

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
École Nationale Polytechnique



وزارة التعليم العالي
والبحت العلمي
المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL

Thèse de Master

En vue de l'obtention du diplôme de Master 2 en Génie Civil



Directeurs de thèse :

D^r M. ABDESSEMED

D^r R. KETTAB

Élaboré par :

M^{lle} GHACHI Ratiba Fatma

Promotion 2012

Résumé

Dans cette étude, nous proposons d'analyser l'effet du renforcement des piles de ponts en béton armé par collage de composites à base de fibres de carbone et contribuer à la bonne compréhension de cette technique qui reste toujours peu connue en Algérie.

En application en vraie grandeur d'un pont de oued OUMAZER situé à Tipaza, avec et sans renforcements : chemisage et tissu de fibre et ce, par l'utilisation de logiciels de calcul de structure basés sur la méthode des éléments finis à savoir ANSYS et SAP2000 avec une modélisation adéquate. Au dernier chapitre nous conduisons une analyse spectrale selon le spectre du RPOA.

Mots-clés : Renforcement, Fibre de Carbone, pile, analyse, numérique, dynamique, fréquence, Modale, spectrale, Modélisation.

Abstract

In this study we are analyzing the effect of retrofitting of reinforced concrete bridge piers by carbon fiber reinforced plastic wrapping, in order to contribute to the well understanding of this technique which is still not widely known in Algeria.

Applying to the study case: bridge of oued OUMAZER, before and after retrofitting by carbon sheets and pier jacketing. All this, using structural analysis softwares based on finite element method which are ANSYS and SAP2000 with an appropriate modeling. A spectral analysis is performed with "RPOA" spectrum.

Keywords: Retrofitting, Carbon Fiber Reinforced Plastic, piers, numerical analysis, dynamic, frequency, modal, Spectral, Modeling.

ملخص

تهدف هذه الدراسة الى معرفة تأثير تقوية دعامة الجسور ذات الخرسانة المسلحة بواسطة مركب من ألياف الكربون و المساهمة في فهم و استيعاب هذه التقنية التي تبقى غير مألوفة في الجزائر. طبقنا ذلك في إطار حالة جسر أومازر مدعم بواسطة التبطين بخرسانة مرة و إصاق نسيج مرة ثانية. ذلك باستعمال برامج حساب الهياكل القائمة على طريقة العناصر المنتهية وهي ANSYS, SAP2000. حسب نموذج مناسب. في الجزء الأخير نقوم بتحليل طيفي.

كلمات مفتاحية

تقوية، نسيج مصنوع من شعيرات الكربون، دعامة جسر، تحليل عددي، ديناميك، تردد الاهتزازات، نمطي، نمذجة.

À ma petite maman, papa mon modèle

Anissa ma protégée

Ma famille

Mes Amies, sœurs de coeur

À la mémoire de ma grand-mère, à Maman

REMERCIEMENTS

الحمد لله car aucun remerciement n'est suffisant pour sa suprême divinité.

Ce travail a été réalisé sous la direction de mes honorables enseignants Dr KETTAB Ratiba, Chef de Département Génie Civil à l'École Nationale Polytechnique et Dr ABDESSEMED Mouloud, Directeur des Infrastructures Aéroportuaires au Ministère des Travaux Publics.

Je tiens à leur témoigner ma reconnaissance pour avoir su me motiver et pour la confiance qu'ils m'ont toujours témoignée. Je voudrais également les remercier de m'avoir transmis, à moi, un bout de leurs connaissances, conseils précieux et avisés à la hauteur de leurs compétences et de leurs réelles qualités humaines.

Mes remerciements s'adressent aussi à mes mentors :

Mr LECHANI, Directeur Infrastructures & Ouvrages Spéciaux à COSIDER Engineering, qui grâce à nos entretiens, j'ai pu commencer mon travail avec un esprit motivé ;

Mr BALI, Professeur à l'École Nationale Polytechnique qui m'a bien orienté lors du choix du sujet.

Je remercie aussi Mr Demidem, Mr Mamria, Djihed, Aïssa qui m'a installé le logiciel ANSYS, Mr Mohri, Mr Benhouhou, Professeur Limam, Mr Laichaoui, Mr Sebah, et Aâmi Saleh ainsi que madame Chahboub. En gros, toute personne qui a participé d'une façon ou d'une autre à la réalisation de mon projet.

Ma reconnaissance aux membres du jury : Mr Bali, Mme Cherid et Mme Baouche pour avoir examiné mon modeste travail.

Un Merci spécial aux enseignants de l'École Nationale Polytechnique, spécialement ceux du département de Génie Civil.

Ratiba

Table des matières

Introduction générale	5
-----------------------------	---

Chapitre I Synthèse bibliographique

1. Patrimoine des ouvrages d'art en Algérie.....	8
2. Pathologie des ponts	9
2.1. Causes liées aux erreurs de conception (3.5% des cas)	9
2.2. Causes liées aux erreurs de calcul (13.6% des cas).....	10
2.3. Causes liées aux projets d'exécution et de réalisation (82.9%).....	10
2.4. Causes liées aux dégradations des matériaux	10
2.5. Causes liées aux actions sollicitant les ponts.....	10
2.5.1. Actions permanentes.....	10
2.5.2. Actions liées au comportement rhéologique des matériaux.....	11
2.5.3. Actions dues au trafic.....	11
2.5.4. Actions climatiques	11
2.5.5. Actions à caractère accidentel	11
2.6. Modification des Conditions d'Exploitation des Ouvrages	12
3. Technique des renforcement des ponts.....	12
3.1. Traitement de surfaces	12
3.1.1. Ragréage	12
3.1.2. Traitement des fissures	12
3.2. Protection du béton et des armatures.....	13
3.2.1. Protection du béton	13
3.2.2. Prévention et restauration de la passivité des armatures	13
3.3. Ajout de forces ou déformations	13
3.4. Ajout de matière	13
3.4.1. Gainage (Chemisage).....	13
3.4.2. Béton projeté	14
3.4.3. Collage de tôles d'acier.....	14
3.4.4. Renforcement par collage de plaques de composite	15
3.5. Composite à base de fibre de Carbone	16
4. Technique renforcement par composite en Algérie.....	17
5. Confinement des colonnes par les matériaux composites.....	18
6. Logiciel de calcul ANSYS.....	18
6.1. Modélisation par ANSYS	19
6.1.1. Béton armé.....	19
6.1.2. L'acier	19
6.1.3. Composite CFRP.....	20
6.2. Propriétés des matériaux.....	20
6.2.1. Béton.....	20
6.2.2. L'acier.....	24
6.2.3. Composite CFRP	25
6.3. Travaux antérieurs.....	26
7. Conclusion	29

Liste des figures

Chapitre I

Synthèse bibliographique

Figure I.1. Répartition des ponts par wilaya [1].....	8
Figure I.2. Répartition des ponts selon leur état [1].....	9
Figure I.3. Réparation de poutres par béton projeté	14
Figure I.4. Conception du système multicouches [12].....	15
Figure I.5. Courbes contrainte-déformation de différentes fibres.....	16
Figure I.6. Pont blanc d'El Harrach (Alger) avec dégradation au niveau de la pile [15].....	17
Figure I.7. Solid65 – 3D Élément béton [18]	19
Figure I.8. Link8 – 3-D spar Élément Acier [18].....	20
Figure I.9. Solid46 – 3-D layered structural solid [18]	20
Figure I.10. Comportement typique du béton sous chargement uniaxial [18].....	21
Figure I.11. Courbe contrainte-déformation simplifiée pour le béton en compression uniaxiale [18]	23
Figure I.12. Courbe contrainte-déformation de l'acier de ferrailage [18]	24
Figure I.13. Schéma de composite renforcé par fibre [18].....	25
Figure I.14. Comportement du composites dans la direction des fibres [18].....	25
Figure I.15. Maillage en 3D [23]	27
Figure I.16. Colonnes confinés au cours d'essais [23]	28
Figure I.17. Effet de l'orientation des fibres dans le comportement contrainte déformation [23]	29
Figure I.18. Courbes typiques des différents matériaux utilisés.....	29

Chapitre II

Analyse dynamique d'un pont sous différent cas de renforcements

Figure II.1. Vue d'ensemble du pont OUMAZER.....	32
Figure II.2. Dégradations pile côté CHERCHELL à droite, pile coté TIPAZA à gauche	33
Figure II.3. Modèle du pont.....	34
Figure II.4. Comparaison avec une modélisation antérieure	35
Figure II.5. Discrétisation plus fine.....	35

Liste des figures

Figure II.6. Condition d'appui du pont.....	36
Figure II.7. Modes de vibration.....	38
Figure II.8. Modes de vibration confrontés.....	40
Figure II.9. Modélisation SAP2000 traditionnelle.....	41
Figure II.10. Tablier modélisé de deux manières.....	41
Figure II.11. Modèle du pont OUMAZER sur SAP2000.....	42
Figure II.12. Comparaison des modèles non renforcés ANSYS/SAP2000.....	44
Figure II.13. Formes de modes de vibration.....	44
Figure II.14. Augmentation de fréquences par chemisage.....	46
Figure II.15. Comparaison des fréquences de vibration SAP2000/ANSYS avant et après chemisage des piles.....	46
Figure II.16. Comparaison vibration pont avant et après renforcement par TFC.....	48
Figure II.17. Comparaison des résultats ANSYS/SAP2000 vis-à-vis du renforcement TFC.....	49

Chapitre III

Analyse spectrale

Figure III.1. Spectre de réponse élastique - Composante horizontale 5% d'amortissement [33].....	53
Figure III.2. Spectre de réponse des accélérations élastique.....	54
Figure III.3. Contraintes dans l'élément frame.....	55
Figure III.4. Contraintes dans les éléments area.....	56
Figure III.5. Cisaillement selon XY.....	58

Chapitre I**Synthèse Bibliographique**

Tableau I.1. Avantages et inconvénients des fibres de carbone	17
Tableau I.2. Propriétés du béton.....	23
Tableau I.3. Propriétés de l'acier.....	24
Tableau I.4. Propriétés du tissu de fibre de carbone [9].....	26

Chapitre II**Analyse dynamique d'un pont sous différent cas de renforcements**

Tableau II.1. Formulation pour 1m ³ de béton Latex.....	34
Tableau II.2. Modes propres pont endommagé	36
Tableau II.3. Résultats du renforcement par chemisage des piles	39
Tableau II.4. Résultats du renforcement par confinement des piles en composite	39
Tableau II.5. Comparaison des différents types de renforcement.....	40
Tableau II.6. Modes propres du pont endommagé	40
Tableau II.7. Comparaison ANSYS/SAP2000 – pont non renforcé.....	43
Tableau II.8. Participation des masses modales au modes de vibration	45
Tableau II.9. Résultat modaux après chemisage des piles.....	45
Tableau II.10. Comparaison des résultats après chemisage.....	46
Tableau II.11. Participation des masses modales – pont chemisé	47
Tableau II.12. Résultats pour pont OUMAZER au piles renforcées par TFC	48
Tableau II.13. Participation de masse modale dans les modes de vibration	48
Tableau II.14. Comparaison ANSYS/SAP2000 dans le cas de renforcement par TFC	49

Chapitre III**Analyse Spectrale**

Tableau III.1. Résultats éléments linéaires avant renforcement	54
Tableau III.2. Résultats éléments surfaciques avant renforcement.....	56
Tableau III.3. Résultats éléments linéiques après renforcement	57
Tableau III.4. Résultats éléments surfaciques après renforcement.....	57
Tableau III.5. Résultats avant renforcement	57
Tableau III.6. Résultats après renforcement	58

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le pont, ouvrage d'art par excellence, occupe une place très particulière parmi les constructions ; il est un symbole, lui-même paradoxal. Depuis l'Antiquité, il a été célébré comme la plus accomplie des constructions. Le caractère paradoxal du pont se retrouve dans son comportement mécanique : son schéma statique est simple, contrairement au bâtiment qui, porté par de nombreux voiles ou poteaux, constitue une structure d'un haut degré d'Hyperstaticité. Et, cependant, le calcul d'un pont exige une spécialisation particulière que peu de bureaux d'études peuvent se flatter de posséder. La raison principale de cette difficulté réside dans les conditions de service des ouvrages :

- exposés aux intempéries, à des charges de trafic à fort effet dynamique et qui dépassent souvent les limites codifiées, les ponts sont soumis à un régime sévère qui justifie le soin particulier apporté à leur projet et à leur exécution ;
- en outre, par le rôle qu'ils jouent dans la vie quotidienne du pays, les ponts sont des ouvrages sensibles à l'opinion publique : la fermeture d'un ouvrage, même temporaire, pour une opération d'entretien ou de réparation, entraîne des réactions vives de la part des usagers, prompts à dénoncer le laxisme, voire l'incurie des services publics.

Les ponts vieillissent, mais, compte tenu de leur importance sociale, ils doivent être l'objet de soins particuliers (entretien, maintenance) pour qu'ils puissent assurer leur fonction pendant la durée de vie qui leur a été assignée en diagnostiquant leurs maladies et puis prescrire le bon remède. Pour cela, un bon choix de la méthode de remise en état d'un pont (réhabilitation, renforcement) exige une bonne connaissance de l'état physique de l'ouvrage, les causes des anomalies apparentes (dégradations, fissures,...). Parmi les techniques qui répondent à ces exigences, celle du collage externe de matériaux composites.

Les composites à base de fibre de carbone, grâce à leurs caractéristiques mécaniques élevées, leur faible poids propre et leur facilité de mise en œuvre sont des matériaux particulièrement intéressants pour le confortement et le renforcement d'ouvrages.

L'objectif principal de cette étude est d'analyser l'effet du renforcement des piles de pont en béton armé par collage de composites à base de fibres de carbone et de contribuer à la bonne compréhension de cette technique qui reste toujours peu connue en Algérie.

Nombreuses études se sont penchées sur le renforcement des tabliers de pont à la flexion et au cisaillement. Nous voulons dans cette étude analyser numériquement des appuis intermédiaires de pont (piles), confiné par l'application des composites collées à la base de fibres de carbone et ce, par l'utilisation de logiciels de calcul de structure à savoir ANSYS et SAP2000 avec une modélisation adéquate.

Ce travail s'articule autour de trois chapitres :

- Le premier chapitre consiste en une synthèse.
- Le deuxième chapitre s'étale sur l'analyse du comportement dynamique d'un pont en béton armé hyperstatique sur différents cas de renforcement.
- Le troisième chapitre expose une analyse spectrale du pont selon le spectre du règlement parasismique algérien des ouvrages d'art.

Ces chapitres sont suivis d'une conclusion générale et de recommandations pour les futurs travaux.

Dans tout ce qui suit :

CFRP : Carbon fiber reinforced polymer

TFC : tissu de fibre de carbone

FRP : Fiber reinforced polymer

CHAPITRE I

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I

Synthèse Bibliographique

1. Patrimoine des ouvrages d'art en Algérie

L'Algérie compte plus de 6000 ponts routiers répartis à travers les 48 wilayas [1] (Figure I.1), dont 70 % sont situés dans des zones de moyenne à forte sismicité. En l'absence d'un règlement parasismique algérien, rares ont été les ouvrages à être calculés au séisme par une approche dynamique et sismique.

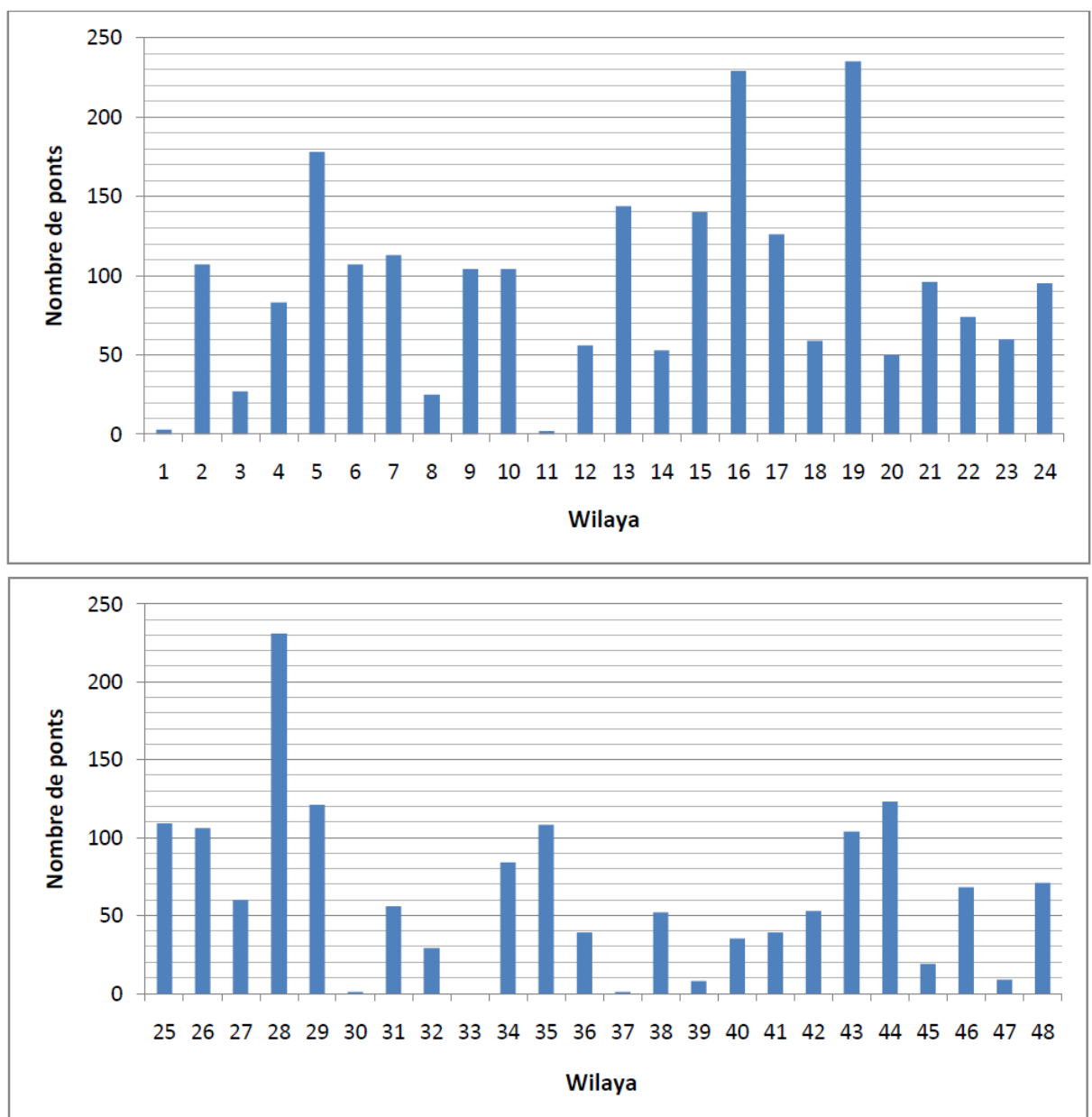


Figure I.1. Répartition des ponts par wilaya [1]

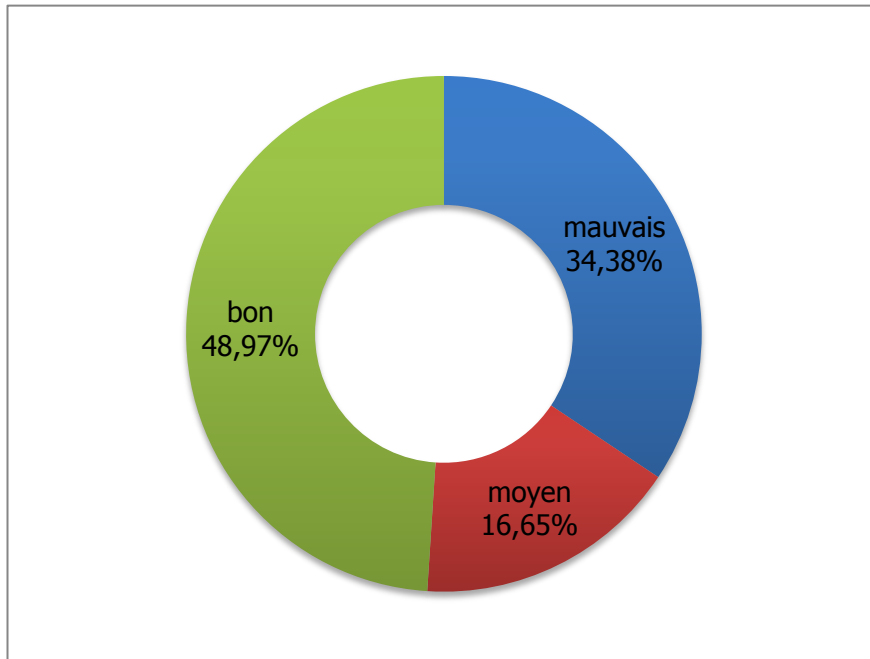


Figure I.2. Répartition des ponts selon leur état [1]

Sachant que 35% des ponts sont dans un mauvais état (Figure I.2), des mesures de sécurité particulières, tels que les renforcements et les réparations, doivent être prévues afin d'éviter toute rupture fragile causée par un séisme. On accordera la priorité aux ouvrages qui se trouvent dans les grandes villes et les ponts autoroutiers en raison de leur importance pour les besoins de la sécurité civile et le maintien des communications d'urgence.

2. Pathologie des ponts

Le signe visible de pathologies est la présence de dégradations, de détériorations locales ou générales, de déformations ou de fissurations inhabituelles. Cependant, certains ouvrages peuvent être endommagés bien avant l'apparition de signes évidents (cas des bétons attaqués par alcali réaction [2]). L'étude du comportement pathologique de ces ouvrages met en évidence des endommagements de matériaux et de structures dus à des erreurs de conception, à des modifications de conditions d'exploitation, au vieillissement des matériaux.

2.1. Causes liées aux erreurs de conception (3.5% des cas)

- Mauvais choix du matériau constituant l'ouvrage (nuances et qualité des aciers);
- Structure instable ;
- Erreurs de pré-dimensionnement ;
- Négligence de la sismicité de la zone ;
- Mauvais choix de variante retenue.

