

# APPLICATION DES MATERIAUX COMPOSITES SUR LES STRUCTURES DE PONTS ROUTIERS

M.ABDESSEMED, S.KENAI & A.BALI

Ministère des Travaux Publics, Ben Aknoun, Alger, Algérie

[abdesmoul@yahoo.fr](mailto:abdesmoul@yahoo.fr)

Laboratoire Géomatériaux, Département Génie Civil, Université de Blida, Algérie

[s.kenai@yahoo.com](mailto:s.kenai@yahoo.com)

Laboratoire de Construction et de l'Environnement, Département de Génie Civil, ENP  
d'Alger, Algérie

[balianl@yahoo.fr](mailto:balianl@yahoo.fr)

## RÉSUMÉ

L'Algérie possède un patrimoine de plus de 11000 d'ouvrages d'art, dont 55% routiers. Plus de 40% de ces ponts nécessitent des interventions de maintenance, d'entretien courant et/ou de réparation. L'application des produits de réparation comme techniques de renforcement telles que le chemisage, le béton projeté, la précontrainte extérieure ou les matériaux composites, permettent de recouvrer les caractéristiques mécaniques des éléments structuraux de l'ouvrage d'art. Dans la plupart des cas, la garantie de ces réparations n'est pas assurée, car le suivi de comportement et contrôle à court et moyen termes ne sont pas appliqués.

Nous présenterons dans cet article, la technique de renforcement par collage de matériaux composites à base de fibres de carbone sur les éléments structuraux des ponts. Ce procédé, appliqué depuis plus de 15 ans dans la réhabilitation des ponts routiers en Algérie, a montré son efficacité, sa rentabilité vis-à-vis au comportement statique et dynamique de ces structures. Les résultats d'un travail expérimental, in situ, seront présentés, afin de tirer le maximum de renseignements qui vont servir à la généralisation de cette technique pour le renforcement d'autres structures détériorées.

Mots-Clés: Composite, fibres de carbone, ponts routiers, poutres, essai expérimental, réparation.

## ABSTRACT

Algeria has more than 11000 bridges of which 55% are road bridges. More than 40% of these bridges require maintenance and/or repair and strengthening. The application of the repair techniques like jacketing, external prestress or composites materials permit to the structure to regain its mechanical performance. In most cases, the repair is not guaranteed, as the follow-up of behaviour and quality control are not applied.

We will present in this paper, the technique of carbon fibres composite material strengthening of structural elements of bridges. This technique, applied since more than 15 years in the rehabilitation of road bridges in Algeria, has proved its efficiency and under static and dynamic behaviour of these structures. The results of an in situ experimental work will be presented, in order to get the maximum information that help the generalization of this technique for strengthening of other damaged structures.

Keywords: Composite, fibers of carbon, road bridges, beams, experimental test, repair.

## 1. INTRODUCTION

Une structure de pont est dimensionnée pour une durée de vie de cent ans en moyenne [1], mais elle se trouve écourtée du fait de nombreux désordres et dégradations. Ces derniers sont dus à des erreurs de conception et de calcul, d'anomalies d'exécution, défauts de résistance à l'effort de cisaillement ou de flexion, des chargements excessifs ou répétés, des conditions environnementales agressives, de la fatigue des éléments structuraux ainsi que de leurs matériaux porteurs (aciers et béton).

Les ouvrages anciens et ceux se trouvant dans des zones de moyenne ou forte sismicité, sont les plus vulnérables, et nécessitent une attention particulière (prédiction, surveillance, maintenance, entretien) pour leur sauvegarde, afin d'assurer la sécurité des usagers.

A l'heure actuelle, L'Algérie dispose de plus 11000 ponts routiers et rails dont 40% nécessitent des suivis permanents et évaluations régulières [2]. C'est pourquoi les pouvoirs publics, dans ce pays, ont lancé depuis huit années déjà, des programmes ambitieux dans le but de sauvegarder le patrimoine des ouvrages d'arts. Car, il est devenu maintenant indispensable de bien mener une politique de surveillance des ponts anciens et vétustes, par application de techniques efficaces, rapides et même innovantes, compte tenu de l'état de ces ouvrages et les conséquences engendrées en cas de détérioration ou de ruine.

