



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE « ABBES LAGHROUR » DE KHENCHELA
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL
Département de Génie Civil



N° de série :

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)

Spécialité : Travaux publics

Option : Voies et Ouvrages d'Art

Réhabilitation sismique des ouvrages d'art

Réalisé par :
SLAMA Faïsal

Dirigé par :
Dr. BADLA Oualid

Membres de jury :

- M. TOUAM Lakhmissi	Président
- Mme. SEKKIOU Soumia	Examineur

Présenté le : 18 /06/2026

Remerciements

Au terme de ce travail, il m'est particulièrement agréable d'exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Je tiens à adresser mes plus vifs remerciements à mon encadreur, **Monsieur BADLA OUALID**, pour sa disponibilité, sa patience, ses précieux conseils ainsi que la confiance qu'il m'a accordée tout au long de ce travail. Son accompagnement, sa rigueur scientifique et la qualité de ses orientations ont été d'une aide inestimable et ont grandement contribué à l'aboutissement de cette étude.

J'exprime également ma profonde reconnaissance à l'ensemble des **enseignants du Département de Génie Civil**, qui ont assuré notre formation avec dévouement, compétence et professionnalisme. Grâce à leur savoir, à leurs encouragements et aux valeurs qu'ils nous ont transmises, nous avons pu acquérir les connaissances et les compétences nécessaires à notre parcours universitaire.

Mes sincères remerciements s'adressent aussi à tous ceux qui m'ont soutenu, conseillé et encouragé durant les différentes étapes de ce travail. Leur présence, leur aide et leurs paroles réconfortantes ont constitué une véritable source de motivation.

Enfin, je tiens à exprimer toute ma gratitude à ma famille et à mes proches pour leur soutien indéfectible, leur patience et leurs sacrifices. Leur confiance et leurs encouragements ont été essentiels pour mener ce projet à son terme.

À toutes ces personnes, je présente mes plus sincères remerciements et leur témoigne ma profonde reconnaissance.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail,

À mes très chers **parents**, en témoignage de mon profond amour, de ma reconnaissance et de mon immense gratitude pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis afin de m'offrir les meilleures conditions de réussite. Que Allah les protège et leur accorde santé, bonheur et longue vie.

À mon **épouse**, pour sa patience, son soutien indéfectible et ses encouragements tout au long de ce parcours.

À mes chers enfants, **MOHAMED AMINE, ABDELMOUINE et DJAD**, qui illuminent ma vie et constituent ma plus grande fierté. Puisse ce travail être pour eux un exemple de persévérance et de détermination.

À mon cher **frère SOUFIANE**, pour son affection, son soutien et ses encouragements constants.

Au petit **ANES**, avec toute mon affection, en lui souhaitant un avenir rempli de réussite et de joie

Enfin, à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce travail et m'ont apporté leur aide et leur soutien.

Je dédie ce mémoire avec respect, affection et gratitude.

I. Résumé

La sécurité des ouvrages d'art soumis au risque sismique représente un défi majeur pour la préservation et la continuité des réseaux de transport. Ce mémoire porte sur la réhabilitation sismique des ponts, en s'intéressant particulièrement à l'évaluation de la vulnérabilité des piles en béton armé et à l'efficacité des techniques de renforcement destinées à améliorer leur comportement sous l'action des séismes.

Une synthèse bibliographique a d'abord été réalisée afin de présenter les notions relatives au comportement sismique des ponts, d'identifier les mécanismes d'endommagement les plus fréquemment observés et d'examiner les différentes méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique des ouvrages existants. Les principales techniques de réhabilitation ont également été analysées, avec une attention particulière portée au confinement par matériaux composites à polymères renforcés de fibres (PFR), en raison de leurs propriétés mécaniques avantageuses et de leur facilité de mise en œuvre.

L'étude appliquée repose sur la modélisation numérique d'une pile de pont en béton armé à l'aide du logiciel SAP2000. Le comportement de la pile a été étudié dans son état initial puis après renforcement par chemisage en PFR, sous les mêmes sollicitations sismiques. Une analyse comparative a été menée à partir de plusieurs indicateurs de performance structurale afin d'évaluer l'influence du renforcement sur la réponse de l'élément étudié..

Enfin, cette étude met en évidence l'intérêt des outils de simulation numérique dans l'aide à la décision et confirme le potentiel des matériaux composites PFR comme solution de renforcement des ouvrages d'art existants exposés au risque sismique.

Mots-clés : réhabilitation sismique ; séisme ; ponts ; vulnérabilité sismique ; renforcement ; chemisage ; piles ; fondations ; appareils d'appui ; matériaux composites PFR ; SAP2000 ; analyse pushover ; performance structurale.

II. ملخص

تمثل سلامة المنشآت الفنية المعرضة للخطر الزلزالي تحدياً كبيراً لضمان الحفاظ على استمرارية شبكات النقل. يركز هذا البحث على إعادة التأهيل الزلزالي للجسور، مع اهتمام خاص بتقييم قابلية تأثر ركائز الجسور الخرسانية المسلحة، ودراسة فعالية تقنيات التدعيم الهادفة إلى تحسين سلوكها تحت تأثير الزلازل.

تم في البداية إجراء مراجعة أدبية من أجل عرض المفاهيم المتعلقة بالسلوك الزلزالي للجسور، وتحديد آليات الضرر الأكثر شيوعاً، ودراسة مختلف طرق تقييم الهشاشة الزلزالية للمنشآت القائمة. كما تم تحليل أهم تقنيات إعادة التأهيل، مع التركيز بشكل خاص على تقنية التغليف بالمواد المركبة المدعمة بالألياف البوليمرية (FRP) نظراً لخصائصها الميكانيكية المتميزة وسهولة تنفيذها.

يعتمد الجانب التطبيقي من هذه الدراسة على النمذجة العددية لركيزة جسر من الخرسانة المسلحة باستخدام برنامج SAP2000. تم تحليل سلوك الركيزة في حالتها الأصلية ثم بعد تدعيمها بالتغليف باستخدام مواد FRP، تحت نفس الأحمال الزلزالية. وقد تم إجراء مقارنة اعتماداً على عدة مؤشرات للأداء الإنشائي بهدف تقييم تأثير التدعيم على استجابة العنصر المدروس.

وأخيراً، تؤكد هذه الدراسة أهمية أدوات المحاكاة العددية في دعم اتخاذ القرار، وتثبت الإمكانيات الكبيرة للمواد المركبة FRP كحل فعال لتدعيم المنشآت الجسرية القائمة المعرضة للخطر الزلزالي.

الكلمات المفتاحية: إعادة التأهيل الزلزالي؛ الزلازل؛ الجسور؛ الهشاشة الزلزالية؛ التدعيم؛ التغليف؛ الركائز؛ الأساسات؛ أجهزة الإسناد؛ المواد المركبة FRP؛ SAP2000؛ تحليل الدفع التدريجي؛ الأداء الإنشائي.

III. Abstract

The safety of bridge structures subjected to seismic risk represents a major challenge for the preservation and continuity of transportation networks. This dissertation focuses on the seismic rehabilitation of bridges, with particular attention given to the assessment of the vulnerability of reinforced concrete piers and the effectiveness of strengthening techniques aimed at improving their behavior under earthquake loading.

A literature review was first conducted in order to present the concepts related to the seismic behavior of bridges, identify the most frequently observed damage mechanisms, and examine the different methods used to assess the seismic vulnerability of existing structures. The main rehabilitation techniques were also analyzed, with special emphasis on Fiber Reinforced Polymer (FRP) confinement, due to its advantageous mechanical properties and ease of application.

The applied study is based on the numerical modeling of a reinforced concrete bridge pier using SAP2000 software. The behavior of the pier was studied in its initial state and then after strengthening through FRP jacketing, under the same seismic loading conditions. A comparative analysis was carried out using several structural performance indicators in order to evaluate the influence of strengthening on the response of the studied element.

Finally, this study highlights the importance of numerical simulation tools in decision-making support and confirms the potential of FRP composite materials as a strengthening solution for existing bridge structures exposed to seismic risk.

Keywords: seismic rehabilitation; earthquake; bridges; seismic vulnerability; strengthening; jacketing; piers; foundations; bearings; FRP composite materials; SAP2000; pushover analysis; structural performance.

Liste des tableaux

N° du tableau	Intitulé du tableau	Page
Tableau 2.1	Comparaison des méthodes d'inspection des ouvrages d'art.	36
Tableau 2.2	Critères de décision pour le renforcement.	37
Tableau 3.1	Les modules d'élasticité et coefficient de poisson des fibres	47
Tableau 4.1	Caractéristiques mécaniques des résines thermodurcissables (Époxyde)	82
Tableau 4.2	Caractéristiques moyenne des renforts (Carbone HR)	83
Tableau 4.3	Type de produit pour renforcement	85
Tableau 4.4	Caractéristiques Sika CarboDur S1012	88

Liste des figures

N° de la figure	Intitulé de la figure	Page
Figure 1.1	Aléa sismique en un site – représentation pour une période de temps T .	10
Figure 1.2	Construction d'un spectre de déplacement.	11
Figure 1.3	Définition de la ductilité.	12
Figure 1.4	Déplacement horizontal du tablier de pont Ben Aknoun–Dar El Beïda (Séisme de Boumerdès, 2003).	16
Figure 1.5	Déplacement latéral du tablier lors du séisme de Kobe (1995).	16
Figure 1.6	Déplacement latéral de la pile de pont sur Oued Sebaou.	17
Figure 1.7	Rupture par manque de confinement d'une pile de pont en béton armé (Northridge, 1994).	17
Figure 1.8	Rupture des piles par cisaillement et effondrement du tablier (Kobe, 1995).	17
Figure 1.9	Affaissement de la dalle de transition (Séisme de Chlef, 1980).	18
Figure 1.10	Effondrement de travée dû à une perte d'appui (Kobe, 1995).	18
Figure 1.11	Affaissement de terrain au niveau de l'ouvrage à Oued Isser.	19
Figure 1.12	Liquéfaction du sol au niveau d'Oued Isser.	19
Figure 2.1	Principe général de la méthode pushover.	26

Figure 2.2	Synoptique présentant la méthode générale à suivre à l'issue d'une inspection détaillée.	31
Figure 2.3	Appareil scléromètre.	34
Figure 2.4	Appareil d'auscultation ultrasonique (Pundit).	34
Figure 3.1	Exemples de mise en œuvre de chemises épaisses en béton armé.	40
Figure 3.2	Renforcement des sections circulaires, carrées et rectangulaires par chemises d'acier.	41
Figure 3.3	Exemple de piles renforcées par chemisages métalliques.	41
Figure 3.4	Photo de tissus de fibre de carbone.	43
Figure 3.5	Photo d'une plaque composite stratifiée au contact et de plats pultrudés	44
Figure 3.6	Exemple de piles renforcées par matériau composite	45
Figure 3.7	Des coupes transversales des composites unidirectionnels.	50
Figure 3.7	Arrangement carré et cellule élémentaire.	50
Figure 3.8	Arrangement hexagonal et cellule élémentaire	51
Figure 4.1	pont à la Wilaya de Tebessa sur le CW02 au PK53+900	53
Figure 4.2	laitances noires au niveau de la dalle.	55
Figure 4.3	Cassure au droit du talon et Perte d'enrobage	56
Figure 4.4	Coulures noires Eclatement de l'enrobage	57
Figure 4.5	Fissures inclinées	58
Figure 4.6	Fissures verticales	59
Figure 4.7	Eclatement de béton	60

Figure 4.8	Perte d'enrobage et Apparition des aciers	61
Figure 4.9	Joints de chaussée entièrement fermés	62
Figure 4.10	Appareils d'appui en néoprène déformés	62
Figure 4.11	fissures horizontales	63
Figure 4.12	éclatement de l'enrobage	64
Figure 4.13	Insuffisance de protection des remblais et des berges	65
Figure 4.14	laitances et ségrégation de béton	66
Figure 4.15	Eclatement de l'enrobage a la base des futs	66
Figure 4.16	Auscultation sclérometrique	68

SOMMAIRE

	Dédicace	i
	Remerciements	ii
	Résumé	iii
	Abstract	iv
	الملخص	v
	Liste des abréviations	vi
	Liste des figures	vii
	Liste des tableaux	viii
	Table des matières	ix
	INTRODUCTION GÉNÉRALE	2
	Contexte sismique et importance de la sécurité des ponts	3
	Problématique de la recherche	3
	Objectifs du mémoire	4
	Méthodologie adoptée	5
	Organisation du mémoire	6
	CHAPITRE 1 : Généralités sur le comportement sismique des ponts	8
1.1	Notions fondamentales en génie parasismique	9
1.1.1	Aléa sismique	9
1.1.2	Spectre de réponse	10
1.1.3	Ductilité et dissipation d'énergie	11
1.1.3.1	Ductilité	11

1.1.3.2	Dissipation d'énergie	
1.2	Comportement dynamique des ponts	12
1.2.1	Interaction sol–structure	13
1.2.1.1	Définition de l'interaction sol-structure	13
1.2.2	Modes de vibration	14
1.2.3	Irrégularités structurales	19
1.3	Pathologies sismiques observées	15
1.4	Conclusion	19
2	CHAPITRE 2 : Évaluation de la vulnérabilité sismique des ponts existants	24
2.2	Méthodes d'analyse	22
2.2.1	Méthode statique équivalente (analyse statique linéaire)	22
2.2.1.1	Processus d'Application	23
2.2.2	Analyse modale spectrale	23
2.2.2.1	Principes de base de la méthode de l'analyse modale spectrale	23
2.2.3	Analyse pushover (analyse statique non linéaire)	24
2.2.4	Analyse dynamique non linéaire	27
2.3	Méthodes qualitatives et quantitatives	27
2.3.1	Les méthodes qualitatives	27
2.3.1.1	Objectifs	27
2.3.2	Les méthodes Quantitative	27
2.3.3	Comparaison des Méthodes	28
2.4	Procédures de diagnostic	29
2.4.1	Inspection visuelle	29

2.4.1.1	Définition	29
2.4.1.2	Objectifs de l'inspection visuelle	30
2.4.1.3	Inspection détaillée	31
2.4.1.4	Inspection des dommages	31
2.4.1.5	Inspections détaillées particulières	32
2.4.1.6	Procédures d'inspection des parties des ponts	32
2.4.2	Essais non destructifs	33
2.4.2.1	Les méthodes d'essais	33
2.4.3	Modélisation numérique	35
2.4.3.1	Auscultation par balayage laser 3D	35
2.4.4	Comparaison des Méthodes d'Inspection	36
2.5	Critères de décision pour le renforcement	37
	CHAPITRE 3 : Techniques de renforcement sismique des ponts	38
3.1	Renforcement des piles	39
3.1.1	Chemisage en béton armé	39
3.1.2	Chemisage métallique	40
3.1.3	Confinement par matériaux composites (FRP)	42
3.1.3.1	Les fibres	42
3.1.3.2	Les matrices	43
3.1.3.3	Les renforts composites	43
3.1.3.4	Avantages et inconvénients du matériau composite	44
3.1.3.6	Les caractéristiques du mélange renfort-matrice	45
3.1.3.7	Description de l'arrangement des fibres dans la matrice	50

4	CHAPITRE 4 : Étude de cas	52
4.1	Introduction	53
4.2	Présentation de l'ouvrage	53
4.3	Auscultation détaillée et diagnostic	54
4.3.1	Constat et analyse des désordres	54
4.4	Conclusion	69
4.5	Diagnostic et solutions de réparation	70
4.6	Synthèse diagnostic	71
4.7	Solutions préconisées	71
4.8	Méthodologie d'intervention	74
4.8.1	Au niveau du tablier	74
4.8.2	Réhabilitation des parties en béton	74
4.8.2.1	Traitement des Fissures	75
4.8.2.2	Produits pour injections (NF P 18-800)	75
4.8.3	Les appuis : chemisage	75
	Le renforcement des poutres par Lamelles et Tissu en Fibre de	77
4.8.4	Carbone	
4.8.4.1	Renforcement par le tissu en fibre de carbone (TFC)	77
4.8.4.1	Résine de la matrice du composite	77
4.8.4.2	Fibres de constitution du tissu	78
4.8.4.3	Tissu du composite TFC	78
4.8.4.3.1	Composite TFC	78
4.8.4.3.1	Pose de TFC	79
4.8.4.4	Renforcement par des lamelles en fibre de carbone	79

4.9	Application numérique	82
4.9.1	Calcul	83
4.9.2	Sika® CarboDur® S	86
4.9.2.1	Description	86
4.9.2.1	Utilisation	86
4.9.2.2	Caractéristiques et Avantages	87
4.9.3	Caractéristiques Sika CarboDur S1012:	88
	CHAPITRE 5 : Recommandations et perspectives	89
5.1	Introduction	90
5.2	Améliorations des techniques actuelles	90
5.3	Recommandations pratiques	91
5.4	Perspectives de recherche	92
5.5	Conclusion du chapitre	93
	CONCLUSION GÉNÉRALE	95
	Synthèse des résultats	95
	Apports scientifiques	96
	Limites de l'étude	97
	ANNEX	99
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	100

Introduction général

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les ouvrages d'art constituent des éléments stratégiques du réseau de transport d'un pays. Les ponts, en particulier, assurent la continuité des échanges humains et économiques, facilitent les interventions d'urgence et participent au fonctionnement des infrastructures vitales. Cependant, leur exposition aux aléas naturels, notamment aux séismes, représente une menace majeure pour leur intégrité structurale et pour la sécurité des usagers.

L'histoire récente a démontré que les conséquences du séisme sur les ponts peuvent être dramatiques. Le séisme de San Fernando en Californie en 1971 a révélé pour la première fois, à grande échelle, la vulnérabilité des infrastructures de transport modernes. Par la suite, le séisme de Loma Prieta en 1989 a provoqué l'effondrement partiel de structures autoroutières dans la région de San Francisco. En 1994, le séisme de Northridge a causé d'importants dommages à plusieurs viaducs malgré l'application de règlements parasismiques avancés. Plus récemment, le séisme de Kobe au Japon en 1995 a entraîné la ruine de nombreux ponts et ouvrages autoroutiers, mettant en évidence les limites des approches de conception de l'époque face aux sollicitations extrêmes. Ces événements ont profondément transformé les philosophies de conception en génie parasismique et ont orienté la recherche vers l'évaluation de la vulnérabilité des structures existantes ainsi que vers le développement de techniques efficaces de réhabilitation.

L'Algérie n'est pas épargnée par ce risque. Située à la limite de convergence entre les plaques africaine et eurasiennne, la région nord du pays présente une activité sismique significative. Les séismes d'El Asnam en 1980 (magnitude 7,3) et de Boumerdès en 2003 (magnitude 6,8) ont causé des pertes humaines considérables et des dommages importants aux infrastructures. Le séisme de Boumerdès a notamment affecté plusieurs ouvrages d'art, perturbant la circulation et révélant la nécessité d'une meilleure prise en compte du comportement sismique des ponts existants. Une grande partie du patrimoine national d'ouvrages de franchissement a été conçue selon des réglementations anciennes ou sans exigences parasismiques adaptées aux connaissances actuelles. Dans ce contexte, la réhabilitation sismique apparaît comme une nécessité technique, économique et sociétale.

Contrairement à la reconstruction complète, souvent coûteuse et difficile à mettre en œuvre, le renforcement des structures existantes constitue une solution durable permettant d'améliorer leur capacité de résistance tout en prolongeant leur durée de service. Parmi les différents composants des ponts, les piles jouent un rôle fondamental dans la transmission des efforts sismiques vers les fondations.

Leur comportement gouverne fréquemment le niveau global de performance de l'ouvrage. Les défaillances observées lors des grands séismes ont montré que les insuffisances en ductilité, en

confinement du béton et en capacité de dissipation d'énergie au niveau des piles constituent des causes majeures d'endommagement.

Au cours des dernières décennies, les matériaux composites renforcés par fibres, connus sous l'appellation PFR (Polymères Renforcés de Fibres), ont suscité un intérêt croissant dans le domaine de la réhabilitation des ouvrages d'art. Grâce à leur faible poids, leur résistance élevée, leur facilité de mise en œuvre et leur excellente durabilité, ces matériaux représentent une alternative prometteuse aux techniques traditionnelles telles que le chemisage en béton armé ou métallique. Appliqués sous forme de confinement externe, ils permettent d'améliorer la ductilité des éléments, d'augmenter leur capacité portante et de limiter les mécanismes de rupture fragile.

C'est dans cette perspective que s'inscrit le présent mémoire intitulé : « **Réhabilitation sismique des ouvrages d'art** ». Cette recherche porte sur l'évaluation de la vulnérabilité sismique des ponts existants et sur l'analyse des solutions de renforcement susceptibles d'améliorer leur comportement face aux sollicitations sismiques. Une attention particulière est accordée aux piles de ponts et à l'utilisation des matériaux composites PFR comme technique de chemisage.

