

Application de renforts composites aux ouvrages d'assainissement en meulière enduite

S. Kesteloot¹, C. Djelal¹, I. Benslimane²

¹ LAMTI, PRES Université Lille Nord de France – IUT, 1230 rue de l'Université, 62400 BETHUNE

² Structure & Réhabilitation, Tour Gallieni 2, 36, avenue du Général de Gaule, 93170 BABNOLET

RÉSUMÉ. Cette étude s'intègre dans le projet RESAME. Une réduction des coûts de réhabilitation de l'ordre de 20% à efficacité équivalente constitue l'objectif principal de ce projet tout en diminuant le temps d'intervention sur site. La première partie permet de retracer l'histoire, de donner les différentes étapes de la construction des égouts de Paris et de faire le point sur les pathologies et les techniques de réparation et d'auscultation de ces ouvrages. Une synthèse bibliographique sur l'application de cette technique de réparation à des ouvrages en maçonnerie complète cette partie. La seconde partie, à caractère expérimental a pour but de caractériser les matériaux et en particulier l'interface enduit/colle/composite.

ABSTRACT. This study is part of the RESAME project. A reduction in rehabilitation costs of about 20% efficiency equivalent is the principal objective of this project while reducing time on-site. The first part enables to recount history, to give the various stages of construction of sewers of Paris and to take stock of the pathologies, the repair techniques and of the auscultation of these structures. A bibliographical summary on the application of this technique to repair masonry structures complete this part. The second part, from an experimental aspect, aims to characterize materials and in particular the interface coating / glue / composite.

MOTS-CLÉS: Ouvrages d'assainissement, maçonnerie, renforcement, tissus de carbone.

KEYWORDS: Sewerage systems, masonry, reinforcement, fabrics of carbon.

1. Introduction

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 [1]. M. Belgrand [2] en 1877 et M. Bechmann en 1888 [3] ont écrit des volumes très complets d'une clarté et d'une précision parfaite sur les égouts de Paris.

De nos jours, les équipements d'assainissement ont la propriété de durer et 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.

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. La plupart des gestionnaires de réseaux d'assainissement se trouve face aux problèmes de manque de moyens budgétaires et doivent mobiliser des financements conséquents pour réhabiliter ces ouvrages, tout en recherchant des solutions techniques et économiques les mieux adaptées.

La recherche de nouveaux procédés de restructuration, afin de réduire les coûts de réparation, amène à réfléchir sur l'application de méthodes ponctuelles de réhabilitation. Il existe depuis les années 90 en France, une technique de restructuration partielle utilisée dans le domaine du bâtiment. Il s'agit d'une réhabilitation par collage de plats ou de tissus composites à base de fibres de carbone. Cette technique a été transposée aux ouvrages d'assainissement en béton (armé ou non) dans le cadre de la thèse de Stephan Kesteloot [4]. Cette étude révèle une diminution des coûts de réparation de l'ordre de 50% avec un gain de charge de 30% minimum par rapport aux techniques utilisées habituellement. Ce procédé fait actuellement l'objet d'une expérimentation sur un collecteur du Val-de Marne de 10 m de longueur depuis janvier 2005. Cependant les ouvrages d'assainissement à réhabiliter en priorité en région parisienne sont en maçonnerie.

2. Etat de l'Art

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.

Dans son « Traité pratique de la construction des égouts », Hervieu [5] 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.

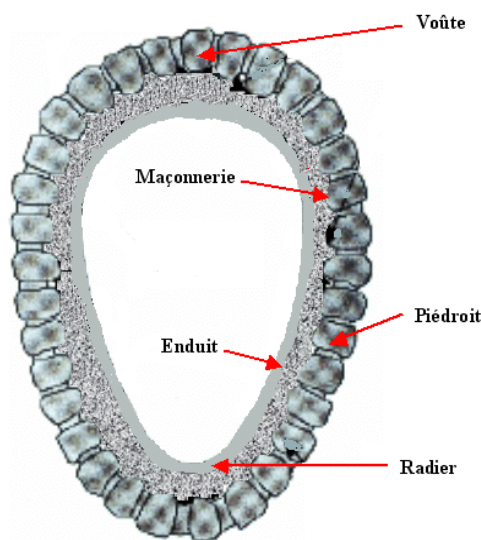


Figure 1. Ovoïde en maçonnerie

Une enquête sur les ovoïdes visitables en maçonnerie de meulière, situés en région parisienne, a été effectuée à partir d'études réalisées par la société Structure & Réhabilitation [6]. 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 [7]. 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 [8] 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 [7] des collecteurs présentant les 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.