Les méthodes de renforcement classiques, comme l'augmentation de section par l'ajout de nouvelles barres d'armatures et d'un nouveau béton collé lié à l'ancien béton, sont souvent très complexes à réaliser, très onéreuses, et nécessitent une intervention lourde sur la structure. Cependant, l'application de nouvelles techniques, telles que le renforcement par collage externe de matériaux composites, sur les éléments structuraux, est une alternative plus appropriée. Les fibres généralement utilisées dans ces matériaux composites sont en verre, en carbone ou en aramide, sous forme de tissus unidirectionnels ou bidirectionnels, de lamelles ou de barres. Ces matériaux offrent l'avantage de rapidité d'exécution, résistance élevée à la traction, un module d'élasticité élevé et une bonne résistance à la corrosion [3].

C'est au début des années soixante qu'est apparu en Afrique du Sud le premier cas d'ouvrages renforcés par collage de tôles en acier afin de remplacer des aciers accidentellement omis. Toutefois, cette technique présentait quelques inconvénients liés à l'acier vu son poids propre important et la vulnérabilité à sa corrosion. Pour palier à ces désavantages, les recherches se sont orientées vers des matériaux composites à base de fibres polymères, pour lesquels les problèmes de corrosion et de poids ne se posent pas. Outre ces avantages, ces matériaux, en particulier à base de fibres de carbone, de leur rigidité spécifique, présentent un grand intérêt pour la réparation. De plus, malgré leur prix élevé ils présentent un avantage économique car ils peuvent être mis en œuvre directement sur les structures par moulage au contact [4]. Ceci permet de réduire considérablement les coûts liés à la manipulation des matériaux, ainsi que les problèmes liés aux interruptions de trafic.

Cependant, malgré la vaste application de ces composites collés dans la réhabilitation des éléments structuraux des ouvrages d'art de nos jours, les recherches pour l'évaluation du comportement de ces structures dans le temps, à court et moyen termes, sous l'effet des conditions environnementales restent peu, voire rare, du fait de la non maîtrise du comportement de ces matériaux en dehors des conditions de laboratoire, et les difficultés de mise en œuvre des outils performants pour la quantification de ces essais d'évaluation.

C'est dans ce contexte que nous proposons, dans ce papier, une lecture dans l'application du collage des matériaux composites (CFRP) sur les ouvrages d'art en Algérie depuis l'année 1997. La procédure et la mise en œuvre du collage dans les différentes applications feront le point dans cet article, et le comportement des ouvrages renforcés, dans le temps et leur état actuel sera aussi traité.

En plus, nous aurons l'occasion de discuter sur les résultats obtenus de la campagne expérimentale, in situ, d'essais dynamiques par vibration ambiante sur un pont ancien, situé dans la wilaya de Tipaza à l'ouest d'Alger.

## 2. MAINTENANCE DES OUVRAGES D'ART

### 2.1. Patrimoine des ouvrages d'art

Le dernier recensement de l'état physique du patrimoine des ouvrages d'art en Algérie montre, l'existence de 5500 ponts routiers et environ 50% de ces structures dépassent les 50 ans de service et se trouvent dans un état mauvais, ou même très vétustes (Fig.1). Parmi ces ouvrages, plus de 65% se trouvent dans des zones de forte et moyenne sismicité [5], soit un nombre avoisinant les 3600 ponts, ce qui nécessite une politique de prédiction du comportement de ces ouvrages par la mis en place de base de données (Fig. 2). En plus, le choix adéquat d'une méthode de réparation simple, pratique et rapide s'impose.

