

Certains aspects de la conception hydraulique des aqueducs romains

Some Aspects of the Hydraulic Design of Roman Aqueducts

par Hubert CHANSON

Professeur en Mécanique des Fluides, Hydraulique et Sciences de l'Environnement
Department of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane QLD 4072, Australie

The Roman aqueducts were large water supply systems delivering water for public health usage. However little is known on the hydraulic design of the aqueducts. The Roman engineers, contemporary of Hero of Alexandria, had a strong expertise and experience in hydraulic engineering. Several regulations basins were found along the aqueducts. It is proposed that the operation was based upon a dynamic regulation principle. Associated issues are discussed. Two types of major hydraulic structures were also built : dropshaft cascades and culverts. The hydraulic engineers who designed these structures have a sound knowledge and understanding of basic hydraulics. Who were they ? Although we do not know, the writer is impressed by their technical expertise. They knew more than modern hydraulic engineers.

INTRODUCTION

Les aqueducs romains étaient des systèmes d'alimentation en eau des grandes villes, à l'usage des thermes et latrines, principalement (HODGE 1992, FABRE *et al.* 1992, 2000). Les aqueducs romains consistaient principalement en de longues sections enterrées, ou semi-enterrées, qui suivaient les lignes de niveau, avec une faible pente longitudinale, de l'ordre de 1 à 3 m de dénivellation par kilomètre, voir moins (0,24 m/km à Nîmes) (*fig. 1*). Plusieurs furent utilisés pendant des siècles, et quelques uns sont toujours en usage (ex. Carthage, CLAMAGIRAND *et al.* 1990 ; Mons à Fréjus, VALENTI 1995a, b). Leur construction fut une tâche gigantesque, souvent conduite par l'armée, sous la direction d'ingénieurs militaires, experts en hydraulique. Le coût d'un aqueduc était extravagant, en comparaison de leur faible débit (moins de 400 L/s en général) : c.a.d., de l'ordre de 1 à 3 millions de sesterces par kilomètre en moyenne (ex. FEVRIER 1979, LEVEAU 1991), ce qui se traduirait, de nos jours, par 140 à 420 millions de francs par km. Pour comparaison, la construction d'un pipeline d'eau en Australie (Tarong, long de 70 km, débit : 0,9 m³/s) a coûté 800 000 francs par kilomètre en 1994 !

Bien que de nombreuses ruines existent toujours (ex. ASHBY 1925, RAKOB 1974, BURDY 1996), on connaît très mal l'ingénierie hydraulique des aqueducs. Il a été suggéré que les ingénieurs romains n'avaient pas compris les principes de conservation de masse ni de quantité de mouvement (GARBRUCHT 1987, HODGE 1992). Cependant, les

grands aqueducs romains, en Gaule et en Afrique du Nord, furent construits à l'époque de, ou après Héron d'Alexandrie. Héron connaissait les principes de conservation de masse et de quantité de mouvement, et sa renommée était telle, que ses travaux ont pu influencer les ingénieurs. Dans cet article, l'auteur va démontrer que les ingénieurs romains avaient fait preuve de bons sens technique, même d'innovations, dans la conception hydraulique des aqueducs, avec des systèmes sophistiqués tels que les bassins de régulation, les cascades de puits de rupture, et les ponceaux.

HYDROLOGIE ET OPÉRATION DE DEUX AQUEDUCS

Hydrologie

L'hydrologie d'un bassin versant est l'étude de la relation entre les précipitations et les débits, prenant en compte les données climatiques et la géologie du bassin. Une étude hydrologique, plus ou moins poussée, est indispensable dès le début de la mise sur pied des projets de retenues en eaux, de drainage, d'irrigation et de distribution d'eau comme un aqueduc. L'hydrologie de deux bassins versants alimentant deux anciens aqueducs a été documentée récemment : la source de l'Eure à Uzès, alimentant l'aqueduc de Nîmes, et la source de Gorze, alimentant l'aqueduc de Gorze (Metz). Une telle comparaison est pertinente. Ces deux aqueducs étaient parmi les plus grands aqueducs, en Gaule et en Germanie, avec ceux de



A

B



C



Figure 1 : Exemples d'aqueducs romains.

(A) Aqueduc de Mons (Fréjus) : les Arches de Sainte Croix, en aval du Château Aurelien, dans le Parc Municipal (flot de la droite vers la gauche) (Photographie prise en septembre 2000) – Long de 40 km, l'aqueduc de Mons à Fréjus comportait une section à forte pente à Callian (une dénivellée de 100 m sur 1 km) et au moins un régulateur (trop-plein) en aval de la source.

(B) Aqueduc du Gier (Lyon) à Mornant – Vue vers l'amont de la conduite semi-enterrée à flanc de coteau, au premier plan, à droite, avec le pont du Mornantay en arrière plan (Photographie prise en juin 1998) – Long de 86 km, l'aqueduc du Gier, ou du Pilat, comptait près de mille regards (dénivellée totale de 94 m sur 200 m).

(C) Aqueduc de Brévenne (Lyon) à Biternay : conduite semi-enterrée à flanc de coteau, vue intérieure en regardant vers l'amont (Photographie prise en septembre 2000) – Long de 70 km, l'aqueduc de Brévenne était équipé de plusieurs chutes à coursier lisses. Par exemple, à Courzieu (dénivellée de 44 m sur 200 m), à Chevinay (dénivellée de 87 m sur 250 m).

Lyon et de Cologne, et ils avaient des caractéristiques très similaires. Ils étaient équipés de canaux de grande largeur (1,2 m à Nîmes, 0,85 à 1,1 m à Gorze), et chaque aqueduc était alimenté par une source naturelle, avec un bassin versant de l'ordre de 45 à 60 km² de superficie (*tableau 1*). De plus, les deux aqueducs comportaient un pont-aqueduc de taille monumentale : le Pont du Gard, long de 360 m, 48,3 m de hauteur, et le Pont sur la Moselle, long de 1 300 m, haut de 30 m. Deux autres aqueduc, celui de Mons à Fréjus, et celui du Mont d'Or à Lyon, sont listés dans le *tableau 1*.

De nos jours, les deux sources sont toujours en activité. La *figure 2* montre le débit moyen journalier pour la source de Metz. Les débits ont été mesurés à l'arrivée à Metz. Ils ne prennent pas en compte les débordements, sur les déversoirs, ou trop-pleins, installés entre la source et Metz. On estime qu'il y a des débordements pour des débits supérieurs à 116 L/s.

1. La Source des Bouillons est utilisée pour l'alimentation en eau de la ville de Metz. Les débits sont été mesurés à l'arrivée à Metz. Ils ne prennent pas en compte les débordements, sur les déversoirs, ou trop-pleins, installés entre la source et Metz. On estime qu'il y a des débordements pour des débits supérieurs à 116 L/s.

Tableau 1. Comparaison entre les aqueducs romains de Nîmes, Gorze (Metz), Mons (Fréjus) et Mont d'Or (Lyon).

	Gorze (Metz)	Nîmes	Mons (Fréjus)	Mont d'Or (Lyon)	Remarques
Hydrologie					
Bassin versant (km ²)	58	45-50	130		
Source(s)	source des Bouillons (Gorze)	Eure (Uzés)	sources de la Siagnole (Mons)	(1) source du Thou (2) ruisseau d'Arches	
Période d'étude de la source	1/1997 à 12/1998	7/1967 à 5/1968 & 1/1976 à 12/1978	1/1981 à 12/1993	fin du 20 ^e siècle	
Débit moyen de la source (m ³ /jour)	8 050*	29 600	97 200	(1) 400 (2) 1 000	Données modernes (basées sur des moyennes journalières).
Ecart-type deviation (m ³ /jour)	2 950	--	--	--	Données modernes.
Débit maximum journalier (m ³ /jour)	10 980*	143 400	1 550 000	(1) 1 500 (2) 3 000	Données modernes (basées sur des moyennes journalières).
Débit minimum journalier (m ³ /jour)	1 100	10 800	0	(1) 100 (2) 150	Données modernes.
Hydraulique					
Longueur de l'aqueduc (m)	22 300	49 800	39 400	26 000	
Dénivellation totale (m)	14,19	17	481	372	
Largeur (interne) du canal (m)	1,1 2 × 0,85**	1,2	0,60	0,5	Canal principal.
Débit maximum estimé (m ³ /jour)	15 000	35 000	52 500	10 000	Estimations (?).
Hauteur d'eau maximale (m)	0,92	1,0	possible mise en charge de certaines sections	0,65	Correspondant à la hauteur de l'enduit de mortier de tuileau.
Volume de stockage de l'aqueduc (m ³)	21 200	58 800	--	--	Excluant le pont-aqueduc.
Pont-aqueduc					
Rivière	Moselle	Gardon	--	--	
Hauteur du pont (m)	30	48,3	--	--	Pont sur la Moselle et Pont-du-Gard respectivement.
Longueur du pont (m)	1 300	360	--	--	
Pente du radier du pont-canal ($S_0 = \sin\theta$)	3,9 E-3	7 E-5	--	--	
Largeur interne du pont-canal (m)	2 × 0,85	1,2	--	--	
Bassin de régulation amont – Volume (m ³)	18,0	4,0	--	--	Bassin plein.
Bassin de dissipation aval – Volume (m ³)	4,24	N/A	--	--	Bassin plein.
Usage de l'aqueduc					
Début	AD 100/200	AD 40/80	BC 31/AD 70	BC 20	Estimations (?).
Fin	AD 450/500	AD 350/500	AD 370/470	--	Estimations (?).

* inclus les débordements.

** pont-aqueduc.

Références : FABRE *et al.* (1991, 1992, 2000), VALENTI (1995a,b), LEFEBVRE (1996), BURDY (2002), Etude présente.

fonctionnerait, à pleine capacité, que quelques mois par an. En période sèche, le débit journalier minimum représente moins de 10 % du débit maximum (mois d'octobre, *fig. 2*).

