

UTILISATION DE MATÉRIAUX COMPOSITES POUR LA RÉHABILITATION DES OUVRAGES D'ASSAINISSEMENT EN MEULIÈRE

S. KESTELOOT*, M. SAADE, C. DJELAL*, I. BENSLIMANE**, N. KHOUFACHE**,**

* LGCgE, PRES Université Lille Nord de France
IUT de Béthune, 1230, rue de l'Université, 62408 BETHUNE

** Structure & Réhabilitation
72/74, avenue Gambetta, 93170 BAGNOLET

1. INTRODUCTION

La plupart des gestionnaires de réseaux d'assainissement en béton ou en maçonnerie, font face à des problèmes de manque de moyens budgétaires. Ils doivent donc mobiliser des financements conséquents pour réhabiliter leurs ouvrages tout en recherchant les solutions techniques et économiques les mieux adaptées. La technique structurante souvent utilisée pour la réhabilitation de la majorité des ouvrages d'assainissement, consiste à réaliser un chemisage en béton armé projeté sur la totalité de la périphérie du collecteur. Les inconvénients majeurs de cette technique résident dans la réduction significative de la section hydraulique et des coûts pouvant dépasser l'enveloppe budgétaire allouée. La nécessité de réduire les coûts de réparation incite à mettre en œuvre de nouvelles techniques de renforcement ponctuelles. La réparation et le renforcement des ouvrages par collage de matériaux composites ont révélé de bons résultats dans les domaines du bâtiment et des travaux publics, et a plus récemment été appliqué à des ouvrages d'assainissement en béton (Kesteloot, 2005).

L'objectif de cette étude est de transposer ce procédé de réhabilitation aux ouvrages d'assainissement en maçonnerie.

Ce papier retrace l'historique des égouts de Paris, avec les époques importantes. Un état de l'art sera ensuite effectué pour connaître la faisabilité de la transposition du procédé. Dans la dernière partie, les premiers résultats des essais sur voûtes en maçonnerie enduites renforcées, seront donnés.

2. HISTORIQUE DES ÉGOUTS DE PARIS

Les égouts de Paris ont fait l'objet de nombreux travaux descriptifs et historiques. Victor Hugo lui-même a consacré de longues pages dans les Misérables à magnifier l'horreur de ce que l'on pourrait appeler les intestins de la capitale (Gérard, 1991). (Belgrand, 1877) et (Bechmann, 1888) ont écrit des volumes très complets d'une clarté et d'une précision parfaite sur les égouts de Paris.

L'histoire des égouts Parisiens commence avec celle de la Lutèce gallo-romaine (Clément et al, 2001). En 52 avant J C, les romains, eux mêmes grands consommateurs d'eau et experts en travaux hydrauliques (ou tout au moins grands précurseurs), captent l'eau des sources situées dans la région de Cachan et de Rungis et la transportent à Paris par l'aqueduc d'Arcueil. Celui-ci alimente les Thermes du

quartier latin. Sur la rive droite, sera construit l'aqueduc d'Auteuil. Les infrastructures souterraines n'étaient peu ou pas existantes. Ces ouvrages seront détruits par les Barbares en 285.

Dix siècles plus tard, les descriptions faites du Paris du Moyen âge (Favier, 1997), sont toujours aussi effarantes en matière d'hygiène. Le contenu des pots de chambre continue d'être versé par les fenêtres. Les rues ne sont guère entretenues, et les pluies d'orage ont bien du mal à les nettoyer de leurs immondices et excréments. Ces égouts à ciel ouvert, lorsqu'ils bénéficient d'une pente suffisante, ne servent qu'à polluer un peu plus la seule source d'alimentation en eau potable de l'époque, c'est-à-dire la Seine. Ce n'est qu'au XIII^{ème} siècle que les rues de grandes artères de la ville seront enfin pavées, la plupart pourvues d'un ruisseau central où viennent se déverser les eaux souillées des maisons par une goutte transversale. La première évocation dans les archives parisiennes d'un égout qui ne soit pas à l'air libre date de 1325 : il s'agit d'une galerie en voûte, l'égout l'Evêque, circulant sous l'Hôtel-Dieu pour déboucher dans la Seine. Mais c'est véritablement sous l'administration active du prévôt du roi Hugues Aubriot qu'on augmenta le nombre des égouts et, surtout, qu'on fit couvrir ceux-ci, pour se garantir de leurs effluves pestilentiels. Ainsi, construit en 1374, le premier égout médiéval couvert longeait la rue Montmartre sur quelques centaines de mètres pour se déverser dans les fossés de l'enceinte de Charles V, eux-mêmes en communication avec la Seine. D'autres ouvrages, aussi modestes et inégalement couverts, ont été relevés rue du Ponceau et rue Meslay, rue de Turenne, rue Saint Antoine...

En 1832, venu du delta du Gange, après avoir transité par Londres, le choléra s'abat sur Paris. Plus de 18 000 personnes sont décimées dans un Paris médiéval aux ruelles étroites et sales. Dans ces quartiers où l'alimentation en eau se fait par des puits et où les déchets sont rejetés dans la rue, les habitants se contaminent eux-mêmes. Paradoxalement cette nouvelle épidémie de choléra va avoir sur la capitale un effet bénéfique. En effet, elle provoque une prise de conscience des bienfaits de la salubrité. Les plans de voirie furent modifiés au bénéfice de chaussées bombées avec caniveaux latéraux et bouches (ou avaloirs) à la verticale des trottoirs. Mais en 1849, le choléra fait de nouveau 9000 victimes. Il est plus que temps d'assainir la ville. En 1851, sur les propositions de l'ingénieur Mille, il fut adopté un nouveau type d'égout, déjà employé en Angleterre où il donnait toute satisfaction, à section ovoïde d'un gabarit suffisant pour que les ouvriers puissent y circuler aisément (Fig. 1).