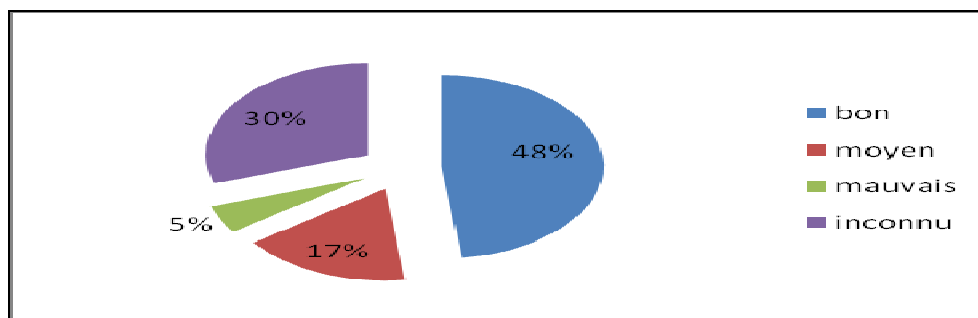


Figure 1 - Etat récapitulatif de l'état des ouvrages d'art en Algérie

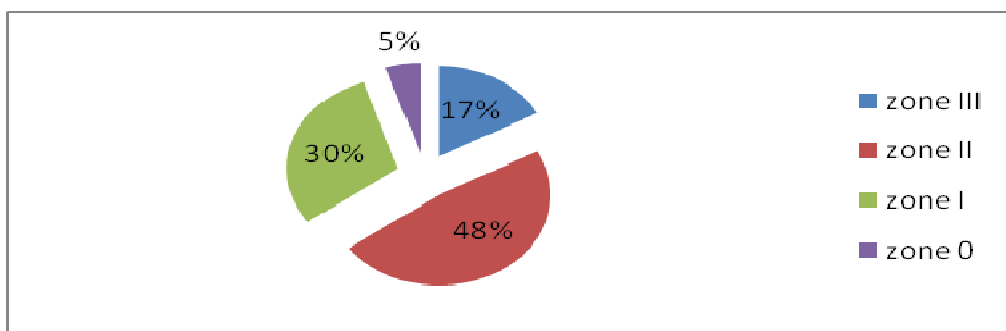


Figure 2 - Répartition des ponts par zone sismique [5]

### 2.2 Réparation des ouvrages d'art

L'exploitation en service d'un pont dépend de la conservation de l'intégrité physique de sa superstructure et son infrastructure. Avant de choisir une réparation, il est nécessaire de vérifier la cause du dégât et les mécanismes de la déchéance. L'objectif principal du programme de maintenance proposé par les pouvoirs publics Algériens, c'est de développer une procédure intégrée rationnelle pour l'évaluation physique des éléments structuraux des ouvrages d'art existants qui présentent de signes de vétusté, ce qui impliquent l'introduction des méthodes efficaces, rapides et performants pour redonner la portance à ces structures, telles que les épreuves de tests non destructifs, les épreuves de radar et les méthodes de l'écho de l'Impact [6], afin de détecter les anomalies et dégradations apparentes (corrosion des aciers, éclatements des béton, fissurations de la structure).

L'introduction sur le marché Algérien de nouveaux produits et de nouvelles techniques de réparation et/ou renforcement des structures en béton armé, d'une manière particulièrement, exige un bon choix et un bon contrôle de la qualité de ces derniers. En effet, la qualité d'exécution et la pratique de mise en œuvre a été toujours une inquiétude majeure du secteur des travaux publics dans la réhabilitation d'infrastructures de base et des travaux de maintenance.

Pour plus de quinze années, le secteur des Travaux Publics a entrepris la réhabilitation et la réparation sur quelques infrastructures stratégiques par application de matériaux innovants (Fig. 3), tel que l'ouvrage de Sidi Rached à Constantine en 1998, l'ouvrage "Pont Blanc" d'El Harrach dans le sud d'Alger en 1999, le pont sur Oued Massaad à Laghouat en 2003 et le pont traversant oued Oumazer" à Cherchell (wilaya de Tipaza) en 2007.



