciel ScilabTM. Pour chaque point de prélèvement, l'algorithme détermine dans quel doublet de lamines il se situe et détermine un âge par interpolation linéaire. Enfin, les observations ont permis, pour chaque échantillon, d'estimer une relation linéaire entre l'âge relatif et la distance à la paroi de l'aqueduc. Les relations obtenues ont été utilisées pour estimer l'âge des points de prélèvement qui sortaient de la zone couverte par les lames minces. Pour l'échantillon Ba0 notamment, c'est la relation linéaire de Ba4 qui a été utilisée. On a ainsi supposé qu'étant donné que les deux échantillons se sont formés dans le même bassin, leurs vitesses de croissance moyennes ont dû être comparables.

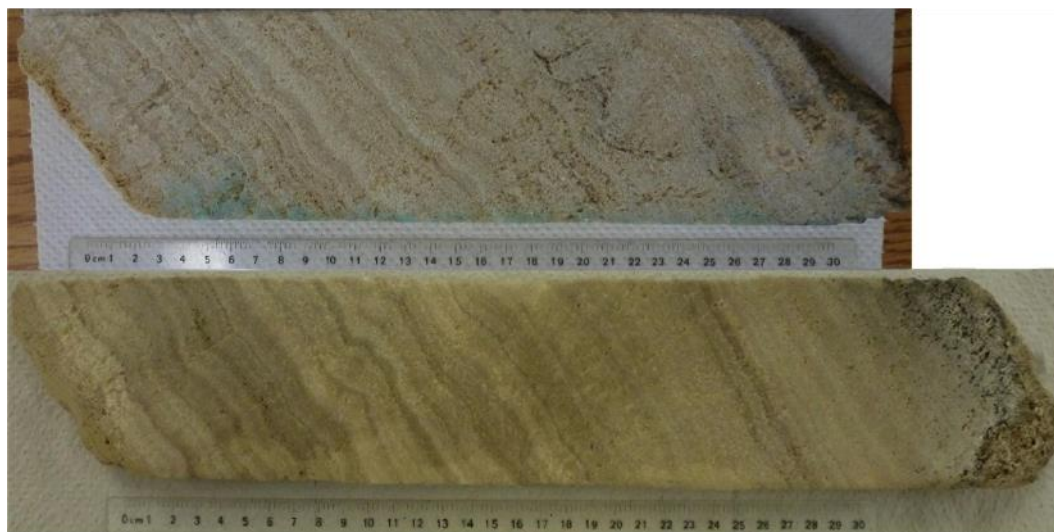


Figure 2. Échantillons Gleyze (haut) et Sernhac (bas). Les parties les plus anciennes sont positionnées vers la gauche. © Yacine Benjelloun.



Figure 3. Échantillons AN1, 2 et 3 (gauche), Ba0 (centre) et Ba4 (droite). Les parties les plus anciennes sont positionnées vers le bas. © Yacine Benjelloun.

3.2. Analyse des isotopes stables de l'oxygène et du carbone

Pour cette étude, deux méthodes d'échantillonnages ont été pratiquées :

- Tout d'abord, des poudres ont été prélevées le long de tous les échantillons grâce à une fraise de sculpture diamantée. L'échantillonnage s'est fait par tranchées successives d'environ 1 mm d'épaisseur et de 1 cm de longueur, avec un pas d'environ 0,5 à 2 mm. Quelques doublets ont été prélevés sur une même lamine afin d'estimer la représentativité des poudres.
- Par ailleurs, une dernière série de prélèvements a été réalisée sur des portions de Sernhac et de Ba4 avec une micro-foreuse *Newwave Research* Modèle 12-0223 commandée par ordinateur. L'échantillonnage s'est fait par tranchées successives d'une épaisseur comprise entre 200 et 300 μm et sur toute la largeur de l'échantillon, avec un pas compris entre 500 μm et 1 mm.

Pour les mesures isotopiques, deux étalons internes ont été utilisés : UQ6 ($\delta^{18}\text{O} = -1,40\text{‰}$ et $\delta^{13}\text{C} = 2,25\text{‰}$ par rapport au PDB) et NBS18 ($\delta^{18}\text{O} = -23,01\text{‰}$ et $\delta^{13}\text{C} = -5,01\text{‰}$). Les rapports isotopiques des étalons internes sont connus à $\pm 0,05\text{‰}$ ou mieux. Certaines poudres ont été analysées deux fois en $\delta^{18}\text{O}$.

4. Résultats

4.1. Observations macroscopiques et microscopiques

Les résultats des observations microscopiques sont présentés en **figure 4**. Pour tous les échantillons, les doublets de lames sont en moyenne de tailles comparables, autour de 1 mm, même si quelques épaisseurs remarquables, notamment supérieures à 5 mm, apparaissent ponctuellement. Ces épaisseurs exceptionnelles peuvent en réalité regrouper plusieurs doublets successifs non identifiés lors de l'observation. Pour la grande majorité des doublets, les lames claires dominent largement en termes d'épaisseur, ce qui suggère qu'elles se développent bien dans des périodes caractérisées par un débit suffisant et une bonne minéralisation de l'eau. Au contraire, les lames sombres, plus fines et exhibant une structure plus poreuse, correspondraient à des périodes de moindre minéralisation et seraient issues d'eaux plus riches en éléments détritiques et organiques.

Malgré les variations d'épaisseur des doublets, la vitesse de croissance demeure stable sur la durée de fonctionnement des aqueducs puisque les résultats des régressions linéaires (**tableau 2**) sont bons. On constate que les échantillons Sernhac, Gleyze, et AN123 montrent des vitesses de croissance comparables, légèrement supérieures à 1 mm/an, à comparer avec une valeur plus faible pour Ba4. Le rapprochement des trois premiers échantillons paraît logique puisqu'ils ont précipité dans des canalisations souterraines, tandis que Ba4 s'est formé dans un bief, à l'air libre et sous de forts débits. Ces dernières conditions semblent donc moins favorables à la croissance de la calcite.

Tableau 2. Vitesses de croissance moyennes et coefficient de corrélation issus des régressions linéaires sur les données d'âge et d'épaisseur de lames obtenues par observation microscopique.

Echantillon	Vitesse de croissance moyenne (mm/an)	R ²
Sernhac	1,3479	0,9953
Gleyze	1,4665	0,9963
AN123	1,2413	0,994
Ba4	0,8055	0,9947

Si l'on compare les échantillons en termes de durée totale de fonctionnement, on confirme ce qui avait été supposé en part. 2.2. à partir des épaisseurs, à savoir que les échantillons de l'aqueduc de Nîmes ont enregistré une durée de fonctionnement bien plus longue que ceux de l'aqueduc d'Arles. La croissance des

concrétions n'ayant sans doute pas été continue dans le temps, notamment à cause d'éventuels travaux de maintenance sur les aqueducs occasionnant des interruptions de l'écoulement, la durée donnée par les concrétions est probablement inférieure à la durée réelle d'exploitation des édifices. Ba0 et Ba4 ont enregistré un fonctionnement d'un peu moins d'un siècle, ce qui est cohérent avec les estimations archéologiques. AN123 fournit une durée de fonctionnement similaire à ces derniers, mais comme déjà mentionné plus haut, il semble bien qu'il ne s'agisse que de la première partie de la série complète. Sernhac aurait enregistré deux siècles de fonctionnement, ce qui serait compatible avec la période de fonctionnement « optimal » de l'aqueduc. Cependant, il y a une différence de plus de 50 ans entre les durées de fonctionnement données par Gleyze et Sernhac, alors qu'il s'agit du même aqueduc. Ba0 et Ba4 fournissent également des durées différentes, avec un écart d'un peu plus de 30 ans.

