

# Carbonates et « mémoire de l'eau » : l'apport des textes juridiques à la gestion des aqueducs urbains

## Carbonates and "water memory": the contribution of legal texts to the management of urban aqueducts

Philippe Leveau<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Professeur émérite, Aix Marseille Université, MMSH France

**RÉSUMÉ.** L'objectif de cet article est d'attirer l'attention des géoarchéologues qui travaillent sur les dépôts carbonatés des aqueducs sur l'intérêt de prendre en compte la réglementation juridique romaine qui en encadrait l'utilisation. La démarche est historiographique. Elle s'appuie sur l'étude de l'aqueduc de Nîmes, un aqueduc urbain, et sur celle de la branche sud de l'aqueduc d'Arles. Celle-ci a été affectée à un usage privé l'alimentation des moulins de Barbegal. Les propriétaires riverains d'un aqueduc public étaient autorisés à en utiliser l'eau contre une redevance. Ils avaient l'obligation légale d'entretenir le conduit et ses abords. La réglementation qui s'appliquait à l'aqueduc de Barbegal relevait du droit privé. Les caractéristiques et l'importance des concrétions de l'aqueduc de Nîmes dépendent autant d'une évolution naturelle que des interventions sur le canal pour des prises d'eau et pour son entretien. Dans le cas de l'aqueduc de Barbegal, l'observation des concrétions et leur analyse montrent (1) que les moulins n'ont pas fonctionné durant toute l'année, (2) que le bâtiment d'origine était couvert et que par la suite son toit ait été enlevé ou détruit, (3) que l'aqueduc a servi de réserve d'eau pendant ses périodes de fonctionnement.

**ABSTRACT.** This article aims to draw the attention of geoarchaeologists who work on the carbonate deposits (sinter) of aqueducts to the importance of the legal regulation, which framed the use of aqueducts. The approach followed is historiographic. It is based on the study of the aqueduct of Nîmes, an urban aqueduct as well as the study of the south branch of the aqueduct of Arles. This one was assigned to private use, supplying of the mills of Barbegal. The residents along the line of a public aqueduct were allowed to use the water for a fee. They had the legal obligation to maintain the conduit and its surroundings. The regulations applicable to the Barbegal aqueduct were governed by private law. The characteristics and the importance of the concretions of the Nîmes aqueduct depend as much on a natural evolution as on interventions on the canal for water intakes and for its maintenance. In the case of the Barbegal aqueduct, the observation of the concretions and their analyses show (1) that the mills did not function throughout the year, (2) that the building was originally covered only by a roof that was subsequently removed or destroyed, (3) the aqueduct served as a water reserve during its period of use.

**MOTS-CLÉS.** Aqueduc romain, public et privé, réglementation, entretien des canaux, dépôts carbonatés.

**KEYWORDS.** Roman aqueducts, public and private, regulation, canal maintenance, carbonate deposits.

L'étude des aqueducs a d'abord relevé de l'archéologie monumentale conçue comme une branche de l'histoire de l'art. L'attention se portait alors sur les grands ponts-aqueducs dont le Pont-du-Gard est devenu le symbole. Par la suite, elle s'est enrichie de l'apport de l'archéologie de la construction qui restitue les modifications subies par ces ouvrages au cours de leur utilisation. C'est dans ce contexte de l'ouverture pluridisciplinaire qui caractérise l'évolution de leur discipline que les archéologues ont fait appel aux géoarchéologues et géochimistes pour analyser des dépôts carbonatés dont Frontin dans son traité des aqueducs de Rome observait qu'ils étaient un facteur de dégradation de ces ouvrages par le resserrement des canaux qu'ils produisent et par la charge que leur poids exerce sur les ouvrages. Les données auxquelles ils leur donnaient accès documentent en effet les opérations d'entretien, les apports ou les prises d'eau qui en ont fait fluctuer le niveau ainsi que les changements d'utilisation dont ces ouvrages ont fait l'objet. En retour, les géochimistes se voient offerte la possibilité d'extraire le signal paléoclimatique de carbonates archéologiques provenant de structures construites beaucoup mieux datées que les spéléothèmes et les tufs et travertins formés dans un milieu naturel, – une grotte ou exurgence karstique. Leur étude est donc

nécessairement pluridisciplinaire. Elle nécessite la prise en compte simultanée de lois naturelles qui relèvent de la chimie des eaux et de la microbiologie et celle de dispositions réglementaires et administratives dont l'objectif est d'assurer à tous la disponibilité du bien commun qu'est l'eau.

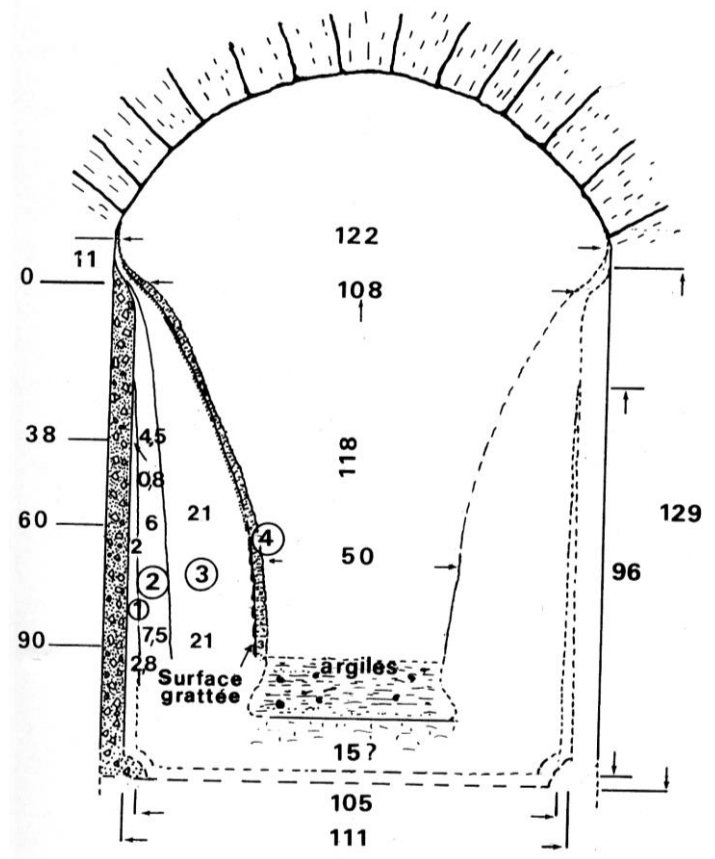
Pour en traiter, je m'appuierai sur ma participation au projet pluridisciplinaire développé par G. Fabre et J.-L. Fiches à la fin des années 1990 sur l'aqueduc de Nîmes (Fabre et al., 2000a) et sur les travaux que nous avons réalisés avec des géochimistes sur les moulins de Barbegal et l'aqueduc qui l'alimentait (Surmelihihi et al., 2018). Dans le premier cas, il s'agissait de réintégrer l'aqueduc romain de Nîmes comme une de ses composantes dans un paysage marqué par une succession d'aménagements agraires, notamment hydrauliques (drains, canaux d'irrigation, barrages, digues, etc...) », soit dans un géosystème (Vaudour, 2000). Dans le second cas, l'étude des carbonates a permis de renouveler la compréhension d'un ouvrage qui occupe une position majeure dans l'histoire de la maîtrise des énergies naturelles.

## 1. Formation des dépôts carbonatés, topographie et droit de l'eau

Les réfections dont l'architecture d'un aqueduc a fait l'objet et les carbonates que les eaux karstiques ont déposés à l'intérieur comme à l'extérieur de son canal témoignent des aléas de politiques municipales qui n'accordèrent pas toujours une attention suffisante aux exigences de l'entretien d'un ouvrage que l'histoire associe à la romanité au point d'en faire un symbole. Le cas de la ville de Rome en témoigne (Dessales, 2011). Sa fonction était de fournir aux villes un courant d'eau continu et celles-ci ne ménagèrent pas leur effort pour en assurer le maintien en menant contre les processus de dégradation une lutte qui était perdue d'avance. Mais on aurait tort de croire qu'il était plus « important d'avoir le monument plutôt que l'eau qu'il contient, et [que] peu importe son état de fonctionnement » (Crogiez Pétrequin, 2018 : 61). Tel est l'enjeu d'une archéologie des dépôts carbonatés qui se donne pour objectif de restituer les politiques urbaines dans ce domaine.

