



HAL
open science

Réflexions autour de la construction des puits de rupture de pente des aqueducs : mise en perspective des résultats obtenus à Autun (Augustodunum)

Laetitia Borau

► To cite this version:

Laetitia Borau. Réflexions autour de la construction des puits de rupture de pente des aqueducs : mise en perspective des résultats obtenus à Autun (Augustodunum). Aquitania - Supplément, 2015, Aquitania, Suppl. 33, pp.49-68. hal-01769539

HAL Id: hal-01769539

<https://hal.science/hal-01769539>

Submitted on 4 Mar 2021

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

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

Réflexions autour de la construction des puits de rupture de pente des aqueducs : mise en perspective des résultats obtenus à Autun (*Augustodunum*)

Laetitia Borau

INTRODUCTION

La question du nivellement des aqueducs et de l'organisation du chantier est au cœur de toute étude consacrée à ces ouvrages hydrauliques. En 2008, J.-L. Fiches¹ relevait "l'existence d'équipes affectées à des sections précises et travaillant en coordination selon un schéma déterminé" mises en évidence sur l'aqueduc de Carthage. C'est d'ailleurs l'opinion de P. Leveau² qui souligne l'importance des relevés topographiques pour la compréhension globale du chantier de construction d'un aqueduc et en particulier les changements de pente du canal qui traduisent l'existence d'équipes assignées à l'élaboration de tronçons spécifiques.

Ce type d'interrogation a justement fait l'objet d'un examen attentif dans le cadre de recherches archéologiques menées sur l'aqueduc de Montjeu à Autun de 2003 à 2010. Ce conduit alimentait la capitale de la *Civitas Aeduorum* (actuelle Bourgogne), *Augustodunum*, création ex-nihilo fondée à la fin du 1^{er} s. a.C.³. À *Augustodunum*, le problème n'était pas la proximité des sources abondantes, mais plutôt leur altitude et leur situation dans les massifs montagneux méridionaux et par conséquent les pentes abruptes qui les séparaient de la ville. Pour remédier à ce problème, les ingénieurs romains ont opté pour une solution originale, en construisant une cascade de puits de rupture de pente, seule réponse possible à un tel problème. De ces récentes investigations procède une analyse plus générale de la conception de ces dispositifs de ralentissement si singuliers et encore mal connus. Ce sont les résultats les plus récents (2009-2010) de cette enquête archéologique qui sont exposés ici.

APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

L'aqueduc de Montjeu présente un état de conservation remarquable dans son parcours extra-muros. Un premier examen des vestiges est effectué au XIX^e s. par des architectes et ingénieurs de la Société éduenne qui ont livré plusieurs plans et relevés des vestiges de très bonne qualité. Cette riche documentation a été mise à profit lors de la reprise des recherches à partir de 2003⁴. Elles ont permis de reconnaître le tracé de l'aqueduc afin de le localiser sur une carte IGN, de documenter les sections visibles, mais aussi de restituer le projet d'ensemble. Les campagnes de prospections pédestres répétées sur une période longue et à différentes saisons de l'année, ont été complétées par la réalisation de sondages archéologiques sur deux secteurs distincts : un tronçon de canal

-
- 1- Fiches 2008, 83-84.
 - 2- Leveau 2008, 136.
 - 3- Borau 2010.
 - 4- Borau 2003, 192.

(2006) et un puits de rupture de pente (2005). Toutefois, ces travaux ont rencontré deux problèmes majeurs : un terrain accidenté (forte déclivité, zones marécageuses) et une végétation très dense (forêts broussailleuses, arbres abattus). En l'absence de bornes topographiques géo-référencées dans ces secteurs boisés, la localisation des vestiges s'est effectuée à partir d'un GPS (fiabilité de 5 à 9 m) et de mesures prises manuellement sur le terrain. En dépit de toutes ces contraintes, les résultats sont importants et l'analyse globale de la conception du projet d'ensemble apporte un nouvel éclairage sur le nivellement et la construction de cet aqueduc.

GÉOGRAPHIE PHYSIQUE

La topographie a joué un rôle prépondérant pour la construction de cet ouvrage hydraulique (fig. 1). Les massifs montagneux qui délimitent la ville au sud culminent à 640 m d'altitude. Ces plateaux se composent de grès en contact avec un socle granitique, aux abords du domaine de Montjeu (lieu-dit Le Chalet), qui correspond à une faille géologique est-ouest liée au massif du Morvan. Ce socle, altéré en surface, est recouvert par endroits d'une couche d'arène granitique sableuse (10 à 25 m d'épaisseur) et d'argiles vertes (forêt de la Plannoise)⁵. Aujourd'hui, le secteur vierge d'occupation anthropique, à l'exception du domaine de Montjeu, est couvert de forêts denses et traversé par la route départementale 120.

Éditions mai 2015

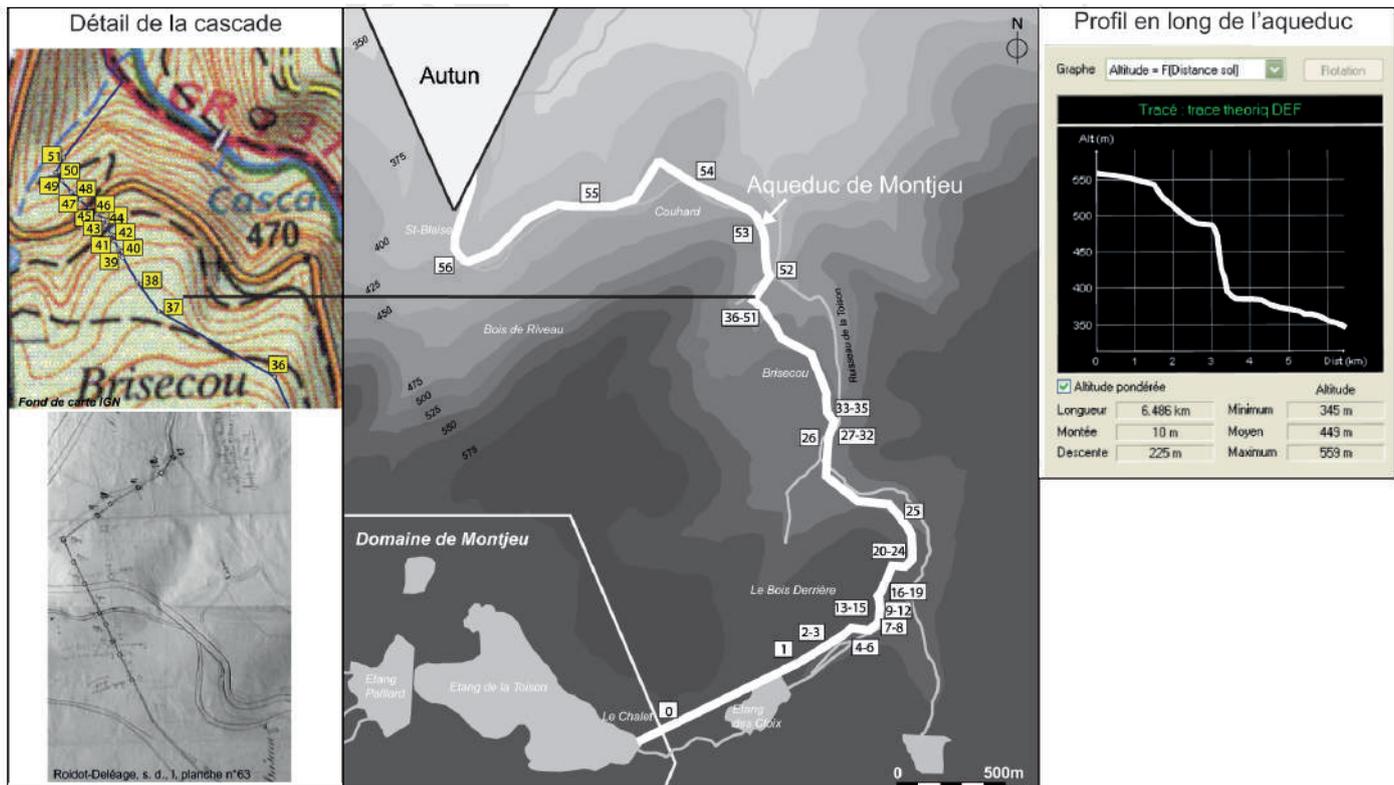


Fig. 1. Tracé de l'aqueduc de Montjeu et profil en long (DAO L. Borau).

5- Guhur 1997, 9.

Au pied de ces massifs et à la limite de la faille est-ouest, la ville romaine s'est installée, sur un plateau losangique incliné du sud (380 m d'altitude) au nord (300 m d'altitude)⁶, cerné de cours d'eau qui épousent ses contours.

Ces montagnes constituent un véritable réservoir naturel car, d'une part les eaux pénètrent à travers les arènes granitiques mais sont bloquées sur la roche-mère⁷, d'autre part les grès présentent de nombreuses failles qui laissent s'infiltrer les eaux. En revanche, la couche argileuse supérieure provoque d'importants ruissellements de surface.

Les principales résurgences sourdent entre les cotes 580 et 560. Elles ont fait l'objet d'aménagements à diverses époques et la plupart sont toujours captées aujourd'hui pour l'alimentation en eau de la ville actuelle, preuve de leur qualité. Ces travaux modernes sont à l'origine de la disparition du captage de l'aqueduc romain. Les sources de Montjeu donnent naissance à un ruisseau (de Brisecou, puis de la Toison) : ce dernier est en partie capté pour la création de trois étangs artificiels, appelés étang Paillard, de la Toison et des Cloix, les deux premiers appartenant à un domaine privé. Des relevés effectués au xx^e s.⁸ témoignent d'une augmentation du débit au niveau de l'étang des Cloix : dans les années 1940, le volume d'eau atteignait 360 m³/jour et, en 1997, 960 m³/jour. En revanche, la "source Chaude"⁹ plus en aval, dans le Bois Derrière et signalée dans la littérature archéologique, est en réalité dépourvue de vertu particulière. Aujourd'hui objet d'un captage moderne¹⁰, cette source aurait pu venir compléter le réseau principal antique. Ainsi, ces résurgences furent canalisées dès l'époque romaine.

Si l'on ne peut estimer avec exactitude la quantité d'eau transportée par l'aqueduc, en l'absence d'une étude hydrologique récente, du captage et d'une connaissance de la pente réelle du canal sur de grandes sections, ces chiffres témoignent néanmoins des ressources en eau potentiellement disponibles à l'époque antique. À titre de comparaison, le débit de l'aqueduc du Gier à Lyon est de 7 000 à 20 000 m³/jour.

PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES ARCHITECTURALES DE L'AQUEUDUC

L'aqueduc de Montjeu est un ouvrage entièrement souterrain qui effectue un parcours sinueux à travers la forêt sur près de 6 km, en suivant la plupart du temps les courbes de niveau (fig. 1 à 3). Cependant, de la source (domaine de Montjeu) à la ville, l'aqueduc perd environ 200 m d'altitude, soit une pente de plus de 3 %, qui peut nettement s'accroître dans certains secteurs très accidentés.