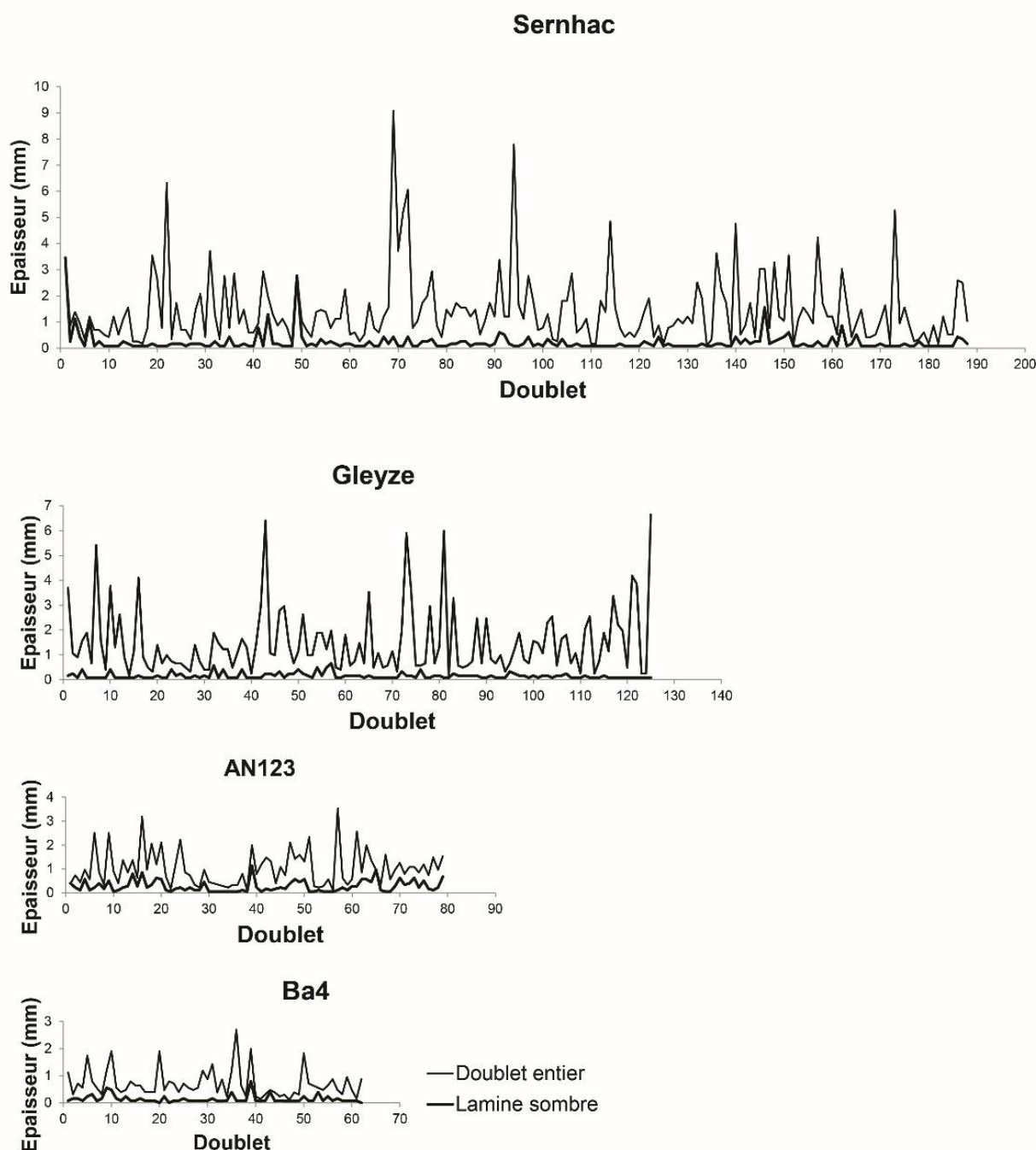


Figure 4. Épaisseurs des doublets de lamines successifs. En abscisse est reportée la position du doublet de lamines, et en ordonnée son épaisseur en millimètres. Du fait de la précision minimale permise par la réglette de la loupe binoculaire, la valeur d'épaisseur de 0,07 mm correspond en réalité à une valeur inférieure ou égale à 0,07 mm mais non nulle. Les lames de Gleyze et Ba4 ne couvrent pas entièrement les échantillons.

4.2. Isotopes stables de l'oxygène et du carbone

Les résultats des analyses en isotopes stables de l'oxygène et du carbone sont présentés aux **figures 5 à 8**. Comme le montre la **figure 5**, la distinction entre les deux aqueducs est remarquable : les échantillons de l'aqueduc de Nîmes occupent un domaine très localisé, avec des $\delta^{18}\text{O}$ compris entre -10 et -11‰ et des $\delta^{13}\text{C}$ compris entre -5,5 et -6,5‰. Ces faibles gammes de variations peuvent s'expliquer par la position souterraine du canal qui doit fortement atténuer les variations de température. Pour l'aqueduc de Barbegal, les variations sont plus importantes, supérieures à 2‰ pour le carbone comme pour l'oxygène. Les domaines de Ba0 et Ba4 se superposent bien, tandis qu'AN123 montre des valeurs plus surprenantes.

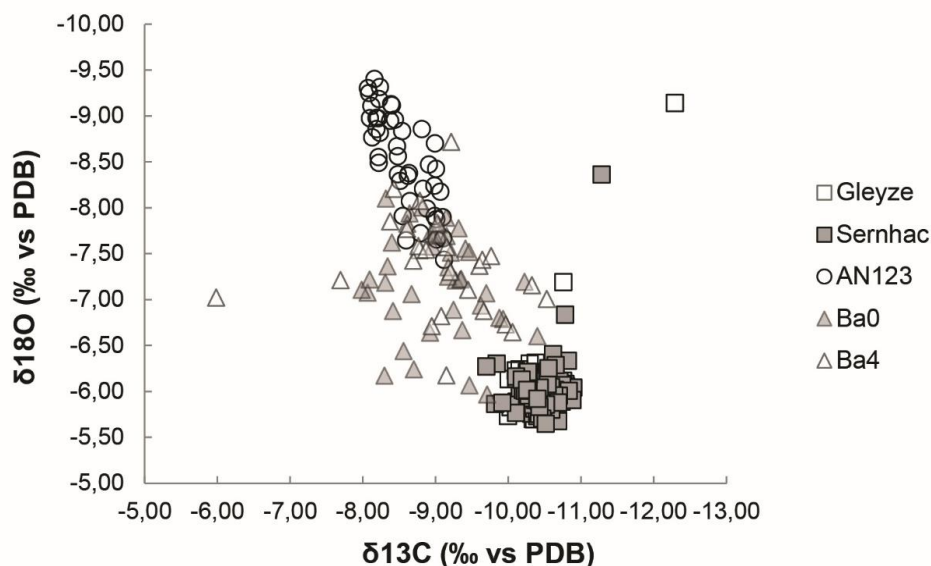


Figure 5. Comparaison des gammes de valeurs isotopiques des échantillons. Le $\delta^{13}\text{C}$ est indiqué en abscisse et le $\delta^{18}\text{O}$ en ordonnée. Les rapports isotopiques sont en ‰ par rapport au VPDB. Les axes sont inversés. L'erreur analytique sur les rapports est $\pm 0,05\%$.

Les échantillons étant contemporains et proches géographiquement, ils ont probablement précipité à partir d'eaux de compositions isotopiques comparables. On pourrait donc s'attendre à ce qu'AN123 présente la même gamme de $\delta^{18}\text{O}$ que les échantillons de l'aqueduc de Nîmes étant donné qu'il est aussi en souterrain. Pourtant, les valeurs sont en majorité significativement plus faibles que pour les échantillons de Barbegal, autour de -9‰. L'écart entre AN et Ba pourrait s'expliquer par une évaporation plus importante de l'eau des biefs qui l'aurait enrichie en ^{18}O . Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ d'AN123 sont quant à elles du même ordre que pour Barbegal. Le $\delta^{13}\text{C}$ étant davantage dépendant des conditions pédologiques locales, on comprend que les échantillons de la région d'Arles montrent des valeurs similaires, légèrement plus élevées que pour la région de Nîmes. Par ailleurs, pour tous les échantillons, il n'y a pas de corrélation notable entre $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$, ce qui suggère que tous les fractionnements ont eu lieu à l'équilibre (Hendy, 1971).