2.2. Causes liées aux erreurs de calcul (13.6% des cas)

- Erreurs dans les hypothèses de calcul;
- Erreurs dans l'introduction des données dans un calcul automatique ;
- Non vérification des états limites de services (déformation) ;
- Mauvaise utilisation des règlements ;
- Plans incomplets ou insuffisants et/ou non conformes à la note de calcul.

2.3. Causes liées aux projets d'exécution et de réalisation (82.9%)

Une mise en œuvre incorrecte peut entraîner différents problèmes : ségrégation, adhérence déficiente entre les différentes couches de béton, défaut de surface, dommages aux coffrages ou à l'armature, fissuration, etc. Comme les tâches effectuées sur chantier sont nombreuses et constituent tout un enchaînement d'opérations, les erreurs rencontrées sont alors classées selon l'opération à exécuter.

- Défauts de mise en place de ferrailage
- Défauts de malaxage et de coulage
- Défauts de coffrage et de décoffrage
- Défauts de vibration
- Défauts de cure
- Insuffisance des documents d'exécution

2.4. Causes liées aux dégradations des matériaux

Les propriétés physiques et, plus particulièrement, le comportement mécanique du béton et des aciers sont susceptibles de se dégrader en fonction des conditions d'environnement définies par la localisation géographique de l'ouvrage. Les principales causes de vieillissement sont liées aux phénomènes suivants [3]:

- Chocs, érosion, abrasion : principalement sur les ouvrages situés en milieu maritime.
- Action des cycles gel-dégel : dans les régions à climat froid.
- Altération physico-chimique du béton : dans les milieux agressifs.
- Retrait du béton : principalement dans les environnements chauds et secs.
- Corrosion des armatures métalliques : par manque d'enrobage, par carbonatation ou par attaque aux chlorures.

2.5. Causes liées aux actions sollicitant les ponts

2.5.1. Actions permanentes

- Rechargement excessif de la chaussée ;
- Erreurs du métré portant sur le poids de certaines pièces ;
- Sous-estimation du poids des équipements des ouvrages.

2.5.2. Actions liées au comportement rhéologique des matériaux

- Évaluation insuffisante du comportement des matériaux utilisés dans le temps sous effet des contraintes et des déformations ;
- Estimation insuffisante ou erronée des phénomènes liés au comportement dans le temps des matériaux.

2.5.3. Actions dues au trafic

- Circulation d'engins de terrassement sur un tablier dont le béton est encore jeune ;
- Les effets répétitifs sur les ponts (phénomène de fatigue) ;
- L'amplification des effets statiques qui engendre la fissuration des dalles de béton armé ;
- Effet de souffle provoqué par le train à grande vitesse sur les équipements placés en bordure de voie.

2.5.4. Actions climatiques

Les principales actions climatiques affectant les ponts sont la température (contraintes supplémentaires), le vent et la neige. On y ajoute la pression hydrostatique pour les ouvrages traversant un cours d'eau et l'affouillement des rivières autour des piles.

2.5.5. Actions à caractère accidentel

• Séismes

Lorsque l'accélération au sol dépasse 0.03g. L'action de séisme pouvant devenir dramatique. Les effondrements les plus spectaculaires ont été observés dans le cas de structures peu hyperstatiques comportant des éléments de ductilité insuffisante, liée le plus souvent à une insuffisance d'armatures transversales et/ou à un excès d'armatures longitudinales mal maintenues dans les zones sollicitées au-delà du domaine élastique [4].

Au cours d'un séisme, les ponts peuvent être amenés à osciller dans le sens vertical ou horizontal. L'excitation verticale est en général absorbée sans problème car les ponts sont conçus en premier lieu pour les charges verticales (poids propre et charge d'exploitation). L'excitation horizontale, quant à elle, conduit souvent à des sollicitations nettement plus grandes que toutes les autres actions; la vulnérabilité dans le sens longitudinal est plus grande que dans le sens transversal, particulièrement pour les ponts à poutres.

- **Chocs de véhicules routiers et ferroviaires**
- **Incendie**
- **Chocs de navires et de bateaux**

2.6. Modification des Conditions d'Exploitation des Ouvrages

En fonction de l'évolution du trafic, ou la modification des charges réglementaires sur essieux, ou de la voirie, il est possible de justifier la nécessité de renforcer ou d'améliorer la portance d'un ouvrage. En plus les ponts et bâtiments sont appelés à être mis en conformité vis-à-vis des sollicitations sismiques ou vis-à-vis de sollicitations accidentelles telles que l'impact de véhicules [5].

3. Techniques de renforcement des ponts

Dans certains cas, la capacité portante et la géométrie d'un pont existant ne sont plus adaptés aux nouveaux besoins qui font jour du fait de l'augmentation du trafic et des charges ou le passage d'un séisme violent. Il faut donc permettre à l'ouvrage de remplir ces nouveaux services, ce qui impose, dans la majeure partie des cas, de le renforcer.

Nous allons ici exposer les techniques utilisées pour réparer les ponts en béton armé.

3.1. Traitement de surfaces

3.1.1. Ragréage

Le ragréage correspond à la mise en œuvre de produits ou systèmes de réparation des bétons appliqués, le plus souvent, en faible épaisseur (reconstitution de l'enrobage des armatures) manuellement ou mécaniquement et, en général, sur des surfaces limitées.

Avant de procéder à un ragréage, il est nécessaire de préparer avec soin les surfaces à traiter afin de créer un support sain, propre, rugueux, de nature à favoriser une bonne adhérence au niveau de la surface de reprise. Les techniques les plus efficaces et les moins traumatisantes pour le béton et les armatures sont l'hydrodémolition et le grenailage ou le « sablage » (abrasifs sans silice interdite à cause des risques pour la santé)[6]. Il est essentiel de dégager les armatures non seulement sur leur face apparente mais sur tout leur pourtour de façon à éliminer toute la partie dépassivée du béton.

Généralement, les ragréages sont localisés à certaines zones. Il est vivement conseillé d'appliquer un revêtement de protection sur toute la surface pour stopper la pénétration de l'humidité et des agents agressifs et pour ponter la microfissure qui se forme à la jonction entre le ragréage et le béton de la structure.

3.1.2. Traitement des fissures

Selon l'origine des contraintes de traction qui les ont provoquées, les fissures offrent un faciès et un tracé typiques. Très souvent, notamment dans le cas de la flexion, la fissuration comporte des fissures principales nettes et rectilignes sur lesquelles se greffent de nombreuses ramifications. De telles ramifications peuvent exister aussi au voisinage des

armatures proches de la fissure principale : elles sont dues à l'effet d'entraînement des aciers dans la zone perturbée.

Le traitement des fissures précède généralement un autre système de réparation.

3.2. Protection du béton et des armatures

3.2.1. Protection du béton

Lorsque l'enrobage des aciers est trop poreux et/ou d'épaisseur insuffisante, ou lorsque l'environnement est particulièrement agressif, il est souvent nécessaire d'appliquer un traitement de protection du béton. Une telle protection peut aussi être appliquée après une réparation pour protéger la réparation, mais aussi le reste de la structure.

3.2.2. Prévention et restauration de la passivité des armatures

Les différentes techniques développées pour la protection des armatures de béton :

- La protection cathodique
- La déminéralisation électrochimique ou déchloruration
- Revêtements actifs ou non sur les armatures de béton armé
- Inhibiteurs de corrosion à la surface du béton

3.3. Ajout de forces ou déformations

Précontrainte additionnelle par ajout d'efforts extérieurs destinés à modifier l'état de contrainte d'un ouvrage existant en béton armé, précontraint, en maçonnerie ou en bois, la précontrainte additionnelle permet à la structure de retrouver sa capacité portante d'origine ou de la renforcer. Son application suppose un traitement préalable des fissures par injection car elle ne peut, à elle seule, refermer les fissures. Parmi ses applications, on note le renforcement en flexion et celui vis-à-vis de l'effort tranchant.

3.4. Ajout de matière

3.4.1. Gainage (Chemisage)

L'utilisation des gaines convient particulièrement à la réparation des poteaux, des piles et des pieux détériorés. Cette technique consiste à reconstituer la section d'un élément en service (surtout celle d'un élément travaillant en compression) en le gainant de béton. Il n'est pas nécessaire que l'élément d'origine soit lui-même en béton, il est possible de gainer des sections en acier ou en maçonnerie.

Les travaux de préparation de surface avant l'opération de gainage revêtent une importance primordiale. Le coffrage de la gaine doit être muni de cales d'espacement destinés à prévoir un vide entre le coffrage et la surface du béton ou matériau initial. Ce coffrage peut être temporaire ou permanent. Il peut être en bois, en acier ou en béton préfabriqué, selon sa destination et les conditions d'exploitation [7].

3.4.2. Béton projeté

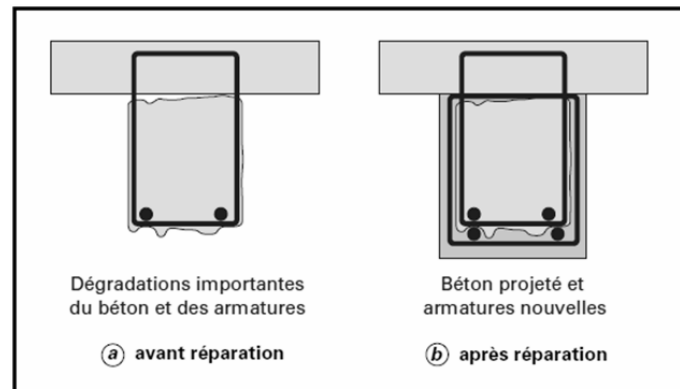


Figure 1.3. Réparation de poutres par béton projeté

Un béton projeté est constitué d'un mélange de granulats, de ciment et d'eau avec parfois des ajouts, projetés grâce à l'air comprimé, sur une paroi. Il y a lieu de faire une distinction entre le béton et le mortier projeté utilisés en réparation de structures. Le mortier, appelé parfois « gunite », a des granulats dont la dimension D est inférieure ou égale à 5 mm, tandis que le béton contient des granulats dont la dimension peut aller jusqu'à 16 mm en voie sèche, et 12 mm en voie mouillée. Il faut distinguer ces deux techniques de projection, suivant le moment d'introduction de l'eau dans la chaîne [8].

L'ajout de matière est la technique la plus répandue dans la réparation des ouvrages en béton armé. Cependant, les techniques de chemisage et de béton projeté présentent beaucoup d'inconvénients tels que : le changement de géométrie, de l'esthétique, les grands réaménagements, le coût et le surplus de poids ajouté par la structure sur la fondation. Le chemisage est toujours pratiqué dans la réhabilitation du bâtiment et le renforcement des appuis des ponts vétustes [9].

3.4.3. Collage de tôles d'acier

La technique des tôles collées a permis soit d'accroître la capacité portante d'un ouvrage, soit de renforcer localement une structure présentant des insuffisances de résistance.

La surface du béton doit subir, avant tout, une préparation soignée afin d'éliminer toutes les parties peu adhérentes et de supprimer les imperfections locales. Le mortier de ragréage est destiné à pallier, dans certains endroits, le manque d'enrobage des armatures internes ou à reprofiler la surface qui n'aurait pu efficacement être traitée, en limitant la surface à ragréer à 20 % de la surface de collage et en s'assurant qu'il n'y a aucune zone ragréée en extrémité de tôles.

La technique de tôles collées a permis d'éliminer pas mal d'inconvénients, vu sa simplicité de mise en œuvre. Cependant, le problème de corrosion en sites agressifs des tôles collées reste un inconvénient majeur [10] et présente un coût important de maintenance. En outre, le collage de ces plaques nécessite une pression constante sur une certaine durée avec un

appareillage spécial. Il faut absolument éviter l'apparition de bulles d'air qui pénalisent l'adhérence.

3.4.4. Renforcement par collage de plaques de composite

Les techniques de renforcement utilisant le collage de plaques composites ou la stratification directe in situ de composite (renfort textile-polymère) sont apparus, depuis les années 80-90 afin de relever la plupart des problèmes posés par les techniques de renforcement décrites précédemment. Résistant à la corrosion comme les tissus à base de polymères (carbone, verre, aramide, résidu plastique), les plaques composites présentent de meilleures propriétés mécaniques, physiques et chimiques que les tôles d'acier [11].

Le principe de la réparation peut être décrit par le schéma ci-dessous où il est possible d'identifier les différents éléments du procédé constructif (*Figure I.4.*).

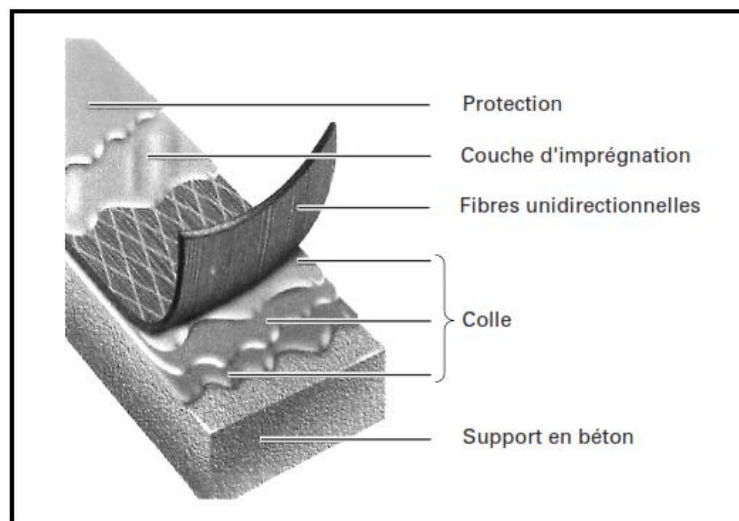


Figure I.4. Conception du système multicouches [12]

Les principales applications de ce renforcement aux ponts en béton armé portent sur le renforcement des poutres ou des dalles vis-à-vis de la flexion et de l'effort tranchant, et le renforcement ou le confinement des piles en béton armé.

Dans cette étude, on s'intéressera aux matériaux composites à base de fibre de carbone, vu les performances qu'ils présentent comparativement aux autres fibres (*voir Figure I.5.*).

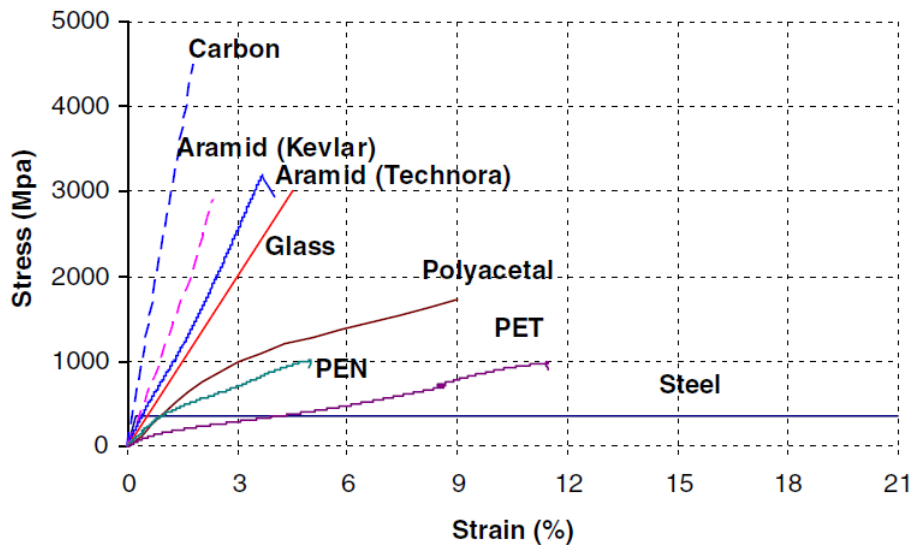


Figure I.5. Courbes contrainte-déformation de différentes fibres

Les fibres de verre qui ont un faible module, manquent de résistance aux solutions salines et/ou basiques. Les fibres aramidées qui ont également un faible module, présentent une résistance à la fatigue limitée en milieu aqueux et une tenue thermique très limitée.

Si la première fibre de carbone a été inventée et produite par T. Edison, les premières utilisations expérimentales datent des années 1960 et les premières unités industrielles ne sont apparues qu'au début des années 1970 avec l'introduction du polyacrylonitrile comme fibre précurseur [13].

3.5. Composite à base de fibre de Carbone

Il existe deux types de fibres de carbone, celles à haute résistance (HR) issues d'une mise en œuvre par carbonisation, et celles à haut module (HM) issues d'une fabrication par graphitisation [14]. Les caractéristiques des fibres de carbone sont les suivantes :

Fibres issues de la carbonisation
 Pureté : 97 à 98 % de carbone
 Masse volumique : 1800 kg/m³
 Résistance en traction : 3000 à 5000 MPa
 Module en traction : environ 250 GPa

Fibres issues de la graphitisation
 Pureté : 99 % de carbone
 Masse volumique : 2100 à 2200 kg/m³
 Résistance en traction : 2500 à 3000 MPa
 Module en traction : environ 500 GPa

Les fibres de carbone ont une très bonne tenue thermique et un très faible coefficient de dilatation. De plus, ces fibres sont inertes à température ambiante et vis-à-vis de la plupart des agents chimiques.

Les avantages et inconvénients de la fibre de carbone sont données dans le *Tableau I.1.*

Tableau I.1. *Avantages et inconvénients des fibres de carbone*

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Rapport résistance/poids très élevé.	Coût relativement élevé du produit de base (jusqu'à 10 fois le coût de l'acier)
Très grande rigidité.	Connaissances limitées sur leurs propriétés à long terme, notamment en ce qui concerne l'adhérence à l'interface béton- composite.
Résistance à la fatigue.	Manque de ductilité.
Résistance à la corrosion.	Absence de normes de conception et de calcul.
Facilité de mise en place.	
Possibilité d'optimisation (choix de renforcement, direction).	
Multifonctionnalité (résistance mécanique, résistance à l'eau et à la corrosion, etc.)	

4. Technique renforcement par composite en Algérie

Cette technique a été utilisée pour la première fois en 1998 sur un pont routier. Un grand nombre d'ouvrages d'art a été renforcé par les lamelles et tissus de fibre de carbone de SIKA et FREYSSINET, citons par exemple le pont routier voûté Sidi Rached, l'ouvrage rail PK 459 sur oued Bill Braguet à Constantine, le pont d'Oued Isser Tablat, L'autopont cinq maisons, Oued Djemaa Sidi-Moussa et le pont d'Ighezer Amokrane à Béjaia.

En 2000, Le Pont Blanc d'EL Harrach a été aussi réparé et renforcé par le procédé (TFC®). L'ouvrage permet le franchissement au niveau du centre ville, de l'oued EL HARRACH, construit au début du siècle (*Figure I.6.*)



Figure I.6. *Pont blanc d'El Harrach (Alger) avec dégradation au niveau de la pile [15]*

La réhabilitation par composite s'est propagée, après, pour le renforcement de plusieurs ouvrages d'art sur le territoire algérien, avec d'autres sociétés de pose et de fourniture (Sika, Travomed, Enros, etc,..). Comme exemple d'application on peut citer : le pont sur oued Messaad à Laghouat en 2005, qui se situe sur l'axe de la route reliant Laghouat à Aflou.

D'autres applications pour renforcements de ponts par le tissu en fibres de carbone ont été effectuées, suite aux conséquences du séisme de Boumerdès, en Mai 2003. Durant les cinq dernières années, la technique de renforcement par CFRP devenait de plus en plus maîtrisable par les techniciens et personnels de terrain des entreprises algériens.

La réhabilitation des ponts comme celui du Oued Oumazer à Cherchell (Tipaza) en 2006 en est la preuve, et la pose du composite sur les parties détériorées du tablier de l'ouvrage a permis de constater l'effet du renforcement par ce type de composite sur le comportement global du pont.

5. Confinement des colonnes par les matériaux composites

Les colonnes en béton armé contiennent typiquement un ferrailage vertical de diamètre important, entouré d'armatures transversales en plus faible diamètre. Suivant l'analyse d'effondrements dus au séisme, il a été réalisé que la faiblesse n'était pas dans les barres verticales mais plutôt dans la résistance et la quantité des cadres horizontales. Une fois ces cadres ouverts, les barres verticales peuvent flamber vers l'extérieur contraignant ainsi le centre du béton. Le béton alors s'écrase, maintenant non confiné pas les cadres. Pour les nouvelles structures, on a maintenant tendance à fretter les colonnes en zone sismique. Pour les anciens ouvrages, on renforce avec des armatures additionnelles telles que barres d'acier et plaques d'acier.

Tandis que l'acier maintient une tension de confinement constante, le CFRP présente un comportement élastique qui provoque un accroissement de l'action de confinement sous dilatation. En contrepartie, le CFRP présente une rupture moins ductile que l'acier. Il contribue de plus à éviter le glissement de barres dans des points où la longueur de joint n'a pas été bien conçue et retarde l'apparition de flambement. Le confinement peut être réalisé par tronçons, en spirale ou peut couvrir toute la surface du support selon les résultats attendus. L'utilisation de FRP préfabriqués est relativement répandue dans cette technique [16].

6. Logiciel de calcul ANSYS

Le logiciel ANSYS est un programme de simulation numérique très utilisé par les chercheurs basé sur la méthode des éléments finis. Il a été développé afin de répondre à différents problèmes de contact et d'impact entre des solides élastiques et/ou hyperélastiques, dynamique du système multicorps.

6.1. Modélisation par ANSYS

La modélisation des spécimens étudiés est effectuée de manière à prendre en considération les paramètres suivants :

- L'effet de la discrétisation géométrique.
- La nature et la forme des éléments de renforcement.
- Le comportement du matériau dans le domaine non-linéaire.
- L'interaction béton-composite caractérisée par le nombre de nœuds qui les relie.

6.1.1. Béton armé

L'élément *Solid65* est utilisé pour modéliser le béton. Cet élément a huit nœuds et chaque nœud contient trois degrés de liberté, translations dans les trois directions nodales. L'élément est capable de subir une déformation plastique et de se fissurer dans les trois directions [17].

La géométrie et la position des nœuds de ce type d'élément sont indiquées dans la *Figure I.7*.