Les caractéristiques architecturales du canal ont déjà été décrites dans un précédent article¹¹. Rappelons simplement que le canal maçonné est construit en deux temps dont l'installation du béton de tuileau constitue la phase de transition. En effet, la moitié inférieure des piédroits et le radier réalisés à partir de moellons de granite liés au mortier, sont élevés dans une large tranchée, cette dernière étant comblée en partie basse par de gros blocs de grès recouverts d'une épaisse couche d'argile crue. Puis l'*opus signinum* est installé à l'intérieur du *specus* et forme un quart-de-rond sur chaque piédroit¹². Enfin, la construction du canal est achevée et correspond à l'élévation de la moitié supérieure des piédroits puis de la voûte. À titre d'exemple, les aqueducs de Carhaix¹³, de Besançon¹⁴, d'Avenches¹⁵ et du Mont-d'Or à Lyon¹⁶ suivent les mêmes étapes.

6- Delfour & Arène 1991, 5-40 ; Vignier *et al.* 1985, 257-260.

7- Guhur 1997, 12.

8- Guhur 1997, 34.

9- Fontenay 1889, 95.

10- Guhur 1997, 92.

11- Borau 2009, 461-476 ; Borau 2010, 168-178.

12- Cette morphologie particulière de l'enduit hydraulique empêche les infiltrations entre l'enduit et le mur, qui causeraient un gonflement puis un éclatement de l'enduit et finalement une destruction du piédroit. Elle permet aussi un bon accrochage de cet enduit au moment de son installation et se rapproche en cela des aqueducs d'Avenches (Grézet 2006, 96), de Balaruc-les-Bains (Bermond 2005, 35-48) ou des Mont-d'Or à Lyon (Germain de Montauzan 1908, 50, fig. 1).

13- Provost & Leprêtre 2002, 222-235 ; Provost *et al.* 2013.

14- Jaccotey 2006, 83-84.

15- Grézet 2006, 96.

16- Germain de Montauzan 1908, 50, fig. 1 ; Jeancolas 1983, 203, fig. 5.

Point	Distance	Altitude	Description	Localisation	Dimensions L, l, H, D	Distance
St 000	0 m	570	zone de captage	Domaine de Montjeu		
St 001	751	554	structure maçonnée (canal ?)	Étang des Cloix		
St 002-003	1 072	550	structure maçonnée (canal ?)	Le Bois derrière	l : 1	
St 004-006	1 215	547	2 voûtes	Le Bois derrière	L : 12 l : 0,90 H : 1,42	
St 007-017	1 331	546	effondrement	Le Bois derrière		
St 018	1 369	546	regard/bouchon	Le Bois derrière	D : 0,43	
St 019-023	1 514	546-544	effondrement	Le Bois derrière		
St 024	1 572	537	1 ^{er} puits de rupture de pente isolé	Le Bois derrière	H : 7	
St 025	1 743	523	voûte	Le Bois derrière	l : 0,8 H : 0,7	
St 026	2 434	493	1 ^{er} contrefort	Le Bois derrière	L : 3,2 l : 4,8 H : 0,6	
St 027		493	2 ^e contrefort	Le Bois derrière	L : 4,4 l : 3,2	7,5
St 028		493	3 ^e contrefort	Le Bois derrière	L : 4,4 l : 3,1	6,8
St 029		493	4 ^e contrefort	Le Bois derrière	L : 4,8 l : 2,4 H : 1,5	4,5
St 030		493	5 ^e contrefort	Le Bois derrière	L : 5,2 l : 1,8 H : 1	5
St 031		493	6 ^e contrefort	Le Bois derrière	L : 4,2 l : 2,1 H : 1	3,5
St 032		493	7 ^e contrefort	Le Bois derrière	L : 4 l : 1,8	3,4
St 033		493	Mur de renfort	Le Bois derrière	l : 4 H : 2	
St 034	2 464	493	2 ^e puits de rupture de pente isolé	Le Bois derrière	L : >2 l : >2	
St 035	2 484	492	3 ^e puits de rupture de pente isolé	Brisecou	L : 6,5 l : 4,8 H : >3	
St 036	2 885	487	4 ^e puits de rupture de pente isolé	Brisecou	L : 7 l : 5	
St 037	3 049	487	effondrement	Brisecou	l : 1	
St 038	3 094	484	5 ^e puits de rupture : 1 ^{er} de la cascade	Brisecou	L : 3 l : 3 H : >5,8	
St 039		477	6 ^e puits de rupture : 2 ^e de la cascade	Brisecou	L : 3 l : 3 H : >5,8	40
St 040		475	7 ^e puits de rupture : 3 ^e de la cascade	Brisecou	l : >2	12
St 041		472	8 ^e puits de rupture : 4 ^e de la cascade	Brisecou	l : >2	12
St 042		466	9 ^e puits de rupture : 5 ^e de la cascade	Brisecou	l : >2	12,6
St 043		459	10 ^e puits de rupture : 6 ^e de la cascade	Brisecou	l : >2	13
St 044		455	11 ^e puits de rupture : 7 ^e de la cascade	Brisecou	l : >2	11
St 045		450	12 ^e puits de rupture : 8 ^e de la cascade	Brisecou	l : >2	13
St 046		442	13 ^e puits de rupture : 9 ^e de la cascade	Brisecou	l : 4,5	12
St 047		439	14 ^e puits de rupture : 10 ^e de la cascade	Brisecou	l : 4,5	6
St 048		434	15 ^e puits de rupture : 11 ^e de la cascade	Brisecou	l : >2	14
St 049		429	16 ^e puits de rupture : 12 ^e de la cascade	Brisecou	l : >2	15
St 050		423	17 ^e puits de rupture : 13 ^e de la cascade	Brisecou	l : >2	22
St 051		421	18 ^e puits de rupture : 14 ^e de la cascade	Brisecou	l : >2	14,5
St 052	3 411	393	Bas de la cascade (7 ^e point hypothétique après la RD 120)	Brisecou		120
St 053	3 711	390	Point hypothétique bordant le ruisseau de la Toison	Brisecou		
St 054	4 097	390-375 ?	Canal observé au XIX ^e s. à Couhard	Brisecou à Couhard	l : 0,8 H : 1,57	
St 055	4 601	375 ?	Structure maçonnée (canal ?) à la sortie du village de Couhard	Couhard à Saint-Blaise		
St 056	5 501	370 ?	Point supposé à Saint-Blaise	Saint-Blaise à Autun		

Fig. 2. Structures repérées et caractéristiques architecturales de l'aqueduc de Montjeu (L. Borau).

Fig. 3. Canal de l'aqueduc et regard
(cl. J. Burdy).

Le canal mesure 1,40 m de hauteur en moyenne et 0,80 m de largeur. Cette élévation relativement importante suppose que des hommes d'entretien puissent progresser quasiment debout dans le conduit. C'est l'hypothèse déjà émise pour l'aqueduc d'Arles¹⁷.

La hauteur de l'enduit hydraulique à l'intérieur du conduit confirme ce postulat. En effet, quoique d'une grande solidité, l'*opus signinum* conserve les traces de l'eau dans la section du canal dégagé en 2006 (St 005 -St 006)¹⁸. Ces détériorations ont l'avantage de fournir la hauteur de la section mouillée qui est comprise entre 0,50 m et 0,60 m, soit un taux de remplissage du conduit aux $\frac{3}{4}$ de la hauteur du cuvelage. La section maximale du cuvelage atteint 0,72 m² (0,90 m de hauteur et 0,80 m de largeur) et la section mouillée seulement 0,54 m² (0,90 0,60 m). Suivant la classification des aqueducs en fonction de leur section établie par M. Bailhache¹⁹, l'exemplaire autunois appartient aux aqueducs de moyen hydraulique²⁰, mais il est tout à fait comparable à ceux du Gier ou de Sens dont la section est comprise entre 0,50 m² et 1 m². Il faudrait cependant pouvoir vérifier si la hauteur d'eau est constante sur l'intégralité du parcours.



17- "L'eau ne circulait que dans la partie inférieure cuvelée de l'ouvrage ; sa surélévation n'a de sens que si l'on accepte qu'elle n'a été construite que pour répondre à la nécessité de circulation d'un homme de petite taille dans la conduite. Ce besoin de circulation dans la conduite relève du souci évident d'inspection afin de localiser un éventuel bouchage et par la suite d'y porter remède sans être contraint d'ouvrir la totalité d'un tronçon entre deux regards" (Paillet 2007, 24-25).

18- H. de Fontenay (Fontenay 1889, 100) avait déjà fait des constatations similaires, il y a plus d'un siècle.

19- Bailhache 1983, 19-49.

20- Plus récemment, d'autres études (Fabre *et al.*, éd. 2005, 6) ont repris cette classification en séparant les aqueducs de grandes sections des petites sections, selon une section supérieure ou inférieure à 1 m². Dans ce second cas, l'aqueduc de Montjeu est un ouvrage de petite hydraulique.

DE NOUVEAUX REGARDS

Jusqu'en 2009, seul un regard était connu sur l'ensemble du tracé de l'aqueduc autunois (fig. 2 à 4). J. Burdy²¹, qui avait exploré ce conduit dans les années 1980, a récemment porté à notre connaissance l'existence d'au moins cinq regards supplémentaires dont un seul a pu être photographié et six autres plus hypothétiques (matérialisés par des affaissements en entonnoirs)²². Situés dans la forêt de Montmain, ils sont similaires au premier regard connu : la voûte est interrompue par une dalle de granite monolithe, elle-même percée d'un orifice central et obturée par un tampon de pierre. Ce dispositif doit a priori servir au contrôle de la canalisation. Cependant, l'étrécissement de cette ouverture, ne dépassant pas 0,45 m de diamètre (1,5 pied), implique que seul un homme très mince soit capable de s'introduire par ces orifices. Faut-il envisager d'autres types de regards plus grands pour le passage des hommes, comparables à ceux de Lyon²³ par exemple ? Si tel est le cas, cette petite ouverture jouerait seulement le rôle de puits de lumière lors des contrôles et des restaurations ou de "trous d'aération" à l'image de ce que A. Veyrac²⁴ avait proposé pour Nîmes. Néanmoins, les mêmes regards existent pour les égouts de la ville et pourraient donc indiquer qu'il s'agit véritablement de regards²⁵. En outre, J. Burdy avait pu mesurer "quatre intervalles avec précision : 33,30 m, 30,70 m, 31,20 m, 31 m"²⁶. Ces informations sont d'autant plus précieuses que l'exploration des vestiges n'est pas envisageable actuellement en raison des difficultés d'accès à l'intérieur du conduit.

21- Burdy 1986, 398.

22- Je tiens à exprimer toute ma gratitude à J. Burdy de m'avoir fourni cette précieuse documentation.

23- Burdy 2002, 117-127.

24- Veyrac 2006, 348-349.

25- Borau 2010, 221-222.

26- Ces mesures ne correspondent pas aux préceptes de Vitruve, qui conseille l'installation de regards tous les 120 pieds (Vitr., 7.6.3)

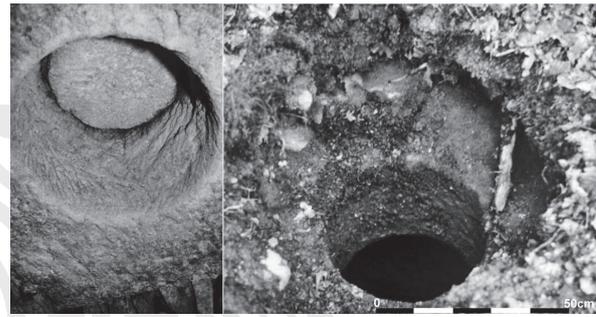


Fig. 4. Vue intérieure d'un regard avec tampon et vue extérieure après ouverture (cl. J. Burdy).

