

RENFORCEMENT DES OUVRAGES D'ASSAINISSEMENT AU MOYEN DE LAMELLES DE CARBONE ÉTUDE DE LA DURABILITÉ

Stefan KESTELOOT, Chafika DJELAL

Laboratoire Artois Mécanique Thermique et Instrumentation (LAMTI)

Idriss BENSLIMANE

Structure & Réhabilitation

INTRODUCTION

En France, de nombreux maîtres d'ouvrages ont pris conscience de l'importance des travaux à entreprendre pour réhabiliter les réseaux d'assainissement. En effet, ces ouvrages datent en grande majorité de la fin du XIX^{ème} siècle, début du XX^{ème}. Or l'urbanisation, la position stratégique de ces ouvrages et l'encombrement des sous-sols sont autant d'éléments qui rendent impossibles ou tout au moins très difficiles et très onéreuses des reconstructions ou des nouvelles constructions. Par ailleurs ces ouvrages ont, en règle générale été surdimensionnés lors de leur réalisation et ils offrent encore à ce jour des capacités hydrauliques suffisantes [1].

Les réseaux d'assainissement sont constitués de différents matériaux, du béton armé ou non ou de la maçonnerie de blocs de pierre (meulière). Leurs formes sont variables, il faut distinguer les ouvrages visitables ou non visitables. Dans le cadre de nos études, seuls les ovoïdes en béton armé seront traités. Les ovoïdes (fig. 1) sont constitués d'une voûte, de piédroits et d'un radier.

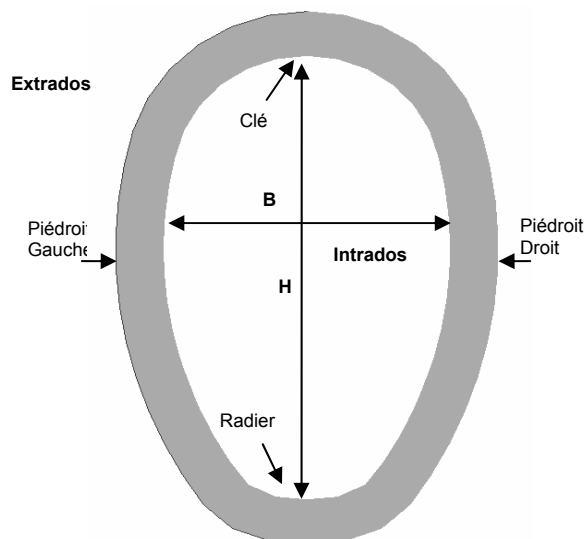


Figure 1 : Nomenclature d'un ovoïde

Les réseaux d'assainissement visitables subissent de nombreuses dégradations [2] pouvant provenir de l'intérieur ou de l'extérieur de l'ouvrage. De par leur fonction, ils sont soit soumis à des attaques chimiques (H_2S , par exemple) [3], soit à des dégradations superficielles ou structurelles :

- tassement du terrain environnant ;
- surcharges à la surface du sol ;
- erreurs de conception.

Pour restituer les fonctions primaires d'un ouvrage dégradé, il existe de nombreuses techniques de réparation et de renforcement : injection, chemisage par projection de béton ou mortier, tubage par élément préfabriqué [2]. Cependant, dans le cas d'ouvrages en béton ou en béton armé, leur application demeure onéreuse et il paraît intéressant de tester de nouvelles techniques.

Dans le domaine du bâtiment et des travaux publics, les méthodes de renforcement ponctuelles à l'aide de matériaux composites sont maintenant bien maîtrisées [4]. Ces matériaux se présentent sous forme de plaques pultrudées ou de tissus. De ce fait, les Sociétés *Sika France S.A.*, *Structure & Réhabilitation* et *VALENTIN Environnement et Travaux Publics* en collaboration avec le laboratoire *LAMTI* se sont donnés pour objectif de réduire les coûts de réhabilitation en appliquant cette technique aux ouvrages d'assainissement en s'appuyant sur un vaste programme expérimental et des applications in-situ.

