

# **INFLUENCE DU MODE DE RÉPARATION DES FISSURES PAR LES MATERIAUX COMPOSITES SUR LES PERFORMANCES DES BÉTONS ORDINAIRE, FIBRÉ, HAUTE PERFORMANCE ET HAUTE PERFORMANCE FIBRÉ**

---

## **INFLUENCE OF THE MODE OF REPAIR OF CRACKS BY COMPOSITE MATERIALS ON THE PERFORMANCES OF ORDINARY, FIBROUS, HIGH-PERFORMANCE AND HIGH- PERFORMANCE FIBROUS CONCRETE**

---

**Bachir REDJEL, Ghania MIROUZI, Khaoula AZZOUZ, Bachir KEBAILI**

*bredjel@yahoo.fr*

Laboratoire de Génie Civil, Département Génie Civil, Université Badji Mokhtar Annaba,  
BP 12, Annaba, 23000, Algérie

---

## **1. INTRODUCTION**

Les ouvrages de Génie Civil sont en grande majorité conçus pour durer longtemps. Mais les structures en béton et en béton armé ont généralement tendance à se dégrader et à se détériorer au cours du temps en raison de leur vieillissement ou des endommagements qu'elles subissent au cours de leur durée de vie suite aux multiples sollicitations agressives dont elles sont l'objet. Environ 30% des ouvrages nécessitent des interventions

de réparation pour assurer la sécurité des usagers avant d'arriver à leur limite de vie utile. En raison de leur coût relativement élevé, il est donc important de pouvoir les réparer et de les réhabiliter afin de préserver leurs performances et d'augmenter leur durée de vie [1-2-3]. La réparation et la réhabilitation des structures en béton deviennent alors des solutions très utilisées qui répondent surtout aux préoccupations du besoin instantané du moment. Ainsi, la recherche des matériaux les plus appropriés doit nécessairement prendre en compte aussi bien la

disponibilité des ressources en quantité que les solutions fonctionnelles visées ainsi que les contraintes esthétiques qu'il faut impérativement satisfaire.

Les secteurs de la construction en général ainsi que ceux du bâtiment et des travaux publics aujourd'hui en pleine mutation sont en mesure de proposer des solutions innovantes répondant aux nouvelles exigences des réglementations, lesquelles sont devenues de plus en plus rigoureuses et exigeantes, et aux besoins des usagers en termes d'impact environnemental, sécuritaire et sanitaire. Dans ce cadre, le développement de nouveaux matériaux de construction innovants passe nécessairement par le respect des normes sanitaires, par l'économie des ressources et par la maîtrise des risques sur l'environnement. Ainsi une nouvelle variété de matériaux économiques et écologiques commence à faire son apparition dans la gamme des matériaux de construction de grande diffusion. Ces éco-matériaux compatibles avec les critères de développement durable et qui présentent des performances comparables à celles des produits concurrents remplissant des fonctions équivalentes sont des produits manufacturés destinés à être intégrés dans les ouvrages du bâtiment tout en répondant à des critères spécifiques de performances techniques, de qualité architecturale, de durabilité et de facilité d'entretien. Ainsi les mortiers de résine et les bétons de résine ou bétons de polymère sont une nouvelle variété de produits écologiques qui peut faire partie de cette famille de matériaux. Ce type de matériau peut constituer une alternative pour des travaux de réparation par injection des structures endommagées, pour la décoration des murs et des planchers ainsi que pour de nombreuses autres utilisations.