Figure 3 - Premières applications des matériaux composites sur pont à Constantine

### 2.3 Application des matériaux composites CFRP

L'utilisation des matériaux composites dans l'industrie de la construction est en plein essor. Ces matériaux présentent plusieurs avantages tels que la légèreté, la bonne résistance, le bon comportement à la fatigue et l'absorption des vibrations [7]. Cependant, l'inconvénient majeur est le coût de mise en place très élevé, qui peut à priori être compensé par des avantages tels que la courte durée d'exécution et le manque de grands aménagements et la réduction de la main d'œuvre. Il existe plusieurs composites destinés au renforcement d'ouvrages, cependant il est impérativement demandé de chercher quel serait le

composite le mieux adapté au renforcement des éléments de ces ouvrages en fonction de sa durabilité et de sa fiabilité. Des études comparatives ont été menées sur plusieurs composites sur la base de divers critères, parmi celles ci, les critères de Meier [8], dont les résultats sont portés dans le Tableau 1.

Tableau 1 – Tableau Comparatif entre les fibres de carbone, d’aramide et de verre E [8]

Critère	Carbone	Aramide	Verre E
Résistance à la traction	très bonne	très bonne	très bonne
Résistance à la compression	très bonne	inadéquate	bonne
Module d'élasticité	très bon	bon	adéquat
Comportement à long terme	très bon	bon	adéquat
Comportement à la fatigue	excellent	bon	adéquat
Densité	bonne	excellente	adéquat
Résistance alcaline	très bonne	bonne	inadéquate
Prix	adéquat	adéquat	très bon

On remarque que le composite à base de fibre de carbone est le mieux adapté au problème de renforcement des structures de génie civil, avec un module d'élasticité élevé et un très bon comportement à long terme et à la fatigue, ainsi qu'une résistance très bonne à la traction, ce qui aidera les éléments de béton travaillant à cette sollicitation.

### 3. CAS D'ETUDES

Nous proposons, dans cette partie, la présentation de quelques ouvrages réparés par application de matériaux composites à base de fibres de carbone (CFRP) en Algérie dans les quinze dernières années.

#### 3.1 Pont Blanc d'El Harrach à Alger

C'est le pont d'Alexandre, se trouvant au centre d'El Harrach à Alger. Ce pont hyperstatique avec éléments porteurs en béton armé livré à la circulation au début des années 20. Cet ouvrage présentait des dégradations au niveau de la poutraison avec des traces d'humidité et carbonatation, éclatement du béton, délaminage du parement des aciers, décollement du béton d'enrobage et corrosion des armatures (Fig. 4). Tandis qu'au niveau de l'infrastructure, les dégradations sont plus avancées avec des fissures inclinées profondes et des éclatements des bétons de surface. La réparation consistait à une méthodologie d'intervention et le renforcement sur les poutres a été fait avec collage de tissus de fibres de carbone (TFC) sur les zones détériorées par des bandes d'une ou deux couches de ce composite (Fig. 5), alors qu'au niveau de l'infrastructure la réparation par chemisage a été appliquée.

Ce pont a été réparé dans un délai de dix mois ce qui représente un délai record comparativement aux autres solutions. La circulation n'a pas été interrompue sauf aux moments du changement des équipements défectueux. L'ouvrage demeure toujours opérationnel



Figure 4- Traces d'humidité et carbonatation



Figure 5 - Application des composites CFRP

### 3.2 Pont d'Ighezer Amokrane à Béjaia

L'ouvrage se trouvant à Bejaia, à l'est de la capitale, est un pont isostatique à poutres sous chaussée en béton armé surmontées d'une dalle en béton armé (Fig. 6). Sa structure présentait des dégradations très avancées qui nécessitaient des interventions d'urgence. Afin de sauvegarder l'ouvrage, il aura fallut de procéder à une solution de réparation efficace, performante, économique et de durée d'application courte.



