

---

# Renforcement des ouvrages d'assainissement en maçonnerie à l'aide de matériaux composites – Etat de l'art

Nabil KOUFACHE<sup>1</sup>, Stephan KESTELOOT<sup>1</sup>, Chafika DJELAL<sup>1</sup>,  
Jean Marc DEL FABRO<sup>2</sup>, Idriss BENSLIMANE<sup>3</sup>

<sup>1</sup> LAMTI, Technoparc Futura, 62400 BETHUNE

<sup>2</sup> Structure & Réhabilitation, 72/74, avenue Gambetta 93170 BABNOLET

<sup>3</sup> 3Abtp, rue Charles Graindorge, 93170 BAGNOLET

---

*RÉSUMÉ. Les ouvrages d'assainissement en maçonnerie connaissent de nombreuses pathologies et doivent donc être réhabilités. Les techniques de réhabilitation actuellement utilisées sont appliquées sur la périphérie complète de l'ouvrage, ce qui se traduit par des coûts élevés et une diminution de la section hydraulique.*

*L'étude envisage l'application du procédé de renforcement par lamelles de carbone à la restructuration de collecteurs en maçonnerie. Appliqué en zone de voûte, il s'agit d'un procédé ponctuel.*

*Ce papier fait l'état des études expérimentales réalisées dans de nombreux laboratoires afin d'identifier les paramètres d'études.*

*Cette synthèse bibliographique nous permettra donc de définir nos paramètres afin de définir notre campagne expérimentale.*

*ABSTRACT. Old masonry sewerage systems endeavour many pathologies and require to be rehabilitated. Current rehabilitation techniques apply to the whole internal surface of the conduct, involving high costs and a reduction of its hydraulic capacity. Instead, the present study concerns the structural strengthening of masonry sewers by carbon plates, intended as a local process of reinforcement. The paper reviews relevant experimental studies carried in many laboratories on FRP masonry strengthening, with a focus on vaults reinforcement. This will enable us to define the parameters of our experimental campaign.*

*MOTS-CLÉS: Ouvrages d'assainissement, Maçonnerie, Renforcement, Lamelles de carbone.*

*KEYWORDS: sewerage systems, Masonry structures, Strengthening, Carbon.*

---

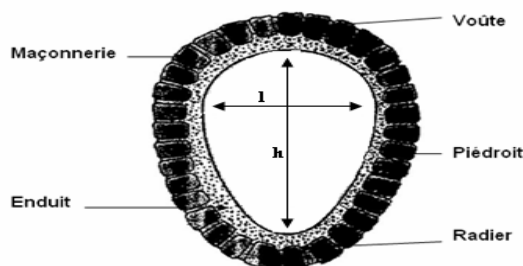
## 1. Introduction

La plupart des gestionnaires de réseaux d'assainissement en béton ou en maçonnerie, se 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 [1].

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

## 2. Généralités sur les ouvrages d'assainissement

Les collecteurs d'assainissement en maçonnerie sont de différentes natures. Ils peuvent être visitables ou non. Ils possèdent des formes diverses (circulaires, arches, ovoïdes, etc.). Ces ouvrages sont apparus au milieu du 19<sup>ème</sup> siècle en France. Ils ont été construits soit en tranchée soit en souterrain et comportent généralement une voûte plein cintre, deux piédroits et un radier (fig.1). La maçonnerie peut être apparente ou enduite. Seuls les ovoïdes seront puisque actuellement en région parisienne, les principaux programmes de réhabilitation à venir concernent ce type de collecteur [2].



**Figure 1.** Nomenclature d'un ovoïde en maçonnerie

Une enquête sur les ovoïdes visitables en maçonnerie de meulière, situés en région parisienne, a été effectuée. 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. Ceux sont principalement des fissures longitudinales au niveau des piédroits et en voûte. Ces défauts sont souvent accompagnés de fissures transversales.