### 1.1. Typologie des dépôts

La vitesse d'écoulement de l'eau dans le canal d'un aqueduc commande la nature et l'importance du concrétionnement. Lorsque la pente est forte, le carbonate se dépose en fines lamines. Dans les sections de faible pente ou de contre-pente, le ralentissement de l'écoulement favorise une activité biologique que se traduit par la baisse de densité du dépôt et une augmentation de sa porosité. La réduction de la section du canal qui en résulte fait monter le niveau de l'eau dans le canal. De ce fait, à débit égal, les couches successives se déposent de manière transgressive. C'est pourquoi, J.-L. Guendon et J. Vaudour ont qualifié de « transgressif », d'« ogive » ou de « calice » la forme que prenait la concrétion (**Figure 1**).



**Figure 1.** Coupe sur une section encroûtée à Sernhac Le Grès (Guendon & Vaudour 2000 : 235, fig. 123).  
L'épaisseur des niveaux et les cotes sont exprimées en cm.

Au fil du temps, l'engorgement du conduit provoqué par l'accumulation des dépôts fait monter le niveau de l'eau au-dessus de la partie cuvelée jusqu'à l'intrados de la voûte, ce qui donne un profil « en ogive ». En l'absence d'entretien, les éléments naturels dégradent la maçonnerie, de sorte que des particules entraînées par le courant se retrouvent dans les dépôts. Ce phénomène affecte en priorité les parties de l'aqueduc en élévation sur lesquelles la végétation s'installe. Mais il concerne également les parties souterraines que dégradent les racines des arbres qui poussent à proximité. Des racines attirées par l'eau traversent les maçonneries et en ralentissent l'écoulement, ce qui accélère l'engorgement du canal. Leur présence laisse des traces dans le dépôt dont elles augmentent la porosité. Des manchons et des tubulures se forment le long de ces racines. Celles-ci laissent également des traces dans les concrétions internes sous forme de boursouflures fuselées dans le sens du courant à la surface des couches (Guendon & Vaudour, 2000).

## 1.2. Incidence de la topographie sur les dépôts

Pour toutes ces raisons, l'importance et la nature des dépôts varient le long d'un canal d'aqueduc à section constante selon la topographie. Celle-ci commande le profil en long de l'aqueduc et par là, la vitesse d'écoulement. Comme l'a montré F. Grabert à propos des ouvrages modernes, on aurait tort d'appliquer à l'étude des ouvrages hydrauliques anciens des principes d'exactitudes qui se sont imposés seulement au XIX<sup>e</sup> s.. En l'absence de cartes comportant des courbes de niveau, les entrepreneurs chargés de leur construction utilisaient des relevés dont la qualité dépendait étroitement de la manière dont les instruments de nivellement étaient maniés et des relations que le niveleur entretenait avec ses assistants. Ils avaient appris à se satisfaire de mesures altimétriques approximatives (Grabert, 2006). Dans ces conditions, la segmentation du profil d'un aqueduc est simplement le résultat d'une adaptation au terrain. L'écart entre les pentes moyennes et pentes

réelles s'explique par les contraintes qu'imposent le franchissement des « points durs » du terrain et la compensation d'erreurs de nivellement.

Dans le cas de l'aqueduc de Nîmes, le relevé topographique montre que, si sa pente moyenne est de 24,8 cm/km, elle varie suivant les différents segments entre un maximum de 4,32 m/km sur une courte section à l'aval du captage et un minimum de 5 cm/km, au quartier du Grès à Sernhac entre les kilomètres 21,3 et 29,5. À l'amont du Pont du Gard, sur les 15 km qui précèdent le bassin régulateur de Balozière situé au km 16, la pente moyenne est de 40 cm/km, alors qu'elle devient centimétrique à l'aval dans les combes de Remoulins entre le km 18 et le km 20 ainsi qu'à l'amont des tunnels de Sernhac. Du km 4,5 au km 47, soit dans la partie terminale à proximité de Nîmes, elle s'établit à une moyenne de 30 cm/km. Mais, dans le dernier kilomètre, elle dépasse 80 cm/km (Fabre *et al.*, 2000b) (*cf. infra* fig. 2 et 4). Des hydrauliciens ont montré qu'à débit égal, ces variations de pentes faisaient monter le niveau de l'eau à une hauteur de 1,2 l m entre le Pont-du-Gard et Sernhac, alors qu'il n'était que de 0,65 m à l'amont et à 0,77 m à l'aval (Viollet *et al.* 2010 : 183). Le cas de l'aqueduc d'Arles est analogue. Cet ouvrage comportait deux branches de longueur et de profil différents qui convergeait dans un bassin à des niveaux différents (Leveau, 1995 et 2012). La branche principale qui amenait l'eau du nord du massif des Alpilles parvenait 1,70 m au-dessus du fond de ce bassin, à la différence de la branche orientale qui captait les sources du versant sud du massif. Le relevé des pentes de cette branche montre qu'entre le Paradou, 4,5 km à l'est de la convergence, et le fond du bassin la perte d'altitude est de 2,41 m soit une moyenne de 0,46 m au kilomètre, ce qui assurait à cette section un écoulement régulier (Leveau 2011 et 2012) (*cf. infra* fig. 5).

### 1.3. Incidences du statut juridique des aqueducs

Les éditeurs d'un colloque qui portait sur l'eau dans les villes du Maghreb et leur territoire ont eu l'heureuse idée d'en débiter les actes par des contributions qui traitent de questions juridiques. Dans l'une d'elles, S. Crogiez Pétrequin rappelait opportunément que les écrits qui nous renseignent le mieux sur le fonctionnement des ouvrages hydrauliques ne sont pas les inscriptions, mais des dispositions réglementaires et administratives qui en régulent l'usage (Crogiez-Pétrequin, 2018). En effet, selon une distinction énoncée au II<sup>e</sup> s. par Gaius<sup>1</sup>, les aqueducs qui alimentent en eau les villes relèvent de la *res universitatis*, l'une des quatre catégories parmi les choses qui échappent à la propriété privée. Cette catégorie réunit « les choses d'un ensemble de personnes », soit pour les cas envisagés ici, les villes d'Arles et de Nîmes. Les trois autres sont les *res communes*, les *res publicae*, « choses de l'État » et les *res nullius*, les « choses qui ne sont à personne ». Comme l'air que l'on respire, l'eau courante, la mer et ses rivages relèvent des *res communes*, dont les juristes romains expliquent que, selon la loi naturelle, elles appartiennent à l'humanité. Les *flumina publica*, les rivières régulées, et les ports sont rangés parmi les *res publicae* ; ils relèvent du seul Peuple Romain. Les sources sont *res nullius* : elles n'ont pas de propriétaire, mais peuvent être appropriées.

Frontin (Fron., *De Aq.* 127.194, 5) développe la notion de *communes utilitates* à propos des aqueducs de Rome. Celle-ci s'est approprié les sources et a fait construire le canal d'amenée sur une bande de terrain acquise en application de l'*utilitas rei publicae* (*ibid.* 127.1). Mais cela n'interdit pas d'alimenter les établissements privés (Maganzani, 2004). Dans le cas d'un aqueduc urbain comme ceux d'Arles et de Nîmes, les autorités municipales ont pu utiliser les servitudes dites « prédiales » d'*iter aquae* et d'*aquae haustus* qui pèsent sur les propriétés privées (Capogrossi Colognesi, 1966, 52-106 ; Bannon, 2001 : 34 n. 2 ; Ronin 2017). Celles-ci et celles de sentier, de chemin, de voie (*iter, actus, uia*) figurent parmi les plus anciennes servitudes qu'ait connues le droit romain (Franciosi, 1967 :

---

<sup>1</sup> Gaius, *Inst.*, II, 1, *De rerum divisione...* *quaedam enim naturali iure communia sunt omnium, quaedam publica, quaedam universitatis, quaedam nullius.*



25-26). L'eau d'un aqueduc peut faire l'objet de concessions aux riverains. Mais ces dérivations sont payantes et doivent être enregistrées pour être légales. Frontin (*De Aq.*, 107) précise qu'elles sont branchées sur un réservoir (*castellum*) pour permettre aux *aquarii* de vérifier que la quantité prélevée n'excède pas celle qui est autorisée. Elles sont enregistrées dans des documents officiels indiquant le calibre et le nom du bénéficiaire. Ainsi la célèbre inscription *CIL*, V, 1261 représente une *forma* d'aqueduc où figure le nom du propriétaire du fonds bénéficiaire d'un branchement.