Napoléon 1^{er} avait déjà de grandes ambitions pour Paris dont il voulait faire non seulement la capitale de la France, mais également de son empire. Il avait échafaudé des plans pour sortir Paris de son sordide état de ville moyenâgeuse, malodorante et sombre. Un certain nombre de transformations furent même entreprises sous son règne. Mais les guerres dans lesquelles il avait engagé le pays et plus probablement l'absence de volonté de son préfet de l'époque l'empêchèrent de mener à terme son projet (Védry, 1996). Son neveu, Napoléon III qui partageait la même ambition, prépara durant ses longues années d'exil à Londres, des



Figure 1. Collecteurs d'assainissement en meulière

plans d'aménagement de la ville. Arrivé au pouvoir en 1848, il compta sur la fidélité, la ténacité et l'audace de son Préfet de Seine, George Eugène Haussmann, pour lui permettre d'entreprendre ce qui pendant plusieurs décennies allait constituer le plus grand chantier du monde et permettre la métamorphose de Paris. Celui-ci nomma l'ingénieur Eugène Belgrand, Directeur des Eaux et des Egouts de Paris. Belgrand s'inspire de la « Cloaca maxima » de la Rome Antique. L'objectif de cette époque n'est il pas de faire de Paris « la vraie Rome du temps présent ». Haussmann et Belgrand réussirent à concevoir ce nouveau concept d'égouts grâce à l'aide des savants et de quelques médecins (Pointeau, 1995). Ils discernèrent avec eux le rôle des matières organiques et des infiniment petits dans le développement des épidémies. Ils eurent Pasteur pour allié dans la mesure où ce découvreur de la microbiologie et nouvelles méthodes d'observation savait triompher des fausses idées reçues. Le projet Belgrand rompt délibérément avec les conceptions du passé.

On notera tout au long de l'histoire brièvement rapportée ici que les échelles de temps caractéristiques de l'évolution du système sont longues. Il fallut cinquante ans à Belgrand et ses successeurs pour atteindre leurs objectifs. Il fallut trente ans pour que les décrets sur le tout à l'égout soient complètement appliqués par des propriétaires réticents aux dépenses supplémentaires occasionnées par les nombreux branchements à réaliser. De nos jours, l'évidence est que les équipements d'assainissement ont la propriété de durer et que les politiques mises en œuvre ne peuvent être rapidement infléchies en réponse aux nouvelles demandes de la société. Bien qu'ils soient masqués et de l'ordre du déchet, les réseaux d'assainissement font clairement partie de ces infrastructures qu'il faut gérer et entretenir dans la durée. Malgré les coûts induits, les collectivités doivent maintenir la pérennité de leur parc. Celui-ci commence seulement à être partiellement remis en cause.

3. LES OUVRAGES D'ASSAINISSEMENT

De part leur dimension, nous pouvons distinguer les collecteurs dont la hauteur intérieure est inférieure à 1,30 m, appelés collecteurs non visitables et les collecteurs dont la hauteur intérieure est supérieure à 1,30 m, appelés collecteurs visitables.

Chaque année, un linéaire minimal de collecteur visitable de section moyenne 180 x 100 de 30 000 mètres est réhabilité. A Paris intra muros, plus de 1000 kms d'ouvrages vont être à réhabiliter dans les années à venir. La technique la plus souvent utilisée pour la réhabilitation de la majorité de ces ouvrages consiste à réaliser un chemisage en béton projeté armé de 6 à 8 cm d'épaisseur sur toute la section du collecteur.

Notre étude porte sur les ouvrages d'assainissement de forme ovoïdale, visitables en maçonnerie, appelés collecteurs. Sont concernés les ouvrages en maçonnerie dont le diagnostic conduit à l'état actuel de l'art à préconiser des travaux de restructuration. Ces ouvrages sont constitués d'une voûte, de piédroits et d'un radier (figure 2).

Dans son « Traité pratique de la construction des égouts », (Hervieu, 1897) explique la façon dont les ouvrages d'assainissement en maçonnerie doivent être construits en particulier en région parisienne, ainsi que les règles suivies pour la réalisation de ce type d'ouvrages. Ceux-ci sont construits en majeure partie avec de la meulière, compte tenu de ses qualités de résistance et de légèreté, ainsi que sa parfaite cohésion avec les mortiers. De plus, la plupart des carrières de meulière sont proches de Paris.

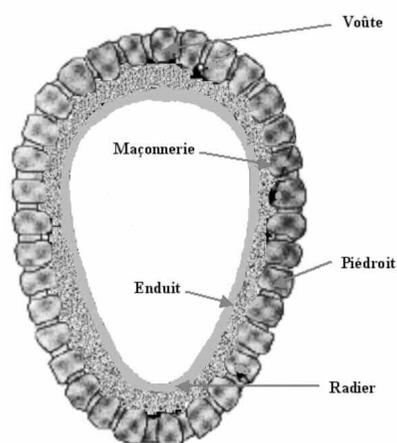


Figure 2. Ovoïde en maçonnerie

Une enquête sur l'état de dégradations des ovoïdes visitables en maçonnerie de meulière situés en région parisienne, a été effectuée à partir d'études réalisées par la société Structure & Réhabilitation. Cette enquête est basée sur une trentaine d'études de diagnostic et préconisation de travaux réalisées depuis une dizaine d'années. Les collecteurs, constitués principalement de maçonneries de meulière présentent des anomalies et dégradations dont les plus recensées sont les dégradations superficielles, les dégradations structurelles, les déformations, les défauts d'étanchéité, ainsi que les fissurations (Khoufache, 2008). Ces anomalies se traduisent principalement par des fissures longitudinales au niveau des piédroits et en voûte. Ces défauts sont souvent accompagnés également de fissures transversales.