Ces dégradations peuvent être la conséquence de plusieurs facteurs de dégradation comme les surcharges, les attaques chimiques et la vétusté de ces 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 [3]. Ces essais sont accompagnés de prélèvements pour valider la qualité de la maçonnerie. A la suite de nombreux essais réalisés, les qualités des maçonneries couramment rencontrés sont classées comme suit :

Qualité de la maçonnerie	Module de Young (MPa)
Bonne	10000
Moyenne	5000
Médiocre	3000

**Tableau 1.** *Classification des maçonneries [2]*

Les principaux travaux effectués pour la réhabilitation des collecteurs présentant le type de pathologies rencontrées dans notre enquête, consistent en la réalisation d'injections de collage avec effet de régénérations, 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.

### **3. Application de plats composites aux ouvrages en béton armé ou non**

Dans le cadre de sa thèse, Kesteloot [1] a appliqué le procédé de réhabilitation par collage de plats composites aux ouvrages d'assainissement en béton armé ou non.

Une étude bibliographique sur les différentes pathologies a été réalisée afin de comprendre les mécanismes de dégradations et de connaître les causes de celles-ci. L'application du procédé de renforcement par collage de lamelles composites à fibres de carbone en clé de voûte a été réalisée en laboratoire sur des ovoïdes préfabriqués T180 afin de ponter les fissures longitudinales. Des essais préalables ont été effectués pour déterminer les caractéristiques minimales du support. Lors de l'application sur support humide et in-situ, des essais d'arrachement par traction directe ont montré une rupture dans le support béton.

Une campagne expérimentale a été menée en laboratoire avant une application in-situ. Ce type de renforcement s'est alors avéré être bien adapté à ces ouvrages. Sur l'ensemble des essais, nous avons obtenu un retardement de la fissuration, ce qui est très important. De plus, le mode de rupture est identique qu'elle que soit la disposition du renforcement. Il est observé un gain de charge allant jusqu'à 55%.

Avant de transposer le procédé sur des ouvrages en maçonnerie, il est nécessaire de faire l'état de l'art du renforcement des structures en maçonnerie par collage de composites.

#### 4. Réhabilitation des ouvrages en maçonnerie par matériaux composites – Etat de l'art

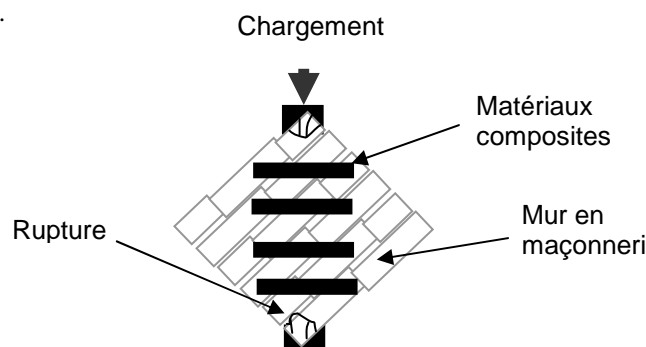
Cette partie, essentiellement bibliographique, fait le point des essais effectués sur les structures en maçonnerie renforcées par matériaux composites, en distinguant le renforcement d'éléments plans d'une part, de voûtes d'autre part.

##### 4.1. Essais sur surfaces planes

Dans le cadre d'une étude sur le comportement d'ouvrages en maçonnerie situé en zone sismique, Gabor [4] a réalisé une recherche bibliographique et des essais destructifs sur des panneaux en briques creuses, construits suivant les recommandations techniques de la RILEM [5]. 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 2.** *Essais de compression diagonale sur des murs renforcés [4]*

Le mode de rupture par traction diagonale a été observé uniquement dans le mur renforcé par les fibres de verre. La 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. [6]. 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.

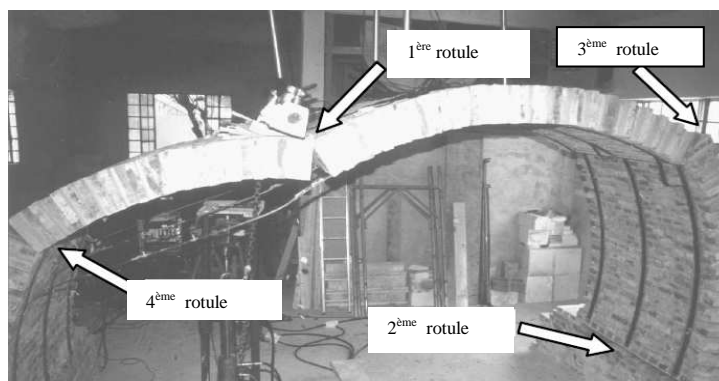
#### **4.2. Essais sur voûtes maçonnées**

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 [7].