AN123 surprend également par l'allure du signal en $\delta^{18}\text{O}$ obtenu qui semble très bruité, et rend difficile l'identification de tendances. Au contraire, le signal en $\delta^{13}\text{C}$ montre plus clairement deux modes bien marqués : un vers -9‰ que l'on trouve au début et à la fin de l'échantillon, et un autre plus proche de -8‰. Au regard des différences conséquentes de durée de fonctionnement enregistrées par Sernhac et Gleyze d'une part, et Ba0 et Ba4 d'autre part, il n'est pas si étonnant que les signaux ne soient pas directement superposables, même s'il est possible de trouver des évolutions similaires entre les deux premiers, notamment en termes de $\delta^{13}\text{C}$, avec une tendance croissante lente sur toute la durée de fonctionnement. Quant aux échantillons de Barbegal, malgré les disparités de durée de fonctionnement, on peut dégager deux modes ici aussi bien marqués pour le $\delta^{18}\text{O}$: un entre -7,5 et -8‰ présent entre 0 et 20 ans pour les deux échantillons ainsi qu'entre 40 et 70 ans pour Ba0, et un autre autour de -7‰ présent entre 25 et 40 ans pour

Ba0 et entre 25 et 50 ans pour Ba4. On peut aussi noter que pour ces deux échantillons, la fin du concrétionnement est marquée par une augmentation importante du $\delta^{18}\text{O}$ jusqu'à -6‰ et des variations plus brutales. Les variations du $\delta^{13}\text{C}$ sont plus erratiques, à l'exception d'une augmentation notable et ponctuelle pour Ba4 un peu avant 50 ans de fonctionnement.

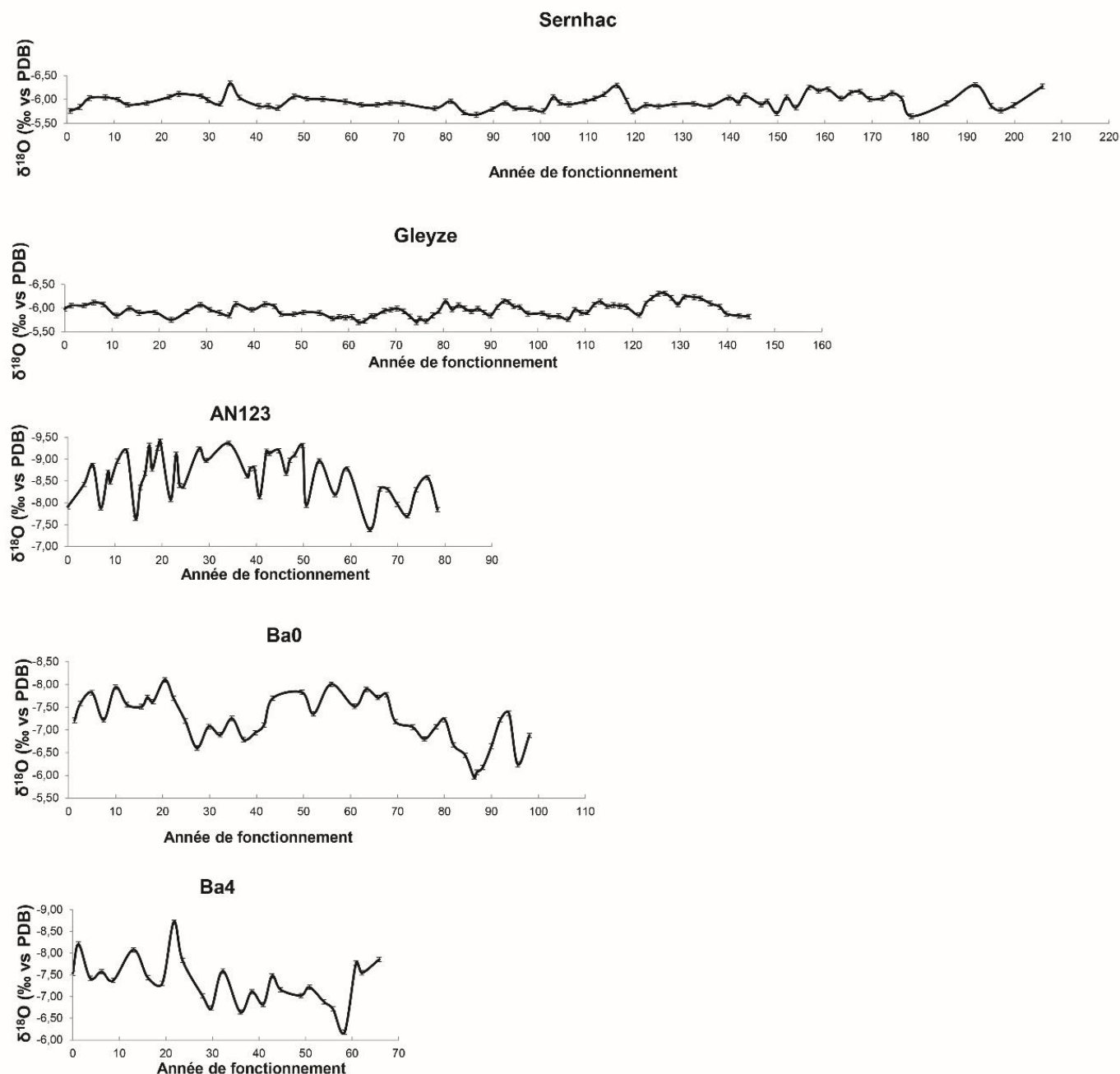


Figure 6. Evolution temporelle du $\delta^{18}\text{O}$ enregistré par les échantillons. L'année de fonctionnement estimée à partir du modèle d'âge décrit en part. 3.1. est indiquée en abscisse (l'origine des temps est fixée à l'initiation du fonctionnement de l'aqueduc), et le $\delta^{18}\text{O}$ (en ‰ par rapport au PDB) en ordonnée. L'erreur analytique sur les rapports, représentée par les barres verticales, est $\pm 0,05\text{‰}$. L'axe temporel ne prend pas en compte d'éventuels arrêts de fonctionnement.

La **figure 8** présente les résultats des prélèvements réalisés à la micro-foreuse sur Ba4. Les valeurs du $\delta^{18}\text{O}$ sont comparables à celles déjà présentées pour cet échantillon, avec une marge de variation totale d'1‰. La marge de variation du $\delta^{13}\text{C}$ est par contre supérieure à celle observée pour le signal interannuel, avec un minimum particulièrement bas de -8‰.

