

REHABILITATION DES OUVRAGES D'ASSAINISSEMENT

S. Kesteloot¹, C. Djelal¹, S. Baraka², I. Benslimane³

1) LAMTI, Béthune, France,
e-mail : stephan.kesteloot@fsa.univ-artois.fr /
c.djelal@wanadoo.fr

2) ADB-Soft, Bagnolet, France,
e-mail : s.barake@free.fr

3) Structure & Réhabilitation, Bagnolet, France,
e-mail: sr.ib@3abtp.com

RÉSUMÉ

Le patrimoine que représente les collecteurs visitables d'assainissement est constitué de plusieurs dizaines de milliers de kilomètres d'ouvrages. 10% du linéaire au moins est estimé avec un état de dégradation structurelle exigeant des travaux. Au cours de leur vie, les ouvrages enterrés peuvent se dégrader ou être amenés à changer de conditions d'exploitation. Les dégradations se traduisent principalement par l'apparition de désordres fonctionnels ou structurels qui peuvent être aussi la conséquence d'erreurs humaines. Afin de rendre les fonctions primaires d'un ouvrage dégradé, il existe de nombreuses techniques de réparation et de renforcement mais elles sont à la fois coûteuses et réparties sur la périphérie de l'ouvrage. Notre étude a pour objectif de développer les techniques de renforcement ponctuelles à l'aide de matériaux composites, maîtrisées dans le domaine du bâtiment et des travaux publics, aux ouvrages d'assainissement visitables. Cette technique novatrice dans ce domaine permet de faire perdurer ces ouvrages dans le temps sans aucune diminution hydraulique et pour un coût abaissé de près de 55% par rapport aux méthodes traditionnelles.

MOTS - CLÉS

Réhabilitation, Ouvrages d'assainissement, Matériaux composites, Renforcement.

1. Introduction

En France, de nombreux maîtres d'ouvrages ont pris conscience de l'étendue des réseaux d'assainissement. Ces ouvrages datent en majorité de la fin du XIX^{ème} ou du début du XX^{ème} siècle et sont encore, en règle générale, capable de reprendre le débit des effluents actuels. Du fait de l'urbanisation et de l'encombrement des sous-sols, nous sommes passés progressivement de l'époque de reconstruction à l'aire de la réhabilitation, la capacité hydraulique étant suffisante du fait de leur surdimensionnement [1].

De nombreuses techniques ont alors vu le jour, avec l'utilisation de divers produits. Une distinction est cependant faite entre les réhabilitations restructurantes ou non, c'est-à-dire avec apport mécanique ou non à la structurante existante. D'autres techniques ont un simple but d'étanchement ou de protection de la structure.

Les réseaux d'assainissement sont de géométrie variable (circulaire ou ovoïde) et de constitution

différente (matériau béton, maçonnerie). De plus, une différenciation peut être faite selon la grandeur de l'ouvrage. En effet, selon la hauteur du conduit, ces ouvrages peuvent être visitable ($h \geq 1,30m$) ou non visitable ($h < 1,30m$). Dans le cadre de notre étude, seuls les ouvrages d'assainissement visitable de forme ovoïdale en béton armé ou non, seront concernés.

Les ovoïdes (Fig. 1) sont constitués d'un radier, de deux piédroits et d'une voûte.

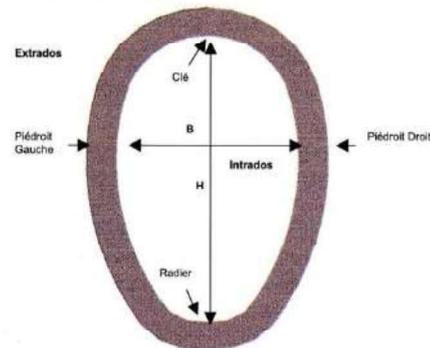


Figure 1 : Nomenclature d'un ovoïde

2. Pathologies les plus courantes et techniques de réparation des ouvrages d'assainissement

Les réseaux d'assainissement visitables subissent de nombreuses dégradations [1] pouvant provenir de l'intrados ou de l'extrados de l'ouvrage. Du fait de leur fonction, ils sont soit soumis à des attaques chimiques, principalement due à la formation d'H₂S [2], soit à des dégradations superficielles ou structurelles (tassement du terrain environnant, surcharge à la surface du sol ou erreurs de conception). Ces dégradations peuvent se situer sur l'ensemble de la périphérie de l'ouvrage ou dans des endroits particuliers, à l'intrados ou à l'extrados. Les principales pathologies sont décrites ci-après :