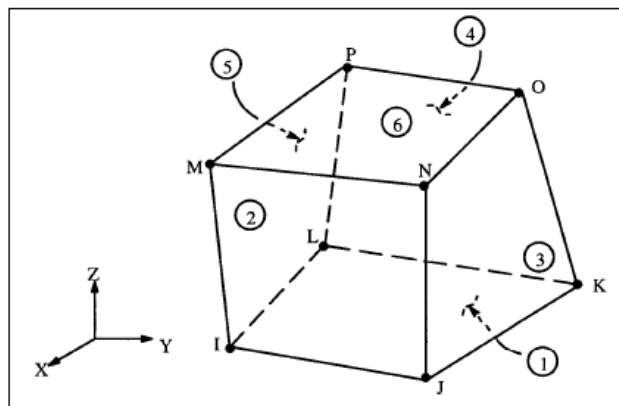


Figure I.7. *Solid65 – 3D Élément béton [18]*

6.1.2. L'acier

L'élément *Link 8 - 3D Spar* est utilisé pour la modélisation de l'acier. Cet élément ayant deux nœuds, chaque nœud contient trois degrés de liberté et trois déplacements dans les directions X, Y, Z. Cet élément est également capable d'une déformation plastique.

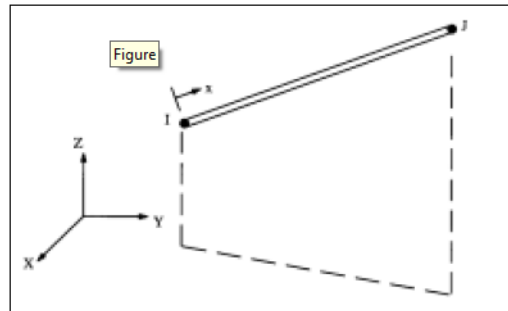


Figure I.8. Link8 – 3-D spar Élément
Acier [18]

6.1.3. Composite CFRP

L'élément *Solid46* est un élément solide utilisé pour modéliser le comportement les matériaux composites. L'élément peut avoir 100 couches pour différentes orientations avec ses propriétés orthotropiques dans chaque couche, trois degrés de libertés pour chaque nœud et un déplacement pour chacune des trois directions (*Figure I.9.*).

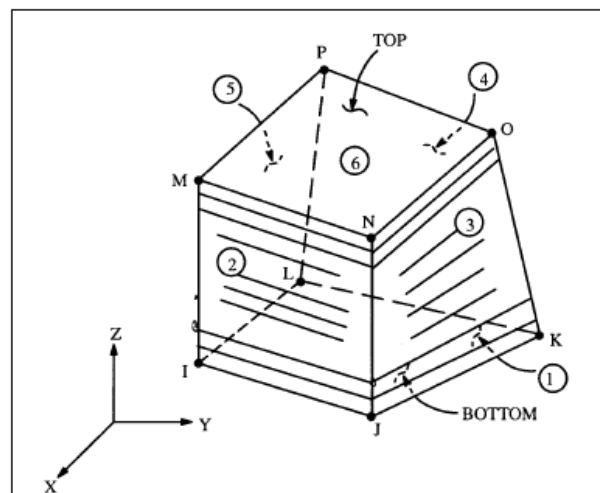


Figure I.9. Solid46 – 3-D layered
structural solid [18]

6.2. Propriétés des matériaux

6.2.1. Béton

Le béton est un matériau quasi fragile et présente un comportement très différent en compression et en traction. La résistance à la traction est en général 8 à 15% de la résistance à la compression. La *Figure I.10.* montre la courbe contrainte-déformation pour le béton.

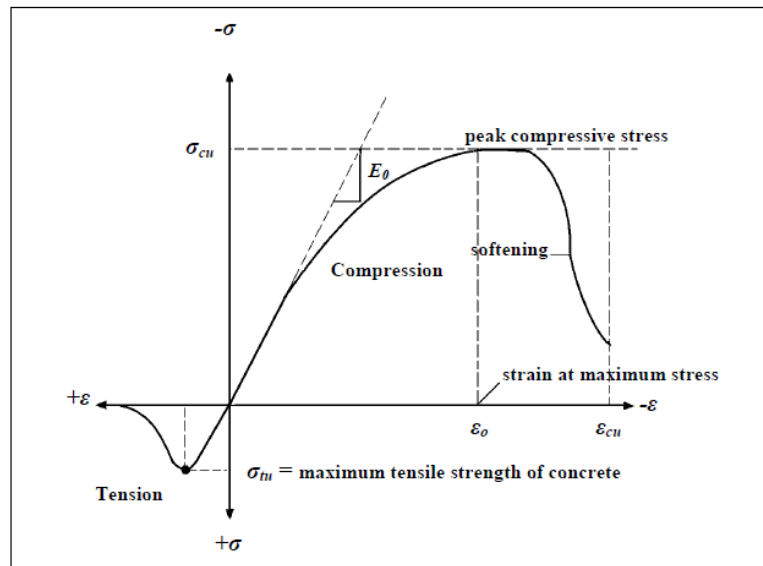


Figure 1.10. Comportement typique du béton sous chargement uniaxial [18]

Les propriétés linéaires souvent isotropiques et multilinéaires isotropiques pour le béton sont comme suit :

- Module élastique E_c .
- Résistance à la compression uniaxiale ultime f'_c .
- Résistance à la traction uniaxiale ultime f'_t .
- Coefficient de poisson ν .
- Coefficient de transfert de cisaillement β_r .
- La relation contrainte-déformation pour le béton en compression uniaxiale.

Les résistances ultimes du béton à la compression et à la traction pour chaque modèle de colonne ont été calculées par les équations III.1 et III.2, respectivement.

$$f'_c = \left(\frac{E_c}{4730} \right)^2 \quad (\text{III.1})$$

$$f'_r = \sqrt{f'_c} \quad (\text{III.2})$$

Où : E_c , f'_c et f'_t en MPa.

Le coefficient de Poisson pour le béton est de 0,2.

Le coefficient de transfert de cisaillement, β_r , utilisé dans beaucoup d'études des structures en béton renforcées, varie entre 0.05 et 0.25. Dans cette étude on adopte $\beta_r = 0.2$ pour le béton.

Le programme ANSYS exige la relation contrainte-déformation pour le béton en compression uniaxiale. Les équations suivantes ont été utilisées pour calculer la courbe multilinéaire isotropique de contrainte-déformation pour le béton.

$$f = \frac{E_c \varepsilon}{1 + (\varepsilon/\varepsilon_0)^2} \quad (\text{III.3})$$

$$\varepsilon_0 = \frac{2f'_c}{E_c} \quad (\text{III.4})$$

$$E_c = \frac{f}{\varepsilon} \quad (\text{III.5})$$

Avec :

f : contrainte à une déformation ε , en MPa.

ε_0 : déformation à la résistance ultime de compression f'_c .

La relation contrainte-déformation multilinéaire isotrope mise en application exige que le premier point de la courbe soit défini par l'utilisateur. Elle doit satisfaire la loi de Hooke.

$$E = \sigma/\varepsilon \quad (\text{III.6})$$

La courbe contrainte-déformation est constituée par six points connectés par des lignes droites, la *Figure I.11*. montre la courbe contrainte-déformation simplifiée de béton en compression uniaxiale qui a été employée dans cette étude.

❖ Calcul les points 1 à 5

Point 1 défini comme $0.30f'_c$ est calculé par la relation contrainte-déformation du béton dans la partie linéaire équation (III.5).

Les points 2, 3, et 4 sont obtenus à partir de l'équation (III.3), où ε_0 est calculé à partir de l'équation (III.4).

Le point 5 est défini par f'_c et ε_0 .

Dans cette étude, un comportement parfaitement plastique après le point 5 est supposé.

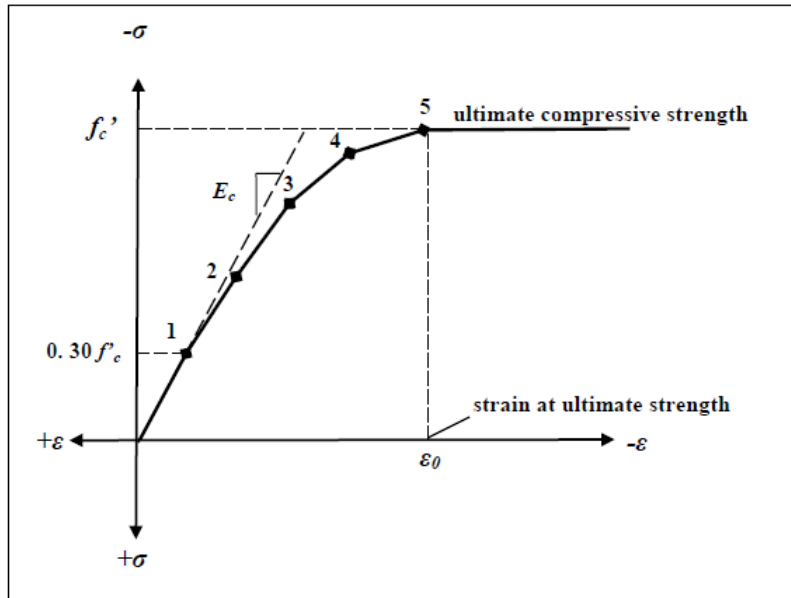


Figure I.11. Courbe contrainte-déformation simplifiée pour le béton en compression uniaxiale [18]

Le *Tableau I.2.* récapitule les différentes propriétés du béton utilisées dans cette étude.

Tableau I.2. Propriétés du béton

Prescription du matériau	Type d'élément	Propriétés du Béton			
1	Béton Solid65	Linéaire isotropique			
		E_c MPa		25000	
		PRXY= ν		0.2	
		Multilinéaire isotropique (courbe σ-ε)			
			Déformation (ε) 10⁻³	Contrainte (σ) MPa	
		Point 1	0	0	
		Point 2	0.336	8.4	
		Point 3	0.672	15.43	
		Point 4	1.008	20.98	
		Point 5	1.344	24.73	
		Point 6	2.44	28	
		Béton			
		ShrCf-Op (βt)	0.2	BiCompSt	0
		ShrCf-CI (βc)	0.2	HydroPrs	0
		UnTensSt (ft28)	3.3	BiCompSt	0
UnCompSt (fc28)	28	UnTensSt	0		
TenCrFac		0			

6.2.2. L'acier

Le comportement de l'acier est supposé élastoplastique parfait et identique en traction et en compression. La *Figure I.12.* montre la courbe contrainte-déformation pour l'acier de ferrailage employé.

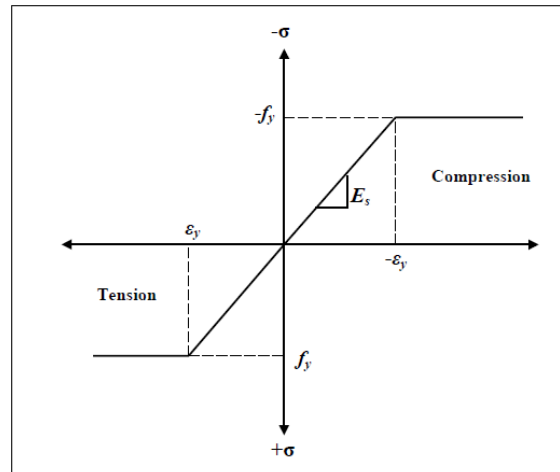


Figure I.12. Courbe contrainte-déformation de l'acier de ferrailage [18]

Les propriétés de l'acier introduit dans L'ANSYS sont résumées dans le *Tableau I.3.*

Tableau I.3. Propriétés de l'acier

Numéro du matériau	Type d'élément	Propriétés du matériau	
2	L'acier du béton armé "link8"	Linéaire isotropique	
		E_x (MPa) = E_s	200000
		PRXY= ν	0.3
		Bilinéaire isotropique	
		f_y (MPa)	410
		E_s'	0
		Diamètre	
Φ (mm)	20		
3	L'acier du béton armé "link8"	Linéaire isotropique	
		E_x (MPa) = E_s	200000
		PRXY= ν	0.3
		Bilinéaire isotropique	
		f_y (MPa)	410
		E_s'	0
		Diamètre	
Φ (mm)	12		

6.2.3. Composite CFRP

Le composite CFRP est composé de deux constituants. Ces constituants sont combinés à une échelle macroscopique et ne sont pas solubles l'un dans l'autre. Un constituant est le renfort, qui est incorporé dans le second : la matrice. Le renfort est en forme de fibres, plus rigides que la matrice. Les FRP – plus précisément les CFRP – sont anisotropiques. La *Figure I.13.* montre un schéma des FRP.

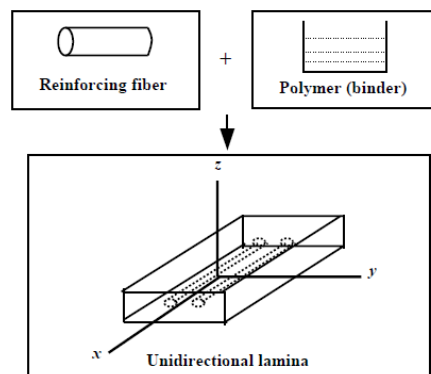


Figure I.13. Schéma de composite renforcé par fibre [18]

Comme montré dans la *Figure I.13.* l'unidirectionnel lamelle a trois plans mutuellement orthogonaux de propriétés mécaniques (par exemple xy, xz et yz). La direction z est dans le même sens de fibre. Il est aussi appelé matériau orthotropique spécial. Dans cette étude, le matériau orthotropique spécial est aussi transversalement isotrope.

Les fibres de carbone sont utilisées généralement pour le renforcement grâce à leur grande contrainte de traction, le comportement des matériaux composites est donné par la *Figure I.14.* Le comportement montre la partie élastique caractérisée par une contrainte de traction de 958 MPa, et une déformation de 1,5%.

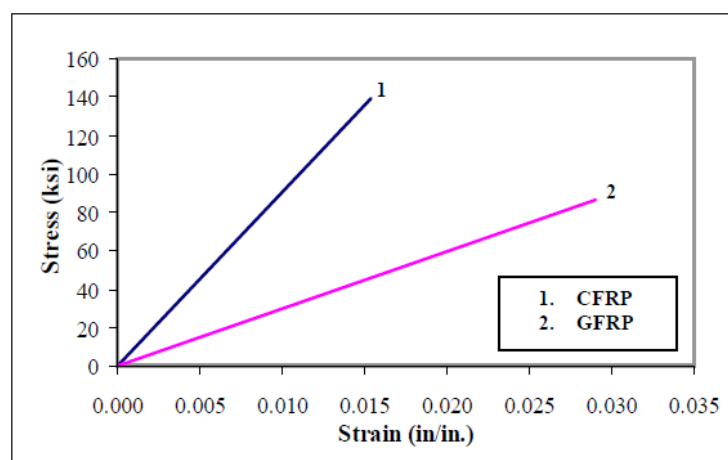


Figure I.14. Comportement du composites dans la direction des fibres [18]

Les données d'entrée nécessaires pour les composites de CFRP dans les modèles d'élément finis sont comme suit:

- Nombre de couches ;
- L'épaisseur de chaque couche ;
- L'orientation de la direction de fibre pour chaque couche (θ) ;
- Module d'élasticité du composite de FRP dans les trois directions (E_x , E_y , et E_z) ;
- Coefficient de poisson major pour les trois plans (ν_{xy} , ν_{yz} et ν_{xz}).
- Module de cisaillement du composite de FRP dans les trois plans (G_{xy} , G_{yz} et G_{xz}) ;

Les propriétés des matériaux isotropes tel que le module d'élasticité et le coefficient de Poisson sont identiques dans toutes les directions, pas d'indices nécessaires. Ce n'est pas le cas avec les matériaux orthotropiques spéciaux. Les indices sont nécessaires pour indiquer les propriétés dans les différentes directions.

Par ailleurs, la résistance en compression d'un composite est complexe et difficile à relier aux propriétés limites des composants de base. Cependant les propriétés de la matrice sont déterminantes quand le composite est sollicité en compression.

Tableau I.4. Propriétés du tissu de fibre de carbone [9]

Numéro du matériau	Composite FRP	Module d'élasticité (MPa)	Coefficient de Poisson	Résistance à la traction	Module de cisaillement (MPa)	Déformation à la rupture (%)
5	CFRP	$E_x = 62000$ $E_y = 4800$ $E_z = 4800$	$\nu_{xy} = 0,2$ $\nu_{yz} = 0,2$ $\nu_{xz} = 0,3$	958	$G_{xy} = 3270$ $G_{yz} = 3270$ $G_{xz} = 1860$	1,5

6.3. Travaux antérieurs

De nombreuses recherches récentes ont été menées pour comprendre le comportement des colonnes confinées par matériaux composites : expérimentales [19,20], analytiques [21,22]. Au domaine de l'analyse numérique très peu d'études ont été faites, en raison de la complexité du comportement non linéaire du béton et les conditions de son adhérence avec l'acier et les tissus de fibres.

Parmi les rares études conduites sur colonne confinée par composite avec le logiciel ANSYS, l'étude de Guoqiang Li et al. [23]. Une analyse par éléments finis par ANSYS® a été employé pour conduire une analyse paramétrique. Des expériences ont aussi été conduites pour valider les résultats de l'analyse numérique. Un accord raisonnable a été trouvé entre les deux résultats. L'effet de l'épaisseur, la raideur et l'orientation des fibres aussi bien que la connectivité interfaciale entre l'enveloppe FRP et le béton, dans la résistance et raideur des colonnes réparées a été évalué.

Les études antérieures qui ont été conduites pour examiner l'effet de confinement dans le comportement contrainte-déformation des colonnes réparées. Les études expérimentales ont montré que la résistance à la compression des cylindres enveloppés a considérablement augmenté de 100% à 500% selon les matériaux utilisés et l'épaisseur des couches FRP. Toutanji [24] proposa un modèle analytique pour prédire la relation contrainte-déformation de la colonne BA réparée. Il a trouvé que la courbe peut être divisé en deux parties distinctes. Dans la première, le comportement est similaire à celui de béton armé, tant que l'expansion latérale du béton est insignifiante. Dans la deuxième partie, le FRP est totalement activé et la courbe est principalement dépendante du modèle du FRP.

Des expériences ont été conduites pour valider ce modèle analytique un accord raisonnable a été trouvé. Or, quand des analyses non linéaires aux éléments finis ont été menées, il se présenta que les couches de fibres subissent un état de contrainte bi-axial contrairement aux suppositions de tension transversale.

Guoqiang Li et al. ont étudié l'effet de direction des fibres et l'effet de collage interfaciale. Aussi au lieu du point de détour net, on a ajouté une troisième région dite de transition. Elle correspond à la rupture progressive du béton.

Dans cette étude, des expériences viennent valider le modèle ANSYS®. Deux tissus fibre de verre traités par époxy ont été utilisés pour réparer des colonnes pré-détériorées par chargement cyclique. Des essais uniaxiales de résistance et rigidité ont été menés sur les échantillons réparés et ceux de contrôle.

Un modèle 3D dimensions a été construit puis maillé comme le montre la *Figure I.15*.

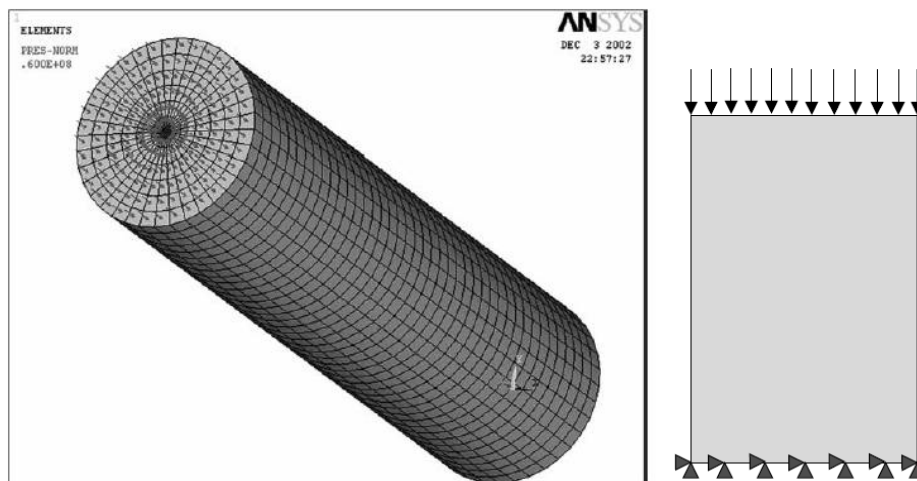


Figure I.15. Maillage en 3D [23]

La colonne a été modélisée en utilisant le béton *Solid65* et FRP *Shell99*.

Les coordonnées globales sont telles que l'axe du cylindre est celui des Z et la face inférieure est totalement encastrée. Une pression a été appliquée en haut du cylindre dans une seule étape de chargement '*load step*'.

Une analyse non linéaire a été menée pour obtenir la charge de rupture et la relation contrainte déformation avec et sans renforcement.

La résistance à la compression du béton à 28 jours était de 26,1 MPa ; Le module d'élasticité de 28,8 GPa. L'acier de ferrailage avec une limite élastique de 414 MPA et un module d'élasticité 200 GPa.

Le test de module d'élasticité a été conduit par *ASTM C469 standard*. Le test de résistance à la compression mené selon *ASTM C 39 standard*. Voir la *Figure I.16*.

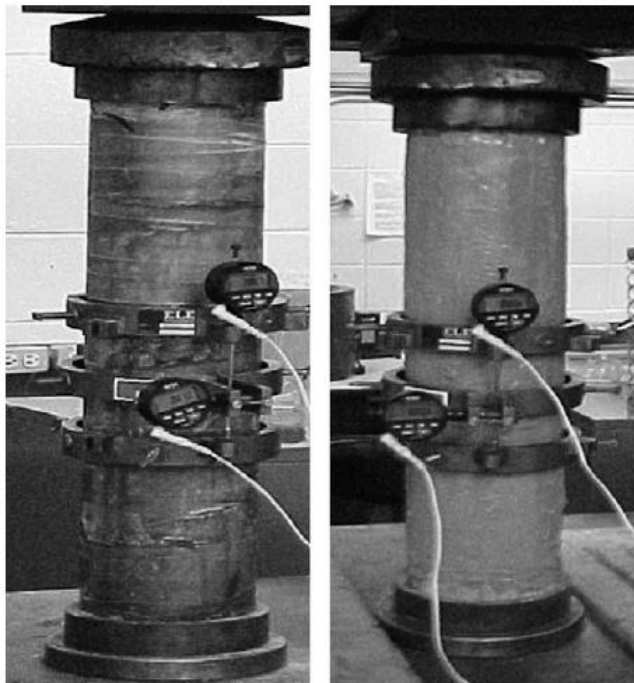


Figure I.16. Colonnes confinés au cours d'essais [23]

De l'analyse paramétrée on peut conclure qu'une meilleure connectivité ou collage donne une meilleure rigidité et résistance, ceci grâce à une meilleure transmission de contrainte.