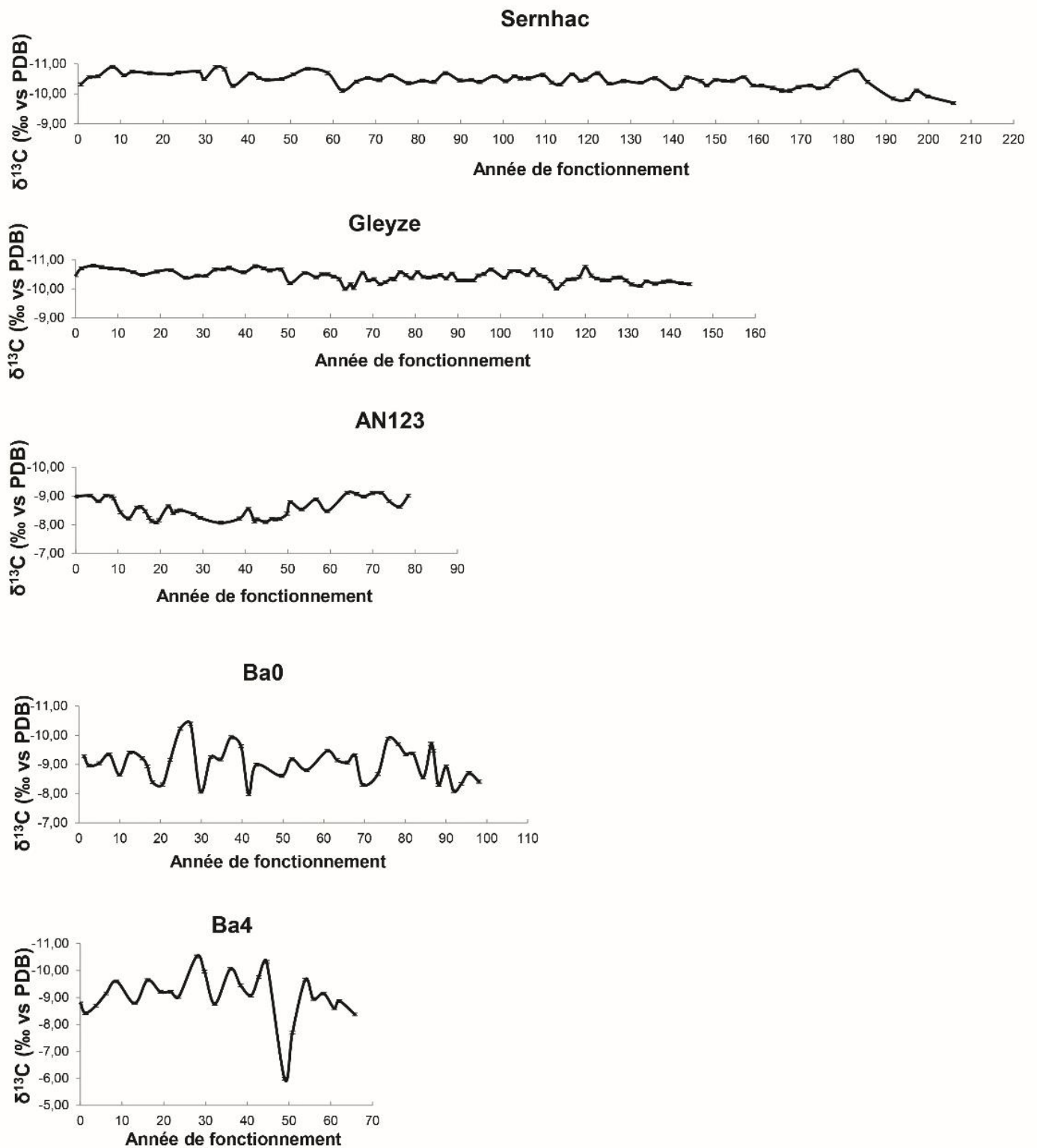


Figure 7. Evolution temporelle du $\delta^{13}\text{C}$ enregistré par les échantillons. L'année de fonctionnement estimée à partir du modèle d'âge décrit en part. 3.1. est indiquée en abscisse (l'origine des temps est fixée à l'initiation du fonctionnement de l'aqueduc), et le $\delta^{13}\text{C}$ (en ‰ par rapport au PDB) en ordonnée. L'erreur analytique sur les rapports, représentée par les barres verticales, est $\pm 0,05\%$. L'axe temporel ne prend pas en compte d'éventuels arrêts de fonctionnement.

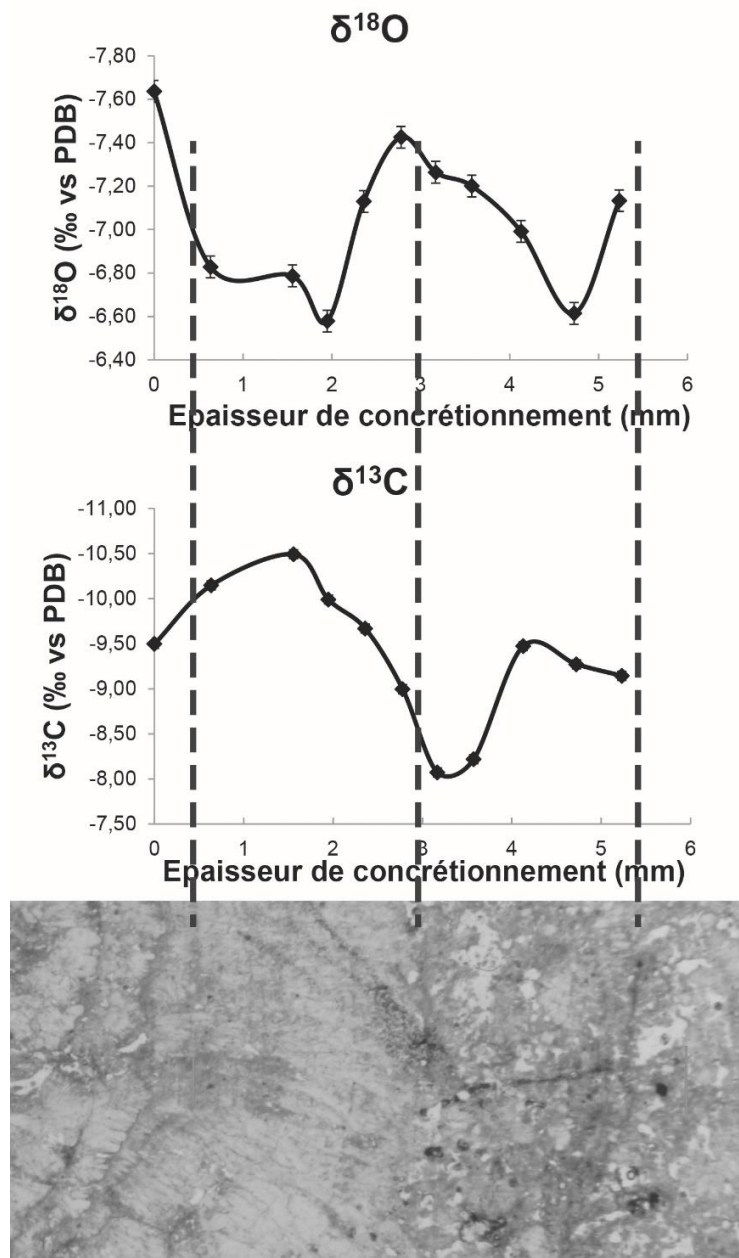


Figure 8. Evolution à haute résolution des rapports isotopiques de l'oxygène et du carbone sur une portion de Ba4. L'évolution du $\delta^{18}\text{O}$ est présentée sur le graphique du haut, et celle du $\delta^{13}\text{C}$ sur le graphique du milieu. En abscisse est indiquée la position en millimètre le long du profil d'échantillonnage à partir du premier point, et en ordonnée le rapport isotopique en ‰ par rapport au PDB. L'erreur analytique, représentée par les barres verticales sur les points, est de $\pm 0,05\%$. L'image du bas est une vue à la loupe binoculaire de la portion de l'échantillon étudiée. Les lignes noires pointillées suivent les limites de doublets. La croissance cristalline s'est effectuée de la gauche vers la droite.

5. Discussion

5.1. Aperçu du signal isotopique sub-annuel

Malgré le faible nombre de points et la faible couverture spatiale de l'échantillonnage à la micro-foreuse exploitable, les variations du $\delta^{18}\text{O}$ montrent des tendances intéressantes. Les points couvrent en effet approximativement deux doublets de lamines, et le signal isotopique semble montrer une cyclicité correspondant, aux incertitudes de positionnement près, à la structure minéralogique. La première partie, claire, du doublet est ainsi associée à une croissance du $\delta^{18}\text{O}$. Cette tendance s'inverse pour la fin du doublet, constitué surtout de la calcite sombre. Ces tendances peuvent être associées à la saisonnalité de l'isotopie des pluies, présentée en **figure 9**.

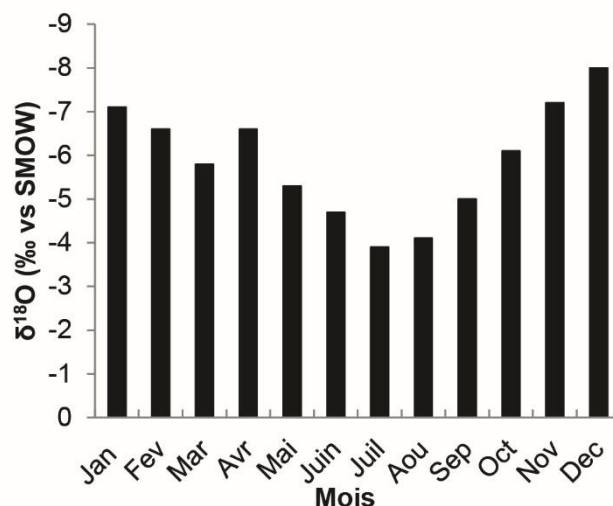


Figure 9. Evolution du $\delta^{18}\text{O}$ des pluies au cours de l'année dans la région d'Arles. Le mois est reporté en abscisse, et en ordonnée le $\delta^{18}\text{O}$ exprimé en ‰ par rapport au SMOW. Les valeurs sont extraites du modèle de Gabriel Bowen (Bowen et al., 2005 ; Bowen, 2012).