2.1 Les désordres superficiels

Les dégradations d'ordre superficiel [3] ne concernent généralement que l'enduit à l'intrados de l'ouvrage, ne causant aucun préjudice à court terme, ces désordres peuvent entraîner des dommages structurels importants s'ils ne sont pas traités rapidement. Nous pouvons avoir :

- Le faïençage, représentant un réseau de fissures décimétrique ;
- L'écaillage, donnant lieu à une formation d'éclats superficiels ;
- Le décollement de l'enduit existant ;
- L'usure du revêtement.

Ces désordres superficiels engendrent alors de possibles infiltrations d'eaux parasites ou des exfiltrations des effluents dans le sol.

2.2 Les fissures

Les fissures [1] sont liées à des risques structurels. Outre les conséquences sur l'intégrité de la structure des collecteurs, les fissures sont à l'origine de dysfonctionnement comme d'une part, les perturbations des écoulements et d'autre part des entrées d'eaux parasites de nappes et des fuites d'effluents. Les conséquences sont diverses :

- Une ruine structurelle du collecteur sous l'effet des charges ;
- Des infiltrations d'eaux parasites avec entraînement de fines de décomposition des terrains adjacents ;
- Une pénétration des racines facilitée.

Dans certains cas, les fissures peuvent entraîner l'effondrement de la voûte du collecteur ou du radier.

2.3 Les dégradations structurelles

Les déformations [1] des ouvrages enterrés sont les conséquences de désordres structurels. Celles-ci entraînent généralement des perturbations fonctionnelles telles qu'un mauvais écoulement ou encore des infiltrations ou exfiltrations. Ces pathologies sont très graves et peuvent générer le remplacement total du conduit déformé. Elles sont principalement dues

- à une surcharge verticale créant un déplacement vertical de la voûte et un déplacement horizontal des piedroits ;
- à des mouvements du sol (tassements différentiels, présence de vides, gonflement du sol en place,...).

La famille que composent les déformations reprend les affaissements de voûte, la convergence et la divergence des piedroits, les ventres ou le déversement des ouvrages et l'affaissement du radier.

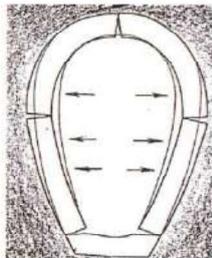


Figure 2 : Divergence des piedroits

De plus, un éclatement de l'ouvrage peut avoir lieu, se traduisant par une apparition de fissures longitudinales multiples qui peuvent conduire à une rupture de l'ouvrage sous l'action de sollicitations internes excessives.

Suite à cette énumération des pathologies les plus courantes, une description des techniques restructurantes est réalisée.

2.4 Techniques de restructurations

La projection de béton ou mortier [4] et le tubage par éléments préfabriqués [5] peuvent être qualifiés de techniques restructurantes, selon qu'il y ait apport mécanique ou non. De plus, les fonctions d'étanchéité,

d'hydraulicité sont redonnées au collecteur. Ces méthodes apportent à l'ouvrage une nouvelle "peau". Les fonctions d'anticorrosion et d'antiabrasion sont alors remplies.

Grâce à ses techniques, une atténuation des anomalies géométriques est constatée. Elle est alors accompagnée d'une réduction significative de la section utile de l'ouvrage, mais pas forcément de sa capacité hydraulique (diminution du coefficient de rugosité). L'objectif structurel de ces méthodes de renforcement est de rendre l'aptitude en service de l'ouvrage, tout en respectant les aspects sécuritaires. Le renfort, dans les principaux cas, ne participe qu'à la reprise de nouveaux chargements permanents ou variables, mis à part dans le cas d'une diminution de la rigidité de l'ouvrage existant.