A travers une étude bibliographique [9], une synthèse des essais menés sur les structures en maçonnerie (briques) renforcées par matériaux composites a été réalisée, en distinguant le renforcement d'éléments plans d'une part, de voûtes d'autre part.

Tous les essais réalisés sur des structures renforcées par des matériaux composites ont fait l'objet des remarques suivantes :

- l'application des matériaux composites modifie le mécanisme classique de rupture de la voûte ;
- l'utilisation des renforts composites induit une augmentation importante en terme de résistance et la charge de ruine. Cette augmentation est supérieure à 50% dans pratiquement tous les essais ;
- le gain est plus important lors de l'utilisation de renforts à base de fibres de carbone.
- la formation de rotules se produit dans les sections renforcées ;
- le décollement du renfort composite se produit dans le cas du renforcement à l'intrados des voûtes ;

- la rupture par glissement le long d'un joint de mortier se produit dans le cas d'un renforcement à l'extrados.

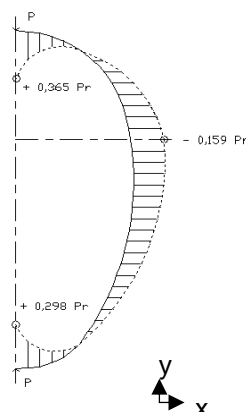
Dans le cas de structures en maçonneries enduites, les études antérieures ont montré une rupture prématurée des structures par décollement du complexe enduit/renforcement. Cependant, l'enduit classique a été remplacé par une couche de résine époxydique lors d'essais sur structures planes maçonnées.

En conclusion, on constate, que le procédé de renforcement par matériaux composites est applicable aux ouvrages d'assainissement en béton [4], présentant des courbures, ainsi qu'aux ouvrages en maçonnerie de brique également voûtés. Mais, aucune étude n'a été réalisée sur le renforcement ponctuel de collecteurs d'assainissement en maçonnerie de meulière au moyen de fibres de carbone.

3. Dimensionnement des corps d'épreuves

Avant la réalisation des essais, il est nécessaire de dimensionner les corps d'épreuves. En effet, du fait de la complexité des ovoïdes en meulière, les essais seront menés sur des voûtes en meulière renforcées ou non. Le chargement retenu est un chargement vertical représentatif des poids des terres et des charges de surfaces. De ce fait, il est nécessaire de modéliser la voûte afin que son comportement corresponde à un ouvrage enterré et d'en déduire ses dimensions.

A partir des calculs extrêmement complexes menés par Kentie [10], le mécanisme de ruine est déduit du diagramme des moments. Les zones tendues représentent les zones de fissuration du béton lors du dépassement des contraintes limites de traction. La figure 2 donne la répartition des moments le long du contour d'un ouvrage ovoïdal sans embase.



Avec r le rayon de courbure moyen de l'ouvrage et P la charge appliquée.

Figure 2. Diagramme des moments

Le moment maximal est relevé en clé de voûte, comme le montre la figure 2. A long terme, la maçonnerie présente des déformations (par micro-fissuration ou formation de rotules), ce qui induit la redistribution des contraintes et donne aux ouvrages des possibilités d'adaptation.

Deux mécanismes de ruine sont alors définis [11] :

- ruine par affaissement de voûte et divergence des piédroits lors de chargement vertical ;
- ruine par convergence des piédroits sous poussée latérale.

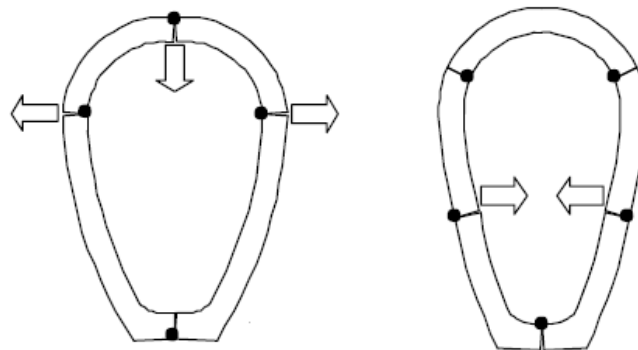


Figure 3. Mécanismes de ruine d'un ovoïde

Les calculs numériques aux éléments finis sont menés dans le cadre de la mécanique de la rupture. Le logiciel est ouvert et intègre les possibilités de calcul de matériau fissuré. Il sera enrichi à la fin de cette étude par l'introduction des lois de comportement obtenues après essais sur les différents matériaux. Cette partie doit permettre d'utiliser ce logiciel en vue de l'application du procédé de renforcement sur des ouvrages en place. Ces calculs permettront de valider notre modèle et notre procédé.