FABRE *et al.* (1991, 2000) (voir aussi BOSSY *et al.* 2000) ont regroupé plusieurs études de la source de l'Eure à Uzès (aqueduc de Nîmes)². Le débit journalier moyen, sur la période d'étude, a été de 343 L/s. Les résultats montrent des variations importantes des débits journaliers. Le débit minimum journalier était de 125 L/s, et le débit maximum journalier était de 1 660 L/s, soit un rapport de 1 à 13 entre minimum et maximum.

VALENTI (1995a) a reporté treize ans de mesures de débits des sources de la Siagnole à Mons (période 1981-1993). Le débit journalier moyen a été de 1,125 L/s. Les résultats montrent des variations importantes des débits journaliers. Le débit minimum journalier était zéro (en août 1986), et le débit maximum journalier était de 17 900 L/s (en avril 1993).

On ne connaît pas les débits anciens qui circulaient dans les aqueducs romains, ni les apports en eau des bassins versants ou même le climat. Dr P. LEVEAU a suggéré à l'auteur que le climat, au sud de la France, différerait entre le début de notre ère et aujourd'hui. Il est, toutefois, plausible que les variations hydrologiques étaient du même ordre de grandeur que de nos jours. A la fin du 20^e siècle, le débit journalier pouvait varier d'un facteur 1 à 10 entre périodes humides et sèches, voire plus à Mons (Fréjus). Pour un même mois, les variations de débits ont été de l'ordre de +/- 35 %, en moyenne, à Gorze (sur deux ans), mais les débits journaliers ont varié entre 40 % et 200 % du débit moyen, au mois d'octobre. C'est à dire, entre 13 L/s et 96 L/s (*fig. 2*).

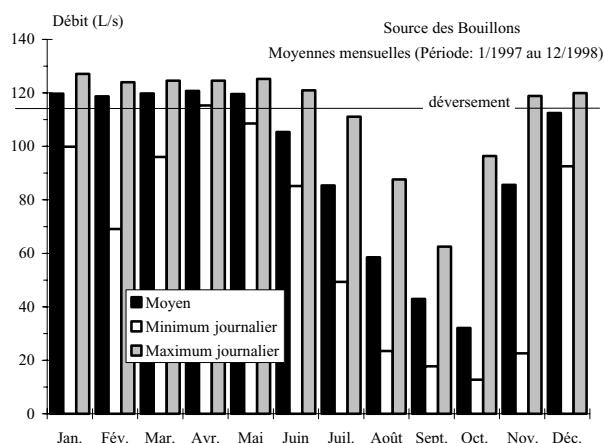


Figure 2 : Débits journaliers de la Source des Bouillons, à Gorze (Moyennes mensuelles pour la période du 1/1997 au 12/1998) (Données : Société Mosellane des Eaux).

L'auteur est convaincu que de telles variations de débits existaient à l'époque romaine, et que ces variations devaient avoir des implications, au niveau du fonctionnement de l'aqueduc, et de la distribution des eaux dans la ville romaine. En particulier, des citernes et bassins devaient exister pour régulariser la distribution d'eau dans la ville. Plusieurs citer-

2. Les débits ont été mesurés à la source, entre juillet 1967 et mai 1968, et entre janvier 1976 et décembre 1978.

nes ont été retrouvées : ex., aux Grands Thermes de Cuicul (ALLAIS 1933) ; à Autun, une citerne été retrouvée Place St Louis, en haut de la ville romaine, près de l'emplacement supposé du castellum, à l'arrivée des aqueducs de Montjeu et Mondru. On a retrouvé, aussi, des grands réservoirs près des prises d'eau des aqueducs du Gier (40 000 m³, Lyon) et de l'Anio Vetus (200 000 m³, Rome), ainsi que dans la ville de Carthage (70 000 m³) (GERMAIN DE MONTAUZAN 1907, p. 83 ; WILSON 1998). Il est aussi envisageable que des systèmes de régulation étaient installés le long d'un aqueduc, pour permettre un réglage en ligne du débit (ex. commande par l'amont, commande par l'aval).

Bassins de régulation

Bien que peu de régulateurs aient été retrouvés (*tableau 2*), deux bassins sont bien documentés et il est possible de reconstituer leur mode d'opération (*fig. 3*). A Ars-sur-Moselle, un bassin de régulation a été mis en évidence en amont du pont-aqueduc sur la Moselle (LEFEBVRE 1996). On notera qu'un bassin de dissipation d'énergie a aussi été retrouvé en aval du pont-aqueduc (LEFEBVRE 1996, CHANSON 2000a). Sur l'aqueduc de Nîmes, trois bassins de régulation ont été mis en évidence (BOSSY *et al.* 2000), avec, en particulier, un bassin en amont du Pont-du-Gard (FABRE *et al.* 1991). Les deux bassins de régulations, positionnés en amont du pont-canal (Ars-sur-Moselle, Pont-du-Gard), avaient une conception très proche. Chaque régulateur consistait en un bassin rectangulaire, un déversoir de trop-plein, équipé d'une vanne, et en une série de vannes contrôlant l'écoulement vers le pont canal³ (*fig. 3*).

L'auteur fait l'hypothèse de travail que les vannes de contrôle, installées le long du canal, étaient des vannes de fond, ou vanne plate levante (*sluice gate*), et que les vannes installées dans les conduits de trop-plein étaient des déversoirs (*overflow gate*). Ce raisonnement est consistant avec l'utilisation moderne de ces types de vannes. On rappelle que le débit, sur un déversoir, est proportionnel à la hauteur de lame d'eau, à la puissance 3/2 :

$$Q \propto \sqrt{(H-h)^3} \quad \text{Déversoir [1]}$$

où Q est le débit, H est la charge spécifique amont et h est la hauteur du déversoir. Par contre, le débit sous une vanne de fond (*vertical sluice gate*), est proportionnel à la racine carrée de la hauteur d'eau amont :

$$Q \propto \sqrt{H} \quad \text{Vanne de fond [2]}$$

Le débit, sur un déversoir, varie rapidement en réponse à une modification de la hauteur d'eau amont, alors que le débit, sous une vanne de fond, est peu sensible à des variations modérées de la hauteur d'eau amont.

Ces hypothèses sont reportées sur la *figure 3*, et les lignes d'eau correspondantes sont indiquées en pointillé. Pour chaque bassin de régulation, l'auteur a considéré le mode d'opération des vannes de fond alimentant le pont-canal. Les calculs hydrauliques ont été effectués pour des débits compris

3. Des rainures ont été bien mises en évidence dans chaque cas (FABRE *et al.* 1991, LEFEBVRE 1996). A Gorze, le pont-canal consistait de deux canaux parallèles, indiqués sur la *figure 3*. Une telle disposition est unique (LEFEBVRE 1996).

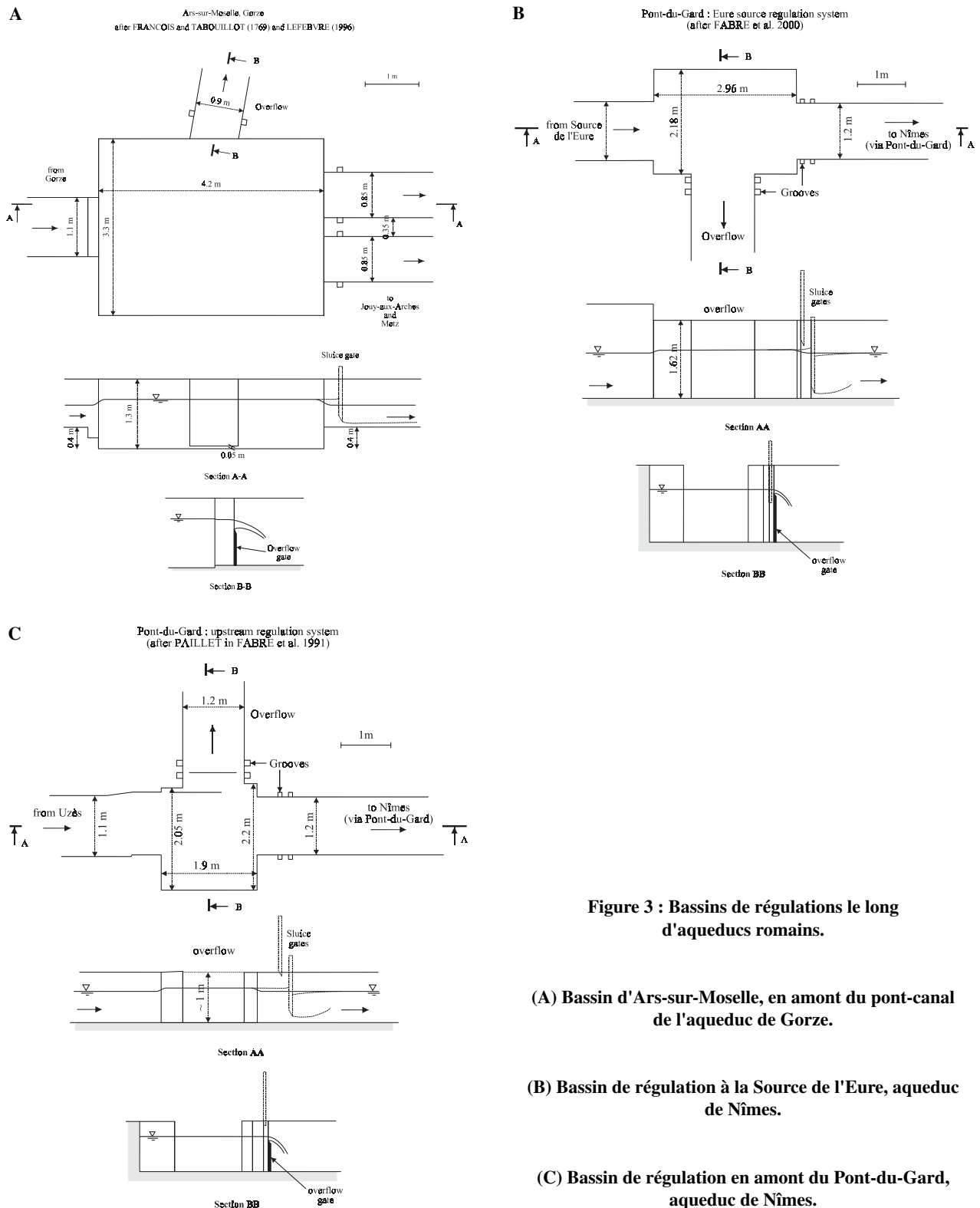


Figure 3 : Bassins de régulations le long d'aqueducs romains.