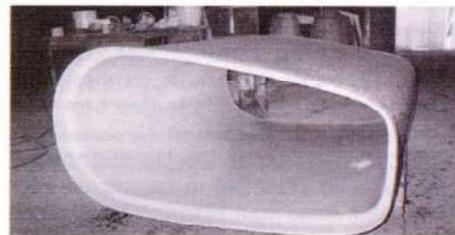


Figure 3 : Coque avec about mâle-tulipe



Figure 4 : Projection par voie sèche (sans prémouillage)

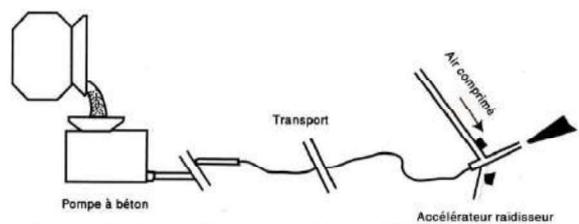


Figure 5 : Projection par voie mouillée (flux dense)

Les techniques de renforcement actuelles s'appliquent sur la totalité de la périphérie de l'ouvrage ou sur un demi ouvrage (Coques PRV). Seuls les ouvrages qui ne présentent pas de déformations les rendant inaptes au service actuel ou futur peuvent être réhabilités. Il apparaît nécessaire de mettre au point une nouvelle méthode de renforcement de type ponctuel afin de limiter les coûts et de cibler les zones à renforcer. De plus, lors de surcharges verticales, la voûte est la plus sollicitée. Un renfort de celle-ci permettra de reprendre les efforts et d'apporter un gain en main d'oeuvre et en temps.

3. Application de la technique des plats collés aux ouvrages d'assainissement

L'intérêt d'appliquer la méthode de renforcement par collage de matériaux composites aux ouvrages d'assainissement visitable est avant tout économique. Une nécessité de réduire les coûts de réhabilitation est primordiale à l'heure actuelle pour envisager une complète restructuration des ouvrages d'assainissement en France.

D'un point de vue mécanique, l'intérêt est de « décharger » la structure existante en disposant un matériau de renforcement. En effet, pour un ouvrage en béton, un chemisage en béton projeté de 6 à 8 cm ne peut procurer à l'existant, une forte augmentation de rigidité globale. L'épaisseur du chemisage doit alors être revue à la hausse, impliquant un accroissement des coûts. De ce fait, l'utilisation de matériaux composites permet d'obtenir un déchargement de la structure du fait de leurs caractéristiques mécaniques élevées. Ce type de renforcement permet de conserver la section hydraulique de l'existant, ce qui n'est pas le cas lors de la mise en place d'un chemisage par béton projeté d'épaisseur importante.

Afin de transposer cette méthode ponctuelle de renforcement, et compte tenu des précédentes recherches [6], nous utiliserons dans la suite de notre étude, le renforcement par collage de lamelles de carbone. Les lamelles de carbone SIKACARBODUR et les colles époxydiques SIKA 30 [7] seront utilisées du fait du partenariat avec la société SIKA France pour ce travail de recherche. Une étude de faisabilité par calculs numériques a été réalisée afin de valider ce type de renfort sous chargement vertical [8]. Cette étude a été réalisée à l'aide du logiciel URUS [9]. La zone de renforcement est de 75 cm. Elle a été déduite suite aux calculs numériques afin de remplir deux objectifs :

- Rendre à l'ouvrage son état de contrainte initiale ;
- Avoir une longueur d'ancrage suffisante pour le collage de lamelles de carbone en partie courbe.

Suite à cette étude de faisabilité, une étude des coûts a mis en avant un gain de près de 55% par rapport à un chemisage traditionnel par béton projeté.