Figure 6 - Vue du pont d'Ighezer Amokrane (Bejaia)

Le choix donc a été porté sur l'application des bandes de fibres de carbone sur les parties des poutres détériorées, ce qui a nettement soulagé l'ouvrage et diminué par conséquent

les vibrations dues aux passages du trafic. Cette technique a amélioré la portance des éléments renforcés et de leur rigidité. Cependant, cette solution a demandé de grands travaux de ragréage, préparation des supports et nettoyage avant l'application de ce composite. L'ouvrage a été ré-ouvert à la circulation en 2004 et demeure toujours opérationnel.

#### 4. TESTS DE VIBRATION AMBIANTE

##### 4.1 Présentation de l'ouvrage testé

L'objectif du test dynamique par vibration ambiante, dans notre cas, c'est l'évaluation structurale des ponts en béton armé, avant et après, leur réparation afin de quantifier l'influence des matériaux composites sur les caractéristiques modales de la structure. Pour y arriver à ces objectifs, le choix a été porté sur un ancien ouvrage hyperstatique de trois travées à poutres, en béton armé, sous chaussée surmontées d'une dalle en béton armé également, se trouvant à Tipaza (Fig. 7).

L'ouvrage présentait des dégradations au niveau du tablier (poutres fissurées et présentant des éclatements du béton) et au niveau des appuis qui se résument en la dégradation totale des bétons et apparition des aciers complètement corrodés avec diminution de leur section (Fig.8). La réparation a consisté en l'application de chemisage pour la partie infrastructure et le collage de composites collés (CFRP) sur la poutraison du tablier du pont.



Figure 7 - Vue sur pont sur oued Oumazer avant réhabilitation



Figure 8- Dégradations au niveau du tablier et de la pile

##### 4.2 Modélisation et calcul modal

Une modélisation par éléments finis a été faite par le logiciel commercialisé SAP2000, afin d'identifier les sections les plus dangereuses de l'ouvrage dans le sens longitudinal, et par conséquent placer les sismomètres dans ces positions [9]. La figure 9 montre la modélisation effectuée avec le choix des éléments finis pour la superstructure (dalle et poutres) et la superstructure (pile).

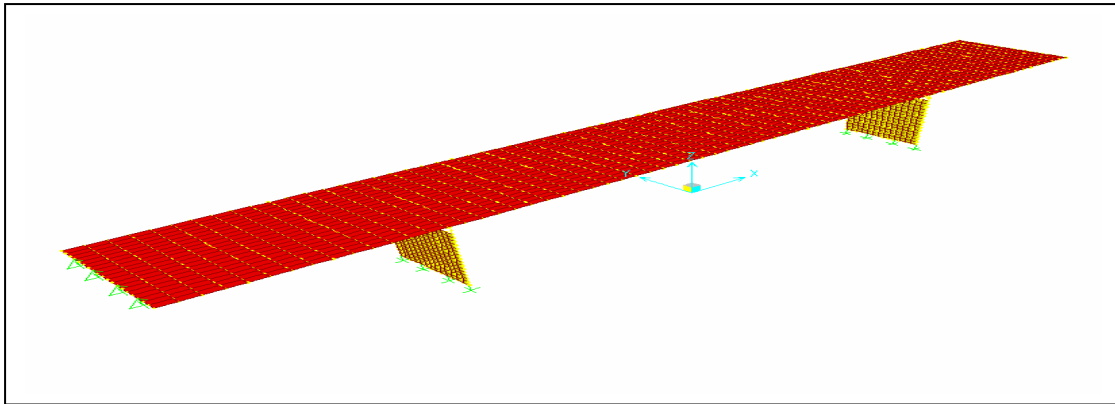


Figure 9- Vue tridimensionnelle du pont modélisé par éléments finis

Les tests expérimentaux par vibration ambiante ont été dirigés sur le pont de son centre (C1 et C2) vers le coté sud d'une part, et du milieu vers le coté nord d'autre part (Fig. 10). Les mêmes positions d'implantation des accéléromètres ont été préservées avant et après réparation de l'ouvrage, afin de pouvoir comparer les résultats en l'occurrence les modes et fréquences propres de la structure. Les mouvements verticaux, longitudinaux, et transversaux du pont ont été mesurés en utilisant 04 canaux d'accéléromètres à trois composantes X, Y et Z [9].