(A) Bassin d'Ars-sur-Moselle, en amont du pont-canal de l'aqueduc de Gorze.

(B) Bassin de régulation à la Source de l'Eure, aqueduc de Nîmes.

(C) Bassin de régulation en amont du Pont-du-Gard, aqueduc de Nîmes.

entre 10 et 180 L/s à Gorze, et entre 30 et 420 L/s à Nîmes, et pour plusieurs ouvertures de vannes (HENDERSON 1966, CHANSON 1999). Les résultats démontrent que les ouvertures optimales des vannes de fond devaient être comprises entre 2 et 10 cm, à Gorze, et entre 3 et 12 cm, à Nîmes, pour avoir un effet régulateur sur l'écoulement (CHANSON 2000b). Pour des ouvertures plus importantes, les vannes

n'avaient aucun effet sur les lignes d'eau, alors que, pour des ouvertures plus petites, il fallait faire fonctionner le déversoir de trop-plein, pour empêcher des débordements dans le bassin lui-même. En pratique, une régulation fine des débits dans l'aqueduc ne pouvait s'effectuer qu'avec des ouvertures de vannes très faibles (moins de 12 cm). Il fallait, donc, qu'il y ait eu des systèmes de contrôle précis de l'abaissement et

Tableau 2. Bassins de régulations installés dans les aqueducs romains.

Bassin de régulation (1)	Description (2)	Remarques (3)
Segovie (Esp.)	Bassin rectangulaire. Déversoir de trop-plein sur le coté gauche. Vannes de contrôle du déversoir (et probablement du canal).	GREWE (1992). « Caseta frente » en amont du pont-canal.
Ars-sur-Moselle, Gorze (Fra.)	Bassin rectangulaire (4,2 m par 3,3 m, 1,3 m de profondeur) en amont du pont-canal sur la Moselle. Radier 0,4-m en dessous du radier du canal. Déversoir de trop-plein (sur la gauche) avec vanne de contrôle, et vannes de contrôle de l'écoulement vers le pont canal.	LEFEBVRE (1996). Situation : 9 km en amont de <i>Divodurum</i> (Metz). Le pont-canal était équipé de deux canaux prallèles.
Vallée de l'Eure, Nîmes (Fra.)	Bassin rectangulaire (2,96-m par 2,18 m, profondeur : 1,62 m). Déversoir de trop-plein (sur la droite). Vannes de contrôle de l'écoulement vers le pont canal.	BOSSY <i>et al.</i> (2000), FABRE <i>et al.</i> (2000). Situation : 700 m en aval de la source de l'Eure.
Bassin Balazière, Pont-du-Gard, Nîmes (Fra.)	Bassin rectangulaire (1,9-m par 2,1 m). Déversoir de trop-plein (sur la gauche). Vannes de contrôle de l'écoulement vers le pont canal.	FABRE <i>et al.</i> (1991,1992), BOSSY <i>et al.</i> (2000). Situation : en amont du Pont-du-Gard, 34 km en amont de <i>Nemausus</i> (Nîmes).
Lafoux, Nîmes (Fra.)	--	BOSSY <i>et al.</i> (2000) basé sur le travail de J. TESSIER-ROLAND. Situation : à Rémoulins, 27,9 km en amont de <i>Nemausus</i> (Nîmes). Détruit au début du 18 ^e siècle.
Barbegal, Arles (Fra.)	Bassin rectangulaire (3,3 m par 2,3 m). Convergence de deux branches de l'aqueduc, en amont d'arcades alimentant les moulins.	LEVEAU (1996).
Siphon de la Durèze, réservoir de chasse Gier (Fra.)	Chambre rectangulaire (6,4 m par 2,25 m) en amont du siplon de la Durèze. Déversoir de trop-plein dans le mur gauche.	GERMAIN de MONTAUZAN (1908, pp. 105, 209 & 218). Appelé aussi Saint-Genis de Terrenoire. Situation : 53 km en amont de <i>Lugdunum</i> (Lyon).
Mons, Fréjus (Fra.)	Un (ou deux) déversoir(s) de trop-plein dans le mur droit.	VALENTI (1995b, p. 10). Deux déversoirs existent immédiatement en aval des sources de la Siagnole, à Mons, dans une section de l'aqueduc ré-utilisée.

Notes : Gauche = à gauche en regardant vers l'aval ; droite = sur la droite en regardant vers l'aval.

de l'élévation des vannes de fond. On peut envisager que les romains utilisaient des systèmes de cabestans et poulies, pour ce type de contrôle fin⁴.

Formes de la surface libre sur le pont-canal

L'auteur a, de plus, calculé les courbe de remous, en aval des vannes de fond, dans le pont-canal de Gorze et celui de Nîmes, pour plusieurs débits⁵. A Gorze, les résultats indiquent l'existence d'un ressaut hydraulique, ondulé, pour des débits compris entre 8 et 175 L/s. La position du ressaut était fonction du débit, et de l'ouverture de la vanne de fond. Dans ces conditions, il n'est pas surprenant qu'un bassin de dissipation fût installé en aval du pont canal, à Jouy aux Arches (CHANSON 2000a).

4. On rappelle que le déplacement d'une vanne de fond de ces dimensions, est très difficile en opération, à cause de la force de pression s'exerçant sur la vanne, même avec des rainures bien graissées.

5. Calculs mono-dimensionnels d'écoulement graduellement variés, avec une intégration numérique de type explicite (ex. HENDERSON 1966, pp. 126-130 ; CHANSON 1999, pp. 112-113 & 289-294).

Au Pont du Gard, les calculs de lignes d'eau montrent que l'écoulement en aval de la vanne était submergé, et qu'il s'agissait d'un écoulement fluvial dans la grande majorité des cas.

Discussion : quel type de régulation ?

On peut envisager deux types d'usage des régulateurs. En premier, une opération tout ou rien. Deuxièmement, une régulation dynamique des débits.

Dans le premier cas, les vannes de contrôle sont ouvertes en permanence, et le débit de sources transite vers la ville, sans autre forme de « régulation » que les forces de gravité et de frottement aux parois du canal. Les vannes permettaient d'interrompre complètement le débit, pour des réparations, ou même un nettoyage du canal. En effet, FRONTINUS mentionnait l'existence d'équipes de maintenance, à Rome (FRONTINUS, 117⁶). Il insistait pour que les réparations, en dehors de la ville, soient conduites avec

6. Le numéro est celui du paragraphe dans la version Latine (manuscrit de Monte Cassino).

« beaucoup de soin et de célérité ». Il classifiait deux types d'intervention, celles « auxquelles on peut remédier sans changer le cours de l'eau, et d'autres qui exigent qu'on le détourne : c'est, par exemple, lorsqu'il faut travailler dans l'intérieur même du canal » (FRONTINUS, 121). Ceci indique que le débit pouvait être stoppé, au moins pour les aqueducs de Rome, ce à quoi FRONTINUS ajoutait que les travaux devaient être conduits avec « la plus grande célérité, toutes choses étant disposées à l'avance pour que l'eau ne soit arrêtée que pendant le moins de jours possible » (FRONTINUS, 122).

L'interruption du débit pour un nettoyage du canal doit être, aussi, sérieusement considéré. Les problèmes de qualité de l'eau, à l'arrivée en ville, étaient reconnus par les romains (ex. FRONTINUS, VITRUVIUS). Une solution consistait à nettoyer le canal régulièrement. On a retrouvé un nombre conséquent de regards surbaissés, à Carthage et à l'aqueduc du Gier, Lyon (RAKOB 1974, HAMM et LITAUDON 2000). Un regard surbaissé est un puit d'accès au canal, dont le fond est plus bas que le radier du canal. Au Gier et à Oudna, le fond des puits était à peu près 0,3 m en dessous du radier. Bien qu'il y ait des discussions sur l'utilité de ces puits⁷, il est concevable que, une fois le débit stoppé, et le canal vidangé, des équipes de nettoyage accédaient au canal par les regards, et brossaient le radier, guidant les détritiques et l'eau sale vers les puits de collection (c.a.d. les regards surbaissés). Ceux-ci étaient ensuite nettoyés, avant la remise en route du flot. Pour nettoyer un aqueduc comme celui du Gier, à Lyon, il devait y avoir plusieurs dizaines d'équipes, chaque équipe étant en charge d'une section de l'aqueduc, et l'opération de nettoyage se répétant tous les 175 m (distance entre puits surbaissés à Gier). De nos jours, on nettoie un laboratoire de mécanique des fluides de la même manière (ex. à l'Université de Queensland).