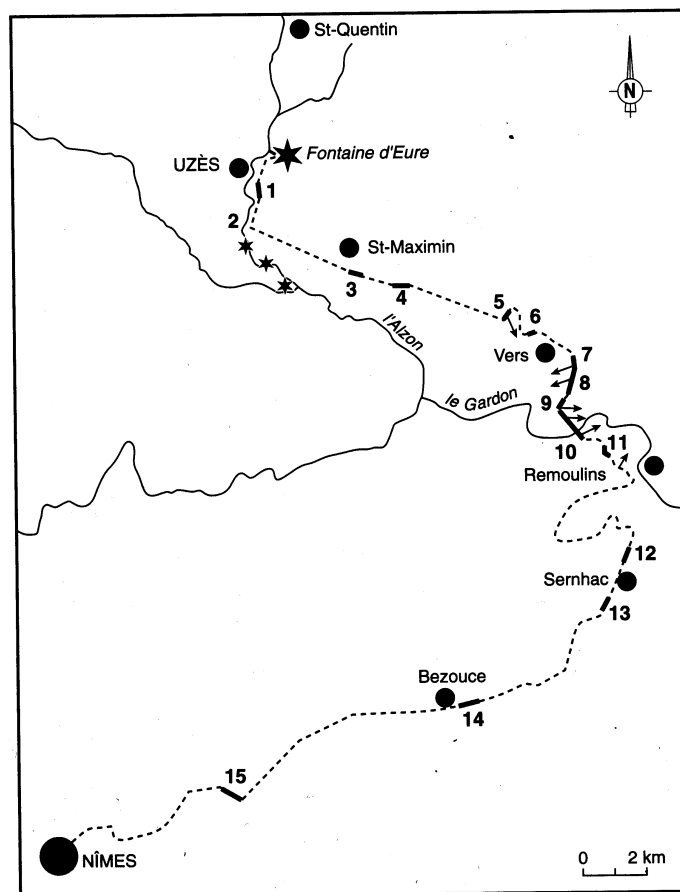
Le passage d'un aqueduc dans un domaine offrait en effet à son propriétaire la possibilité de pourvoir à l'alimentation en eau de la partie résidentielle de sa villa et à l'irrigation de ses terres. R. Thomas et A. Wilson qui ont consacré une section de leur étude sur les établissements ruraux du Latium et du sud de l'Étrurie à cette question, citent des exemples d'utilisation de l'eau publique pour alimenter des structures privées (Thomas & Wilson, 1994 : 146-150 ; Wilson 2008). Ainsi, Stace (*Silv.* 1.3, v. 66-69) célèbre la *Villa Tiburtina* de Manilius Vopiscus qui recevait de l'eau de l'*Aqua Marcia* transportée par des tuyaux de plomb dans l'Anio. La villa de Mura di Santo Stefano à Anguillara Sabazia qu'alimentait une dérivation de l'*Aqua Alsietina* (Thomas, 2012). La villa de Cicéron à *Tusculum* était l'une des propriétés alimentées par l'*Aqua Crabra* (Cicéron, *Ad Familiares* 16.18.3 ; *De Lege Agraria* 3.2.9). S. Crogiez Pétrequin cite un rescrit daté du 18 mai 330 qui figure dans la longue série des textes qui concernent l'alimentation en eau de Byzance (Crow et al., 2008 : 221-247). Ce rescrit qui émane de l'administration impériale au moment de la construction de la nouvelle capitale nous apprend qu'obligation est faite aux propriétaires des domaines traversés d'assurer la protection du canal de l'aqueduc. Cette obligation leur vaut d'être dédommagés par des exemptions de charges. Mais s'ils font défaut, leurs terres sont confisquées. Cette obligation s'inscrit dans une pratique générale de l'administration romaine, la même que celle en usage pour l'entretien des routes.

Dans cet exposé, j'accorderai une attention particulière à cette législation. Elle établit en effet une distinction entre l'aqueduc de Nîmes et la branche de l'aqueduc d'Arles. Durant toute la durée de son existence, le premier est resté un aqueduc public à l'entretien duquel la ville devait pourvoir. La seconde qui a été détournée pour alimenter les moulins est entrée dans le domaine privé. Son propriétaire était en droit de faire ce qu'il voulait de l'eau d'une source qu'il s'était appropriée et de gérer comme il l'entendait le canal qui en amenait l'eau à l'usine qu'il avait construite.

## 2. Dépôts carbonatés et fonctionnement de l'aqueduc de Nîmes

### 2.1. Géoarchéologie et chronologie des concrétions

Dans le chapitre qu'ils ont consacré à la présentation des concrétions de l'aqueduc de Nîmes dans leurs relations avec son fonctionnement hydraulique, J.-L. Guendon et J. Vaudour ont insisté sur la très grande irrégularité qu'elles présentent d'amont en aval. Ils opposent en particulier la partie amont, de la source au Pont-du-Gard, où l'on suit « le développement progressif des incrustations par épaissement des dépôts, puis envahissement de la voûte », à sa partie aval où « les concrétions bien que très volumineuses ne dépassent pas la partie cuvelée » du canal (Guendon & Vaudour, 2000 : 246) (**Figure 2**). L'envahissement de la voûte est particulièrement net à l'amont du Pont du Gard, sur un long tronçon, au clos des Touillers et à La Lône. Le canal est construit en élévation et les encroûtements revêtent l'intrados de la voûte dans sa totalité (Fabre et al., 2000c : 80 n° 50 et 51). L'observation de ses concrétionnements internes leur a permis de distinguer deux périodes. Dans la première durant laquelle la qualité de l'eau était optimale, l'alimentation en eau a connu des moments d'arrêt en nombre variable selon les secteurs. La seconde traduit une dégradation de la qualité de l'eau dont témoignent les traces qu'elles laissent dans les concrétions internes décrites plus haut et les accumulations de manchons et de tubulures trouvées en fouille au pied de l'aqueduc à hauteur de regards.



**Figure 2.** *Aqueduc de Nîmes : localisation des tronçons où des concrétions ont été étudiées (Guendon & Vaudour, 2000 : p. 234, fig. 122). 6. Vers ; 7. Touillers ; 8. La Lône ; 10. Pont du Gard ; 13. Sernhac aval ; 14. Bezouze. Les amas de tuf sont entre les points 7 et 8. Le secteur des concrétions régressives échantillonnées à Sernhac, Font-en-Gour et Gleyze est situé entre 13 et 14 (seuil et étang de Clausonne).*

Dans tous les cas, ni la chronologie de ces phases ni celle des moments qu'ils y distinguent ne sont fixées. Au pont de la Combe Joseph, « en raison des plans de clivage et de la morphologie on peut distinguer cinq dépôts successifs ». À Remoulins et Sernhac, ce sont « trois plans de séparation mécanique qui sont naturels et ne comportent pas de plan de grattage à leur surface » (Fiches et al., 2000 : 325). Les opérations d'entretien interfèrent avec les effets du fonctionnement naturel. Ainsi, trois dépôts ont été ultérieurement échantillonnés par des géochimistes pour en extraire le signal climatique entre Sernhac à l'amont et Font-en-Gour à l'aval. Ils constatent que, sur les 500 m de cette section, des grattages ont interrompu la croissance des dépôts entre les années 50 et 225, soit durant 175 ans de fonctionnement de l'aqueduc. À Gleyze, ils ont fait disparaître 40 années d'enregistrement. Il en résulte que « la durée de fonctionnement donnée par les concrétions échantillonnées est susceptible de sous-estimer la durée réelle » (Benjelloun et al., 2019). Ces observations géoarchéologiques confirment la nécessité d'une approche pluridisciplinaire. Les interventions anthropiques mises en évidence varient selon que les riverains ont rempli ou non les obligations que la législation imposait. Le témoignage de Frontin sur les aqueducs de Rome à son apogée était là pour nous rappeler qu'elles ont pu exister à tout moment quand le contrôle se relâche. Il en découle est que, si l'état final observé traduit bien l'abandon de l'aqueduc, des traces de végétation ne doivent pas être systématiquement attribuées à cette phase.