3.1 Caractéristiques des renforcements

Les lamelles de carbone SIKACARBODUR

Les lamelles composites sont un arrangement de fibres de carbone, noyées dans une matrice époxydique. La résistance en traction élevée de ces lamelles permet de combler le manque de résistance en traction du béton. De plus leur mise en oeuvre est aisée du fait de leur faible épaisseur et de leur faible poids. Leurs caractéristiques principales sont également :

- Un excellent comportement à la fatigue ;
- Une insensibilité à la corrosion ;
- Un croisement aisé des lamelles ;
- Un gain de main d'oeuvre.

Les caractéristiques de ces lamelles de carbone sont répertoriées dans le tableau 1.

Désignation	Caractéristiques
Module d'élasticité E	> 165 000 MPa
Résistance à la rupture par traction	> 2 800 MPa
Allongement à la rupture	> 17 ‰
Pourcentage volumétrique de fibres	> 68%
Densité	1,5

Tableau 1: Caractéristiques physique et mécaniques des lamelles de carbone

Les lamelles ont une épaisseur de 1,2 mm et une largeur variable (50, 80, 100 et 150 mm).

Etant donné la courbure importante de nos ovoïdes, des lamelles d'une largeur de 50 mm sont utilisées.

La colle SIKADUR 30 Colle

Cet adhésif est une colle époxydique thixotropique à 2 composants sans solvants. Elle se présente sous forme de kit comprenant un composant A (résine de couleur blanche) et un composant B (durcisseur de couleur noire).

Les caractères généraux de cette colle sont :

- Très forte adhérence sur la plupart des supports ;
- Imperméabilité aux liquides et à la vapeur d'eau ;
- Résistances élevées aux agents chimiques usuels ;
- Applicabilité en sous-face ;
- Durcissement rapide ;
- Résistance mécanique élevée ;
- Mélange et mise en place facile.

Les caractéristiques physiques et mécaniques de cette colle sont répertoriées dans le tableau 2.

Désignation	Caractéristiques
Densité de la colle (mélange A + B)	1,8 (environ)
Diamètre maximum des charges	0,4 mm
Proportion du mélange : A/B	3 / 1 (en poids)
Adhérence sur béton	> 4 MPa (rupture dans le support)
Module d'élasticité statique	12 800 MPa
Résistance en compression à 2 jours	> 55 MPa,
Résistance en flexion à 2 jours	> 30 MPa
Coefficient de dilatation thermique	0,03 mm par mètre et par degré
Durété shore	> 70

Tableau 2: Caractéristiques physiques et mécaniques de la colle

La colle doit être appliquée pour une température comprise entre 5°C et 40°C et sur un support propre et sain, avec une cohésion superficielle d'au moins 1,5 MPa.

3.2 Procédure de mise en oeuvre

La préparation du support a pour but d'éliminer toute trace superficielle d'huile, de graisse, de produit de décoffrage et autres salissures, ainsi que la peau superficielle du ciment et les laitances de ressuage. Toutes les parties hétérogènes ou ne présentant pas une cohésion superficielle minimale de 1,50 MPa doivent être enlevées. Après ponçage, le support est dépoussiéré à l'aide d'air comprimé ou d'une balayette. Le support doit être plan et respecter les conditions suivantes :

± 2 mm sous la règle de 20 cm. Si ce n'est pas le cas, des ragréages peuvent être réalisés à l'aide de pâte époxydique.

Les lamelles ont été découpées à la longueur désirée (75 cm) à l'aide d'une meuleuse équipée d'un disque diamant. Puis, elles sont nettoyées à l'aide d'un simple solvant avant collage [7].

Une procédure de collage des lamelles a été mise au point pour nos essais en laboratoire et pour une application future in situ du fait de la courbure des corps d'épreuves et de la rigidité importante des lamelles. Deux équerres en aluminium sont disposées au niveau des naissances de voûtes pour les arrêts des lamelles. La colle est mise en oeuvre par double encollage (lamelles et support) d'une épaisseur de 1 à 1,5 mm. Les lamelles sont ensuite introduites dans l'ovoïde (fig.6), puis plaquées à l'aide de 2 bastaings filants contre la voûte. Les bastaings ont été maintenus à l'aide de 2 étais au niveau des naissances de voûtes (fig. 7).