3.1. Choix du modèle

Le modèle de voûte seule est représentatif de l'état de l'ouvrage T200 existant après dégarnissage de l'enduit. Ce dégarnissage concerne une épaisseur de 1 à 2 cm en moyenne. Aussi, et afin de limiter le nombre de voûtes testées, l'état de référence avant renforcement est considéré réalisé par une voûte après application d'un enduit sur 3 cm environ, en supposant négligeable la contribution structurelle de cet enduit. Les voûtes ont une longueur de 1,20 m.

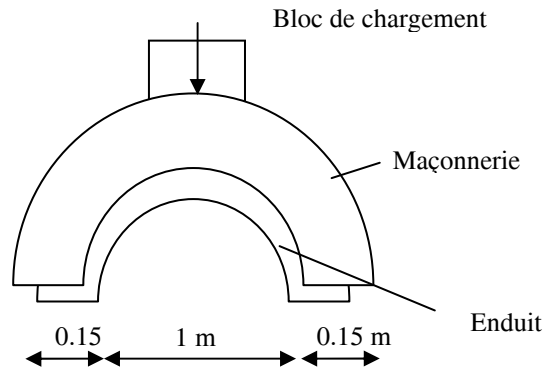


Figure 4. Principe de l'essai

Le chargement est appliqué sous forme de pression verticale sur la génératrice supérieure du bloc. Après vérification de la faible contribution relative vis-à-vis du chargement appliqué en clé, le chargement de poids propre n'est pas activé.

3.2. Paramètres d'études

Le modèle est maillé automatique avec des éléments quadrangulaires.

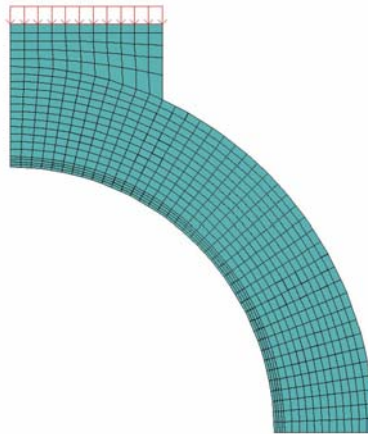


Figure 5. Maillage et zone de chargement

Les lois de comportement adoptées pour la maçonnerie et pour l'enduit sont des lois exponentielles (Figure 6). Le bloc de chargement est modélisé en élasticité linéaire.

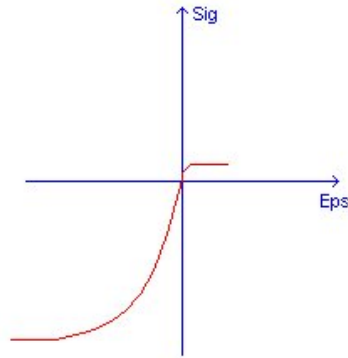


Figure 6. Loi de comportement exponentielle

Les caractéristiques des matériaux sont détaillées ci-après d'après les résultats obtenus d'essais sur chantier.

Maçonnerie :

- Module de déformation longitudinale : $E_{\text{maçonnerie}} = 5000 \text{ MPa}$
- Coefficient de Poisson : $\sigma_{\text{maçonnerie}} = 0,2$
- Résistance à la compression : $Rc_{\text{maçonnerie}} = 5 \text{ MPa}$
- Poids volumique : 22 kN/m^3
- Déformation limite en compression : $\sigma^- = 0,02 \%$
- Déformation limite en traction : $\sigma^+ = 0,002 \%$

Enduit :

- Module de déformation longitudinale : $E_{\text{enduit}} = 24000 \text{ MPa}$
- Coefficient de Poisson : $\sigma_{\text{enduit}} = 0,15$
- Résistance à la compression : $Rc_{\text{enduit}} = 30 \text{ MPa}$
- Résistance à la traction : $Rt_{\text{enduit}} = 0,5 \text{ MPa}$
- Poids volumique : 22 kN/m^3

- Déformation limite en compression : $\sigma^- = 0,02 \%$
- Déformation limite en traction : $\sigma^+ = 0,002 \%$

Note : La résistance à la traction adoptée peut paraître surestimée par rapport à la résistance attendue d'un enduit neuf. Il s'agit d'un paramètre du modèle, qui intervient comme résistance résiduelle pour des déformations supérieures à la déformation de fissuration.