Le deuxième type de régulation est une régulation dynamique de l'écoulement, comme cela se fait, aujourd'hui, dans les réseaux de canaux d'irrigation (ex. canal de Provence), et dans les réseaux d'assainissement (CAQUOT 1941, BOUILLOT 1976, CHATZIS et DUPUY 1997). Ce type de fonctionnement est prévu pour que les usagers (la ville romaine) reçoivent le débit prévu, sans qu'il y ait défaillance ni pertes d'eau. Un tel type d'opération, dans un aqueduc romain, devait régulariser le débit en fin de canal, pour satisfaire la demande en eau de la ville, dans la journée, mais aussi stocker l'eau dans le canal, durant la nuit⁸. Pratiquement, ce rôle de stockage du canal est important. A Gorze et à Nîmes, la capacité de stockage maximale était de l'ordre de 20 000 et 55 000 m³ respectivement (tableau 1). En contrepartie, il fallait modifier, fréquemment, l'ouverture des vannes de contrôles, au moins deux fois par jour, ce qui impliquait des équipes d'opérateurs. Il fallait, aussi, avoir une communication régulière entre la ville et les opérateurs de régulateurs. Enfin l'utilisation du canal, pour un rôle de stockage, impliquait forcément que la hauteur d'eau, dans le canal, soit supérieure à la profondeur normale (*normal depth*). De ce fait, un nombre de calculs anciens de débits, se basant sur une hauteur d'eau supposée⁹, sont incorrectes

(ex. BAILHACHE 1977, HAUCK and NOVAK 1987, HODGE 1992).

On notera que les bassins régulateurs de la source de l'Eure, en amont du Pont du Gard et à Ars-sur-Moselle étaient équipés de systèmes de double-vannes (fig. 3). De nos jours, les vidanges de barrages sont toutes équipées d'un tel système. La vanne amont fonctionne avec le principe du tout ou rien : c.a.d. complètement fermée ou ouverte. Cette vanne est utilisée pour assécher la vidange, et effectuer des travaux de maintenance, mais aussi comme 'back up' en cas de problème avec la deuxième vanne. La vanne aval est normalement utilisée pour la régulation fine des débits relâchés dans la vidange. L'auteur suggère que les vannes des bassins de régulation, à Metz et Nîmes, fonctionnaient avec le même principe, renforçant le concept d'une régulation fine des débits dans les aqueducs romains. Ceci est indiqué sur la figure 3.

En résumé, l'utilisation de régulateurs, le long des aqueducs romains, aurait permis de stocker l'eau. Cela impliquait une hauteur d'eau réelle (en usage) supérieure à la profondeur d'eau normale (fig. 4). Ceci est en accord avec les observations d'enduits de mortier de tuileau, montrant des hauteurs (ex. 1 m à Nîmes, 0,92 m à Gorze) bien supérieures aux profondeurs normales pour les débits maxima estimés (ex. $d_0 = 0,55$ m à Nîmes pour 400 L/s, $d_0 = 0,27$ m à Gorze pour 170 L/s), et aussi avec les hauteurs de déposition de calcite à Nîmes.

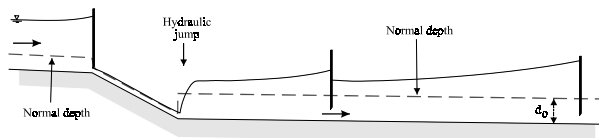


Figure 4 : Forme de la surface libre dans un aqueduc équipé de régulateurs.

Remarques

De nos jours, l'écartement entre régulateurs est déduit de considérations économiques (c.a.d. la balance entre le coût d'un bassin supplémentaire, et une surélévation des berges), de considérations de stabilité hydrodynamique, et de sujétions locales (ex. installation d'un régulateur avec une dérivation). A l'époque romaine, une telle analyse n'existait probablement pas dans ces termes. Le faible nombre de régulateurs, que l'on a retrouvé, suggérerait qu'il y en avait peu. Cependant, pour un contrôle hydraulique optimal, l'auteur estime qu'il devait y avoir un bassin tous les un à cinq kilomètres. De plus, des bassins de régulation devaient être installés près de la source, pour une interruption complète du débit, en amont des chutes raides, pour une régulation par l'amont des écoulements supercritiques, et en amont des ouvrages d'art (tunnel, pont-aqueduc) pour faciliter leur maintenance.

Il y a une discussion ouverte, sur les besoins en eaux d'une ville romaine, et les débits nécessaires. Quoiqu'il en soit, il devait y avoir une relation explicite entre l'offre et la demande en eau. HODGE (1992, p. 464) suggéra une consommation journalière de l'ordre de 200 L/jour/personne, bien qu'il mentionnât aussi le travail d'ESCHEBACH à Pompéi, avançant une consommation individuelle de 500L/jour/per-

7. Bassin d'amortissement, piège à sédiments, ou fosse de nettoyage ? (voir aussi CHANSON 2000a)

8. Dr J.L. FICHES a indiqué à l'auteur que BOSSY *et al.* (2000) avait aussi une telle hypothèse.

9. Se basant sur des dépositions de calcite, ou sur la hauteur de l'enduit de mortier de tuileau.

sonne (HODGE 1992, p. 305). Pour comparaison, aujourd'hui, la consommation en eau journalière est de l'ordre de 240 L/jour/personne, pour la ville de Brisbane, Australie (Ref. : Brisbane City Council, période 1997-98). La famille de l'auteur, 3 personnes, consomme à peu près 400 L/jour (Ref. : Water rate, Brisbane City Council, période Jan-Mar 2000). Il est probable que la consommation en eau d'une ville romaine était inférieure à ces chiffres modernes. Il devait y avoir, aussi, des variations saisonnières importantes, avec une demande forte en période d'été. A Rome, FRONTINUS soulignait qu'« *il faut éviter de réparer en été les canaux mêmes des aqueducs, afin de ne pas ôter l'eau dans la saison où l'on en a le plus grand besoin* » (FRONTINUS, 122).

LES CASCADES DE PUIITS DE RUPTURE

Bien que de nombreux auteurs suggèrent que les aqueducs aient été construits avec des pentes relativement faibles, associées à des écoulements tranquilles, on a démontré l'existence de chutes importantes (CHANSON 2000a). Des exemples, bien documentés, sont regroupés dans le *tableau 3*. On distinguait trois types de chutes : le coursier lisse, le coursier en marches d'escalier, et la cascade de puits de rupture.

Un puits de rupture est, en fait, un puits vertical permettant une chute brutale du radier (*fig. 5*). Une telle disposition est utilisée, de nos jours, dans les réseaux d'assainissement, par exemple, à Paris et à Tokyo. Le puits de rupture est un ouvrage hydraulique associé à une dissipation d'énergie importante. Les ingénieurs romains ont aussi construit des cascades de puits de rupture, c'est à dire des puits installés en série (*fig. 5*). Les cascades de puits permettaient une dissipation effective de fortes charges : par exemple, $DH = 200$ m à Madinat-al-Zhara (Valdepuentes). Ce design avait un record impressionnant, en terme de longévité. Plusieurs cascades de puits furent utilisées pendant des siècles¹⁰. La construction d'une cascade de puits est difficile, avec les nombreux conduits souterrains et puits de raccordement, dans des conditions topographiques délicates (pente raide). Les ingénieurs romains firent des prouesses techniques !

L'auteur a conduit une étude sur modèles physiques de plusieurs puits (*fig. 5*). Les essais ont été effectués pour des pentes de radier, entre puits, comprises entre $S_0 = 0$ (horizontal) et 0,3 (pente raide). Les résultats ont montré une opération satisfaisante des cascades de puits pour tous débits et pentes entre puits, à l'exception d'une plage de débits intermédiaires, pour lesquels le canal aval risque d'être érodé très rapidement. Cette plage de débits intermédiaires peut être calculée analytiquement, en fonction des caractéristiques géométriques du puit et du radier (CHANSON 1998, pp. A1-A7).

Discussion

On distingue deux formes de puits (rectangulaire ou circulaire), et aussi deux familles de cascades en fonction de la pente du canal de raccordement. La plupart des cascades de puits étaient conçues avec des pentes faibles¹¹ du conduit de raccordement entre puits : par exemple, à Autun, à Recret ou

à Cuicul. Par contre, à Charchell et à Valdepuentes, les canaux de raccordements avaient une pente raide, et les puits de rupture opéraient avec les conditions d'écoulement amont supercritique (torrentiel). La pente moyenne était $S_0 = 5\%$ entre puits à Valdepuentes (ex. *fig. 5*) ; à Charchell, un plan incliné raide ($S_0 = 62\%$) précédait chaque puits, se terminant 4,5 m en amont. On notera, de plus, que l'aqueduc de Valdepuentes était équipé d'une cascade, Fuentes de la Teja-Madinat al Zahra¹², qui comportait trois puits avec le canal de sortie perpendiculaire au canal d'amenée (VILLANUEVA 1993, 1996). Cette disposition était rare, quoiqu'il existât peut-être cinq puits de ce type à Montjeu (Autun).

Il faut souligner que les informations sur les puits de rupture, et les cascades de puits, sont parfois contradictoires, voir incorrectes. Par exemple, la plupart des études sur l'aqueduc de Montjeu, Autun reprennent le travail de ROIDOT-DELEAGE (1879 ?) (ex. COQUET 1966, PINETTE et REBOURG 1986, CHANSON 1998). L'auteur est allé sur le terrain, en septembre 2000, et il a étudié le manuscrit de Jean ROIDOT-DELEAGE (1794-1878). Une planche du manuscrit montre 24 puits, mais elle n'indique explicitement qu'un puits de rupture, dont les dimensions sont improbables, physiquement. Le tracé de l'aqueduc ne comprend que deux sections raides : dans la Forêt de Brise cou et à Pierre de Couhard. Au mieux, seuls les puits, numérotés 18, 19, 20, 21, 22, et 24, et peut-être les puits numéro 10 et 23, étaient des puits de rupture¹³. Les dimensions de ces puits sont inconnues, et probablement pas identiques.