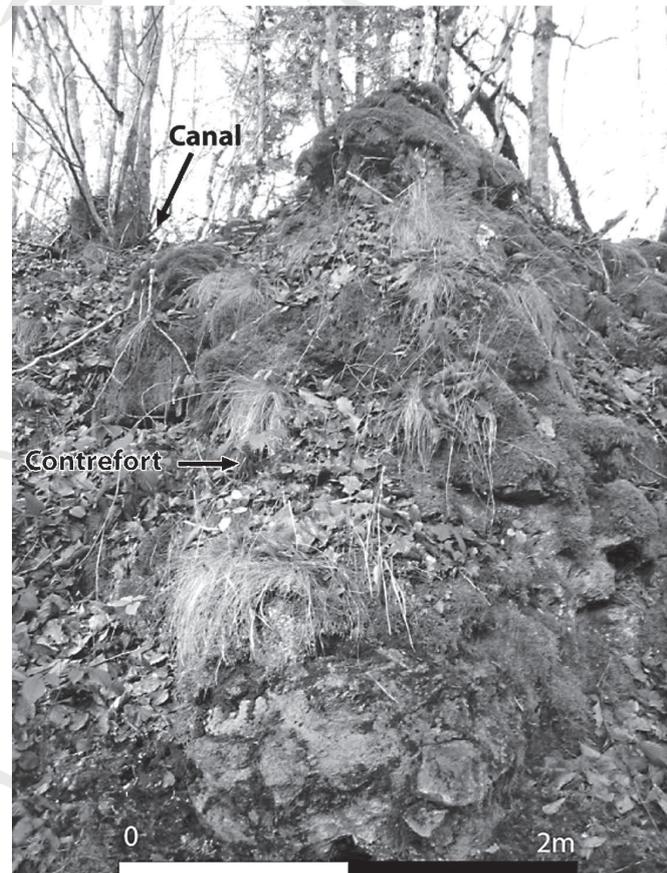


Fig. 5. Contrefort St 029 installé dans la pente en contrebas du canal (cl. L. Borau).

TECHNIQUES DE CONSTRUCTION DES CONTREFORTS

À 2 434 m du parcours, l'aqueduc souterrain est soutenu par sept contreforts²⁷ implantés dans la pente à intervalles irréguliers (fig. 2 et 5). Leur présence s'explique par le contexte topographique accidenté : en effet, l'aqueduc circule entre le rocher naturel et une pente abrupte, laissant un espace libre d'à peine 2 m de largeur. Un examen attentif de la maçonnerie a permis de préciser les techniques de construction : réalisés en *opus caementicium*, ces contreforts sont constitués de moellons de granite liés au mortier. L'analyse pétroarchéologique des mortiers prélevés sur les contreforts St 027 et St 028 a montré la présence de fragments millimétriques de terre cuite. L'emploi d'un mortier hydraulique permet de supposer que ces contreforts étaient apparents dès l'origine. Ce type de liant architectural évitait ainsi la détérioration trop rapide de la maçonnerie à l'air libre. De plus, l'aspect bombé de ces contreforts devait aussi participer à la bonne évacuation des eaux de ruissellement.

LES PUIITS DE RUPTURE DE PENTE : DÉFINITION ET FONCTION

Dans les zones les plus accidentées c'est-à-dire de forte déclivité, l'aqueduc souterrain est jalonné de structures de ralentissement du débit de l'eau : il s'agit de puits de rupture de pente (fig. 1, 2 et 6). L'eau, conduite par l'aqueduc, parvient au sommet d'un puits quadrangulaire, effectue une chute qui peut atteindre plusieurs mètres de profondeur et s'évacue par un canal de fuite, aménagé au bas du puits, dans la paroi opposée au canal d'arrivée. Une pente très accentuée nécessite l'installation de plusieurs puits disposés en série formant alors une cascade de puits : il s'agit d'un véritable escalier hydraulique. Puis au bas de cette cascade, l'eau reprend un écoulement gravitaire normal dans le canal souterrain. En outre, ces puits assurent vraisemblablement un rôle de décantation puisqu'ils piègent les sédiments ou graviers transportés par l'eau qui se déposent au fond, à l'instar des observations faites dans les puits de l'aqueduc de l'Yzeron à Lyon²⁸.

Les puits de rupture de pente : les données du XIX^e s.

Au XIX^e s., vingt-quatre puits de rupture de pente sont reconnus sur l'ensemble du parcours, dont une cascade constituée de quatorze puits successifs dans le secteur de Brisecou²⁹. H. de Fontenay³⁰ les décrit ainsi : "les cascades sont construites des mêmes matériaux que l'aqueduc, cependant leur partie supérieure est en pierres de taille". Plusieurs relevés sont effectués à cette époque par J. Roidot-Deléage³¹, notamment un plan et une coupe du premier puits de rupture de pente de la cascade qui représentent une structure de 3 x 2,40 m de côté. La différence de hauteur entre le canal amont et le canal aval est de 4,40 m. On note cependant quelques incohérences à propos de la cascade : alors qu'H. de Fontenay³² décrit des puits distants de 15 à 30 m, le plan publié par J. Roidot-Deléage³³ restitue un tracé "idéalisé" de l'aqueduc comportant des intervalles réguliers pour les neuf premiers puits de la cascade. Or deux plans manuscrits conservés à la Société éduenne³⁴ – probablement plus anciens – figurent des relevés différents et représentent les puits selon des espacements irréguliers. Les nombreuses ratures témoignent des difficultés rencontrées par l'auteur pour localiser convenablement les vestiges en plan, problème auquel nous sommes toujours confrontés plus d'un siècle après. Or, en comparant

27- L'installation de contreforts pour renforcer un aqueduc souterrain n'est pas une pratique répandue. À titre de comparaison (Paillet 2007, 33) dans le secteur de Fontaine-de-Vaucluse, des contreforts ont été observés sur l'aqueduc de Cavaillon. Espacés de 4,14 m d'axe en axe, ils viennent renforcer la canalisation, très large à cet endroit, vraisemblablement à ciel ouvert, ce qui conduit l'auteur à supposer que : "la masse est seulement destinée à compenser la poussée de l'eau et non celle d'une voûte en berceau".

28- Burdy 2002, 130.

29- Fontenay 1889, 95.

30- Fontenay 1889, 98.

31- Roidot-Deléage, s.d., I, planche n°XXVII.

32- Fontenay 1889, 95.

33- Roidot-Deléage, s.d., I, planche n°XXVII.

34- Roidot-Deléage, s.d., I, planche n°63, 65.

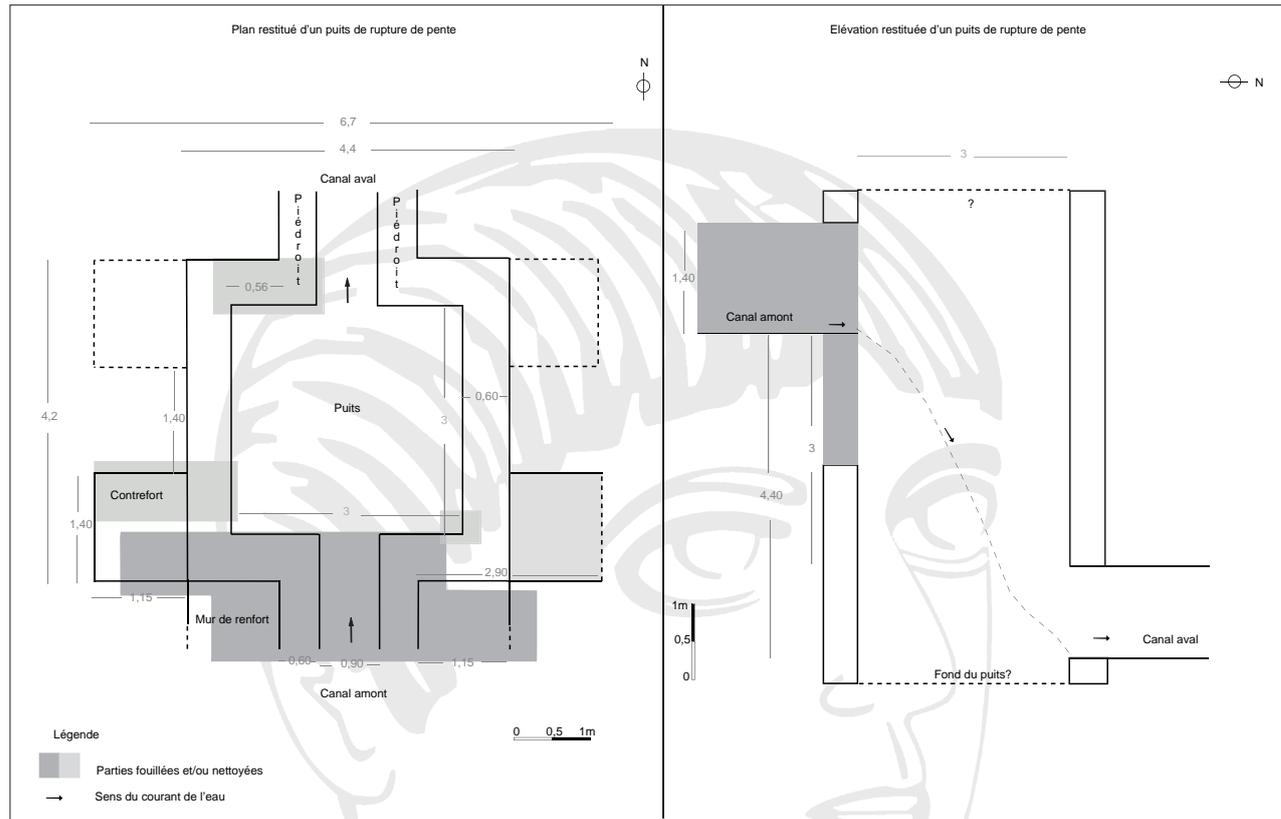


Fig. 6. Restitution d'un puits de rupture de pente, vu en plan et en coupe (DAO L. Borau).

nos données à celles du XIX^e s., le même nombre de puits a été identifié³⁵ : cependant sur les relevés anciens, les quatorze puits s'échelonnent jusqu'au bas de la pente. Il est donc probable que leur implantation soit le fruit d'une "restitution" – sans prise en compte de la réalité archéologique – pratique courante à cette époque. D'ailleurs, la coupe du puits a probablement elle aussi bénéficié de certains "embellissements" car l'auteur n'a pas reconnu les murs de renforts de part et d'autre du canal. On peut également s'interroger sur l'existence effective des quatre contreforts perpendiculaires au puits. Enfin, on ignore si ces chercheurs ont atteint le fond du puits lors de leur exploration. En dépit de ces quelques remarques, les chercheurs du XIX^e s. ont produit une documentation remarquable.

Les données du XXI^e s.

Grâce aux recherches de terrain de 2009-2010, nous avons pu affiner et compléter nos précédentes observations³⁶ afin de préciser l'implantation et la conception de quatre puits isolés et d'une cascade composée d'au moins quatorze puits successifs.

35- Fontenay 1889, 95 ; Roidot-Deléage, s.d., I, planche n°63, 65, XXVII.

36- Borau 2009, 461-476.