Pour réaliser cette étude, les lamelles de carbone *Sika Carbodur* [5] ont été retenues pour leur module d'élasticité élevé permettant de « décharger » la structure sans atteindre ses limites de résistance. De plus, l'adhésif *SIKADUR 30 Colle* est couramment utilisée pour la réhabilitation d'ouvrages hydrauliques et ne connaît à ce jour aucun problème de dégradation.

Ce papier présente, dans un premier temps l'application du procédé de renforcement par plats composites aux ouvrages d'assainissement. Des essais destructifs à l'échelle 1 ont été réalisés en laboratoire sur des ovoïdes T180 sous chargement vertical. Puis ce procédé a été appliqué à un ouvrage en service en région parisienne (94).

Cependant, un problème a été soulevé par plusieurs chercheurs et futurs utilisateurs : la durabilité de ces matériaux en milieu agressif. Une étude a donc été entreprise par notre laboratoire pour étudier le complexe composite/colle/béton en milieu saturé en eau ou agressif (égouts).

1. ESSAIS EN LABORATOIRE A L'ÉCHELLE 1

Les corps d'épreuves sont des ovoïdes T180 d'origine industrielle. La hauteur intérieure est de 180 cm, la largeur intérieure de 108 cm et l'épaisseur de 13 cm. Le fabricant [6] donne une charge d'essai à la rupture de 138 kN. La classe de résistance est OVOA2.

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.

Les essais ont été réalisés pour un seul chargement vertical en voûte sans blocage, ni application de charge en piédroits. La résultante horizontale des poussées des terres n'est pas prise en compte afin de mettre en évidence la zone la plus sollicitée, c'est-à-dire la clé de voûte, vis-à-vis des contraintes de traction présentes en clé de voûte. Ce chargement est donc le plus défavorable. La surface de renforcement par lamelles de carbone est issue de simulations numériques [7], soit 0,75m de lamelles par mètre linéaire de collecteur, disposées transversalement en voûte.

Les différents ovoïdes testés sont :

- ovoïdes témoins intègres non renforcés ;
- ovoïdes intègres renforcés en continu ;
- ovoïdes intègres renforcés avec espacement entre les renforts (Optimisation du renfort) ;
- ovoïdes pré-endommagés, réparés et renforcés avec espacement.

Pour les ovoïdes pré-endommagés, le renforcement a été réalisé sous une charge de 115 kN après rebouchage de la fissure [8].

L'ensemble des comportements des ovoïdes testés en laboratoire est représenté en figure 2. Chaque ovoïde est testé dans les mêmes conditions. Pour chaque cas, deux ovoïdes ont été testés. Il ne sera représenté qu'un seul ovoïde.