Le principe du renforcement ou de la réparation consiste généralement en une adjonction de matière dans les zones où les sections se trouvent souvent trop sollicitées ou dégradées. Pour des ouvrages destinés à assurer des fonctions d'étanchéité ou à limiter les phénomènes de corrosion, il devient également nécessaire de faire intervenir la notion de protection. Celle-ci doit viser à restituer en général les caractéristiques initiales de portance telles que la rigidité et la résistance des ouvrages concernés. La notion de renforcement tend surtout à améliorer les performances de la structure vis-à-vis des conditions d'exploitations modifiées ou d'augmenter la durée de vie de l'ouvrage. En particulier les silos en béton armé, utilisés pour le stockage de matériaux granulaires ou poudreux comme les céréales, les sables, les ciments, etc., sont des structures constamment exposées à des variations de température et à des contraintes variables survenant pendant les opérations de remplissage et de vidange. Les contraintes qui en découlent induisent des fissures verticales, généralisées ou localisées dans les parois, ce qui affecte la durée de vie des ouvrages [4, 5, 6]. Ces fissures apparaissent souvent au tiers de la hauteur des silos [6]. Ce phénomène a surtout été constaté sur des silos de stockage de blé construits durant les années 50 à 70 [6, 7]. Afin de remédier aux fissures verticales qui apparaissent sur la partie cylindrique de la paroi de ces silos, les techniques traditionnelles de réparation telles que l'injection de coulis ou du béton sont des solutions fréquemment utilisées. Néanmoins, ces techniques ne permettent pas en général de stopper l'initiation et la propagation des fissures [8].

Ainsi différentes techniques de réparation et de maintenance des ouvrages se sont développées ces dernières années. Entre autres des méthodes de réparation des fissures ont ainsi fait

l'objet d'utilisation et d'application avec succès dans le domaine de la construction [3-9-10]. Certaines sont spécifiquement conçues pour réparer des fissures actives, tandis que d'autres restent mieux adaptées à la réparation des fissures stables. Ces méthodes permettent de restaurer la capacité portante de l'élément en améliorant sa résistance mécanique. Par ailleurs, le renforcement traditionnel est de plus en plus remplacé par celui s'articulant sur des techniques utilisant les matériaux composites relativement inertes à l'oxydation de type tissu de fibres de verre ou tissu de fibres de carbone collés extérieurement. Cette technique rapide et efficace qui permet de concevoir des réparations économiques et durables commence à avoir des applications très répandues dans les domaines du génie civil et du génie militaire [11-12]. Elle permet notamment d'améliorer la capacité, la rigidité et la durabilité de nombreux éléments comme les colonnes, les poutres et les dalles soumises aux agressions du milieu [13-14-15-16]. Les comportements observés avec ce type de renforcement des poutres par les matériaux composites se présentent en général sous la forme de tissus ou de plaques stratifiées préalablement fabriquées. Elles sont plus performantes que celles des poutres renforcées par des tôles en acier ou en alliage. Ces matériaux qui ont l'avantage de pouvoir être fabriqués en même temps que la structure permettent une conception du renfort dont les directions sont complètement paramétrables, plus adaptées au besoin de la structure grâce à divers procédés qui se prêtent bien à la notion de réparation.

Ce travail se propose d'étudier l'influence du mode de réparation des fissures et de la nature des matériaux composites utilisés pour le recouvrement des fissures sur les performances mécaniques de quatre types de béton : ordinaire, fibré, haute performance et haute performance fibré.

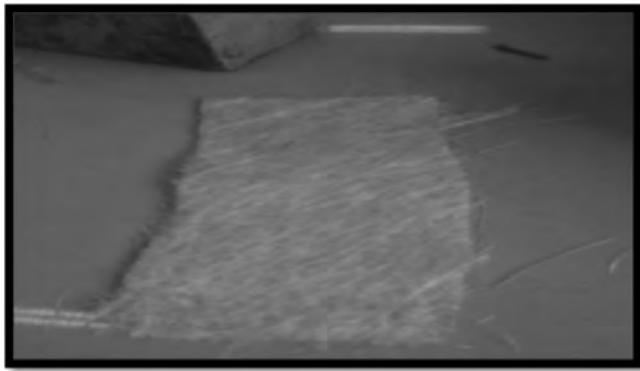
## 2. PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX

### 2.1. Matériaux et méthode de réparation

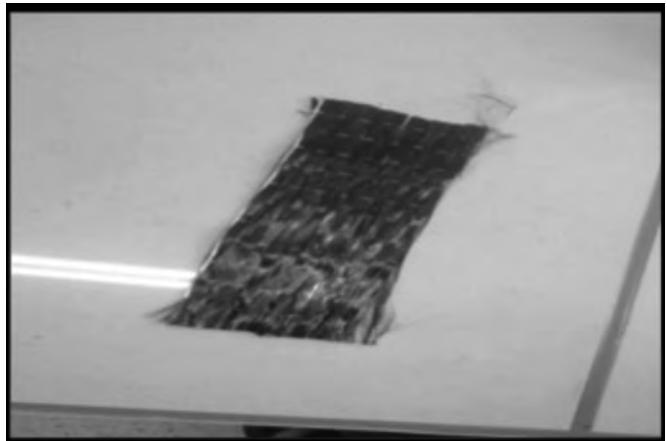
Dans cette étude il a été adopté une démarche utilisant de la résine polyester seule, du mortier de résine pour injection et un bandage par des toiles en matériaux composites en fibre de verre TFV (figure 1) ainsi que la toile en fibre de carbone TFC (figure 2) utilisées pour la réparation d'éprouvettes complètement endommagées et rompues en flexion.

Les constituants utilisés pour la formulation du béton synthétique à matrice polymère sont un sable de dune fin, un sable de dune moyen, un gravier de fraction 3/8 et un liant sous forme de résine polyester. Celle-ci fournie sous forme liquide dans des bidons étanches est de couleur rouge foncé, inflammable et insoluble dans l'eau. Elle a une masse volumique de  $1,11 \text{ g/cm}^3$  à la température ambiante de  $23^\circ\text{C}$ , une viscosité de  $20 \text{ dPa.s}$ , une résistance à la traction de  $45 \text{ MPa}$  et à la compression comprise entre  $50$  et  $150 \text{ MPa}$ . Les additifs qui sont un accélérateur et un durcisseur ont été fournis sous forme liquide dans des flacons hermétiques. Une huile servant d'isolant a été utilisée pour éviter le collage entre la résine et le moule.

Le tableau 1 résume les caractéristiques physiques des constituants.



**Figure 1 : Tissu de fibre de verre**



**Figure 2 : Tissu de fibre de carbone**

**Tableau 1 : Caractéristiques physiques des constituants**

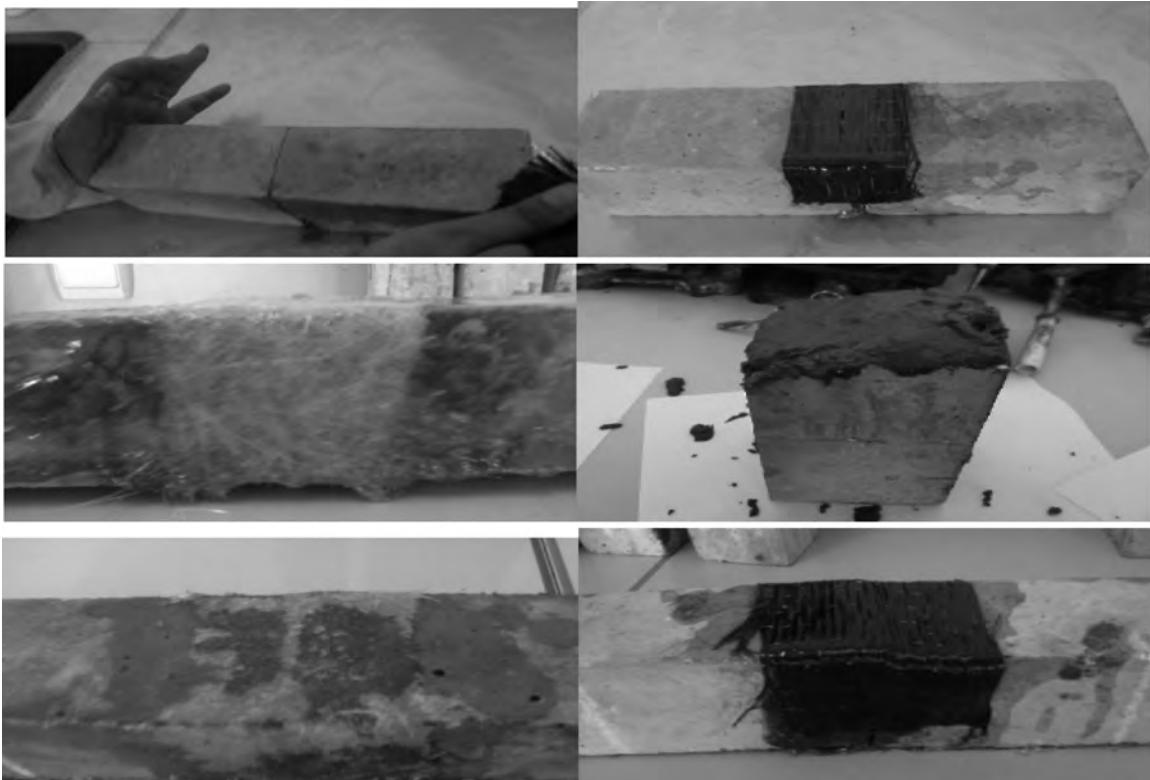
	Sable fin	Sable moyen	Gravier 3/8
Module de finesse (sans unité)	1,67	2,10	---
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,33	1,32	1,25
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2,39	1,32	2,50
Porosité (%)	44,50	42,60	50
Propreté ES (%)	87,32	89,78	---