De plus, il a été trouvé que la direction axiale de fibres est plus performante que celle transversale, voir la *Figure I.17*.

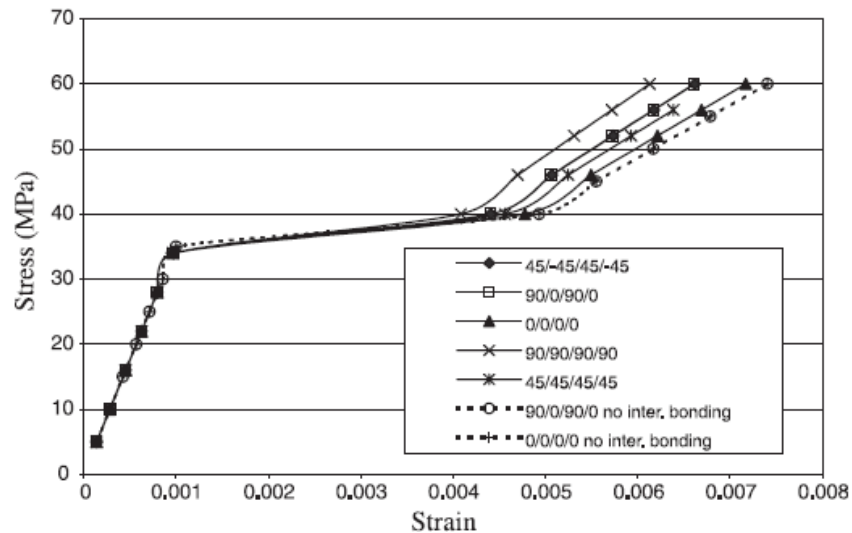


Figure I.17. Effet de l'orientation des fibres dans le comportement contrainte déformation [23]

L'étude de Guoqiang Li souligne l'importance du module d'élasticité du composite et les trois zones.

7. Conclusion

De nos jours, la volonté grandissante de maîtriser notre environnement mène un grand nombre d'hommes de sciences, et les ingénieurs en particulier, à se tourner vers des outils sophistiqués qui permettent d'analyser dans le détail les comportements physiques des matériaux. Les éléments finis sont à même de répondre à ces attentes et sont actuellement communément utilisés dans de nombreux domaines.

Dans le domaine du génie civil, le calcul par éléments finis est également entré dans les mœurs. Avec l'avènement des méthodes de calculs non linéaires, il est devenu possible de modéliser fidèlement le comportement d'une structure en béton armé. De par son comportement très inhomogène, le béton est un matériau très difficile à modéliser spécialement son comportement en traction.

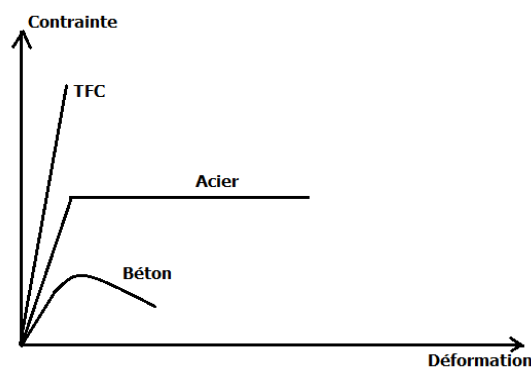


Figure I.18. Courbes typiques des différents matériaux utilisés

CHAPITRE II

ANALYSE DYNAMIQUE D'UN PONT SOUS DIFFÉRENT CAS DE RENFORCEMENT

Chapitre II

Analyse Dynamique d'un Pont sous différents cas de renforcements

1. Introduction

Dans l'ingénierie des structures, l'analyse modale utilise la masse globale et la rigidité de la structure pour trouver les périodes différentes dans lesquelles elle résonne naturellement. Ces périodes de vibration sont très importantes à noter dans le génie parasismique, puisqu'il est impératif que la fréquence naturelle de la structure ne coïncide pas avec la fréquence du séisme de la région d'implantation. Si la fréquence naturelle d'une structure correspond à la fréquence du tremblement de terre, la structure continuerait de résonner et connaîtrait une destruction totale.

L'équation des vibrations libres sous une forme matricielle est [27]:

$$[K]\{U\} + [C]\{\dot{U}\} + [M]\{\ddot{U}\} = 0$$

[M] étant la matrice des masses

[K] matrice de rigidité

[C] matrice d'amortissement

$\{U\}$, $\{\dot{U}\}$, $\{\ddot{U}\}$ sont le déplacement, la vitesse et l'accélération de la structure.

La solution de ce système est la réponse en oscillation libre de la structure.

Le but de cette étude est l'adaptation des structures d'ouvrage d'art aux sollicitations dynamiques, par différents types de renforcement.

Nous présenterons dans cette partie la modélisation d'un pont en béton armé vétuste puis renforcé une fois par chemisage et une autre par tissu de fibre de carbone.

2. Description de l'ouvrage

Suite au constat du manque de cas pratiques de pont dont les piles ont été renforcé par fibre de carbone, nous avons retenu le cas du pont à poutres sous chaussées se trouvant dans la wilaya de Tipaza, situé en zone de sismicité III selon le règlement parasismique algérien des ouvrages d'art (RPOA).

Réalisé en 1927, l'ouvrage est un passage supérieur sur oued « OUMAZER » se trouvant à Cherchell, distante de 80 km à l'ouest d'Alger. Hyperstatique à trois travées, le tablier est constitué de quatre poutres maîtresses en béton armé, à inertie variable, liaisonnées par des entretoises et longrines surmontées d'une dalle en béton armé. Le pont est d'un angle du biais de 100 grades.

L'infrastructure est composée de deux piles, qui sont constituées de quatre poteaux liaisonnés par voiles raidisseurs, et de deux longrines en béton armé. Les caractéristiques géométriques du pont sont :

{	Longueur totale	70,00m
{	Longueur de la travée d'accès	15,00m
{	Longueur de la travée intermédiaire	40,00m
{	Largeur de la chaussée	6,00m
{	Largeur des trottoirs	1,00m
{	Hauteur de la pile	10,00m



Figure II.1. Vue d'ensemble du pont OUMAZER

Suite à la visite de l'ouvrage au pk 15+970 sur CW09, un rapport d'expertise a été établi comprenant un relevé des désordres sur l'ouvrage ainsi que les propositions de réhabilitation adéquates.

Les détériorations sont visibles sur les éléments du tablier, avec des éclatements du béton d'enrobage, corrosion des armatures et des fissures plus ou moins profondes sur les éléments structuraux du tablier. Au niveaux de l'infrastructure, les piles présentent des anomalies qui se résument en la dégradation totale des bétons et apparition des aciers complètement corrodés avec diminution de leur section. Cela est dû probablement aux attaques des eaux salées du milieu marin entraînant des éclatements du béton et une perte de masse et exposant ainsi les aciers à la corrosion et une perte alarmante de la section résistante. Le diagnostic révèle aussi des fissures inclinées à 45° au niveau des abouts des poutres maîtresses qui traduisent l'accroissement des contraintes de cisaillement dues essentiellement à l'augmentation du trafic routier. On retient également que cette zone a été frappée par un séisme de magnitude 6.1 à l'échelle de Richter en 1989.



Figure II.2. Dégradations pile côté CHERCHELL à droite, pile coté TIPAZA à gauche [28]

En outre, l'analyse des désordres a permis de dégager des solutions d'intervention qui convergent vers la réhabilitation et/ou le renforcement des éléments détériorés, afin de redonner à ces éléments une portance adaptée. La méthodologie choisie pour réparer et renforcer le pont repose sur les phases d'interventions suivantes :

- Chemisage armé des piles ;
- Réparation des bétons dénudés ;
- Injection des fissures par la résine époxydique ;
- Réparation des poutres par collage de tissus de fibres de carbone CFRP.

❖ Chemisage des piles

Le chemisage des appuis en béton consiste à remplacer le béton d'enrobage dégradé (fissures, éclatement, carbonatation) par une couche de béton avec ajout de barres d'armatures, en passant par la préparation rigoureuse de la surface à savoir : piquage du béton, sablage des armatures corrodées.

Une fois le coffrage en place le béton de latex est coulé. Les bétons de latex ne sont pas complètement étanches à la pénétration des chlorures, mais ils offrent une protection bien supérieure à celle obtenue avec des bétons courants de type B 30.

La formulation des bétons de latex est identique à celle des bétons de ciment Portland courants. Les proportions du mélange doivent simplement être ajustées pour tenir compte de la proportion d'eau contenue dans l'émulsion de latex et de l'important effet de plastification du latex. Selon le dosage et le type de latex employé, le rapport E/C sera compris entre 0,30 et 0,40. La quantité de latex à employer (exprimée en extrait sec) se situe généralement entre 10 et 20 % de la masse de ciment [29].

Baron et al. [30] ont donné la formulation typique du béton de latex (de chemisage) qui se résume au *Tableau II.1.*

Tableau II.1. Formulation pour $1m^3$ de béton Latex

Ciment kg	Latex %	E/C	Gravillon kg	Sable kg	Affaissement cm	Résistance 28j MPa
309	15	0,3	985	805	15,5	45

Dans notre étude, on modélisera dans un premier temps le pont dégradé, puis le pont avec la pile chemisée en béton armé, ensuite le pont avec la pile confiné par composite de carbone. L'intérêt n'étant pas autour de renforcement des poutres on supposera ces dernières en bon état.

3. Modélisation par ANSYS

La modélisation par ANSYS a été faite selon le choix des éléments exposé au chapitre I. Pour le béton détérioré on a crée un 5^{ème} élément *Solid65* avec les propriétés dégénérés. Les différentes entretoises, les talons de poutres et leur inertie variable ont été prise en compte dans le modèle.

3.1. Modélisation

Le modèle du pont est dans la figure II.3. et les détails de modélisation sont illustrés à la Figure II.4. avec comparaison de l'ancienne modélisation du pont.

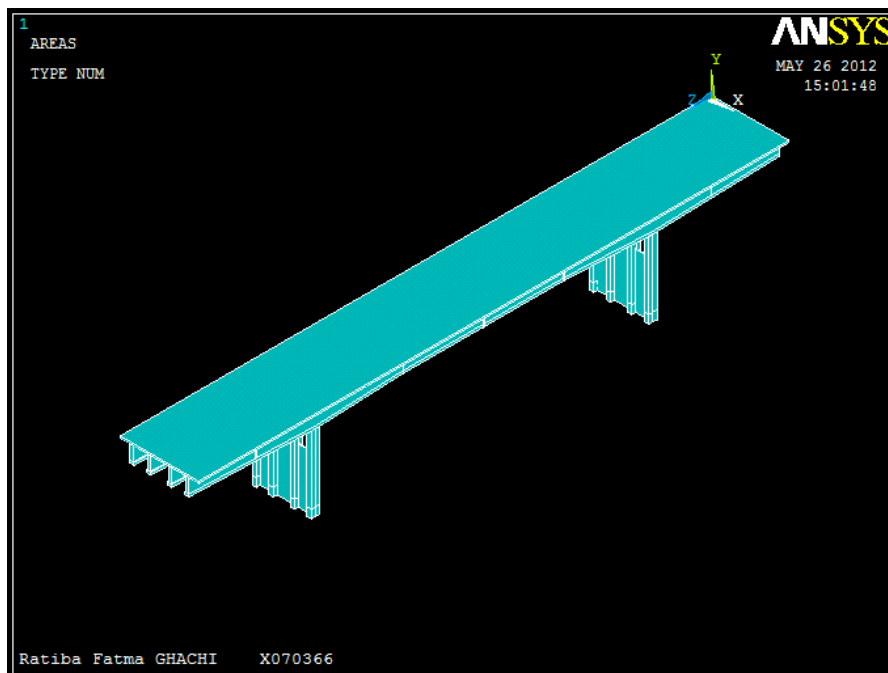


Figure II.3. Modèle du pont

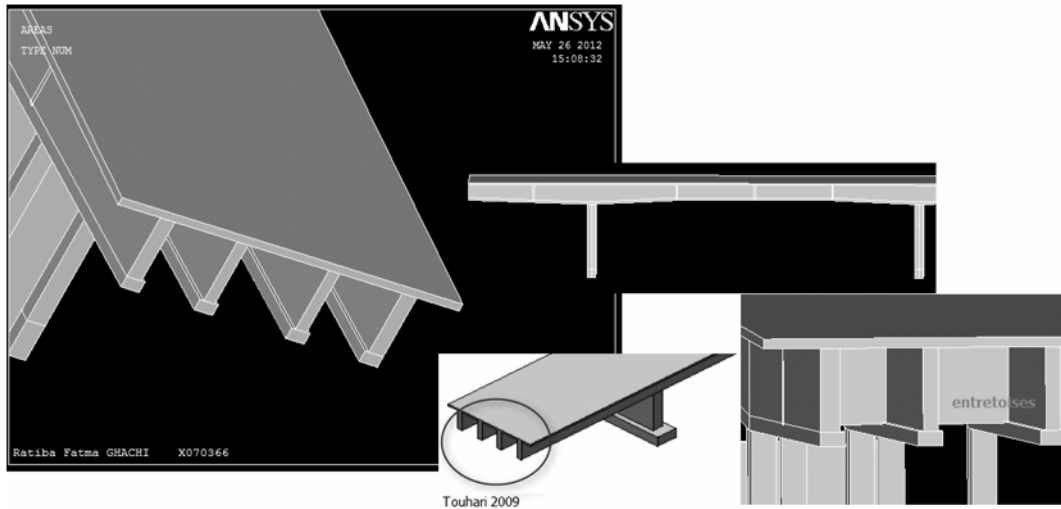


Figure II.4. Comparaison avec une modélisation antérieure [31]

3.2. Discrétisation par éléments finis

L'élément fini choisit pour le maillage du pont est tétraédrique en raison de la complexité de la géométrie. La discrétisation est alors automatique. Plus fine que les modélisations antérieures car plus de détails sont modélisé et surtout une analyse de convergence à été conduite, afin que les résultats se rapprochent/convergent – dans les limites imposées par le matériel. On a 95788 éléments.

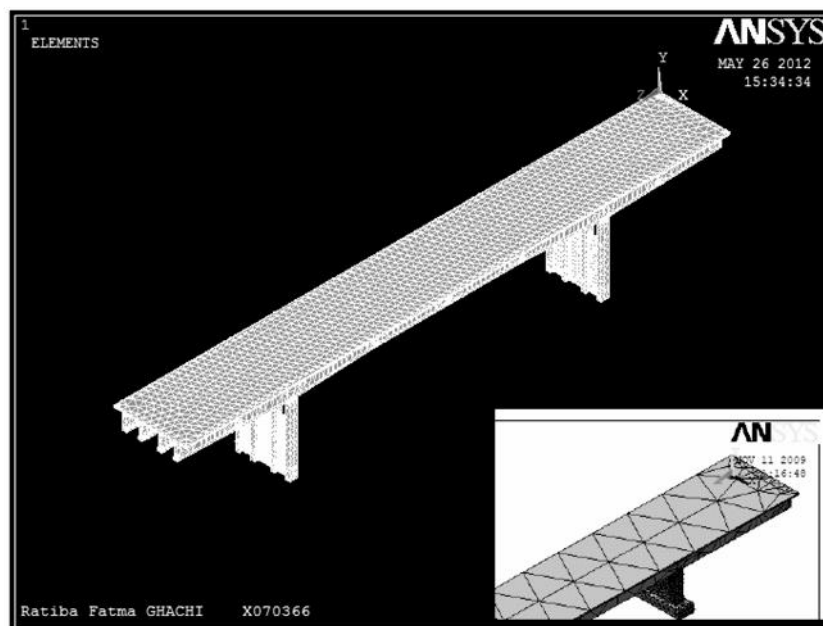


Figure II.5. Discrétisation plus fine [31]

3.3. Conditions aux limites

Le pont est encastré au niveau des appuis et appuyé simplement au niveau des sommiers.

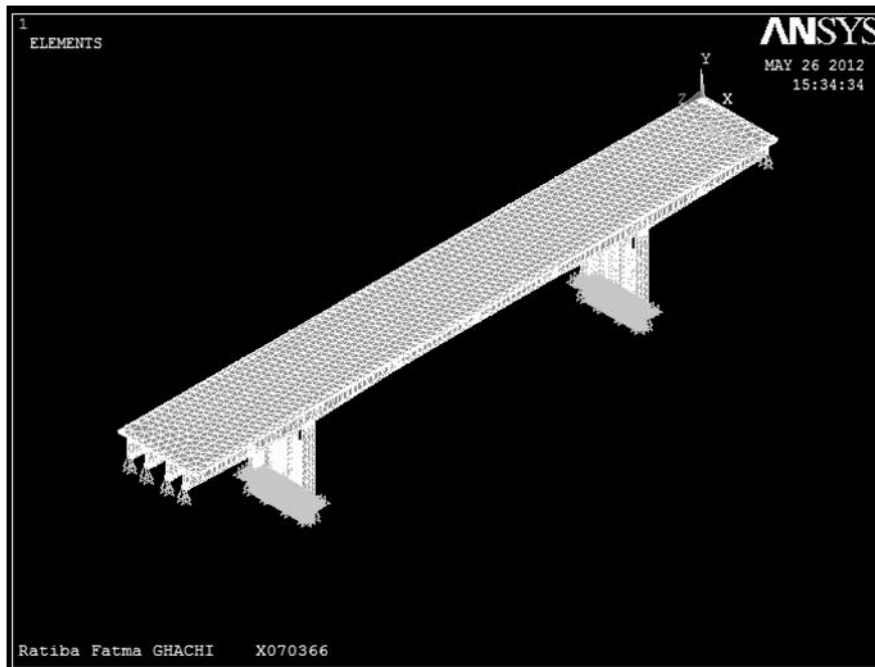


Figure II.6. Condition d'appui du pont

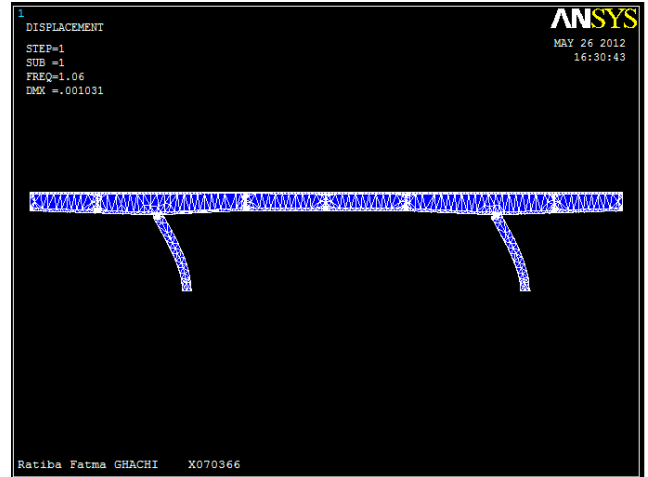
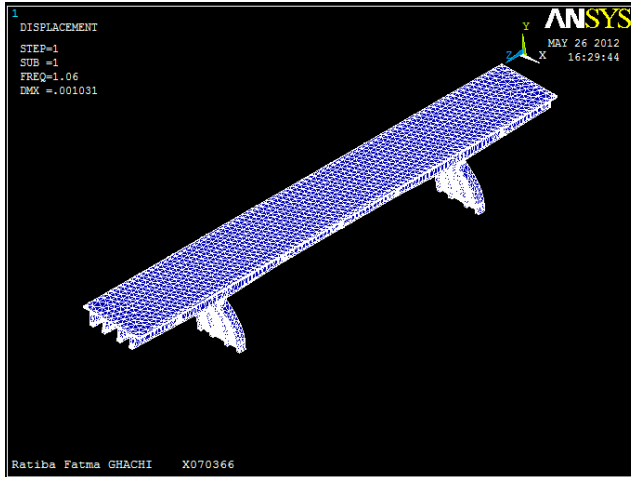
3.4. Résultats numériques du pont non renforcé

Les modes de vibration libre du pont sont :

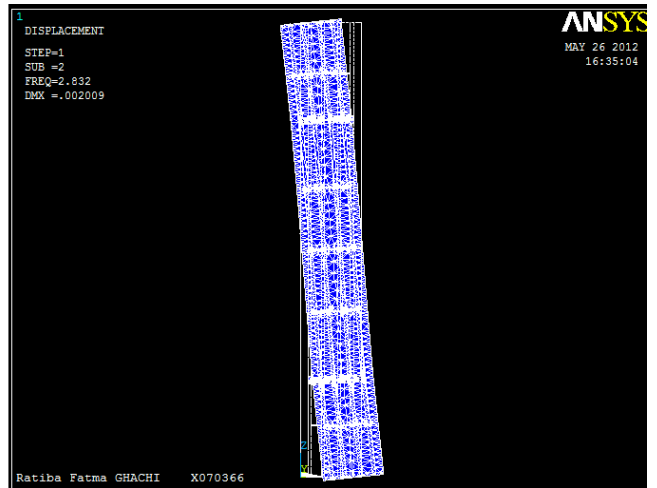
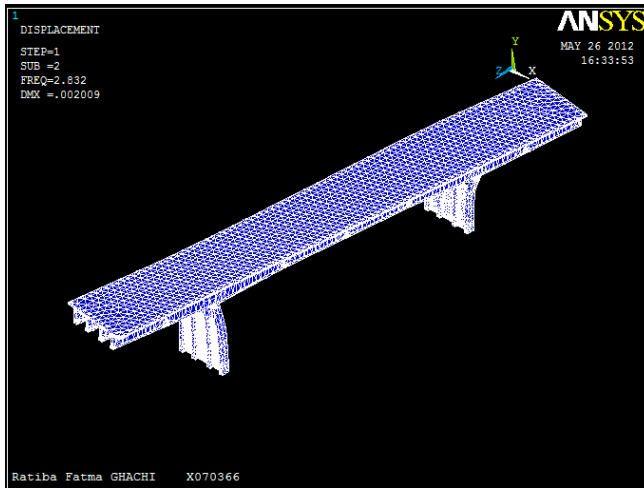
Tableau II.2. Modes propres pont endommagé