Bloc de chargement :

- Module de déformation longitudinale : $E_{\text{bloc}} = 200 \text{ MPa}$
- Coefficient de Poisson : $\nu_{\text{bloc}} = 0,3$
- Poids volumique : 19 kN/m^3

3.3. Résultats

Les courbes charge-déplacement en clé intrados sont données ci-après pour plusieurs valeurs de la résistance à la traction adoptée pour la maçonnerie. Lors de l'application d'un chargement croissant, le modèle désactive les éléments dont la déformation maximale dépasse les seuils définis par la loi de comportement. Le comportement de la voûte correspond au comportement rencontré dans la théorie. De plus, il est représentatif des mécanismes de déformations d'un collecteur ovoïde enterré.

La charge de ruine est ici définie comme le dernier pas de chargement atteint par le calcul (pas ne permettant plus la convergence du calcul). Les courbes ne permettent pas de définir un chargement limite.

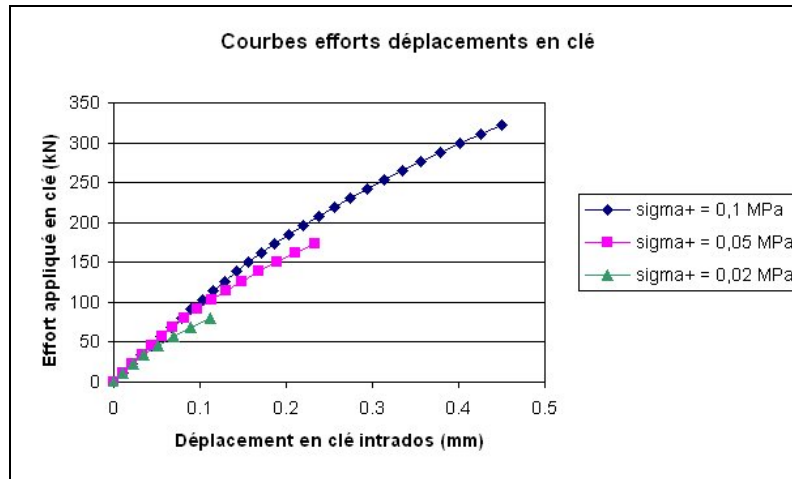


Figure 7. Courbes charge/déplacement en clé de voûte

La charge de ruine calculée est fortement dépendante de la contrainte de traction rentrée dans le modèle. La contrainte de traction qui correspond à l'ordre de grandeur de la charge de ruine attendue est très faible (0,02 MPa).

3.3.1. Résultats en termes de contraintes

Les graphes ci-dessous représentent les contraintes et directions principales dans la voûte au dernier pas de chargement (ici, calcul avec une contrainte de traction de 0,02 MPa).