Problématique de la recherche

La réhabilitation sismique des ouvrages d'art constitue aujourd'hui un domaine en constante évolution, marqué par la diversité des stratégies d'intervention proposées pour améliorer la sécurité et la performance des structures existantes. Toutefois, malgré les avancées réalisées dans ce domaine, la sélection d'une solution de renforcement appropriée demeure une problématique complexe. Les études disponibles mettent souvent l'accent sur l'amélioration de la résistance des éléments structuraux, sans évaluer de manière exhaustive les conséquences de l'intervention sur le comportement global de l'ouvrage face aux sollicitations sismiques.

En effet, une augmentation de la capacité portante ou de la rigidité d'un élément ne se traduit pas systématiquement par une amélioration de la performance sismique de l'ensemble de la structure. Les interventions de réhabilitation peuvent modifier les mécanismes de transfert des efforts, la répartition des sollicitations, les modes de déformation ainsi que la capacité de dissipation d'énergie de l'ouvrage. Dès lors, l'efficacité d'une stratégie de réhabilitation ne peut être appréciée à travers un seul critère de résistance, mais doit être analysée à partir d'une approche globale intégrant les différents paramètres qui gouvernent la réponse sismique.

Dans cette perspective, la question suivante se pose :

Dans quelle mesure les techniques de réhabilitation sismique permettent-elles d'améliorer réellement la performance globale des ouvrages d'art existants, et comment évaluer objectivement leur contribution à la réduction de la vulnérabilité sismique sans engendrer de modifications défavorables du comportement structural ?

Répondre à cette interrogation nécessite une démarche d'analyse fondée sur la simulation numérique du comportement des structures avant et après intervention, afin d'identifier l'influence des solutions de réhabilitation sur les principaux indicateurs de performance sismique et de déterminer dans quelle mesure les améliorations observées traduisent une optimisation effective du comportement de l'ouvrage.

Objectifs du mémoire

L'objectif principal de ce mémoire est d'évaluer l'influence d'une intervention de réhabilitation sismique sur la performance globale d'un ouvrage d'art existant et d'apprécier l'efficacité réelle de la solution de renforcement retenue à travers une approche basée sur la simulation numérique.

Pour atteindre cet objectif général, les objectifs spécifiques suivants sont définis :

- Analyser les concepts fondamentaux relatifs au comportement sismique des ouvrages d'art et aux mécanismes susceptibles d'affecter leur performance sous l'action des séismes ;
- Examiner les différentes approches utilisées pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique des ponts existants et identifier les paramètres les plus pertinents pour caractériser leur niveau de performance ;
- Étudier les principales techniques de réhabilitation sismique développées pour les ouvrages d'art et mettre en évidence leurs domaines d'application, leurs avantages et leurs limites ;
- Développer un modèle numérique représentatif d'une pile de pont en béton armé à l'aide du logiciel SAP2000 afin de reproduire son comportement structural
- Évaluer la réponse de la pile dans son état initial à travers l'analyse des principaux indicateurs de performance, notamment la capacité portante, les déplacements, les efforts internes, la rigidité et la ductilité ;
- Simuler l'effet d'une intervention de renforcement par chemisage en matériaux composites PFR sur le comportement de la pile soumise aux mêmes sollicitations sismiques ;
- Comparer les performances obtenues avant et après réhabilitation afin de quantifier l'influence du renforcement sur la réponse structurale de l'élément étudié ;

- Déterminer si les améliorations observées traduisent une réelle optimisation du comportement sismique ou une simple augmentation de la résistance mécanique ;
- Formuler des recommandations techniques susceptibles d'orienter le choix des stratégies de réhabilitation les plus adaptées aux ouvrages d'art existants dans le contexte du génie parasismique.

Méthodologie adoptée

Afin d'atteindre les objectifs fixés et d'apporter des éléments de réponse à la problématique de recherche, une démarche méthodologique structurée a été mise en place. Celle-ci combine une analyse documentaire approfondie et une étude numérique appliquée à un cas représentatif de pile de pont en béton armé.

La méthodologie suivie s'articule autour des étapes suivantes :

- Réalisation d'une revue bibliographique portant sur le comportement sismique des ouvrages d'art, les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité et les différentes stratégies de réhabilitation développées dans la littérature scientifique ;
- Analyse critique des techniques de renforcement existantes afin d'identifier leurs principes de fonctionnement, leurs conditions d'application ainsi que leurs limites vis-à-vis des objectifs de performance recherchés ;
- Sélection d'une pile de pont représentative comme support de l'étude, en définissant ses caractéristiques géométriques, mécaniques et de ferrailage à partir de données techniques disponibles ;
- Élaboration d'un modèle numérique tridimensionnel sous le logiciel **SAP2000**, permettant de reproduire le comportement structural de la pile dans son état initial ;
- Évaluation de la réponse de la structure avant intervention à travers des analyses adaptées, notamment l'analyse modale et l'analyse statique non linéaire (*pushover*), afin de déterminer les paramètres caractérisant son niveau de performance ;
- Mise en œuvre d'une solution de réhabilitation par chemisage en matériaux composites **PFR**, suivie de l'actualisation du modèle numérique afin de prendre en compte les modifications induites par le renforcement ;
- Soumission de la pile renforcée aux mêmes conditions de chargement que celles appliquées à l'état initial, dans le but d'assurer une comparaison objective des résultats ;

- Analyse comparative des réponses obtenues avant et après intervention, en s'appuyant sur des indicateurs tels que la capacité portante, les déplacements, la rigidité, la ductilité, les mécanismes de plastification et la dissipation d'énergie ;
- Interprétation critique des résultats afin d'évaluer l'apport réel du renforcement sur la performance sismique de la pile étudiée et d'apprécier la pertinence de la solution adoptée au regard des objectifs de réhabilitation.

Cette démarche méthodologique vise ainsi à dépasser une simple vérification de l'augmentation de la résistance mécanique pour apprécier, de manière globale, l'influence de l'intervention sur le comportement sismique de la structure et sur son niveau de performance après réhabilitation.

Organisation du mémoire

Le présent mémoire est structuré en cinq chapitres complémentaires, organisés de manière progressive afin de conduire le lecteur des concepts généraux vers l'application pratique et l'interprétation des résultats obtenus.

- **Le premier chapitre** est consacré aux généralités relatives au comportement sismique des ponts. Il présente les notions fondamentales du génie parasismique, notamment l'aléa sismique, les spectres de réponse, la ductilité et les mécanismes de dissipation d'énergie. Il aborde également le comportement dynamique des ouvrages, l'interaction sol–structure, les modes de vibration ainsi que les principales pathologies observées lors des événements sismiques.
- **Le deuxième chapitre** traite de l'évaluation de la vulnérabilité sismique des ponts existants. Les différentes méthodes d'analyse, qu'elles soient linéaires ou non linéaires, y sont présentées. Ce chapitre expose également les procédures de diagnostic des ouvrages, comprenant l'inspection visuelle, les essais non destructifs et la modélisation numérique, avant d'aborder les critères intervenant dans la prise de décision relative au renforcement.
- **Le troisième chapitre** est consacré aux techniques de renforcement sismique des ponts. Il présente les principales solutions de réhabilitation applicables aux différents éléments de l'ouvrage, notamment le renforcement des piles. Une attention particulière est accordée au confinement des piles par matériaux composites PFR, compte tenu de son intérêt dans le cadre de cette étude.

- **Le quatrième chapitre** présente l'étude de cas retenue dans le cadre de ce travail. Il comprend la description du pont étudié ainsi que les caractéristiques de la pile considérée. La modélisation numérique est réalisée à l'aide du logiciel SAP2000 afin d'évaluer le comportement de la pile dans son état initial. Une solution de renforcement par chemisage en matériaux composites PFR est ensuite proposée et intégrée au modèle. Enfin, une analyse comparative des résultats obtenus avant et après intervention est menée afin d'apprécier l'influence du renforcement sur les principaux indicateurs de performance sismique de la structure.
- **Le cinquième chapitre** présente les recommandations issues des résultats de cette étude. Il met en évidence les améliorations susceptibles d'être apportées aux approches actuelles de réhabilitation sismique et propose des perspectives de recherche visant à approfondir les connaissances et à optimiser les stratégies d'intervention appliquées aux ouvrages d'art existants.
- Enfin, le mémoire se clôture par une **conclusion générale**, qui synthétise les principaux résultats obtenus, rappelle les apports du travail au regard des objectifs fixés, souligne les limites de l'étude et ouvre des perspectives pour de futures recherches dans le domaine de la réhabilitation sismique des ouvrages d'art.

CHAPITRE 1 :

Généralités sur le comportement sismique des ponts

1.1 Notions fondamentales en génie parasismique

Le génie parasismique traite l'impact des séismes sur les structures et les moyens d'y remédier. Il s'appuie notamment sur une excellente connaissance des méthodes de dimensionnement parasismique, et en particulier du dimensionnement en capacité. Cependant, le génie parasismique pose un ultime défi aux ingénieurs en structures. Malgré l'incertitude associée aux phénomènes naturels, les ingénieurs en génie civil doivent concevoir des ouvrages (bâtiments, ponts, barrages...etc) capables de résister aux forces dévastatrices engendrées par les tremblements de terre.

1.1.1 Aléa sismique :

L'aléa sismique, en un site donné, est la probabilité qu'au cours d'une période de référence (ex: probabilité annuelle), une secousse sismique atteigne ou dépasse en ce site une certaine intensité. Il définit les caractéristiques des mouvements sismiques susceptibles de se produire dans le futur en tenant compte de la durée de vie des constructions concernées et du type d'activités qui y sont réalisées. Il se calcule en fonction de l'histoire sismique de la région étudiée. L'une des étapes importantes dans la réduction du risque sismique au niveau d'une région, est l'évaluation de l'aléa sismique dans cette région. Ce dernier peut être exprimé en termes de probabilité de dépassement ou de période de retour de l'accélération de pointe du sol .

Généralement on représente « l'aléa sismique » en un site sous la forme de courbes indiquant la probabilité d'occurrence d'une valeur X du PAG (Peak Ground Acceleration), pour une période de temps future donnée. La distribution de X est souvent exprimée en fonction de $P(X)$ ou $p(x) = 1 - P(X)$, respectivement la probabilité de dépassement ou de non dépassement de la valeur X durant la période de temps considérée. Sur la figure II.1, est représentée la probabilité de dépasser une certaine valeur d'accélération maximale pour in site fictif pendant une période de temps T future donnée .

Si nous regardons la probabilité que l'accélération maximale du sol soit supérieure à **0,1g**

($g=9,8ms^{-2}$) durant la période de temps considérée, on a:

$$PT(PGA > 0,1g \text{ durant } T \text{ années}) = 0,85$$

Cette relation signifie que pour le site considéré, il y a **85%** de chance que durant les prochaines **T** années, l'accélération maximale de **0,1g** soit dépassée au moins une fois.

Il y a donc aussi **15%** de chance que ce niveau d'accélération ne soit pas dépassé.

PT (PGA < 0,1g durant T années) = 0,15

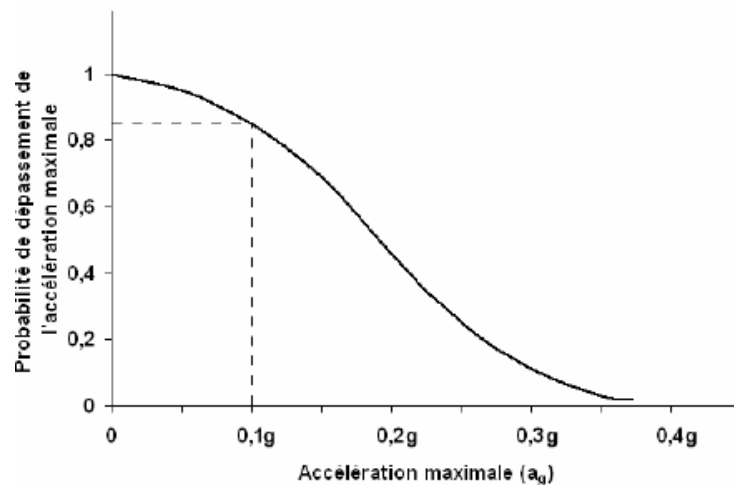


Figure 1.1: Aléa sismique en un site- représentation pour une période de temps T.

De même la probabilité que l'accélération max du sol soit supérieure à **0,2g** durant la période de temps considérée est PT = 45%. Ce qui implique qu'il y a **55%** de chance que ce niveau d'accélération ne soit pas atteint pendant la durée de temps **T** considérée.

1.1.2 Spectre de réponse

Les spectres de réponse sont utilisés par les ingénieurs pour caractériser le système de sollicitations (ou action sismique) qui s'applique à une structure lors d'un séisme. Ils s'expriment par un graphe qui donne la réponse, en termes d'accélération, de vitesse ou de déplacement d'un oscillateur simple en fonction de la période T ou de la fréquence.

Dans le cadre classique d'une analyse multimodale (représentation des ouvrages par des oscillateurs multiples), ils permettent d'évaluer l'amplification dynamique associée à chacun des modes de vibration de la structure en fonction des valeurs des périodes modales T_i.

Un spectre de réponse est une courbe de réponse maximale en termes de déplacements, de vitesses ou d'accélérations pour un système à un seul degré de liberté soumis à une excitation sismique (Chanti, 2000).

La figure 1.2 représente la procédure de la construction du spectre de déplacements à partir des déplacements maximaux de plusieurs oscillateurs simples avec différentes masses et plusieurs valeurs d'amortissement.

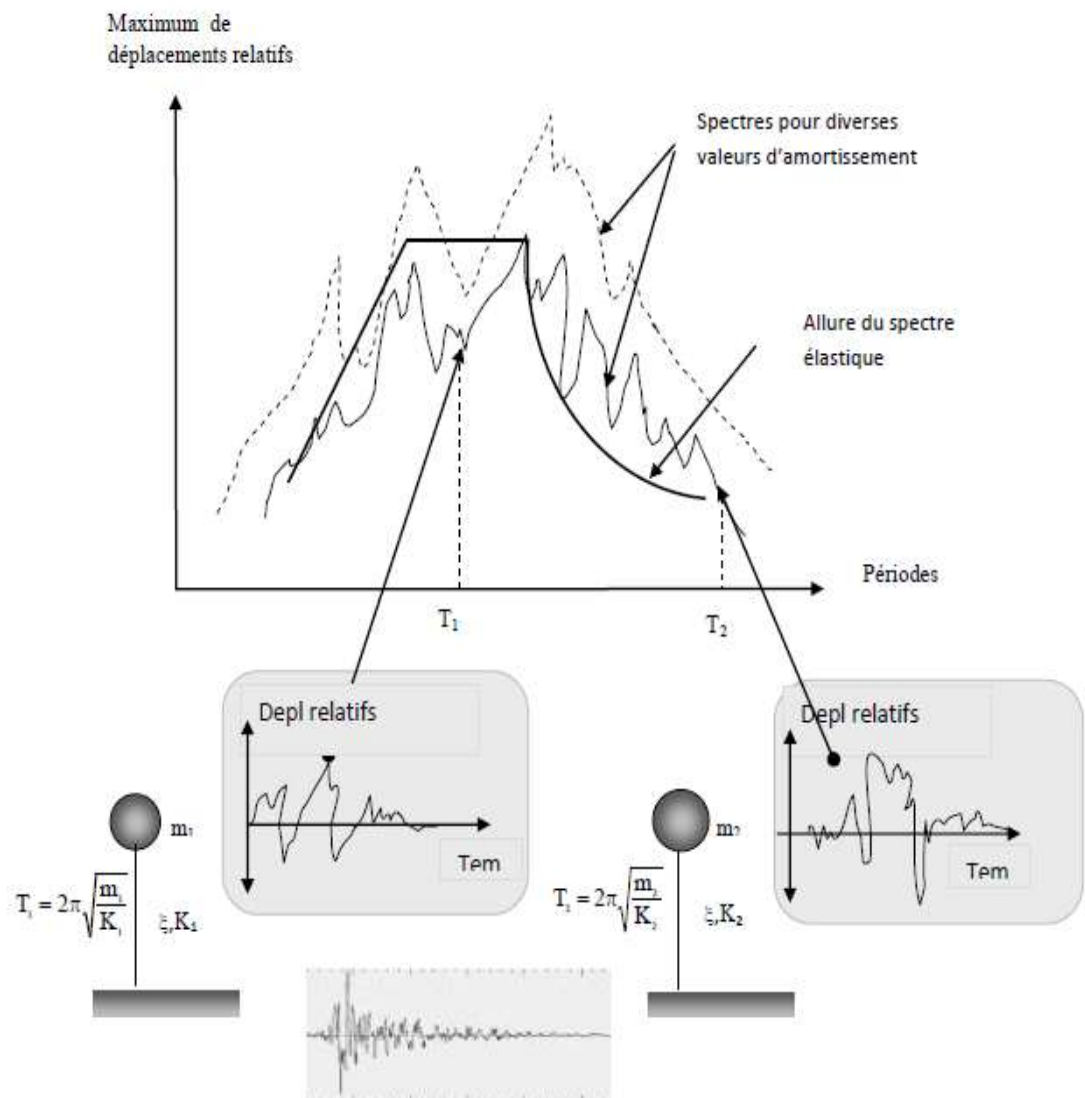


Figure 1.2 : Construction d'un spectre de déplacement

1.1.3 Ductilité et dissipation d'énergie

1.1.3.1 Ductilité :

La ductilité est une caractéristique importante des structures devant résister aux séismes par la formation d'un mécanisme plastique global. Mais qu'est-ce que la ductilité ?

Le terme ductilité définit la capacité d'une structure et de ses différents éléments présélectionnés à se déformer inélastiquement sans perte excessive de la résistance et de la raideur.

La ductilité est le paramètre clé du comportement parasismique. D'une manière générale, en admettant un comportement idéalisé selon la figure I.1, la ductilité (u_{tot} / u_y) est définie comme le rapport entre la déformation totale (u_{tot}) et la déformation à l'initiation de la plastification (u_y). Cette définition s'applique aux déformations au sens large du terme, c'est-à-dire aux déplacements, aux courbures, aux rotations, aux allongements, etc.

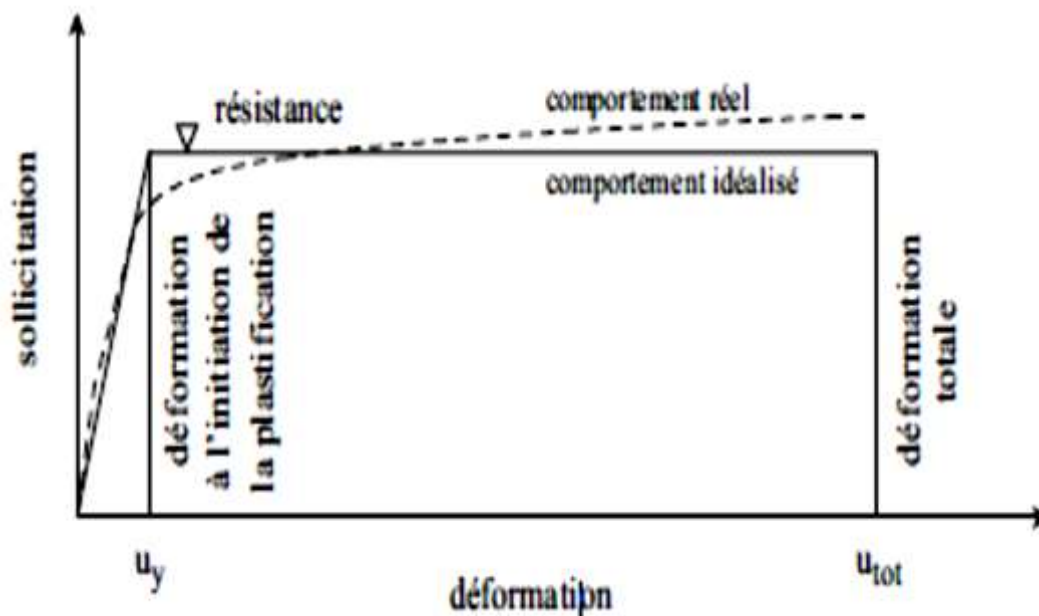


Figure 1.3 : Définition de la ductilité

1.1.3.2 Dissipation d'énergie

Les structures ont encore une capacité de traduire une partie de l'énergie sismique sous forme d'une dissipation d'énergie par divers mécanismes. Ces mécanismes peuvent être regroupés en quatre catégories :

- Dissipation en réflexion de la structure, avec le sol. Celle-là peut être déterminée par l'étude de l'interaction sol – structure.
- Dissipation par frottement qui se produit dans les joints de contact entre les différents matériaux, comme le cas des panneaux de la maçonnerie avec l'ossature en béton armé.
- Dissipation par fissuration ou par rupture des éléments structuraux. Dans ce cas, il est souhaitable que la rupture des éléments constructifs soit progressive et non pas brutale.
- Dissipation par amortissement interne et qui représente la cause la plus importante de la dissipation d'énergie. Cette dissipation est due à la viscosité et à la plasticité des matériaux.