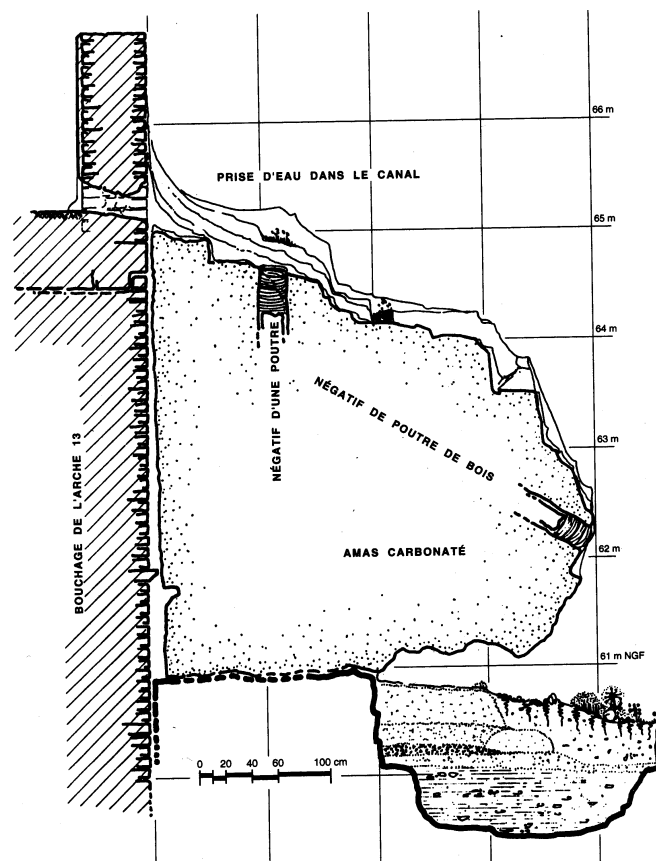
## 2.2. Prises d'eau

Des recherches ont été menées pour établir la relation entre l'aqueduc de Nîmes et l'habitat dans la vallée de l'Alzon à l'amont du Pont du Gard. C'est ainsi qu'à partir de 1987, M. Gazenbeek a mis

en évidence une forte densité de sites dont 48 ont été occupés à l'époque romaine (Benoit et al., 1994 : Gazenbeek, 2000 : 226-227 et fig. 2). Pour trois d'entre eux, la présence de thermes suggère que des sites interprétables comme des villas ont pu recevoir l'eau de l'aqueduc. Ce sont d'est en ouest : Castagnier sur la commune de Saint-Maximin (Provost et al., 1999, 645) (aqueduc point 18), Mas Darnès, le plus important d'entre eux à l'est d'Argilliers, 100 m au sud de l'aqueduc (*ibid.* : 160) et Valagrand sur la commune de Vers (*ibid.* : 728 et fig. 907). Le dossier a été repris et complété par L. Buffat (2011 : 242-246).

### 2.2.1. Les « gros amas » du plateau de Vers

Le seul témoignage d'une prise d'eau sur l'aqueduc est fourni par les sept gros « amas dissymétriques » qui jalonnent le parcours aérien de l'aqueduc entre Vers et le Pont du Gard, sur les arches de La Lône, au Pont Roupt et à celui de Valive. Ce sont des tufs, roches vacuolaires, poreuses et de faible densité, présentes à proximité des sources. Ils doivent leur caractéristique à l'exposition à la lumière qui favorise une activité biologique (développement de biofilms bactériens, de mousses et autres organismes) surtout pendant les périodes estivales. Ces amas sont présentés et décrits dans trois des chapitres de la monographie qu'ont dirigée G. Fabre, J.-L. Fiches et J.-L. Paillet (Fabre et al., 2000a : 80-82, 245, 327-329). Ils ne proviennent pas de débordements, mais se sont formés à la sortie d'orifices percés dans les parois du canal de l'aqueduc alors qu'il était en fonctionnement. Des traces de vannes dont certaines présentent la trace d'une fermeture ultérieure avaient été observées (Fabre et al., 2000c, p. 81). Dans les amas formés à l'aval par l'écoulement de l'eau, le négatif de planches et de poutrages offre la possibilité d'identifier l'ensemble du dispositif de prise d'eau (Fiches et al., 2000 : 337, fig. 186) (**Figure 3**).



**Figure 3.** Valive : coupe sur l'amas de l'arche 13 (relevé J.-L. Paillet, in Fiches et al., 2000b 337, fig. 186).

Considérant que celui-ci est incompatible avec un fonctionnement normal de l'aqueduc, on a supposé qu'ils « remontaient à une époque où la canalisation n'était plus entretenue pour la ville et

où elle pouvait être utilisée pour les besoins ruraux » (Benoit et al., 1994 : 151). Mais, c'est sans certitude, car l'existence de vannes s'accorde avec l'observation de la procédure légale de prise d'eau sur un aqueduc urbain. Par ailleurs, allant dans le même sens, à La Lône, une fouille a montré les traces d'une canalisation en bois de dimensions équivalentes à celles de l'aqueduc qui se prolongeait vers l'amont sur quelques mètres en oblique par rapport à l'édifice. Elle reposait sur les déblais provenant du percement de la paroi de l'aqueduc et sur des débris de manchons calcitiques. À l'extrémité de cette structure, une accumulation de dépôts calcitiques suggère la présence d'un petit bassin de réception (Guendon & Vaudour, 2000 : 245).

### 2.2.2. Prises d'eau et concrétions régressives à Clausonne

À l'aval du Pont-du-Gard, les géoarchéologues ont supposé un rapport entre un type de concrétion et des prises d'eau qu'expliquerait le développement des activités agricoles sur le territoire de la cité de Nîmes. Ces concrétions sont du type que J.-L. Guendon et J. Vaudour qualifient de « régressives » parce qu'au lieu d'être ascendant, l'encroûtement des parois du canal adopte une géométrie opposée, ce qui s'explique par une baisse du débit de l'aqueduc. Celle-ci peut avoir trois origines : des fuites d'eau dues à la dégradation du canal, des prélèvements pour les besoins d'un établissement quelconque, comme une villa ou des moulins ou pour l'irrigation, l'accélération de l'écoulement de l'eau consécutive au grattage de concrétions qui la ralentissaient à l'aval.

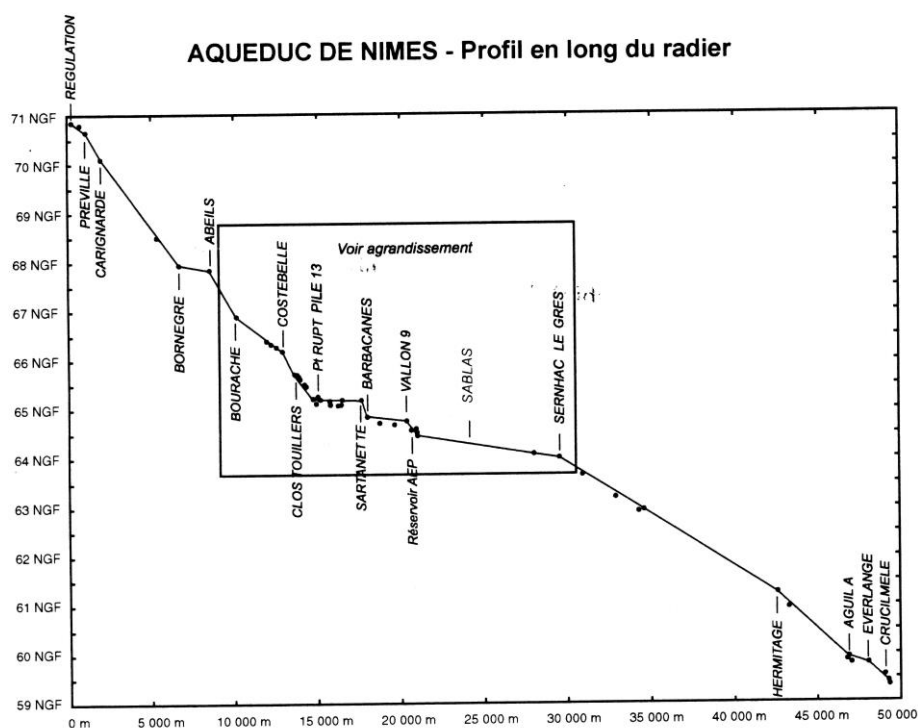
Cette disposition est décrite en haute Vistrenque sur un secteur de 500 m à l'aval de Sernhac où la géométrie des encroûtements traduit une régression des lamines de croissance correspondant à une diminution de 50 % du débit entre le Mas de Gleyze et de Pansac (fig. 2, entre les points n° 13 et 14). Deux explications ont été proposées. Dans la première, la baisse du débit s'expliquerait par des fuites dues à des déformations d'origine sismique qui auraient affecté le canal dans le secteur où il recoupe la faille de Nîmes (Carbon et al., 2005). De leur côté, les géochimistes qui ont échantillonné des séquences en trois endroits à Sernhac, Font-en-Gour et Gleyze pour en extraire le signal climatique suggèreraient une relation entre la configuration irrégulière des dépôts où des "sauts" séparent des périodes et des phases d'expansion dans l'utilisation agricole des terres. En effet, observent-ils dans le cas du site de Gleyze, l'abaissement du niveau de l'eau en aval de Fond-en-Gour s'amorcerait au milieu du II<sup>e</sup> s. quand Nîmes affirme son emprise sur ses campagnes (Benjelloun et al., 2019 : 7).