- Les puits isolés

Les puits isolés (fig. 1 et 2) qui ponctuent le parcours de l'aqueduc, se présentent généralement sous la forme de dépressions oblongues de plus de 3 m de profondeur et de 2 à 5 m de largeur pour une longueur atteignant souvent 6 à 7 m, délimitées par un éboulis de moellons. À la différence des dix puits isolés comptabilisés au XIX^e s.³⁷, seules quatre structures de ce type sont encore visibles aujourd'hui. Il s'agit des puits St 024 (à 1 572 m), St 034 (à 2 464 m), St 035 (à 2 484 m) qui pourrait être renforcé par un contrefort installé dans la pente et dont il ne subsiste qu'un effondrement, et St 036 (à 2 885 m). Ils sont systématiquement implantés sur de brèves ruptures de pente. Il est toutefois probable que les observations du XIX^e s. soient pour partie exactes car l'aqueduc doit faire face à de brusques changements d'altitude à plusieurs reprises, en particulier une pente de 4 % entre St 025 et St 026 (forêt du Bois Derrière) et de 1,5 % entre St 055 et St 056 (village de Couhard).

- Les caractéristiques architecturales des puits

À 3 094 m du parcours de l'aqueduc, le premier puits de la cascade (St 038) se situe à l'extrémité d'un replat et à l'amorce d'une pente de 28 % en moyenne : à cet endroit, le conduit perd 91 m d'altitude sur 317 m (fig. 6 et 7). Partiellement effondré, il a été fouillé en 2005³⁸. Le canal en amont du puits a été dégagé et il est d'ailleurs visible en coupe, seule sa voûte a disparu. Des structures inédites, qui n'avaient pas été observées au XIX^e s., ont été mises en évidence : ce sont des murs de renforts de part et d'autre du canal en amont du puits ainsi que l'amorce d'un contrefort perpendiculaire au puits. En raison des conditions de fouille particulièrement difficiles et de l'affaissement d'une partie des vestiges, le fond du puits n'a pas été atteint et seules ses limites méridionales ont été partiellement dégagées. Cette opération a été complétée en 2009 par un nettoyage sommaire du deuxième puits de la cascade (St 039), situé à 40 m en aval, travail qui a permis de compléter les plans et ainsi d'en achever la restitution. Ce second puits possède lui aussi des murs de renforts latéraux, ainsi que des contreforts perpendiculaires, dont un complet (à l'ouest). L'une des découvertes les plus significatives est celle des angles sud-est et nord-ouest du puits. En outre, on remarque une "anomalie" : en effet, son mur nord ne mesure que 0,56 m de longueur et semble s'interrompre brusquement dans la partie centrale. Seul un dégagement permettrait de proposer une interprétation.

Néanmoins, ce travail a permis d'identifier les caractéristiques techniques de cet ouvrage. Les maçonneries conservées sur 3 m de hauteur sont réalisées en *opus caementicium* à partir de moellons de granite liés au mortier. Intérieurement, chaque puits devait être revêtu d'un enduit hydraulique, comme le suggèrent les relevés du XIX^e s.³⁹. La conception d'ensemble est plutôt originale. De bas en haut, les bâtisseurs semblent avoir logiquement respecté un axe vertical déterminé par les piédroits de l'aqueduc qui doivent servir de repères pour la construction puisqu'ils se prolongent dans le soubassement du canal. Ils servent également d'axes de symétrie dans la partie supérieure du puits car ils déterminent l'implantation des autres parties constituantes (murs de renfort notamment). Les murs de renfort et les contreforts étaient soigneusement parementés.

Grâce à l'examen de ces deux structures, il est désormais possible de restituer la morphologie de ces puits et de proposer un modèle : en reprenant toutes les dimensions connues, un "puits type" mesure intérieurement 3 m de côté (10 pieds). Il s'agit de structures carrées et non rectangulaires comme le suggéraient les plans du XIX^e s. Cette mesure de 3 m se retrouve aussi en élévation puisqu'elle correspond à la différence de niveau entre le fond du canal amont et la voûte du canal aval. D'ailleurs, le recours à des mesures normalisées transparait dans la conception de cet ouvrage. Le canal mesure 0,90 m de largeur en moyenne (soit 3 pieds), les piédroits 0,60 m de largeur en moyenne (soit 2 pieds), dimension que l'on retrouve pour l'épaisseur des puits. Cette faible épaisseur est compensée par les murs de renfort et les contreforts. Les murs de renforts mesurent entre 1,10 m et 1,20 m de largeur (soit 4 pieds) et plus d'1,50 m de longueur et les contreforts 1,40 x 1,10 m de côté. On ignore s'il existait des contreforts aux angles opposés c'est-à-dire en aval, mais cela paraît vraisemblable en raison de la forte pente. Si tel était le cas, alors on peut supposer que les contreforts étaient identiques et en déduire l'espacement séparant les deux contreforts soit 1,40 m.

37- Fontenay 1889, 94.

38- Borau 2009, 461-476.

39- Roidot-Deléage, s.d., I, planche n°XXVII.

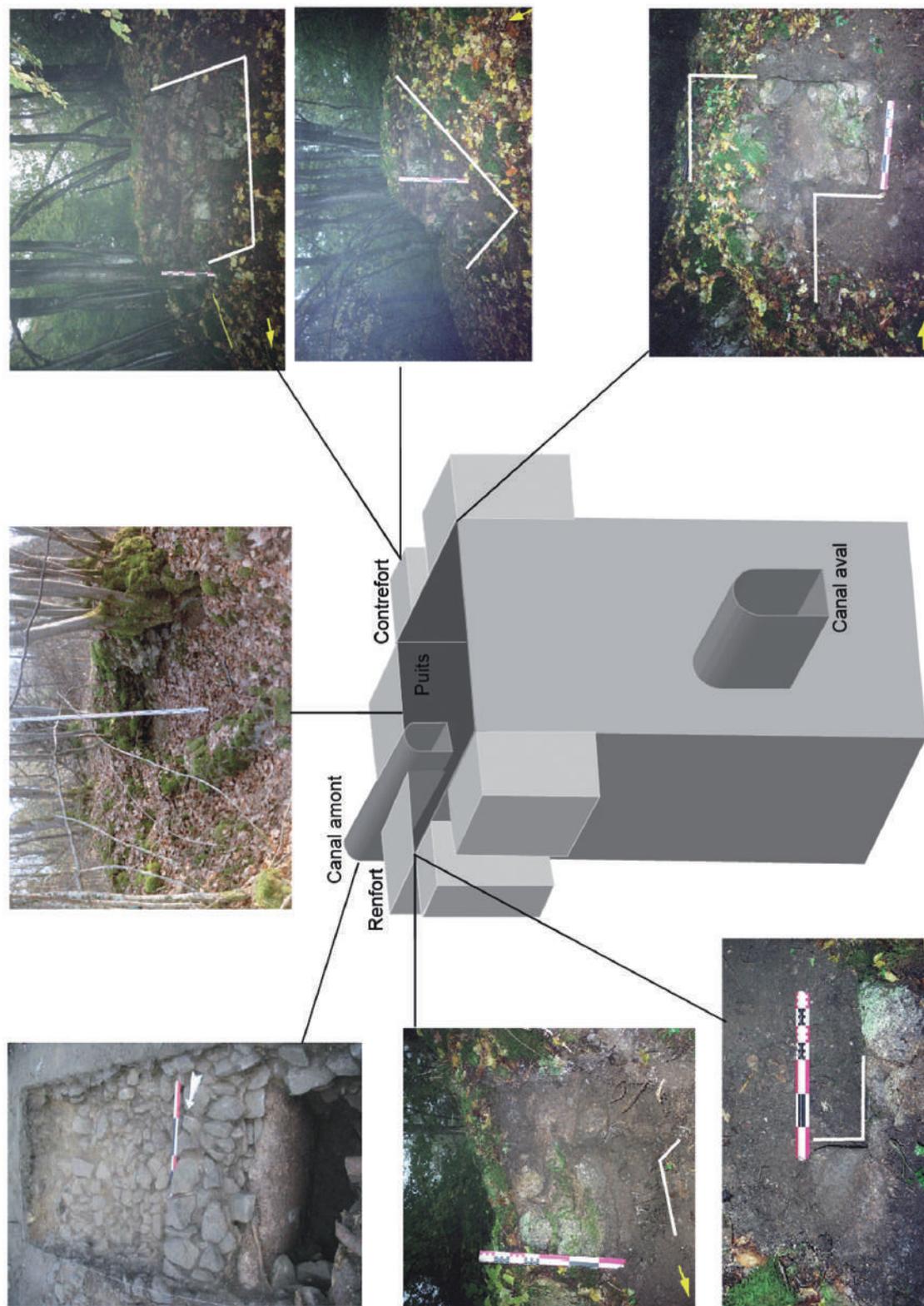


Fig. 7. Restitution schématique en trois dimensions d'un puits de rupture de pente et structures repérées St 038-St 039 (cl. et DAO L. Borau).

L'extérieur du puits (si l'on tient compte de la largeur différente des deux murs de renfort) atteint 4,40 m (10 coudées) auquel il faut ajouter les dimensions des contreforts : la largeur totale de la structure s'élève à 6,70 m et la longueur totale doit être supérieure à 5,70 m.

Or ces mesures sont intéressantes car la largeur extérieure de l'ouvrage correspondrait globalement à la profondeur de celui-ci. En effet, H. de Fontenay⁴⁰ rapporte que la hauteur séparant le canal amont du canal de fuite est de 4,40 m (10 coudées). En tenant compte de la hauteur du canal amont et de l'épaisseur de la voûte, l'ouvrage atteint 6,30 m d'élévation. Cependant, le puits devait être plus profond que le canal de fuite. On peut donc considérer que la hauteur totale dépassait 6,30 m et avoisinait vraisemblablement les 6,70 m à 7 m (ce qui équivaldrait à cinq fois la hauteur du canal).

En outre, ces nouvelles recherches permettent d'estimer la masse de travail préalable à l'implantation du puits, mais également son ampleur à la fois en plan et en volume. En superficie, le puits dépasse 9 m² (3 x 3 m). Si l'on considère l'ouvrage hors tout, il a une forte emprise au sol puisqu'il dépasserait 38 m² (6,70 x 5,70 m)⁴¹. En volume, le puits atteint plus de 55 m³ (3 x 3 x 6,30 = 56,70 m). Le terrain est donc décaissé profondément afin d'établir chaque puits.

Cependant, seules les dimensions des deux premiers puits ont pu être précisées. Ces premières estimations permettent néanmoins de se figurer le travail considérable qu'a nécessité un tel chantier. D'ailleurs, le décaissement laborieux de la roche granitique doit avoir été mis à profit pour extraire les matériaux de construction. Si une partie du puits est construite – ses parements notamment – on peut supposer que les aménageurs ont également utilisé la roche en place pour asseoir la structure : dans ce cas, les contreforts et les murs de renforts reposant sur le rocher, consolidaient peut-être uniquement la partie supérieure du puits (à l'air libre ?). De plus, on ignore le type de couverture du puits et s'il était partiellement apparent ou intégralement souterrain. Seuls des rapprochements avec d'autres aqueducs peuvent fournir des éléments de réponse. Pour son étude de l'aqueduc algérien de Rusicade, H. Vertet⁴² a publié une photographie figurant un puits circulaire intégralement visible en élévation, avec l'amorce du canal aval. À *Baelo Claudia*⁴³, les puits de rupture de pente de l'aqueduc de Realillo se présentent sous la forme de cheminées circulaires en élévation mais les conduits connexes ne sont pas apparents. À Cordoue⁴⁴, les puits affleurent le sol et sont obturés par de simples dalles. On peut donc supposer qu'à Montjeu, le regard formant une tour carrée devait légèrement dépasser du sol. D'ailleurs, l'interruption du mur nord du puits pourrait par exemple correspondre à une ouverture d'accès.

Ces recherches récentes ont ainsi permis de corriger les données du XIX^e s. et d'établir un nouveau plan des deux premiers puits de rupture de pente de la cascade afin d'en proposer une restitution volumétrique.