Dans la région qui nous concerne, les pluies sont les plus légères d'un point de vue isotopique en hiver, leur $\delta^{18}\text{O}$ croît au cours du printemps, puis décroît en été-automne. Ce schéma saisonnier semble donc transposable pour la calcite : le gros de la partie claire du doublet, marqué par une croissance du rapport, serait associé aux pluies d'hiver-printemps, tandis que la fin du doublet, marquée par une décroissance du rapport, serait associée aux pluies d'été-automne. On retrouve d'ailleurs le résultat de l'étude de J. Nicod déjà évoquée en 2.2 (Nicod, 2010). Ces résultats confirmeraient donc l'hypothèse de l'annualité des lamines. Toutefois, il faudrait confirmer l'existence de cette cyclicité sur un nombre plus important de lamines.

Les variations du $\delta^{13}\text{C}$ ne montrent pas cette saisonnalité. Il semble donc que les facteurs liés à la variabilité environnementale interannuelle dominent le signal par rapport aux facteurs saisonniers. Toutefois, il y a une différence nette entre les deux doublets. Le premier doublet est marqué par un $\delta^{13}\text{C}$ particulièrement bas, autour de -10‰, tandis que le passage au deuxième doublet est associé à une augmentation importante du rapport jusqu'à -8‰. On peut également remarquer que le deuxième doublet est constitué d'une calcite plus poreuse et probablement plus riche en impuretés que le premier. Cette différence de texture de la calcite peut être attribuée à une quantité plus importante de pluies durant la deuxième année, occasionnant des débits et donc un lessivage des sols plus importants et une minéralisation de la calcite moindre. Le $\delta^{13}\text{C}$ plus élevé de cette année serait cohérent avec cette hypothèse, dans la mesure où un débit plus important limite le temps de résidence de l'eau dans le sol et donc la participation organique au carbone dissout, d'où un rapport plus élevé (Drysdale et al., 2004).

5.2. Évolution de la vitesse de croissance de la calcite et facteurs associés

Afin de déterminer si l'évolution de la vitesse de croissance peut contenir un signal climatique, une analyse de Fourier rapide a été réalisée avec le logiciel PAST sur les données présentées en **figure 4**. Les principaux pics identifiés sont répertoriés dans le **tableau 3**.

Tableau 3. Principales périodes identifiées par analyse de Fourier sur les données d'épaisseur de doublets.

Echantillon	Périodes (ans)
Sernhac	2,7 – 11,6 – 24,1
Gleyze	2,7 – 4,4 – 38,2
AN123	3,4 – 34,7
Ba4	3,3 – 4,9

Les échantillons de l'aqueduc de Nîmes montrent des périodicités aussi bien à court terme qu'à plus long terme, même si cette dernière est moins certaine étant donné que les durées de fonctionnement n'excèdent pas deux siècles. AN123 semble également présenter cette dichotomie, malgré un spectre plus bruité. Tous les échantillons semblent présenter une périodicité de 3 ans environ. Une analyse similaire a été réalisée par M. Dubar sur un concrétionnement de l'aqueduc de Fréjus (Dubar, 2006). Il a également identifié deux sous-groupes de périodicités, avec notamment un pic à 2,7 ans dans le spectre de Fourier que l'on retrouve ici. On peut avancer que l'existence de telles périodicités suggère un contrôle climatique sur la vitesse de croissance, au moins pour les échantillons souterrains.

La vitesse de croissance peut dépendre de nombreux facteurs, tels que la composition chimique de l'eau, la température, la quantité de pluies, la pression partielle en CO₂ dans le karst, en plus de paramètres hydrodynamiques locaux (Frisia *et al.*, 2003). Plusieurs études suggèrent qu'une diminution de la vitesse de croissance indique une période plus froide et sèche (Frisia *et al.*, 2003 ; Genty *et al.*, 2010). Par ailleurs, les profils de vitesse de croissance obtenus montrent peu de tendances clairement identifiables, à l'exception de Gleyze avec une tendance décroissante de 40 à 70 ans et croissante à partir de 110 ans ainsi qu'une période à faible épaisseur de doublet entre 20 et 40 ans. Ba4 montre également une telle période entre 40 et 50 ans. A priori, on ne retrouve pas ces intervalles particuliers dans les signaux isotopiques, donc la vitesse de croissance et les rapports isotopiques ne partagent sans doute pas les mêmes facteurs dominants.

5.3. Analyse quantitative du signal en $\delta^{18}\text{O}$ interannuel

Le $\delta^{18}\text{O}$ des carbonates dépend de deux facteurs : la température et le $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau dont le carbonate est issu. D'autres éléments tels que des processus cinétiques lors de la précipitation ou l'évaporation peuvent aussi jouer (Drysdales *et al.*, 2004). En l'absence d'inclusions fluides qui permettent de retrouver la composition isotopique de l'eau, il est quasiment impossible de décorrélérer les effets de la température et de la source. De plus, l'interaction des deux effets est complexe puisque la température atmosphérique influence le $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations, qui augmente avec la température, mais une diminution de température augmente aussi le fractionnement et enrichit la calcite en oxygène 18. Toutefois, on peut faire l'hypothèse au premier ordre, pour les échantillons souterrains, que la température dans le canal est constante, ce qui permet d'estimer les variations relatives du $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau. La relation entre température et $\delta^{18}\text{O}$ est fournie par l'équation suivante (Epstein *et al.*, 1953) :

$$T (^{\circ}\text{C}) = 16,5 - 4,3\Delta + 0,14\Delta^2 \text{ où } \Delta = \delta^{18}\text{O}_{\text{CaCO}_3}(\text{PDB}) - \delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}(\text{SMOW})$$

Les estimations se basent sur les échantillons Sernhac et Ba0. Étant donné que les gammes de variations sont respectivement identiques à celles de Gleyze et Ba4, ces derniers donneraient des résultats comparables. Afin d'avoir une idée de la température du canal souterrain, on peut estimer l'ordre de grandeur du $\delta^{18}\text{O}$ des pluies, qui peut s'appliquer aux deux aqueducs vu leur proximité géographique et chronologique. Pour le calculer, on utilise une température de 14°C, ce qui est l'ordre de grandeur de la température moyenne annuelle de la région pour les cinquante dernières années, et la moyenne des $\delta^{18}\text{O}$ de Ba0. On obtient une valeur de -7,80‰ par rapport au SMOW, ce qui correspond aux pluies hivernales actuelles (Bowen *et al.*, 2012). Si l'on applique cette valeur à la moyenne des $\delta^{18}\text{O}$ de Sernhac, on obtient une température de 9,07°C. La différence de $\delta^{18}\text{O}$ entre Sernhac et Ba0 peut donc s'expliquer par une différence de température d'environ 5°C, ce qui n'est pas incongru.

En supposant une température constante de 9°C pour Sernhac, on obtient une courbe artificielle du $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau circulant dans l'aqueduc, présentée en **figure 10**. Les valeurs sont contenues dans une fenêtre de variation inférieure à 1‰, ce qui est cohérent avec les variations du $\delta^{18}\text{O}$ des pluies sur le pourtour de la Méditerranée pour les 50 dernières années (IAEA., 1981). Il n'est donc pas nécessaire d'invoquer une

variation de température pour obtenir un signal théoriquement admissible, ce qui appuie l'hypothèse de faibles variations de température dans le canal de l'aqueduc de Nîmes. On a vu en part. 5.1. que les pluies d'hiver sont plus légères isotopiquement que les pluies d'été et qu'elles participent davantage dans la formation de calcite du doublet annuel. Ainsi, en période humide, on aura une participation accrue de ces pluies légères et un $\delta^{18}\text{O}$ de la calcite plus faible (Bard *et al.*, 2002). En se basant sur la courbe calculée, on pourrait donc identifier des épisodes plus humides entre 100 et 120 ans et entre 150 et 180 ans, ainsi qu'une évolution vers des conditions plus sèches entre 40 et 80 ans.