Les dégradations peuvent être la conséquence de plusieurs facteurs de dégradation (PN RERAU) comme les surcharges, les attaques chimiques et la vétusté des ouvrages. Avant d'entreprendre des travaux de réparation, il est donc

nécessaire de connaître les pathologies mais aussi leurs origines. Ces dernières sont obtenues à partir d'auscultations visuelles, géométriques ou mécaniques. La plupart des essais mécaniques sont basés sur des essais de vérinage intérieur qui consistent à ovaliser la conduite testée et permettent de mesurer la rigidité globale du collecteur et d'en déduire le module de Young. Ces essais sont accompagnés de prélèvements pour valider la qualité de la maçonnerie. Les principaux travaux effectués pour la réhabilitation (Thepot, 2004) des collecteurs présentant les pathologies rencontrées dans notre enquête, consistent en la réalisation d'injections de collage avec effet de régénération, visant à consolider les parties affectées, puis la restructuration de ces ouvrages par la réalisation de chemisages en béton armé en voûte et piédroits, soit la majeure partie de la section intérieure, même si des parties ne présentent pas des dégradations. Une autre technique de réparation consiste à utiliser des éléments préfabriqués. Ces techniques induisent des réductions significatives de la section hydraulique des collecteurs. De ce fait, la mise en place d'un renforcement ponctuel sur les zones concernées par la dégradation, pourrait permettre de diminuer les coûts de réhabilitation.

4. RÉHABILITATION D'OUVRAGES MAÇONNÉS À L'AIDE DE MATÉRIAUX COMPOSITES

Cette partie, essentiellement bibliographique, fait le point des essais effectués sur les structures en maçonnerie renforcées par matériaux composites, en distinguant le renforcement d'éléments plans d'une part et des voûtes d'autre part.

4.1. Essais sur surfaces planes

Dans le cadre d'une étude sur le comportement d'ouvrages en maçonnerie situé en zone sismique, (Gabor, 2002) a réalisé une recherche bibliographique et des essais destructifs sur des panneaux en briques creuses, construits suivant les recommandations techniques de la Rilem (1994). Des murs renforcés et non renforcés par des matériaux composites ont été testés. Trois types de renforts ont été utilisés : les fibres de verre, de carbone et le tissu de verre. Du fait de l'objectif du renforcement, une orientation perpendiculaire des fibres du renfort à la diagonale comprimée a été retenue.

Avant l'application des composites, des murs ont été enduits par un mortier. La rupture s'est produite par un décollement du complexe mortier-composite sans endommagement du renfort. Cette remarque est donc très importante pour la suite de notre étude. Les résultats des essais sur les murs renforcés et la comparaison avec ceux des murs non-renforcés révèlent un gain considérable en terme de résistance : 50% pour les renforts de fibres de verre et jusqu'à plus de 75% pour les tissus de verre et fibres de carbone (figure 3).

Le mode de rupture par traction diagonale a été observé uniquement dans le mur renforcé par les fibres de verre. La

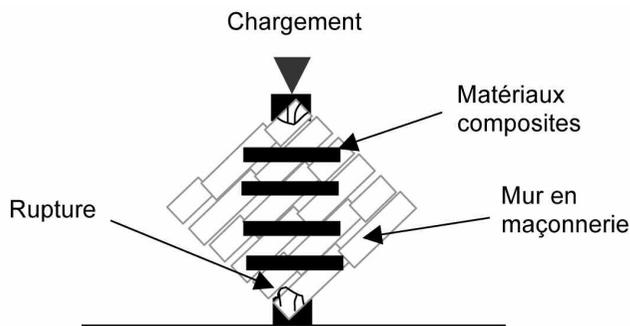


Figure 3. Essais de compression diagonale sur des murs renforcés [Gabor, 2002]

ligne de rupture est parallèle à la diagonale comprimée et se situe à l'extrémité des quatre bandes de renfort appliquées. Pour les autres murs renforcés, la rupture est apparue dans les zones d'appui par écrasement de la maçonnerie.

Une autre étude relative au comportement des murs en maçonnerie renforcés par les matériaux composites a été réalisée par (Albert et al., 2001). Les auteurs ont effectué des essais de compression, sous chargement uniformément distribué, sur des murs en maçonnerie de briques renforcés par les matériaux composites à base de fibres de verre et de carbone.

Concernant la réponse globale des murs, les résultats obtenus ont révélé une importante augmentation de la résistance à la compression et de la ductilité de 50 à 60% par rapport aux murs non-renforcés. La rupture s'est produite dans un premier temps entièrement dans la maçonnerie sans endommagement du renfort, mais il a été observé des déformations dans le composite au niveau des joints du mortier. Cette déformation est beaucoup plus élevée que dans les blocs (briques). Ainsi, lorsque le joint du mortier fissure, il y a une redistribution de l'effort vers la partie du renfort qui se trouve au voisinage de la fissure. Par conséquent, la disposition des matériaux de renforcement a un effet très important sur le comportement local de la structure, du fait de la distribution des contraintes et de la déformation de la structure.

4.2. Essais sur voûtes maçonnées

De nombreux essais ont été réalisés en Italie sur des structures en voûte en maçonnerie dans le cadre de la protection du patrimoine culturel vis-à-vis du risque sismique (CNR-DT, 2004)

G. Creazza et al. (2001) ont mené une étude sur des voûtes en maçonnerie renforcées par des matériaux composites appliqués à l'intrados. Une voûte non enduite a été renforcée par trois bandes de lamelles de carbone de 5 cm de largeur et 1,2 mm d'épaisseur collées à l'intrados et espacées de 64 cm. La voûte est soumise à une charge ponctuelle et appliquée à $\frac{1}{4}$ de la distance entre appuis.

A mesure que la charge augmente, quatre zones tendues correspondant à l'apparition de quatre fissures sont observées. Le mécanisme d'effondrement se traduit par l'apparition de 4 rotules pour une charge de 63 kN. De plus,

quatre zones de fissuration longitudinale correspondant à la formation de rotules ont été observées :

- à l'intrados : au niveau de l'application du chargement et au niveau de l'appui opposé au chargement ;
- à l'extrados : près du second appui et en naissance de voûte.