MODE	Fréquence
1	1,0576
2	2,8268
3	2,9280
4	4,4920
5	5,6035
6	8,9139

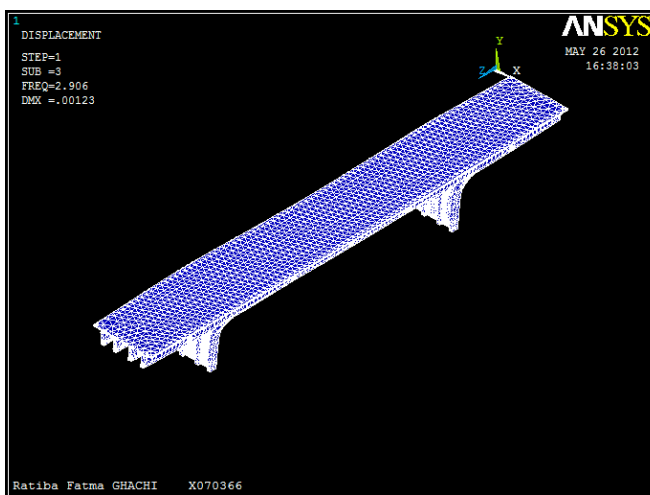
Les formes de modes étant les suivants :



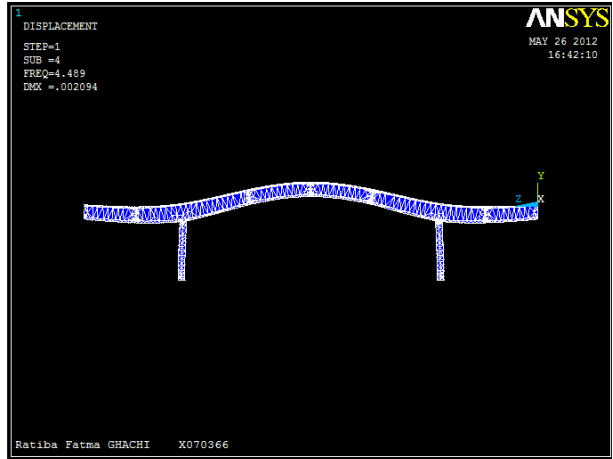
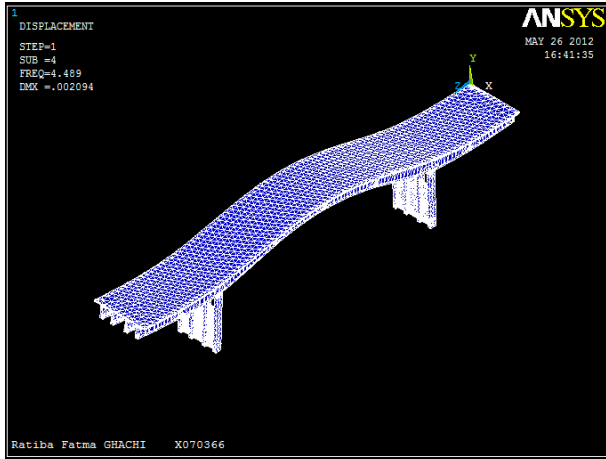
Mode 1 Translation longitudinale



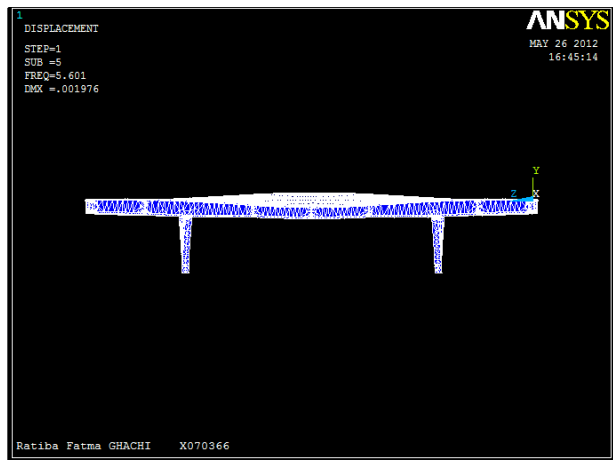
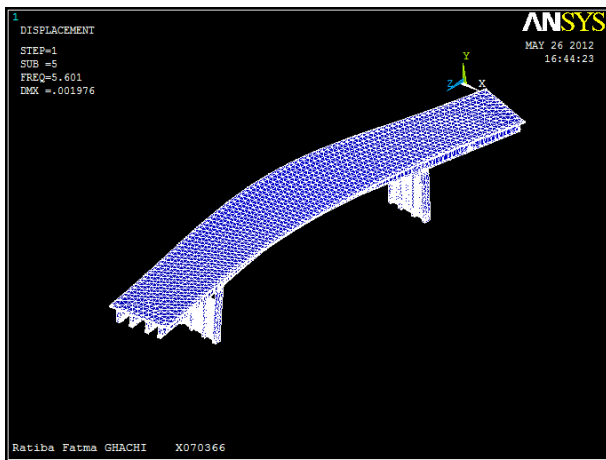
Mode 2 Rotation latérale autour de Y



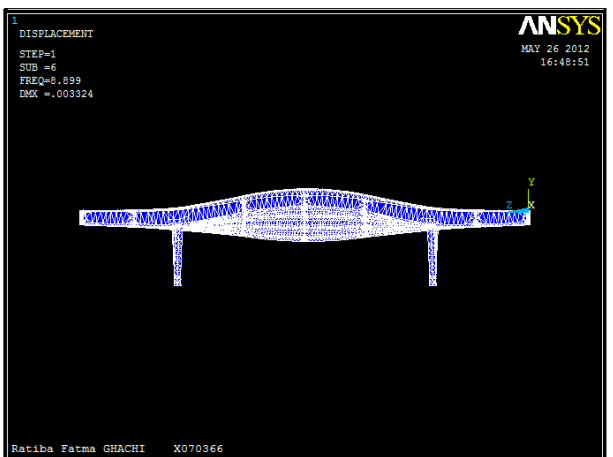
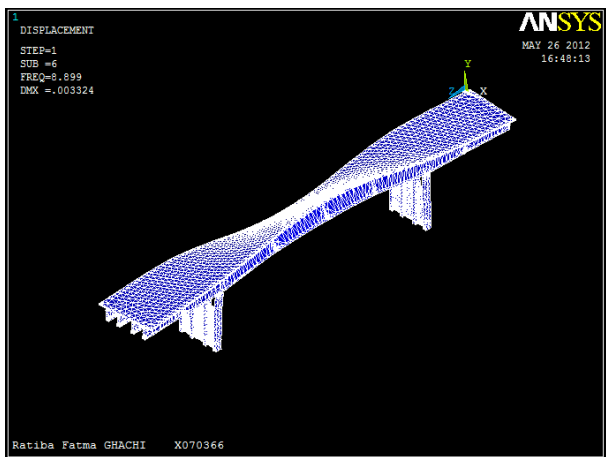
Mode 3 Translation latérale



Mode 4 Fléchissement vertical



Mode 5 Fléchissement latéral associé à une torsion



Mode 6 Torsion

Figure II.7. Modes de vibration

3.5. Résultats du pont après chemisage des piles

On modélise le chemisage selon le plan de chemisage armé des piles – voir annexe A – on fait l'hypothèse que ce renfort bien scellé au béton initiale. On a les résultats modaux de la structure :

Tableau II.3. Résultats du renforcement par chemisage des piles

Mode	Fréquence avant chemisage	Fréquence après chemisage	Augmentation
1	1,0576	4,2777	304,47%
2	2,8268	5,1045	80,58%
3	2,9280	5,4668	86,71%
4	4,4920	5,5373	23,27%
5	5,6035	6,1255	9,32%
6	8,9139	9,9293	11,39%

On a donc pour le premier mode une augmentation de 304,47%. Ce qui est considérable, en dépit de l'augmentation de la masse globale.

Les mêmes formes de modes ont été observé dans cette analyse.

3.6. Résultats du pont renforcé par TFC

Les propriété du TFC sont tel présenté au chapitre I, le bureau d'étude SAPTA a estimé une perte de 30 à 40% d'armatures au niveau des piles qu'on compensera avec trois couches de 0,43 mm confinant les deux piles du pont, vue que les cerces utilisés pour le chemisage étaient des HA14.

Après modélisation du TFC, il est discrétisé en éléments *Solid46* au nombre de 93294.

L'analyse, qui – il faut le signaler – est très lente, devra être enregistré pour ne pas subir des temps d'attente à chaque besoin de détails. Les paramètre modaux de la structure renforcée par TFC sont :

Tableau II.4. Résultats du renforcement par confinement des piles en composite

Mode	Fréquence avant renforcement	Fréquence après renforcement en TFC	Écart
1	1,0576	3,5179	232,63%
2	2,8268	4,0302	42,57%
3	2,9280	4,1964	43,32%
4	4,4920	4,5453	1,19%
5	5,6035	5,6928	1,59%
6	8,9139	9,0302	1,30%

On constate une augmentation de 232,63% de fréquence fondamentale. Donc le tissu de fibre augmente la rigidité de la structure et améliore le comportement dynamique global de la structure.

Cette augmentation est nettement supérieure à l'augmentation de fréquences lorsque les poutres sont renforcées.

3.7. Comparaison des résultats

Dans ce paragraphe, on évaluera les résultats des différents types de renforcement en comparaison avec la structure du pont endommagé.

Tableau II.5. Comparaison des différents types de renforcement

Mode	Fréquences avant renforcement	Fréquence après chemisage	Fréquence après renforcement en TFC	Écart
1	1,0576	4,2777	3,5179	17,76%
2	2,8268	5,1045	4,0302	21,05%
3	2,9280	5,4668	4,1964	23,24%
4	4,4920	5,5373	4,5453	17,91%
5	5,6035	6,1255	5,6928	7,06%
6	8,9139	9,9293	9,0302	9,06%

La *Figure II.8.* représente les résultats des trois cas traité précédemment et montre l'amélioration de la rigidité de la structure par les deux procédés.

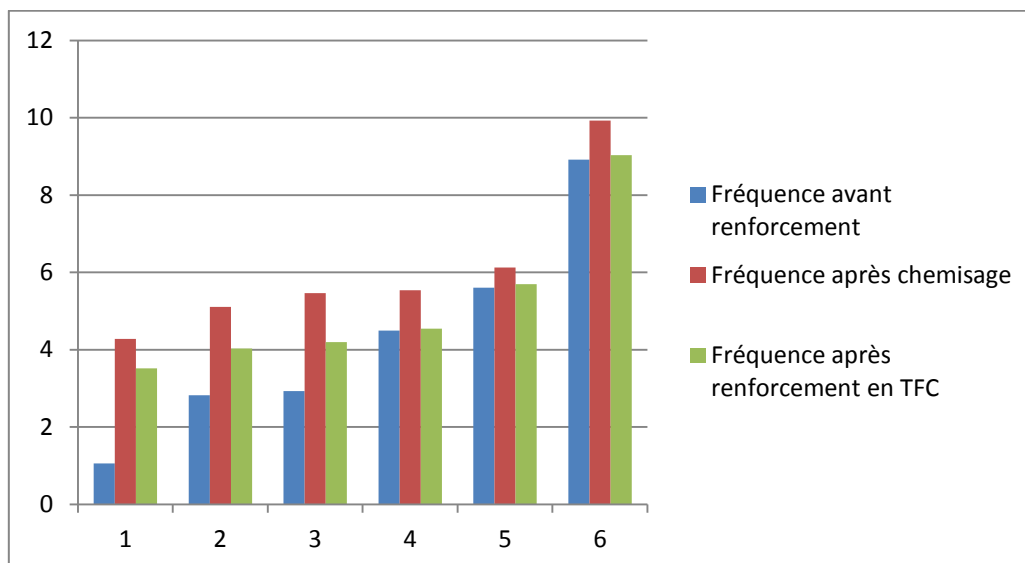


Figure II.8. Modes de vibration confrontés

On constate que la performance des deux modes de renforcement sont assez proches pour envisager une étude comparatif. Puisque le chemisage nécessite du matériel et la disposition du site à recevoir les gaines et les échafaudages. D'autre part la facilité de mise en œuvre du tissu de fibre, l'application sans couper la circulation sont à considérer, outre son prix.

La structure renforcée au TFC présente un meilleure souplesse, ce qui est favorable vis-à-vis du séisme.

4. Modélisation par SAP2000

Vu que la modélisation en éléments solides de la colonne [32] ne donne pas des résultats satisfaisants et que la modélisation du pont entier en solide est non possible pratiquement. Nous avons opté pour les éléments usuelles à savoir *frame* et *area* respectivement linéique et surfacique.

Néanmoins une amélioration par rapport aux modèles traditionnelles a été accompli.

L'un des exemples les plus frappant concernant les ouvrages d'art, celui représenté dans la *Figure II.9*.

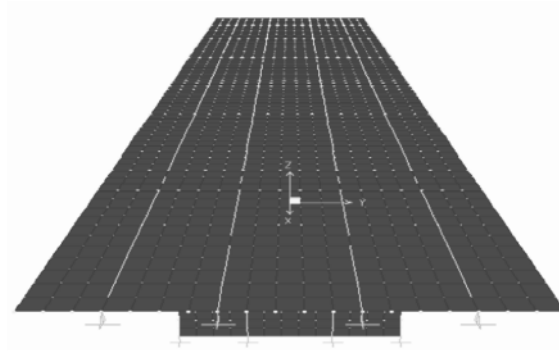


Figure II.9. Modélisation SAP2000 traditionnelle

Or une telle modélisation donne des éléments tels qu'en *Figure II.9*. Ce qui modifie la rigidité du tablier. La *Figure II.10* met en valeur en 3D deux modélisations de tablier en exemple. La première (gauche) tel que modélisée usuellement voir *Figure II.9*, montre que la rigidité du tablier est nettement modifiée par cette simplification. En modifiant le point d'insertion des poutres principales (droite), on parvient à un modèle plus représentatif de la réalité.

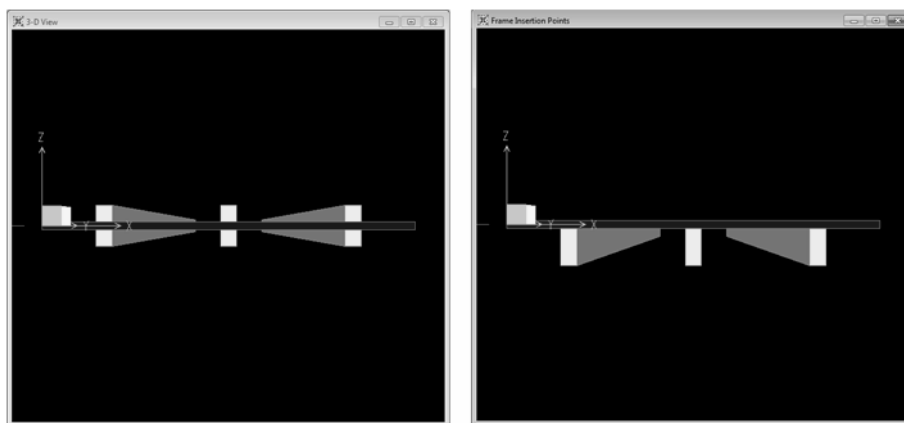


Figure II.10. Tablier modélisé de deux manières

Ainsi la modélisation du modèle du pont OUMAZER sur SAP2000 est détaillé tel présenté à la *Figure II.11*.

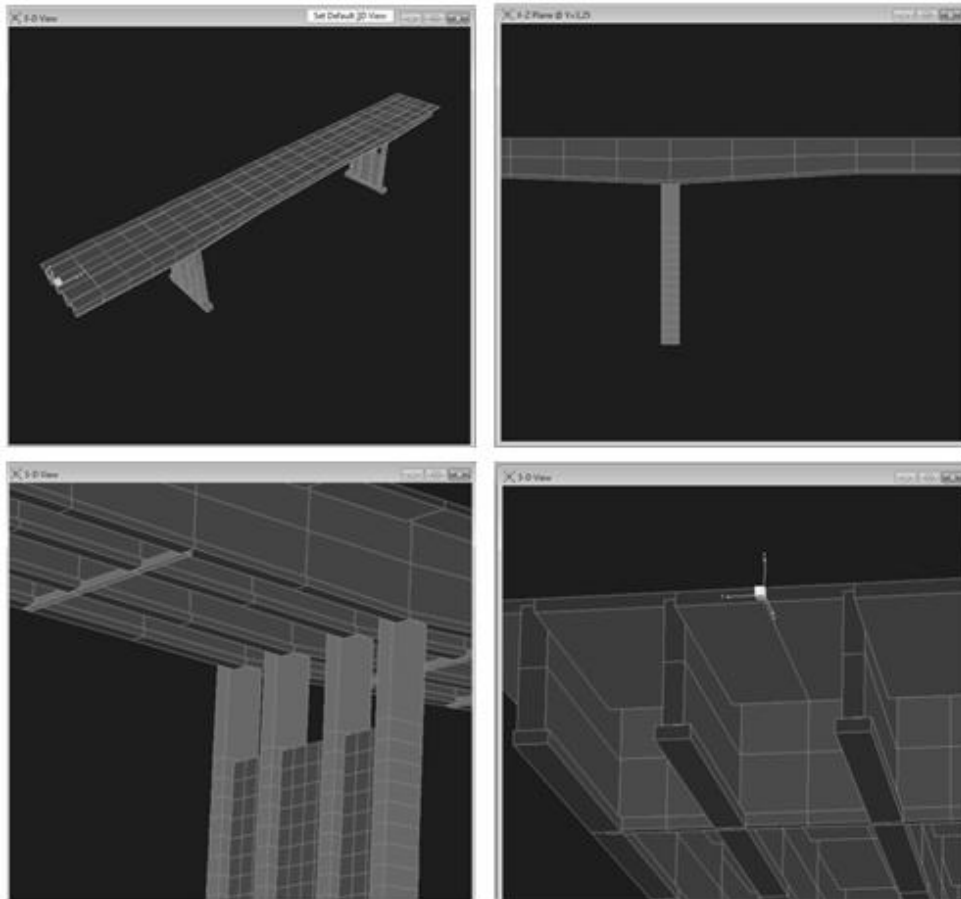


Figure II.11. Modèle du pont OUMAZER sur SAP2000

Les appuis sont encastrés aux tabliers, vu l'existence d'anciens appareils d'appuis fixes. Les sommiers (culées) sont simplement appuyés et les piles sont encastrées aux fondations.

Pour le renforcement des piles par chemisage, on augmente la section des éléments de l'appui. Pour le renforcement TFC, vu les résultats de la colonne dans et les contraintes matérielles informatiques, nous optons pour une représentation du TFC par modification du module d'élasticité du béton de piles.

Dans les études expérimentales précédentes [9], les courbes force-déformation issues des mesures effectuées par les jauges de déformation placées sur le béton (à sa fibre comprimée) et aciers de traction, pour les différents modes de renforcement, nous ont permis de constater la nette différence entre ces modes en terme d'écartement de ces courbes en phase de chargement des poutres renforcées. En effet, le module d'élasticité, caractéristique physique intrinsèque de l'élément poutre, permet de donner une bonne lecture du comportement de cette dernière.

Le module d'élasticité avant réparation est $E_1 = 25000$ MPa (vu son état vétuste et dégradé avant réparation), sa densité est de 2400 kg/m³, tandis que celui après réparation est $E_2 = 32500$ MPa (après injection de fissures et renforcement par matériaux composites CFRP), la densité est prise égale à 2400 kg/m³ [9].

4.1. Résultats numériques du pont non renforcé

L'analyse dynamique du modèle a conduit à l'obtention des paramètres modaux de la structure du pont. Les fréquences modales de l'analyse par MEF, avec comportement linéaire, trouvées sont résumées dans le *Tableau II.6.*, avec les formes des modes correspondantes illustrées dans la *Figure II.13.*

Tableau II.6. Modes propres du pont endommagé

Mode	Période	Fréquence	Description
	Sec	Cycle/sec	Texte
1	0,946444	1,0566	Translation longitudinale
2	0,56192	1,7796	Rotation latérale autour de Z
3	0,546106	1,8311	Translation latérale
4	0,257452	3,8842	Torsion
5	0,25092	3,9853	Fléchissement vertical
6	0,172457	5,7985	Mode couplé : Fléchissement latéral avec fléchissement vertical

Les fréquences obtenue par ce modèle de SAP2000, présente une très bonne correspondance avec le modèle ANSYS présenté dans la première partie du chapitre courant.

On effet pour le premier mode, on a 1,0566 Hz contre 1,0576 Hz pour ANSYS. Le modèle de SAP2000 est adéquat pour le modèle non-renforcé.