- Conception de la cascade de puits de rupture de pente

Intéressons-nous maintenant à la conception générale de la cascade (fig. 8). L'aqueduc ne suit plus les courbes de niveau mais franchit perpendiculairement la dénivellation. Quatorze puits ont été localisés successivement sur 197 m de longueur. Après le dernier puits repéré, il manque encore 120 m avant d'atteindre le bas de la pente, point à partir duquel l'aqueduc reprend un écoulement gravitaire normal. Les puits sont disposés à intervalles irréguliers : 40 m séparent le premier puits du second, ensuite les espacements s'échelonnent de 11 à 15 m. La pente naturelle n'est pas constante, mais se décline en trois grandes sections : la première de 33 %, la seconde de 29 % et la troisième de 21 %. Plusieurs interrogations demeurent pour proposer une restitution valable de cette cascade : quel est le nombre exact de puits ? Sont-ils identiques en plan et en élévation ? Leur implantation s'adapte-t-elle au relief ou est-elle soumise à un principe de régularité, masqué par l'état actuel du terrain ? Ces incertitudes nous ont conduits à proposer deux restitutions théoriques que seules des opérations

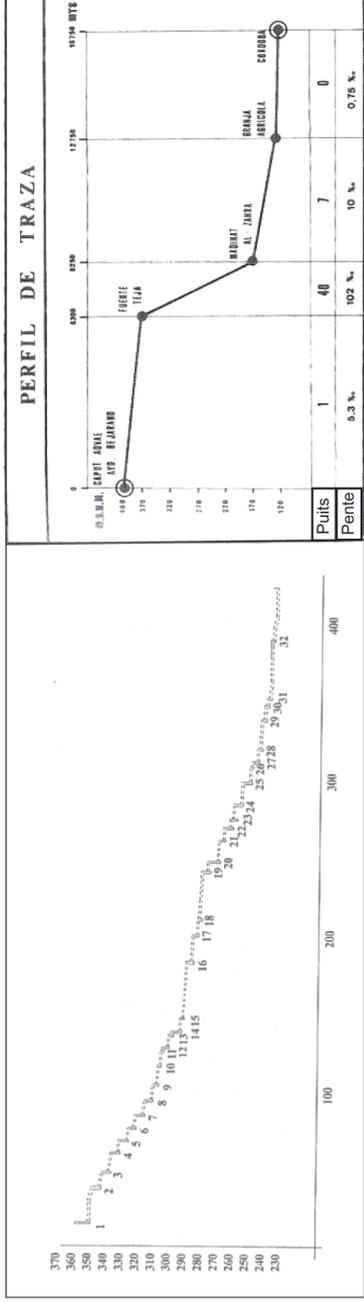
40- Fontenay 1889, 98.

41- Comme on ignore s'il existe des murs de renfort en aval du puits, nous ne l'intégrons pas à cette estimation.

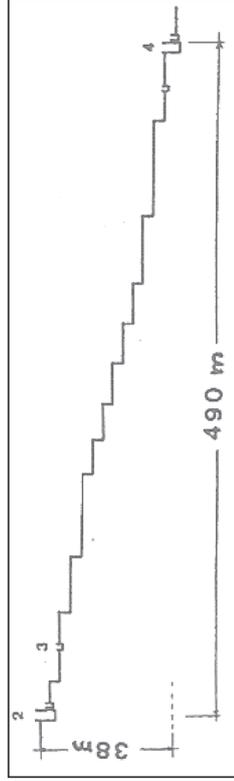
42- Vertet 1983, 349-369.

43- Étude en cours : L. Borau et P. Moret 2013 : *Baelo, ville punique et romaine du détroit de Gibraltar (Andalousie-Espagne)*, projet de recherche réalisé avec le soutien du laboratoire TRACES). L. Borau 2014-2015 : *L'alimentation en eau à Baelo Claudia*, projet de prospection-inventaire dans le cadre d'un post-doctorat à la Casa de Velázquez.

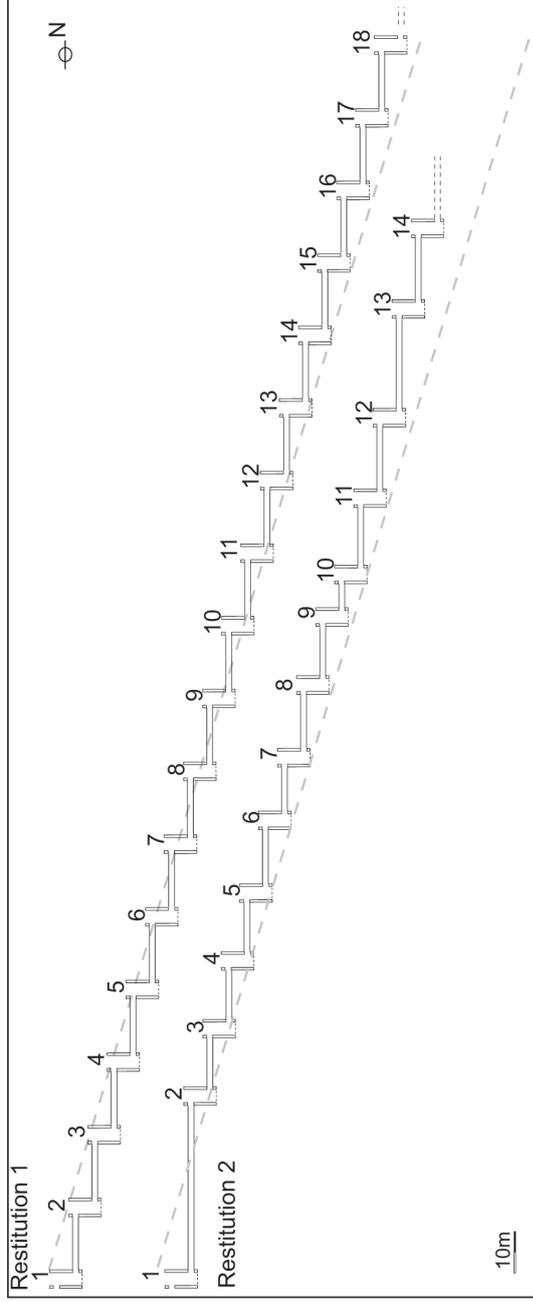
44- Ventura Villanueva 1993, 88, fig. 34-35.



Cordoue : Restitution de la cascade de puits de rupture de pente et profil en long de l'aqueduc de Valdepuentes (Ventura Villanueva 1993).



Lyon : Restitution de la cascade de puits de rupture de pente de l'aqueduc de l'Yzeron (Burdy 2002).



Autun : proposition de restitutions de la cascade de puits de rupture de pente de l'aqueduc de Montjeu.

Fig. 8. Restitution des cascades de puits de rupture de pente des aqueducs de l'Yzeron (Lyon), de Montjeu (Autun) et de Valdepuentes (Cordoue) et profil en long (DAO L. Borau).

archéologiques de grande ampleur pourraient valider. La première restitution suppose des puits identiques, implantés à une distance régulière de 13 m⁴⁵, sans prise en compte du relief. La cascade nécessiterait alors 19 puits. La seconde proposition a été réalisée à partir de nos propres observations : les 14 puits ont des espacements irréguliers et s'adaptent donc à la topographie. Comme nous ignorons les caractéristiques précises de chaque puits, on considère que tous les puits sont identiques. Si l'on tient compte de la moyenne des intervalles entre les puits (13 m), on peut estimer que, théoriquement, il manque 8 puits sur les 120 m restants, soit un total de 22 puits.

Si ces propositions restent du domaine de la théorie, leur mise en perspective démontre que les différences sont faibles : par conséquent, cette cascade devait comporter une vingtaine de puits. Cependant, ces restitutions posent des problèmes d'implantation car les puits semblent "jaillir" du sol. Cela signifie-t-il que les puits étaient visibles en élévation, à l'image de ceux de Ruscade, et beaucoup plus profonds ? En dépit de nombreuses incertitudes, ce travail confirme l'intérêt d'examiner précisément de tels ouvrages.

Comme l'a souligné J.-L. Fiches⁴⁶ et en l'état actuel des recherches, il semblerait que les constructeurs, s'appuyant sur des calculs théoriques – et peut-être ayant recours à des ouvrages aux dimensions normalisées – ont adapté les structures au contexte topographique : en témoignent les similitudes observées entre le premier et le second puits de la cascade et a contrario, l'irrégularité de leurs espacements. Il faut probablement envisager le développement d'un modèle de puits "standard", répété sur toute la pente, de plan carré, de 3 m de côté, renforcé par des contreforts. Leurs profondeurs ont probablement varié en fonction du relief, peut-être par section. Les puits sont implantés à des intervalles irréguliers, par exemple St 046 et St 047 distants de 5-6 m en raison d'une pente de 66 % alors qu'inversement, St 049 et St 050 sont séparés de 22 m car la pente est moins accentuée, de l'ordre de 27 %. Enfin, l'aqueduc change de direction entre les puits St 050 et St 051 (treizième et quatorzième puits) toujours pour des raisons topographiques et afin d'éviter un petit cours d'eau. Le canal de fuite de St 050 doit être perpendiculaire au canal amont. Cette caractéristique se retrouve sur l'aqueduc de Valdepuentes à Cordoue⁴⁷.

Aperçu des systèmes de ralentissement du débit de l'eau des aqueducs romains

L'aqueduc de Montjeu ne constitue pas un *unicum*, bien qu'il existe peu d'aqueducs dotés de puits de rupture de pente. La documentation est assez inégale et rares sont les ouvrages à avoir été fouillés. Dans les années 1970, P. Leveau et J.-L. Paillet⁴⁸ ont été les premiers à proposer une véritable étude de ces dispositifs, observés sur l'aqueduc de Cherchell (Algérie). A. Trevor Hodge⁴⁹, dans son ouvrage *Roman aqueducts and water supply*, consacre une seule page à la notion de "cascade" alors que le chapitre réservé aux siphons occupe treize pages ! À partir de 1998, l'ingénieur hydraulicien H. Chanson⁵⁰ dresse un inventaire de ces systèmes de ralentissement et reconnaît trois types de "chutes" :

- celles à radier lisse que l'on retrouve notamment à Rome sur l'*Aqua Marcia*, l'*Anio Vetus*, l'*Anio Novus*, à Lyon sur la Brévenne, à Cherchell en Algérie et à Carthage en Tunisie.
- les chutes en marches d'escaliers : sur l'aqueduc de la Brévenne, d'Andriake (Turquie) et de Cherchell. On peut désormais compléter cette liste par celui de Zama (Tunisie)⁵¹.
- les puits de rupture de pente et les cascades de puits : à Lyon sur l'aqueduc de l'Yzeron, à Cordoue sur l'aqueduc de Valdepuentes et à Cherchell. On peut actuellement ajouter au moins deux aqueducs de *Baelo Claudia* (Punta Paloma et Realillo).

45- Cette mesure correspond à une moyenne des intervalles St 039-St 051.

46- Fiches 2008.

47- León *et al.* 2008, 291, fig. 303-304 ; Chanson 2002, 9.

48- Leveau & Paillet 1976, 185.

49- Trevor Hodge 2005, 160-161.

50- Chanson, 2002. Cependant, ces données doivent être utilisées avec prudence. En effet, les travaux d'H. Chanson bien que remarquables du point de vue de l'apport des expérimentations en laboratoire qui confirment l'efficacité des ouvrages romains, ne se fondent pas sur des données archéologiques, mais uniquement sur des données théoriques.