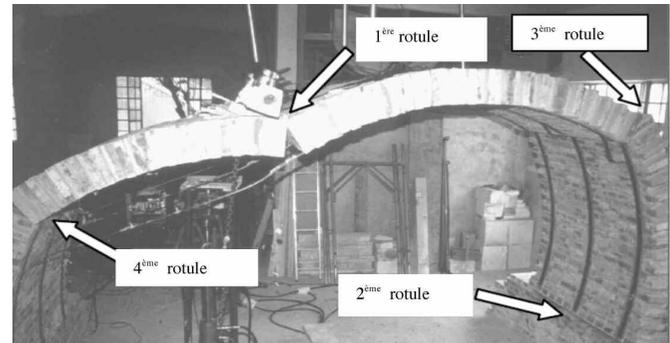


Figure 4. Mécanisme de ruine d'une voûte renforcée à l'intrados par plats de carbone (Creazza et al, 2001)

M.R Valluzi et C. Modena, (2001) tout comme P. Foraboschi (2004) ont étudié le comportement des voûtes en maçonnerie de briques non enduites, renforcées par des matériaux composites. L'influence du type de fibre (carbone et verre) ainsi que la surface et la zone d'application du renforcement (intrados ou extrados), ont été étudiées expérimentalement en laboratoire. Des échantillons de voûtes en briques ont été renforcés et testés sous des charges verticales appliquées à un $\frac{1}{4}$ de leur portée.

Le décollement des renforts est le mécanisme prédominant dans le cas des voûtes renforcées à l'intrados du fait de la poussée aux vides. Le glissement le long d'un joint de mortier a été observé dans le cas des voûtes renforcées à l'extrados. D'après les auteurs, ces mécanismes de rupture peuvent être retardés par l'augmentation de la largeur des bandes de composite surtout aux zones d'application des charges.

M. Como et al (2002) ont réalisé une étude sur l'évaluation de la résistance des arcs en maçonnerie renforcés par les matériaux composites. Ces matériaux sont appliqués à l'intrados et/ou à l'extrados des voûtes.

Le point de départ de cette recherche est que l'application des bandes de FRP modifie les mécanismes classiques de rupture des arcs en maçonnerie :

- Pour un arc renforcé à l'intrados et sollicité verticalement en clé ou en demi-voûte par une charge ponctuelle, il y a apparition des fissures en demi-voûtes à l'extrados et aux niveaux des appuis à l'intrados, et donc la formation de rotules à l'intrados.
- Si le renforcement est effectué à l'extrados, avec une sollicitation verticale en clé ou en demi-voûte par une charge ponctuelle, il y a apparition de fissures en clé et au niveau des appuis à l'extrados, ainsi que des fissures à l'intrados au niveau de l'application de la charge.

Suite à cette recherche bibliographique, il apparaît que l'enduit est problématique pour l'application du procédé de renforcement par matériaux composites, du fait de la rupture prématurée des structures par décollement du complexe enduit/renforcement. Or pour les ouvrages

d'assainissement visés, il est nécessaire de mettre en œuvre un enduit pour régulariser la surface d'application des renforts.

5. PARAMÈTRES D'ÉTUDES POUR L'APPLICATION DE PLATS COMPOSITES AUX OUVRAGES D'ASSAINISSEMENT EN MAÇONNERIE

Les ouvrages d'assainissement sont des structures enterrées. De ce fait, la seule possibilité de renforcement par les matériaux composites sera celle d'un renforcement à l'intrados. Les matériaux constitutifs sont des blocs de meulière assemblés. En général, par un mortier de sable. Du fait de l'irrégularité des blocs de meulière, il est nécessaire de mettre en place un enduit pour une bonne application des matériaux composites. Notre étude devra donc consister à appliquer des matériaux à base de fibres de carbone sur des structures voûtées en maçonnerie enduite. Pour atteindre cet objectif, notre campagne expérimentale comprendra 3 phases.

La première phase concerne la validation des différents matériaux afin de répondre à la question posée précédemment. En effet, l'enduit doit répondre à deux critères importants qui sont la transmission des efforts aux renforts et une capacité d'adhésion nécessaire pour ne pas avoir un décollement prématuré du complexe composite/colle/enduit.

Puis, nous testerons en laboratoire des voûtes enduites renforcées ou non. Ces voûtes devront représenter le comportement d'un ovoïde enterré avec un chargement représentant les surcharges verticales dues aux poids des terres et charges de surface.

6. RÉSULTATS DE LA CAMPAGNE EXPÉRIMENTALE

La campagne expérimentale s'attachera d'une part à reproduire le comportement des voûtes enterrées, qui fait appa-

raître des rotules plastiques (Figure 5) (Plumey, 2007) ; et d'autres part à valider l'application du procédé.

Les voûtes testées dans notre laboratoire sont représentatives d'une voûte d'un ovoïde T210 enterré. La géométrie de nos voûtes est illustrée sur la figure 6. Les dimensions sont issues (Kesteloot et al, 2009) de simulations numériques. La voûte a une largeur de 110cm et une longueur de 120cm.

Les matériaux retenus pour notre campagne expérimentale sont les suivants :

- Matériaux constitutifs des ouvrages d'assainissement : des blocs de meulière (Société COSSUTA S.A. - 02);
- Mortier de liaison ayant pour liant un mélange de chaux et de ciment ainsi qu'une charge qui sera du sable ;
- Produits hydrauliques pour la réalisation de l'enduit.
- Renforts composites à base de fibres de carbone : lamelles et tissus de carbone pour le renforcement des voûtes

6.1. Caractéristiques des matériaux

6.1.1. La meulière

Les pierres ont été lavées pour enlever la terre puis triées. Leurs formes sont variables. Les dimensions sont comprises entre $7 \times 15 \times 20 \text{ cm}^3$ et $20 \times 30 \times 50 \text{ cm}^3$. Du fait de leurs origines diverses, soit extraites de carrière ou de récupération, les pierres sont très hétérogènes (couleur marron ou blanchâtre, pores plus ou moins importants, présence ou non de stries).

Suite à cette analyse des essais destructifs ont été réalisés. Ces essais sont des essais de compression ainsi que des essais avec mesure du module de Young et des essais d'arrachement par traction directe.