1.2 Comportement dynamique des ponts :

Les ponts, en tant qu'éléments important des réseaux routiers et ferroviaires, sont particulièrement vulnérables aux séismes, ces événements naturels pouvant entraîner des dommages graves et mettre en péril la sécurité des infrastructures et des usagers. Comprendre le comportement des ponts lors de séismes et développer des stratégies efficaces pour renforcer leur résilience face à ces événements est donc une préoccupation majeure dans le domaine de l'ingénierie civile.

1.2.1 Interaction sol–structure

On entend généralement, par interaction sol-structure l'étude au comportement d'une structure soumise à une sollicitation sismique, Littéralement l'interaction sol-structure traduit la modification du mouvement du sol lors d'un séisme du fait de la présence de l'ouvrage ou la modification du mouvement de l'ouvrage lors d'un séisme du fait de la présence du sol ,Cette interaction est bien entendu plus ou moins importante suivant la nature du sol , les caractéristiques de l'ouvrage et son mode de fondation. La nécessité d'étudier la réponse sismique d'un ouvrage, en ne le considérant pas isolément mais comme partie intégrante d'un ensemble comprenant le sol et les structures avoisinantes, rend les analyses d'interaction sol-structure impérieuses pour une part grandissante d'ouvrages importants

1.2.1.1 Définition de l'interaction sol-structure

Le terme Interaction Sol-Structure est couramment utilisé par les ingénieurs géotechniciens. Ce qui est possible de dire sur sa définition est qu'il traite de l'interprétation phénoménologique du comportement de la structure avec la présence du sol de fondation et l'étude des influences mutuelles entre ces deux composantes.

L'Interaction Sol-Structure (ISS) signifie la modification du mouvement du sol ou de la structure lors d'une excitation dynamique du fait de la présence de l'autre composante. Il faut dire donc que le mouvement de l'interface sol-structure est différent du mouvement en champ libre et différent aussi du mouvement de l'interface en l'absence de la structure. Le sol moins la partie excavée. L'interaction sol-structure est une discipline de la mécanique appliquée s'intéressant au développement de méthodes théoriques et pratiques pour l'analyse des structures soumises à des charges dynamiques en prenant en considération l'influence du sol de fondation et de ses propriétés. On entend généralement, improprement, par interaction sol-structure l'étude du comportement d'une structure soumise à une sollicitation sismique. L'interaction sol-structure traduit la modification du mouvement du sol (ou de la structure) lors d'un séisme du fait de la présence de l'autre composant (structure ou sol). Cette interaction est bien entendue plus ou moins importante suivant la nature du sol, les caractéristiques de l'ouvrage et son mode de fondation. Pour certains ouvrages, fondés superficiellement, elle peut être pratiquement négligeable. Par contre, la nécessité d'étudier la réponse sismique d'un ouvrage, en ne le considérant pas isolément mais comme partie intégrante d'un ensemble comprenant le sol et les structures avoisinantes, rend les analyses d'interaction sol-structure impérieuses pour une part grandissante d'ouvrages importants : barrages, centrales nucléaires, réservoirs de gaz naturel liquéfié. L'interaction sol-structure est une discipline de la mécanique appliquée s'intéressant au développement et à l'investigation des méthodes théoriques et pratiques pour l'analyse des structures soumises à des charges dynamiques en tenant compte du comportement du sol de la fondation

1.2.2 Modes de vibration

Les modes de vibration constituent les propriétés intrinsèques, ou signatures vibratoires, de la structure. Ils décrivent la manière dont le pont oscille librement après avoir été perturbé par une force extérieure. Un mode de vibration ne dépend pas de l'intensité du séisme, mais uniquement de la configuration interne de l'ouvrage, à savoir la répartition de sa masse et la distribution de sa rigidité.

Chaque mode est défini par deux caractéristiques fondamentales : la fréquence propre (qui exprime le nombre de cycles d'oscillation par seconde), son inverse la période propre (le temps

nécessaire pour accomplir un cycle complet), et la déformée modale (le profil géométrique tridimensionnel que prend le pont lorsqu'il vibre à cette fréquence).

Une propriété mécanique essentielle des modes de vibration est leur orthogonalité. Ce principe physique stipule que chaque mode de vibration est mathématiquement indépendant des autres. Grâce à cette indépendance, le comportement global du pont lors d'un séisme peut être décomposé en une somme de comportements individuels plus simples, un procédé connu sous le nom de méthode de superposition modale

1.2.3 Irrégularités structurales

Les méthodes d'analyse dynamique simplifiées reposent sur l'hypothèse d'une régularité géométrique et d'une distribution homogène des propriétés mécaniques. Cependant, la topographie des vallées, le tracé des voies de communication ou les contraintes géotechniques imposent souvent des formes complexes qui créent des **irrégularités structurales**. Ces ruptures de symétrie perturbent la diffusion des forces sismiques et génèrent de graves concentrations de contraintes dans des zones localisées.

Il est crucial de distinguer les différents types d'irrégularités qui peuvent affecter un pont:

- **Irrégularités Géométriques**

Ces irrégularités concernent la forme physique du pont. Elles incluent:

- **Discontinuités du tablier:** Des interruptions ou changements abrupts dans la continuité de la surface de roulement.
- **Biais:** Des angles non perpendiculaires entre le tablier et les appuis.
- **Variations locales de portée ou d'élancement:** Des sections où la longueur ou la finesse du pont change de manière non uniforme.
- **Changements abrupts de forme:** Des modifications soudaines de la section transversale ou de la hauteur.

Les irrégularités structurelles transforment de manière significative la réponse d'un pont aux excitations dynamiques. Elles introduisent des complexités qui doivent être prises en compte lors de la conception, de l'évaluation et de la maintenance.

1.3 Pathologies sismiques observées

L'action sismique résultant des séismes a pour effet d'induire dans les structures des oscillations ou des vibrations forcées, auxquelles succèdent, lorsque le séisme prend fin, des oscillations libres qui s'amortissent plus ou moins rapidement. Au cours de ces mouvements, les éléments structuraux des ponts subissent des déplacements importants qui peuvent créer des problèmes au niveau des jonctions entre les éléments verticaux et horizontaux ainsi qu'au niveau des appuis. Il est reconnu que la dissipation de l'énergie induite par les vibrations sismiques dépend des principaux éléments structuraux qui constituent un pont, soient : le tablier, le système d'appuis, les piles, les culées et les fondations. Par ailleurs, la nature du sol et les effets de sites qui en résultent contribuent grandement à augmenter la vulnérabilité sismique des ouvrages.

Parmi les dommages importants subis par les structures de ponts durant les séismes, on rapporte entre autres la perte d'appuis des travées, la rupture des colonnes et des piles, la rupture des culées servant de murs de soutènement, et l'effondrement ou l'affaissement du remblai situé aux accès des ponts.

- **Déplacement horizontal du tablier** : Souvent causé par un défaut d'ancrage ou une rupture des appareils d'appui, provoquant un désalignement critique



**Figure 1.4 : Déplacement horizontal du tablier de pont Ben Aknoun Dar El Beïda
(Séisme de Boumerdès, 2003)**



Figure 1 .5 : déplacement latéral du tablier séisme Kobe 1995 (Kobe 1995)



Figure 1 .6 : Déplacement latéral de la pile de pont sur Oued Sebaou

- **Rupture des appuis (Piles et Culées) :** Due à une insuffisance de ductilité (capacité à se déformer sans rompre) ou un défaut de confinement du béton. Les piles élancées subissent souvent des ruptures par flexion ou effort tranchant



Figure 1 .7 Rupture par manque de confinement d'une pile de pont en béton armé (Northridge, 1994)



Figure 1.8 : Rupture des piles par cisaillement et effondrement du tablier (Kobe, 1995)

- **Affaissement et tassement des accès : Défaillance des remblais techniques derrière les culées et effondrement des dalles de transition**



Figure 1. 9 : Affaissement de la dalle de transition (Séisme de Chlef, 1980)

- **Chute des travées : Risque majeur pour les ponts, où les mouvements longitudinaux peuvent entraîner la sortie du tablier de ses appuis**



**Figure 1.10 : Effondrement de travée dû à une perte d'appui (Kobé 1995)
(Tiré de SML, 2002)**



Figure 1.11 : Affaissement de terrain au niveau de l'ouvrage à Oued Isser



Figure 1.12 : Liquéfaction du sol au niveau de Oued Isser

Conclusion

Ce premier chapitre a mis en évidence les principes clés du comportement parasismique des ponts. L'évaluation de leur vulnérabilité exige de dépasser l'analyse statique pour maîtriser leur comportement dynamique, caractérisé par leurs modes de vibration propres et fortement influencé par l'interaction sol-structure.

Le retour d'expérience sur les pathologies sismiques montre que les défaillances majeures (déchaussement, rupture de pile, martèlement) découlent souvent d'irrégularités structurales. Qu'elles soient en plan ou en élévation, ces dissymétries provoquent des effets destructeurs comme le pivotement ou l'effet de pile courte, qui sur sollicitent les éléments les plus rigides.

Ainsi, la protection des ouvrages repose sur un compromis entre rigidité et ductilité pour dissiper l'énergie.

CHAPITRE 2 :

Évaluation de la vulnérabilité sismique des ponts existants

2.1 Évaluation de la vulnérabilité sismique des ponts :

L'évaluation de la vulnérabilité sismique des constructions et des ouvrages s'avère nécessaire pour déterminer leurs degrés d'endommagement en cas de secousse tellurique et par la suite établir une stratégie d'intervention visant le remplacement des éléments les plus vulnérables, la réparation ou le renforcement de ceux caractérisés par une moyenne vulnérabilité et l'entretien des moins vulnérables.

2.2 Méthodes d'analyse :

L'objectif principal des codes parasismiques est d'assurer de manière fiable un niveau satisfaisant de sûreté et d'opérabilité vis-à-vis des aléas naturels. Pour ce faire, ils proposent plusieurs procédures de calcul. Les structures doivent être en mesure de résister aux tremblements de terre d'une manière quantifiable et présenter des niveaux de performance cible, correspondant à des niveaux de dommages économiquement et socialement acceptables. Pour évaluer la performance structurelle, les codes suggèrent l'utilisation de différents types de méthodes d'analyse

2.2.1 Méthode statique équivalente :

La Méthode Statique Équivalente (MSE) est une technique d'ingénierie sismique largement adoptée pour évaluer la vulnérabilité sismique des ponts. Son objectif principal est de simplifier l'analyse des effets complexes d'un séisme en les traduisant en forces statiques horizontales. Cette approche permet de calculer les sollicitations internes dans les éléments du pont, tels que les piles et les appuis, et d'estimer leur capacité à résister à ces charges sismiques.

La MSE repose sur l'idée que l'effet d'un séisme peut être représenté par une force inertielle agissant sur la structure. Pour les ponts, cette force est généralement considérée comme concentrée au niveau du tablier, où se trouve l'essentiel de la masse. Elle est proportionnelle à l'accélération du sol (définie par l'aléa sismique) et à la masse du tablier. En appliquant cette force équivalente, on peut ensuite déterminer les contraintes et déformations subies par les composants du pont.

2.2.1.1 Processus d'Application

Le processus d'application de la MSE peut être résumé en plusieurs étapes :

1. **Définition de l'Action Sismique** : Il s'agit de déterminer les paramètres sismiques pertinents pour le site du pont, souvent basés sur les règlements parasismiques locaux (comme le RPA 99 version 2003 en Algérie).
2. **Calcul des Charges Sismiques Équivalentes** : Les forces horizontales d'inertie sont calculées en fonction de la masse du tablier et de l'accélération sismique de conception.
3. **Analyse Structurale** : Une analyse linéaire élastique est réalisée sur un modèle du pont, en appliquant les charges sismiques équivalentes. Cela permet d'obtenir les sollicitations (efforts internes) dans les différents éléments structurels.
4. **Évaluation des Sollicitations et des Dommages** : Les résultats de l'analyse sont comparés aux capacités de résistance des éléments du pont. Cela permet d'identifier les zones de faiblesse potentielles et d'estimer les états de dommages probables.
5. **Construction d'Indices de Vulnérabilité** : Des indices de vulnérabilité sismique, ou des courbes de fragilité, peuvent être développés pour classer les ponts selon leur probabilité d'endommagement et guider les décisions de renforcement.

2.2.2 Analyse modale spectrale :

L'analyse modale permet de mettre en évidence les fréquences, les coefficients de participation et les masses effectives dans chaque direction d'excitation de chacun des modes de la structure. Chaque mode de vibration est caractérisé par sa pulsation et par le vecteur propre associé (Betbeder-Matibet, 1985)

La détermination de la réponse de la structure et son dimensionnement peuvent se faire par cette méthode de calcul selon la nature de sollicitation sismique qui est décrite sous forme d'un spectre de réponse. (Capra, 1985)

Conditions d'application de la méthode d'analyse modale spectrale :

La méthode d'analyse modale spectrale peut être utilisée dans tous les cas, et en particulier, dans le cas où la méthode statique équivalente n'est pas permise.

2.2.2.1 Principes de base de la méthode de l'analyse modale spectrale :

Le mouvement vibratoire d'un ouvrage est la superposition des mouvements vibratoires découplés des modes propres de l'ouvrage se comportant comme des oscillateurs simples indépendants. Nous pouvons donc étudier séparément l'action du séisme sur chaque mode, puis combiner l'ensemble.

Le but final du calcul est de trouver les valeurs maximales des déplacements, des efforts, des contraintes sous l'effet de l'action des deux composantes horizontales et de la composante verticale du séisme.

Cette méthode est sans doute, la méthode la plus fréquemment utilisée pour l'analyse sismique des structures, elle est caractérisée par :

- La définition du mouvement sismique imposé aux supports sous la forme d'un spectre de réponse.
- L'hypothèse d'un comportement global linéaire de la structure permettant l'utilisation des modes propres. Elle comporte les étapes suivantes :
- Etablissement d'un modèle de calcul reproduisant au mieux le comportement dynamique réel de la structure.
- Calcul des modes propres et fréquences propres du modèle.
- Lecture sur le spectre de réponse des valeurs maximales des réponses des modes propres.
- Calcul des réponses de la structure par combinaison des réponses modales

2.2.3 Analyse pushover :

Les méthodes en déplacement (analyses en poussée progressive - « push-over ») consistent à appliquer à la structure une sollicitation latérale croissante proportionnelle à la déformée du mode fondamental (1er mode de vibration). Le principe consiste à appréhender les plastifications successives qui se produisent dans les différents éléments structuraux. Ceci permet notamment de calculer l'appel en ductilité réel dans les différents éléments, de représenter les redistributions d'efforts dans la structure après plastifications et la chronologie des événements (endommagements structuraux) au cours d'une sollicitation sismique croissante. La méthode est donc particulièrement bien adaptée à la problématique du diagnostic des ouvrages existants. La ductilité globale disponible est en effet ici évaluée de façon réaliste par le calcul, ce qui revient finalement en quelque sorte à justifier un coefficient de comportement qui peut être sensiblement supérieur à celui autorisé par les méthodes en force.

Ces analyses sont conduites en faisant l'hypothèse de base que le mode fondamental est représentatif du comportement sismique général de la structure. Dans le cas des ponts, cette hypothèse est généralement vérifiée pour la direction longitudinale. Pour la direction transversale, elle n'est valide que si l'ouvrage vérifie les critères de régularité définis dans le cadre de l'application des méthodes en force monomodales. Il convient en particulier de s'assurer que le premier mode (selon lequel la poussée est appliquée) couvre bien l'essentiel de la réponse sismique de la structure.

La méthode push-over résulte dans le tracé d'une loi de comportement globale de type Force/Déplacement pour la structure dans une direction donnée. Cette loi se traduit par une courbe, dite « courbe de capacité », représentant le déplacement atteint en fonction d'une force horizontale croissante appliquée de façon quasi-statique (d'où le terme de méthode en poussée progressive).

A partir de cette loi, il est possible de déterminer le déplacement ultime que peut subir l'ouvrage avant sa ruine. Par ailleurs, en chaque point de la courbe, correspondant à un niveau d'endommagement donné, on peut calculer les caractéristiques sécantes équivalentes de la structure dégradée (raideur, période, amortissement) et en déduire, par calage du spectre unitaire sur le niveau de déplacement atteint, l'accélération nominale correspondante.

On peut alors facilement en déduire une courbe de dommage pour la structure dans la direction étudiée, représentant la ductilité appelée ($d/d_{\text{élastique}}$) en fonction de l'accélération nominale sollicitante a_N .

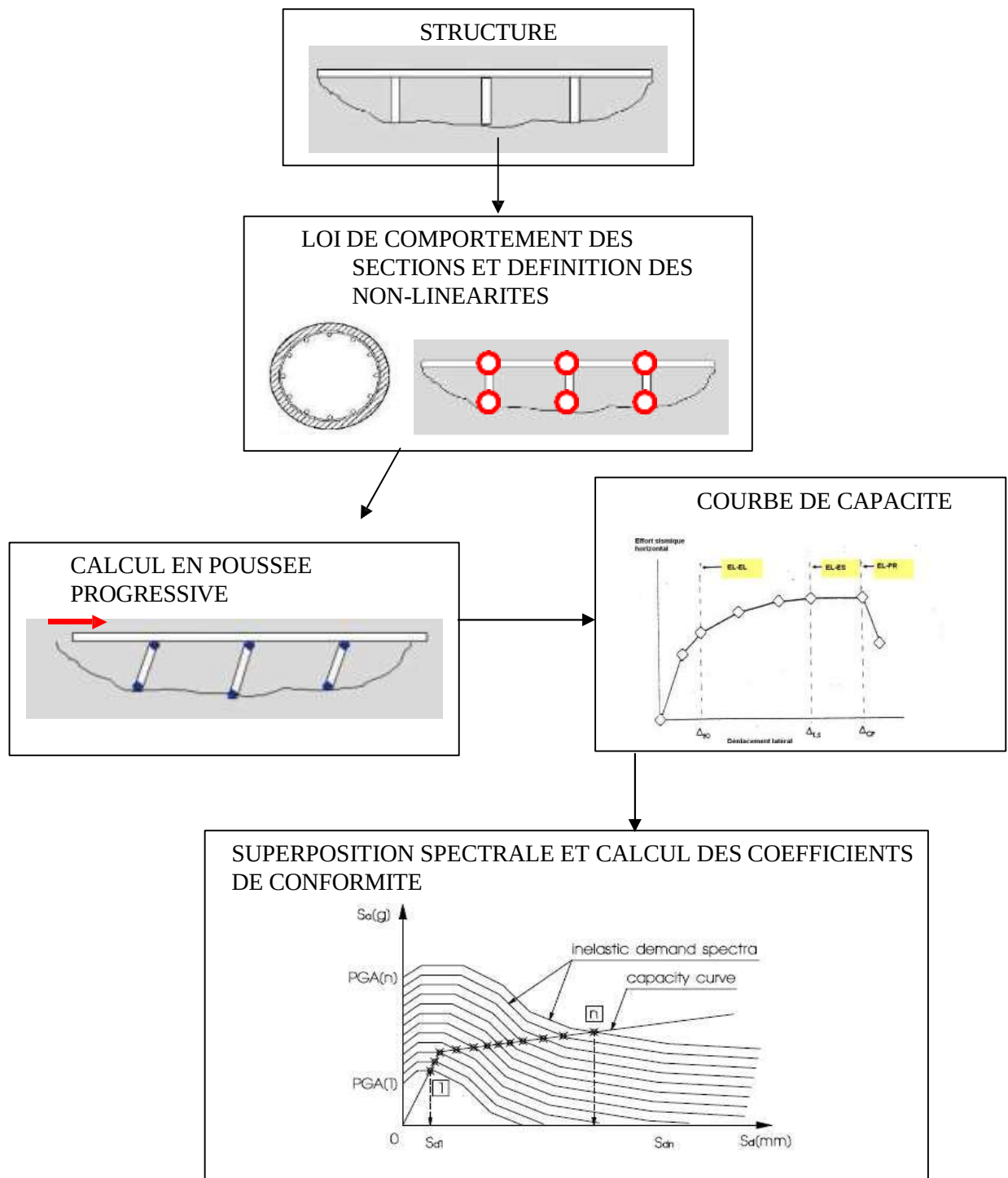


Figure 2.1 : Principe général de la méthode push-over

2.2.4 Analyse dynamique non linéaire

La procédure d'analyse dynamique non linéaire est basée sur l'intégration directe des équations de mouvement (en utilisant des enregistrements réels ou simulés) ou des algorithmes contenant les déformations élastoplastiques de la structure sont adoptés. Si la méthode est à priori apte à décrire le comportement réel lors d'un séisme, le problème majeur réside dans le choix d'un enregistrement (accélérogramme) propre, du fait de la grande variabilité induite par la nature du sol et la distance de la source. Il devient donc essentiel d'utiliser plusieurs types d'enregistrements ou un accélérogramme artificiel contenant les principales caractéristiques des séismes potentiels.