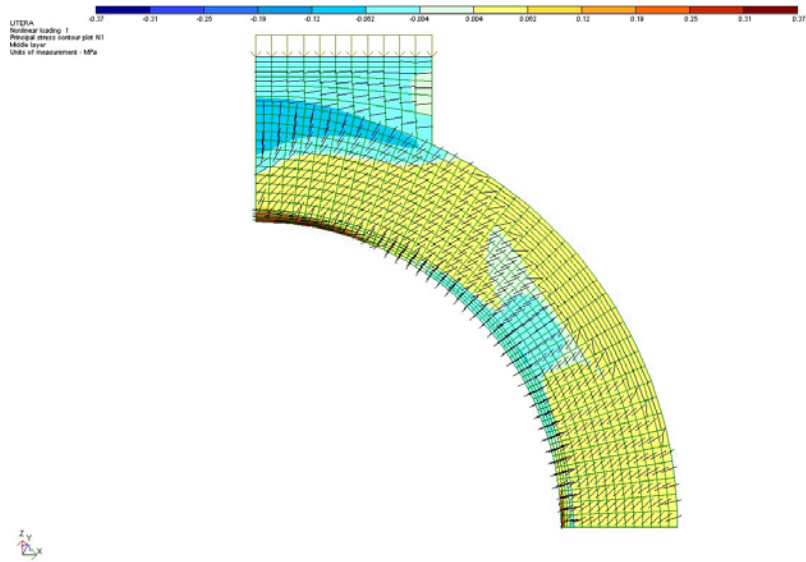


Figure 8. *Contraintes principales N1 et directions principales associées*

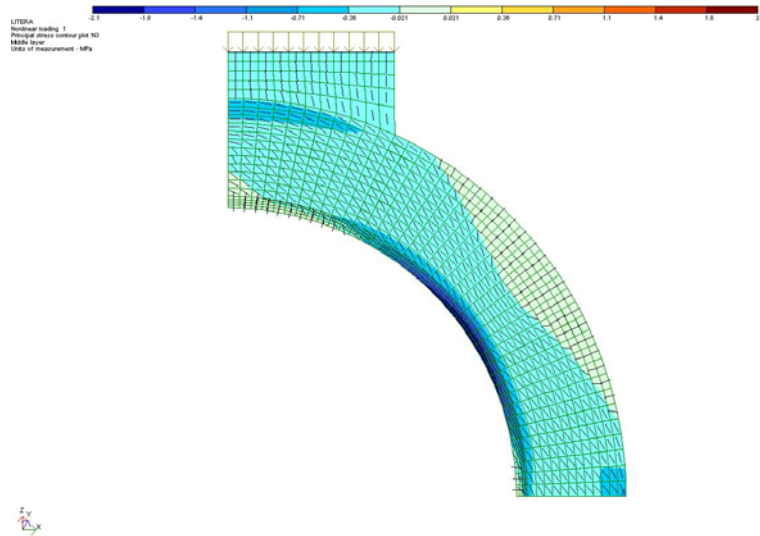


Figure 9. *Contraintes principales N3 et directions principales associées*

3.3.2. Résultats en termes de déplacements

La déformée du modèle est représentée par le graphe ci-dessous (contrainte 0,02 MPa).

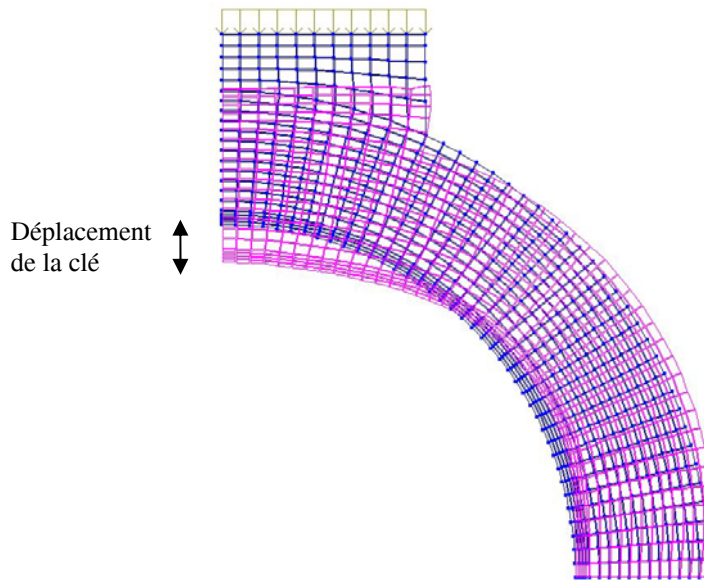


Figure 10. *Déformée de la voûte*

Le déplacement maximal vertical en clé intrados au dernier pas de chargement est de 0,11 mm. Le déplacement maximal horizontal aux reins, c'est-à-dire la jonction entre la clé de voûte et le reste de la voûte, est de 0,05 mm.

La modélisation adoptée concerne une voûte enduite de 19 cm d'épaisseur. Compte tenu des irrégularités de la maçonnerie, elle peut être jugée représentative d'une voûte de 20 cm d'épaisseur environ avant application de l'enduit.

La charge de ruine de la voûte enduite estimée sous un chargement appliqué avec une demi-ouverture angulaire de 25° serait de l'ordre de 70 kN. Le calage d'un modèle éléments finis à partir de cette charge a été réalisé. Il requiert l'adoption d'une valeur très faible pour le paramètre de résistance à la traction. Les déplacements verticaux en clé à la ruine sont voisins de 0,11 mm.