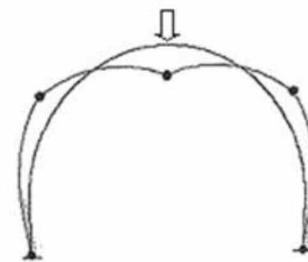


Figure 5. Formation de rotules plastiques

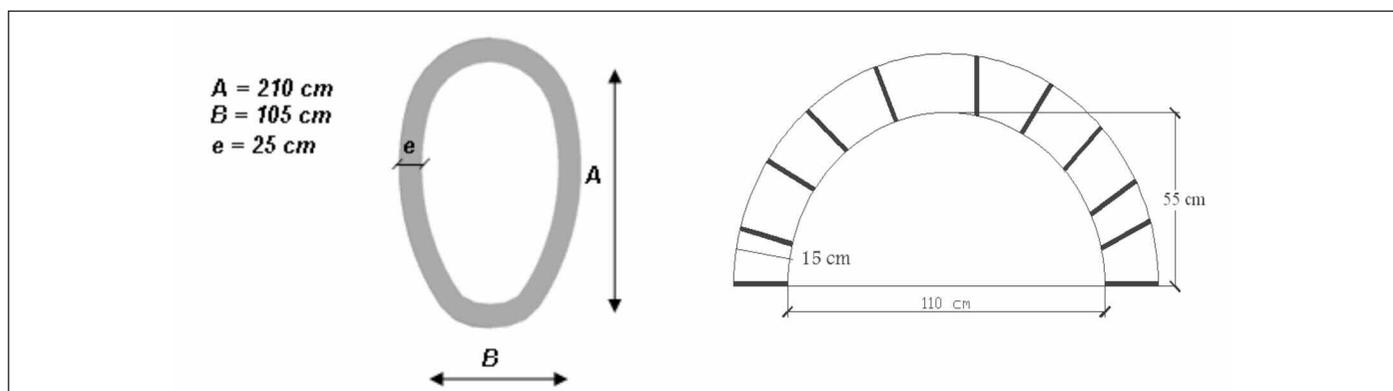


Figure 6. Caractéristiques géométriques des voûtes

Caractéristiques	[MPa]
Module d'élasticité	2500
Résistance à la compression	12 à 26
Résistance à la traction	1,47

Tableau 1. Caractéristiques mécaniques de la meulière

6.1.2. Le mortier de liaison

Le mortier de liaison entre les différentes pierres a été confectionné selon les recommandations des annales des Ponts et Chaussées (1856). Au XIX^{ème} siècle, le liant servant à la maçonnerie des ouvrages en meulière était un mélange de 3/5 de ciment et 2/5 de chaux hydraulique. Ce mortier est donc un mortier « bâtard ».

Plusieurs essais ont été effectués sur le mortier. Le tableau 2 présente les caractéristiques mécaniques du mortier.

Caractéristiques	[MPa]
Module d'élasticité	5 931
Résistance à la compression	0,9
Résistance à la traction	0,5

Tableau 2. Caractéristiques mécaniques du mortier

6.1.3. Les produits hydrauliques

Le chemisage mince a pour but d'homogénéiser la surface des voûtes, tout en évitant les exfiltrations et infiltrations des effluents vers le milieu naturel. De plus, l'enduit doit permettre de transférer les efforts aux renforts composites. Quatre produits hydrauliques ont été testés (Saade et al, 2011).

Le produit hydraulique retenu est celui dont les caractéristiques mécaniques sont les mieux adaptées pour la transmission des efforts aux composites.

L'enduit est un mortier fibré de réparation. Il est utilisé dans les travaux de réagréage et de reconstitution de forme. Des essais sur 4 enduits hydrauliques différents ont été testés pour déterminer leurs caractéristiques mécaniques (tableau 3).

Le produit A a la meilleure résistance de compression mais a la plus petite valeur pour la contrainte d'adhérence. Il est

Enduit	A	B	C	D
Teneur en eau (%)	14	12	11,2	16
Résistance de flexion (MPa)	7,75	7,79	8,04	5,79
Résistance de compression (MPa)	63,60	52,53	51,3	54,90
Contrainte d'adhérence (MPa)	1,66	2,2	2,68	2,26
Résistance en traction par fendage (MPa)	3,84	4,31	5,43	2,99
Module de Young (MPa)	33 701	27 308	34 719	28 464

Tableau 3. Résultats des essais de caractérisations des produits hydrauliques

nécessaire d'avoir une contrainte d'adhérence élevée afin de transmettre les efforts de la meulière à l'enduit. Le produit C est le meilleur produit au niveau de sa résistance à la traction par arrachement. Cependant son module de Young étant élevé, la rigidité globale de la structure entraînera alors des fissures rapidement. De ce fait, le produit D apporte le meilleur compromis pour un renforcement par matériaux composites.

6.1.4. Les matériaux composites

Pour notre étude, nous avons renforcé les voûtes par tissus et par lamelles de carbone. Ces procédés sont destinés à réparer et à renforcer les structures. Les lamelles sont des plats composites à base de fibres de carbone noyées dans une matrice polymère, et le tissu est un tissu de fibres de carbone. Leurs caractéristiques mécaniques sont résumées respectivement dans les tableaux 4 et 5.

Désignation	Caractéristiques
Module d'élasticité en traction	> 165 GPa
Résistance en traction	> 2 800 MPa
Allongement à la rupture	> 17 ‰

Tableau 4. Caractéristiques des lamelles de carbone

Désignation	Caractéristiques
Module d'élasticité en traction	230 GPa
Résistance en traction	3500 MPa
Allongement à la rupture	15 ‰

Tableau 5. Caractéristiques des tissus de carbone

Pour appliquer les renforts, nous avons utilisé 2 colles différentes à base époxy. Le rôle de l'adhésif est très important dans le cas de renforcement par matériaux composites, du fait de la transmission des efforts dans la structure aux matériaux composites. Les caractéristiques mécaniques des lamelles et des tissus de carbone sont résumées respectivement dans les tableaux 6 et 7.