2.3 Méthodes qualitatives et quantitatives

Pour appréhender pleinement la vulnérabilité sismique d'un pont, il est nécessaire d'adopter une démarche multicritères. Les méthodes qualitatives et quantitatives, bien que distinctes, sont complémentaires et s'intègrent souvent dans une approche dite "mixte"

2.3.1 Les méthodes qualitatives

Elles se concentrent sur la compréhension approfondie des mécanismes potentiels de défaillance. Elles visent à expliquer les raisons et les modes de dommages possibles en cas de séisme. Cette approche est intrinsèquement descriptive et s'appuie sur une combinaison d'observations, d'études de cas, d'expertises et d'analyses post-sismiques.

2.3.1.1 Objectifs

Le principal objectif des méthodes qualitatives est d'identifier les éléments structurels les plus vulnérables. Cela peut inclure des défauts de conception originels, des matériaux dégradés, des connexions inadéquates ou des détails constructifs non conformes aux normes parasismiques. Ces méthodes sont particulièrement efficaces pour cerner les modes de rupture critiques, c'est-à-dire les scénarios de défaillance les plus probables et les plus dangereux.

Les méthodes qualitatives sont rapides, peu coûteuses et très utiles pour un "screening" initial, permettant de prioriser les ponts nécessitant des investigations plus poussées

2.3.2 Les méthodes Quantitative

Les méthodes quantitatives visent à mesurer et à quantifier précisément la capacité d'un pont à résister aux forces sismiques. Elles s'appuient sur des données numériques, des modèles mathématiques et des simulations informatiques pour estimer les performances structurelles sous différentes sollicitations.

Cette approche implique la collecte de données détaillées sur la géométrie du pont, les propriétés des matériaux, les types d'appuis, les caractéristiques du sol et, si disponible, l'instrumentation.

Typiquement, une évaluation qualitative initiale permet d'identifier les ponts les plus à risque et

de les prioriser. Ensuite, des analyses quantitatives ciblées sont menées sur ces ouvrages critiques pour des études plus approfondies, afin de dimensionner précisément les renforcements nécessaires ou d'envisager des techniques d'isolation de base.

Cette synergie permet non seulement de gagner du temps et de l'argent en évitant des analyses coûteuses sur des ponts peu vulnérables, mais aussi d'allouer les ressources là où elles sont le plus nécessaires, assurant ainsi une meilleure sécurité globale de l'ouvrage.

2.3.3 Comparaison des Méthodes

CARACTERISTIQUES	Méthodes Qualitatives	Méthodes Quantitatives
Objectif Principal	Identifier les modes de défaillance et points faibles, prioriser les ouvrages.	Quantifier la capacité de résistance, estimer les performances, dimensionner les renforcements.
Nature de l'Analyse	Descriptive, basée sur l'observation, l'expertise et les études de cas.	Numérique, basée sur des modèles mathématiques, simulations et calculs.
Données Requises	Caractéristiques typologiques, observations visuelles, historique du pont.	Géométrie détaillée, propriétés des matériaux, caractéristiques du sol, chargements sismiques.
Outils et Techniques	Guides méthodologiques systèmes d'évaluation préliminaire	Méthode statique équivalente Analyse modale spectrale Analyses pushover, Analyse dynamique non linéaire
Complexité et Coût	Faible à modéré, rapide à mettre en œuvre.	Élevée, demande du temps et des ressources spécialisées.
Précision	Indicative, utile pour un dépistage général.	Élevée, fournit des résultats détaillés et probabilistes.
Application	Phase de pré-évaluation, gestion du risque à grande échelle, priorisation.	Conception de renforcements spécifiques, études de cas complexes, conformité aux normes

2.4 Procédures de diagnostic

Le diagnostic d'un ouvrage c'est l'ensemble des investigations nécessaires pour définir l'origine et l'étendue des désordres constatés, il permet de vérifier s'il satisfait aux conditions de sécurité et d'utilisation qui sont définies par la réglementation et par les besoins de son usager.

Dans le cadre d'un diagnostic, trois types de missions peuvent être réalisées :

- Sur un ouvrage sain : estimer, vérifier ou contrôler les caractéristiques de la construction, c'est notamment le cas des ouvrages à « caractère exceptionnel » (grand ponts...etc.)
- Sur un ouvrage supposé endommagé : détecter l'endommagement ;
- Sur un ouvrage visiblement endommagé dont les désordres sont susceptibles ou non

de s'aggraver ou de mettre en cause la sécurité : caractériser l'endommagement (gravité de l'endommagement.)

La réhabilitation sismique suit un processus structuré, débutant par une évaluation approfondie des risques et se poursuivant par l'application de solutions techniques ciblées. Cette approche garantit que les interventions sont proportionnées aux risques identifiés et optimisent le rapport coût/bénéfice.

2.4.1 Inspection visuelle

2.4.1.1 Définition

Appelée aussi « de routine », « continue » ou « préliminaire », les inspections visuelles représentent les sources principales d'information relevées pendant les inspections principales. Elles fournissent des informations de base suffisantes pour qu'un avis préliminaire soit présenté vis-à-vis des conditions de l'élément dégradé. Plusieurs méthodes de classification basées sur les caractéristiques de ces désordres sont disponibles dans la littérature, notamment IQOA, 1996, ACI.

La Procédure IQOA, 1995

Présente des catalogues de désordres destinés à faciliter la cotation des ouvrages en application de la méthodologie I.Q.O.A. (Image de la Qualité des Ouvrages d'Art). Chaque catalogue traite des principales dégradations qui peuvent atteindre des éléments structuraux spécifiques, tel que le tablier et les piles, d'un type d'ouvrage comme les ponts à poutres sous chaussée, les ponts dalle en béton armé, les ponts voûtés en béton armé... Tableau Des catalogues de défauts relatifs aux équipements et aux éléments de protection sont aussi proposés. La qualité des ouvrages est donc vérifiée selon 6 classes d'état

Classe 1	Ouvrage en bon état apparent relevant de l'entretien courant au sens de l'Instruction Technique sur la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art.
Classe 2	Ouvrage, – dont la structure est en bon état apparent mais dont les équipements ou les éléments de protection présentent des défauts, – ou dont la structure présente des défauts mineurs, et qui nécessite un entretien spécialisé sans caractère d'urgence.
Classe 2E	Ouvrage, – dont la structure est en bon état apparent mais dont les équipements ou les éléments de protection présentent des défauts, – ou dont la structure présente des défauts mineurs, et qui nécessite un entretien spécialisé URGENT pour prévenir le développement rapide de désordres dans la structure et son classement ultérieur en 3.
Classe 3	Ouvrage dont la structure est altérée et qui nécessite des travaux de réparation mais sans caractère d'urgence.
Classe 3U	Ouvrage dont la structure est gravement altérée, et qui nécessite des travaux de réparation URGENTS liés à l'insuffisance de capacité portante de l'ouvrage ou à la rapidité d'évolution des désordres pouvant y conduire à brève échéance.
Classe NE	Ouvrage non évalué.

2.4.1.2 Objectifs de l'inspection visuelle :

Le pré-diagnostic ou l'inspection visuelle sert à:

- **Qualifier** : Un désordre spécifique à une origine et des conséquences particulières. La qualification a pour but d'établir à quel désordre on est confronté et donc quel type de traitement/réparation est à mettre en place.
- **Localiser**: La position d'un désordre sur l'ouvrage donne des indications sur son degré d'importance et son origine. En outre, la localisation permet de cibler les zones à traiter de manière urgente et de choisir les travaux en fonction des contraintes d'accès.
- **Quantifier**: Ceci a pour but de connaître l'étendue des désordres et donc d'évaluer les méthodes les plus adaptées pour effectuer les réparations.
- **Comparer**: Une comparaison de l'état de l'ouvrage par rapport à l'état précédent ou par rapport à un état de référence, et cela en vue de déceler et de signaler à temps toute nouvelle anomalie ou toute évolution anormale d'une anomalie existante
- **Procès –verbal** : L'inspection visuelle est sanctionnée par un procès-verbal, comportant notamment les renseignements sur la situation de l'ouvrage et l'obstacle franchi, les détails de conception de l'ouvrage (longueur, largeur, fondations, appuis, type de tablier, équipements, ...) les renseignements sur les conditions de la visite, le relevé succinct des dégradations et une appréciation sur l'état de l'ouvrage

2.4.1.3 Inspection détaillée

L'Inspection détaillée est réalisée par un organisme spécialisé avec soins et détails, en utilisant tous les moyens d'accès nécessaires pour accéder aux différentes parties et éléments de l'ouvrage, ainsi que l'outillage adéquat. À cet effet, à savoir : nacelles, Échafaudages, matériel élévateur, barques, aides visuelles, ... Cette inspection est complétée éventuellement par le nivellement des appuis et la mesure des flèches de travées.

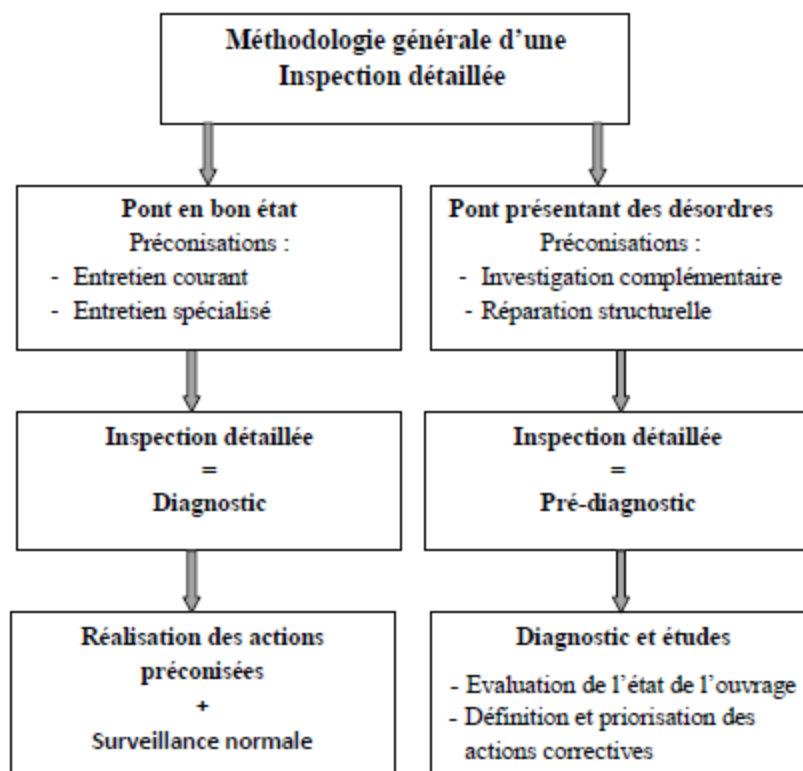


Figure 2.2 : Synoptique présentant la méthode générale à suivre à l'issue d'inspection détaillée

2.4.1.4 Inspection des dommages :

Dans le cas de l'endommagement d'un pont, une inspection des dommages est généralement appelée à évaluer la gravité des dégâts et de déterminer la nécessité de restrictions de charge ou de fermeture complète. Le niveau et le détail d'inspection dans ce cas dépend de la gravité et l'étendue des dégâts. Si les dommages significatifs sont trouvés, l'inspecteur peut généralement s'attendre à faire des mesures détaillées des éléments endommagés (par exemple le niveau de perte de la section).

Il est évidemment souhaitable que l'inspecteur ait la capacité de faire des calculs d'ingénierie dans le domaine spécifié lié à la nécessité de restriction de charge ou de fermeture.

2.4.1.5 Inspections détaillées particulières :

Elles sont effectuées en dehors du programme d'inspections périodiques (primaires et détaillées). Suite à des circonstances anormales: Crues, glissement de terrain, défaillance imprévue, désordre occasionné par choc, séisme ...etc.

2.4.1.6 Procédures d'inspection des parties des ponts

L'inspection doit porter sur l'examen des parties de l'ouvrage tel que :

a) Fondations:

il y a lieu de déceler tout mouvement du sol de fondation, à travers les mouvements d'appuis (inclinaison, tassement général ou différentiel) qui peuvent être occasionnés par un glissement de terrain, la présence de cavités souterraines, variation du niveau de la nappe phréatique et les affouillements pour les appuis dans les cours d'eau.

b) Infrastructure:

c'est la partie apparente des appuis du tablier. Il y a lieu de vérifier la présence et la nature des fissures, l'existence d'éclatements de béton, la corrosion des armatures, l'état des joints de maçonneries,

c) c)Appareils d'appuis :

Vérifier s'il n'y a pas d'écrasement d'appareil, de déformations importantes, de blocage quelconque, ...etc.

d) Superstructure:

Tabliers en béton : vérifier le contact tablier appui, noter en particulier l'existence de fissures et leurs directions sur chaque élément porteur, les éclats de béton et écaillages, la corrosion des armatures, les dégâts accidentels, étanchéité de la dalle, ...

Tabliers métalliques : vérifier l'état de la protection (peinture), la présence de fissures, relever les déformations permanentes (flèches, flambements, voilements, torsion, ondulations, vérifier l'état des soudures, des assemblages, des boulons et rivets, étanchéité du tablier, ...

Ponts suspendus : vérifier l'état des colliers, selles, sabots et culots, la rupture de fils et câbles, l'état de la protection (peinture métallique), la tension relatives des câbles...etc.

e) Joints de dilatation: il faut porter attention aux défauts suivants : desserrement des boulons, insuffisance du souffle, étanchéité du joint, ...

2.4.2 Essais non destructifs

Les essais non destructifs (END) représentent des méthodes de reconnaissance couramment appliquées aux structures de bâtiments, ouvrage d'art ou de génie civil.

Comme leur nom l'indique il s'agit de mesures n'endommageant pas les constructions. Etant entendu que quelques désordres mineurs peuvent être apportés à la structure sans toutefois modifier ni sa performance ni son apparence. Une importante caractéristique des essais non destructifs est qu'ils peuvent être refaits au même endroit ou presque, ce qui permet de suivre les changements des propriétés du béton dans le temps.

Les END sont particulièrement utiles pour :

- Le contrôle qualité sur chantier.
- Le diagnostic de structures existantes (ponts, bâtiments).
- L'évaluation des dommages après un événement (incendie, séisme).
- La surveillance à long terme de la performance du béton.

Les essais non destructifs peuvent jouer un rôle exceptionnel dans la garantie de la qualité du béton et dans le développement ultérieur de la technologie de construction.

Ces essais sont rapides et légers à mettre en œuvre, et apportent de surcroît une réponse globale à l'échelle d'une structure ou d'un ouvrage, dans le cadre des contrôles d'ouvrages neufs ou en construction et comme diagnostic d'état d'ouvrages anciens.

2.4.2.1 Les méthodes d'essais :

a L'essai au scléromètre (Marteau de Schmidt) :

Le scléromètre est un appareil simple qui mesure la " dureté au choc " du béton au voisinage de la surface (Indice sclérométrique). Cet indice, reporté sur un abaque, permet de déduire la résistance à la compression du béton testé. Dans l'essai au scléromètre une masse approximative de 1.8 kg montée sur un ressort a une quantité potentielle fixe d'énergie qui lui est transmise par un ressort tendu à partir d'une position fixe, ce que l'on obtient en pressant la tête du marteau contre la surface du béton mis à l'essai. Lors de son relâchement, la masse rebondit depuis la tête, toujours en contact avec la surface du béton et la distance qu'elle parcourt, exprimée en pourcentage de l'extension initiale du ressort est appelée l'indice de rebondissement. Cet indice est indiqué par un curseur qui se déplace le long d'une règle graduée.



Figure 2.3 : Appareil scléromètre

b L'essai par auscultation ultrasonique:

Connu sous le nom d'essai aux ultrasons, cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) à travers un élément en béton. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance donnée.

Appareil d'auscultation ultrasonique (Pundit) : Composé d'un émetteur, d'un récepteur, et d'une unité de mesure du temps.



figure 2.4 : Appareil d'auscultation ultrasonique (Pundit)

b.1 Calcul et interprétation

- Calculer la vitesse de propagation ($V=L/t$).
- Comparer la vitesse obtenue avec les plages de vitesses caractéristiques pour différents états de qualité du béton (ex: très bonne, bonne, moyenne, mauvaise).
- Utiliser des courbes de corrélation (si disponibles et étalonnées pour le type de béton) pour estimer la résistance à la compression.

b.2 Recommandations importantes :

- La présence de fissures, de vides ou de zones de mauvaise qualité réduit la vitesse de propagation des ondes. La vitesse est influencée par la teneur en eau du béton, la température et le type de granulats.
- Les corrélations avec la résistance à la compression sont plus fiables si elles sont établies in situ.

b.3 Classements qualitatifs :

- $2500 \text{ m/s} \leq V < 3200 \text{ m/s}$ béton de faible résistance,
- $3200 \text{ m/s} \leq V < 3700 \text{ m/s}$ béton de moyenne résistance,
- $3700 \text{ m/s} \leq V < 4200 \text{ m/s}$ béton à haute résistance,
- $V \geq 4200 \text{ m/s}$ béton à très haute résistance.

2.4.3 Modélisation numérique

2.4.3.1 Auscultation par balayage laser 3D

Le scan laser 3D est une technologie innovante qui crée des modèles 3D ultra-détaillés d'objets et d'environnements. à l'aide d'un laser comme source de lumière. Cela signifie que la technologie repose sur les faisceaux laser pour mesurer la distance à une surface et créer des modèles 3D ultra-réalistes de l'ouvrage, de sites ou de paysages. Le scan laser 3D est également un outil populaire dans les domaines de l'ingénierie, de la construction et de l'architecture où il est souvent utilisé pour documenter l'état d'une structure.

En produisant un fichier de nuage de points, les scanners fournissent des données numériques inestimables dans une multitude d'applications, de la rétro-ingénierie et l'inspection qualité Ce qui rend cette technologie encore plus populaire, c'est que les scanners laser modernes sont portables, sûrs et faciles à utiliser, et qu'ils sont précis au millimètre près.

Le nuage de points est transformé en un modèle ou une carte 3D détaillée, où chaque point est le reflet exact de l'environnement scanné. Ces données peuvent ensuite être visualisées, analysées et utilisées pour créer des modèles 3D précis.

Le scan laser 3D intervient à différentes étapes de la vie d'un ouvrage, notamment lors des inspections détaillées ou des projets de réhabilitation :

- **Précision Inégalee:** Le scan laser 3D capture des millions de points pour créer un modèle numérique détaillé, permettant une détection submillimétrique des déformations et fissures.
- **Cartographie des fissures :** Visualisation précise de l'ouverture et de la propagation des fissures sur le béton ou l'acier

- **Détection des déplacements :** Mise en évidence immédiate des rotations de piles, des désalignements de tablier et des problèmes au niveau des appareils d'appui.
- **Rapidité et Sécurité:** Cette méthode non-destructive permet une évaluation à distance des zones potentiellement dangereuses, accélérant le processus d'inspection et garantissant la sécurité des opérateurs.
- **Analyse Complète:** Les données 3D facilitent la comparaison avant/après séisme, l'identification des indicateurs critiques de dommage une planification optimale des réparations

2.4.4 Comparaison des Méthodes d'Inspection :

Caractéristique	Scan Laser 3D(TLS)	Inspection Visuelle	Ultrasons
Précision de Détection	Submillimétrique (géométrie, Déformations fissures	Qualitative (fissures visibles, Déformation	Détections de défaut Internes (béton, acier)
Rapidité d'Acquisition	Très rapide (grands volumes en quelques heures)	Lente nécessite un accès physique	Moyenne (point par point)
Sécurité Opérationnelle	Élevée (sans contact, à distance)	Faible (accès physique requis travail en hauteur)	Moyenne (contact direct)
Couverture Spatiale	Complète (modèle 3D de l'ensemble du pont)	Limitée (zones accessibles)	Très Localisée (points spécifiques)
Nature des Données	Nuage Des points 3D,	Note, photos2D, croquis	Lectures numériques, images 2D
Coût Initial	Élevé	Faible	Moyen
Potentiel d'Automatisation	Élevé (détection, comparaison, modélisation)	Faible	Moyen (logiciels d'analyse)

2.5 Critères de décision pour le renforcement

Le choix de la solution de renforcement la plus appropriée dépend d'une analyse approfondie de l'état du pont, des pathologies identifiées et des objectifs de l'intervention.

La décision de renforcements du pont est multifactorielle. Le tableau ci-dessous récapitule les principaux critères considérés.

Catégorie de Critère	Exemples Spécifiques	Impact sur la Décision
Technique	Vulnérabilité structurelle (piles, fondations, appuis), capacité résiduelle, état des matériaux, performance sous Eurocode 8.	Détermine la nécessité technique du renforcement et le type d'intervention.
Réglementaire et Normatif	Catégorie d'importance du pont, règles de construction parasismique, arrêtés nationaux.	Cadre légal et exigences minimales à respecter.
Économique	Coût du renforcement vs. coût de reconstruction, coûts indirects de fermeture, coût de la vie humaine.	Analyse coût-bénéfice pour optimiser l'investissement.
Opérationnel et Stratégique	Criticité du pont pour les secours, continuité des services, pertinence de l'itinéraire.	Priorise les ouvrages et influence le niveau de performance visé.
Environnemental	Impact des travaux sur l'environnement local, durabilité des solutions de renforcement.	Considérations pour un développement durable.