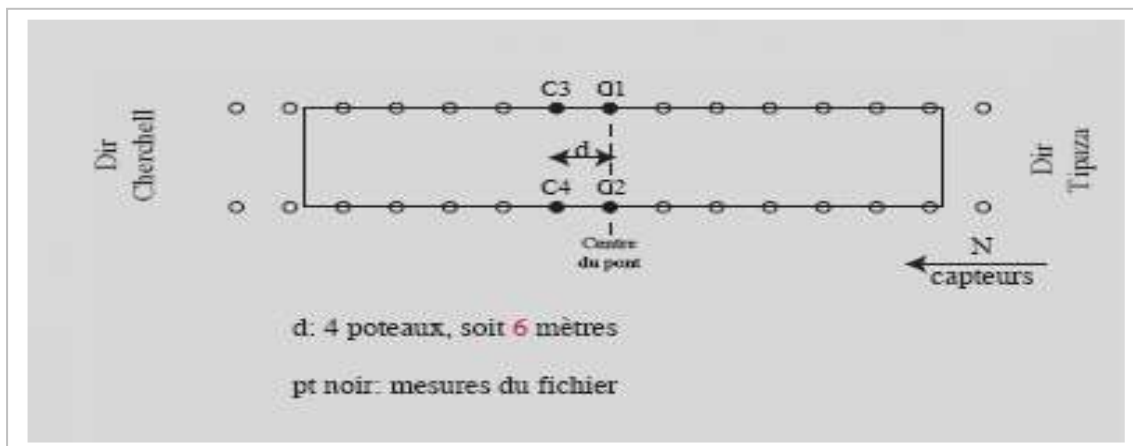


Figure 10- Positions d'implantations des accéléromètres (capteurs)

Les valeurs expérimentales, les plus défavorables, prises sont celles des capteurs de référence (C1 ou C2) dans leurs trois directions. On présentera dans le tableau 2 les six (06) premiers modes propres et leur fréquence, avant et après réparation de l'ouvrage.

Les résultats expérimentaux (Tableau 2) ont montré que la masse ajoutée de la réhabilitation du pont a donné une légère augmentation des fréquences du cintrage longitudinales (F1, F3 et F5) considérablement avec des taux variant de 2 à 3 %. Cependant, il a rehaussé la rigidité transversale du pont qui a donné changements minimes dans les modes horizontales longitudinales (F4) et a augmenté également les fréquences des modes du cintrage longitudinal transversales associées (F2, F6).



Tableau 2 - Valeurs des fréquences des modes propres expérimentaux

N°	Fréquence avant réparation (Hz)	Fréquence Après réparation (Hz)	Différence %	Mode vibration
1	3.94	4.05	2.8	Vertical (Z)
2	4.55	4.67	2.20	Horizontal (E)
3	4.89	5.00	2.25	Vertical (Z)
4	5.03	5.07	0.08	Horizontal (N)
5	6.72	6.93	3.10	Vertical (Z)
6	7.23	7.36	1.80	Horizontal (E)

Les matériaux composites à base de fibres de carbone collés ont influés par excès sur les fréquences propres des modes prépondérants de l'ouvrage testé, avec des pourcentages allant jusqu'à 8%, et cela est due éventuellement à la variation de la rigidité  $k$  de la structure (puisque'il y a une proportionnalité entre les fréquences propres  $f$  et la rigidité  $k$ ) [10]. Tandis que les ponts endommagés puis réhabilités par ajout de béton tels que le chemisage donnent, pendant leur évaluation des fréquences qui varient selon le mode de vibration.