Il est à remarquer que le module de finesse du sable moyen est plus grand que celui du sable fin ; le sable moyen possèdant la meilleure granulométrie. La masse volumique absolue du sable moyen est inférieure à celle du sable fin et à celle du

gravier. Par ailleurs, les valeurs moyennes des équivalents de sable qui sont supérieures à 80 indiquent que les sables utilisés sont très propres.

Afin de concevoir des réparations à la fois durable et économique, un pourcentage de 35% de résine par rapport au poids total est apparu comme étant la quantité optimale à prendre comme référence dans la formulation des mortiers de résine servant à la réparation avec deux types de sable. Il est à signaler que la vitesse de durcissement de la résine est très sensible à la température ambiante ce qui oblige à préparer des quantités peu importantes de mortier. Ainsi chaque gâchée est préparée avec une quantité de 600g de sable. Les différents pourcentages massiques des constituants sont 80% de sable fin, 20% de sable moyen, 35% de résine et 1,5% de durcisseur.

Les techniques et les étapes de réparation adoptées sur les quatre types de béton formulés (BO, BFM, BHP, BHPF) sont illustrées sur la figure 3 et peuvent être résumées comme suit :



**Figure 3 : Étapes de réparation.**

## 1. Etape A

- injection de la résine seule dans la zone fissurée (dans notre cas après rupture) ;
- après l'injection de la résine, une bande de fibre de carbone de forme en U est placée et collée dans la zone tendue ;
- la même procédure est utilisée avec une bande de tissu en fibres de verre.

## 2. Etape B

- l'injection de la résine polyester seule est remplacée par l'injection de mortier de résine polyester ;
- injection de mortier de résine polyester + bandage par TFV (tissu de fibre de verre) ;
- injection de mortier de résine polyester + bandage par TFC (tissu de fibre de carbone).