2.6 Conclusion

La décision de renforcement d'un pont après l'évaluation de la vulnérabilité sismique et les procédures du diagnostic sont des processus complexes et multidimensionnel. Elle exige une compréhension approfondie des aspects techniques, réglementaires, économiques et opérationnels. L'objectif ultime est d'assurer la résilience des infrastructures vitales face aux aléas sismiques, garantissant ainsi la sécurité des usagers et la continuité des services essentiels. Les guides méthodologiques et les normes internationales fournissent un cadre robuste pour accompagner les professionnels dans cette tâche cruciale.

CHAPITRE 3 :

Techniques de renforcement sismique des ponts

Le renforcement sismique des ponts consiste à modifier les propriétés dynamiques ou mécaniques de l'ouvrage existant pour améliorer sa réponse sous l'effet de secousses telluriques. Contrairement aux réparations superficielles ou à la maintenance courante (liées aux classes d'état de dégradation conventionnelles), l'intervention parasismique vise à requalifier structurellement les éléments clés du cheminement des efforts, principalement le tablier, les appareils d'appui, les fondations et, de manière très critique, les piles.

3.1 Renforcement des piles

Le renforcement des piles de pont après un séisme est une démarche fondamentale pour la sécurité et la pérennité des infrastructures de transport. Les séismes peuvent causer des dommages variés, allant de fissures superficielles au cisaillement ou à la rupture complète, compromettant la capacité portante et la stabilité de l'ouvrage. Les méthodes de renforcement visent à restaurer, voire à améliorer, la résistance sismique des piles.

Après un événement sismique, les interventions se concentrent sur deux objectifs principaux :

- Augmenter la résistance en flexion et améliorer la ductilité des piles, pour qu'elles puissent absorber et dissiper l'énergie sismique sans rupture fragile.
- Améliorer le confinement du cœur des piles, notamment à leur base, afin de prévenir l'éclatement du béton et la rupture prématurée des armatures, garantissant ainsi l'intégrité des appuis.

Plusieurs techniques, tirant parti de matériaux avancés et de principes d'ingénierie modernes, sont employées pour renforcer les piles de pont endommagées ou vulnérables aux séismes. Ces méthodes sont choisies en fonction de l'ampleur des dommages, du type de pile et des contraintes opérationnelles du pont.

Les techniques de renforcement les plus courantes comprennent des chemises en acier, en béton, en matériaux composites (fibres de verre, fibres de carbone, ou autres fibres dans une matrice d'époxy)

3.1.1 Chemisage en béton armé

Cette technique consiste à construire un bloc de béton armé, désigné par le terme de chemise, qui enveloppe la section initiale. L'addition d'une chemise en béton adéquatement armée à la base permet d'améliorer la résistance en flexion, cisaillement et la ductilité des piles

La réalisation de cette technique nécessite les étapes suivantes :

- Préparer les zones endommagées, éventuellement (enlever le béton détérioré).
- Percer des trous dans les piles et les fondations pour assurer la continuité entre les éléments.
- Nettoyage et sablage du support initial.
- Ancrage et scellement de chevilles pour fixation d'armatures additionnelles.
- Fixation des armatures additionnelles avec les tiges d'ancrage.

- Étalage d'une couche d'époxy sur la surface de béton existant.
- Coulage de l'enveloppe en béton.



Figure 3 .1: Exemples de mise en œuvre de chemises épaisses en béton armé
(Source : Cerema ITM) [23]

a. Avantage de la technique :

- Technique peu coûteuse du fait des matériaux utilisés.
- Main d'œuvre peu qualifiée.

b. Inconvénients :

- Augmentation considérable des sections donc du poids de la structure.
- Les éléments sont plus encombrants et moins esthétiques.
- Nécessité de mettre hors service l'ouvrage à renforcer pendant la durée des travaux qui est généralement longue.
- Nécessité de coffrages.
- Mise en œuvre souvent difficile.

3.1.2 Chemisage métallique

L'efficacité de cette technique vient du fait qu'en plus d'augmenter le confinement du béton, la chemise augmente directement la résistance en cisaillement. Elle peut être perçue comme une série d'étriers plaquée sur l'extérieur de la pile. La méthode de construction est assez simple, deux demi-coques d'acier sont superposées à la pile et sont soudées ensembles. L'ajout de béton ou d'un coulis vient compléter le vide entre la chemise circulaire et la pile. Un certain espacement est laissé entre le bas de la chemise et la surface de la semelle pour éviter que l'acier de la chemise agisse comme

armature de compression à des ratios de déplacement élevés ce qui viendrait modifier les efforts de flexion et de cisaillement dans la zone de rotule plastique.

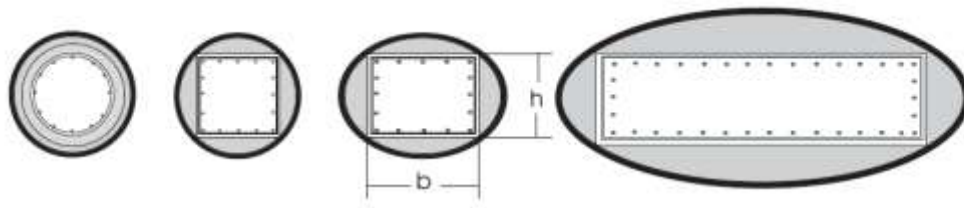


Figure 3.2 renforcement pour les sections circulaires, carrées et rectangulaires à l'aide de chemises d'acier

a. Avantage de la technique :

- Courte durée de réalisation par rapport au chemisage en béton
- Bonne performance des éléments renforcés (bonne ductilité)
- Faible augmentation des sections

b. Inconvénients :

- Coûts relativement élevé
- Nécessite de soudure donc une main d'œuvre qualifiée
- Nécessite d'une préparation spécifique de la surface à traiter (la raideur des tôles nécessite une surface parfaitement plane pour assurer l'uniformité en épaisseur de l'adhésif).
- Nécessite d'un collage sous pression (vérins) pour assurer une adhésion suffisante et éviter les bulles d'air dans la couche de résine de collage



Figure 3.3 : Exemple de piles renforcées par chemisages métalliques

3.1.3 Confinement par matériaux composites (FRP)

Les matériaux composites deviennent de plus en plus populaires pour la réparation et le renforcement des structures en béton armé et les PRF sont maintenant des matériaux de choix pour la flexion. Le cisaillement et le renforcement axial des éléments en béton armé. Pour ce type de travaux, des plaques ou des feuilles en PRF sont collés à l'extérieur des éléments en béton armé en utilisant le procédé de moulage manuel avec une résine époxyde. Ces feuilles ou plaques sont généralement collées sur les faces tendues des éléments en flexion afin d'augmenter leur capacité en flexion, ou sur leurs faces latérales afin d'augmenter la capacité en cisaillement.

Les Polymères Renforcés de Fibres (PRF) conviennent pour une gamme très étendue d'utilisation ceci s'explique notamment par le fait qu'ils sont disponibles sous diverses formes. Ils peuvent s'utiliser sous forme de lamelles, feuilles, tissus ou enveloppes préformées, collés sur les parois extérieures de la structure (moulage au contact) ou encore sous forme de barres pour le renforcement interne du béton.

Les PRF sont constitués de deux éléments principaux : de fibres de résistance élevée et d'une matrice polymère dans laquelle elles sont noyées. Ce sont les propriétés propres à ces deux éléments qui vont conférer au matériau composite ses propriétés globales si intéressantes.

Néanmoins, les propriétés générales du matériau dépendent aussi de la fraction volumique des fibres, de leur orientation, ou encore de la méthode de fabrication. L'efficacité du processus de réparation dépendra aussi de la technique de mise en œuvre, et plus particulièrement du type de procédé liant mécaniquement le matériau de renforcement à la structure que l'on cherche à renforcer

3.1.3.1 Les fibres

Ce sont les fibres qui fournissent la résistance et la rigidité au matériau composite, mais leur utilisation doit être précise car les fibres sont orientées et confère un comportement orthotrope; ainsi les matériaux composites sont beaucoup plus efficaces dans la direction des fibres.

Il existe différents types de fibres permettant de fabriquer un PRF. Cependant les principales fibres utilisées dans le domaine de la construction sont les fibres de carbone, les fibres de verre (Figure 3.4), et les fibres d'aramide, chacune offrant des propriétés bien spécifiques qui détermineront leur emploi.

Les fibres de carbone présentent un coût très élevé (environ 10 fois celui des fibres de verre) mais sont néanmoins de plus en plus employées en raison de leur haut module élastique, de leur très haute résistance, de leur faible masse volumique et de leur résistance aux divers effets environnementaux.

Le domaine du renforcement structural s'appuie donc plus particulièrement sur ce type de fibres pour constituer les armatures composites.



Figure 3.4 : Photo de tissus de fibre de carbone

3.1.3.2 Les matrices

Même si ce sont les fibres qui confèrent au PRF sa résistance et sa rigidité, la matrice joue néanmoins plusieurs rôles essentiels au bon fonctionnement du PRF : elle lie les fibres ensemble tout en les répartissant sur l'ensemble du volume du composite, elle les protège d'un environnement parfois agressif et permet de transférer les forces entre les différentes fibres.

Les polymères les plus utilisés sont les polyesters, en raison de leur faible coût et de leur facilité de fabrication. Les vinylesters, bien que proposés à un coût plus élevé que les polyesters, sont cependant très appréciés du fait de leur haute résistance aux acides et aux alcalins, permettant ainsi de faire face aux alcali-réactions pouvant avoir lieu à l'intérieur du béton.

Pour ces raisons, les vinylesters sont donc souvent employées pour la fabrication des barres et armatures composites destinées à renforcer les ouvrages en béton. Enfin les matrices époxydes présentent de très bonnes qualités d'adhérence et sont donc largement employées lors de l'imprégnation sur place des plaques et feuilles de PRF (par collage). Elles ont cependant un coût encore bien supérieur à celui des polyesters et vinylesters.

3.1.3.3 Les renforts composites

Les matériaux composites à fibres de carbone (PRFC) sont les plus courants avec un grammage compris en 200 à 600 g/m². A titre d'exemple, il est possible de fournir les caractéristiques mécaniques génériques suivantes (données pour un PRF à base de fibres HR et de matrice époxy Figure 11) :

- Module d'Young longitudinal en traction = 90 à 165 GPa
- Résistance longitudinale en traction = 500 à 3000 MPa
- Déformation à la rupture = 1,2 à 1,3%
- Epaisseur de composite comprise entre 0,4 mm et 2 mm

- Force/cm de large de composite compris entre 5 et 30 kN/cm
- Un taux volumique de fibres de 30 à 70 %



Figure 3.5 : Photo d'une plaque composite stratifiée au contact et de plats pultrudés

3.1.3.4 Avantages du matériau composite

Les matériaux composites ont de nombreux avantages par leurs propriétés exceptionnelles, comparé aux autres matériaux qui peuvent être utilisés pour une même application :

- Moins volumineux : La masse est plus compacte et on obtient ainsi un produit moins volumineux pour à propriétés équivalentes.
- Résistance et haut module d'élasticité en traction longitudinale
- Grande résistance à la fatigue et à la déformation ;
- Plus fort : Le matériau est très résistant aux charges, aux chocs grâce au renfort.
- Plus rigide.
- Plus résistant : Le matériau est également résistant aux intempéries et aux agressions chimiques grâce à la matrice qui protège.
- Meilleure durée de vie : La tenue du matériau à travers le temps est très bonne, on observe une absence de corrosion.
- Liberté de forme : La matière est plus malléable et il est plus facile de créer des formes particulières.
- La matière est également plus étanche, plus isolante, etc.
- Grande résistance à l'usure ;
- Absorption des vibrations ;

- Grande stabilité dimensionnelle ;
- Grande stabilité thermique (les fibres de carbone sont pratiquement incombustibles;

3.1.3.5 Inconvénients du matériau composite

Cependant certains inconvénients freinent leur diffusion.

- Les coûts des matières premières et des procédés de fabrication. (jusqu'à 10 fois le coût de l'acier)
- La sensibilité à la chaleur.
- La gestion des déchets engendrés



Figure 3.6 : Exemple de piles renforcées par matériau composite

3.1.3.6 Les caractéristiques du mélange renfort-matrice

On qualifie couramment du nom de pli le demi produit « renfort + résine » présenté sous forme quasi bidimensionnelle, ce peut être :

- Un unidirectionnel + matrice.
- Un tissu (chaîne+trame) +matrice.
- Un mat + matrice.

01 La teneur en masse de renfort

On appelle ainsi le rapport :

$$M_f = \frac{\text{masse de renfort}}{\text{masse totale}} \quad (3.1)$$

En conséquence, la teneur en masse de matrice est telle que :

$$M_m = \frac{\text{masse de matrice}}{\text{masse totale}} \quad (3.2)$$

Ou encore :

$$M_m = 1 - M_f \quad (3.3)$$

02 La teneur en volume de renfort

On appelle ainsi le rapport :

$$V_f = \frac{\text{volume de renfort}}{\text{volume totale}} \quad (3.4)$$

En conséquence, la teneur en volume de matrice est telle que :

$$V_m = \frac{\text{volume de matrice}}{\text{volume total}} \quad (3.5)$$

Ou encore :

$$V_m = 1 - V_f \quad (3.6)$$

On peut passer du taux en masse au taux en volume, et réciproquement:

$$V_f = \frac{\frac{M_f}{\rho_f}}{\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_m}{\rho_m}} \quad (3.7)$$

$$M_f = \frac{V_f \rho_f}{V_f \rho_f + V_m \rho_m} \quad (3.8)$$

03 La masse volumique

C'est, pour le mélange « renfort+matrice » le rapport :

$$\rho = \frac{\text{masse totale}}{\text{volume total}} \quad (3.9)$$

Soit encore :

$$\rho = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (3.10)$$

04 Coefficient de poisson

Il caractérise la contraction dans le sens transverse (T) du pli lorsqu'on le sollicite en traction suivant le sens long (L) :

$$\vartheta_{LT} = \vartheta_f V_f + \vartheta_m V_m \quad (3.11)$$

05 L'épaisseur du pli UD

On définit sous le terme de grammage la masse (m_{of}) de renfort par mètre carré. L'épaisseur d'un pli notée (h), est alors telle que :

$$h = \frac{m_{of}}{V_f \rho_f} \quad (3.12)$$

$$m_{of} = \frac{\text{la masse des fibres}}{\text{la surface du pli}}$$

On peut également exprimer l'épaisseur à partir de la teneur en masse de renfort au lieu de la teneur en volume :

$$h = m_{of} \left(\frac{1}{\rho_f} + \frac{1}{\rho_m} \left(\frac{1-M_f}{M_f} \right) \right) \quad (3.13)$$

06 Modules d'élasticité du pli UD

6.a. Module d'élasticité dans le sens des fibres

Il est bien approché par la relation :

$$E_L = E_{fL} V_f + E_m V_m \quad (3.14)$$

Ou encore :

$$E_L = E_{fL} V_f + E_m (1 - V_f) \quad (3.15)$$

En pratique ce module dépend essentiellement du module longitudinal de la fibre (E_f)

6.b. Module d'élasticité dans le sens travers des fibres

Dans la relation ci-dessous, (E_{ft}) représente le module d'élasticité de la fibre dans le sens transverse à la fibre telle qu'il figure dans le tableau (3.1):

$$E_T = E_m \left(\frac{1}{(1-V_f) + \frac{E_m}{E_{fT}} V_f} \right) \quad (3.16)$$

	Verre « E »	Kevlar	Carbone « HR »	Carbone « HM »
E_{fl} (MPa)	74000	130000	230000	390000
E_{ft} (MPa)	74000	5400	15000	6000
G_{flt} (MPa)	30000	12000	50000	20000
ν_{flt}	0.25	0.4	0.3	0.35

Tableau 3.1. Les modules d'élasticité et coefficient de poisson des fibres.

6.c. Module de glissement

Un ordre de grandeur de ce module difficile à approcher par le calcul est donné par l'expression suivante, dans laquelle (G_{flt}) représente le module de cisaillement de la fibre.

$$G_{LT} = G_m \left(\frac{1}{(1-V_f) + \frac{G_m}{G_{flt}} V_f} \right) \quad (3.17)$$

6.d. Module d'élasticité dans une direction quelconque

Il est possible d'évaluer les modules d'élasticité dans des directions autres que le sens long (L) et travers (T) :

$$E_x = \frac{1}{\frac{C^4}{E_L} + \frac{S^4}{E_T} + 2C^2 S^2 \left(\frac{1}{2G_{LT}} - \frac{\nu_{LT}}{E_L} \right)} \quad (3.18)$$

$$c = \cos \theta, \quad s = \sin \theta$$

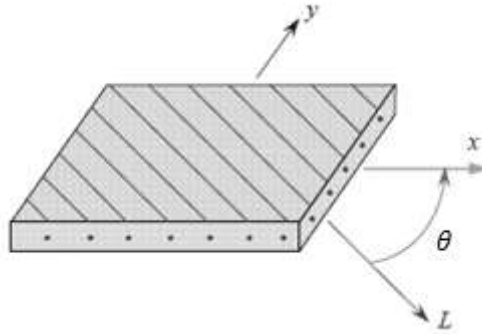


Figure 3.7. Pli unidirectionnel à direction quelconque.

07 Résistance à la rupture d'un pli UD

Lorsque les fibres se rompent avant la matrice, on obtient pour le mélange et pour une sollicitation dans la direction (L) :

$$\sigma_{Lrupt} = \sigma_{frupt} V_f + \sigma_{mrupt} V_m \quad (3.19)$$

$$\sigma_{Lrupt} = \sigma_{frupt} \left(V_f + (1 - V_f) \frac{E_m}{E_f} \right) \quad (3.20)$$

08 Résistance à la rupture d'un pli UD dans une direction quelconque

On note la décroissance rapide de cette résistance lorsqu'on s'écarte de la direction des fibres, elle est donnée par la relation qui suit :

$$\sigma_{xrupt} = \frac{1}{\sqrt{\frac{C^4}{\sigma_{Lrupt}^2} + \frac{S^4}{\sigma_{Trupt}^2} + \left(\frac{1}{\tau_{LTrupt}^2} - \frac{1}{\sigma_{Lrupt}^2} \right) C^2 S^2}} \quad (3.21)$$

$$c = \cos \theta, \quad s = \sin \theta$$

09 Les coefficients de dilatation thermique

Les coefficients de dilatation thermique longitudinal (L) et suivant le sens travers (T).

$$\alpha_L = \frac{\alpha_f E_{fL} V_f + \alpha_m E_m V_m}{E_{fL} V_f + E_m V_m} \quad (3.22)$$

$$\alpha_T = \alpha_m V_m + \alpha_f V_f + \frac{(\vartheta_f E_m - \vartheta_m E_{fL})}{\frac{E_m}{V_f} + \frac{E_{fL}}{V_m}} (\alpha_f - \alpha_m) \quad (3.23)$$

10 Modules d'élasticité et coefficient de poisson du pli tissé

Le pli tissé est alors remplacé par un seul pli UD anisotrope qui aura le même taux volumique (V_f) de renfort et d'épaisseur (ht), (x) étant la direction de la chaîne et (y) celle de la trame, on a alors :

$$K = \frac{n_1}{n_1 + n_2} \quad (3.24)$$

n_1 : nombre de fils de chaîne par mètre.

n_2 : nombre de fils de trame par mètre.

$$E_x \approx K E_L + (1 - K) E_T \quad (3.25)$$

$$E_y \approx K E_T + (1 - K) E_L \quad (3.26)$$

$$G_{xy} = G_{LT} \quad (3.27)$$

$$\vartheta_{xy} = \frac{\vartheta_{LT}}{\left(K + (1 - K) \frac{E_L}{E_T}\right)} \quad (3.28)$$

11 Modules d'élasticité et coefficient de poisson du pli chargé avec des mats

Les mats sont des renforts bidimensionnels à fibres coupées (longueur comprise entre 5 et 10 cm). Les mats sont isotrope dans leur plan (x, y), ils peuvent donc être caractérisés par deux constantes élastiques seulement :

$$E_{mat} \approx \frac{3}{8} E_L + \frac{5}{8} E_T \quad (3.29)$$

$$\vartheta_{mat} \approx 0.3 \quad (3.30)$$

$$G_{mat} \approx \frac{E_{mat}}{2(1 + \vartheta_{mat})} \quad (3.31)$$

Avec :

E_L et E_T : les modules élastiques (sens long et sens travers) de l'unidirectionnel qui aura le même taux volumique (V_f) de renfort que le pli de mat.