6.2. Construction des voûtes

Quatre voûtes ont été construites en respectant les techniques de construction utilisées à l'époque de Baron

Désignation	Caractéristiques
Module d'élasticité	12 800 MPa
Résistance à la flexion	≥ 30 MPa à 2 jours à 20°C
Adhérence sur béton	≥ 4 MPa (rupture dans le support)

Tableau 6. Caractéristiques des colles pour les lamelles

Désignation	Caractéristiques
Module d'élasticité en flexion	3 800 MPa à 7 jours et 23°C
Résistance à la compression	≥ 55 MPa à 2 jours et 20°C
Résistance à la traction	≥ 30 MPa à 2 jours et 20°C
Adhérence sur béton sablé	Supérieure à la cohésion du support (dès 24 h)

Tableau 7. Caractéristiques des colles pour les tissus

Hausmann (Hervieu, 1897). Les blocs de meulière (environ 15 x 20 x 20 cm) ont tout d'abord été débités à l'aide d'une scie circulaire avant de les assembler pour former les voûtes. Des coffrages en bois, en demi-cylindre ont été réalisés. Le diamètre extérieur de la base (1,00 m) est égal au diamètre intérieur de la voûte. La hauteur des cintres est de 0,50 m. Des lamelles de bois d'une longueur de 1 m, coupées dans le sens de la longueur sont fixées sur ces cintres. Les cintres sont composés de deux parties juxtaposées correspondant chacune à la moitié de la voûte. Cette disposition servira à faciliter le décoffrage après l'achèvement de l'ouvrage.

Des blocs de meulière ont été disposés sur les cintres afin de réaliser un maillage. Les pierres ont été choisies de manière à ce qu'elles soient de la même épaisseur et de la même origine. Une bâche a été placée sur les cintres en bois avant de maçonner les blocs de meulière sur les coffrages afin d'empêcher l'eau du liant de s'infiltrer dans le bois des coffrages. Les performances et les propriétés du mortier qui servira à assembler les blocs et à faciliter le décoffrage seront alors conservés (figures 7 et 8).

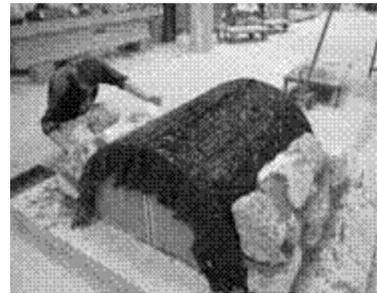


Figure 7. Positionnement des pierres



Figure 8. Conservation des voûtes

Les blocs sont ensuite maçonnés. L'enduit est ensuite appliqué sur l'intérieur de la voûte puis lissé. La mise en œuvre de l'enduit est réalisée en 2 couches. Ensuite, afin d'éviter le retrait et d'être dans des conditions de chantier, un humidificateur a été placé sous les voûtes.

6.3. Résultats des essais sur voûtes à l'échelle 1

6 voûtes ont été testées sous chargement vertical afin de vérifier la faisabilité du projet :

- 2 voûtes non enduites (témoins) ;
- 2 voûtes enduites renforcées par tissus ;
- 2 voûtes enduites renforcées par lamelles (figure 9).

Les résultats par famille de voûtes étant les mêmes, nous présenterons les essais pour une seule voûte (tableau 8).