Par contraste, l'étude de l'aqueduc de Valdepuentes, à Cordoba, est mieux documentée¹⁴. L'aqueduc a été étudié, en effet, en détail par l'ingénieur S. LOPEZ-CUERVO (1985) et pendant la thèse de Dr VILLANUEVA (1993, 1996). Au moins trois grandes cascades de puits existaient

Conception hydraulique d'une cascade de puits

Il est reconnu que la conception hydraulique d'un aqueduc était une tâche redoutable (GREWE 1992, HODGE 1992). Cependant, peu d'historiens ou d'ingénieurs réalisent les prouesses techniques que nécessitait le design d'une cascade de puits. De nos jours, l'hydraulique des puits de rupture n'est pas enseignée en écoles d'ingénieurs, et les travaux de recherche sont très limités. Ainsi, la base de données internationale Science Citation Index, the Web of Science® ne liste que 5 articles sur le thème des puits de ruptures, publiés entre 1985 et 2000, dans des revues scientifiques avec comité de lecture.

Les ingénieurs romains ont conçu des cascades de puits de rupture très fiables, qui furent utilisées pendant plusieurs siècles. Ils devaient avoir une expérience et un savoir-faire hydraulique extraordinaire.

Sur-dimensionnement des puits de rupture

On a montré que les puits de rupture des aqueducs de l'Yzeron (branche de Vaugneray), de Charchell et de Montjeu étaient surdimensionnés, pour le débit maximum qu'ils transitaient (CHANSON 2000a). Dr P. LEVEAU discutait, avec l'auteur, que ce surdimensionnement n'était pas un problème, ni d'un point de vue économique, ni d'un point de vue esthéti-

10. Par exemple, les cascades de puits de l'aqueduc Valdepuentes (Cordoba) furent ré-utilisées par les Arabes (VILLANUEVA 1993).

11. C'est à dire, caractérisées par des écoulements sous-critiques.

12. En amont du pont sur le ruisseau Valdepuentes.

13. Planche 65, ROIDOT-DELEAGE (1879?). Numéros donnés par ROIDOT-DELEAGE.

14. Appelé aussi Aqua Vetus.

Tableau 3. Chutes (bien documentées) dans les aqueducs romains.

Site, aqueduc (pays) (1)	ΔH (m) (2)	L (m) (3)	$S_o = \sin\theta$ (4)	$Q_{\max}$ (m ³ /jour) (5)	Remarques (6)
<i>Chute à radier lisse</i>					
Gericomio, Marcia (Rome)	21	204	0,11	188 000	
Ponte dell'Inferno, Anio Novus (Rome)	26,4	--	0,011	190 080	
Mola di San Gregoria, Anio Vetus (Rome)	4,1	--	0,16	190 080	
Courzieu II, Brévenne (Fra.)	44	--	0,21	10 000	
Lentilly II, Brévenne (Fra.)	33	--	0,082	10 000	
Chabet Ielouine, Cherchell (Alg.)	12,3	--	0,62	6 600	
Bordj-Djedid, Carthage (Tun.)	--	--	0,37	--	Grandes citernes.
<i>Chutes en marches d'escalier</i>					
Beaulieu (Fra.)	37	--	--	--	Marches plates horizontales.
Chevinay, Brévenne (Fra.)	87	~ 200	0,40	10 000	Marches plates inclinées vers le bas.
Andriake (Turq.)	11	18	0,52	--	Marches en forme de bassin, avec mur de retenue aval.
Chabet Ielouine, Cherchell (Alg.)	19	--	--	6 600	En aval du pont sur l'Oued Bellah.
<i>Cascades de puits de rupture</i>					
Beaulieu (Fra.)	37	--	--	--	
Brisecou, Montjeu (Fra.)	140	770	0,13	--	Puits rectangulaires.
Cerro de los Pinos, Valdepuentes (Esp.)	120	400	0,29	22 000	34 puits circulaires.
Chabet Ielouine, Cherchell (Alg.)	12	32	0,36	6 600	4 puits circulaires.
Grands Thermes, Cuicul (Tun.)	3	85	--	--	4 puits circulaires.
Gunugu (Tun.)	20	--	--	--	4 à 5 puits circulaires.
Madinat-al-Zhara, Valdepuentes (Esp.)	200	--	--	22 000	
Recret, Yzeron (Fra.)	38	490	--	13 000	~ 15 puits rectangulaires.
Vaugneray, Yzeron (Fra.)	22	375	0,058	5 000	~ 8 puits rectangulaires. J. BURDY estimait L = 250 m.

Notes : L : longueur de la chute ; $Q_{\max}$: débit maximum estimé ; ΔH : perte de charge ; (--) : information non disponible.

que. D'une manière similaire, et indépendamment, Mr STRASBERG a indiqué à l'auteur que, à Autun, plusieurs bâtiments et ouvrages de génie civil romains, avaient été surdimensionnés, peut-être pour démonter puissance et prospérité. Par exemple, le théâtre avait un diamètre de 148 m (le plus grand en Gaule romaine) ; l'amphithéâtre mesurait 154 m

par 130 m (de nouveau, le plus grand en Gaule romaine) ; pas moins de 14 routes romaines convergeaient sur Autun ; l'existence de deux aqueducs (REBOURG 1999).

L'auteur reste sceptique sur les raisons qui ont incité à surdimensionner des puits de rupture, ouvrages coûteux et invisibles (car enterrés).

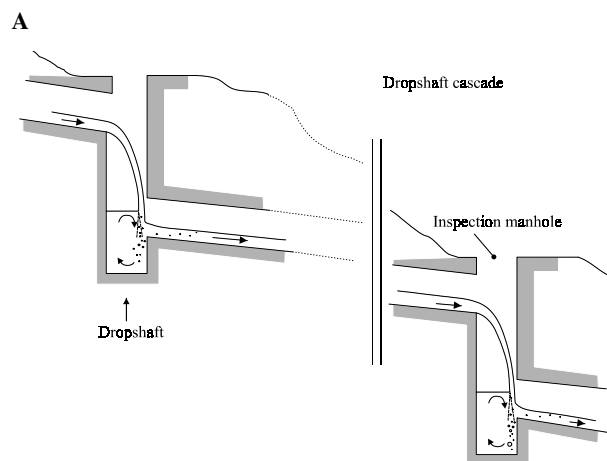


Figure 5 : Puits de rupture romain.

(A) Sketch d'une cascade de puits de rupture de l'aqueduc de Valdepuentes.

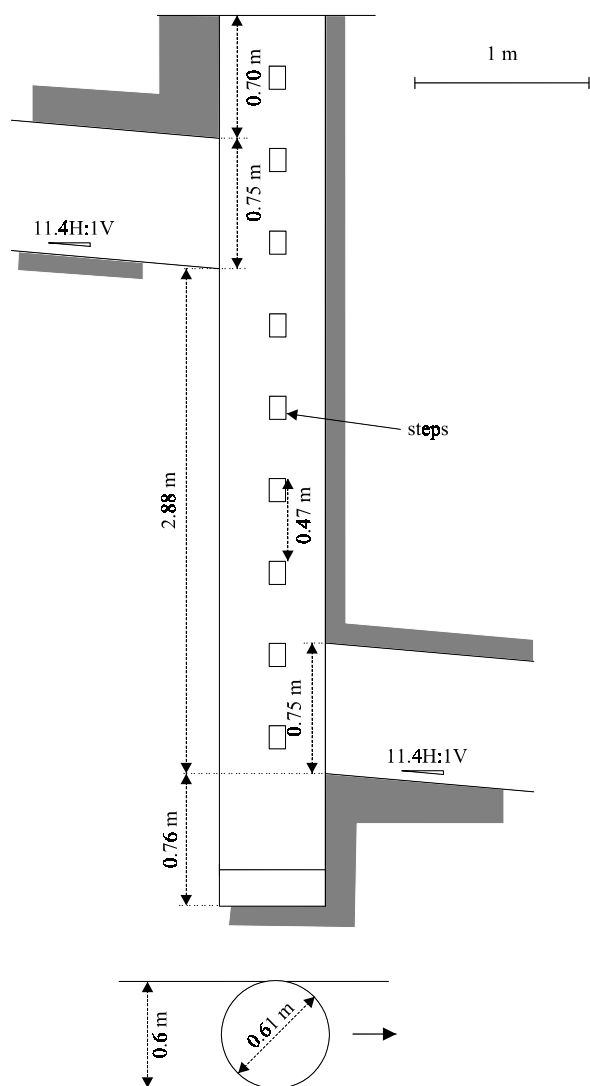
(B) Sketch d'un puit de rupture de l'aqueduc de Valdepuentes.

(C) Modèle physique d'un puit de rupture de l'aqueduc de Valdepuentes.

Ecoulement de la droite vers la gauche, avec écoulement amont supercritique

B

Valdepuentes aqueduct
(Aqua Vetus, Cordoba)
Pozzo resalto No. 11
upstream of Valdepuentes bridge
Fuentes de la Teja-Madinat al Zahra



C



LES PONCEAUX

Un ponceau est un passage couvert, de faible longueur, permettant le passage de l'eau (ex. un ruisseau) sous un talus en remblai. Les romains ont construit de nombreux ponceaux sous leurs routes (BALLANCE 1951). Quand le franchissement était plus important, comme, par exemple, pour une rivière, ils construisaient un pont (O'CONNOR 1993). Les deux géométries, principalement utilisées par les romains, étaient les drains rectangulaires (*box culvert*) et les drains à voûtes circulaires (*arched culvert*).