12 Description de l'arrangement des fibres dans la matrice

Dans le cas des composites à matrice organique et renfort fibreux, la distribution des fibres dans la matrice n'est jamais parfaitement homogène, figure (3.7). Cette dernière dépend notamment de l'aptitude au mouillage de la fibre par la matrice et du procédé de mise en œuvre.

Un examen de la microstructure du composite révèle ainsi systématiquement des fluctuations locales de la fraction de renfort avec des zones plus ou moins riches en fibres.

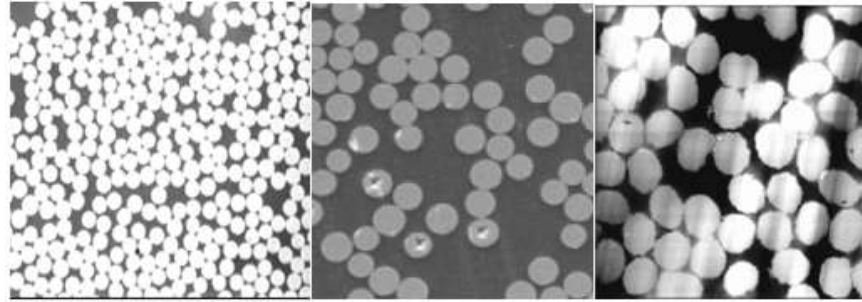


Figure 3.7. Des coupes transversales des composites unidirectionnels.

Dans de nombreux problèmes micromécaniques, notamment celui de la détermination des modules élastiques, il est cependant nécessaire de schématiser la structure du composite en considérant des arrangements périodiques permettant de mener à bien les calculs. Les configurations de type hexagonal ou carré sont les plus usitées:

Dans le cas d'un arrangement carré, figure (3.7), la fraction volumique de renfort peut être reliée au diamètre (d) de la fibre et au côté (c) de la cellule élémentaire par la relation (3.32) :

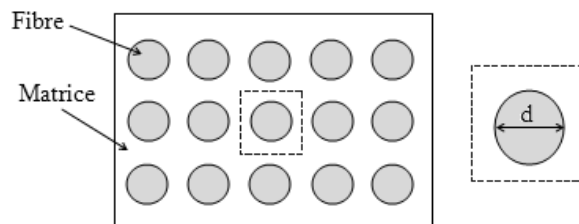


Figure 3.7. Arrangement carré et cellule élémentaire.

$$V_f = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{c} \right)^2 \quad (2.32)$$

La fraction volumique de fibres maximale est donc obtenue en posant ($c = d$) soit :

$$V_{fmax} = \frac{\pi}{4} \quad (3.33)$$

Dans le cas d'un arrangement hexagonal, figure (3.8), la fraction volumique de renfort peut être reliée au diamètre (d), de la fibre et à la distance (R), entre la fibre centrale et ses plus proches voisins :

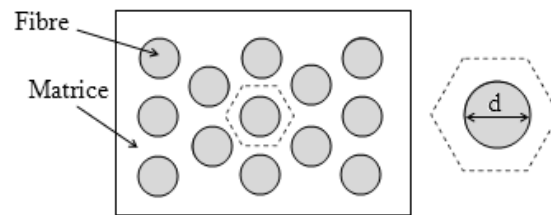


Figure 3.8. Arrangement hexagonal et cellule élémentaire.

$$V_f = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left(\frac{d}{R} \right)^2 \quad (3.34)$$

La fraction volumique de fibres maximale est obtenue pour $R=d$ soit :

$$V_{fmax} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \quad (3.35)$$

CHAPITRE 4 :

Étude de cas

4.1-Introduction :

Un ouvrage d'art est une construction de grandes dimensions dont l'étude et la réalisation nécessitent des moyens exceptionnels faisant largement appel aux connaissances et au savoir-faire du génie civil. A titre d'exemple, on peut citer les types d'ouvrages tels que : les ponts .

Le terme pont est communément utilisé pour qualifier une structure reliant deux points séparés par une dépression ou par un obstacle – que ceux-ci soient naturels (cours d'eau, vallée, bras de mer) ou créés par l'homme (route, chemin de fer, canal, rivière).

4.2. Présentation de l'ouvrage :

L'ouvrage est situé dans la Wilaya de Tebessa sur le CW02 au PK53+900. C'est un pont en béton armé à 05 travées isostatiques de 15,20ml.

- Longitudinalement nous avons un ouvrage à 05 travées de 15.20 m en béton armé et deux piles culées de 1.90 m (mur en retours) soit au total un linéaire de 79.90 m.
- Transversalement l'ouvrage est constitué par une chaussée de 7.00m encadrée par des trottoirs de 1.20m, équipés de gardes corps métalliques.
- La dalle en béton armé repose 10 poutres rectangulaires entretoisées aux abouts.
- **Les Appuis de rives :** sont constitués de piles -culées enterrées comportant 04 poteaux surmontés par un chevêtre rectangulaire.
- **Les Appuis centraux :** sont constitués par des piles voiles surmontées par un chevêtre en béton armé.



Figure 4.1 : pont à la Wilaya de Tebessa sur le CW02 au PK53+900

4.3 Auscultation détaillée et diagnostic

La deuxième phase de l'étude, est faire une Auscultation détaillée de l'ouvrage et l'établissement d'un diagnostic. Cette phase consiste à effectuer un constat et un relevé exhaustif de tous les désordres affectant l'ouvrage, surtout en ce qui concerne les équipements, La structure et les éléments de protection de l'ouvrage.

Une interprétation des désordres se fera à partir du fonctionnement de l'ouvrage et des risques potentiels sur la sécurité des usagers et la durabilité de l'ouvrage.

Pour ce faire, cette opération est intervenue une semaine après l'inspection préliminaire et a concerné la totalité des parties accessibles de l'ouvrage.

Cette inspection a été effectuée visuellement et complétée par des sondages :

- Au marteau de géologue (sondage des parties de béton),
- Ainsi que le relevé dimensionnel pour la reconstitution des données géométriques de l'ouvrage.

➤ **Examen visuel :**

Il a consisté à observer soigneusement chaque élément accessible de l'ouvrage afin de déceler les anomalies visibles à l'œil nu tel que les fissurations de béton ou sa dégradation, l'état des équipements, les déformations apparentes des matériaux et d'une façon général l'état de conservation de l'ouvrage.

➤ **Mesurage :**

Etant donné l'inexistence des plans de construction, une campagne de mesurage à été effectuée (chaine, cordeau et fil d'axe), afin de reconstituer la géométrie de la coupe transversale et longitudinale, la vue en plan de l'ouvrage ainsi que les dimensions des culées et de la pile centrale.

➤ **Inspection des éléments en béton :**

La solidité des gardes corps et lisses ont été vérifiées par martelage, les parties en béton ont fait l'objet d'une inspection minutieuse pour recenser les défauts visibles.

➤ **Relevé des déficiences :**

Ce relevé est consigné sur un carnet d'inspection, avec les croquis à main levée correspondants.

Les défauts localisés sont pris en photos, mesurés et dessinés sur des croquis accompagnés de commentaires qui serviront plus tard à étayer la solution pratique de réhabilitation retenue.

➤ **Essais non destructif :**

Pour avoir une idée sur la qualité du béton en place. Une campagne d'essais non destructifs au scléromètre a été effectuée au niveau des voiles des piles et des pile-culées et des poutres.

4.3.1 Constat et analyse des désordres

B.1. Au niveau du tablier

B.1.1 Dalle

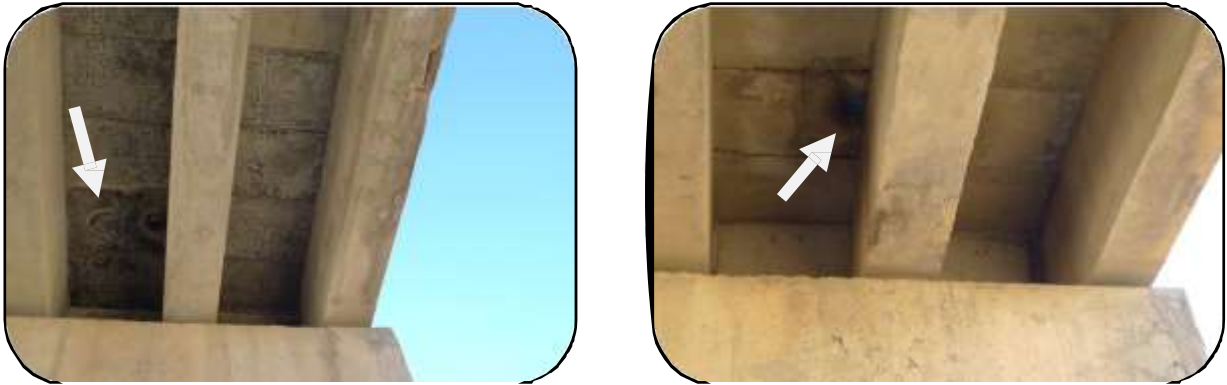


Figure 4.2 : laitances noires au niveau de la dalle.

- **Nature des dégradations:**
 - laitances noires par endroits.
- **Cause des dégradations :**
 - défaut d'étanchéité non généralisé
- **Conséquences :**
 - altération du béton
- **Diagnostic:**
 - Suppression des infiltrations au niveau du trottoir.

B.1.2. Poutre de rives différentes travées :



Figure 4.3 : Cassure au droit du talon et Perte d'enrobage

➤ **Nature des dégradations : poutres et entretoises**

- Cassure au droit du talon
- Perte d'enrobage
- Aciers apparents

➤ **Cause des dégradations :**

- Infiltration des eaux par le trottoir

➤ **Conséquences :**

- perte d'enrobage
- Corrosion des aciers
- ségrégation du béton et des aciers.
- perte de résistance de la poutre

➤ **Diagnostic :**

- Traitement des aciers et béton
- Renforcement de la poutre par TFC.

B.1.3. Poutres d'abouts : pour l'ensemble des travées du pont:



Figure 4.4 : Coulures noires Eclatement de l'enrobage

➤ **Nature des dégradations : poutres de rive pour l'ensemble du pont:**

- Coulures noires et laitances noires
- Eclatement de l'enrobage

➤ **Cause des dégradations :**

- infiltration des eaux par l'intermédiaire des joints.
- infiltration des eaux au niveau des corniches

➤ **Conséquences :**

- perte d'enrobage
- Corrosion des aciers
- ségrégation du béton.
- perte de résistance de la poutre

➤ **Diagnostic :**

- Suppression des infiltrations
- Traitement des aciers et béton

B.1.4. Poutres intermédiaires et poutres de rive: fissuree inclinées



Figure 4.5 : Fissures inclinées

- **Nature des dégradations :**
 - Fissures inclinées
- **Cause des dégradations :**
 - Effet des charges roulantes.
 - Effort tranchant important
 - Epaisseur d'about insuffisante
- **Conséquences :**
 - perte de résistance de la poutre
- **Diagnostic :**
 - Renforcement de la poutre

B.1.5 Poutres intermédiaires et poutres de rive: fissures verticales



Figure 4.6 : Fissures verticales

- **Nature des dégradations :**
 - Fissures verticales
- **Cause des dégradations :**
 - Effet des charges roulantes.
 - Moment important
- **Conséquences :**
 - perte de résistance de la poutre
 - flexion de la poutre et absence de contre flèche
- **Diagnostic :**
 - Renforcement de la poutre

B.1.6. Entretoises d'about (entre P5 et P6, côté Oum Ali)



Figure 4.7 : Eclatement de béton

➤ **Nature des dégradations :**

- Eclatement de béton
- Armatures corrodées

➤ **Cause des dégradations :**

- Oxydation des armatures
- Effet des charges roulantes.
- Mauvaise qualité de béton
- infiltration des eaux au niveau des du joint de chaussée

➤ **Conséquences :**

- perte de résistance de l'entretoise

➤ **Diagnostic :**

- A réparer et renforcer

B.2. Trottoirs :



Figure 4.8 : Perte d'enrobage et Apparition des aciers

➤ **Nature des dégradations:**

- Perte d'enrobage
- Apparition des aciers

➤ **Cause des dégradations :**

- Défaut congénital

➤ **Conséquences :**

- Infiltrations des eaux sur la table de compression de la poutre
- Corrosion des aciers et du béton des poutres

➤ **Diagnostic:**

- Danger pour la structure
- Suppression des infiltrations
- Traitement des joints secs entre les corniches et suppression des dalettes.

B.3. Equipements

B .3.1. Joints de chaussée



Figure 4.9 : Joints de chaussée entièrement fermés

- **Nature des dégradations:**
 - Joints entièrement fermés
- **Cause des dégradations :**
 - Enrobé et gravillons
- **Conséquences :**
 - joints non fonctionnels.
- **Diagnostic:**
 - joints ne jouant plus leurs rôles.
 - Remplacement des joints.

B.3.2. Appareils d'appuis :



Figure 4.10 : Appareils d'appui en néoprène déformés

➤ **Nature des dégradations:**

- Appareils d'appui en néoprène simplement collé Complètement déformés.
- Obsolètes et inadaptés.

➤ **Solution**

- A changer en totalité.

B.3.3. Protection parasismique

Le dispositif de protection parasismique n'existe pas sur les piles et les culées. Ce dispositif doit être mis en place pour protéger l'ouvrage.

B.4. Pile - culée : poteaux



Figure 4.11 : fissures horizontales

➤ **Nature des dégradations:**

- fissures horizontales

➤ **Cause :**

- Effort horizontal important
- défaut de réalisation

➤ **Conséquences**

- Cisaillement en tête des poteaux.
- Danger pour la structure

➤ **Diagnostic :**

- Renforcement immédiat

B.4.1. Pile - culée : – sommier et murs en retour



Figure 4.12 : éclatement de l'enrobage

➤ **Nature des dégradations:**

- éclatement de l'enrobage

➤ **Cause :**

- Infiltrations des eaux

➤ **Conséquences**

- corrosion des aciers

➤ **Diagnostic**

- traitement des aciers et réparation du béton

B.4.2. protection de l'ouvrage : Remblais d'accès



Figure 4.13 : Insuffisance de protection des remblais et des berges

➤ **Nature des dégradations:**

- Insuffisance de protection des remblais et des berges

➤ **Cause :**

- Défaut congénital

➤ **Conséquences**

- Instabilité des remblais d'accès

➤ **Diagnostic :**

- Amélioration de la protection

B.4.3. Piles : chevêtres et voiles et voiles : infiltrations - laitances - ségrégation de béton



Figure 4.14 : laitances et ségrégation de béton

➤ **Nature des dégradations:**

- Laitances et coulures noires sur le chevêtre

➤ **cause :**

- infiltrations des eaux

➤ **Conséquences**

- Ségrégation du béton
- Corrosion des aciers

➤ **Diagnostic :**

- Suppression des infiltrations
- Traitement des parties affectées.

B4.4. Piles : Voiles



Figure 4.15 : Eclatement de l'enrobage a la base des futs

➤ **Nature des dégradations:**

- Eclatement de l'enrobage a la base des futs (des 05 piles)
- Apparition des aciers

➤ **cause :**

- Enrobage insuffisant

➤ **Conséquences**

- Corrosion des aciers
- Danger pour la structure

➤ **Diagnostic :**

- Chemisage des futs à la base

C . Investigations complémentaires

C.1 Auscultation sclérometrique

Dans le cadre des investigations, une campagne d'auscultation au scléromètre (NF-EN-12504-2) nous a permis d'avoir une appréciation sur la qualité du béton en place des futs des 03 piles concernées par l'éclatement de l'enrobage.

C.1.1 Essais : sur Béton – pile culée (coté Oum Ali)



Figure 4.16 : Auscultation sclérométrique



Résultats des essais sclérométriques sur les piles culées

POTEAUX				
N°	P1	P2	P3	P4
Moyenne Pour 10 coups : Is	34	34	45	45
Rc (en bar) E- cylindrique	260	260	420	420

Le béton des poteaux de la pile-culées (coté Oum Ali) a une résistance moyenne à la compression de 340 bars, qui est admissible. Les résistances ne sont pas Homogènes.

Résultats des essais sclérométriques sur le chevrete de la pile – culée (coté Oum Ali)

POTEAUX				
N°	P1	P2	P3	P4
Moyenne Pour 10 coups : Is	34	34	45	45
Rc (en bar) E- cylindrique	260	260	420	420

Le béton des poteaux de la pile-culées (coté Oum Ali) a une résistance moyenne à la compression de 340 bars, qui est admissible. Les résistances ne sont pas Homogènes.

CHEVETRE- S1 -			
N°	S11	S12	S13
Moyenne Pour 10 coups : Is	36	34	34
Rc (en bar) E- cylindrique	280	260	260

Le béton du chevetre de la pile-culée (coté Oum Ali) a une résistance moyenne à la compression de 266 bars ,qui est admissible.

Résultats des essais sclérometriques sur les poutres – Travée -1-



POUTRES										
N°	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Moyenne Pour 10 coups : Is	33	42	38	36	32	34	42	38	32	34
Rc (en bar) E- cylindrique	250	380	330	280	230	260	380	330	230	260

Le béton des poutres de la travée T1 (coté Oum Ali) a une résistance moyenne à la compression de 293 bars qui est admissible. **Les résistances ne sont pas Homogènes pour les poutres (Les poutres P5 et P9 ont une résistance faible.)**

Diagnostic final :

Les désordres sont dus principalement :

- Aux Infiltrations des eaux de ruissellements sur les poutres de rives, sur les chevêtres des piles et sur les sommiers des pile- culées (Infiltrations provenant des dallettes de trottoirs et des joints de chaussée)
- Au défaut de fonctionnement des équipements de l'ouvrage (joints de chaussée – appareils d'appui - gargouilles)
- A l'augmentation des charges d'exploitation (cisaillement des poteaux)
- A un défaut de qualité d'exécution (enrobage-qualité du béton)
- A un léger affouillement au droit de la travée 01.

4.4. Conclusion :

L'ouvrage ne présente pas de danger à moyen terme. Mais les défauts constatés mettent en danger la pérennité de l'ouvrage car les poutres sont en mauvais état. Les travaux de réparation et de confortement doivent être réalisés par une entreprise spécialisée.

Ils se résument à :

- A la suppression des infiltrations au niveau du tablier et des appuis.
- Au renforcement des poutres
- A des travaux de réparation de béton.
- A la mise à niveau des équipements.
- A la protection des remblais et des berges

4.5. Diagnostic et solutions de réparation

La troisième phase de l'étude, est faire un diagnostic final et solutions de réparation. Cette phase est l'aboutissement de la visite préliminaire et de la visite détaillée y compris l'auscultation de l'ouvrage avec les conclusions des causes exactes des désordres relevés. Elle comprend un avis sur l'état de l'ouvrage et des propositions de mesures de maintenance, des suggestions concernant

les travaux d'entretien et de réparation à effectuer. Cette phase doit aboutir à l'élaboration de la solution finale de réhabilitation et servira à l'établissement du dossier technique de réhabilitation de telle façon à ce qu'il soit exploitable par l'entreprise qui doit intervenir éventuellement.

4.6. Synthèse diagnostic

Les défauts d'exécution (générant des infiltrations) et l'augmentation sensible du trafic sur cet axe routier sont les deux causes principales des désordres. L'ouvrage constitué par (05) tabliers en béton armé présente des pathologies bien identifiées :

- Pour la partie tablier (fissuration des poutres et des entretoises, infiltrations),
- Pour le béton des piles-culées (cisaillement des poteaux, fissuration et altération) ;
- Pour le béton des piles (fissuration, perte d'enrobage).

- Les chevêtres des piles et les sommiers des piles - culées subissent des altérations visibles (ségrégations) dues à l'agressivité des eaux de ruissellements nocives pouvant se transformer en déficiences graves si elles ne sont pas prises en charge.
- Les équipements (joints de chaussée, appareils d'appuis, gargouilles, gardes corps et corniches) sont à mettre à niveau et doivent être repris.

Globalement l'ouvrage ne présente aucun danger immédiat pour les usagers. Mais les défauts constatés mettent en danger la pérennité de l'ouvrage car les poutres sont en mauvais état. Les travaux de réparation et de confortement doivent être réalisés par une entreprise spécialisée.