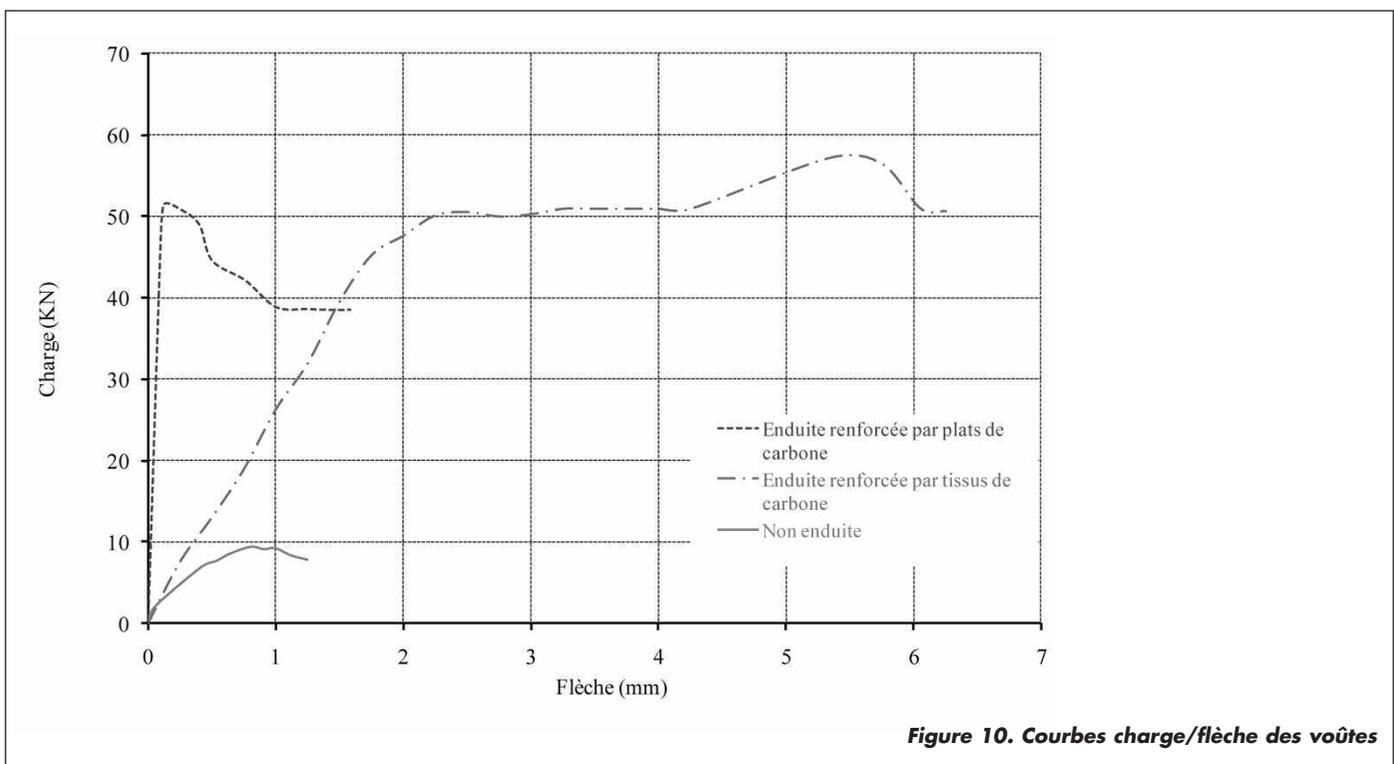
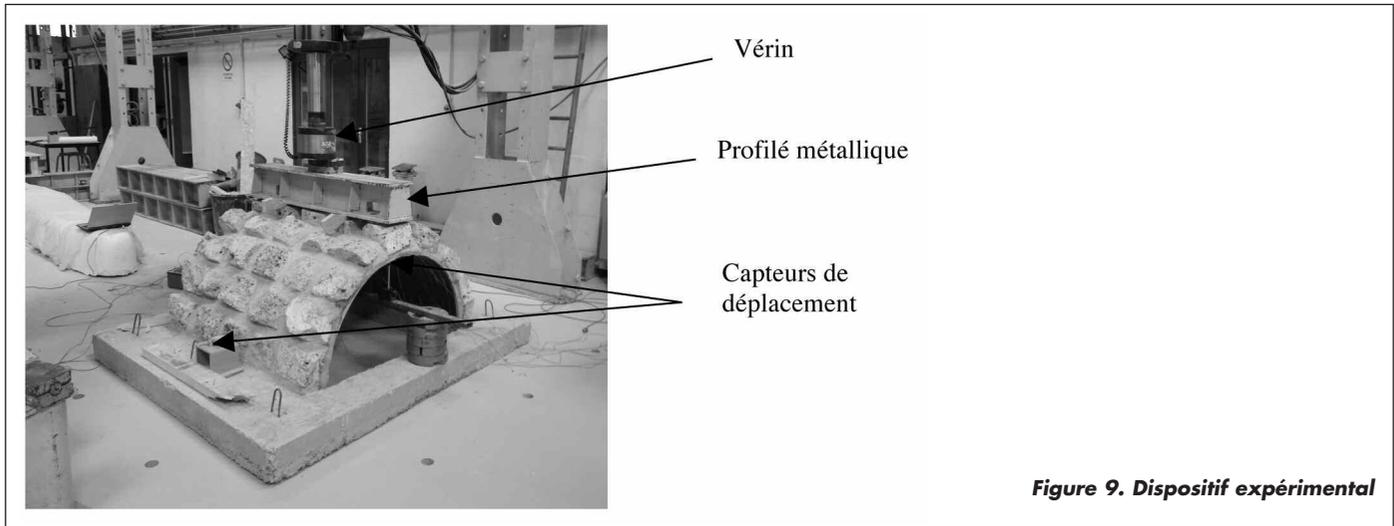
La figure 10 compare les courbes charge/flèche en clé pour les trois voûtes.

Les voûtes renforcées par lamelles montrent une rigidité globale plus importante que pour les voûtes « témoins » et les voûtes renforcées par tissu.

Concernant les deux voûtes non enduites, les fissures sont apparues dans les joints du mortier au niveau des reins à l'extrados et en clé de voûte à l'intrados. L'ensemble des

Essais	Charge max [kN]	Flèche en Clé [mm]	Charge d'apparition de la première fissuration [kN]
Voûte non enduite	9,32	0,8	8
Voûte enduite renforcée par lamelles	51,46	0,12	43
Voûte enduite renforcée par tissus	57,24	5,35	45

Tableau 8. Résultats des essais sur voûtes



fissures est continu dans la longueur de la voûte. Les reins sont situés entre la clé de voûte et les naissances de voûte. Concernant les deux voûtes enduites renforcées par lamelles de carbone, les fissures sont apparues dans les joints du mortier au niveau des reins à l'extrados et en milieu de piédroits à l'extrados. De plus, un décollement des lamelles au niveau de la clé de voûte à l'intrados est constaté (figures 11, 12 et 13).

Concernant les deux voûtes enduites renforcées par tissus de carbone, les fissures sont apparues dans les joints du mortier au niveau des reins à l'extrados et en milieu de piédroit (un seul côté) (figures 14 et 15).

L'ensemble des fissures des voûtes est continu dans la longueur de la voûte. Les voûtes renforcées par tissus de carbone se sont effondrés alors que celles renforcées par lamelles ont gardé leur forme initiale (voûte). Cependant un décollement complet des blocs de meulière en clé de voûte est observé.

7. CONCLUSION

La synthèse bibliographique a confirmé le gain de charge qui peut être apporté par l'application de plats composites sur des structures en maçonnerie de type voûte, à l'intrados. Les essais préliminaires ont permis de valider le projet mais aussi d'affiner les paramètres des voûtes, comme la résistance nominale des voûtes, soit la composition du mortier de liaison des différents blocs de meulière entre eux. Dans le cadre de l'application visée, la charge de ruine, que ce soit pour un renforcement par lamelles ou par tissus, a été multiplié par 5. Cependant, un comportement fragile est constaté pour les voûtes renforcées par lamelles. Mais, du fait de la rigidité importante des lamelles, la voûte reste en place contrairement au voûtes non enduites et aux voûtes renforcées par tissus de carbone.