Des ponceaux ont été construits, aussi, sous les aqueducs (tableau 4). L'une des structures les plus impressionnantes était le ponceau du vallon n° 6, sous l'aqueduc de Nîmes, en aval du pont du Gard (fig. 6). Il était conçu pour faciliter le passage des eaux de ruissellement sous le canal, et la section centrale comprenait trois drains rectangulaires construits en pierres de taille. Les piles, supportant l'aqueduc, étaient profilées, comme les piles du Pont de Bornègre, situé entre Uzès et le Pont du Gard¹⁵. Les particularités uniques de ce ponceau étaient :

- une structure multi-drains (*multi-cell culvert*),
- une taille conséquente, plus grande que la norme, et
- une conception hydraulique de haut niveau (voir ci-dessous).

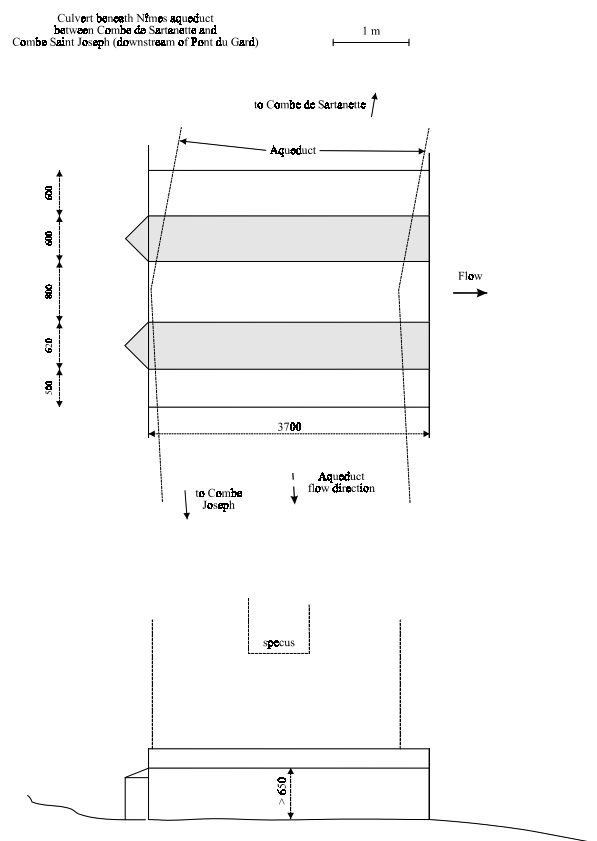


Figure 6 : Ponceau sous l'aqueduc de Nîmes, entre la Combe de Sartanette et la Combe Saint Joseph, en aval du Pont du Gard.

15. L'auteur a inspecté les deux sites en septembre 2000, et il estime que les piles du ponceau étaient mieux profilées que celles du Pont de Bornègre.

Performances hydrauliques du ponceau de l'aqueduc de Nîmes

On a inspecté le site du ponceau, en septembre 2000. Le drain est proprement aligné, avec l'axe de la combe, et au point le plus bas. Les trois drains sont de tailles similaires à des drains modernes, en béton préfabriqué. Le design hydraulique est propre¹⁶.

On a, de plus, effectué une étude hydraulique complète, a posteriori, du ponceau de l'aqueduc de Nîmes (voir appendice I). Le ponceau opérait avec un écoulement à surface libre, à l'entonnement et dans le drain, pour des débits inférieurs à 2 m³/s, ce qui correspondait à une hauteur d'eau amont inférieure à 0,78 m. Pour des hauteurs d'eau supérieures, l'entonnement fonctionnait en charge (fig. 7B). Les calculs de débits sont regroupés sur la figure 7A, montrant la relation entre le débit Q , dans le ponceau, et le hauteur d'eau amont d_1 .

Les résultats démontrent une capacité de débit impressionnante. Si l'on considère une hauteur d'eau amont maximale

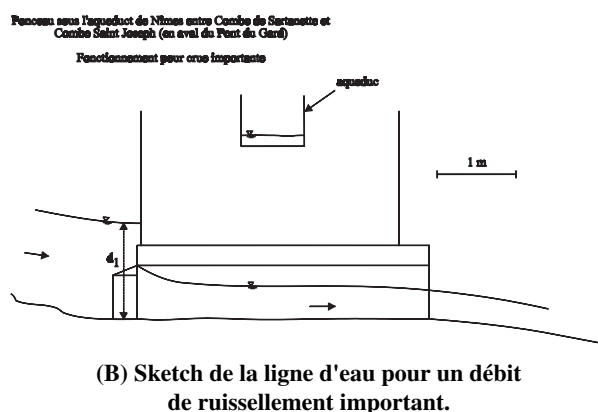
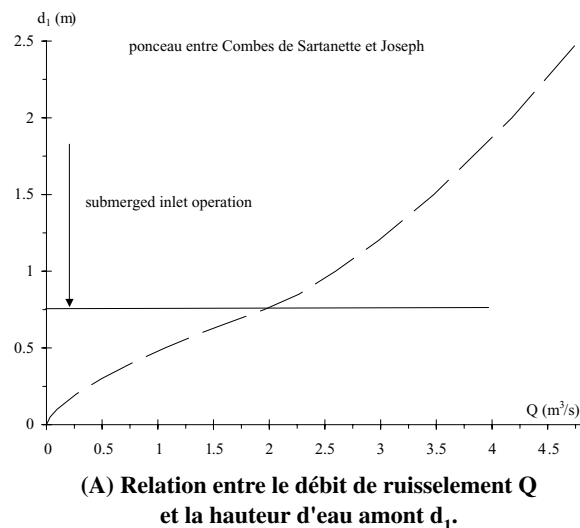


Figure 7 : Opération hydraulique du ponceau sous l'aqueduc de Nîmes, entre la Combe de Sartanette et la Combe Saint Joseph.

16. L'auteur parle en connaissance de cause, ayant lui-même conçu plusieurs ponceaux, et enseignant l'hydraulique des ponceaux en écoles d'ingénieurs (CHANSON 1999).

Tableau 4. Ponceaux et petits ponts sous les aqueducs romains.

Site (1)	Type (2)	Caractéristiques de la section centrale du ponceau/pont (3)	Remarque (4)
Petits Ponts Petit pont près de Vollem, aqueduc de Cologne	Pont (<i>arched bridge</i>)	1 ouverture, largeur : 1.1 m, hauteur maximale : 1.1 m. Section de passage ~ 1 m ² . Construction : arche segmentale (<i>single-rib segmental arch</i>) ^(a) supportée par des pie- droits faits de pierre de grosse taille.	Meternich-Vollem, en amont. GREWE (1986, pp.64-67).
Pont-Amont de Roc-Plan, aqueduc de Nîmes	Pont (<i>arched bridge</i>)	3 arches ; hauteur : 3.4 m, largeur : 2.8 m, longueur : 5.4 m. Elevation du radier de l'aqueduc : 66.398 m NGF.	37.8 km en amont de Nîmes. FABRE et al. (2000, pp. 75- 76).
Pont de la Combe Pradier, aqueduc de Nîmes	Pont (<i>arched bridge</i>)	1 arche (construction initiales). Elevation du radier de l'aqueduc : 64.691 m NGF.	30.3 km en amont de Nîmes. FABRE et al. (2000, p. 93).
Ponceaux Ponceau du Vallon No. 6, entre la Combe de la Sarta- nette et la Combe Joseph, aqueduc de Nîmes	Drain rectangulaire (<i>box culvert</i>)	3 drains rectangulaires en parallèle : 0.5 × 0.65 m ² , 0.8 × 0.65 m ² , 0.6 × 0.65 m ² . Section de passage > 1.24 m ² . Construction en appareil de grande taille. Profillement amont des piles. Elevation du radier de l'aqueduc : 64.858 m NGF.	En aval du Pont du Gard. FABRE et al. (1992), Etude présente.
Pont-Aval de Roc-Plan, aqueduc de Nîmes	Drain rectangulaire (<i>box culvert</i>)	3 ouvertures biaisées (hauteur : 1.7 m, largeur : 1.15 m, longueur : 5.4 m). Elevation du radier de l'aqueduc : 66.381 m NGF.	37.7 km en amont de Nîmes. FABRE et al. (2000, pp. 75- 76).
Ponceau près de Coste-Belle, aqueduc de Nîmes	Drain rectangulaire (<i>box culvert</i>)	4 drains rectangulaires en parallèle (longueur : 5.5 m). Construction en pierres de maçonnerie. Elevation du radier de l'aqueduc : 66.180 m NGF.	Entre Pont Bornègre et Pont du Gard. FABRE et al. (1992).
Ponceau, Combe Pradier, aqueduc de Nîmes ^(b)	Drain rectangulaire (<i>box culvert</i>)	1 ouverture. Elevation du radier de l'aqueduc : 64.691 m NGF.	Stage 2 after filling of the arch for reinforcement. 30.3 km upstream of Nîmes. FABRE et al. (2000, p. 93).
Ponceau des Escaunes, entre les tunnels de La Perotte et Les Cantarelles, aqueduc de Nîmes	--	Elevation du radier de l'aqueduc : 64.1 m NGF.	22 km en amont de Nîmes. FABRE et al. (2000, p. 97).
Ponceau près de Burg Dal- benden, aqueduc de Cologne	Drain à voute circulaire (<i>arched culvert</i>)	1 drain, largeur : 0.9 m, hauteur maximale : 0.7m. Section de passage ~ 0.6 m ² . Construction : arche segmental (<i>single rib segmental arch</i>) ^(a) .	Kall-Urft, en amont. GREWE (1986, pp. 42-46).
Série de ponceaux, aqueduc de Brévenne, Lyon	--	Situations : Chevinay, ruisseau du Plainet ; Sourcieux ; ...	Conseil Général du Rhône (1993, p. 152), Etude pré- sente.
Séries de ponceaux, aqueduc du Gier, Lyon	--	Situations : en amont.	Conseil Général du Rhône (1993, pp. 225-229).