Cette hypothèse est justifiée par un contexte bien mis en évidence par les opérations archéologiques que G. Fabre et J.-L. Fiches ont conduites dans le secteur de la traversée de la dépression de Clausonne qu'un étang occupait avant la construction de l'aqueduc (Fabre et al, 1997 : 193-219 ; 2011). Celui-ci est doublé par un canal qui a servi à son drainage, une opération qui a permis de gagner une superficie cultivable évaluée à 1 km<sup>2</sup>. Elle aurait été réalisée par un grand propriétaire nîmois qui aurait financièrement participé à la construction de l'aqueduc et aurait reçu en échange le terrain libéré selon une procédure explicitement attestée dans le cas du drainage du lac Fucin sous Claude (Leveau, 1993). Plusieurs villas et des sites annexes ont été reconnus en prospection dans ce secteur, sur la commune de Sernhac à Cadenet-et-Perrières (Provost et al., 1999 : 682-683 ; Buffat 2011 : 110) et surtout, sur celle de Meynes. Le mas de Clausonne occupe l'emplacement d'une très riche villa d'où provient entre autres la stèle funéraire à rinceau d'une aristocrate nîmoise (Provost et al., 1999 : 450-451). Ce contexte domanial justifie l'hypothèse de prélèvement d'eau sur l'aqueduc. Mais cela reste une simple présomption et il est pour l'heure impossible de trancher entre les différentes hypothèses proposées.



### 2.3. Régulation dynamique

Il reste à examiner une troisième hypothèse de gestion de l'eau qu'il convient de confronter au témoignage des concrétions : celle d'une « régulation dynamique » suggérée par des hydrauliciens selon lesquels pendant la période d'étiage des sources, l'écoulement de l'eau aurait été interrompu durant la nuit pour constituer une réserve. Les concepteurs romains de l'aqueduc auraient anticipé un principe de fonctionnement qui fut appliqué dans les canaux des grandes adductions de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> s. Dans le secteur situé immédiatement à l'amont de Sernhac, ils identifiaient « au moins cinq biefs à fond légèrement en pente, mais à chanfreins horizontaux, séparés par des seuils de hauteurs décimétriques », auxquels ils ajoutaient l'existence probable de deux autres, l'un au sud-ouest de l'ancien étang de Clausonne, et l'autre avant l'entrée du tunnel de la Croix-de-fer à Nîmes ». Selon eux, « l'existence de biefs à berges horizontales limitées par de petits ouvrages hydrauliques (seuils et vannes) permettait aux techniciens antiques une modulation éventuelle des débits entre le jour et la nuit pour limiter les conséquences d'un déficit d'alimentation (étiage). Celle-ci autorisait les interventions sur l'aqueduc sans avoir à le vidanger en totalité. Ils isolaient seulement le bief concerné et réduisaient ainsi considérablement la durée des coupures d'eau pour travaux » (Bossy et al., 2000) (**Figure 4**).



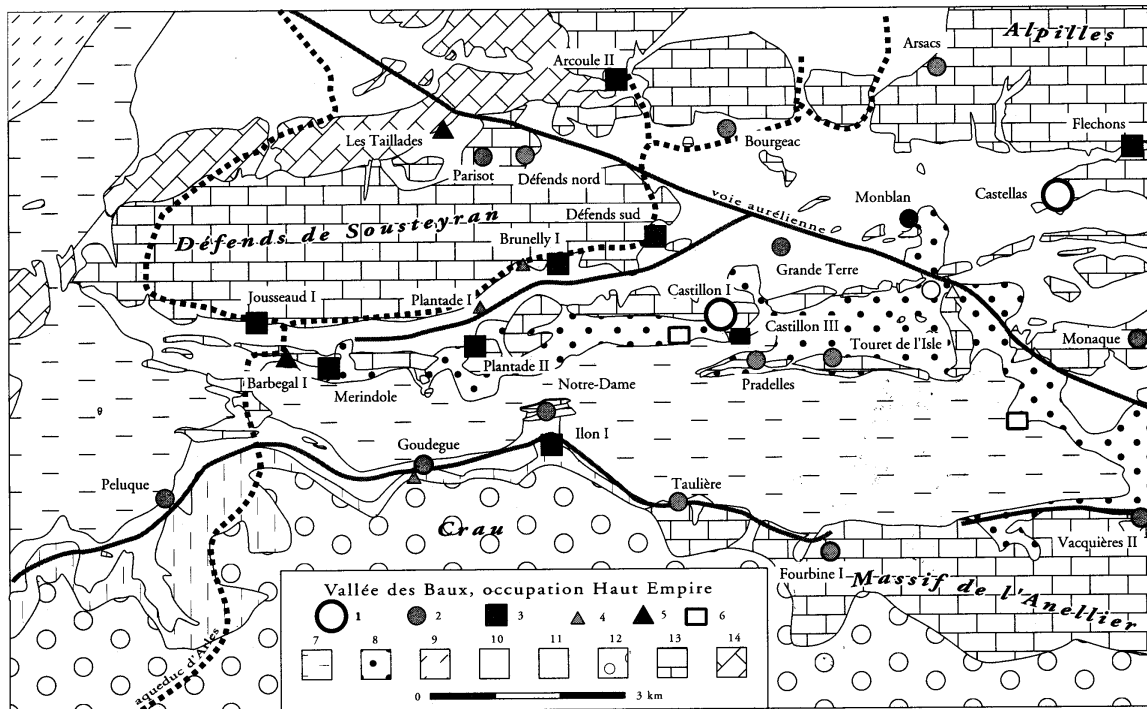
**Figure 4.** Profil en long de l'aqueduc de Nîmes (d'après Bossy et al., 2000 : fig. 2, p. 714). La partie encadrée correspond au secteur situé à l'aval du Pont-du-Gard et des combes de Remoulins où l'aqueduc quitte le bassin de l'Alzon. Des tunnels y assurent le franchissement d'interfluvies.

Cette proposition a été retenue par C. Larnac (2010). Un dispositif analogue a été proposé par H. Chanson selon lequel les fontainiers pratiquaient la régulation dynamique des débits. Il a calculé que, dans le cas de Metz, la fermeture des vannes sur les différents biefs permettait de constituer un réservoir de 20 000 m<sup>3</sup> à Metz sur l'aqueduc de Gorze et de 55 000 m<sup>3</sup> sur celui de Nîmes. Entre ces deux situations anormales, l'ouvrage fonctionnait en écoulement libre (Chanson, 2002). Malgré l'intérêt qu'elle présente, l'hypothèse du caractère intentionnel des différents paliers et de seuils pourvus de vannes se heurte à un certain nombre d'objections qui conduisent à l'écarter. La première est une objection de principe. La démarche comparative consistant à rechercher des

parallèles modernes est légitime à condition de tenir compte de la rupture qu'introduisent au XIX<sup>e</sup> s. les innovations, ici dans le nivellement des aqueducs (Graber 2006). La seconde est l'absence de concrétions que l'eau aurait laissé sur l'intrados de la voûte, comme c'est le cas sur l'aqueduc de Barbegal (cf infra fig. 8).

### 3. L'aqueduc d'Arles

Ce qui constitue l'intérêt principal de la branche orientale de l'aqueduc d'Arles pour la question qui nous occupe, c'est le rôle que l'étude des concrétions a joué dans une réinterprétation récente des moulins de Barbegal (Leveau et al., 2019 : 98-99). Ce complexe était alimenté par la dérivation d'une des deux branches de l'aqueduc augustéen qui alimentait la colonie après qu'au début du II<sup>e</sup> s., elle ait perdu le statut public qu'elle avait à l'origine (Figure 5).