Tableau II.7. Comparaison ANSYS/SAP2000

– pont non-renforcé

Fréquences ANSYS	Fréquence SAP2000	Écart
1,0576	1,0566	0,09%
2,8268	1,7796	58,84%
2,928	1,8311	59,90%
4,492	3,8842	15,65%
5,6035	3,9853	40,60%
8,9139	5,7985	53,73%

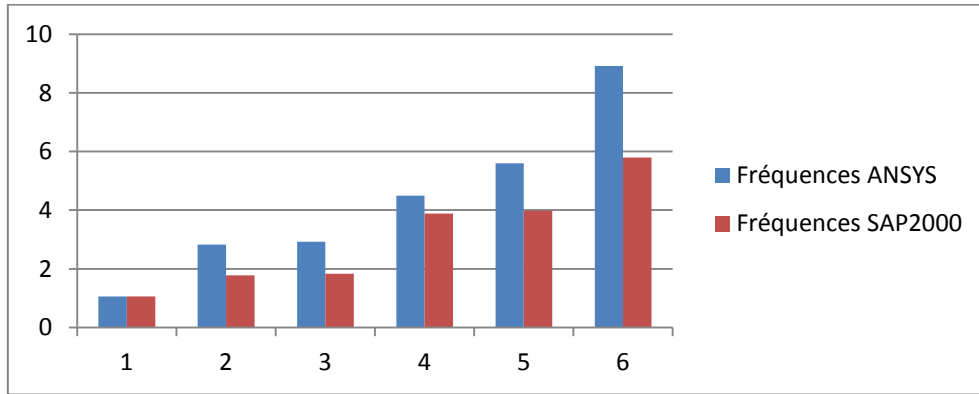


Figure II.12. Comparaison des modèles non renforcés ANSYS/SAP2000

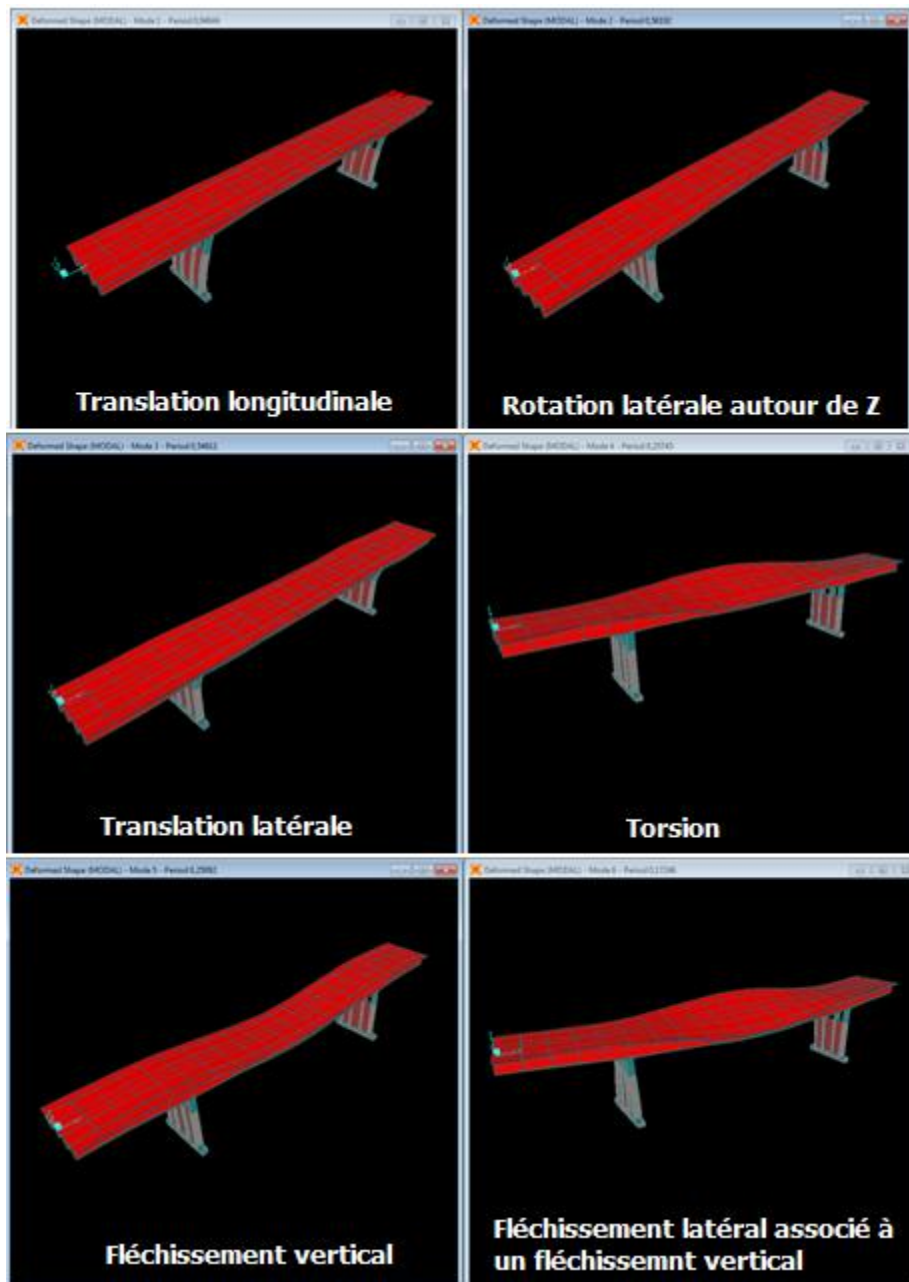


Figure II.13. Formes de modes de vibration

Les ratios de participation des masses modales sont tels que :

Tableau II.8. Participation des masses modales aux modes de vibration

Mode	Période	UX	UY	RZ	Somme UX	Somme UY	Somme RZ
Sans unité	Sec	%	%	%	%	%	%
1	0,946444	0,94844	0	0	0,94844	0	0
2	0,56192	0	6,23E-20	0,91254	0,94844	6,232E-20	0,91254
3	0,546106	0	0,90966	3,049E-20	0,94844	0,90966	0,91254
4	0,257452	4,05E-19	0,00011	0	0,94844	0,90977	0,91254
5	0,25092	1,84E-18	3,68E-20	8,856E-20	0,94844	0,90977	0,91254
6	0,172457	6,44E-17	0,00013	4,28E-16	0,94844	0,90989	0,91254

On atteint les 90% réglementaires (Règlement Parasismique des Ouvrages d'Art) de participation de masse au bout du troisième mode, on s'intéresse donc à ces modes prépondérants.

Pour les trois modes on remarque, comme surligné au *Tableau II.5*, un bon comportement bel et bien éloigné du couplage de deux modes différents qui conduit généralement à la torsion nuisible pour les structures.

4.2. Résultats numérique du pont renforcé par chemisage des piles

Les piles entières ont été chemisées d'un béton latex sur 20 cm tout autour avec armature. Voir la géométrie dans les plans (Annexe A).

Les résultats du comportement dynamique libre sont :

Tableau II.9. Résultat modaux après chemisage des piles

Mode	Période	Fréquences après chemisage	Fréquences avant chemisage	Augmentation
1	0,469287	2,1309	1,0566	101,68%
2	0,340472	2,9371	1,7796	65,04%
3	0,335703	2,9788	1,8311	62,68%
4	0,247713	4,0369	3,8842	3,93%
5	0,246819	4,0516	3,9853	1,66%
6	0,170654	5,8598	5,7985	1,06%

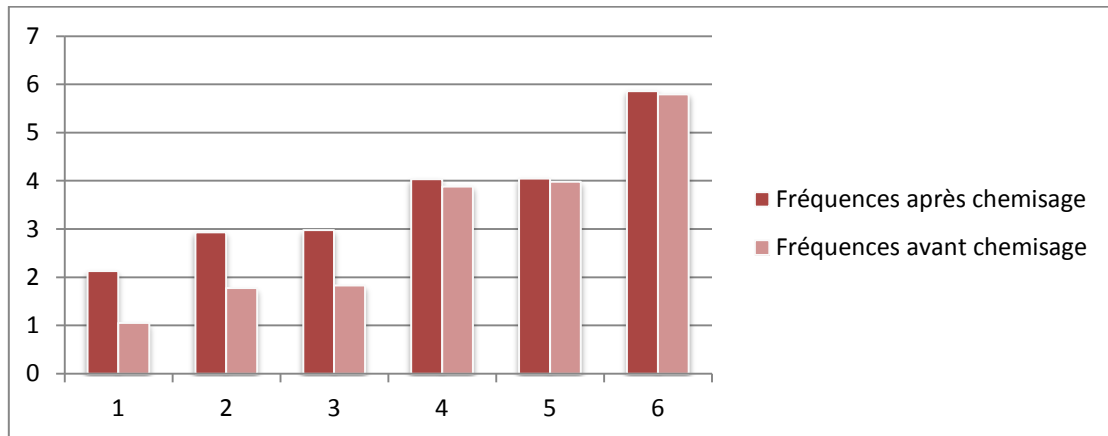


Figure II.14. Augmentation de fréquences par chemisage

On observe une augmentation de 101,68% pour le premier mode. En comparant aux résultats ANSYS on trouve un écart de 100,75% (double) avec les résultats du premier mode.

Tableau II.10. Comparaison des résultats après chemisage

Mode	Fréquence après chemisage ANSYS	Fréquence après chemisage SAP2000	Différence
1	4,2777	2,1309	100,75%
2	5,1045	2,9371	73,79%
3	5,4668	2,9788	83,52%
4	5,5373	4,0369	37,17%
5	6,1255	4,0516	51,19%
6	9,9293	5,8598	69,45%

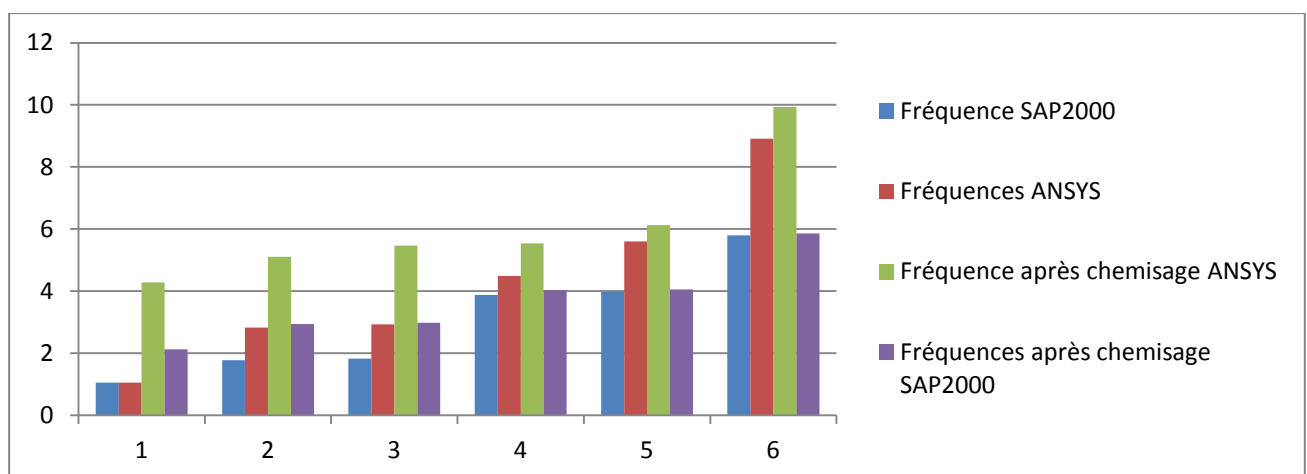


Figure II.15. Comparaison des fréquences de vibration SAP2000/ANSYS avant et après chemisage des piles

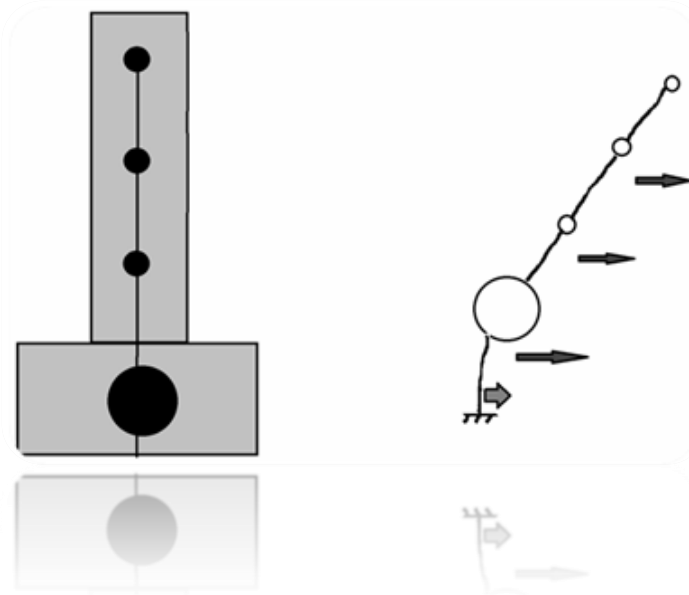
Tableau II.11. Participation des masses modales – pont chemisé

Mode	Période	UX	UY	RZ	Somme UX	Somme UY	Somme RZ
1	0,469287	0,86453	0	0	0,86453	0	0
2	0,340472	5,102E-18	5,603E-18	0,7707	0,86453	5,603E-18	0,7707
3	0,335703	3,983E-18	0,73145	0	0,86453	0,73145	0,7707
4	0,247713	1,94E-19	0,03448	1,897E-20	0,86453	0,76593	0,7707
5	0,246819	2,166E-18	1,32E-20	7,417E-19	0,86453	0,76593	0,7707
6	0,170654	6,745E-18	0,000005053	1,767E-16	0,86453	0,76594	0,7707

Le *Tableau II.11.* présente la participation des masses modales dans les vibrations libres du pont renforcé par chemisage. On n'atteint pas les 90% pour toutes les directions pour les six premiers modes.

Cette modification peut être expliquée par un exemple de structure de bâtiment : quand une tour a une base large donc rigide et lourde. Les modes de vibration de la tour dépendront des autres masses, en effet la masse à la base ne participe pas, vu qu'elle se déplacera peu.

Dans notre cas l'augmentation de poids des piles qui sont, elles aussi, à la base de la structure, les masses de tablier étant plus représentatives des vibrations.



Au point de chargement de la structure il ne faut pas oublier l'incidence du chemisage sur les fondations.

4.3. Résultats numériques après renforcement des piles par TFC

Les résultats dynamiques de l'effet du TFC, introduit comme décrit précédemment, sont :

Tableau II.12. Résultats pour pont OUMAZER aux piles renforcées par TFC

Mode	Période	Fréquence avant TFC	Fréquence après TFC	Augmentation
1	0,812508	1,0566	1,2308	16,49%
2	0,508431	1,7796	1,9668	10,52%
3	0,494628	1,8311	2,0217	10,41%
4	0,25521	3,8842	3,9183	0,88%
5	0,249128	3,9853	4,014	0,72%
6	0,172129	5,7985	5,8096	0,19%

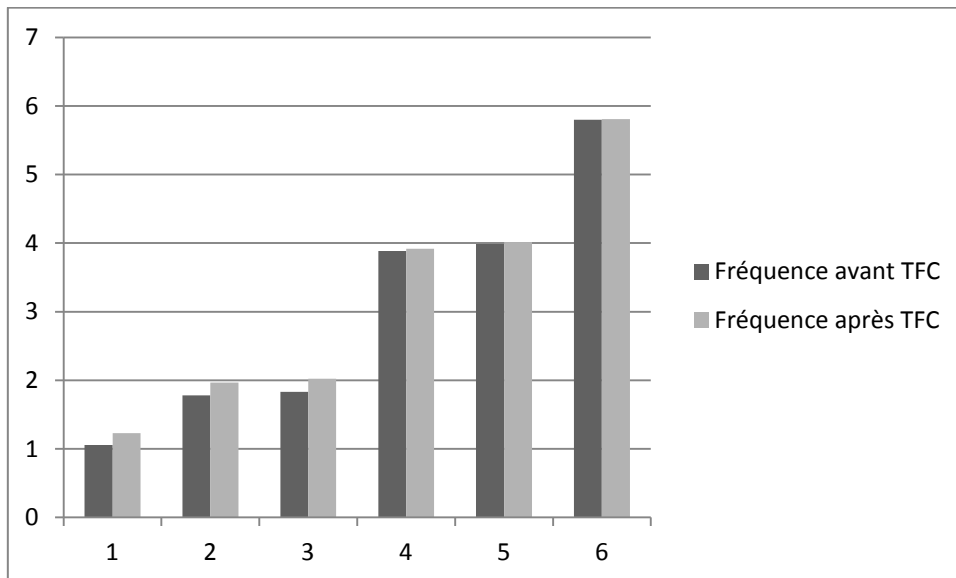


Figure II.16. Comparaison vibration pont avant et après renforcement par TFC

La légère augmentation relativement est due à l'introduction de du TFC non par éléments réel mais par modification de module d'élasticité du béton.

Tableau II.13. Participation de masse modale dans les modes de vibration

Mode	Période	UX	UY	RZ	SumUX	SumUY	SumRZ
1	0,812508	0,94789	0	0	0,94789	0	0
2	0,508431	0	5,88E-20	0,90988	0,94789	5,88E-20	0,90988
3	0,494628	0	0,90632	2,849E-20	0,94789	0,90632	0,90988
4	0,25521	9,291E-20	0,00086	0	0,94789	0,90719	0,90988
5	0,249128	7,536E-19	2,475E-20	1,373E-19	0,94789	0,90719	0,90988
6	0,172129	4,882E-19	0,00009302	9,826E-17	0,94789	0,90728	0,90988

On atteint les 90% réglementaires au bout du 3^{ème} mode de vibration, ceci est dû à la légèreté du tissu de fibre.

En effet la formule remarquable de dynamique des structures [27] :

$$\text{fréquence} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{K/M}$$

Elle montre qu'en collant le tissu de fibre de carbone, la masse ne change pas significativement et la rigidité augmente vu qu'elle est fonction du module d'élasticité. Ce qui fait que la fréquence augmente, comme montré précédemment sur ANSYS.

Or SAP2000, qui n'est pas adapté à un tel calcul donne des résultats nettement inférieurs aux résultats d'ANSYS.

Tableau II.14. Comparaison ANSYS/SAP2000 dans le cas de renforcement par TFC

Mode	SAP2000		Ansys		Écart
	avant TFC	après TFC	avant TFC	après TFC	
1	1,0566	1,2308	1,0576	3,5179	228,71%
2	1,7796	1,9668	2,8268	4,0302	206,34%
3	1,8311	2,0217	2,928	4,1964	217,47%
4	3,8842	3,9183	4,492	4,5453	62,70%
5	3,9853	4,014	5,6035	5,6928	167,88%
6	5,7985	5,8096	8,9139	9,0302	322,06%

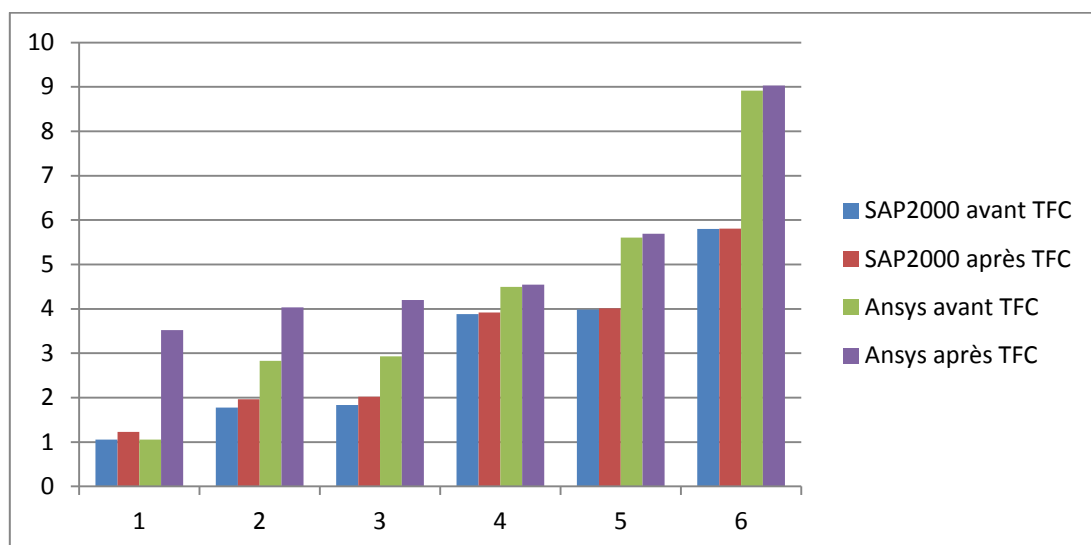


Figure II.17. Comparaison des résultats ANSYS/SAP2000 - renforcement TFC

Même si on représente graphiquement les six modes, on prend en considération les trois premiers modes prépondérants. On remarque que sur SAP2000 le modèle renforcé par TFC à une augmentation insignifiante par rapport au résultats (plus précis en maillage) d'ANSYS.

5. Récapitulatif

On peut retenir que le TFC et le chemisage contribue non seulement à réparer un ouvrage mais le renforcer à un niveau supérieur de ces capacités initiales.

ANSYS est très adapté à la modélisation numérique vu les avantages qu'il présente en discrétisation et les possibilités qu'il offre à travers sa large bibliothèque.

Une bonne modélisation sur SAP2000 avant renforcement est possible à condition de bien reproduire les détails de la structure et la mailler dans la limite du possible.

Les matériaux composites contribuent à la stabilité dynamique des ouvrages par leur grand module d'élasticité. Ils absorbent bien les chocs et les vibrations.

Vu que les résultats de l'analyse de vibration sont comparables une étude technico-économique peut trancher dans le choix de la technique à employer. Si le maître d'ouvrage ne souhaite pas couper la circulation – ce qui est le cas généralement – la meilleure solution est le montage de feuilles de TFC, qui a été prouvé applicable sur pont sous circulation. Les exemples ne manquent pas : pont blanc El Harrach zone saturés et vitale renforcé totalement par TFC, pont Tidjelabine ,après le séisme de Boumerdès 2003, qui a subi un éclatement de béton à la tête des piles, or, on ne pouvait se permettre de le fermer alors qu'on avait besoin d'acheminer les secours et les engins pour les démolitions durant l'été suivant.

D'autre part, l'utilisation des gaines convient particulièrement à la réparation des poteaux, des piles et des pieux détériorés. Cette technique consiste à reconstituer la section d'un élément en service (surtout celle d'un élément travaillant en compression) en le gainant de béton. Toutefois, l'intervention sur chantier nécessite un matériel lourd à manutentionner, un site convenable (placer échafaudages) et éventuellement une coupure de circulation avec attente du séchage/durcissement du béton.

Un matériel informatique plus puissant permettra d'avoir des résultats les plus près possible des résultats expérimentales. Il y a une bonne correspondance entre ANSYS et SAP2000 pour le pont en béton armé. Cependant, ANSYS est mieux adapté que SAP2000 à la précision de calcul (maillage fin) requise pour modéliser l'effet du renforcement par collage externe de composite.

De la comparaison des résultats du chemisage et collage de fibre, on constate que ce dernier présente – pour un renforcement équivalent – une souplesse structurelle qui est recherché en cas de séisme.

En raison de cette souplesse et le poids propre minime du renforcement TFC, on peut conclure qu'il est plus adapté aux sollicitations sismiques.

CHAPITRE III

ANALYSE SPECTRALE

Chapitre III

Analyse Spectrale

1. Introduction

Dans cette dernière partie afin d'examiner l'effet du confinement de piles de pont vis-à-vis du séisme, nous allons conduire une analyse spectrale sur le pont détérioré puis sur le pont renforcé par TFC.

Le spectre de réponse utilisé est déterminé selon le Règlement Parasismique Algérien des Ouvrages d'Art.