Les résultats obtenus montrent une corrélation entre les calculs numériques et la théorie. De plus les contraintes obtenus ainsi que les déplacements correspondent à ceux d'un ovoïde. Les essais pourront être réalisés sur des voûtes, à la place

d'ovoïdes. Les dimensions de la voûte utilisée dans notre calcul aux éléments finis seront reprises pour la campagne expérimentale, soit un diamètre de 1,00 m et une épaisseur de 0,15 m.

4. Campagne expérimentale

Notre campagne expérimentale s'attachera d'une part à reproduire le comportement des voûtes enterrées, qui fait apparaître des rotules plastiques (Figure 11) [12] ; et d'autres part à valider l'application du procédé.

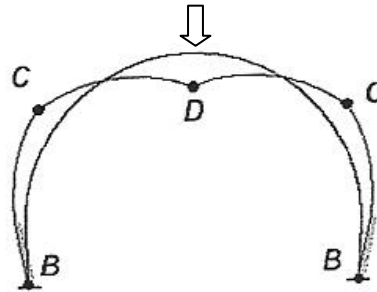


Figure 11. Formation de rotules plastiques

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 : les bétons de sable de chez Freyssinet (FOREVA M110);
- Renforts composites à base de fibres de carbone : tissus de Freyssinet et colle associée.

4.1. Caractéristiques des matériaux

4.4.1. 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). Des échantillons ont été envoyés au Muséum d'Histoire Naturelle, section Géologie, Histoire de la terre pour être analysés. Une analyse pétrographique et une observation au microscope optique ont été menées sur des échantillons préalablement taillés en lames minces de 0,03 mm d'épaisseur.

Trois échantillons nommés faciès 1, 2 et 3 ont été observés. Chaque faciès est décrit ci-dessous :

1- *le faciès moyennement vacuolaire* : Faciès micritique silicifié. De nombreux vides sont remplis de silice de paléosols, remplissage polyphasé. On note aussi de rares reliquats d'argiles d'illuviation.

2- *roche la moins caverneuse, beige* : microquartz avec en bordures des vides avec des sphérolites de silice fibreuse. On note aussi des reliquats d'argiles d'illuviation brunâtre. La zone la plus compacte montre une micrite + ou - silicifiée à cristaux de quartz dispersés dans la micrite et zones de quartz mosaïque à fibreux dans les vides.

3- *roche la plus caverneuse* : structure gaufrée colorée par les oxydes de fer la roche est une micrite silicifiée. Les vides sont remplis de silice fibreuse colorée par des oxydes de fer et des argiles.

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 12. Essais de compression sur éprouvettes cubiques

L'ensemble des résultats obtenus montre que la meulière est un matériau ayant des caractéristiques mécaniques très dispersées. En effet, la contrainte en compression est comprise entre 5 et 30 MPa. De même, la contrainte d'arrachement est comprise entre 0.5 et 2 MPa environ. Le module d'élasticité moyen est de 2 500 MPa.

4.4.2. *Le mortier de liaison*

Le mortier de liaison entre les différentes pierres a été réalisé après avoir effectué des recherches bibliographiques à la bibliothèque des Ponts et Chaussées [13]. A cette époque, 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 ». Le dosage en liant est de 400 kg/m³.

Les composants de ce mortier sont :

- Le ciment : CEM II / B-M 62,5 CP2 ;
- La chaux : une chaux hydraulique blanche NHL5. L'utilisation de cette chaux permet d'accélérer le durcissement du mortier par rapport à un mortier de chaux aérien. Les résistances de cette chaux peuvent aller jusqu'à 15 MPa à 28 jours avec un rapport E/C de 0,6 [16] ;
- Un sable de rivière semi-concassé.

4.2. *Construction des voûtes*

Quatre voûtes ont été construites en respectant les techniques de construction utilisées à l'époque de Baron Haussmann. Les blocs de meulière (environ 15 × 20 × 20) 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 conservées.



Figure 13. *Positionnement des pierres*

Les blocs sont ensuite maçonnés. L'enduit est ensuite disposé puis lissé. Les renforts ont été collés sur la totalité de la voûte comme le montre la figure 14. Le collage a été réalisé suivant le CCT 3/04-424. Le tissu est collé en appliquant une couche de résine sur les bandes de 20 cm de tissus préalablement découpées. La colle doit pénétrer intégralement le tissu. Puis les bandes de tissus sont disposées sur la voûte en juxtaposition.