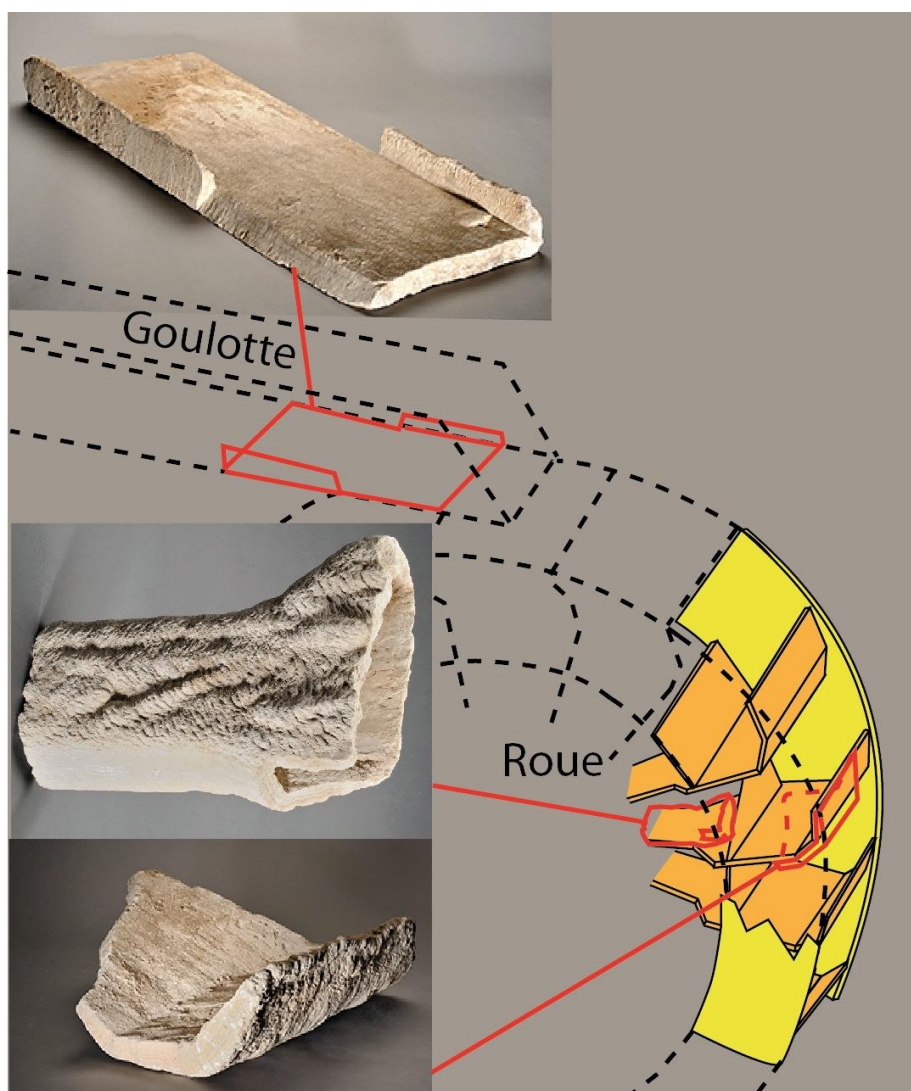


**Figure 5.** L'occupation du sol dans la vallée des Baux et le long de l'aqueduc sud des Alpilles durant le Haut Empire (Gazenbeek, 2000 : 90, fig. 4). Légende de la figure relative à l'habitat : 1 : oppidum ; 2 : habitat ; 3 : villa ; 4 : nécropole ; 5 : structure indéterminée ; 6 : structure visible sur photo aérienne. Un premier bassin assure la convergence des différentes sources de l'aqueduc à la Burlande et un second bassin celle des deux branches de l'aqueduc d'Arles à l'amont du vallon des Arcs avant la construction des moulins.

#### 3.1. Les concrétions, témoins du fonctionnement des moulins de Barbegal

Le musée d'Arles conservait dans ses réserves les fragments de concrétions qui provenaient des fouilles dirigées par F. Benoit à la fin des années 1930 sur ces moulins. C'étaient « de longues plaques d'empreintes calcaires avec retour à angle droit formées à l'intérieur d'une canalisation de bois » dont l'examen lui avait permis de restituer les caractéristiques générales et le fonctionnement d'un système de roues à augets. (Benoit 1940 : 49). C. Passchier du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Mayence a répondu à l'appel à collaboration que j'avais lancé pour en reprendre l'interprétation. Il en a pris en charge l'étude avec G. Sürmelihiindi et C. Spötl de l'Institut de Géologie d'Innsbruck. Ces fragments dont le nombre a été porté à 142 se distinguaient par une

absence de porosité, une densité inhabituelle et la taille des cristaux de leur tissu. Ces chercheurs leur ont appliqué les protocoles qu'ils avaient utilisés dans l'étude des dépôts des aqueducs d'Éphèse et de Patara en Turquie (Sürmelihiindi & Passchier, 2013), maintenant étendue à d'autres aqueducs de Gaule, dont celui de Cahors (Passchier et al., 2015). Leurs travaux ont donné lieu à deux publications qui apportent des nouveautés dans la connaissance du mécanisme et sur les périodes de fonctionnement de l'usine (Sürmelihiindi et al., 2019). Ils établissent que les pièces de bois du mécanisme faisaient l'objet de réparations à un intervalle inférieur à dix ans. L'analyse des isotopes stables de l'oxygène  $\delta^{18}\text{O}$  et du carbone  $\delta^{13}\text{C}$  des lamines montre que l'exploitation de l'usine a été régulièrement interrompue pendant plusieurs mois, principalement à la fin de l'été et en automne et qu'elle a repris en hiver. Cette observation a permis d'insérer l'usine dans les circuits économiques régionaux en formulant l'hypothèse que leur construction par le propriétaire de la villa voisine avait répondu à la demande en farine des agglomérations portuaires voisines. L'irrégularité de la demande et l'importance des quantités nécessaires à l'approvisionnement des navires en vivres de bord exigeaient la confection de stocks (Sürmelihiindi et al., 2019 ; Leveau et al., 2020) (**Figure 6**).



**Figure 6.** Restitution de la roue à partir des dépôts carbonatés du Musée d'Arles (Conception et DAO Cees Passchier).

### 3.2. L'architecture du bâtiment

Mais ce n'est pas le seul apport de l'étude des dépôts carbonatés. Des observations portant sur les concrétions déposées sur les parois des biefs où tournaient les roues des moulins ont également



montré une évolution significative dans l'architecture du bâtiment. Denses et cristallines à la base, les lamines sont surmontées d'une couche de carbonate blanc poreux présentant des empreintes de plantes. Une telle modification dans la nature du carbonate s'explique par une augmentation de la luminosité qui favorise le processus biologique à l'origine de la porosité des dépôts les plus récents. Ils en ont déduit qu'une structure, peut-être un toit ou un auvent, protégeait à l'origine les roues et les biefs d'une exposition directe au soleil et que par la suite celle-ci ait été enlevée ou détruite (**Figure 7**). L'hypothèse d'un bâtiment fermé s'en trouve à la fois confortée et nuancée. L'absence de protection des biefs occupés par les roues peut correspondre à l'utilisation de l'installation à une époque tardive, entrevue mais très mal documentée (Leveau 2011 : 128).



**Figure 7.** L'aqueduc au Vallon des Arcs et les moulins de Barbegal (© Antoine Chenet, CCJ).

### 3.3. L'aqueduc, réservoir pour le fonctionnement des moulins

Le système d'alimentation de l'usine constitue un troisième apport des observations faites sur les carbonates. En 1990, dans le prolongement de ceux qu'il avait conduits avec J. Vaudour et G. Fabre sur l'aqueduc de Nîmes, J.-L. Guendon avait montré l'apport de la géoarchéologie des carbonates à la compréhension du fonctionnement du bassin qui assurait à l'origine la convergence des deux branches de l'aqueduc à l'amont de sa traversée de la vallée des Baux (Guendon 2005). Des concrétions correspondant à la période où ce bassin fonctionnait en convergence étaient conservées dans la partie de la branche orientale abandonnée à la suite de sa dérivation vers les moulins (Leveau, 2011). Cet ensemble se composait de trois couches de lamines « correspondant à un écoulement soutenu », dont la dernière était transgressive (Guendon, 2005 : 90). Sa composition était analogue à celle du premier ensemble observé 4,5 km à l'amont sur le tronçon de 300 m mis au jour par M. Gazenbeek en 1987 lors de la construction d'un lotissement sur la commune du Paradou à l'aval de la Burlande (Gateau & Gazenbeek 1999 : 238-239). Sur ce site, là où le canal est préservé dans son intégralité, sa partie interne est recouverte d'une épaisse couche de carbonate allant jusqu'à l'intrados de la voûte (**Figure 8**). Les premières concrétions contrastaient par leur densité avec l'extrême porosité et l'absence de stratification des dépôts ultérieurs observés.