51- Je tiens à remercier chaleureusement C. Darles de m'avoir indiqué sa découverte (Ferjaoui *et al.* à paraître)

- Quelques observations sur les aqueducs romains pourvus de puits de rupture de pente

L'examen attentif de quelques exemples du monde romain (fig. 9) permet de se faire une meilleure idée des caractéristiques techniques de ces puits de rupture de pente. S'appuyant sur les travaux de C. Germain de Montauzan⁵², J. Burdy apporte un nouvel éclairage à la connaissance des aqueducs lyonnais⁵³. Sur la branche de Grézieu de l'aqueduc de l'Yzeron, J. Burdy⁵⁴ a dégagé des puits de rupture de pente : la partie amont du canal (1,26 x 0,60 m) en contact avec le puits, a le plus souvent disparu. Les puits carrés mesurent 1,17 m de côté. L'épaisseur des murs ne dépasse pas 0,60 m. Conservés sur 3,25 m de hauteur, ils devaient atteindre à l'origine 6 m de profondeur. La hauteur séparant le canal amont du canal aval est estimée à 2,50 m et le puits est encore plus profond de 1,35 m. Sur la branche de Vaugneray de ce même aqueduc⁵⁵, un puits de 1,90 x 1,14 m a été mis au jour. Le canal amont n'était pas conservé et le fond ne se situait qu'à 0,19 m par rapport au canal aval. L'élévation totale atteignait 1,30 m. La différence de niveau entre les deux canalisations est estimée à 2,50 m, semblable au tronçon précédent. J. Burdy⁵⁶ estime qu'il existait, sur la première branche, une cinquantaine de puits, distants de 30 à 100 m sur une longueur totale de 2 km et sept puits espacés de 40 m environ sur la branche de Vaugneray⁵⁷.

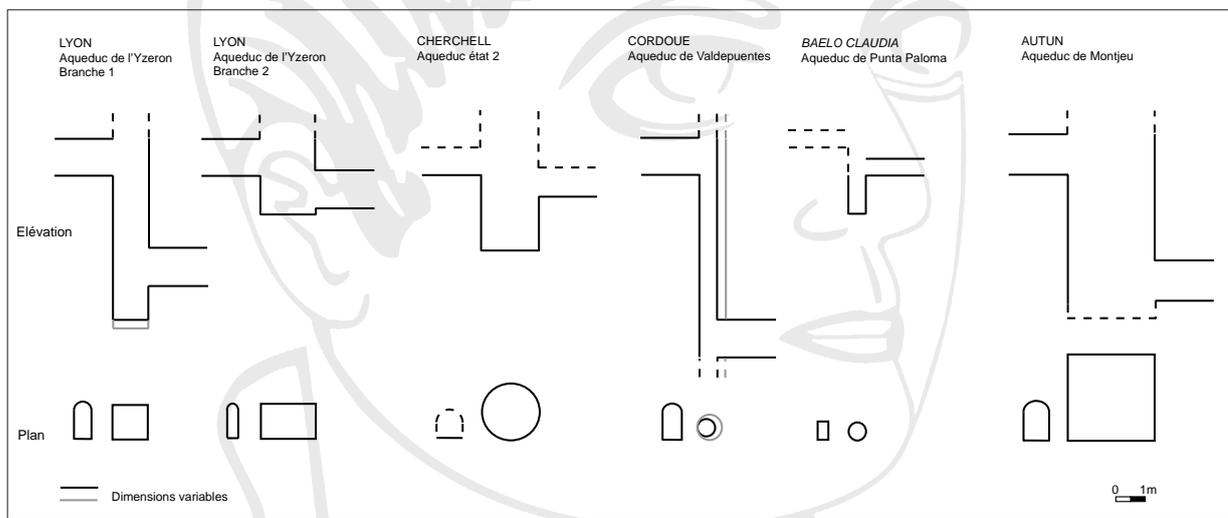


Fig. 9. Comparaisons des puits de rupture de pente du monde romain (DAO L. Borau).

A. Ventura Villanueva a étudié dans la Sierra Morena (secteur de Fuente de la Teja- Madinat al-Zabra), la cascade de l'aqueduc de Valdepuentes qui alimentait la capitale de la Bétique Cordoue. Le canal mesure 0,64 m de largeur, les piédroits 0,45 m et une hauteur, voûte comprise, de 1,26 m. Pris dans une maçonnerie quadrangulaire de 1,70 à 1,90 m de côté, ces puits sont circulaires et percés en surface d'un orifice de 0,60 à 0,85 m de diamètre. De lourdes dalles accolées recouvrent l'ouverture. Les puits peuvent atteindre 10 m de

52- Germain de Montauzan 1909, 174.

53- Ajoutons que l'aqueduc de la Brèvenne possède des dispositifs de ralentissement différents. J. Burdy identifie d'une part cinq "chutes" (non fouillées) et pour lesquels on dispose de peu d'informations ; d'autre part, un plan incliné de 20°, revêtu de dalles, barré de poutres transversales qui ralentissent le courant de l'eau (Burdy 2002, 133-134 ; Germain de Montauzan 1909, 174).

54- Burdy 2002, 130-131.

55- Burdy 2002, 131-132.

56- Burdy 2002, 130-131. Les pentes varient entre 3 et 20 %.

57- Burdy 2002, 131-132.

profondeur⁵⁸. La différence de hauteur entre le canal amont et le canal de fuite varie entre 1 et 5 m. Intérieurement enduites de mortier de tuileau, les parois de certains puits ont la particularité de présenter des orifices réguliers destinés à accueillir des poutres transversales : l'objectif était double, briser davantage le courant de l'eau et former une échelle de descente pour inspecter les ouvrages⁵⁹. Ces puits sont installés sur une pente de 33 %. La première section de 200 m de longueur se compose de 20 puits avec un espacement maximal de 25 m. Le canal conserve alors une pente de 5 %⁶⁰. La seconde section de 150 m de longueur, comporte 14 puits⁶¹. A. Ventura Villanueva⁶² suppose l'existence de 47 puits en tout. L'aqueduc perd 285 m d'altitude en 16,750 km, soit une pente générale de 1,7 %. Le chercheur espagnol formule une remarque particulièrement intéressante : "no olvidemos que esta es una pendiente media global, de manera que, en realidad, la pendiente del canal varia bastante según tramos⁶³". En effet, certains tronçons ont une pente de 8 %, d'autres de 25 %⁶⁴. Ainsi, la compréhension du nivellement d'un aqueduc ne peut s'effectuer que par section et non en fonction d'une pente générale. Le profil en long montre que les puits sont disposés selon des intervalles irréguliers et possèdent des profondeurs variables qui s'adaptent à la morphologie du terrain.

Autre exemple, à Caesare de Maurétanie, P. Leveau et J.-L. Paillet⁶⁵ ont étudié les puits de rupture de pente de l'aqueduc de Cherrhell. L'un des puits cylindriques, mis en évidence à l'amont du Pont Illelouine, mesure 2,03 m de diamètre. Il est constitué de blocs de pierre de taille, enduit intérieurement de mortier de tuileau et pris dans un massif de maçonnerie directement lié au pont en contrebas. Le puits est conservé sur 1,60 m de profondeur. D'après la coupe⁶⁶, la différence de hauteur entre le canal amont et aval, ne dépasse pas 0,70 m. La profondeur du puits atteint 2,50 m par rapport au canal amont et 1,90 m par rapport au canal aval. L'implantation de cette structure au passage de l'oued permet au canal de perdre 12,28 m de hauteur sur 32 m (soit une pente de 38 %). Les canaux intermédiaires entre les puits correspondent à des plans inclinés plus larges (de 1,30 m) que le canal de l'aqueduc (0,46 à 0,74 m) qui, selon les chercheurs permettent : "d'augmenter le coefficient de frottement de l'eau⁶⁷". Quatre plans inclinés ont été repérés. Il existait peut-être un dispositif similaire dans la gorge de Bouchaoun et à l'extrémité du tronçon du Chabet Illelouine. Leur création correspondrait à une phase de remaniement du tracé de l'aqueduc⁶⁸.

À *Baelo Claudia*⁶⁹, un puits est positionné dans un contexte similaire au conduit précédent : implanté en amont du pont de Chorrera de l'aqueduc de Punta Paloma, il mesure 0,60 m de diamètre et 1,25 m de profondeur par rapport au canal aval (le canal amont s'est effondré). Ses parois épaisses de 0,50 m sont enduites intérieurement de mortier de tuileau. Le diamètre du puits en amont du pont de Churriana est identique. Le canal mesure 0,30 m de largeur pour une hauteur de 0,60 m environ. En revanche, le puits observé sur l'aqueduc de Realillo est plus imposant et mesure 0,90 m de diamètre.

Enfin, H. Vertet⁷⁰ a étudié l'aqueduc algérien de Rusicade qui alimentait la *Colonia Veneria Rusicade* (actuelle ville de Skikda), dont le canal est large de 0,40 à 0,60 m pour une hauteur de 0,50 à 0,70 m. Bien que cet aqueduc soit particulièrement bien conservé, sa description est assez succincte et l'auteur⁷¹ signale simplement l'existence de plans inclinés et de puits de rupture de pente sur le parcours de cet aqueduc. Il livre néanmoins quelques informations intéressantes :

58- Ventura Villanueva 1993, 75.

59- Ventura Villanueva 1993, 74, 76, fig. 19, 88, fig. 34-35.

60- Ventura Villanueva 1993, 74, 76, fig. 19.

61- Ventura Villanueva 1993, 77.

62- Ventura Villanueva 1993, 126.

63- Ventura Villanueva 1993, 125-127.

64- Ventura Villanueva 1993, 148.

65- Leveau & Paillet 1976, 76-77.

66- Leveau & Paillet 1976, 76, fig. 44.

67- Leveau & Paillet 1976, 76-77.

68- Leveau & Paillet 1976, 46, 77, 142.

69- Borau 2014-2015, *op.cit.* ; Sillières 1995, 145 et 149-150 ; Jiménez 1973, 281-283, fig. 5.

70- Vertet 1983, 349-369.

71- *Ibid.*

“Ils se présentent comme des cylindres verticaux solidement construits en blocage comme le canal de l’aqueduc. L’extérieur porte un enduit sommaire qui laisse apparaître les pierres et sur lequel ont été tracées des lignes circulaires horizontales. Si les puits sont restés en place, il n’en est pas de même du canal, qui a été souvent déchaussé, et dont les morceaux sont partis à la dérive sur la pente⁷²”.

- Mise en perspective des différents puits de rupture de pente

Si l’on met en perspective les puits des différents aqueducs, on constate une très grande disparité des données, mais on distingue aussi plusieurs points communs (fig. 8 à 10).

D’abord, d’un point de vue morphologique, seul l’aqueduc de l’Yzeron possède des puits quadrangulaires, comme à Autun. Les puits de Cherchell, Rusicade, Cordoue et *Baelo Claudia* sont circulaires.

Si l’on considère les dimensions des ouvrages, l’aqueduc de l’Yzeron possède deux puits de près d’1 m² et un autre plus grand de 2,10 m². Les puits circulaires varient entre 1,10 et 2,50 m² de diamètre à *Baelo Claudia* et à Cordoue, alors qu’ils mesurent près de 13 m² à Cherchell et 9 m² à Autun.