## 5. CONCLUSION

Les principales conclusions qu'on peut tirer de l'expérience d'application des matériaux composites sur les ponts anciens et vétustes en Algérie et leur comportement avant et après collage de ces composites sur leur tablier, se résument à :

- La technique de renforcement des éléments structuraux des ponts en béton armé par des matériaux composites, qui se caractérisent par une traction élevée et une bonne résistance à la compression, peut être une bonne alternative aux techniques classiques (chemisage, béton projeté, etc.).
- Quelque soit le degré d'endommagement des poutres composant le tablier d'une structure, leur réparation par collage de composites CFRP, leur redonne leur portance et garantie leur durabilité de l'ouvrage ;
- Les premières applications des composites collées sur les éléments des ponts en béton armé a montré son efficacité, sa rapidité de mise en œuvre et a permet l'absorption des chocs et des vibrations dont ils sont soumis les ponts et par conséquent peuvent se comporter convenablement en cas de séisme, ou d'autres vibrations ;
- Le test dynamique par vibration ambiante a montré que la valeur du module d'élasticité ( $E$ ) du béton indique l'état réel du matériau et tout dégât possible dans le pont. La rigidité  $k$ , avant et après renforcement, reflète les changements apportées sur la structure ;
- Le mode prépondérant du pont testé est le fléchissement vertical avec une fréquence de 3.94 Hz avant renforcement par CFRP et 4.05 Hz après, soit une

différence de 2.8%. Le matériau composite a augmenté la rigidité de la structure et par conséquent sa fréquence modale (proportionnalité entre la fréquence  $f$  et la rigidité  $K$ ) ;

- Il est possible de constituer une base de données en analysant les ouvrages anciens dynamiquement par des essais non destructifs et par conséquent prédire leur comportement dans le temps.

## REFERENCES

1. Mallett, G.P. (1994). Repair of concrete bridges, Book, State of the Art Review, Thomas Telford, London.
2. Ministère des Travaux Publics (2008), Direction de l'exploitation et de l'entretien routier (DEER), Catalogue de saisi des ouvrages d'art en Algérie, Alger, Algérie.
3. Abdessemed M. (2011). Etude expérimentale et modélisation du comportement des poutres en béton armé renforcées par des matériaux composites sous flexion- cas des poutres, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Alger, Algérie,
4. Avril, S. (2002), Application des méthodes de mesure de champs à la caractérisation mécanique de poutres en béton armé réparées par matériaux composites, Thèse de Doctorat, Ecole nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne et de l'Université Jean Monnet, Département Mécanique et Matériaux, France.
5. Ministère des Travaux Publics (2008). Direction des Routes, Règlement parasismique Algérien des ouvrages d'art (RPOA 2008), Alger.
6. Abdessemed M., Kenai, S., Attar, A. et Kibboua, A. (2008). Maintenance and Rehabilitation Program for Algerian Bridges, 11DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components Istanbul, Turkey.
7. Djelal C., E. David, Bodin F.B, (1998). Renforcement des poutres en béton armé à l'aide de lamelles composites, Etude expérimentale- Pré dimensionnement, Laboratoire d'Artois mécanique et habitat, Université d'Artois, France.
8. Meier U. (1995). Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites, Construction and Building Materials, Vol. 9, n°6. pp.341-351
9. Abdessemed M., Kenai S. , Bali A. et Kibboua A. (2011), Dynamic analysis of a bridge repaired by CFRP, Experimental and numerical modelling, Science Direct, Elsevier, Journal "Construction & Building Materials", Vol. 25, Issue 3, pp. 1270-1276.
10. Catbas F.N., Grimmelsman K.A. (2007), Static and Dynamic testing of a concrete T-Beam Bridge before and after CFRP retrofit, Journal TBR, issue volume 1976/2006, pp. 77-87.