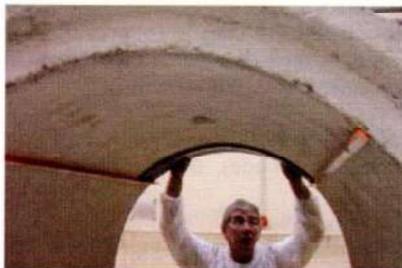


Figure 6 : Mise en place des équerres d'arrêts des renforts



Figure 7 : Placage des lamelles

Les lamelles sont marouflées, c'est-à-dire pressées à l'aide d'un rouleau entre les bastaings.

Cette opération est couramment appelée «marouflage». Il faut obtenir un reflux continu sur les bords des lamelles afin de retirer le surplus de colle.

Avant le début des essais, quelques vides entre les lamelles et le support sont notés. Ils sont relevés principalement entre le bastaing filant et l'arrêt des lamelles. Lors des ruptures des ovoïdes renforcés, la ruine s'est produite au niveau de ces vides.

4. Etude expérimentale à l'échelle 1

4.1 Procédure expérimentale

La campagne expérimentale a été réalisée sur des corps d'épreuves T180 [10]. Les essais sont réalisés pour un seul chargement vertical en voûte sans blocage, ni application de charges en piédroits. Ce type de chargement est le plus défavorable. Une redistribution des charges est

donc effectuée en sollicitant alors moins la clé de voûte. Cette procédure d'essai met en évidence l'apport d'un renforcement ponctuel lors de surcharges verticales avec la présence de vides à l'interface piédroits/sol.

Afin de répartir la charge uniformément en clé de voûte, un châssis en bois rempli de sable a été réalisé. L'application de la charge s'effectue donc de manière uniforme sans glissement sur la clé. La surface d'application de la charge est de 0.45 m de large x 1,20 m de longueur afin de concentrer le chargement en clé de voûte. Au niveau de l'appui au sol, compte tenu de la géométrie de l'ouvrage, un tapis en caoutchouc est mis en place sous l'ovoïde pour absorber les irrégularités du sol et du radier.

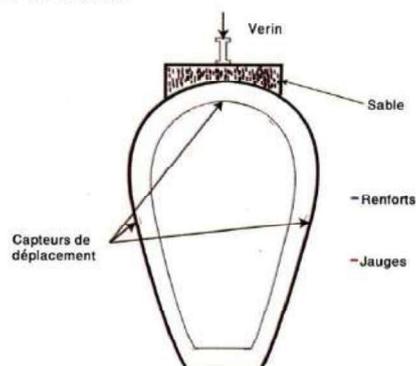


Figure 8 : Dispositif expérimental des essais de rupture

4.2 Résultats des essais

Les courbes charges/déplacements de la clé de voûte des ovoïdes témoins et renforcés sont données figure 9.

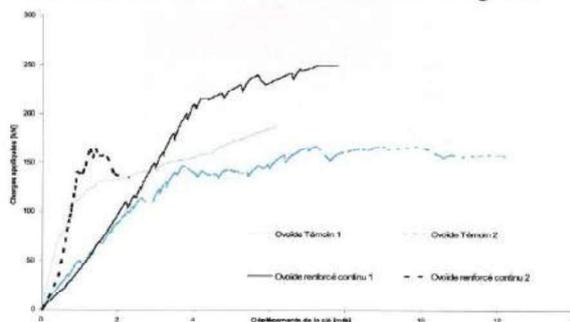


Figure 9 : Comparaison du comportement des ovoïdes témoins et renforcés

Lors de l'essai de l'ovoïde renforcé n°2, le capteur de déplacement s'est cassé lors du chargement. Les résultats sont alors inexploitable.

Dans le domaine élastique, un comportement identique des corps d'épreuves est relevé jusqu'à l'apparition de la première fissure. Puis, nous constatons l'évolution des fissures en milieu de piédroits à l'extrados, en clé de voûte et au niveau de la liaison radier/piédroits à l'intrados.