La figure 4 montre un exemple des éprouvettes réparées

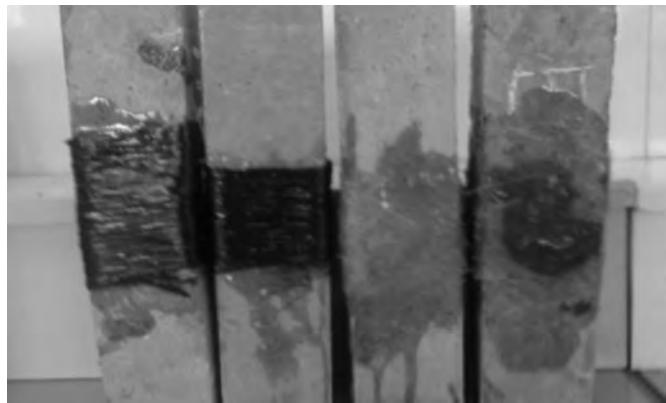


Figure 4 : Éprouvettes après l'épreuve de la réparation

## 2.2. Bétons à réparer étudiés, corps d'épreuves et dispositif de flexion

Quatre formulations de béton ont été étudiées et expérimentées : un béton ordinaire (BO), un béton à fibres métalliques courtes injectées de façon aléatoire dans le volume de l'éprouvette (BFM), un béton à haute performance (BHP) et un béton à

haute performance fibré (BHPF). Les éprouvettes pour chaque type de béton sont de forme prismatique de 7x7x28 cm<sup>3</sup>. Cette géométrie est imposée par la capacité de la machine d'essai. Pour les éprouvettes de mortier, des prismes de 4x4x16 cm<sup>3</sup> ont été utilisés. Les essais ont d'abord été effectués sur les éprouvettes vierges et saines jusqu'à la rupture totale puis sur ces mêmes éprouvettes reconstituées après réparation en collant les deux morceaux rompus, en flexion 3 points. Ces essais de flexion ont été menés sur une machine de flexion Controlab dotée d'un montage de flexion trois points à chargement manuelle de capacité 30kN (figure 5). La distance entre les appuis est prise égale à 21 cm. Les échantillons sont testés à l'âge de 28 jours. Les figures 5 et 6 montrent respectivement le montage à rouleaux 3 points adopté et le dispositif expérimental d'essai utilisé en flexion. Les essais sont conduits jusqu'à la ruine totale de l'échantillon

## 3. RÉSULTATS ET ANALYSES

Durant les essais sur les éprouvettes réparées il a été observé une adhésion parfaite entre le mortier de réparation et le béton juste avant le décollement c'est-à-dire qu'il n'y a pas de rupture prématuée des éprouvettes due au décollement du mortier de résine polyester.

Les valeurs des résistances mesurées sur les éprouvettes avant et après les étapes de réparation pour les différents bétons formulés sont résumées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Résistances Rt pour les 4 types de bétons sur les éprouvettes avant et après la réparation

	Rt avant réparation en (MPa)	Rt après réparation en (MPa)			
		Résine + TFC	Résine + TFV	Mortier + TFC	Mortier + TFV
BO	4.6	1.37	7.34	5.51	7.34
BF	5.5	2.29	5.51	5.96	5.96
BHP	6.9	2.29	7.80	3.21	7.80
BHPF	7.80	2.29	8.26	3.67	8.72