4.7. Solutions préconisées

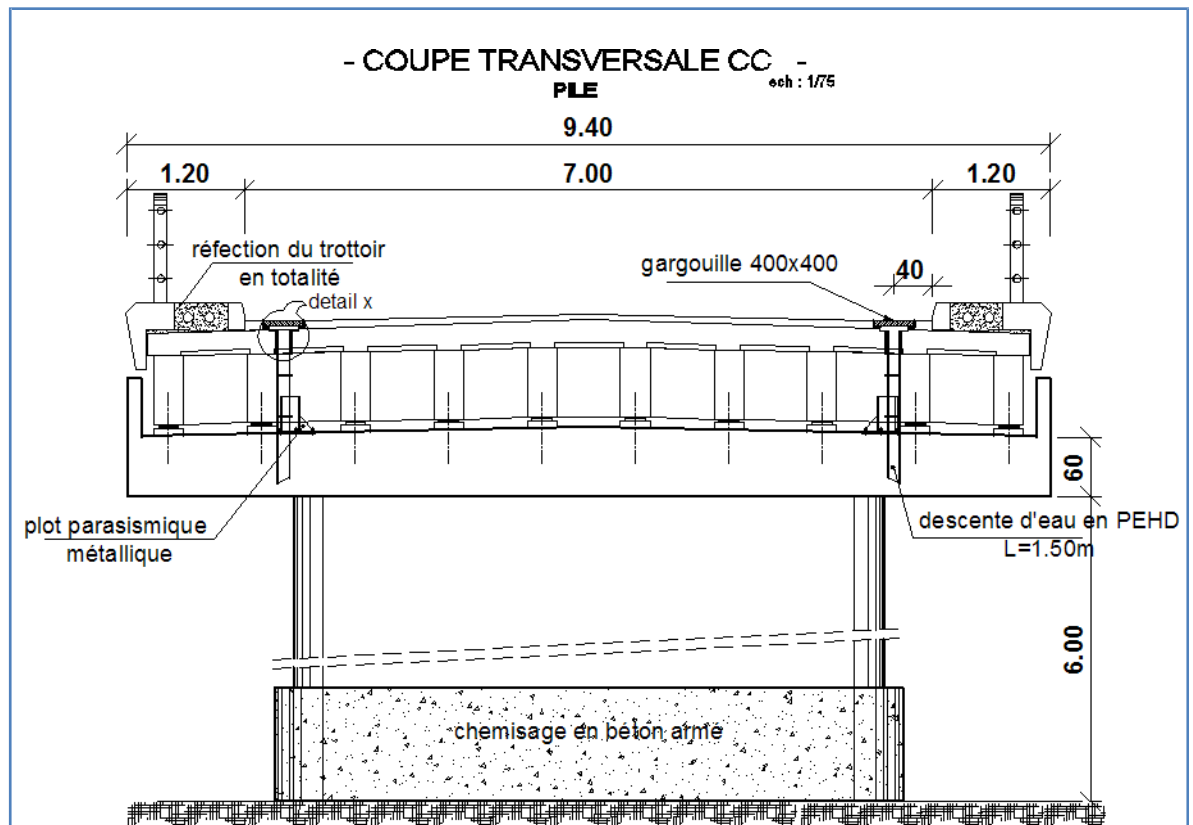
Afin de pérenniser, et sécuriser l'ouvrage, il est nécessaire de procéder aux travaux suivants:

- suppression des infiltrations au niveau du tablier et des appuis
- Renforcement des poutres et entretoises endommagées en utilisant des techniques appropriées tel que l'injection de résine, la fibre de carbone (TFC) par exemple,
- Réparation des bétons dégradés des sommiers de piles et culées par un micro béton adjuvanté.

- Réparation des bétons des trottoirs, y compris les scellements des gardes corps.
- Réfection totale de l'étanchéité
- Remplacement des équipements : joints de chaussée, appareils d'appui, gargouilles.
- Création de plots parasismiques.
- Réparation des corniches et gardes corps.
- Réfection du béton dégradé des piles et culées (injections - chemisage)
- Recalibrage de l'oued à l'amont et à l'aval.
- Amélioration de la protection existante de la pile culée (coté Oum Ali).
- Consolidation de la protection des remblais par un perré maçonné.

Au niveau du tablier 03 solutions sont à envisager :

- Le renforcement des poutres par béton projeté est une solution qui est possible mais nécessitera la déviation du trafic car la projection de béton ne peut se faire sous circulation à cause des vibrations générées par les véhicules.
- La dépose et remplacement des poutres de rives du tablier est envisageable mais nécessitera la fermeture de la moitié de la chaussée, ce qui est difficilement réalisable sur cet axe routier. Cette solution extrême nécessitera une signalisation et une surveillance permanente.
- On a opté pour le Renforcement des poutres par le système TFC qui a fait ses preuves, car la mise en œuvre est plus pratique et moins contraignante et peut être réalisée avec le maintien du trafic routier.



4.8. Méthodologie d'intervention

4.8.1. Au niveau du tablier : de façon précise il faut réaliser les opérations suivantes :

- a. Le sablage des poutres et entretoises y compris la face inférieure de la dalle.
- b. l'injection des fissures par de la résine époxydique.
- c. La passivation des aciers d'armatures et leur reconstitution.
- d. La réfection, des talons des poutres et des entretoises, par un micro béton à haute performance adjuvanté.
- e. Le Renforcement des poutres par collage de lamelles en fibres de carbone de type SIKARBOCARB ou équivalent.
- f. Le Renforcement par collage de tissu en matériaux composite en fibres de Carbone de type SIKARBOCARB XEX 230C ou équivalent.
- g. Le renforcement des poutres doit suivre une méthodologie pratique et devra être strictement contrôlé au cours de la réalisation.

4.8.2. Réhabilitation des parties en béton :(sommiers-talon des poutres – entretoises- consoles)

Cette opération concerne les parties endommagées et les parties à démolir et à reconstruire, elle implique des étalements préliminaires si nécessaire ; elle comporte les opérations suivantes :

- **Démolition** mécanique des bétons, y compris piquage des matériaux friables jusqu'aux zones saines
- **Réparation** des armatures dégradées
 - élimination de la rouille par brossage, ou sablage éventuellement.
 - dégagement longitudinal des barres au delà des parties corrodées.
 - renforcement des armatures sectionnées par ajout de barres en acier de section identique ou supérieure ; les cadres seront remplacés, avec liaison à la partie reconnue saine.
 - Passivation de l'armature par imprégnation d'un inhibiteur de rouille (sikarbo armatec 108) ou équivalent.

▪ **Reconstitution de bétons par les étapes suivantes :**

- application d'une couche de résine époxydique type sikafloor 94 LP constituant un primaire d'adhérence (couche d'accrochage)
- mise en œuvre du micro béton additionné de fumée de silice type sikacrete HD.
- Application d'une couche de finition au mortier, selon l'état de la surface
- Traitement final de protection.

4.8.2.1. Traitement des Fissures :

- préparation par piquage, brossage, sablage éventuel, lavage et dépoussiérage
- traitement par injection sous pression de résine époxydique type sikadur 52 injection avec mise en place de cavaliers d'injection fixés à la colle sikadur 30 et colmatage des fissures au mortier rapide.

La norme NF P 95-103 « Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie Traitement des fissures et protection du béton » s'applique pour ce type de réparations.

La norme concerne les techniques ou procédés suivants :

- **L'injection** : Il s'agit de faire pénétrer dans des fissures un produit susceptible de créer une liaison mécanique et/ou une étanchéité entre les parties disjointes.
- **Le calfeutrement** : C'est un colmatage avec des produits souples pour rétablir une étanchéité des fissures à l'eau et à l'air, ou pour éviter des pénétrations de matières solides risquant de bloquer le mouvement de la fissure ou du joint.

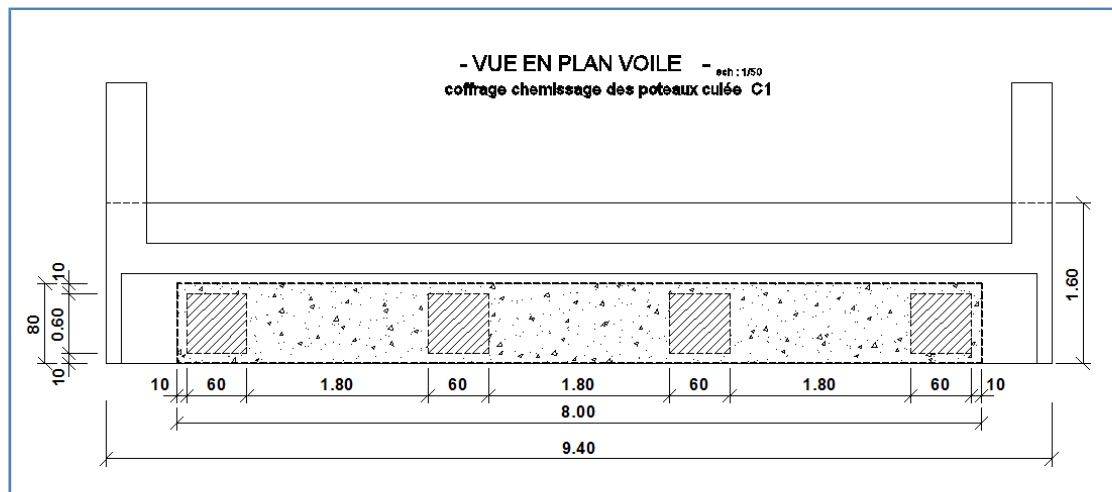
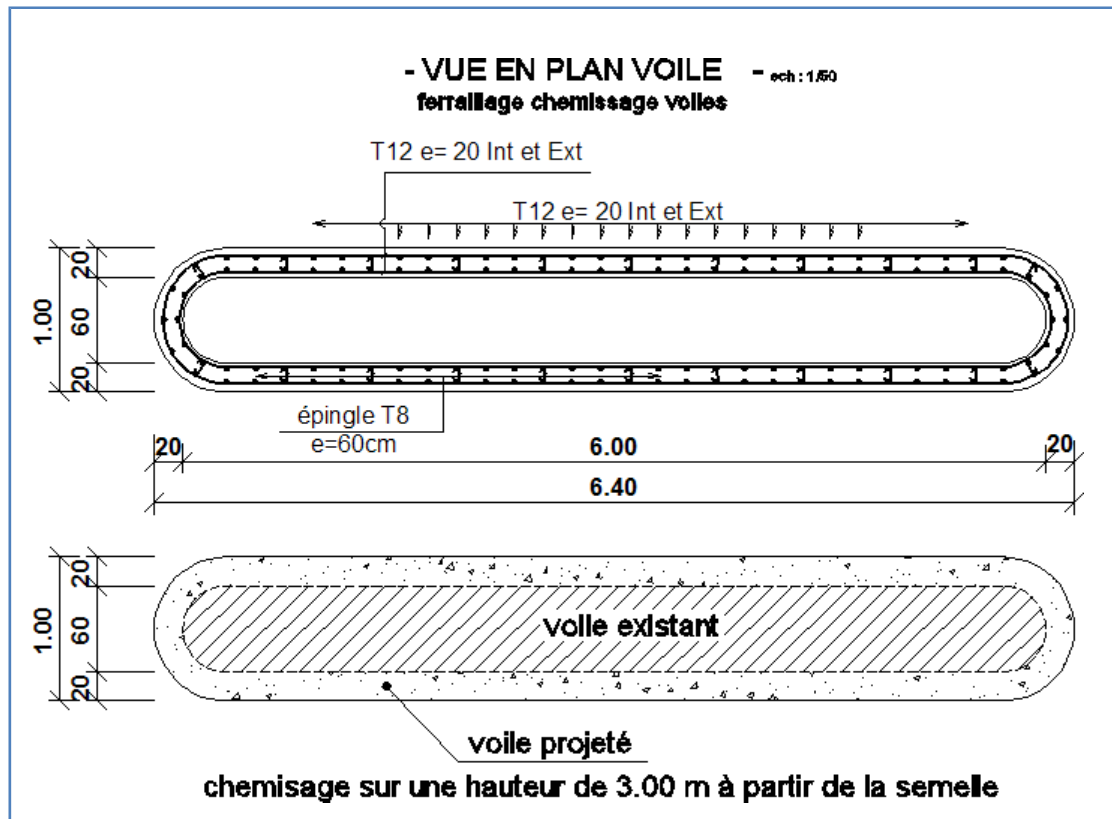
4.8.2.2. Produits pour injections (NF P 18-800) :

- **Les coulis de ciment** : Les coulis de ciment sont constitués : de ciments conformes à la norme NF P 15-301 ;
- **Résines époxydiques** : Ce sont des systèmes à deux composants liquides sans solvant à mélanger au moment de l'emploi. Ils peuvent être chargés avec des produits minéraux. Leur vitesse de polymérisation et leur module d'élasticité peuvent être choisis selon les besoins du chantier.

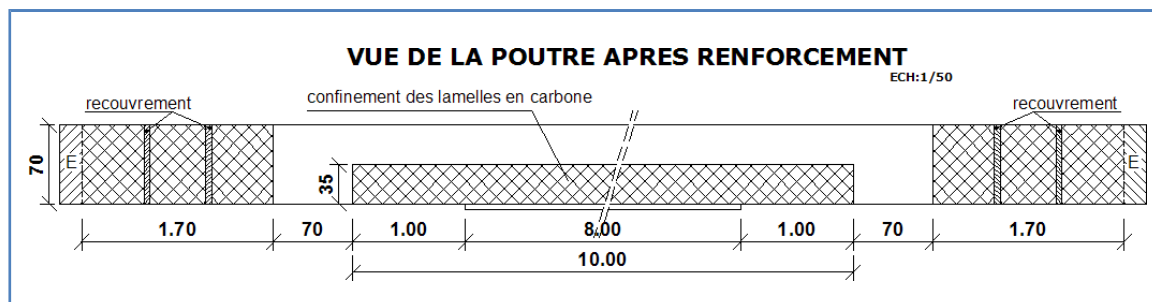
4.8.3 Les appuis : chemisage

- les poteaux cisailés des piles-culées seront réparés par chemisage.
- Les voiles des piles seront chemisés à la base pour pallier à l'insuffisance de l'enrobage.

Cette opération nécessitera le respect des plans de réhabilitation.



4.8.4 Le renforcement des poutres par Lamelles et Tissu en Fibre de Carbone



4.8.4.1. Renforcement par le tissu en fibre de carbone (TFC) :

Le choix de renforcement des ouvrages diffère d'un cas à l'autre, cette différence dépend non seulement de la nature des désordres constatés mais aussi de la possibilité d'exécution, du délai et du coût de réparation. Parmi les méthodes de renforcement, on retrouve celle qui utilise le procédé TFC (Tissu en Fibres de Carbone).

Ce procédé est basé sur le principe d'un placage de matériau, résistant aux efforts de traction, judicieusement collé sur les zones tendues de la pièce à renforcer pour en augmenter les performances de fonctionnement. Le procédé

TFC a essentiellement un rôle de renforcement structurel aux efforts engendrés par les effets de flexion et d'efforts tranchants. C'est un composite à base de fibres de carbone matricées dans un liant synthétique appliqué à froid dans le but d'être intégré par adhérence au support pour former le complément d'armature de renforcement désiré.

▪ Préparatifs des supports

Le support doit répondre à certains critères de réception géométriques, mécaniques et physico-chimiques. Les caractéristiques des matériaux du support doivent être en adéquation avec les efforts d'entraînement engendrés par le renfort et s'appliquant sur l'interface de collage, soit une contrainte de cisaillement admissible avoisinant 2 MPa. Les états de surface du support et les défauts géométriques locaux doivent être traités avant l'application.

4.8.4.1. Résine de la matrice du composite

Le procédé de renforcement de structure par TFC nécessite l'utilisation d'une résine synthétique destinée à imprégner le tissu et assurer la liaison avec le support à renforcer.

Elle est constituée de deux composants pré dosés en jeux de 1, 2 ou 5 Kg prêts à l'emploi.

La vitesse de durcissement, après l'application, est liée à la température ambiante.

4.8.4.2. Fibres de constitution du tissu

Les fibres de carbone se présentent sous forme de mèches noires contenant, suivant le type demandé, de 3000 à 24000 mono filaments de 5 à 7 microns. Les fibres de carbone bénéficient de caractéristiques mécaniques sans équivalent et de propriétés physiques très étendues :

- grande résistance et haut module d'élasticité en traction longitudinale ;
- grande résistance à la fatigue et à la déformation ;

Les fibres de carbone sont utilisées sous forme de matériaux composites pour conférer au produit fini le meilleur des propriétés physiques, statiques et dynamiques. Ces matériaux anisotropes présentent une contrainte à la rupture très élevée pour une densité cinq fois moins que celle de l'acier.

4.8.4.3. Tissu du composite TFC

Le tissu du composite TFC est constitué de fibres de carbone orientées à 90° dans la chaîne et dans la trame de manière à obtenir une armature souple et déformable pouvant épouser les formes du support. C'est un tissu bidirectionnel à sens de résistance privilégié dans le sens de la chaîne, il est constitué de 70% de fibres dans le sens de la chaîne et de 30% de fibres dans le sens de la trame. Le repérage du sens privilégié est simple dans la mesure où le TFC est livré en largeurs standard et que le sens de meilleure résistance est dans le sens longitudinal du coupon.

4.8.4.3.1 Composite TFC

Le composite TFC est l'ensemble du tissu matricé dans la résine de synthèse. Le composite obtenu par fabrication in situ est constitué d'environ 40% de tissu et 60% de résine. Ces proportions peuvent varier à l'exécution dans une fourchette de plus ou moins 7% selon les conditions d'application sur le chantier (température ambiante, surface du support...).

Les caractéristiques annoncées dans le tableau ci-dessous sont les caractéristiques minimales garanties. Elles concernent le tissu imprégné qui constitue le corps du composite, donc la section effective résistante.

Epaisseur moyenne	1/10 mm	4.3
Traction à la rupture 1 cm de largeur chaîne	daN	600
Traction à la rupture 1 cm de largeur trame	daN	250
Module E	GPa	105

Composition : 65% fibres, 35% matrice. Tissu : 70% fibres de chaîne, 30% fibres de trame

4.8.4.3.1 Pose de TFC

- **Conditions climatiques**

La pose du TFC doit être réalisée sur un support dont la température est supérieure à 5°C, et à température ambiante comprise entre 5°C et 45°C. On s'assure qu'il n'y a pas de ruissellement d'eau sur le support.

- **Conditions de réception du support**

On doit s'assurer de la résistance mécanique du support. Le support doit être bien préparé pour recevoir le tissu.

- **Conditions de réalisation**

Le tissu doit être appliqué sur une couche de résine humide. La pose du tissu sur la couche humide se fait en partant d'une extrémité vers l'autre par placage sur la résine de collage à l'avancement.

La bande du tissu doit être posée sans pli, et sans étirement excessif sur un support préalablement profilé. Après la pose, le tissu doit être fermement plaqué sur le support par un marouflage permettant l'imprégnation de la colle dans la fibre et l'élimination des bulles d'air éventuelles. Le marouflage est réalisé au moyen d'un rouleau en élastomère souple ou d'un rouleau de peintre à poils ras muni de son tube de protection en polyéthylène.

Après l'opération de marouflage, le tissu doit avoir un léger poisseux au toucher, bien que la présence de résine ne soit pas perceptible en tout point.

Une deuxième couche de résine (dite couche de fermeture) est destinée à donner l'apport de matière époxydique permettant d'achever l'imprégnation du tissu. Cette deuxième couche est appliquée immédiatement après la pose du Tissu. En aucun cas cette couche ne peut être appliquée après polymérisation de la première couche.

L'application de la couche de fermeture est réalisée au moyen d'un couteau à enduire passé dans le sens des fibres sans excès de pression. La quantité de mise en œuvre sur cette couche est de 700gr/m² plus ou moins 50gr.

4.8.4.4. Renforcement par des lamelles en fibre de carbone :

La Lamelle composée de fibres de carbone, noyées dans une matrice époxydique présente une :
Très haute résistance mécanique en traction.

- Epaisseur faible (1,2 mm).
- Excellent comportement à la fatigue.
- Insensible à la corrosion.

a. Domaines d'application

Utilisation avec la colle époxydique SIKADUR 30 COLLE dans le cadre du procédé SIKACARBODUR pour la réparation et le renforcement des structures en béton, dans les cas suivants :

- augmentation des charges d'exploitation.
- Ferrailage insuffisant par conception, défaut de positionnement, etc. endommagement de l'existant : corrosion ou sectionnement d'armatures, dommage par accident, etc.,
- amélioration des conditions de service : réduction de flèche de plancher, réduction des contraintes dans les armatures, réduction de largeur de fissures.

b. Caractéristiques physiques et mécaniques

- Résistance à la traction* : > 2 800 MPa.
- Allongement à la rupture* : > 17 %.
- Module d'élasticité E : > 165 000 MPa.
- Densité : 1,5.
- Epaisseur : 1,2 mm.
- Pourcentage volumétrique des fibres >60%.

c. Caractéristiques dimensionnelles des lamelles

TYPE	LARGEUR	EPAISSEUR	SECTION
S512	50 MM	1,2MM	60MM ²
S812	80MM	1,2MM	96MM ²
S1012	100MM	1,2MM	120MM ²
S1512	150MM	1,2MM	180MM ²

d. Préparation du support

- Le support, préalablement préparé, doit avoir une résistance superficielle à la traction d'au moins 1,5 MPa.
- La tolérance de planéité est fixée à 2,5 mm sur une longueur de 50 cm et 10 mm sur une longueur de 2 m.
- Si nécessaire, ragréer le support avec le SIKADUR 41 F RAGREAGE
- Le pré -encollé avec la SIKADUR 30 COLLE sur une épaisseur de 1 mm minimum.

e. Préparation de la lamelle

- Nettoyer et dégraisser la face à encoller (face opposée à celle qui fait l'objet du marquage du numéro de lot) avec le NETTOYANT SIKADUR.
- Appliquer de façon uniforme une couche de SIKADUR 30 COLLE de 1 à 2 mm d'épaisseur sur l'ensemble de la surface.

f. Mise en œuvre

- Positionner et plaquer manuellement la lamelle. Le pouvoir collant de la SIKADUR 30 COLLE permet de la maintenir sans dispositif d'étalement particulier.
- Presser fortement sur la lamelle avec un rouleau maroufleur afin d'éliminer le surplus de colle de part et d'autre puis nettoyer les balèbres.
- Dans le cas de la juxtaposition de deux ou plusieurs lamelles, prévoir un espace libre d'au moins 5 mm entre celles-ci afin de permettre l'évacuation de l'excès de colle.