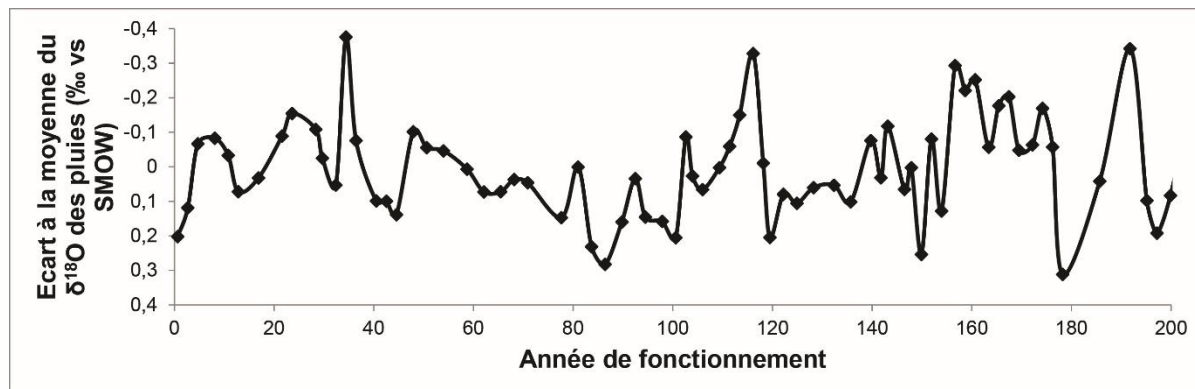


Figure 10. Evolution relative calculée du $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau de l'aqueduc de Nîmes. L'écart à la moyenne du $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau, exprimé en ‰ par rapport au SMOW est indiqué en abscisse, et l'année de fonctionnement de l'aqueduc en ordonnée. Le $\delta^{18}\text{O}$ a été calculé en utilisant température constante de 9°C.

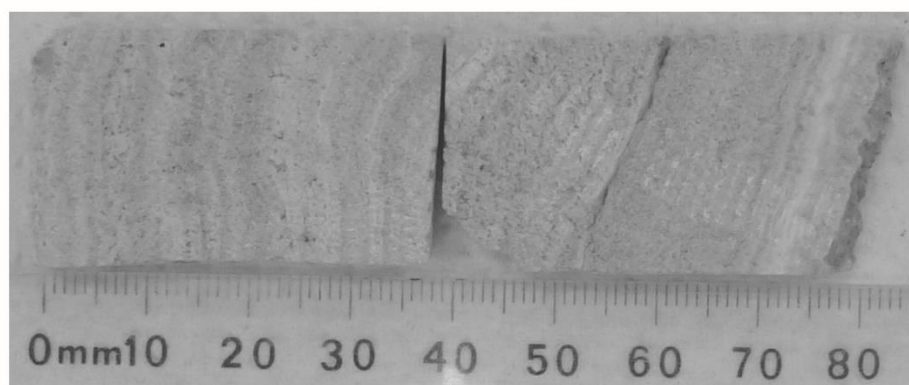
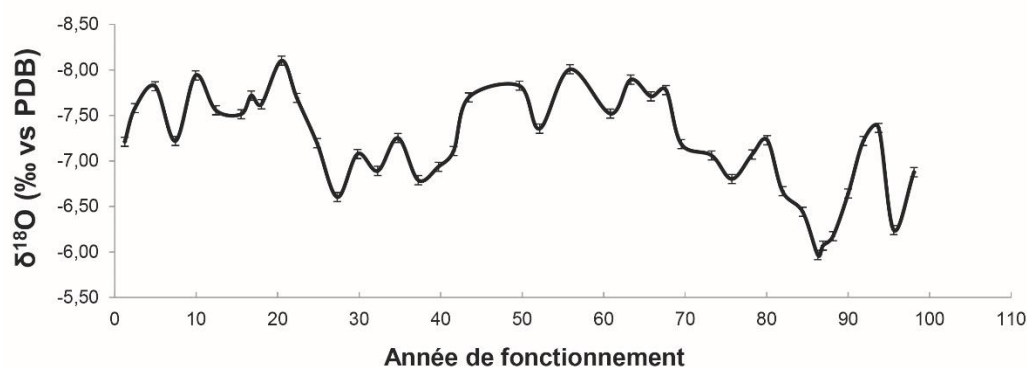


Figure 11. Comparaison de l'évolution du $\delta^{18}\text{O}$ de BaO (haut) et de la texture de l'échantillon (bas). L'année de fonctionnement de l'aqueduc est reportée en abscisse, et le $\delta^{18}\text{O}$ exprimé en ‰ par rapport au PDB en ordonnée. L'erreur analytique, représentée par les barres noires est $\pm 0,05\%$. La cassure au milieu de l'échantillon n'est pas naturelle.

On peut raisonner de façon inverse et estimer les variations de température pouvant expliquer les signaux en fixant le $\delta^{18}\text{O}$ des pluies, par exemple à $-7,80\%$ par rapport au SMOW. Pour Sernhac, on obtient une fenêtre de variation d'un peu plus de 2°C, ce qui reste raisonnable pour l'échelle de temps considérée, tandis

que pour Ba0, cette fenêtre est de 9°C, avec parfois des variations de plus de 5°C en moins de dix ans. Ceci montre bien que pour Ba0, on doit impérativement tenir compte des deux paramètres pour expliquer les variations de $\delta^{18}\text{O}$. Il est alors plus délicat d'en tirer des informations climatiques. Les variations de texture de l'échantillon peuvent apporter des informations utiles à l'interprétation, comme on l'a vu en part. 5.1. On constate ainsi, sur la **figure 11**, que les périodes de $\delta^{18}\text{O}$ faible sont associées à des textures macroscopiques plus poreuses et plus sombres. Il s'agirait alors d'intervalles plus humides, marquées par des pluies hivernales légères dominantes et des débits accrus limitant la minéralisation de la calcite, plus riche en impuretés. Ba0 présenterait donc deux épisodes humides de 0 à 25 ans et de 40 à 70 ans, alternant avec des épisodes plus secs.

Enfin, on peut remarquer que des cyclicités apparaissent dans le signal en $\delta^{18}\text{O}$ notamment sur deux échantillons. Gleyze semble en effet montrer des cycles d'un peu plus de 10 ans (voir la **figure 12** pour une échelle plus lisible), tandis que Ba0 présenterait un cycle à haute fréquence d'un peu moins de 10 ans, ainsi qu'un cycle à basse fréquence, plus incertain, d'un peu moins de 50 ans. Le cycle haute fréquence est d'ailleurs aussi visible pour Ba4. Comme pour la vitesse de croissance, ces cyclicités suggèrent l'influence de paramètres climatiques.

5.4. Analyse du signal en $\delta^{13}\text{C}$ interannuel

Le $\delta^{13}\text{C}$ des carbonates a deux sources principales : le carbone présent dans la roche mère, et le carbone d'origine biologique. Le carbone d'origine biologique provient de la respiration des différents organismes du sol, à l'origine d'un CO_2 à signature très négative qui se dissout lors de l'infiltration de l'eau des précipitations sous la forme d'ions bicarbonates avec un $\delta^{13}\text{C}$ d'environ -14‰ dans le cas d'une végétation C3. Pendant son transit dans le karst, l'eau dissout partiellement la roche mère et intègre des ions bicarbonates avec un $\delta^{13}\text{C}$ bien plus élevé d'environ -3‰. Le carbonate final se place donc entre ces deux pôles (Lambert & Aharon, 2011). Ainsi, le $\delta^{13}\text{C}$ peut dépendre de nombreux facteurs : couverture végétale, temps de résidence dans le sol, composition isotopique de la roche mère, temps de contact avec la roche (Frisia *et al.*, 2003).