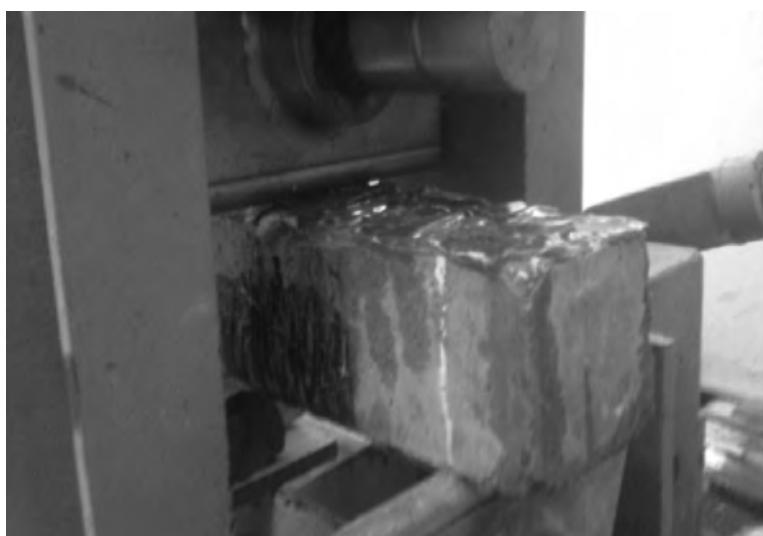
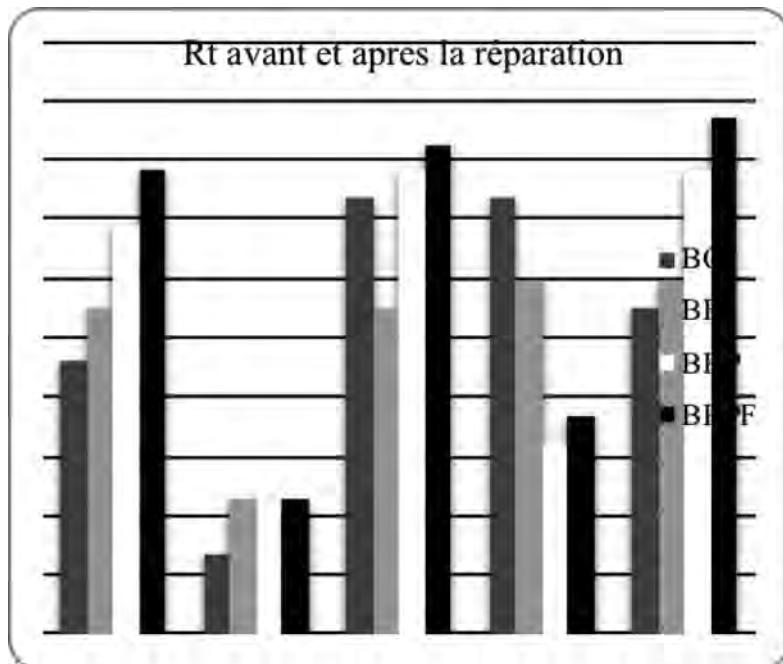


Figure 5 : Montage de l'éprouvette dans le dispositif de flexion à rouleaux en acier utilisé



**Figure 6 : Dispositif de flexion**

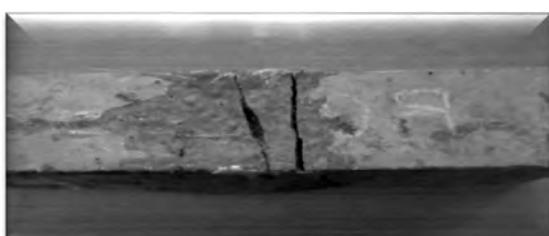


**Figure 7 : Résistance à la traction par flexion avant et après la réparation des 4 types de béton**

Ces résultats sont illustrés sur l'histogramme de la figure 7. Il apparaît que la géométrie du TFC qui est unidirectionnelle et parallèle à la fissure n'a pas d'influence significative sur la résistance. Cependant le TFV se distingue par une bonne adhérence avec le béton. Ce dernier engendre une augmentation de la résistance. Le TFV tissé sous forme bidirectionnelle en chaîne et trame aboutit ainsi à un processus de réparation efficace.

Par ailleurs la réparation par le mortier s'avère meilleure et plus efficace que celle par la résine toute seule.

Les images des figures 8 et 9 montrent un exemple d'illustration du mode de rupture des éprouvettes en flexion après la réparation. La détérioration des éprouvettes est produite par une nouvelle rupture espacée (2) proportionnellement à l'ancienne (1). Ces fissures naissent à un des appuis en continuant un chemin vers le point central où la charge est concentrée et appliquée.



**Figure 8 : Ancienne (1) et nouvelle rupture (2)**



**Figure 9 : Exemple de mode de rupture en flexion**

## 4. CONCLUSIONS

La réparation ou le renforcement des structures existantes, leur adaptation à des contraintes d'exploitation évolutives sont autant d'aspects susceptibles de s'inscrire aujourd'hui dans les démarches de construction durable. Avec le temps les constructions endommagées nécessitent une réparation pour améliorer leur durée de vie. Ceci implique ainsi la recherche et le développement de nouvelles méthodes innovantes parmi lesquelles la technique de renforcement des structures par ajout de résines de polyester renforcées de tissus de fibre de verre ou de tissu de fibres de carbone. Ces techniques constituent une solution rapide, économique et durable de réparation. Cependant les gains de résistance ou de rigidité obtenus par ces techniques s'accompagnent de l'apparition de nouveaux modes de rupture. Ainsi du fait de leur caractère fragile, ces modes de rupture doivent être pris en compte de manière particulièrement attentive lors du choix et de la justification du renforcement.