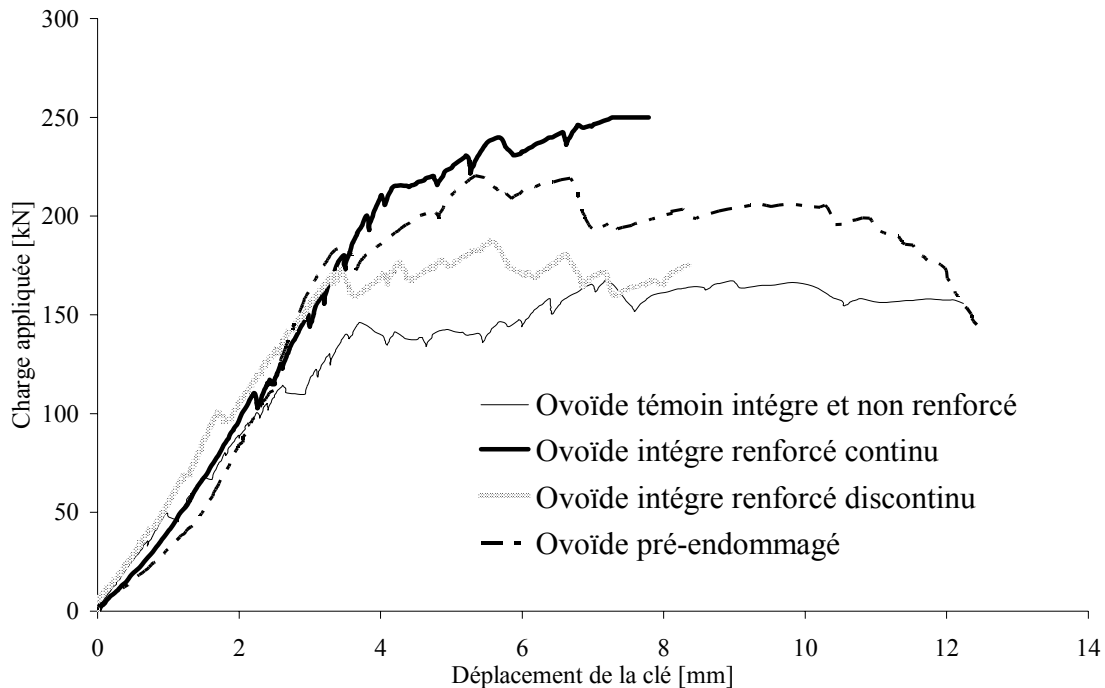


Figure 2 : Comparaison des courbes charge/déplacement

Lors du chargement, le comportement des corps d'épreuve est identique jusqu'à 100 kN, valeur de l'apparition de la première fissure en clé de voûte pour l'ovoïde témoin. 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 renforcés, la rigidité des corps d'épreuve est identique jusqu'à l'apparition de la première fissure en clé de voûte ou le relâchement des lamelles (renforcements continus).

En comparant les différents ovoïdes, nous pouvons conclure à :

- Un gain de charge de ruine de 55% pour l'ovoïde renforcé continu et un accroissement de la charge d'apparition de la première fissure de 60% ;
- Un gain de charge de ruine de 15% pour l'ovoïde renforcé avec espacement et un accroissement de la charge d'apparition de la première fissure de 40% ;
- Un gain de charge de ruine de 37% pour l'ovoïde pré-endommagé puis réparé et renforcé mais avec un accroissement de la charge d'apparition de la fissure de 95%.

Cette dernière conclusion montre l'avantage apporté par le collage de lamelles de carbone en clé de voûte lors de surcharges verticales. Dans chaque cas, une redistribution des contraintes s'est réalisée avec un déplacement de l'apparition de la première fissure en radier pour les ovoïdes renforcés sans endommagement.

Suite à ces essais en laboratoire, il a été décidé d'appliquer ce procédé in-situ dans le cadre d'un chantier expérimental.

2. CHANTIER EXPERIMENTAL

Le fait d'appliquer le procédé de renforcement sur support humide a nécessité des essais préliminaires en laboratoire et in-situ [9]. Il est proposé d'appliquer un coefficient de réduction de l'efficacité de l'adhésif [2] lors du collage sur support humide non ruisselant. Ce coefficient sera fonction de l'humidité et des caractéristiques mécaniques du support. Les résultats des essais après six mois de conservation in-situ n'ont pas montré de détérioration, que ce soit de la lamelle de carbone ou de la colle.

Le chantier retenu par les 3 entreprises partenaires est situé dans le département du Val de Marne, dans la commune de Saint Maur des Fossés. L'ouvrage est un ovoïde T200. L'application des renforts s'effectue sur une surface préalablement préparée par hydro-nettoyage. Le dimensionnement des lamelles a été optimisé par un calcul aux éléments finis [10].

Un test de collage in-situ (photo 1) a été réalisé afin de valider l'application du procédé.