Figure 14. *Disposition des renforts*

4.3. Principe de l'essai

Les essais sont réalisés pour un seul chargement vertical en voûte. Afin de répartir la charge uniformément en clé de voûte, un profilé métallique est placé sur celle-ci.



Figure 15. Principe de l'essai

Le vérin a une capacité de 250 kN. L'ensemble des essais est piloté en déplacement à raison de 1 mm/min.

Lors de nos essais, l'instrumentation sera composée d'un capteur de déplacement, d'un capteur de force et d'un capteur de déplacement pour mesurer la position de la tête de vérin.

Le capteur est relié à la centrale d'acquisition via un conditionneur (Convertisseur tension/déplacement). Le capteur de déplacements de type inductif est situé au niveau de la clé de voûte à l'intrados (déplacement vertical). La course est de ± 100 mm.

4.4. Résultats des essais

Deux voûtes renforcées et deux non renforcées ont été testées sous chargement vertical dans les mêmes conditions. Les résultats sont résumés dans le tableau ci-après.

Essais	Charge max [kN]	Charge d'apparition de la première fissuration	Flèche en Clé [mm]
voûtes non renforcé	136,05	115 kN en clé	2,20
voûtes renforcées	250*	235 kN en clé	0,90

*Charge maximale du vérin

Tableau 1. Résultats des essais sur voûtes

Concernant la voûte non renforcée, 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 fissures est continu dans la longueur de la voûte. Le mécanisme de ruine est présenté en figure 16. La disposition des rotules plastiques correspond aux calculs théoriques et numériques.

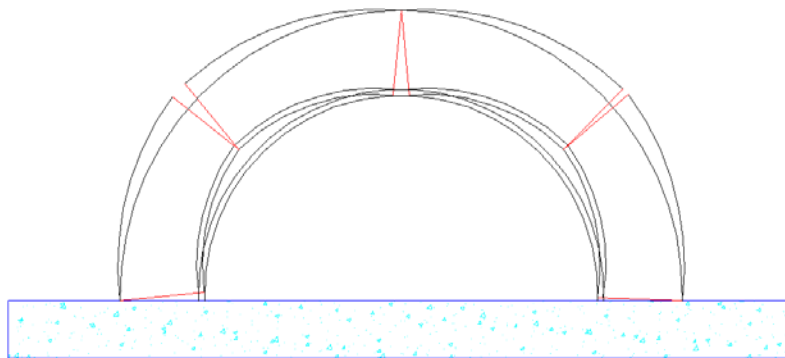


Figure 16. Mécanisme de rupture des voûtes non renforcées

Pour les voûtes renforcées, la rupture ne s'est pas produite du fait de la capacité du vérin. Les fissures sont apparues comme pour les voûtes non renforcées, c'est-à-dire au niveau des joints, mais de façon discontinue. A l'intrados, aucune fissure ou décollement du tissu n'a été constaté.

Une comparaison des voûtes non renforcées et renforcées est effectuée. En terme de déplacement en fonction de la charge, il est constaté une plus grande rigidité de la voûte renforcée. En effet, la voûte non renforcée fait apparaître une plus grande ductilité. La voûte renforcée présente une rigidité globale constante. La figure 17 compare les courbes charge/flèche en clé des deux voûtes.