2. La méthode modale Spectrale

La méthode modale spectral est, sans doute, la méthode la plus fréquemment utilisée pour l'analyse sismique des structure, elle est caractérisée par :

- La définition du mouvement sismique imposé aux supports sous la forme d'un spectre de réponse de calcul ;
- L'hypothèse d'un comportement globalement linéaire de la structure, permettant l'utilisation des modes propres.

La bonne pratique de la méthode spectrale suppose :

- ✓ L'établissement d'une bonne modélisation ;
- ✓ Le choix judicieux des modes à retenir ;
- ✓ La connaissance des limites de validité des règles de combinaisons des modes et des composantes.

2.1. Nombre de modes à considérer

Le nombre de modes de vibration à considérer doit être (selon le RPA99) tel que :

- La somme des masses modales effectives pour les modes retenus soit au moins égale à 90% de la masse totale de la structure ;
- Ou que tous les modes retenus ont une masse modale effective supérieure à 5% de la masse totale ;
- Le minimum de modes à retenir est trois.

2.2. Spectre de réponse élastique

Le spectre de réponse élastique Sae (*Figure III.1*) constitue généralement la donnée de base pour le calcul sismique élastique. Pour chaque composante de la force sismique (horizontale ou verticale) est établi un spectre de réponse. Il permet de déterminer le déplacement maximal d'un oscillateur (de période T et de taux d'amortissement critique ξ) par rapport à sa base ainsi que l'effort maximal induit dans cet oscillateur F_{max} .

Dans notre cas le passage supérieur de Oued Oumazer est classé au groupe 2 selon le RPOA [33]. Et le sol est de type S2 [33] selon de bureau d'étude.

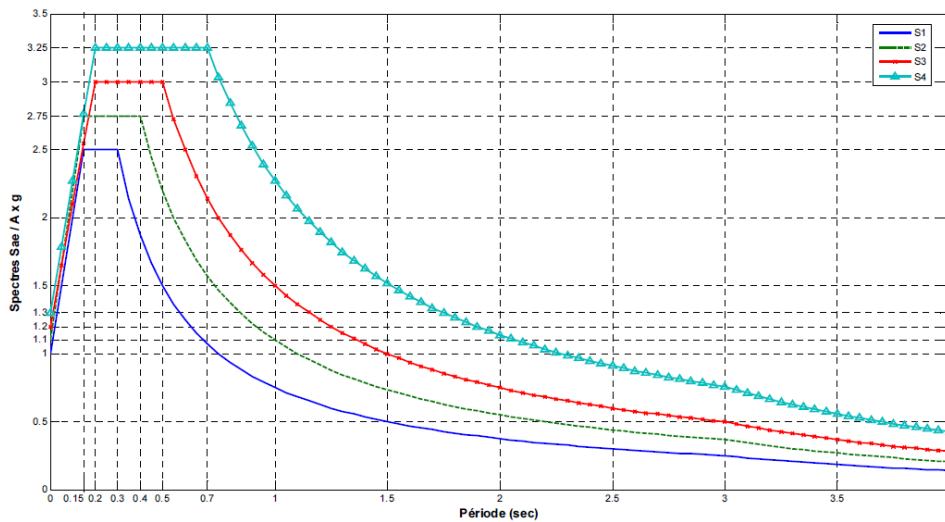


Figure III.1. Spectre de réponse élastique - Composante horizontale 5% d'amortissement [33]

Le spectre de réponse élastique (Sae) pour les deux composantes horizontales est donne en fonction de la période élastique T et du taux d'amortissement ξ de l'ouvrage par la formule :

$$Sae(T, \xi) \text{ (m/s}^2\text{)} = \begin{cases} AgS(1 + \frac{T}{T_1}(2.5\eta - 1)) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5\eta Ag S & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta Ag S \left(\frac{T_2}{T}\right) & T_2 \leq T \leq 3.0s \\ 2.5\eta Ag S \left(\frac{3T_2}{T^2}\right) & T \geq 3.0s \end{cases}$$

g : accélération de la pesanteur = 9,81m/s²

T₁, T₂ : périodes caractéristiques associées à la catégorie de site

S : coefficient de site

A : Coefficient d'accélération de zone [33]

η : facteur de correction de l'amortissement ($\eta = 7(2 + \xi)$)

ξ : taux d'amortissement

Nous prenons en considération de séisme dans le sens longitudinal et transversal. La zone sismique étant classé III le spectre de réponse est définie point par point dans l'annexe B. Voir son illustration à la Figure III.2.

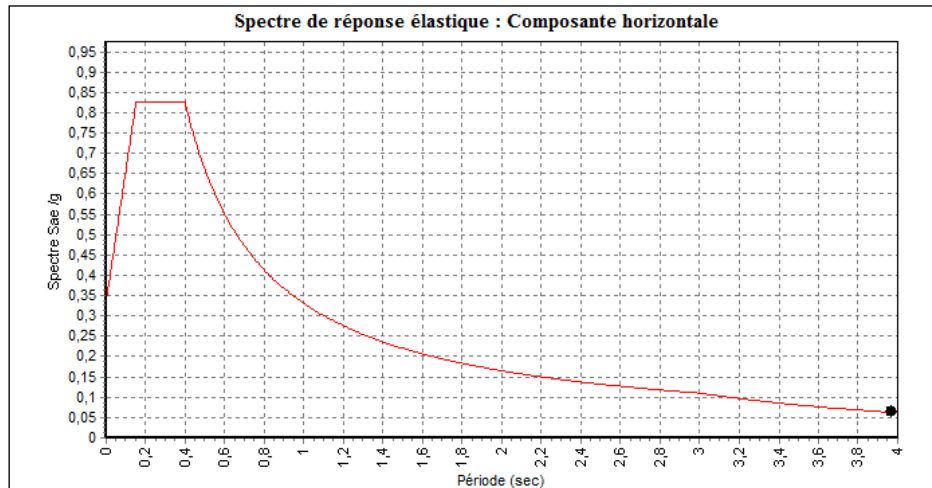


Figure III.2. Spectre de réponse des accélérations élastique

2.3. Résultats SAP2000

Nous modélisons le pont de Oued OUMAZER avec sa géométrie décrite à l'annexe A et introduisant le spectre de réponse élastique défini à l'annexe B. Avec une coefficient d'amortissement de 7% puisque la structure est en béton armé.

2.3.1. Avant renforcement

La structure est définie par deux éléments *frame* et *area*, l'un linéique à deux nœuds, l'autre surfacique à quatre nœuds.

Nous nous intéresseront au deux éléments séparément.

Pour frame :

Tableau III.1. Résultats éléments linéaires avant renforcement

Moment max kN.m	Effort normal max kN	Effort Tranchant max kN	Torsion max kN. m
1294,97	2953,45	759,67	105,92

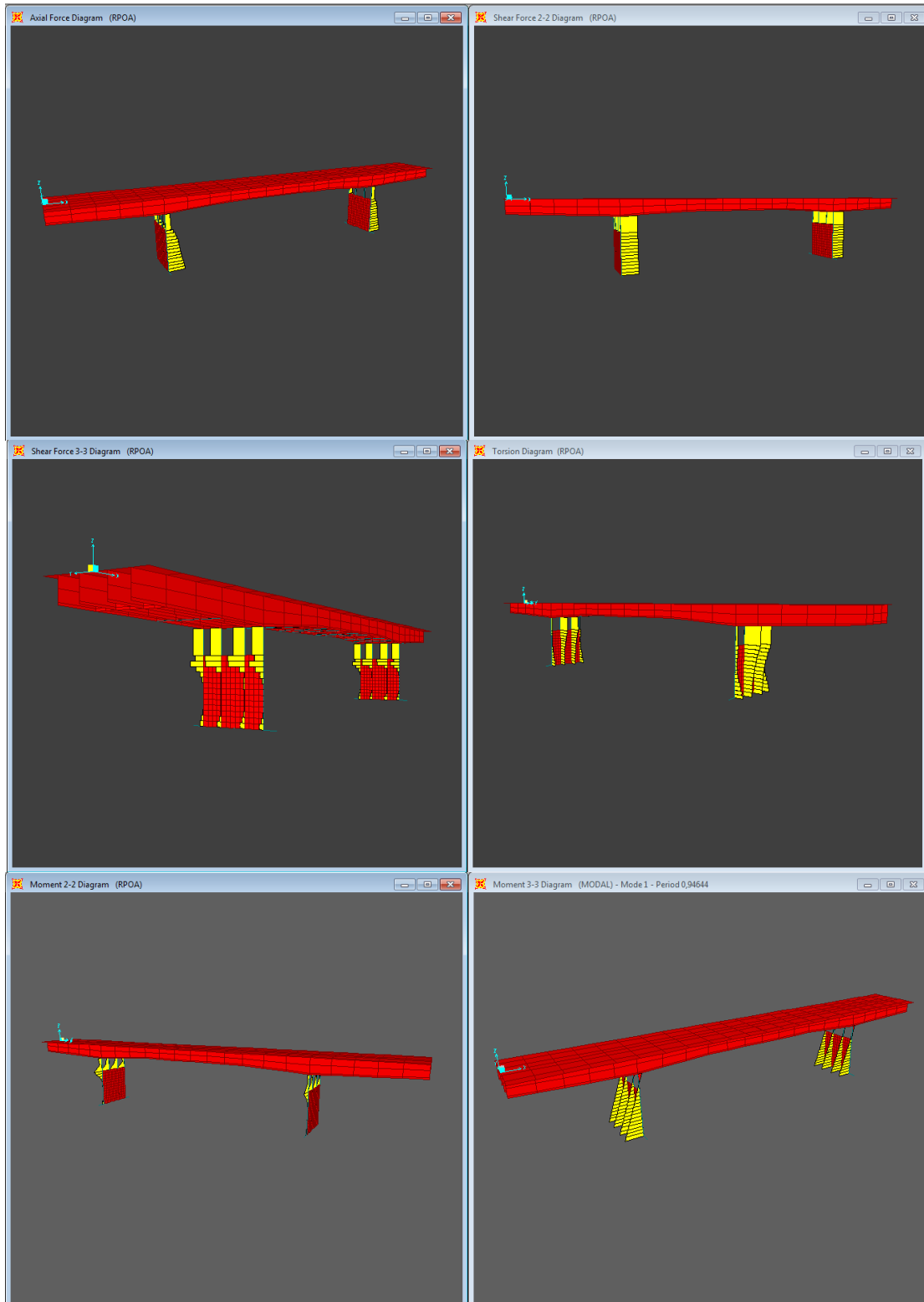


Figure III.3. Contraintes dans l'élément frame

Pour area :

Tableau III.2. Résultats éléments surfaciques avant renforcement

Moment max kN.m/m	Effort normal max kN/m	Effort Tranchant max kN/m
796,42	14819,73	615,26

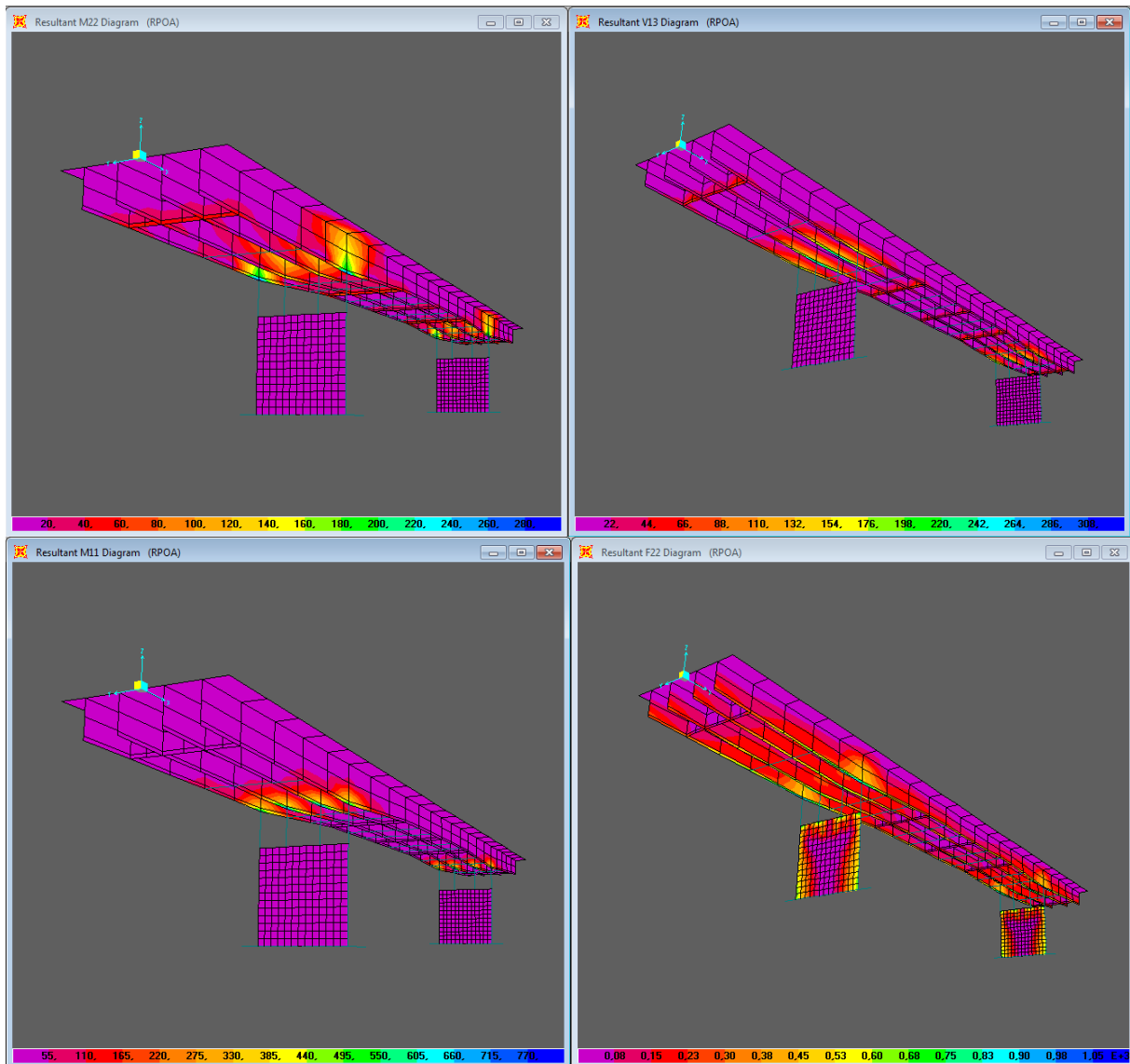


Figure III.4. Contraintes dans les éléments area

2.3.2. Après renforcement

Après renforcement des deux piles en TFC tel modélisé dans le paragraphe §4 du chapitre II on a les résultats :

Pour frame :

Tableau III.3. Résultats éléments linéiques après renforcement

Efforts	Efforts	Augmentation
Moment max kN.m	-1838,8	41,99%
Effort normal max kN	3174,24	6,95%
Effort Tranchant max kN	1025,27	34,96%
Torsion max kN.m	137,15	29,48%

Pour area :

Tableau III.4. Résultats éléments surfaciques après renforcement

Efforts	Efforts	Augmentation
Moment max kN.m	907,48	13,94%
Effort normal max kN	14978,89	1,07%
Effort Tranchant max kN	710,12	15,41%

On constate une hausse des contraintes au niveau des éléments *frame* et *area* suite au renforcement par TFC, naturellement la structure est plus rigide ce qui confirme les résultats de l'analyse modale du chapitre II.

2.4. Résultats ANSYS

Pour la modélisation en éléments solides qui a été plus adéquate. On a les résultats sont exprimé en N/m^2 :

Tableau III.5. Résultats avant renforcement

	Contrainte selon X	Contrainte selon Y	Contrainte selon Z	Cisaillement XY	Cisaillement YZ	Cisaillement XZ
Max	16353	9675	4447	6477	5331	5040
Min	0,063	0,109	0,063	0,086	0,106	$0,77^E-13$

La Figure III.5. représente le contour de l'état de contrainte du cisaillement selon XY.

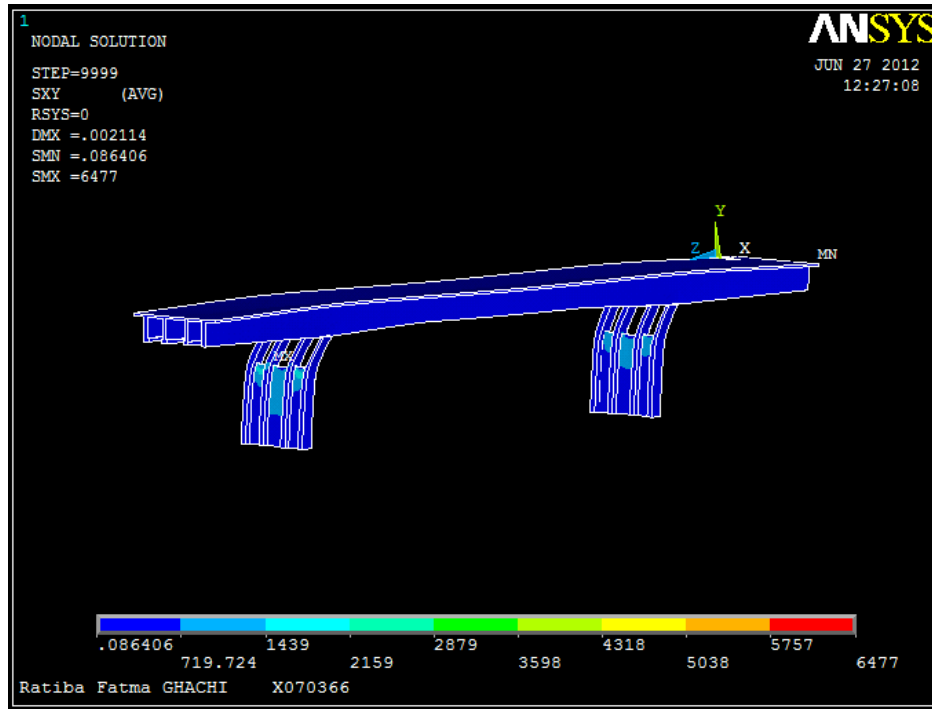


Figure III.5. Cisaillement selon XY

Le TFC travaille principalement autant qu’armature additionnelle il peut compenser le manque de frettage des piles de pont.

Le cisaillement est plus grand dans les raidisseurs entre les colonnes, il est donc intéressant de les renforcer tout autant que les colonnes.

Après renforcement on a les résultats en valeur absolue :

Tableau III.6. Résultats après renforcement

	Contrainte selon X	Contrainte selon Y	Contrainte selon Z	Cisaillement XY	Cisaillement YZ	Cisaillement XZ
Max	156820	63726	108721	147227	90639	327248
Augmentation	89,57%	84,81%	95,9%	95,6%	94,11%	98,45%

3. Conclusion

Le renforcement d’une structure rigidifie la structure donc les contraintes augmentent. Nous avons étudié dans ce chapitre la variation des effort induite par un séisme introduit pas le spectre de réponse du règlement parasismique algérien des ouvrages d’art.

Il est important de vérifier l’adaptation de la structure puisque son état de contrainte change.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS

Conclusion générale

Le renforcement est une opération destinée à rendre l'ouvrage capable de résister à des charges d'intensité supérieure à celles prévues à l'origine.

Dans le cas de la réhabilitation, le processus de l'introduction des matériaux composites à base de fibres de carbone a été accéléré par la mise au point de méthodes techniquement fiables et compétitives comparativement aux anciens procédés de renforcements à base d'acier.

Si le but principal recherché est la protection des ouvrages d'art du risque de destruction lors d'un tremblement de terre, ce type de renforcement a aussi l'avantage d'être pratiquement insensible à la corrosion et durable.

La recherche des applications des fibres de carbone ne fait que commencer. Les résultats obtenus et les expérimentations en grandeur réelle de ces très grandes structures auront sûrement des synergies avec les applications dans le domaine des travaux publics.

Dans notre étude, nous avons conduit une analyse numérique, sur le pont de Oued OUMAZER, selon deux solutions de renforcement : chemisage et confinement TFC des piles.

L'analyse dynamique a été faite à l'aide de deux logiciels de calcul, basés sur la théorie des éléments finis. ANSYS et SAP2000 – les deux logiciels utilisés – présentent des différences du point de vue de la modélisation et introduction des propriétés des matériaux.

Une corrélation appréciable entre les résultats des deux logiciels a été observé dans le cas du pont avant renforcement. L'écart commence à être observé lors de l'introduction des éléments de renforcement.

Une analyse spectrale a aussi été conduite en tenant compte du spectre de réponse du règlement parasismique algérien.

Les points suivants peuvent être dégagés des analyses accomplies :

- Des gains de rigidité sont observés suite au renforcement par matériau composite à base de fibre de carbone.
- Les matériaux composites contribuent à la stabilité dynamique des ouvrages par leur grand module d'élasticité.
- La non adaptation du SAP2000 à la modélisation de la fibre de carbone est due principalement au faible maillage. ANSYS est adapté à la modélisation numérique vu les avantages qu'il présente en discrétisation et les possibilités qu'il offre à travers sa large bibliothèque.
- Les matériaux composites absorbent bien les chocs et les vibrations auxquels sont soumis les ponts comme les séismes et les charges mobiles.

- Une étude technico-économique peut trancher entre la technique du chemisage et celle du collage de tissu de fibre de carbone vu leur impact plus ou moins proche. Pour une mise en place sans couper la circulation par exemple le collage de tissu est une solution plus adaptée.
- La technique de collage TFC présente une meilleure souplesse structurelle par rapport au chemisage en béton armé. En raison de cette souplesse et le poids propre inférieur du renforcement TFC, on peut conclure qu'il est plus adapté aux sollicitations sismiques.
- Lors du renforcement d'une structure son état de contrainte change à la hausse par rapport à toute les sollicitations.