Pour les ovoïdes témoins, après l'apparition de la première fissure, un changement de courbure est constaté, alors que pour les ovoïdes renforcés, une continuité de la pente initiale est remarquée jusqu'à l'obtention du

premier décollement. Ce décollement provient:

- D'un mauvais placage de la lamelle lors du collage ;
- D'une poussée au vide à laquelle sont soumis les renforts.

Il apparaît évident que nous sommes en présence de 2 familles de corps d'épreuves (Rigidité identique dans le domaine élastique). En comparant une même famille d'ovoïdes, nous pouvons conclure à :

- Un gain de charge ultime de 55% ;
- Une redistribution des contraintes vers le radier mais aussi l'extrados en milieu de piédroits ;
- Un accroissement de la charge d'apparition de la première fissure de près de 60%.

Ce retardement de la fissuration est essentiel. La structure transfère aux lamelles les efforts présents dans l'ouvrage au renforcement. De plus, lors des dimensionnements traditionnels pour les ouvrages d'assainissement, seul le domaine du service est pris en compte, ce qui conforte l'utilisation de ce procédé.

La rupture des corps d'épreuves est identique pour tous les ovoïdes testés (renforcés ou pas).



Figure 10 : Rupture des ovoïdes sous chargement vertical

Ce retardement de la fissuration est essentiel. La structure transfère aux lamelles les efforts présents dans l'ouvrage au renforcement. De plus, lors des dimensionnements traditionnels pour les ouvrages d'assainissement, seul le domaine du service est pris en compte, ce qui conforte l'utilisation de ce procédé.

Pour l'application de lamelles de carbone en égouts, les résultats des essais après six mois de collage in-situ n'ont pas montré de détérioration, que ce soit de la lamelle de carbone ou de la colle. Cependant, lors de nos essais de collage, un coefficient de pondération de 1,4 doit être pris pour l'application de ce procédé sur support humide.

5. Conclusion

Ce procédé est actuellement expérimenté en région parisienne. Cette première étude concernant le renforcement des ouvrages d'assainissement visitables par collage de plats composites ne représente que les prémices d'une longue campagne de recherche. Ce procédé pourrait être développé pour être appliqué aux ouvrages d'assainissement en maçonnerie. En effet, ces derniers sont plus vieux que les ouvrages en béton armé et leur réhabilitation est prioritaire.

Remerciements

Cette étude a été menée grâce au soutien financier des Sociétés Structure & Réhabilitation, Sika et Valentin BTP.

Références

[1] Restructuration des collecteurs visitables, Conséquences et remèdes, Guide technique, Tome 1, Projet National RERAU, France, 2002.

[2] Formation de l'H2S dans les réseaux d'assainissement, conséquences et remèdes, IRH de Nancy, France, Mai 1987.

[3] Fiches pathogénomiques, FSTT, AGHTM, France.

[4] Cahiers des pathologies des ouvrages d'assainissement visitables, Equipement Ile de France, France.

[5] Manuel de recommandations techniques, Inspection télévisé et réhabilitation des réseaux d'assainissement, Ministère de l'Équipement, du logement et des transports ; Direction de l'architecture et de l'urbanisme, France, Septembre 1991.

[6] Djelal C., David E., Buyle-Bodin F., Gicquel Y., Renforcement des poutres en béton armé à l'aide de lamellas composites. Etude expérimentale – rédimensionnement, Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, N°1, février 1998, p.39-47.

[7] Procédés de renforcement des structures par collage d'armatures à base de fibres de carbone, cahier des clauses techniques CCT 37, SIKA France, Août 2000.

[8] Kesteloot, S., Djelal C., Baraka S., Benslimane I., Etude numérique pour l'optimisation de la réhabilitation d'ouvrages d'assainissement à l'aide de composites, Revue Mécanique et Industrie, Novembre 2004.

[9] Logiciel de calculs de structures par éléments finis, URUS Version 9, @bd soft, France.

[10] Catalogue des produits, BONNA SABLE, France, 2001.