On peut estimer l'ordre de grandeur du $\delta^{13}\text{C}$ du HCO_3^- dissout dans l'eau circulant dans les aqueducs en utilisant les températures estimées en part. 5.3 (Deines *et al.*, 1974). Avec des $\delta^{13}\text{C}_{\text{calcite}}$ de -10,43‰ et -9,04‰ pour Sernhac et Ba0 respectivement, on obtient des $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$ de -12,52‰ et -11,09‰, ce qui est cohérent avec les données de la littérature. L'effet de la différence de température sur le fractionnement est ici très faible, et on peut expliquer cet écart par la signature de la roche mère. Les $\delta^{13}\text{C}$ du calcaire hauterivien de Barbegal et du calcaire urgonien de la région de Nîmes diffèrent en effet de 1 à 1,5‰. On peut également invoquer un dégazage des eaux plus important pour le bassin de Ba0 qui est à l'air libre, ce qui enrichirait le carbonate en carbone 13.

Les échantillons de Barbegal présentent un signal relativement erratique et difficilement interprétable, sans doute lié aux conditions locales de dépôt. On peut seulement noter une très forte augmentation du rapport isotopique pour Ba4 un peu avant 50 ans, peut-être due à un dégazage brutal lors du dépôt. AN123 montre des variations plus claires, avec une augmentation du rapport de 10 à 30 ans suivie d'une diminution de 40 à 65 ans. Ces tendances peuvent être corrélées avec les variations d'épaisseur de doublets annuels. Les intervalles 0-30 ans et 40-65 ans sont en effet marqués par des épaisseurs plutôt élevées, tandis que l'intervalle 25-40 ans s'en distinguent par des épaisseurs bien plus faibles. L'explication évoquée en part. 5.2, à savoir qu'une chute de la vitesse de croissance marquerait un climat froid et sec est cohérente avec ces résultats. En effet, la diminution de température fait aussi diminuer l'activité biologique du sol, ce qui limite l'apport de CO_2 biogénique, et la sécheresse est défavorable à la couverture végétale, ce qui agit dans le même sens. Ces deux éléments peuvent expliquer un $\delta^{13}\text{C}$ plus élevé. Quant aux échantillons de l'aqueduc

de Nîmes, ils présentent un signal assez bruité, avec une tendance croissante à un rythme très lent. Cette tendance pourrait s'expliquer par une variation progressive du couvert végétal. La romanisation des territoires s'est en effet souvent accompagnée de déforestations et de mises en culture (Curras *et al.*, 2012), ce qui tend à privilégier les végétaux en C4, qui ont une signature en carbone 13 plus lourde, par rapport aux végétaux en C3.

5.5. Tentative d'intégration régionale des signaux

Avant de pouvoir corrélérer les résultats des deux aqueducs, il est nécessaire d'établir un cadre chronologique absolu, ce qui est délicat puisque les échantillons d'un même aqueduc ne livrent pas la même durée de fonctionnement.

Si l'on peut supposer que Ba0 a connu un concrétionnement continu, aux arrêts de fonctionnement près, il n'en va pas de même pour Ba4 qui est plus court, et présente peut-être des lacunes. Les débuts des deux échantillons coïncident quand même assez bien pour le $\delta^{18}\text{O}$, avec des valeurs faibles pendant 25 ans, suivi d'une augmentation notable. On peut aussi rapprocher les fins des échantillons avec une forte augmentation jusqu'à -6‰ . Il serait toutefois imprudent à ce stade d'essayer de faire correspondre les deux échantillons sur toute leur longueur, sans étude fine de la stratification des concrétions.

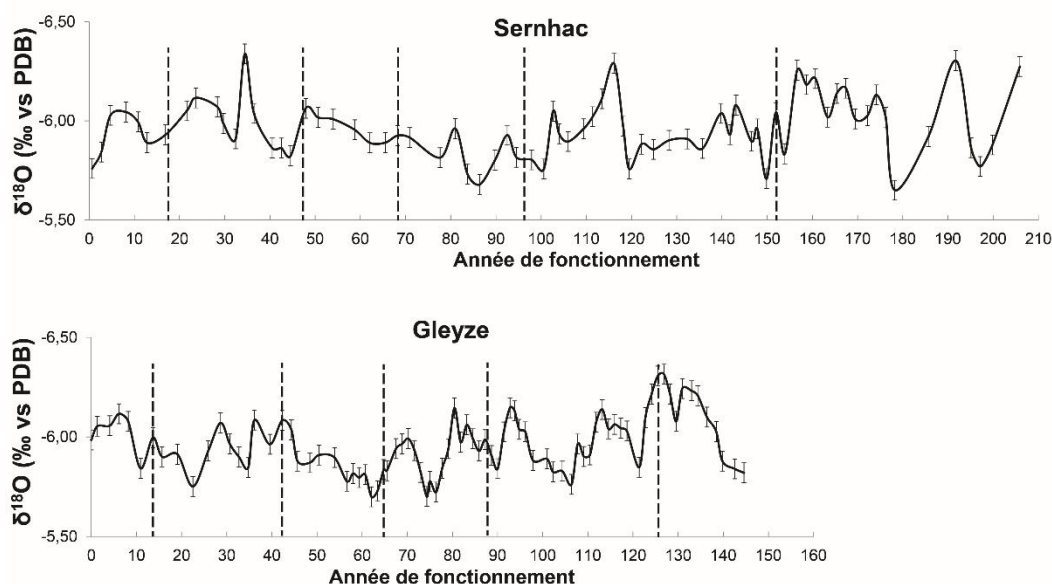


Figure 12. Comparaison des signaux en $\delta^{18}\text{O}$ des échantillons de l'aqueduc de Nîmes. L'année de fonctionnement est reportée en abscisse, et le $\delta^{18}\text{O}$ exprimé en ‰ par rapport au PDB en ordonnée. La courbe du haut est celle de Sernhac et celle du bas correspond à Gleyze. Les barres verticales pointillées marquent les niveaux fins et sombres évoqués dans le texte.

Malgré ces incertitudes, on peut se baser sur Ba0 et Sernhac, qui sont les échantillons les plus longs et sans doute les plus complets, pour tenter de replacer les interprétations climatiques réalisées en part. 5.3. dans une chronologie absolue, à partir des dates estimées par les archéologues pour la construction des deux aqueducs, qui sont respectivement d'environ 120 et 70 apr. J.-C. Aux erreurs de chronologie près, on peut observer des tendances similaires entre les deux échantillons selon ce schéma : dégradation climatique au milieu du II^e siècle apr. J.-C., suivie d'une amélioration jusqu'au III^e siècle avant un retour à des conditions plus sèches. Le signal en $\delta^{13}\text{C}$ de AN123 semblait montrer un intervalle plus froid et sec dans la deuxième moitié du I^{er} siècle et une amélioration climatique au début du II^e siècle, ce qui n'apparaît pas clairement dans le signal en $\delta^{18}\text{O}$ de Sernhac, même s'il est vrai qu'on observe un pic négatif vers les années 100.

Pour l'aqueduc de Nîmes, les correspondances entre les deux échantillons sont facilitées par la présence de cinq fines lamines sombres, interprétées comme des interruptions du fonctionnement pour travaux (Fabre & Vaudour, 1992). La **figure 12** replace ces niveaux particuliers sur les deux signaux en $\delta^{18}\text{O}$. On constate que les signaux sont assez bien corrélés sur les différents intervalles identifiés. Les niveaux sombres sur les deux enregistrements présentent un léger décalage chronologique qui s'accroît au cours du temps. Ce décalage croissant peut résulter des incertitudes liées au comptage des lamines, en plus de conditions de dépôts variables entre les deux sites. Les deux enregistrements diffèrent considérablement entre 120 et 130 ans, peu avant la fin de Gleyze. Pour expliquer ces différences, on peut invoquer l'élimination de certains pans de concrétions par curage. Les concrétions des aqueducs réduisaient en effet les sections des canaux à mesure de leur croissance, ce qui entravait la circulation de l'eau, c'est pourquoi elles étaient parfois retaillées ou complètement curées (Fabre *et al.*, 2001). Par ailleurs, il a été observé que les concrétions en aval du tunnel de Sernhac présentent une épaisseur moindre et une géométrie particulière. Ceci indique que le niveau de l'eau, et donc le débit, a baissé à un moment donné, et qu'il y aurait eu une « perte » d'eau considérable après Sernhac, d'origine inconnue (Guendon & Vaudour, 1986). Cette perte d'eau a pu perturber le concrétionnement pour Gleyze. La chronologie établie pour Gleyze est donc incertaine.