Notes : ^(a) terminologie d'après O'CONNOR (1993) ; ^(b) : après second renforcement du pont (Stage 2) ; (--) : pas d'information disponible.

de l'ordre de 2 m^{17} , le ponceau pouvait débiter près de $4,2 \text{ m}^3/\text{s}$, soit plus de 12 fois le débit maximum de l'aqueduc. On note, de plus, que les vitesses de l'écoulement dans les drains étaient importantes : de l'ordre de $2,5 \text{ m/s}$ pour un débit de $3 \text{ m}^3/\text{s}$. Pour comparaison, FABRE *et al.* (2000) estime un débit maximum, de nos jours, de l'ordre de $5 \text{ m}^3/\text{s}$ sous le Pont Bornègre.

Alors que beaucoup d'attention se soit portée sur les écoulements dans les aqueducs, qui avaient, somme toute, des débits relativement faibles, l'auteur a démontré la bonne conception hydraulique d'un ouvrage, capable de passer des débits relativement importants. De plus, cet ouvrage montre que les ingénieurs romains avaient une bonne expérience des problèmes hydrologiques tels que les eaux de ruissellement, devant transiter sous un ouvrage tel qu'un aqueduc.

SOMMAIRE ET CONCLUSION

Les ingénieurs romains, qui ont construit les grands aqueducs en Gaule et Germanie romaine (ex. Lyon, Nîmes, Metz), étaient des contemporains d'Héron d'Alexandrie, qui connaissait les concepts de conservation de masse et conservation de quantité de mouvement. Bien qu'il n'y ait aucune preuve écrite, que les ingénieurs comprenaient ces principes de mécanique des fluides, on montre, dans cette étude, qu'ils avaient des connaissances et une expérience hydrauliques très avancées, que l'on peut même qualifier de « pointues » de nos jours.

Plusieurs bassins de régulations ont été retrouvés le long d'aqueducs romains (tableau 2, fig. 3). Dans chaque cas, ces bassins étaient équipés de vannes verticales de contrôle, et d'un canal de trop-plein. On fait l'hypothèse que le débit dans le canal principal était contrôlé par un système de vannes de fond, et que les vannes des trop-pleins étaient des déversoirs. Dans le cas des aqueducs de Gorze et Nîmes, l'utilisation effective des vannes de fond ne pouvait se faire qu'avec des ouvertures faibles (moins de 10 cm), impliquant des systèmes de cabestans et poulies pour ajuster, finement, l'ouverture des vannes.

Il est, aussi, supposé que ces systèmes de régulateurs permettaient une régulation dynamique de l'aqueduc, opérant plusieurs fois par jour. Ceci impliquerait des équipes d'opérateurs, mais aussi l'usage de l'aqueduc lui-même pour le stockage des eaux. Ce dernier point suggérerait que les hauteurs d'eau dans le canal étaient bien supérieures aux profondeurs d'eau normale. Ceci remet en question un certain nombre de calculs de débits, mais cela est cohérent avec les observations de hauteurs d'enduits de mortier de tuileau et de dépôts de calcite, dans plusieurs aqueducs.

On a aussi mis en évidence deux types d'ouvrages hydrauliques, associés aux aqueducs romains : les cascades de puits de rupture, et les ponceaux. On a documenté plusieurs cascades de puits de rupture, installées dans les aqueducs (fig. 5). Ces ouvrages avaient, principalement, un rôle de dissipateur d'énergie, bien que l'on ne puisse exclure une fonction d'aérateur. Aujourd'hui, l'analyse hydraulique d'une cascade de puits est un exercice très difficile, nécessitant une expertise

de premier plan. Les ingénieurs romains qui ont conçu ces cascades de puits de rupture, devaient avoir un savoir-faire et une expérience hors du commun. Qui étaient-ils, vraiment ?

Sous l'aqueduc de Nîmes, on a retrouvé un ponceau de grande taille (fig. 6). Son étude hydraulique, à posteriori, montre une conception hydraulique parfaite, avec une capacité importante (près de $4,2 \text{ m}^3/\text{s}$). Cet ouvrage n'est probablement pas unique, mais les ponceaux romains n'ont pas attiré beaucoup d'insert de la part des historiens et archéologues.

En conclusion, l'auteur est impressionné par le savoir-faire, l'expertise et l'expérience hydraulique, des ingénieurs romains qui ont conçu les bassins de régulation, les cascades de puits de rupture et les ponceaux. Ils en savaient bien plus que la majorité de nos ingénieurs hydrauliciens !

Remerciements

L'auteur tient à remercier toutes les personnes qui lui ont fourni des informations pertinentes, parmi lesquelles : Professeur C.J. APELT, University of Queensland, Australie ; Mr G. BERGE Jussy, France ; Dr D. BLACKMAN, Monash University, Australie ; Dr J. BURDY, Lyon, France ; Mme P. CHARDON-PICAULT, Autun, France ; Mme CHOU Y.H., Brisbane, Australie ; Dr J.L. FICHES, France ; Dr T. HODGE, Carleton University, Canada ; Mr G. ILLIDGE, The University of Queensland, Australie ; Mr C. LEFEBVRE, Châtel-St-Germain, France ; Dr P. LEVEAU, Université d'Aix-en-Provence, France ; Mr J.C. LITAUDON, Saint-Etienne, France ; Mr D. MURPHY, Houston, USA ; Professeur N. RAJARATNAM, University of Alberta, Canada ; Société Mosellane des Eaux, France ; Mr A. STRASBERG, Musée Rolin, Autun, France ; Mr V. VALENTI, Fréjus, France ; Dr A.V. VILLANUEVA, University of Cordoba, Spain.

APPENDICE I – CALCUL HYDRAULIQUE (MODERNE) D'UN PONCEAU

Un ponceau est destiné à faire passer les eaux de ruissellement sous un remblai (ex. route, voie de chemin de fer). Pour le calcul hydraulique de la débitance, les paramètres de base sont le débit maximum Q_{max} , le niveau d'eau amont et la perte de charge maximale (acceptée) ΔH . En pratique, on cherche à minimiser les pertes de charge, en milieu urbain, pour limiter les inondations, causées, en amont du ponceau, par la présence du remblai. Durant la conception, les contraintes de design sont typiquement :

- [1] le coût doit être le plus bas,
- [2] l'augmentation de la hauteur d'eau amont (*afflux*)¹⁸ doit rester faible,
- [3] la hauteur maximale du remblai est, parfois, une contrainte supplémentaire, et
- [4] il faut prévoir une protection contre l'affouillement, en particulier, en sortie de ponceau.

Pratiquement, l'étude hydraulique d'un ponceau est un compromis entre la débitance et la perte de charge (CHANSON 1999, pp. 365-397). L'écoulement dans le ponceau peut être en charge ou à surface libre. Pour des ponceaux relativement courts, on optimise le design pour obtenir un écoulement à

17. Pour des hauteurs d'eau amont plus importantes, l'aqueduc formait un petit barrage, et la force de pression de l'eau, retenue en amont, pouvait induire un glissement de l'aqueduc. FABRE *et al.* (2000) mentionnait un engravement du ponceau, durant l'opération de l'aqueduc, qui a pu conduire aussi à une situation similaire.

18. Induite par la présence du ponceau.

surface libre critique, dans le drain. Dans ces conditions, le débit transitant dans le ponceau est égal à (pour un ponceau rectangulaire) :

$$\frac{Q}{B} = C_D * \frac{2}{3} * \sqrt{\frac{2}{3} * g * H^{1.5}}$$

Entonnement amont avec surface libre [1]

$$\frac{Q}{B} = C * D * \sqrt{2 * g * (H - C * D)}$$

Entonnement amont en charge [2]

où H est la charge spécifique amont, B est la largeur interne du drain, D est la hauteur interne du drain, g est l'accélération de la gravité (HENDERSON 1966). Le coefficient C_D est égal à 1 pour des arêtes arrondies et à 0,9 pour des arêtes vives, à l'entonnement. C égale 0,6 pour des arêtes vives et 0,8 pour des arêtes arrondies.

Si le ponceau est en charge, le débit peut être calculé à partir d'abaques (ex. US Department of the Interior 1987, Concrete Pipe Association of Australasia 1991, CHANSON 1999).