Par ailleurs cette étude montre que les tissus de verre sont plus performants en tant que matériaux de réparation que ceux des fibres de carbone utilisés.

Le mortier de résine s'est avéré un produit de réparation meilleur que la résine seule.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Croston T., « *Etude expérimentale du comportement d'une poutre en béton armé en flexion 3 points réparée par matériaux composites : approche probabiliste* » thèse de Doctorat, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers, centre de Bordeaux, France, 20 Juin 2006.
- [2] Backeland A., « *Etude des mécanismes d'adhésion à l'interface résine/ciment en vue de la réparation des ouvrages en génie civil* » thèse de Doctorat, INSA de Lyon, 31 Mai 2005.
- [3] Nguyen T.H., « *Durabilité des réparations à base cimentaire : analyse comparée de l'influence des propriétés mécaniques du matériau de réparation* », thèse de Doctorat Université Paul Sabatier Toulouse III, 12 Juillet 2010.
- [4] Reimbert M., Reimbert A., (1982). « *Silos, Théorie et pratique* ». Éditions Eyrolles. Paris.
- [5] Rotter J.M., *Silo and hopper design for strength*, 2008: Bulk Solids Handling: Equipment Selection and Operation Edited by Don McGlinchey Blackwell Publishing Ltd. ISBN: 978-1-405-15825-1
- [6] Dutta A.B., (2013). *Study of type of failure in silo*, GRA global reserch analysis, Engineering, volume 2, issue :11, ISSN No 2277-8160
- [7] Ding Y., Wang J., Wa X. & Fen W. *Performance Analysis of Concrete Silo Structure Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminate* Advanced Materials Research, 2011, V 243-249, p 5501-5505
- [8] *Concrete durability and repair technology*, Proceeding of the intenational conference, University of Dundee, Scotland, 8-10 september 1999, edited by Ravindrah Dhir and Michaul J, p 166
- [9] Allout N., Debbar I., « *Elaboration et comportement d'un mortier de résine polyester : applications aux réparations* », mémoire de Master 2, Génie Civil, Département Génie Civil, Université Badji Mokhtar Annaba, Juin 2012.
- [10] Kermiche S., « *Analyse expérimentale du comportement mécanique de poutres en béton armé préfissurées renforcées de matériaux composites de type textile polymère en toile de fibres de carbone* » mémoire de Magister, Département Génie Civil, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2 Juillet 2007.
- [11] Lacroix R., Doghri K., « *Renforcement et réparation des structures par collage de composites : le TFC* », Annales du bâtiment et des travaux publics, N° 2, Avril-Mai 1999.
- [12] Triantafillou T.C., “*Strengthening of masonry structures using epoxy bonded FRP laminates*”, Journal of Composites for Construction, May 1998, pp. 96-104.
- [13] Diagana C., « *Contribution à l'étude expérimentale et théorique de structures en béton armé renforcées à l'effort tranchant par collage de composites à matrice organique* », thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne (2001), France.
- [14] Assih T., « *Contribution à l'étude du renforcement et de la réparation de poutres en béton armé par collage de plaques composites en fibres de carbone* », thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, (1998), France.
- [15] Mosallam A.S., Mosallam K.M., “*Stengthening of two-way concrete slabs with FRP composite laminate*”, Construction and building material, Vol. 17, 2003, pp. 43-54.
- [16] Djelal C. « *Renforcement des poutres en béton armé à l'aide de lamelles composites : étude expérimentale – pré dimensionnement* », Annales du bâtiment et des travaux publics, Février 1998.