Photo 1 : Essai de collage in-situ – Mise au point d'un système d'étalement

Cet essai de collage doit permettre d'évaluer un principe de pose afin d'avoir une facilité de placage et de valider les points d'application des étais. Pour cela, la société Valentin a fait réaliser un système d'étalement réglable et adaptable à ce type d'ouvrage. Puis, une procédure de collage [11] a été mise au point en prenant en compte le taux d'humidité important et le confinement d'air que présentent les ouvrages d'assainissement. La procédure de collage se décompose en 4 phases :

- préparation du support ;
- mise en place de la colle et positionnement de la lamelle ;
- placage de la lamelle ;
- marouflage des lamelles et finition.

La mise au point de cette procédure et du système d'étalement est représentée sur la photo 2.



Photo 2 : Placage des lamelles in-situ

Le chantier expérimental a montré qu'il était possible d'appliquer cette technique in-situ. Des sondages soniques au marteau seront réalisés au cours des différents contrôles du renforcement afin de relever la présence d'éventuels vides. Après 24 mois de réalisation, aucune détérioration du renforcement ou de décollement des lamelles n'est constatée. Des visites régulières sont programmées pour évaluer la bonne tenue du renfort dans le temps.

Les essais et l'application in-situ ont montrés l'avantage de l'utilisation de cette technique pour le renforcement des ouvrages d'assainissement en béton. Cependant pour développer cette technique, il est nécessaire de traiter du problème de la durabilité de ce procédé dans une ambiance agressive.

3. ÉTUDE DE LA DURABILITÉ EN LABORATOIRE

La durabilité du matériau seul ne suffit pas à assurer la durabilité de la structure. Bien que le béton lui-même soit un matériau résistant, sa durabilité dépend essentiellement de sa composition et de sa formulation ainsi que les contraintes environnementales auxquelles il est soumis pendant sa durée de vie.

Les matériaux composites doivent, quand à eux, conserver leurs propriétés tout au long de la durée de vie de la structure renforcée. Cette durée de vie dépend des conditions d'utilisation (contraintes mécaniques,

chimique, fatigue...), des conditions climatiques auxquelles le matériau est soumis (humidité, température...) et des applications visées (civiles ou militaires, court, moyen ou long terme). La conception et la fabrication de ces matériaux doivent répondre à des critères de durabilité à long terme dans les conditions d'utilisation. La prévision de leurs comportements est très complexe, et selon les secteurs d'activité. Elle est souvent basée principalement sur le retour d'expérience [12].

Les mécanismes qui affectent la durabilité des matériaux composites sont divers et varient en fonction de la nature de la matrice [13] et des conditions d'utilisation comme la température, l'humidité et les contraintes mécaniques appliquées en service ou induites par l'environnement.

Malgré les connaissances requises sur ces matériaux concernant, leurs formulations, leurs caractéristiques mécaniques et les conditions d'application, de nombreux points restent, à ce jour, non identifiés, c'est-à-dire la durabilité du complexe pris dans sa globalité [14].

3.1. Paramètres d'études

Des éprouvettes ont été stockées dans trois ambiances différentes pendant 6 mois.

- une ambiance dite normale, celle-ci représentant l'ambiance témoin. Elle est caractérisée par une température $\theta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative $HR = 40\%$
- une seconde ambiance saturée en eau, caractérisant l'ambiance générale des ouvrages d'assainissement. Elle est caractérisée par une température $\theta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative $HR = 90\%$.
- une dernière ambiance in-situ. Les éprouvettes ont été stockées dans le réseau d'assainissement de l'IUT de Béthune. Une analyse des effluents n'a pas montré de présence d'agents chimiques.