BIBLIOGRAPHIE

- ALLAIS Y. (1933). « L'Alimentation en Eau d'une Ville Romaine d'Afrique : Cuicul (Djemila) », *5th Congrès International d'Archéologie*, Alger, pp. 93-117.
- ASHBY T. (1935). « The Aqueducts of Ancient Rome », *Clarendon Press*, Oxford, UK, edited by I.A. RICHMOND, 342 p.
- BAILLACHE M. (1977). « Etude de l'Evolution du Débit des Aqueducs Gallo-Romains » ("Study of the Discharge Evolution of Gallo-Roman Aqueducts") *Journées d'Etude sur les Aqueducs Romains*, Lyon, France, 26-28 Mai (also *Les Belles Lettres Publ.*, Paris, France, 1983, pp. 19-49) (in French).
- BALLANCE M. H. (1951). « The Roman Bridges of the Via Flaminia », *Papers of the British School at Rome*, vol. 19, pp. 78-117 & plates xiv to xix.
- BOSSY G., FABRE G., GLARD Y., and 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 de Paris, Sciences de la Terre et des Planètes*, vol. 330, pp. 769-775.
- BOUILLOT R. (1976). « Hydraulique Agricole et Urbaine », *Polycopié de cours*, INPG, Grenoble, France, tome 1.
- BURDY J. (1996). « Préinventaire des Monuments et Richesses Artistiques. IV Lyon. L'Aqueduc Romain du Gier », *Bosc Frères Publ.*, Lyon, France, Conseil Général du Rhône, 407 p. & 1 Map.
- BURDY J. (2002). « Les Aqueducs Romains de Lyon », *Presses Universitaires de Lyon*, Lyon, France, 204 p.
- CAQUOT A. (1941). « Sur la Quantité d'Eau Pluviales à Ecouler dans les Agglomérations Urbaines Modernes », *Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences*, vol. 213, 2nd sem., pp. 509-514.
- CHANSON H. (1998). « The Hydraulics of Roman Aqueducts : Steep Chutes, Cascades and Dropshafts », *Research Report No. CE156*, Dept. of Civil Engineering, University of Queensland, Australia, 97 p.
- CHANSON, H. (1999). « The Hydraulics of Open Channel Flows : An Introduction », *Butterworth-Heinemann*, Oxford, UK, 512 p.
- CHANSON H. (2000a). « Hydraulics of Roman Aqueducts : Steep Chutes, Cascades and Dropshafts », *American JI of Archaeology*, vol. 104, No. 1, Jan., pp. 47-72.
- CHANSON H. (2000b). « Notes on the Hydraulic Engineering of Roman Aqueducts », *Report*, Dept. of Civil Engrg., Univ. of Queensland, Brisbane, Australia, Dec., 48 p.
- CHATZIS K., and DUPUY, G. (1997). « Comment se Passer des Observations Locales : la Formule "Caquot" et l'Assainissement en France de l'Après-Guerre », *Annales des Ponts et Chaussées*, n° 82, pp. 67-75.
- CLAMAGIRAND E., RAIS S., CHAHED J., GUEFREJ R., and SMAOUI L. (1990). « L'Aqueduc de Carthage », *Jl La Houille Blanche*, n° 6, pp. 423-431.
- Concrete Pipe Association of Australasia (1991). « Hydraulics of Precast Concrete Conduits », *Jenkin Buxton Printers*, Australia, 3rd edition, 72 p.
- Conseil Général du Rhône (1993). « Préinventaire des Monuments et Richesses Artistiques. III L'Aqueduc Romain de la Brévenne », *Bosc Frères Publ.*, Lyon, France, Henri HOURS Editor, 230 p. & 1 Map.
- COQUET M. (1966). « Les Aqueducs Romains de Beaulieu et les Puits de Rupture de pente », *Cahiers Ligures de Préhistoire et d'Archéologie*, vol. 15, pp. 283-295.
- FABRE G., FICHES J.L., and PAILLET, J.L. (1991). « Interdisciplinary Research on the Aqueduct of Nîmes and the Pont du Gard », *Jl of Roman Archaeology*, vol. 4, pp. 63-88.
- FABRE G., FICHES J.L., LEVEAU P., and PAILLET J.L. (1992). « The Pont du Gard. Water and the Roman Town », *Presses du CNRS*, Caisse Nationale des Monuments Historiques et des Sites, Collection Patrimoine au Présent, Paris, France, 127 p.
- FABRE G., FICHES, J.L., and PAILLET J.L. (2000). « L'Aqueduc de Nîmes et le Pont du Gard. Archéologie, Géosystème, Histoire », *CNRS Editions*, CRA Monographies Hors Série, Paris, France, 483 p. & 16 plates.
- FEVRIER P.A. (1979). « L'Armée Romaine et la Construction des Aqueducs », *Dossiers de l'Archéologie*, Séries Les Aqueducs Romains, vol. 38, Oct./Nov., pp. 88-93.
- FRONTINUS Sextus Julius. « *De Aquis Urbis Romae* », (« Des Aqueducs de la Ville de Rome ») Latin text par LOEB (1925). Traduction française par C. Bailly.
- GARBRECHT G. (1987). « Hydraulics and Hydraulic Research : a Historical Review », *Balkema Publ.*, Rotterdam, The Netherlands.
- GERMAIN DE MONTAUZAN C. (1907). « Rapport sur une Mission Scientifique en Italie et en Tunisie », *Nouvelles Archives des Missions Scientifiques*, tome XV, fasc. II, pp. 71-123.
- GERMAIN DE MONTAUZAN C. (1908). « Aqueducs Antiques de Lyon. Etude Comparée d'Archéologie Romaine », *Ernest Leroux*, Paris, France.
- GREWE K. (1986). « Atlas der Römischen Wasserleitungen nach Köln » ("Atlas of the Roman Hydraulic Works near Köln") *Rheinland Verlag*, Köln, Germany, 289 p. (in German).
- GREWE K. (1992). « Planung und Trassierung römischer Wasserleitungen » ("Planning and Surveying of Roman Water Supplies") *Verlag Chmielorz GmbH*, Wiesbaden, Germany, Schriftenreihe der Frontinus Gesellschaft, Suppl. II, 108 p. (in German).
- HAMM J.A., and LITAUDON, J.C. (2000). « L'Aqueduc Romain du Gier ou du Pilat », *Fédération de la Recherche Archéologique de la Loire*, Graphi-Print printer, La Fouillouse, France, 41 p.

- HAUCK G.W., and NOVAK R.A. (1987). « Interaction of Flow and Incrustation in the Roman Aqueduct of Nîmes », *Jl of Hyd. Engrg.*, ASCE, vol. 113, No. 2, pp. 141-157.
- HENDERSON F.M. (1966). « Open Channel Flow », *MacMillan Company*, New York, USA.
- HODGE A.T. (1992). « Roman Aqueducts & Water Supply », *Duckworth*, London, UK, 504 p.
- LEFEBVRE C. (1996). « L'aqueduc Antique de Gorze à Metz » ("The Antic Aqueduct of Gorze at Metz") *Itinéraire du Patri-moine n° 119*, Direction Régionale des Affaires Culturelles de la Lorraine, Nancy (in French).
- LEVEAU P. (1991). « Research on Roman Aqueducts in the past Ten Years », *Future Currents in Aqueduct Studies*, Leeds, UK, T. HODGE ed., pp. 149-162.
- LEVEAU P. (1996). « The Barbegal Water Mill in its Environment : Archaeology and the Economic and Social History of Antiquity », *JRA*, vol. 9, pp. 137-153.
- LOPEZ-CUERO S. (1985). « Medina Az-Zahra Ingeniera y Formas », *Publicaciones del Ministerio de Obras Publicas y Urbanismo*, Madrid, Spain, 169 p. (in Spanish).
- O'CONNOR C. (1993). « Roman Bridges », *Cambridge University Press*, Cambridge, UK, 235 p.
- PINETTE M., and REBOURG A. (1986). « Autun (Saône-et-Loire) Ville Gallo-Romaine », *Guides Archéologiques de la France*, Imprimerie Nationale, Ministère de la Culture et de la Communication, France (In French).
- RAKOB F. (1974). « Das Quellenheigtum in Zaghouan und die Römische Wasserleitung nach Karthago », *Mitt. des Deutschen Archaeologischen Instituts Roemische Abteilung*, vol. 81, pp. 41-89, Plates 21-76 & Maps (in German).
- REBOURG A. (1999). « L'Urbanisme d'Augustodunum (Autun, Saône-et-Loire) », *Gallia*, Presses du CNRS, Paris, France, vol. 55, pp. 141-236.
- ROIDOT-DELEAGE J. (1879 ?). « Autun Ancient et Moderne », *Société Eduenne*, Autun, France, 2 volumes.
- US Department of the Interior (1987). « Design of Small Dams », *Bureau of Reclamation*, Denver CO, USA, 3rd edition.
- VALENTI V. (1995a). « Aqueduc Romain de Mons à Fréjus. 1. Etude Descriptive et Technique. Son Tracé, son Profil, son Assise, sa Source », *Research Report*, Fréjus, France, 97 p.
- VALENTI V. (1995b). « Aqueduc Romain de Mons à Fréjus. 2. Etude Hydraulique. Son Débit... de sa Mise en Service à son Déclin », *Research Report*, Fréjus, France, 123 p.
- VILLANUEVA A.V. (1993). « El Abastecimiento de Agua a la Cordoba Romana. I: El Acueducto de Valdepuentes » ("The Water Supply of the Roman Cordoba. I: Aqueduct of Valdepuentes") *Monografias No. 197*, Universidad de Cordoba, Servicio de Publicaciones, Cordoba, Spain, 172 p. (in Spanish).
- VILLANUEVA, A.V. (1996). « El Abastecimiento de Agua a la Cordoba Romana. II: Acueductos, Ciclo de Distribución y Urbanismo » ("The Water Supply of the Roman Cordoba. II: Aqueduct, Distribution System and Urbanism") *Monografias No. 251*, Universidad de Cordoba, Servicio de Publicaciones, Cordoba, Spain, 222 p. (in Spanish).
- WILSON A. (1998). « Water Supply in Ancient Carthage », *Jl Roman Archaeology*, Suppl. series No. 28, pp. 65-103.

LEXIQUE

English / Anglais	French / Français	German / Deutsch	Spanish
catchment area	bassin versant		
critical flow	écoulement critique	kritischer Abfluß	
culvert	buse de drainage, ponceau	Durchlass	
discharge	débit	Durchfluss	
dropshaft	puits de rupture	Tosbecken	pozo resalto
energy	énergie	Energie	
free-surface flow	écoulement à surface libre	Freispiegelabfluß	
Froude number	nombre de Froude-Reech	Froudezahl	
head loss	perte de charge	Energieverlust	
hydraulic jump	ressaut hydraulique		
inspection shaft	regard		
momentum	quantité de mouvement	Impuls	
open channel flow	écoulement à surface libre	Freispiegelabfluss	
overfall	déversoir	Überfall	
pipe flow	écoulement en charge	Druckabfluss	
pressurised flow	écoulement en charge	Druckabfluß	
shaft	puits		
streamline	ligne de courant	Stromlinie	
sub-critical flow	écoulement fluvial		
super-critical flow	écoulement torrentiel		
total head	charge (ou charge totale)	Energiehöhe	
total head line (or energy line)	ligne de charge	Energielinie	
uniform equilibrium flow (or normal flow)	écoulement uniforme	Normalabfluss	
vortical structure	tourbillon		