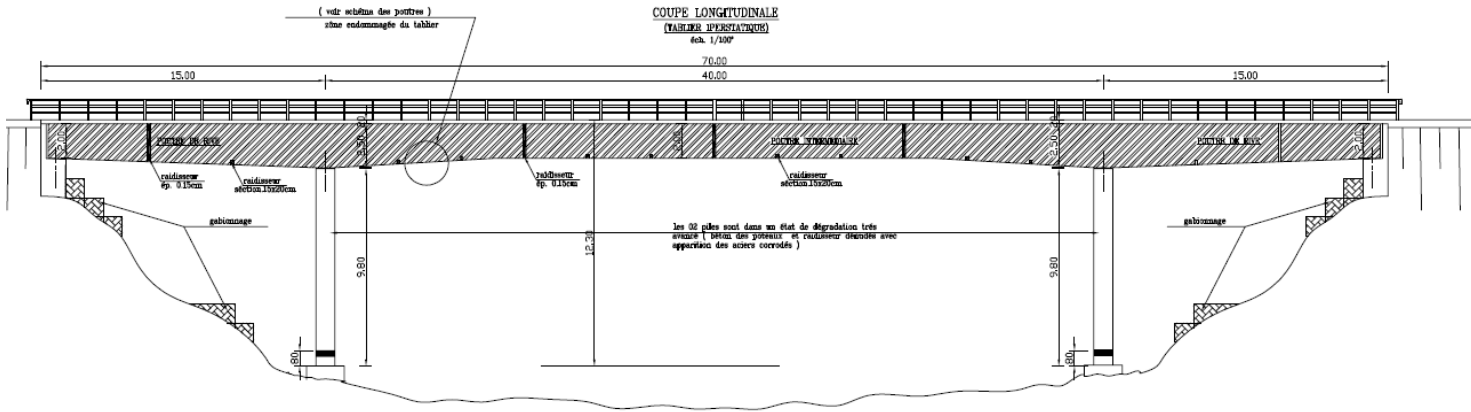
On peut recommander au terme de cette étude :

- Il est possible d'accompagner un ouvrage de sa naissance dans une modélisation numérique adéquate qui change et évolue avec lui pour pouvoir prédire son comportement.
- L'étude plus approfondie de l'interface béton/TFC peut être envisagé.
- L'étude technico-économique concernant le collage de TFC par rapport aux autres techniques de renforcement traditionnel est à développer.
- L'application de l'intelligence artificielle par réseaux de neurones peut être envisagée pour mettre en point une formulation générale du problème.
- Il est possible de constituer une base de données en analysant les ouvrages anciens dynamiquement par des essais non destructifs et une modélisation numérique.
- D'autres modélisations accompagnées par des modèles numériques pour l'application de TFC aux dalles aux nœuds de béton et à la maçonnerie.

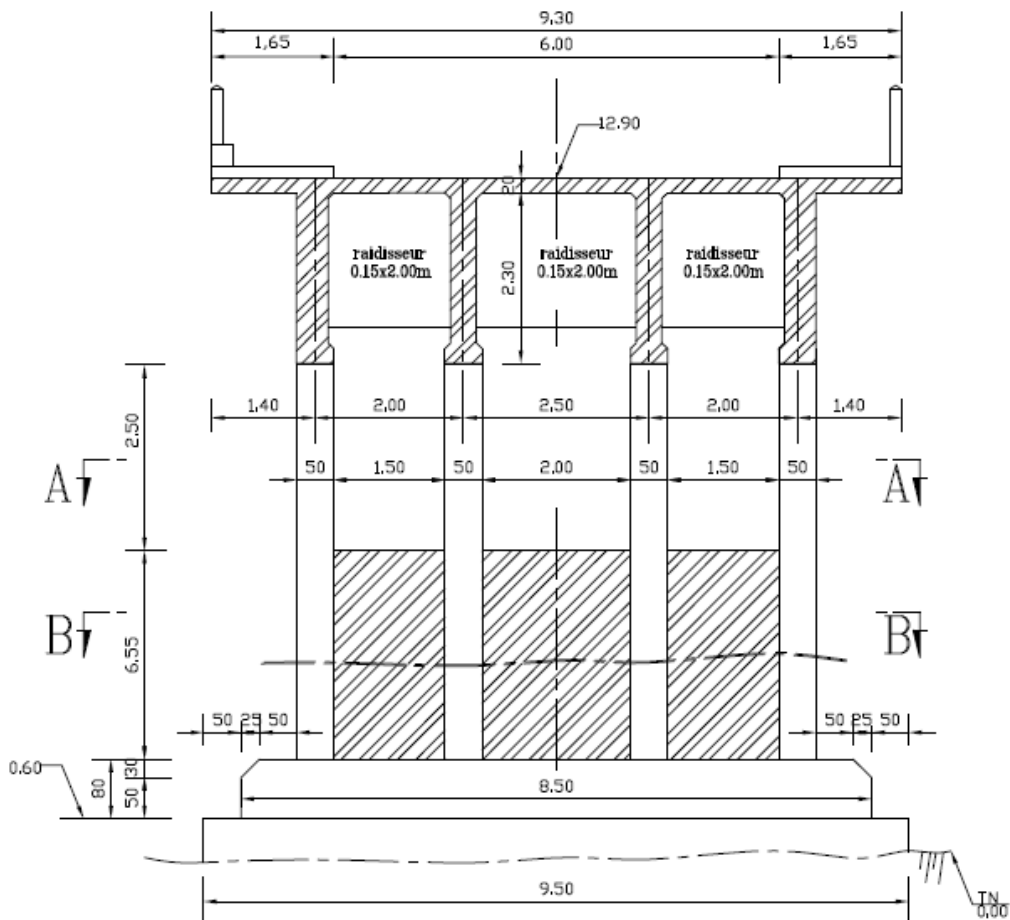
ANNEXE A
PLANS PONT OUMAZER

Annexe A

Plans pont Oued Oumazer



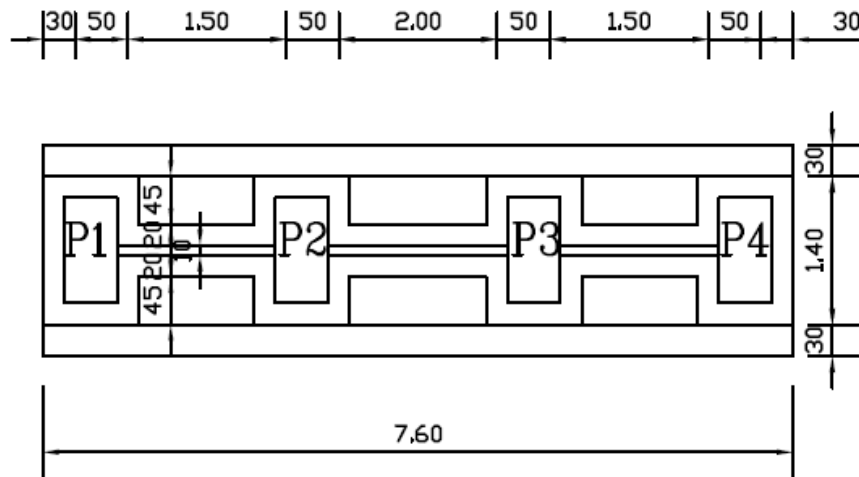
COUPE TRANSVERSALE
SUR APPUI (PILE)
éch. 1/50°



Chemisage armé

COUPE B B

éch. 1/50°



Indice	Date	Modifications			Par
A	SEPT.2005	Modifications selon CTP.			E.K.H.
déssiné par		Ingénieur	Vérifié par	Echelle	Date
El kechbour		M. RAMRANI		1.50°	29/3/2005
<p>E P E - S A P T A</p> <p>المؤسسة العمومية الإقتصادية سابل</p> <p>SAPTA UNITE REALISATION</p> <p>Z.I Rue Mansourah Bd 70 EL- HARRACH - ALGER</p>					

ANNEXE B
SPECTRE DE RÉPONSE

Annexe B

Spectre de réponse élastique composante horizontale

Période (s)	Spectre Sae /g	Période (s)	Spectre Sae /g
0,00	0,33000000	2,01	0,14479236
0,01	0,35650544	2,02	0,14407557
0,02	0,38301088	2,03	0,14336583
0,03	0,40951632	2,04	0,14266306
0,04	0,43602176	2,05	0,14196714
0,05	0,46252720	2,06	0,14127798
0,06	0,48903264	2,07	0,14059548
0,07	0,51553808	2,08	0,13991954
0,08	0,54204353	2,09	0,13925007
0,09	0,56854897	2,10	0,13858697
0,10	0,59505441	2,11	0,13793016
0,11	0,62155985	2,12	0,13727955
0,12	0,64806529	2,13	0,13663504
0,13	0,67457073	2,14	0,13599656
0,14	0,70107617	2,15	0,13536402
0,15	0,72758161	2,16	0,13473734
0,16	0,72758161	2,17	0,13411643
0,17	0,72758161	2,18	0,13350121
0,18	0,72758161	2,19	0,13289162
0,19	0,72758161	2,20	0,13228757
0,20	0,72758161	2,21	0,13168898
0,21	0,72758161	2,22	0,13109579
0,22	0,72758161	2,23	0,13050791
0,23	0,72758161	2,24	0,12992529
0,24	0,72758161	2,25	0,12934784
0,25	0,72758161	2,26	0,12877551
0,26	0,72758161	2,27	0,12820821
0,27	0,72758161	2,28	0,12764590
0,28	0,72758161	2,29	0,12708849
0,29	0,72758161	2,30	0,12653593
0,30	0,72758161	2,31	0,12598816
0,31	0,72758161	2,32	0,12544511
0,32	0,72758161	2,33	0,12490671
0,33	0,72758161	2,34	0,12437292
0,34	0,72758161	2,35	0,12384368
0,35	0,72758161	2,36	0,12331892
0,36	0,72758161	2,37	0,12279858
0,37	0,72758161	2,38	0,12228262
0,38	0,72758161	2,39	0,12177098

Annexe B

0,39	0,72758161	2,40	0,12126360
0,40	0,72758161	2,41	0,12076043
0,41	0,70983572	2,42	0,12026142
0,42	0,69293487	2,43	0,11976652
0,43	0,67682010	2,44	0,11927567
0,44	0,66143783	2,45	0,11878883
0,45	0,64673921	2,46	0,11830595
0,46	0,63267966	2,47	0,11782698
0,47	0,61921839	2,48	0,11735187
0,48	0,60631801	2,49	0,11688058
0,49	0,59394417	2,50	0,11641306
0,50	0,58206529	2,51	0,11594926
0,51	0,57065224	2,52	0,11548914
0,52	0,55967816	2,53	0,11503267
0,53	0,54911820	2,54	0,11457978
0,54	0,53894934	2,55	0,11413045
0,55	0,52915026	2,56	0,11368463
0,56	0,51970115	2,57	0,11324227
0,57	0,51058359	2,58	0,11280335
0,58	0,50178042	2,59	0,11236782
0,59	0,49327567	2,60	0,11193563
0,60	0,48505441	2,61	0,11150676
0,61	0,47710270	2,62	0,11108116
0,62	0,46940749	2,63	0,11065880
0,63	0,46195658	2,64	0,11023964
0,64	0,45473851	2,65	0,10982364
0,65	0,44774253	2,66	0,10941077
0,66	0,44095855	2,67	0,10900099
0,67	0,43437708	2,68	0,10859427
0,68	0,42798918	2,69	0,10819057
0,69	0,42178644	2,70	0,10778987
0,70	0,41576092	2,71	0,10739212
0,71	0,40990513	2,72	0,10699730
0,72	0,40421201	2,73	0,10660536
0,73	0,39867486	2,74	0,10621629
0,74	0,39328736	2,75	0,10583005
0,75	0,38804353	2,76	0,10544661
0,76	0,38293769	2,77	0,10506594
0,77	0,37796447	2,78	0,10468800
0,78	0,37311877	2,79	0,10431278
0,79	0,36839575	2,80	0,10394023
0,80	0,36379081	2,81	0,10357034
0,81	0,35929956	2,82	0,10320307
0,82	0,35491786	2,83	0,10283839
0,83	0,35064174	2,84	0,10247628
0,84	0,34646743	2,85	0,10211672
0,85	0,34239135	2,86	0,10175967
0,86	0,33841005	2,87	0,10140510
0,87	0,33452028	2,88	0,10105300

Annexe B

0,88	0,33071891	2,89	0,10070334
0,89	0,32700297	2,90	0,10035608
0,90	0,32336960	2,91	0,10001122
0,91	0,31981609	2,92	0,09966871
0,92	0,31633983	2,93	0,09932855
0,93	0,31293833	2,94	0,09899070
0,94	0,30960920	2,95	0,09865513
0,95	0,30635015	2,96	0,09832184
0,96	0,30315900	2,97	0,09799079
0,97	0,30003365	2,98	0,09766196
0,98	0,29697209	2,99	0,09733533
0,99	0,29397237	3,00	0,09701088
1,00	0,29103264	3,01	0,09636736
1,01	0,28815113	3,02	0,09573022
1,02	0,28532612	3,03	0,09509938
1,03	0,28255597	3,04	0,09447476
1,04	0,27983908	3,05	0,09385627
1,05	0,27717395	3,06	0,09324383
1,06	0,27455910	3,07	0,09263737
1,07	0,27199313	3,08	0,09203680
1,08	0,26947467	3,09	0,09144206
1,09	0,26700243	3,10	0,09085306
1,10	0,26457513	3,11	0,09026974
1,11	0,26219157	3,12	0,08969201
1,12	0,25985058	3,13	0,08911982
1,13	0,25755101	3,14	0,08855308
1,14	0,25529179	3,15	0,08799173
1,15	0,25307186	3,16	0,08743570
1,16	0,25089021	3,17	0,08688493
1,17	0,24874585	3,18	0,08633934
1,18	0,24663783	3,19	0,08579888
1,19	0,24456525	3,20	0,08526347
1,20	0,24252720	3,21	0,08473306
1,21	0,24052285	3,22	0,08420759
1,22	0,23855135	3,23	0,08368698
1,23	0,23661191	3,24	0,08317119
1,24	0,23470375	3,25	0,08266016
1,25	0,23282612	3,26	0,08215382
1,26	0,23097829	3,27	0,08165212
1,27	0,22915956	3,28	0,08115500
1,28	0,22736925	3,29	0,08066240
1,29	0,22560670	3,30	0,08017428
1,30	0,22387126	3,31	0,07969058
1,31	0,22216232	3,32	0,07921124
1,32	0,22047928	3,33	0,07873621
1,33	0,21882154	3,34	0,07826544
1,34	0,21718854	3,35	0,07779888
1,35	0,21557974	3,36	0,07733648
1,36	0,21399459	3,37	0,07687819

Annexe B

1,37	0,21243259	3,38	0,07642396
1,38	0,21089322	3,39	0,07597375
1,39	0,20937600	3,40	0,07552750
1,40	0,20788046	3,41	0,07508518
1,41	0,20640613	3,42	0,07464672
1,42	0,20495257	3,43	0,07421210
1,43	0,20351933	3,44	0,07378126
1,44	0,20210600	3,45	0,07335416
1,45	0,20071217	3,46	0,07293076
1,46	0,19933743	3,47	0,07251102
1,47	0,19798139	3,48	0,07209489
1,48	0,19664368	3,49	0,07168233
1,49	0,19532392	3,50	0,07127330
1,50	0,19402176	3,51	0,07086776
1,51	0,19273685	3,52	0,07046568
1,52	0,19146884	3,53	0,07006700
1,53	0,19021741	3,54	0,06967170
1,54	0,18898224	3,55	0,06927974
1,55	0,18776300	3,56	0,06889108
1,56	0,18655939	3,57	0,06850567
1,57	0,18537111	3,58	0,06812349
1,58	0,18419788	3,59	0,06774450
1,59	0,18303940	3,60	0,06736867
1,60	0,18189540	3,61	0,06699595
1,61	0,18076562	3,62	0,06662632
1,62	0,17964978	3,63	0,06625974
1,63	0,17854763	3,64	0,06589617
1,64	0,17745893	3,65	0,06553559
1,65	0,17638342	3,66	0,06517796
1,66	0,17532087	3,67	0,06482325
1,67	0,17427104	3,68	0,06447143
1,68	0,17323372	3,69	0,06412247
1,69	0,17220867	3,70	0,06377633
1,70	0,17119567	3,71	0,06343298
1,71	0,17019453	3,72	0,06309240
1,72	0,16920503	3,73	0,06275456
1,73	0,16822696	3,74	0,06241942
1,74	0,16726014	3,75	0,06208696
1,75	0,16630437	3,76	0,06175715
1,76	0,16535946	3,77	0,06142996
1,77	0,16442522	3,78	0,06110537
1,78	0,16350149	3,79	0,06078334
1,79	0,16258807	3,80	0,06046385
1,80	0,16168480	3,81	0,06014687
1,81	0,16079152	3,82	0,05983237
1,82	0,15990805	3,83	0,05952034
1,83	0,15903423	3,84	0,05921074
1,84	0,15816992	3,85	0,05890355
1,85	0,15731494	3,86	0,05859875

Annexe B

1,86	0,15646916	3,87	0,05829631
1,87	0,15563243	3,88	0,05799620
1,88	0,15480460	3,89	0,05769840
1,89	0,15398553	3,90	0,05740289
1,90	0,15317508	3,91	0,05710964
1,91	0,15237311	3,92	0,05681864
1,92	0,15157950	3,93	0,05652985
1,93	0,15079412	3,94	0,05624326
1,94	0,15001683	3,95	0,05595885
1,95	0,14924751	3,96	0,05567658
1,96	0,14848604	3,97	0,05539645
1,97	0,14773231	3,98	0,05511843
1,98	0,14698618	3,99	0,05484249
1,99	0,14624756	4,00	0,05456862
2,00	0,14551632		

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Ministère des travaux publics, Recensements des ouvrages d'art en Algérie, Alger, 2008.
- [2] M. SIDNEY, Dégradation, entretien et réparation des ouvrages, éditions Eyrolles, Paris, 1969.
- [3] P. HAMELIN, Renforcement des ouvrages d'art par matériaux composites, [AM 5 615] Traité Plastiques et Composites, Éditions Techniques de l'Ingénieur 2002.
- [4] S. BENYAMINA, Comportement d'un tablier de pont à poutres multiples sous chaussée en béton armé réparé par matériaux composites, thèse de magister, université de Blida, Avril 2008.
- [5] C.G.S, Catalogue des méthodes de réparation et de renforcement des ouvrages, Alger-2^{ème} Semestre 1992.
- [6] D. POINEAU et J A. CALGARO, Projet de renforcement ou de réparation d'un pont, Technique de l'ingénieur 1999.
- [7] C.G.S, Catalogue des méthodes de réparation et de renforcement des ouvrages, Alger-2^{ème} Semestre 1992.
- [8] F. AL MAHMOUD, Technologie de renforcement des poutres en béton armé par l'insertion de joncs de carbone, l'Institut National des Sciences Appliquées de TOULOUSE, 2007.
- [9] M. ABDESSEMED, Étude expérimentale et modélisation du comportement des poutres en béton armé renforcées par des matériaux composites sous flexion cas des ponts, thèse de doctorat, École Polytechnique, Juin 2011.
- [10] L. ADDELSON, Les défauts de la construction, prévention, diagnostic et remède de principales pathologies de la construction, Bruxelles, 1993.
- [11] A.AIDOUD, A.BENOUIS, Pathologie des Constructions : Du Diagnostic à la Réparation, Influence du taux de chargement pour les poutres réparées en flexion, Colloque National Pathologie des Constructions, Département de Génie Civil Université Mentouri Constantine - 25 et 26 Novembre 2008.
- [12] MITSUBISHI chemical corporation replark, Design guidelines of FRP for concrete structures. Japanese standard association, 1986.
- [13] M. REYNE, Technologie des composite , Edition Hermès, 1995.
- [14] HOLLAWAY L.C., LEEMING M.B., Strengthening of reinforced concrete structures, using externally bonded FRP composites in structural and civil engineering, Woodhead Publishing Limited, Cambridge England, First published 1999, reprinted 2001.
- [15] Structure rénovation/DEC , Unité de réalisation, SAPTA, Expertise et réparation des ouvrages d'art en béton, El Harrach, 2009.

- [16] REFHORM, Étude des spécificités des bétons de la première moitié du 20^{ème} siècle et leur adaptabilité aux nouvelles technologies de renforts composites, rapport final, Septembre 2009.
- [17] J. ROBBERT, Identification des modèles structuraux en dynamique non linéaire, thèse de doctorat, Toulouse, France 2005.
- [18] D. KACHLAKEV, T. MILLER, Finite element modeling of reinforced concrete structures strengthened with FRP laminates, 2001.
- [19] R. BENZAID, N-E CHIKH, H. MESBAH, Behaviour of square concrete column confined with GFRP composite wrap, 2008.
- [20] R. MASMOUDI, H. MOHAMED, Comportement axial de colonnes en béton armé et confinées à l'aide de tubes en matériaux composites, 2008.
- [21] G. P. LIGNOLA, A. PROTA, G. MANFREDI, E. COSENZA, Unified theory for confinement of RC solid and hollow circular columns, 2008.
- [22] T. W. PARK, U. J. NA, L. CHUNG, M. Q. FENG, Compressive behavior of concrete cylinders confined by narrow strips of CFRP with spacing, 2008.
- [23] G. LI, S. KIDANE, S-S. PANG, J.E. HELMS, M.A. STUBBLEFIELD, Investigation into repaired RC columns , Composite Structures, Vol. 62, 2003.
- [24] H. TOUTANJI, Stress-strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composite sheets, ACI Mater J 1999.
- [26] A. ATTIA, Analyse numérique des poutres en béton sous flexion avant et après renforcement par CFRP, ENP 2009.
- [27] R-W. CLOUGH, J. PENZIEN, Dynamique des structures, Edition Pluralis 1975.
- [28] Rapport d'expertise, Réparation d'un pont sur Oued Oumazer sur CW 109 au pk 15+970, SAPTA, 2005.
- [29] A. GUETTALA, S. BENMEBAREK, Diagnostic et réparation d'un pont en béton armé, 2^{ème} Conférence spécialisée en génie des matériaux de la Société canadienne de génie civil, Montréal, Québec, Canada, 5-8 juin 2002.
- [30] J. BARON, J. P. OLLIVIER, Les béton bases et données pour leur formulation, Edition Eyrolles, France, 1997.
- [31] M. TOUHARI, Influence du renforcement par matériaux composites de fibres de carbone sur le comportement d'un pont à poutres en béton, ENP 2010.
- [32] R. F. GHACHI, Analyse numérique du renforcement des piles de pont par matériaux composites, Juin 2012.
- [33] Règles parasismiques applicables au domaine des ouvrages d'art R.P.O.A 2008. Ministère des Travaux Publics.