Lors de cette campagne expérimentale, deux types d'essais ont été effectués afin de caractériser le renfort (composite) et l'adhésif (colle) :

- Des essais de flexion quatre points
- Des essais d'arrachement par traction directe

3.2. Essais de flexion quatre points

Le but de cette campagne d'essais est d'étudier l'influence des différentes ambiances sur l'interface béton/colle/composite. Nous nous intéresserons particulièrement au mode de rupture des prismes et au gain apporté à la charge de la rupture des prismes renforcés.

27 prismes de section rectangulaire ont été confectionnés pour les essais de flexion 4 points [15]. Tous les prismes sont identiques, ont une section $7 \times 7\text{ cm}$ et une longueur de 28 cm . Ils sont en béton non armé pour mettre en évidence l'interface béton/colle/renfort.

La résistance moyenne f_{c28} visée du béton est de 45 MPa . Un ciment CPA CEM I 42,5 R, un sable roulé 0-5 mm et un gravier concassé 4/8 ont été utilisés. Le béton a été préparé à la centrale du laboratoire (capacité 250 l). La résistance moyenne à la compression du béton à 28 jours, f_{c28} , est de 46.7 MPa . La résistance moyenne en traction du béton est alors de 3.4 MPa ($f_{t28} = 0.6 + 0.06 f_{c28}$). Le module de Young du béton a également été mesuré. Il est égal à $29\,500\text{ MPa}$.

Les essais ont été effectués selon la norme NF P 18-407. La machine d'essai est conforme aux normes NF P 18-411 et NF P 18-413.

Le collage des lamelles est réalisé en partie centrale de l'éprouvette.

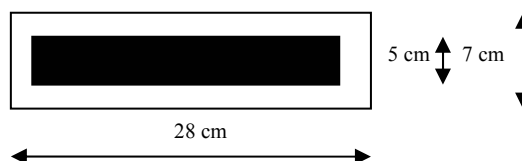


Figure 3 : Disposition des renforts

3.3. Essais d'arrachement par traction simple

Cet essai [16] [17] a pour but de déterminer d'une part les caractéristiques minimales du support et d'autre part, de vérifier les liaisons colle/béton et colle/renfort.

Des éprouvettes de section de 5x5 cm et d'une hauteur de 10 cm ont été confectionnées pour les essais de d'arrachement par traction direct. Le renfort de l'éprouvette est appliqué sur la section de chaque prisme 5x5 cm.

Le collage des pastilles intervient 24 heures après carottage sur le béton. Les pastilles sont soigneusement nettoyées et dégraissées. La colle est appliquée sur la pastille et sur le support à tester. Ensuite, celle-ci est fermement appuyée sur le support afin d'enlever l'excédent de colle.

Le dynamomètre est mis en place au dessus de la pastille conformément à la figure 4. La position correcte de la rotule doit être vérifiée avant l'essai. L'effort de traction est ensuite appliqué progressivement jusqu'à arrachement de la pastille du support.

Pour la réalisation de nos essais, des pastilles de rectangulaire de section 50 × 50 mm ont été utilisées afin d'obtenir un recouvrement complet des plats composites.

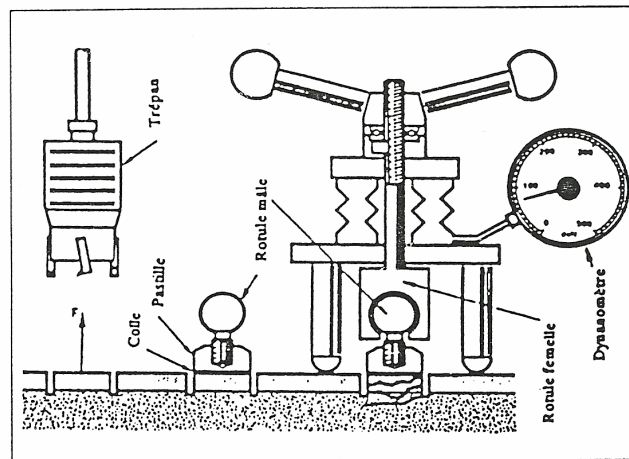


Figure 4 : Disposition des renforts

3.4. Résultats des essais de flexion 4 points

Une rupture fragile a été observée à chaque essai pour les éprouvettes non renforcées et renforcées par la colle. Une rupture dans le support béton a été constaté à chaque essai.