6. Conclusion

Au terme de cette étude, il semble bien établi que les concrétions des aqueducs romains contiennent des informations utiles sur l'histoire technique et environnementale de ces monuments. Même si de nombreuses interrogations subsistent, plusieurs résultats importants d'ordre méthodologique ont pu être obtenus. La structure annuelle de ces concrétions permet d'estimer précisément la durée de fonctionnement de l'ouvrage, ce qui, couplé aux données de l'archéologie, fournit une chronologie relativement fiable pour replacer les observations minéralogiques et isotopiques dans un cadre temporel absolu. Les variations des isotopes stables de l'oxygène et du carbone peuvent être interprétées de façon comparable aux travertins de rivière et aux spéléothèmes, mais les facteurs déterminant l'épaisseur de lamines restent à préciser. Par ailleurs, nous avons testé pour la première fois l'analyse isotopique sub-annuelle sur ce type d'échantillons.

Les concrétions des aqueducs présentent toutefois deux inconvénients majeurs qui limitent fortement leur intérêt en tant qu'archives climatiques. Tout d'abord, la présence de lacunes fausse considérablement la chronologie absolue du fonctionnement. Les progrès réalisés dans les techniques de datation U-Th devraient permettre de dépasser cette limitation. De plus, les facteurs environnementaux influant sur la croissance et la chimie de ces concrétions doivent être davantage investigués afin de mieux calibrer les différents proxies. D'autres types d'analyse pourraient être mis à profit sur ce type de dépôts. Le contenu en éléments traces de ces échantillons constituerait un proxy supplémentaire, qui permettrait de confirmer ou d'infirmer certaines hypothèses. Les développements récents autour du $\Delta 47$ pourraient également s'avérer prometteurs dans la mesure où ce nouvel outil géochimique apporterait une contrainte directe sur la température de précipitation.

Conflit d'intérêts

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

Évaluation

L'évaluation de cet article a été réalisée par Christophe Petit, Julien Curie et un évaluateur anonyme.

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

- Bard, E., Delaygue, G., Rostek, F., Antonioli, F., Silenzi, S., Schrag, D. P., 2002. Hydrological conditions over the western Mediterranean basin during the deposition of the cold Sapropel 6 (ca. 175 kyr BP). *Earth and Planetary Science Letters*. 202(2), 481-494.
- Bowen, G. J., 2012. *The Online Isotopes in Precipitation Calculator*, version 2.2., <http://www.waterisotopes.org>.
- Bowen, G. J., Wassenaar, L. I., Hobson, K. A., 2005. Global application of stable hydrogen and oxygen isotopes to wildlife forensics. *Oecologia*, 143(3), 337-348.
- Carlut, J., Chazot, G., Dessales, H., Letellier, E., 2009a. Trace element variations in an archeological carbonate deposit from the antique city of Ostia: Environmental and archeological implications. *Comptes Rendus Geoscience*, 1, 10-20.
- Carlut, J., Dessales, H., 2008. *Les Ponts-aqueducs du Vallon des Arcs, Fontvieille : les données de l'archéologie de la construction*, Rapport d'activité, Aix en Provence, Centre Camille Jullian.
- Carlut, J., Dessales, H., Trebaul, K., 2009b. *Les aqueducs d'Arles : Archéologie de la construction et géologie*, Rapport d'activité, Aix en Provence, Centre Camille Jullian.
- Curras, A., Zamora, L., Reed, J. M., Garcia-Soto, E., Ferrero, S., Armengol, X., Mezquita-Joanes, F., Marques, M. A., Riera, M. A., Julia, R., 2012. Climate change and human impact in central Spain during Roman times: High-resolution multi-proxy analysis of a tufa lake record (Somolinos, 1280 m asl). *Catena*. 89(1), 31-53.
- Deines, P., Langmuir, D., Harmon, R. S., 1974. Stable carbon isotope ratios and the existence of a gas phase in the evolution of carbonate ground waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 38(7), 1147-1164.
- Drysdale, R. N., Zanchetta, G., Hellstrom, J. C., Fallick, A. E., Zhao, J. X., Isola, I., Bruschi, G., 2004. Palaeoclimatic implications of the growth history and stable isotope ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$) geochemistry of a Middle to Late Pleistocene stalagmite from central-western Italy. *Earth and Planetary Science Letters*. 227(3-4), 215-229.
- Dubar, M., 2006. Approche climatique de la période romaine dans l'Est du Var : recherche et analyse des composantes périodiques sur un concrétionnement centennal (I^{er}-II^e siècle apr. J.-C.) de l'aqueduc de Fréjus. *Archéosciences*. 30, 163-171.
- Epstein, S., Buchsbaum, R., Lowenstam, H. A., Urey, H. C., 1953. Revised carbonate-water isotopic temperature scale. *Bulletin of the Geological Society of America*. 64(11), 1315-1326.
- Fabre, G., Fiches, J.-L., Paillet, J.-L., 2001. *L'aqueduc de Nîmes et le Pont du Gard*. Paris. CNRS Éditions.
- Fabre, G., Vaudour, J., 1992. Géoarchéologie de l'eau : l'aqueduc romain de Nîmes et le Pont du Gard. *Annales de Géographie*, 101(568), 609-621.
- Frisia, S., Borsato, A., Preto, N., McDermott, F., 2003. Late Holocene annual growth in three Alpine stalagmites records the influence of solar activity and the North Atlantic Oscillation on winter climate. *Earth and Planetary Science Letters*. 216(3), 411-424.
- Genty, D., Combourieu-Nebout, N., Peyron, O., Blamart, D., Wainer, K., Mansuri, F., Ghaleb, B., Isabello, L., Dormoy, I., von Grafenstein, U., Bonelli, S., Landais, A., Brauer, A., 2010. Isotopic characterization of rapid climatic events during OIS3 and OIS4 in Villars Cave stalagmites (SW-France) and correlation with Atlantic and Mediterranean pollen records. *Quaternary Science Reviews*. 29(19-20), 2799-2820.
- Genty, D., Quinif, Y., 1996. Annually Laminated Sequences in the Internal Structure of Some Belgian Stalagmites - Importance for Paleoclimatology. *Journal of Sedimentary Research*. 66(1), 275-288.

- 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*, 87-96.
- Guendon, J.-L., Vaudour, J., 1986. Les concrétions de l'aqueduc de Nîmes - observations et hypothèses. *Méditerranée*. 1-2, 140-151.
- Hendy, C. H., 1971. The isotopic geochemistry of speleothems-I: The calculations of the effects of different modes of formation on the isotopic composition of speleothems and their applicability as paleoclimate indicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 35(8), 801-824.
- International Atomic Energy Agency, 1981. *Statistical treatment of environmental isotope data in precipitation*. Technical Reports Series. 206. Vienne. IAEA.
- Lambert, W. J., Aharon, P., 2011. Controls on dissolved inorganic carbon and $\delta^{13}\text{C}$ in cave waters from DeSoto Caverns: Implications for speleothem $\delta^{13}\text{C}$ assessments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 75(3), 753-768.
- Nicod, J., 2010. Barrages de tufs calcaires et cascades dans le Centre-Var : rapport avec les eaux des sources karstiques, historique et déclin annuel. *Physio-Géo*. 4, 43-67.
- Trebaul, K., 2009. *Étude archéomagnétique et géochimique de l'aqueduc antique d'Arles*. Mémoire de Master 2. Paris. Université Paris Diderot.
- Van der Leeuw, S., Archaeomedes, 2005. « Climate, hydrology, land use, and environmental degradation in the lower Rhone Valley during the Roman period. *Comptes Rendus Geoscience*. 337(1-2), 9-27.