Les profondeurs sont impressionnantes puisque les aqueducs de Cordoue ou de Lyon peuvent dépasser les 6 m et atteindre jusqu’à 10 m. À Lyon, la différence de niveau entre les canalisations amont et aval est estimée à 2,50 m. Ces chiffres sont tout à fait comparables à ceux d’Autun (3 m) alors qu’à Cherchell, elle ne dépasse pas 0,70 m et, a contrario, à Cordoue, 5 m.

Dans certains cas, le puits est plus profond que le canal aval notamment à Cherchell (1,90 m), Lyon (1,45 m) et *Baelo Claudia* (1,25 m). C’est également la restitution qu’en propose J. Roidot-Deléage⁷³ pour Autun. Une particularité remarquable s’observe sur les puits de Cordoue munis de poutres transversales contribuant à ralentir la chute d’eau.

Si l’on observe le nombre de puits et le contexte topographique, les aqueducs de Lyon et de Cordoue constituent les meilleurs points de comparaison avec l’aqueduc de Montjeu. Pour le premier, J. Burdy⁷⁴ estime qu’il existait d’une part une cascade de 50 puits sur un premier tronçon (branche de Grézieu) et d’autre part, 7 puits sur le second tronçon (branche de Vaugneray). Pour l’aqueduc espagnol, le profil en long⁷⁵ est tout à fait semblable à l’exemplaire autunois, en raison de contextes topographiques analogues. La cascade de Valdepuentes, composée de 47 puits, est installée sur une pente abrupte de 33 %.

- Spécificités des puits de rupture de pente de l’aqueduc de Montjeu

À l’issue de ce premier tour d’horizon, il ne semble pas exister de puits types et de cascades standardisées dans l’Empire romain, mais des structures conçues sur le même principe et avec des procédés similaires qui s’adaptent aux conditions locales en fonction du contexte topographique et/ou hydrologique et à l’architecture



Fig. 10. Puits de rupture de pente en amont du pont Chorrera de l’aqueduc de Punta Paloma (cl. L. Borau).

72- Vertet 1983, 358.

73- Roidot-Deléage, s.d., I, planche n°71.

74- Burdy 2002, 130-131.

75- Ventura Villanueva 1993, 137 ; León et al. 2008, 291, fig. 303.

générale de l'aqueduc (proximité d'un pont notamment). Ce premier constat soulève la question des transferts des modèles qui doit encore être approfondie.

En l'état actuel des connaissances, les exemplaires autunois apparaissent comme les plus imposants parmi les puits de rupture de pente connus du monde romain avec une superficie de 9 m² et un volume impressionnant qui dépasserait 50 m³ (fig. 6 et 9). Bien sûr, il ne faut pas envisager des puits remplis intégralement mais plutôt des structures capables de supporter la chute d'eau de plus de 3 m entre les deux canaux. Le terme de cascade prend ici tout son sens. Cet apparent "surdimensionnement", déjà évoqué par H. Chanson⁷⁶, est à mettre en relation avec la pluviométrie de la région autunoise et la quantité d'eau fournie par les sources et donc transportée par l'aqueduc, qui doit fortement varier en fonction des saisons. Le zèle des constructeurs par cet "excès" de prudence témoigne en tout cas de leur savoir technique. Si les Romains ne maîtrisaient pas le calcul des débits exacts comme nous le faisons aujourd'hui⁷⁷, ils savaient adapter la plupart du temps les structures aux volumes d'eau ou apporter des améliorations comme en témoigne l'exhaussement du canal de l'aqueduc de Nîmes par exemple⁷⁸. Ainsi, l'approche étant empirique, les ingénieurs prennent des marges de précaution énormes.

Aujourd'hui, la construction d'une telle cascade dans la capitale de cité apparaît comme une tâche colossale. L'emprise au sol hors tout d'un puits est estimée à 38 m² et cet imposant dispositif se répète une vingtaine de fois. La réalisation de ce projet a donc nécessité un important investissement financier, mais celui-ci doit être compensé par la faible longueur de l'aqueduc qui ne mesure pas plus de 6 km. En comparant cet ouvrage à celui de Nîmes de 50 km de longueur, du Gier à Lyon atteignant 96 km ou encore de Carthage dépassant les 100 km, sans compter leurs différents ouvrages d'art (arches, ponts, siphons), la construction de la cascade d'Autun apparaît comme une entreprise impressionnante mais comparable à tout "travail de Romains".

Cette cascade témoigne plutôt du savoir-faire des concepteurs, au même titre que l'édification des ponts-aqueducs. Ce sont des ingénieurs qui ont élaboré la planification des puits, en utilisant des normes constructives qu'ils connaissent tout en s'adaptant à des contextes spécifiques. D'ailleurs, l'analyse de l'ouvrage suggère que la structure est édifiée en fonction de repères en plan : en effet, l'axe de l'aqueduc constitue le centre du puits et les piédroits forment les parements internes des murs de renforts. Ces derniers délimitent l'emprise du puits. Ainsi, la construction de la structure pouvait s'effectuer à partir du plan établi au sol et suivant ces différents repères. En outre, les dimensions sont normalisées et les constructeurs savaient par exemple que le côté du puits correspondait à la différence de hauteur entre la base du canal amont et le sommet du canal aval soit 3 m. On ignore si plusieurs équipes travaillaient simultanément, mais l'établissement du tracé et de la cascade en particulier, a nécessité l'intervention préalable d'un arpenteur habile qui réglait le positionnement de chaque puits et les pentes des canaux intermédiaires. Nous ne disposons d'aucune information sur ces derniers. Mais au vu des observations de terrain (fig. 11), l'existence de canaux de plan incliné semble plausible.

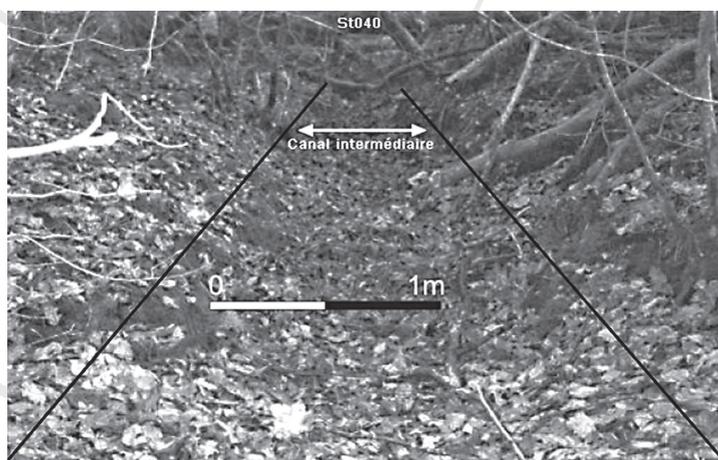


Fig. 11. Vue du canal intermédiaire entre les puits de rupture de pente St 040 et St 041 (cl. L. Borau).

76- Chanson 2002, 9.

77- Dans son traité, Frontin expose précisément la manière de calculer les débits d'eau fournie par les aqueducs de Rome, à la fin du 1^{er} s. p.C. (Fron., *Aq.*, 34.35).

78- Fabre et al. 2000, 256.

Si le travail de terrassement et de décaissement préparatoire dans le granite est considérable, il a permis d'extraire des matériaux de construction, ce qui amoindrit également les coûts. Cette pratique courante a été observée sur l'aqueduc de Fréjus⁷⁹ par exemple. Cela nous amène à considérer l'environnement immédiat de l'aqueduc. Il est implanté sur un socle majoritairement granitique et, naturellement, les constructeurs ont taillé les moellons dans cette roche. Les grès sont employés dans le comblement de la tranchée de fondation du canal. Cependant, les lieux d'extraction, sans doute proches, n'ont pas été localisés⁸⁰. Enfin, l'argile verte observée dans la tranchée de fondation, provient du plateau d'Antully proche.

L'emploi de matériaux locaux est confirmé par des analyses pétroarchéologiques des mortiers réalisées en 2010⁸¹. Parmi les dix échantillons prélevés sur des points précis de l'aqueduc, le prélèvement PRL5 provenant du cuvelage de l'aqueduc St 038, a révélé la présence de quatre couches de mortier de tuileau, alors que trois seulement étaient visibles à l'œil nu. Sur la maçonnerie du canal était appliquée une première couche de mortier de tuileau, de 0,02 m d'épaisseur, comportant des fragments millimétriques de terre cuite et de calcaire. Au-dessus, la seconde couche de 0,015 m d'épaisseur, est dépourvue de calcaire. La troisième couche s'apparente à un simple mortier malgré quelques inclusions de terre cuite micrométriques, recouverte d'un ultime enduit de lissage très riche en chaux de l'ordre du millimètre. Analysé en microscopie optique en transmission, ce prélèvement de mortier de tuileau comporte très peu de quartz, de micas et de feldspath et essentiellement de la terre cuite. Son broyage fin assure une meilleure efficacité du mortier de tuileau et la bonne qualité de la chaux augmente la dureté de celui-ci. Cet exemple montre clairement la technique d'installation et les différences entre chaque couche d'imperméabilisation du cuvelage. De plus, deux échantillons de mortier jaune provenant du contrefort occidental et du mur nord du puits de rupture de pente St 039 ont également été prélevés et leur analyse démontre qu'ils sont identiques. L'analyse microscopique révèle la présence de quartz, de feldspaths, de micas et de chaux. Pour F. Rivière : "nous sommes en présence d'une très bonne maîtrise dans la conception du liant : quasi-absence de nodules de chaux, recette bien maîtrisée et granulat bien trié⁸²". Ainsi, ces analyses confirment l'origine locale des matériaux notamment le sable quartzo-feldspathique de type arène granitique, présent sur le parcours de l'aqueduc. L'étude de ces premiers éléments révèle ainsi la bonne qualité du gâchage, le respect des proportions et du choix des matériaux (homogénéité de la granulométrie du sable, broyage du tuileau)⁸³ et l'homogénéité du travail. La proximité de la voie d'Autun à Lyon, près du domaine de Montjeu, devait faciliter l'approvisionnement de certains matériaux étrangers au secteur considéré, en particulier la chaux.

Enfin, l'examen des abords de la cascade a mis en évidence un fossé linéaire dépassant les 3 m de largeur, parallèle à l'aqueduc sur sa bordure occidentale. Il pourrait s'agir d'une tranchée d'essai pour l'implantation du canal, d'une dérivation lors de travaux dans le conduit, ou alors d'une tranchée postérieure à l'époque romaine (liée à une carrière ou une minière par exemple). À titre de comparaison, P. Leveau et J.-L. Paillet⁸⁴ signalent la présence d'une canalisation de drainage parallèle à l'aqueduc de Cologne.

CONCLUSION

Ces recherches récentes ont à la fois contribué à rectifier certaines données du XIX^e s. et à établir un nouveau plan type d'un puits de rupture de pente, mais aussi à proposer une nouvelle image de cette cascade en examinant son emprise au sol et ses volumes.

Certes, de nombreuses incertitudes demeurent. Pour l'heure, on ne se risquera pas à affirmer comme H. Chanson que "les ingénieurs romains ont conçu des cascades de puits de rupture très fiables, qui furent utilisées pendant plusieurs siècles⁸⁵". Seules des recherches de terrain pourraient confirmer l'utilisation sur le

79- Gébara *et al.* 2002, 161.

80- Cette hypothèse est confirmée par les fouilles de 2006 : l'aqueduc se situe à la limite des socles granitiques et gréseux, matériaux employés dans la canalisation.

81- Rivière 2010, 204-210.

82- Rivière 2010, 207.

83- Rivière 2010, 208 ; Rivière & Surgent 2011, 32-39.

84- Leveau & Paillet 1976, 142.