G. Creazza et al. [8] 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 [8]

M.R Valluzi et C. Modena [9], tout comme P. Foraboschi [10], ont étudié le comportement des voûtes en maçonnerie de briques non enduites, renforcées par des matériaux composites. L'influence du type de fibre (carbone, 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. [11] 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 la constatation 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 plats 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. Le paragraphe suivant donnera les orientations pour résoudre ce problème.

## **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, la plupart du temps, 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 plats composites. Notre étude devra donc consister à appliquer des plats de carbone sur des structures voûtées en maçonnerie enduite. Pour atteindre cet objectif, notre campagne expérimentale comprendra de 3 phases.

La première phase concerne la validation de nos différents matériaux. Des essais de caractérisation des matériaux seront effectués, notamment sur les blocs de meulière et sur les enduits retenus. Les enduits sont les matériaux couramment utilisés pour réhabiliter les ouvrages d'assainissement par les méthodes traditionnelles. Après avoir caractérisé ces matériaux, nous procéderons aux essais d'interfaces, soit des essais d'arrachement par traction direct et de glissement. Ces essais valideront l'utilisation de notre enduit. En effet le mortier doit répondre à deux critères importants qui est de retransmettre les efforts aux renforts et d'avoir une capacité d'adhésion nécessaire pour ne pas avoir un décollement prématuré du complexe lamelles/colle/enduit.

Puis, en seconde phase du projet, des structures planes en maçonnerie de meulière enduite renforcées et non renforcées seront réalisées. Des essais de flexion seront réalisés afin de mesurer le gain apporté par l'utilisation de plats composites et de connaître le mode de rupture de ces structures.

En dernière phase, nous testerons en laboratoire des voûtes enduites renforcées ou non. Nos voûtes devront représenter le comportement d'un ovoïde enterré avec un chargement représentant les surcharges verticales. Parallèlement à ces essais, des simulations numériques seront réalisées pour préciser la géométrie de notre voûte et des renforts.

## 6. Conclusion

Cette 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. Dans le cadre de l'application visée, l'étude prendra en compte l'incidence sur ces gains de l'enduit disposé entre les plats composites et la maçonnerie.

## 7. Bibliographie

- [1] S. Kesteloot, *Réhabilitation des ouvrages d'assainissement par matériaux composites : Etude expérimentale et dimensionnement par calculs numériques*, Thèse de doctorat, Université d'Artois, 2005.
- [2] *Restructuration des collecteurs visitables ; Guide technique*, Tomes 1&2, Projet National RERAU, 2002 et 2004.
- [3] O. Thepot, *Prise en compte des caractéristiques en petites déformations des sols dans l'étude du comportement des collecteurs enterrés*, Thèse Doctorat, ENPC, 2004.
- [4] A. Gabor., *Contribution à la caractérisation et à la modélisation des maçonneries non-renforcées et renforcées par matériaux composites*. Thèse Doctorat, Lyon 1, 2002.
- [5] RILEM (1994) LUMB1-compressive strength of small walls and prisms. Technical report, RILEM.
- [6] M. Albert, J. Cheng, A. Elwi, *Strengthening of unreinforced masonry walls using FRP*, Journal of Composites for Construction (2001).
- [7] 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
- [8] G. Creazza, A.V. Saetta, R. Matteazi., *Analysis of masonry structures reinforced by FRP*, Historical Constructions Guimarães, 2001.
- [9] M.R Valluzi and C. Modena, *Experimental analysis and modelling of masonry vaults strengthened by FRP*, Historical Construction Guimarães, 2001.
- [10] P. Foraboschi, *Strengthening of Masonry Arches with Fiber-Reinforced Polymer Strips*, 2004.
- [11] M. Como, U. Ianniruberto, M. Imbido. On the structural capacity of masonry arches strengthened by FRP. Arch'01. (2002). pp. 277-282.