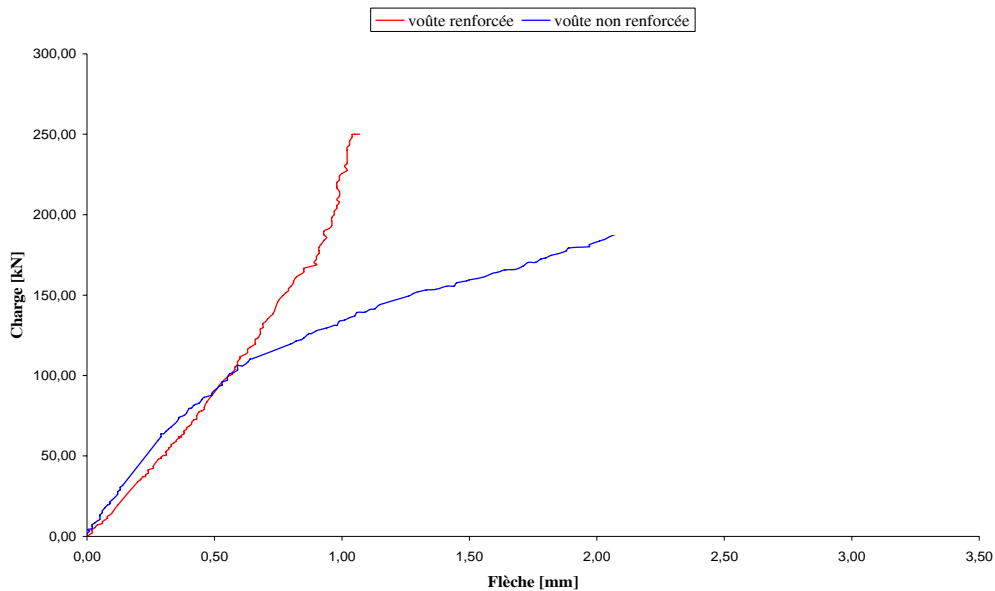


Figure 17. Courbes charge/déplacement de la clé de voûte

D'un point de vue comportemental, un gain de flèche est donc constaté. Concernant l'apparition de la fissuration, la première fissure a eu lieu à 115 kN pour la voûte non renforcée et à 235 kN pour la voûte renforcée. La charge de fissuration a donc été doublée.

5. Conclusion

La présence de l'enduit à l'interface enduit/colle/composite n'a pas posé de problème particulier. Les mécanismes de ruine obtenus lors de la modélisation de l'ouvrage correspondent aux mécanismes des voûtes testées. Le collage du tissu composite à base de fibres de carbone sur une voûte en maçonnerie enduite s'est avéré adapté au renforcement de celle-ci. La présence du tissu, a permis de retarder l'ouverture des fissures (doublement de la charge) et de réduire la flèche.

6. Remerciements

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

7. Bibliographie

- [1] Gérard E., « Paris souterrain », Edition Sides, ré-édité en 1991
- [2] Bechmann G., « salubrité urbaine, distribution d'eau, assainissement, encyclopédie des travaux publics », Paris, Baudry et cie, 1888.
- [3] Belgrand E., « Les travaux souterrains de Paris V, deuxième partie-les égouts de Paris », Dunod, 1887.
- [4] Kesteloot S., « Réhabilitation des ouvrages d'assainissement par matériaux composites: Etude expérimentale et dimensionnement par calculs numériques », Thèse de Doctorat, Université d'Artois, Mars 2005.
- [5] Hervieu J., « Traité Pratique de la Construction des Egouts », Paris BAUDRY & C^{IE} Editeurs, 1897.
- [6] Structure & Réhabilitation, Bureau d'études techniques, laboratoire d'essais et de contrôle, Bagnolet
- [7] Khoufache N., « Contribution à la restructuration des ouvrages d'assainissement en maçonnerie au moyen de matériaux composites », Thèse de Doctorat, Université d'Artois, Décembre 2008.
- [8] Restructuration des collecteurs visitables - Guide technique, Tome 1 et 2, Projet National RERAU. Edition Lavoisier, 2004.
- [9] Khoukache N., Kesteloot S., Djelal C. , Del Fabro J.M., Benslimane I., « Renforcement des ouvrages d'assainissement en maçonnerie à l'aide de matériaux composites – Etat de l' Art », XXVèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil, 23&25 mai 2007, Bordeaux.
- [10] Kentie, « Zterke-Berekening van riolbmzen net eivermig profiels' », technische Gemmeete blad, octobre 1915 – octobre 1917, Issu de GerrinA., Daniel G., "Traité de béton armé". Tome 8, Dunod, 1968.
- [11] Thépot O., « Prise en compte des caractéristiques en petites déformations des sols dans l'étude du comportement des collecteurs enterrés ». Thèse de Doctorat, ENPC, Janvier 2004.
- [12] Plumey S.. « Interaction sol-structure dans le domaine des tranchées couvertes ». Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2007.
- [13] Annales des Ponts des Chaussées, 1834, 1836, 1854 et 1856, Bibliothèque Centrale des Ponts et Chaussées
- [14] Raffard D., Modélisation de structures maçonnées par homogénéisation numérique non linéaire : Application aux ouvrages d'intérêt archéologique, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Décembre 2000.