85- Chanson 2002, 8.

long terme de ces structures complexes. On ignore par exemple si ces puits ont été utilisés, entretenus régulièrement, voire réparés pendant plusieurs siècles. On ne connaît pas non plus le réel impact des invasions du III^e s. sur ces ouvrages, rapporté dans le Panégyrique de Constance en 298⁸⁶. Les traces de réparation ne sont pas perceptibles sur les sections dégagées. Comme en témoignent les chercheurs D. Murphy et M. Mengel⁸⁷, l'absence de fouilles reste un problème pour appréhender ces dispositifs de ralentissement. Si on ne doute pas de leur efficacité, le faible nombre d'aqueducs dotés de tels aménagements doit néanmoins nous interpeller.

En outre, la question de la datation de l'aqueduc de Montjeu et donc de la cascade de puits de rupture de pente reste délicate en l'absence de nouveaux fossiles directeurs. Nous avons envisagé l'hypothèse⁸⁸ selon laquelle le second aqueduc (dit de Montdru) pourrait avoir été construit à l'époque augustéenne, peut-être au moment de la fondation de la ville. Puis, l'aqueduc de Montjeu viendrait se raccorder à ce premier réseau, à l'époque flavienne, datation fournie par une monnaie découverte au XIX^e s. dans la maçonnerie du quatorzième puits de la cascade⁸⁹. Les datations des autres aqueducs romains munis de tels dispositifs ne peuvent que fournir une fourchette chronologique durant laquelle cette technologie se développe⁹⁰. Ainsi, l'aqueduc de Valdepuentes est construit à l'époque augustéenne⁹¹ alors que l'installation des puits de rupture de pente de l'aqueduc de Chercell daterait de la première moitié du II^e s. et correspondrait à la rectification du tracé d'un premier aqueduc édifié au I^{er} s.

L'élaboration d'études comparatives que nous cherchons à développer dans nos travaux permet de renouveler la question des techniques de nivellement des aqueducs. Dans ce cadre, l'étude des puits de rupture de pente est cruciale. Pour l'heure, ces résultats ne constituent qu'une première étape à l'analyse de ces escaliers hydrauliques et cette recherche, qui en est encore à ses balbutiements, mériterait d'être poursuivie afin de mieux comprendre ces aménagements complexes qui peuvent s'apparenter à de véritables ouvrages d'art mais souterrains...

Bibliographie

- Babcock, R. W. et R. Walton, éd. (2008) : *World Environmental and Water Resources, Actes du congrès de Honolulu, 13-16 mai 2008*, ASCE-EWRI, Reston.
- Bailhache, M. (1983) : "Étude de l'évolution du débit des aqueducs gallo-romains", in : Boucher, éd. 1983, 19-49.
- Bermond, I. (2005) : "L'aqueduc de l'agglomération antique de Balaruc-les-Bains (Hérault)", in : Fabre et al. éd. 2005, 35-48.
- Borau, L. (2003) : *Les systèmes d'adduction et d'évacuation d'eau à Autun à l'époque antique*, mémoire de maîtrise, Université Paris-Sorbonne.
- (2009) : "Nouvelle étude de l'aqueduc gallo-romain de Montjeu à Augustodunum", *RAE*, 58, 461-476.
- (2010) : *Les structures hydrauliques chez les Éduens à l'époque antique. Les sites de Bibracte et d'Augustodunum-Autun. Analyse complémentaire des sites éduens de Bourgogne*, thèse de doctorat, Université Paris-Sorbonne.

86- Panégyrique latin, V (4).

87- Murphy & Mengel 2000, 157.

88- Nous tenons à préciser qu'il ne s'agit que d'une hypothèse de travail. L'aqueduc de Montdru présente certaines caractéristiques : une faible longueur, des dimensions modestes, une construction simple, la présence de regards en bois. Il pourrait correspondre au premier système d'alimentation en eau de la ville romaine, réalisé sans doute à faible coût. Cet aqueduc installé avant la construction du rempart et, comme le suppose C. Goudineau (Goudineau 2002, 78-79), dans les remblais supportant les terrasses de la ville, parviendrait jusqu'au *castellum divisorium* édifié intra-muros. Puis, les besoins d'eau grandissant, de nouvelles sources suffisamment abondantes sont choisies : il s'agit de Montjeu. Ce serait donc à l'époque flavienne, période d'embellissement de la ville, que les travaux seraient entamés dont témoignerait d'ailleurs le dépôt de fondation (Borau 2010, 197-200).

89- Fontenay 1889, 101.

90- Les aqueducs de l'Yzeron à Lyon, de Ruscade et de *Baelo Claudia* ne sont pas datés.

91- Ventura Villanueva 1993, 145-151.

- Boucher, J.-P., éd. (1983) : *Journées d'études sur les aqueducs romains. Lyon, 26-28 mai 1977*, Études anciennes, Paris.
- Burdy, J. (1986) : "Mille regards sur l'aqueduc du Gier", *Bulletin des musées et monuments lyonnais*, 7, 353-400.
- (2002) : *Les aqueducs romains de Lyon*, Lyon.
- Chanson, H. (2002) : "Certains aspects de la conception hydraulique des aqueducs romains", *La houille blanche*, 6-7, 1-16.
- (2008) : "The hydraulics of Roman aqueducts: what do we know? Why should we learn?", in : Babcock & Walton, éd. 2008, 1-16.
- Coutelas, A. (2009) : *Le mortier de chaux*, Paris.
- Delfour, J. et J. Arène (1991) : *Notice explicative de la feuille Autun au 1/50000^e*, Carte géologique de la France 551, Orléans.
- Fabre, G., J.-L. Fiches et J.-L. Paillet [1991] (2000) : *L'aqueduc antique de Nîmes et le pont du Gard. Archéologie, géosystème et histoire*, 2^e éd. revue et augmentée, Paris.
- Fabre, G., J.-L. Fiches et P. Leveau (2005) : "Recherches récentes sur les aqueducs romains de Gaule méditerranéenne", in : Fabre et al., éd. 2005, 5-12.
- Fabre, G., J.-L. Fiches et P. Leveau, éd. (2005) : *Aqueducs de la Gaule méditerranéenne*, Gallia 62, Paris.
- Ferjaoui, A., J.-M. Paillet, C. Darles, J.-M. Fabre, J. Mahoudeau, E. Philippe et A. Vernhet (à paraître) : *L'approvisionnement en eau de Zama : étude archéologique et historique. Résultats préliminaires des campagnes 2002 à 2004*.
- Fiches, J.-L. (2008) : "Les aqueducs romains, des objets archéologiques complexes et singuliers", in : Guimier-Sorbets 2008, 79-87.
- Fontenay, H. de (1889) : *Autun et ses monuments*, Autun.
- Galletier, É. [1952] (2003) : *Panegyriques latins*, I-V, Paris.
- Gébara, C., J.-M. Michel et J.-L. Guendo (2002) : *L'aqueduc romain de Fréjus*, RAN Suppl. 33, Montpellier.
- Germain de Montauzan, C. (1909) : *Les aqueducs antiques de Lyon. Étude comparée d'archéologie romaine*, Paris.
- Giorgetti, D. et I. Riera, éd. (2002) : *Atti del convegno internazionale su metodologie per lo studio della scienza idraulica antica, Ravenna, 13-15 maggio 1999*, In Binos Actus Lumina I, La Spezia.
- Goudineau, C. (2002) : *Autun antique*, Guides archéologiques de France, Paris.
- Grézet, C. (2006) : "Nouvelles recherches sur les aqueducs d'Aventicum", *Bulletin de l'Association Pro Aventico*, 48, 49-106.
- Grimal, P., éd. [1947] (2003) : *Frontin, Les aqueducs de la ville de Rome*, Paris.
- Guhur, F. (1997) : *Étude hydrogéologique préalable à la mise en place des périmètres de protection des captages alimentant la ville d'Autun (71)*, mémoire inédit, École nationale supérieure de Géologie.
- Guimier-Sorbets, A. M. (2008) : *L'eau. Enjeux, usages et représentations*, Colloque de la Maison René-Ginouvès 4, Paris.
- Jaccotey, L. (2006) : "L'aqueduc d'Arcier", in : *De Vesontio à Besançon, la ville s'expose*, catalogue d'exposition, Neuchâtel, 83-84.
- Jansen, G. C. M., éd. (2000) : *Cura aquarum in Sicilia, Proceedings of the Xth International Congress on the History of Water Management and Hydraulic Engineering in the Mediterranean Region, Syracuse, 16-22 may 1998*, BABesch Suppl. 6, Louvain.
- Jeancolas, L. (1983) : "Présentation des aqueducs antiques de Lyon (problèmes anciens-observations nouvelles)", in : Boucher, éd. 1983, 179-205.
- Jiménez, A. (1973) : "Los acueductos de Bellone Claudia (Bolonía, Cádiz)", *HABIS*, 4, 273-293.
- León, P., R. Hidalgo, C. Márquez et A. Ventura (2008) : *Arquitectura y urbanismo. Arte romano de la Bética*, Sevilla.
- Leveau, P. (2008) : "Conduire l'eau et la contrôler : l'ingénierie des aqueducs romains", in : Molin, éd. 2008, 132-163.
- Leveau, P. et J.-L. Paillet (1976) : *L'alimentation en eau de Caesare de Maurétanie et l'aqueduc de Cherchell*, Paris.
- Molin, M., éd. (2008) : *Archéologie des techniques du monde romain*, Paris.
- Murphy, D. et M. Mengel (2000) : "The stair step structure at Andriake, Turkey. Ancient mill or water cascade?", in : Jansen, éd. 2000, 155-157.
- Paillet, J.-L. (2007) : "Réflexions sur la construction du specus des aqueducs antiques", *Africa*, 3, 21-36.
- Provost, A. et B. Leprêtre (2002) : "L'aqueduc romain de Carhaix (Côte-d'Armor-Finistère) (France)", in : Giorgetti & Riera, éd. 2002, 222-235.
- Provost, A., B. Leprêtre et E. Philippe (2013) : *L'aqueduc de Vorgium/Carhaix (Finistère). Contribution à l'étude des aqueducs romains*, Gallia Suppl. 61, Paris.
- Rivière, F. (2010) : "Étude technique et pétroarchéologique des liants architecturaux de l'aqueduc de Montjeu à Autun (Saône-et-Loire)", in : Borau 2010, 204-210.
- Rivière, F. et M. Surgent (2011) : "Le chantier de l'aqueduc de Traslay à Bourges. Dernières recherches et apport d'une étude pétroarchéologique des mortiers ?", *Archéopages*, 33, 32-39.
- Roidot-Deléage, J. (s.d.) : *Recueil de planches manuscrites (xix^e siècle)*, Bibliothèque de la Société éduenne, Autun.
- Sillières, P. (1995) : *Baelo Claudia, une cité romaine de Bétique*, Collection de la Casa de Velázquez 51, Madrid.
- Trevor Hodge, A. (2002) : *Roman aqueducts and water supply*, Liverpool.
- Ventura Villanueva, A. (1993) : *El abastecimiento de agua a la Córdoba romana, I, El acueducto de Valdepuentes*, Monografías 197, Córdoba.
- Vertet, H. (1983) : "Observations sur les aqueducs de Ruscade (Algérie)", in : Boucher, éd. 1983, 349-369.
- Veyrac, A. (2006) : *Nîmes romaine et l'eau*, Gallia Suppl. 57, Paris.
- Vignier, F., M. Blondel, R. Chapuis, G. Taverdet et J.-P. Collinet (1985) : *Bourgogne*, Encyclopédies régionales, Le Puy.