**Figure 8.** *Le conduit à Paradou (Photo M. Gazenbeek).*

Pour J.-L. Guendon, cette branche avait été affectée aux moulins à cause d'une dégradation de la qualité des eaux qui la rendait impropre à la consommation urbaine. Cette hypothèse s'accorde mal avec le résultat de l'analyse des carbonates déposés à l'aval de la dérivation vers les moulins. Leur tissu est dense et sparitique et son analyse n'y révèle la présence de presque aucun résidu de bactéries ni de croissance de plantes. L'eau des sources qui alimentaient l'aqueduc est encore utilisée localement. Sa qualité est satisfaisante et son analyse n'indique pas de composition particulière. Il est probable que cette branche a été abandonnée parce que le réservoir karstique qui en alimentait la source était de faible dimension et trop affectée par l'irrégularité qui caractérise le climat méditerranéen. Lorsque les Arlésiens en ont prolongé la branche occidentale au nord des Alpilles dans la vallée de la Durance, ils l'ont cédée à un privé qui l'a utilisée pour faire tourner des moulins. En effet, contrairement à ce que pensaient F. Benoit et encore O. Wikander (2000 : 379), l'aqueduc n'a pas été construit pour les moulins. La quantité d'eau qu'il délivrait était insuffisante pour actionner leurs 16 roues en écoulement libre, comme c'est le cas lorsqu'elle est dérivée d'une rivière.

Dans ces conditions, j'ai été amené à formuler deux hypothèses. La première est qu'à l'amont du Vallon des Arcs, entre le Paradou et le Vallon des Arcs, le canal a été équipé sur 4,5 km d'un dispositif lui permettant de servir de réservoir pour le fonctionnement des moulins. Cela explique l'importance et la nature des concrétions dans ce canal. Un calcul sommaire montre que, pour un débit de 250 à 300 l/s, une heure de fonctionnement des moulins correspond à une consommation de 900 à 1 080 m<sup>3</sup>. En l'absence d'un apport suffisant des sources, l'écoulement de l'eau stockée dans le canal aurait assuré de 5 à 6 h de fonctionnement. La seconde porte sur l'utilisation de l'eau pendant la période d'étiage des sources. Confronté à la pénurie, le propriétaire du domaine auquel



les moulins appartenant pouvait utiliser l'eau préférentiellement pour l'irrigation pendant la saison estivale. C'est ce que suggère la distinction que faisaient les juristes romains entre l'*aqua quotidiana*, celle que les aqueducs délivrent à une ville, et l'*aqua aestiva* dont l'irrigation est l'usage principal (Capogrossi Colognesi, 1966 : 134-141). Dans ce contexte, l'utilisation saisonnière de l'eau pour des moulins témoigne d'une probable adaptation aux conditions climatiques locales.

## Conclusion

En 2005, J.-L. Guendon proposait de dater la construction de l'aqueduc d'Arles à partir d'une séquence conservée dans un tronçon hors d'usage de cet aqueduc : il en évaluait à 50 à 75 ans le temps de formation en utilisant la vitesse moyenne de concrétionnement de 2 mm par an estimée sur l'aqueduc de Fréjus. La construction des moulins étant datée des années 120 par une monnaie, celle de l'aqueduc devait être déplacée de l'époque augustéenne au milieu du I<sup>er</sup> s. (Guendon, 2005 : 93 et 96). Mais depuis, le débat a été relancé par J.-L. Paillet qui a montré que le pont routier construit à Burlande pour enjamber l'aqueduc était daté de 3 av. J.-C., ce qui confirme la datation augustéenne de l'aqueduc d'Arles (Paillet, 2011 ; Leveau, 2018 : 118-123). Ma conclusion reprend donc sur la thématique de la pluridisciplinarité évoquée en introduction en confrontant les données évite de répéter pour un ouvrage romain les dérives auxquelles donna lieu l'utilisation de la micromorphologie des sols dans les années 1990 quand M. A. Courty qui en fut une pionnière affirma avoir identifié par cette technique les origines d'une crise climatique survenue en Mésopotamie qui serait à l'origine de l'écroulement de l'Empire d'Akkad à la fin du III<sup>e</sup> millénaire avant J.-C. Dans le débat qui l'opposa à S. Cleuziou, elle prétendait défendre « la science » contre ce qu'elle appelait « la droite épigraphique et la gauche archéologique » (Cleuziou 1994 ; Weiss & Courty 1994). À cette vision conflictuelle des rapports entre disciplines, on préférera la convergence des disciplines dans une pluridisciplinarité entendue comme l'approche multifactorielle d'un site archéologique, ici les moulins dont la raison d'être est l'utilisation industrielle de l'eau (Leveau, 2019). Telle est la leçon que je tire de l'historique de la question.

## Références bibliographiques

- Bannon, C.J., 2001. Servitudes for Water Use in the Roman Suburbium. *Historia*, 50 (1), 34-52.
- Benjelloun, Y., Carlut, J., Hélie, J.-F., Chazot G., Le Callonnec, L., 2019. Geochemical study of carbonate concretions from the aqueduct of Nîmes (southern France): a climatic record for the first centuries AD?. *Scientific Reports*, en ligne.
- Benoit, F., 1940, L'usine de meunerie hydraulique de Barbegal (Arles). *Revue Archéologique*. 19-80.
- Benoit, J., Fiches, J.-L., Gazenbeek, M., 1994. Recherches le long de l'aqueduc de Nîmes dans la basse vallée de l'Alzon (Gard), in : Favory, F., Fiches, J.-L., *Les campagnes de la France méditerranéennes dans l'Antiquité et le haut Moyen Âge. Études microrégionales*. Maison des Sciences de l'Homme, Paris.
- Bossy, Y., Fabre, G., Glard, Y., Joseph, C., 2000. Sur le fonctionnement d'un ouvrage de grande hydraulique antique, l'aqueduc de Nîmes et le pont du Gard (Languedoc, France). *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2. Sciences de la terre et des planètes*, 330, 11, 769-775.
- Buffat, L., 2011. *L'économie domaniale en Gaule Narbonnaise*. Lattes.
- Capogrossi Colognesi, L., 1966. *Ricerche sulla struttura delle servitù d'acqua in diritto romano*. Giufré, Milano.
- Carbon, D., Fabre, G., Volant, Ph., Fiches, J.-L., Levret, A., Combes, Ph., 2005. L'aqueduc de Nîmes dans la haute Vistrenque : analyse interdisciplinaire d'un tronçon souterrain. *Gallia*, 62. 69-86.
- Chanson, H., 2002. Certains aspects de la conception hydraulique des aqueducs romains. *La houille blanche*, 6, 1-16.
- Cleuziou, S., 1994. La chute de l'Empire d'Akkadé : hommes et milieux au Moyen-Orient. *Les Nouvelles de l'Archéologie*, 56, 45-47.