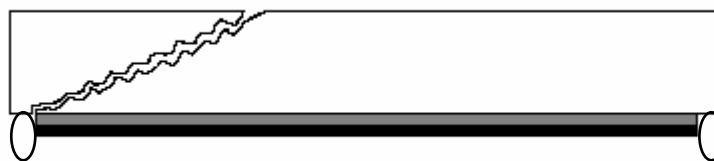


Figure 5 : Rupture des éprouvettes renforcées

Les essais de flexion à 4 points sont résumés dans le tableau 1. La valeur moyenne est donnée pour chaque ambiance du fait de l'homogénéité des résultats.

Tableau 1 : Résultats des essais de flexion 4 points

Eprouvettes	Force [kN]		
	Ambiance normale	Ambiance saturée en eau)	Ambiance in-situ
Eprouvettes témoins	5,66	5,43	4,63
Eprouvettes avec colle	6,83	6,33	6,70
Eprouvettes avec colle et lamelles	20,63	18,16	15,50

Nous obtenons une perte de résistance des éprouvettes non renforcées dans les ambiances saturée en eau et in-situ par rapport à l'ambiance normale, soit respectivement de 18% et 4%. Le même résultat est observé pour les éprouvettes renforcées avec les lamelles avec une perte de 25% et 12%.

De ce fait, le gain apporté par l'éprouvette renforcée avec lamelles par rapport à l'éprouvette témoin est sensiblement identique dans chaque ambiance.

Les essais de flexion 4 point permettent de conclure que la diminution de résistance est due à la chute de résistance du béton, suite à son exposition en environnement agressif, et non à une détérioration du complexe colle/renfort.

3.5. Résultats des essais d'arrachement par traction directe

Le tableau 2 résume les essais par traction directe. La valeur moyenne est donnée pour chaque cas.

Tableau 2 : Résultats des essais d'arrachement par traction directe

Eprouvettes	Contraintes d'arrachement moyenne [MPa]		
	Ambiance normale	Ambiance saturée en eau	In situ
Pastilles sur béton	1,02	0,97	0,89
Pastilles sur la colle	1,04	0,99	0,93
Pastilles sur la lamelle collée sur le béton	1,02	0,96	0,88

La rupture observée lors de ces essais s'est produite dans le support et non dans le renfort. Les valeurs obtenues pour chaque ambiance sont quasi identiques. De plus, il est constaté une chute de la résistance du béton comme précédemment.



Photo 3 : Rupture dans le support béton

Lors de ces essais, la diminution de résistance est identique quel que soit le corps d'épreuves (renforcés ou non). Cela met donc en évidence que la chute de résistance provient du béton.

4. CONCLUSION

L'application du procédé de renforcement par lamelles de carbone *Sika Carbodur* sur des ouvrages d'assainissement de type ovoïde en béton apparaît comme une alternative intéressante par rapport aux techniques de réparations existantes, que ce soit d'un point de vue structurel ou économique. Par rapport à un chemisage traditionnel en béton projeté armé, une diminution des coûts de 55% est escomptée. Du point de vue structurel, un retardement important de l'apparition des fissures est remarqué.

Lors d'un renforcement avec espacement, la diminution des coûts est de 65% par rapport à un chemisage traditionnel. De plus, le procédé permet à l'ouvrage de conserver son état de service sans réduction de la section hydraulique. De nombreuses perspectives de recherche peuvent être envisagées dans le domaine de l'assainissement sur l'application de matériaux composites en carbone, par exemple avec des géométries et compositions différentes.