D'un point de vue financier, l'application des tissus est plus aisé et donc plus rapide par rapport aux lamelles. De



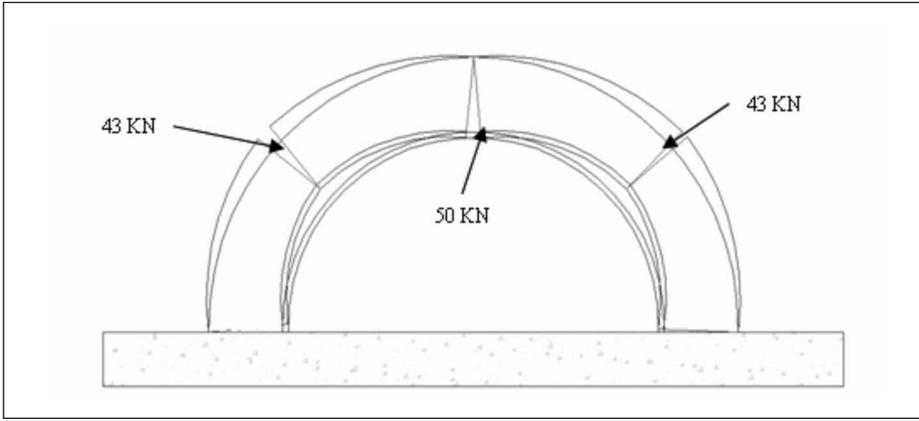
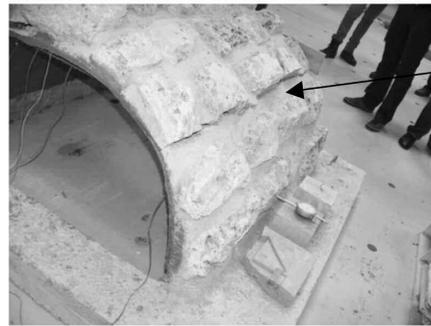


Figure 11. Mode de ruine de la voûte renforcée par lamelle de carbone



Décollement des lamelles

Figure 12. Décollement des lamelles de carbone



Fissurations au niveau des reins à l'extrados à 45 KN

Figure 15. Fissurations au niveau des reins à l'extrados



Fissurations au niveau des reins à l'extrados

Figure 13. Fissurations au niveau des reins à l'extrados



Détachement des fibres



Détachement des fibres

Figure 14. Détachements des fibres de carbone (tissu)



plus, il est plus simple de faire du « multicouches » de tissus pour accroître la capacité portante de la structure. Des essais sont donc envisagés après calage numérique pour effectuer des essais sur voûtes avec plusieurs couches de tissus afin d'arriver à un gain de charge identique à un chemisage par béton armé projeté.

8. REMERCIEMENT

Nous tenons à remercier les sociétés Freyssinet, Lanko, Sika, Structure & Réhabilitation et Weber & Broutin pour leur participation financière et leur aide technique dans la réalisation de ce projet de recherche.

9. BIBLIOGRAPHIE

- S. Kesteloot, Réhabilitation des ouvrages d'assainissement par matériaux composites : Etude expérimentale et dimensionnement par calculs numériques, Thèse de doctorat, Université d'Artois, 2005.
- E. Gérard (1908), *Paris souterrain*, édition Sides, ré-édité en 1991
- Gérard Bechmann (1888), *salubrité urbaine, distribution d'eau, assainissement, encyclopédie des travaux publics*, Paris, Baudry et cie
- E. Belgrand (1887), les travaux souterrains de Paris V, deuxième partie-les égouts de Paris, Dunod
- A. Clément et Gilles Thomas (2001), *Atlas du Paris Souterrains. La doublure sombre de la ville lumière*. Editions Parigramme
- J. Favier (1997), *Paris deux mille ans d'histoire*, Edition Fayard, p. 214-227
- B. Védry (1996), *Ballade écologique au fil de la Seine en 1900. Petite histoire illustrée de l'assainissement de la région parisienne il y a cent ans*, Editions Graphein
- M. F. Pointeau (1995), *Rendre l'eau à la vie*. 1970,1995, 25^e anniversaire du SIAAP, Editions CEP Euro
- J. Hervieu, *Traité Pratique de la Construction des Egouts*, Paris BAUDRY & C^{IE} Editeurs, 1897.
- Rapport Interne, Structure & Réhabilitation, Bagnolet
- N. Khoufache, Contribution à la restructuration des ouvrages d'assainissement en maçonnerie au moyen de matériaux composites, Thèse de Doctorat, Université d'Artois, Décembre 2008.
- Restructuration des collecteurs visitables* ; Guide technique, Tomes 1&2, Projet National RERAU, 2002 et 2004.
- O. Thepot, Prise en compte des caractéristiques en petites déformations des sols dans l'étude du comportement des collecteurs enterrés, Thèse Doctorat, ENPC, 2004.
- A. Gabor., Contribution à la caractérisation et à la modélisation des maçonneries non-renforcées et renforcées par matériaux composites. Thèse Doctorat, Lyon 1, 2002.
- RILEM (1994) LUMB1-compressive strength of small walls and prisms. Technical report, RILEM.
- M. Albert, J. Cheng, A. Elwi, «*Strengthening of unreinforced masonry walls using FRP*», Journal of Composites for Construction (2001).
- Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures, CNR-DT 200/2004, – Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, ROME, 2004
- G. Creazza, A.V. Saetta, R. Matteazi., «*Analysis of masonry structures reinforced by FRP*», Historical Constructions Guimarães, 2001.
- M.R Valluzi and C. Modena, «*Experimental analysis and modelling of masonry vaults strengthened by FRP*», Historical Constructions Guimarães, 2001.
- P. Foraboschi, «*Strengthening of Masonry Arches with Fiber-Reinforced Polymer Strips*», 2004.
- M. Como, U. Ianniruberto, M. Imbido. «*On the structural capacity of masonry arches strengthened by FRP*». Arch'01. (2002). pp. 277-282.
- S. Plumey, Interaction sol-structure dans le domaine des tranchées couvertes. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2007.
- S. Kesteloot, C. Djelal, I.Benslimane, N. Khoufache-«*Renforcement des ouvrages d'assainissement à l'aide de matériaux composites*»- AUGC2009, 2-4 juin 2009, St Malo
- Annales des Ponts des Chaussées, 1834, 1836, 1854 et 1856, Bibliothèque Centrale des Ponts et Chaussées
- M. Saade, S. Kesteloot, C. Djelal, L. Hamitouche, I. Benslimane-«*Influence of a fibre coatings for the repair of sewerage in masonry- International conference on advances in construction materials through science and engineering*», 5-7 Septembre, 2011, Hong-Kong