- Crogiez-Pétréquin, S., 2018. L'eau et la loi dans l'empire romain à travers les sources juridiques et épigraphiques, in : Brouquier-Reddé, V. et Hurllet, F. (Éd), *L'eau dans les villes du Maghreb et leur territoire à l'époque romaine*, Ausonius, Bordeaux, 53-61.
- Crow, J., Bardill, J., Bayliss, R. 2008. *The water supply of Byzantine Constantinople*. London,
- Dessales, H., 2011. Entretien et restauration des aqueducs à Rome, au regard du traité de Frontin, in : Abadie-Reynal, C., Provost, S., Vipard, P. (Éds), *Histoire des réseaux d'eau courante dans l'Antiquité : réparations, modifications, réutilisations, abandon, récupération*. Presses Universitaires, Rennes, 2011, 13-21.
- Fabre G., Fiches J.-L., Paillet J.-L., 2000a. *L'aqueduc de Nîmes et le Pont du Gard*. Archéologie, Géosystème, Histoire. CNRS édition, Paris.
- Fabre G., Martin R., Sintès-Aioutz M., 2000b. Atlas et levé topographique, in : Fabre et al., 2000a, 43-55.
- Fabre G., Fiches J.-L., Paillet J.-L., Pey J., 2000c. Le tracé de l'aqueduc dans son environnement, in : Fabre et al., 2000a, 57-120.
- Fiches J.-L., Gazenbeek M., Paillet J.-L., 2000. Prospections et fouilles : archéologie d'un aqueduc, in : Fabre et al., 2000a, 315-376.
- Fabre, G., Fiches, J.-L., Marchand G., Mathieu, V., Pey, J., 2011. Entre Gardon et Vistre, Clausonne, l'étang, ses drainages et l'aqueduc antique de Nîmes, in : *Temps de l'eau, sites et monuments entre Vidourle et Rhône*. Bulletin de l'École antique de Nîmes, 29, 147-204.
- Fabre G., Fiches, J.-L. Fiches, Paillet, J.-L., 1997. L'aqueduc antique de Nîmes et le drainage de l'étang de Clausonne : hypothèses sur le financement de l'ouvrage et l'identité de son concepteur, in : Bedon, E. (Éd.). *Les aqueducs de la Gaule romaine et des régions voisines*. Presses Universitaires, Limoges, 193-219.
- Franciosi, G., 1967. *Studi sulle servitù prediali*. Naples, E. Jovene, 25-26
- Gateau, F., Gazenbeek, M., 1999. *Les Alpilles*. 13/2, Carte Archéologique de la Gaule. Maison des Sciences de l'Homme, Paris.
- Gazenbeek, M., 2000a. Interaction entre aqueduc et habitat rural : deux cas d'étude en France méditerranéenne : Nîmes et Arles, in : Jansen, G. C. M. (Ed.). *Cura aquarum in Sicilia. Proceedings of the Tenth International congress on the history of water management and hydraulic engineering in the Mediterranean Region, Syracuse, May 16-22*. Peeters, Louvain, 226-227.
- Gazenbeek, M., 2000b. L'habitat rural autour du Marais des Baux : évolution de l'âge du Fer à la fin de l'Antiquité, in : Leveau, Ph. et Saquet, J.-P., *Milieu et sociétés dans la vallée des Baux*. Édition de la Revue Archéologique de Narbonnaise, Montpellier, 85-96.
- Graber, F., 2006. Le nivellement, une mesure pour l'action autour de 1800. *Histoire & mesure*, XXI, 29-54.
- Guendon, J.-L., Leveau, Ph. (coll.), 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.
- Guendon, J.-L., Vaudour, J., 2000. Concrétions et fonctionnement de l'aqueduc : étude morpho-stratigraphique, in : Fabre et al., 2000a, 233-248.
- Larnac C., 2010. *Racontez-moi le Pont-du-Gard*. Essai de réponse à des questions relatives à l'aqueduc de Nîmes et au Pont-du-Gard. Actes Sud, Arles.
- Leveau Ph., 1993. Mentalité économique et grands travaux. Le drainage du lac Fucin, *Annales ESC*, 9-16.
- Leveau Ph., 1995. Les moulins romains de Barbegal, les ponts-aqueducs du vallon des Arcs et l'histoire naturelle de la Vallée des Baux (Bilan de six ans de fouilles programmées). *Comptes rendus des séances de l'Académie des Inscriptions et Belles-lettres*, 139, 115-144.
- Leveau, Ph., 2011. Les eaux des Alpilles, la colonie romaine d'Arles et les moulins de Barbegal : un système hydraulique et ses paradigmes interprétatifs, in : Abadie Reynal, C., Provost, S., Vipard, P. (Éds). *Les réseaux d'eau courante dans l'Antiquité. Réparation, modifications, réutilisation abandon, récupération*, Presses universitaires de Rennes, Rennes, 115-131.
- Leveau, Ph., 2012. L'aqueduc d'Arles dans le territoire de la cité : topographie et hydrologie. *Agri Centuriati*, 9, 77-100.

- Leveau, Ph., Passchier, C.W., Sürmelihindi, G., 2019. Les moulins de Barbegal, 80 ans après les fouilles de F. Benoit. L'apport de la géoarchéologie des carbonates, in : Djaoui, D., Heijmans, M. (Éds). *Arelate Intra et extra muros. Archéologie et histoire en territoire arlésien*, Éditions Mergoïl, Autun, 95-124.
- Maganzani, L., 2004. L'approvvigionamento idrico degli edifici urbani nei testi della giurisprudenza classica: contributi giuridici alle ricerche sugli acquedotti di Roma antica, in : Antico Gallina M., *Acque per l'utilitas, per la salubritas, per l'amoenitas*. ET Edizioni, Milan, 185-220.
- Passchier C., Rigal D., Sürmelihindi G., 2015. Preuves du nettoyage des concrétions calcaires de l'aqueduc antique de Divonna-Cahors, in : Borau, L. et Borlenghi, A. (Éds), *Aquae ductus*, CNRS, Paris, 233-242.
- Paillet, J.-L., 2011. Paradou (Le), Bouche du Rhône, pont de La Burlande, in : Barruol, G., Fiches, J.-L., Garmy, P. (Éds), *Les ponts routiers en Gaule Romaine*. Éditions de l'Association de la Revue archéologique de Narbonnaise, Montpellier-Lattes, 159-16.
- Provost, M. et al., 1999. *Le Gard*. 30/3. Maison des Sciences de l'Homme, Paris.
- Ronin, M., 2017. Réglementer l'accès à l'eau dans l'empire romain, in : Mergey, A., Mynard, F., (Éds). *La police de l'eau. Réglementer les usages des eaux : un défi permanent*, Johanet, Paris, 31-45.
- Sürmelihindi, G., Passchier, C. W., 2013. Sinter Analysis - A Tool for the Study of Ancient Aqueducts, in: G. Wiplinger (Ed), *Historische Wasserleitungen Gestern - Heute - Morgen*. BABESCH Supplement 24/Sonderschriften 49, 269-287.
- Sürmelihindi, G., Passchier, C. W., Baykan, O. N., Spötl, C., Kessener (P.), 2013. Environmental and depositional controls on laminated freshwater carbonates: An example from the Roman aqueduct of Patara, Turkey, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 386, 321-335
- Sürmelihindi G., Passchier, C. W., Spötl, C., Kessener, P., Bestmann, M., Jacob, D. E., Baykan, O. N., Laminated carbonate deposits in Roman aqueducts: Origin, processes and implications. *Sedimentology* 60, 2013, 961-982.
- Sürmelihindi, G., Leveau, Ph., Spötl, C. Vincent, B., 2018 ; The second century CE Roman watermills of Barbegal: Unraveling the enigma of one of the oldest industrial complexes, *Science Advances* (eaar 3620), 5 September 4.
- Sürmelihindi, G., Passchier, C. W., Leveau, Ph., Spötl, C., Bourgeois, M., Bernard, V., 2019. Barbegal: carbonate imprints give a voice to the first industrial complex of Europe, *Journal of Archaeological Science: Reports*.
- Thomas, E., 2012. Water and the display of power in Augustan Rome: the so-called 'Villa Claudia' at Anguillara Sabazia, *Water History*, 4, 57-78.
- Thomas R.G., Wilson A., 1994. Water supply for Roman farms in Latium and South Etruria, *Papers of the British School at Rome*, 62, 139-196.
- Vaudour J., 2000. La notion de géosystème appliquée à l'étude des aqueducs antiques concrétionnés, in : Fabre et al., 2000a, 143-156.
- Viollet, P.L., Benhamadouche, S. Benoit, M., Chabard J.-P., Violeau, D. 2010. *Problèmes résolus de mécanique des fluides*, Presses des Ponts, Paris.
- Weiss, H., Courty, M.-A., 1994. Entre droite épigraphique et gauche archéologique, y a-t-il une place pour la Science ?. *Les Nouvelles de l'Archéologie* 57, 33-40.
- Wikander, O., 2000. The Water-Mill, in Wikander O., *Handbook of Ancient Water Technology, Technology and Change in History*, Brill Academic Publishers, Leiden, 371-400.
- Wilson A.I., 1999. Deliveries aqueducts and extra urbem: the countryside. *Journal of Roman Archaeology*, 12, 326.
- Wilson, A. I., 2008. Villas, horticulture and irrigation in infrastructure in the Tiber Valley, in : Coarelli, F., Patterson, H. (Eds), *Mercator placidissimus : the Tiber valley in Antiquity : new research in the upper and middle river valley : Rome, 27-28 february 2004*, Quasar, Rome, 731-768.