Les essais de vieillissement, après 2 mois de mise en cure, ont montré l'efficacité du procédé de collage des lamelles SIKA-CARBODUR avec la résine SIKADUR 30 colle en ambiance agressive. Au niveau des essais de flexion à quatre points, les éprouvettes renforcées avec les lamelles ont apporté un gain identique dans les trois ambiances, alors que le support béton a subi une chute de résistance. De même, les essais d'arrachement ont également montré que la rupture se produit au niveau du support béton et non dans le renfort dans les trois ambiances.

Ces premiers essais nous encouragent à poursuivre notre investigation sur le comportement dans le temps des structures en béton renforcé par plats composites. De plus, l'inspection du chantier expérimental, après 24 mois de collage, n'a pas fait apparaître de dégradations de la lamelle et de l'adhésif.

REMERCIEMENT

Nous tenons à remercier les sociétés *SIKA France SA*, *Structure & Réhabilitation* et *Valentin Environnement et Travaux Publics* pour leur participation financière et leur aide technique dans la réalisation de les phases d'essais en laboratoire et d'essais in-situ.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Projet National RERAU 'Restructuration des collecteurs visitables, Guide technique, Editions Lavoisier, (2002) (1) 1-2.
- [2] Kesteloot S. (2005) « Réhabilitation des ouvrages d'assainissement par matériaux composites : Etude expérimentale et dimensionnement par calculs numérique », Thèse de doctorat, Université d'Artois.
- [3] Formation de l'H2S dans les réseaux d'assainissement, conséquences et remèdes', *Synthèse Bibliographique*, Institut de Recherche Hydrologiques de Nancy, (1987).
- [4] Djelal C., David E., Buyle-Bodin F., Gicquel Y., 'Renforcement des poutres en béton armé à l'aide de lamelles composites : Etude expérimentale – Prédimensionnement, *Annales du bâtiment et des travaux publics*, 1 (1998) 39-47.
- [5] *Notice technique 914, SIKA CARBODUR LAMELLE* ; Sika France, Edition Juin 2000.
- [6] *Catalogue des produits* ; BONNA SABLA, 2001.
- [7] Kesteloot S., Djelal C., Baraka I., Benslimane I., "Modelling of sewerage systems strengthening with composites plates", *Construction and Building Materials* 20, pp158-168, 2006.
- [8] S. KESTELOOT, C. DJELAL, S. BARAKA, I. BENSLIMANE, "Rehabilitation of concrete reinforced ovoid sewage system multi cracks by means of composite material", 3rd International Conference on Composites in Construction, July 11-13 2005, Lyon
- [9] Kesteloot S., Benslimane I., Djelal C., Gicquel Y., Jobart P., "Renforcement d'ouvrages d'assainissement visitables par matériaux composites sous sollicitations verticales – Chantier expérimental", *Les Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*, en cours de rédaction
- [10] URUS Version 8.2 / 9, 'Logiciel de calcul de structures par éléments finis', @bd soft.
- [11] Kesteloot S. (2005) « Procédure de collage des lamelles de carbone en clé de voûte », document interne, Indice 2, Structure & Réhabilitation, 2005.
- [12] TECHNIQUE DE L'INGENIEUR : Fatigue des matériaux composites à matrice polymère et fibres longues, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 2004.

- [13] ZE YI WU : Etude expérimentale du comportement des poutres courtes en béton arme pre-fissurées et renforcées par matériaux composite sous chargement statique et de fatigue, ENPC, 2004.
- [14] AFGC, Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites, 2003.
- [15] Norme NF P 18-407, 'Essai de flexion', *AFNOR* (1981).
- [16] Norme NF P 18-870, 'Produits ou systèmes de produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques pour collage structural entre deux éléments en béton – Caractères normalisés garantis', *AFNOR* (1993)
- [17] Norme NF P 18-852, 'Produits ou systèmes de produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques destinés aux réparations de surfaces du béton durci – Essai d'adhérence par traction sur dalle support à surface sciée', *AFNOR* (1993).