4.9. Application numérique :

MATRICES → CARACTERIS TIQUES ↓	ÉPOXYDE	PHENOLIQUE	POLYESTER	POLYCARBONATE	VINYLESTER	SILICONE	URETHANNE	POLYIMIDE
MASSE VOLUMIQUE (KG/M3)	1200	1300	1200	1200	1150	1100	1100	1400
MODULE D'ELASTICITE LONGITUDINAL. (MPA)	4500	3000	4000	2400	3300	2200	700 A 7000	4000 A 19000
MODULE DE CISAILLEMENT (MPA)	1600	1100	1400	/	/	/	/	1100
COEFFICIENT DE POISSON	0.4	0.4	0.4	0.35	0.5	/	/	0.35
COEFFICIENT DE DILATATION THERMIQUE (C⁻¹ × 10⁻⁵)	11	1	8	6	5	/	/	8
CONTRAINTES DE RUPTURE EN TRACTION (MPA)	130	70	80	60	75	35	30	70
ALLONGEMENT A RUPTURE (%)	2	2.5	2.5	/	4	/	100	1

Tableau 4.1 : Caractéristiques mécaniques des résines thermodurcissables (Époxyde)

RENFORTS → CARACTERISTIQUES ↓	VERRE E	VERRE R	CARBONE HM	CARBONE HR	KEVLAR	BORE	SILICATE D'ALUMINE	POLYETHYLENE
DIAMETRE DU FILAMENT (μM)	16	10	6.5	7	12	100	10	/
MASSE VOLUMIQUE (KG/M³)	2600	2500	1800	1750	1450	2600	2600	960
MODULE D'ELASTICITE LONGITUDINAL (MPA)	74000	86000	390000	230000	130000	400000	200000	100000
MODULE DE CISAILLEMENT (MPA)	30000	/	20000	50000	12000	/	/	/
COEFFICIENT DE POISSON	0.25	0.20	0.35	0.30	0.40	/	/	/
COEFFICIENT DE DILATATION THERMIQUE (°C ⁻¹ × 10 ⁻⁵)	0.5	0.3	0.08	0.02	-0.2	0.4	/	/
CONTRAINTES DE RUPTURE EN TRACTION (MPA)	2500	3200	2500	3200	2900	3400	3000	3000
ALLONGEMENT A RUPTURE (%)	3.5	4	0.6	1.3	2.3	0.8	1.5	/

Tableau 4.2: Caractéristiques moyennes des renforts (Carbone HR)

4.9.1 Calcul

a. les caractéristique :

$$V_t = S \times L = 120 \times 50000 = 6 \times 10^6 \text{ mm}$$

$$V_\rho = 4.08 \times 10^6 \text{ mm}$$

$$m_\rho = \rho \cdot V_\rho = 1750 \times 4.08 \times 10^6 = 7.14 \text{ kg}$$

$$V_m = 1.92 \times 10^6$$

$$M_m = \rho_m V_m = 1200 \times 1.92 \times 10^6 = 2.30 \text{ kg}$$

$$M_t = 7.14 + 2.30 = 9.54 \text{ kg}$$

$$\rho = \frac{m_t}{V_t} = \frac{9.54}{6.10 \times 10^{-3}} = 1590 \text{ kg/m}^3$$

b. Coficion de poisson:

$$\vartheta_{LT} = 0.4 \times 1.92 \times 10^{-3} + 0.3 \times 4.08 \times 10^{-3} = 2 \times 10^{-3}$$

c. Lépaisseur :

$$mof = 7.14 / 0.1 \times 50 = 1.42$$

$$\lambda = 1.42 \left(\frac{1}{20} + \frac{1}{1200} \left(\frac{1-0.74}{0.74} \right) \right) = 0.0012 \text{m} - 1.22 \text{mm}$$

d- Module d élasticité:

$$EL = EfL Vf + Em Vm$$

$$230000 \times 0.68 \times 10^6 + 4500 \times 0.32 \times 10^6 = 157840$$

$$ET = Em \left(\frac{1}{(1-Vf) + \frac{Em}{Ef} Vf} \right) = 4500 \left(\frac{1}{(1-0.68) + \frac{4500}{230000} 0.68} \right) = 13501.17 \text{ Mpa}$$

$$GLT = Gm \left(\frac{1}{(1-Vf) + \frac{Gm}{Gf} Vf} \right) = 1600 \frac{1}{(1-0.68) + \frac{1600}{50000} 0.68} = 4681.64 \text{ MPa} =$$

e- Risistance a la rupture :

$$\sigma_{L \text{ rupt}} = \sigma_{f \text{ rupt}} Vf + \sigma_{m \text{ rupt}} Vm$$

$$\sigma_{L \text{ rupt}} = 3200 \times 0.68 + 130 \times 0.32 = 2217.6 \text{ Mpa}$$

$$\alpha f EfL Vf + \alpha m Em Vm$$

$$\alpha L = \frac{10^5 \times 0.02 \times 230000 \times 0.08 + 11 \times 10^5 \times 16000 \times 0.32}{230000 \times 0.68 + 1600 \times 0.32} = 0.05 \times 10^5$$

SYMBOLE	VALEUR
MM KG	2.30
MF KG	7.14
VM M3	1.92 X 10 ⁶
VF M3	4.08 X 10 ⁶
VM	0.32
VF	0.68
P KG/M3	1590
ØLT	2 X 10 ⁻³
MOF KG	1.42
H MM	1.22
EL MPA	157840
ET MPA	13501.17
GLT MPA	4681.46
ΣLRUPT MPA	2217.60
AL C-1	5 X 10 ³

Tableau 4.3 : Type de produit pour renforcement

4.9.2. Sika® CarboDur® S

Lamelles pultrudées à base de fibres de carbone pour le renforcement de structures.

4.9.2.1. Description

Les Sika CarboDur S sont des P.R.F.C. pultrudés (Polymères Renforcés de Fibres de Carbone), à base de fibres de carbone noyées dans une matrice époxydique. Ils se présentent sous forme de lamelles préfabriquées en usine, et sont conçus pour le renforcement des structures en béton armé, en béton précontraint, en bois, en maçonnerie, en métal.

Pour le collage des lamelles en surface du support, l'adhésif structural utilisé est le Sikadur®-30.

Les lamelles peuvent également être engravées dans des rainures en suivant le principe du système de renforcement dit « engravé en surface du béton » (traduction du terme anglais « NSM »). Les colles structurales utilisées sont ,alors soit le Sikadur-30 ou Sikadur -330 pour les applications en sous face, le Sikadur-300 pour les applications en horizontal (renforcement vis-à-vis des moments négatifs en chapeaux). En complément, Sikadur-33 conditionné en cartouche peut être utilisé.

4.9.2.1. Utilisation

Différents cas de renforcement de structures

a. Endommagement des éléments de structures

- Dégradation des matériaux de la structure
- Corrosion, diminution ou sectionnement d'armatures internes (chocs, incendie)
- Charges dynamiques, séismes

b. Amélioration des conditions de service

- Réduction de flèche de planchers, poutres
- Diminution de l'ouverture des fissures

c. Modification de la structure

- Création de trémies (voile, dalle, poutre...)
- Élimination de murs, poteaux

d. Mise en conformité suite à l'évolution de la réglementation

- Renforcement parasismique
- Nouveau code de calcul

e. Défauts de conception, défauts de calcul

- Insuffisance ou déficience des sections d'acier interne
- Défaut de positionnement des armatures dans le béton

4.9.2.2. Caractéristiques et Avantages

a. Avantages

- Insensible à la corrosion
- Très haute performance
- Excellente durabilité
- Facile à transporter (légèreté, conditionnement en rouleau)
- Longueur illimitée (rouleau de 10 à 250 mètres suivant le type de lamelle utilisé)
- largeur 50mm à 150mm
- Application économique (pas de matériel de levage, ni de serrage)
- Peut recevoir un revêtement (peinture, mortier...)
- Croisement aisé des lamelles grâce à la faible épaisseur
- Facilité d'application, en particulier en sous face, sans moyen auxiliaire de placage ni de serrage
- Excellente tenue à la fatigue
- Facile à préparer, applicable en plusieurs couches superposées
- Finition excellente des bords de lamelles (imprégnation et alignement des fibres) obtenue lors de la fabrication par pultrusion

b. Aspect / Couleurs

- PRFC (Polymère Renforcé de Fibres de Carbone HR – matrice résine époxy) de couleur noire

c. Conditionnement

- Suremballage carton pour les rouleaux de 10, 25, 50m (la longueur)
- Suremballage en caisse en bois pour les rouleaux de 250m

4.9.3. Caractéristiques Sika CarboDur S1012:

Valeurs dans le sens longitudinal des fibres U D (suivant la norme EN 2561)

CARACTERISTIQUES	VALEURS
DENSITE (KG/M ³)	1600
POURCENTAGE VOLUMETRIQUE DES FIBRES	> 68%
MODULE D'ÉLASTICITE E EN MPA	VALEUR MOYENNE 165 000
RESISTANCE EN TRACTION UNI AXIALE EN MPA	VALEUR MOYENNE 3 100
ÉLONGATION A RUPTURE	VALEUR MINIMUM > 1,70%
LA LONGUEUR ()	50
LARGEUR (MM)	100
SECTION (MM ²)	120
L'ÉPAISSEUR (MM)	1.2

Tableau 4.4 : Caractéristiques Sika CarboDur S1012

CHAPITRE 5 :

Recommandations et perspectives

5.1 Introduction

L'analyse réalisée dans le cadre de cette étude a permis d'évaluer l'influence du renforcement par chemisage en matériaux composites PFR sur le comportement sismique d'une pile de pont en béton armé.

L'objectif de ce chapitre est donc de présenter des pistes d'amélioration des méthodes de réhabilitation utilisées aujourd'hui, ainsi que des recommandations pratiques et des perspectives de recherche découlant directement des observations effectuées au cours de cette étude.

5.2 Améliorations des techniques actuelles

L'étude menée met en évidence plusieurs points susceptibles d'améliorer les pratiques actuelles de renforcement sismique des ouvrages d'art :

- Intégrer systématiquement des critères tels que la ductilité, la capacité de déformation et la dissipation d'énergie lors du choix d'une technique de réhabilitation ;
- Optimiser le dimensionnement des chemisages en PFR afin d'obtenir le niveau de confinement nécessaire sans recourir à un nombre excessif de couches ;
- Adapter la stratégie de renforcement aux caractéristiques propres de chaque ouvrage, notamment son état de dégradation, son âge et la disposition de ses armatures ;
- Éviter l'application de solutions standardisées sans étude préalable du comportement réel de la structure concernée ;
- Améliorer la prise en compte des interactions entre les différents éléments du pont afin d'évaluer plus fidèlement l'effet du renforcement sur l'ensemble de l'ouvrage ;
- Développer des modèles numériques plus représentatifs intégrant les non-linéarités des matériaux et les mécanismes d'endommagement progressif
- Utiliser la simulation numérique pour comparer plusieurs scénarios d'intervention et sélectionner la solution offrant le meilleur compromis entre sécurité, efficacité et coût ;
- Renforcer les procédures de contrôle de qualité lors de la mise en œuvre des matériaux composites afin de garantir les performances attendues ;
- Intégrer davantage les aspects liés à la durabilité, à la maintenance future et aux contraintes d'exploitation dans le choix des techniques de réhabilitation
- Favoriser le retour d'expérience à partir des ouvrages déjà réhabilités afin d'améliorer continuellement les pratiques et les méthodes de conception.

5.3 Recommandations pratiques

À partir des observations effectuées au cours de cette étude, plusieurs recommandations peuvent être proposées.

Avant toute opération de réhabilitation, il apparaît indispensable de disposer d'une connaissance suffisamment précise de l'état réel de l'ouvrage. Une campagne d'inspection détaillée, associée lorsque cela est possible à des investigations complémentaires, permet de limiter les incertitudes susceptibles d'affecter la qualité de l'évaluation.

Le recours à la modélisation numérique doit être envisagé comme un outil d'analyse et non comme une finalité. Les résultats obtenus dépendent fortement des hypothèses retenues ; ils doivent donc être interprétés avec discernement et confrontés aux caractéristiques constructives de l'ouvrage étudié.

Concernant le chemisage en PFR, une attention particulière doit être accordée aux conditions de mise en œuvre. La qualité de préparation du support, le respect des procédures d'application et le contrôle des matériaux utilisés influencent directement l'efficacité du confinement. Une mauvaise exécution peut réduire de manière significative les bénéfices attendus du renforcement.

Il est également recommandé de privilégier une approche progressive dans la programmation des interventions à l'échelle d'un réseau routier. Les ouvrages présentant un rôle stratégique ou un niveau élevé de vulnérabilité devraient être traités en priorité afin d'optimiser l'utilisation des ressources disponibles.

Dans le contexte algérien, l'élaboration de référentiels techniques dédiés à la réhabilitation des ouvrages existants constituerait un appui précieux pour les praticiens. De tels documents permettraient d'harmoniser les méthodes d'évaluation et de faciliter le choix des solutions d'intervention adaptées aux réalités locales.

5.4 Perspectives de recherche

Les résultats obtenus dans cette étude ouvrent plusieurs perspectives de recherche liées aux évolutions technologiques récentes dans les domaines des matériaux, des outils numériques et des systèmes intelligents appliqués aux ouvrages d'art.

- Développer, au sein des laboratoires de recherche, des programmes expérimentaux plus avancés permettant de reproduire de manière réaliste les sollicitations sismiques et de mieux comprendre le comportement des éléments de l'ouvrage renforcés par PFR ;
- Concevoir et tester de nouvelles générations de matériaux composites plus écologiques, utilisant des fibres naturelles ou recyclées, afin de réduire l'impact environnemental des opérations de réhabilitation ;
- Étudier des résines et matrices polymériques plus durables, moins polluantes et présentant une meilleure résistance au vieillissement et aux agressions environnementales ;
- Développer des outils informatiques plus performants intégrant des modèles numériques avancés capables de simuler avec précision l'endommagement progressif des structures renforcées
- Exploiter les technologies du jumeau numérique (Digital Twin) pour assurer une représentation virtuelle actualisée des ponts et suivre leur évolution tout au long de leur durée de vie ;
- Intégrer les techniques d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique pour améliorer la détection précoce des dégradations, prédire l'évolution des dommages et optimiser les stratégies de maintenance ;
- Utiliser des algorithmes d'intelligence artificielle pour assister les ingénieurs dans le choix des solutions de renforcement les plus adaptées selon les caractéristiques de chaque ouvrage ;
- Développer des systèmes électroniques de surveillance continue basés sur des réseaux de capteurs installés sur les éléments structuraux des ponts ;
- Employer des capteurs de déformation, d'accélération, de déplacement, de vibration, de température ou de corrosion afin de détecter les changements de comportement des structures en temps réel ;
- Mettre en place des dispositifs de surveillance connectés permettant la transmission automatique des données vers des plateformes de gestion centralisées ;

- Associer les capteurs intelligents à des systèmes d'alerte capables de signaler rapidement l'apparition d'anomalies ou d'endommagements susceptibles d'affecter la sécurité de l'ouvrage.
- Développer des solutions intégrant l'électronique embarquée, l'Internet des objets (IoT) et les technologies de communication sans fil pour améliorer le suivi de l'état des ponts ;
- Étudier la faisabilité de systèmes autonomes alimentés par récupération d'énergie afin d'assurer le fonctionnement durable des dispositifs de surveillance ;
- Élaborer des plateformes d'aide à la décision combinant données issues des capteurs, modèles numériques et intelligence artificielle pour orienter les interventions de maintenance et de réhabilitation.

Ces perspectives traduisent l'évolution du domaine de la réhabilitation vers une approche plus durable, plus intelligente et davantage orientée vers la surveillance continue des infrastructures.

5.5 Conclusion

Les améliorations proposées montrent que les techniques actuelles de réhabilitation peuvent encore évoluer vers des approches plus adaptées au comportement réel des structures. Une intervention efficace ne consiste pas uniquement à renforcer un élément, mais à améliorer la réponse globale de l'ouvrage face aux sollicitations sismiques tout en tenant compte des contraintes techniques, économiques et environnementales.

L'étude réalisée confirme l'intérêt du chemisage en matériaux composites PFR comme solution de renforcement, à condition que son dimensionnement, sa mise en œuvre et son évaluation soient réalisés avec rigueur. Les perspectives présentées mettent également en évidence le rôle croissant des innovations issues des laboratoires, des matériaux écologiques, des outils informatiques avancés, de l'intelligence artificielle et des systèmes électroniques de surveillance dans l'avenir de la gestion des ouvrages d'art. Ces évolutions pourraient contribuer au développement de stratégies de réhabilitation plus performantes, plus durables et mieux adaptées aux défis futurs des infrastructures existantes.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion général

Le présent mémoire s'est intéressé à la problématique de la réhabilitation sismique des ouvrages d'art, en mettant l'accent sur l'évaluation de la vulnérabilité des ponts existants et sur l'analyse de l'efficacité d'une technique de renforcement appliquée aux piles en béton armé. Dans un contexte marqué par le vieillissement progressif des infrastructures et par l'augmentation des exigences en matière de sécurité, la préservation des ponts existants constitue un défi majeur pour les ingénieurs et les gestionnaires d'ouvrages. Les événements sismiques ayant affecté plusieurs régions du monde ont démontré que les ponts représentent des éléments stratégiques dont la défaillance peut entraîner des conséquences humaines, économiques et sociales importantes.

À travers une approche combinant étude bibliographique et simulation numérique, ce travail a permis d'examiner l'influence du chemisage en matériaux composites PFR sur le comportement sismique d'un élément structural représentatif. L'objectif principal était d'évaluer dans quelle mesure cette technique de renforcement peut contribuer à améliorer la performance d'une pile de pont soumise à des sollicitations sismiques, tout en mettant en évidence les paramètres à considérer lors du choix d'une stratégie de réhabilitation adaptée.

Synthèse des résultats

L'étude bibliographique a montré que la vulnérabilité des ponts ne dépend pas uniquement de l'intensité des sollicitations sismiques, mais également de la capacité des différents composants de l'ouvrage à développer un comportement compatible avec les exigences de performance attendues. Elle a également mis en évidence la diversité des méthodes disponibles pour l'évaluation des structures existantes ainsi que la variété des solutions de réhabilitation actuellement utilisées. Les techniques de renforcement ont considérablement évolué au cours des dernières décennies, offrant aujourd'hui des alternatives performantes, rapides à mettre en œuvre et adaptées aux contraintes d'exploitation des ouvrages.

L'étude de cas réalisée sous le logiciel SAP2000 a permis d'analyser la réponse d'une pile de pont dans son état initial, puis après l'application d'un renforcement par chemisage en matériaux composites PFR. Les simulations effectuées ont montré que l'intervention modifie la réponse structurale de l'élément étudié et contribue à améliorer certains paramètres caractérisant son comportement sous chargement sismique.

La comparaison des résultats obtenus avant et après renforcement a mis en évidence une évolution favorable de la capacité portante de la pile ainsi qu'une amélioration de sa capacité à supporter les

sollicitations imposées. Le confinement assuré par les matériaux composites PFR permet notamment d'accroître la résistance de l'élément et d'améliorer sa capacité à développer des déformations plus importantes avant l'apparition de mécanismes de rupture critiques. Ces observations confirment l'intérêt de cette technique dans le cadre des interventions de réhabilitation sismique.

Les analyses ont également montré que l'interprétation de l'efficacité d'une technique de réhabilitation ne peut être fondée sur un seul indicateur, mais nécessite une appréciation globale du comportement structural. En effet, une augmentation de la résistance ne signifie pas systématiquement une amélioration de la performance globale. Des paramètres tels que la ductilité, la rigidité, les déplacements, la dissipation d'énergie et la redistribution des efforts doivent être pris en considération afin d'obtenir une évaluation plus réaliste de l'efficacité du renforcement.

Cette étude souligne ainsi l'intérêt d'une démarche reposant sur l'analyse comparative de différents états de la structure afin d'orienter le choix des solutions de renforcement les plus adaptées aux objectifs recherchés. Elle met également en évidence le rôle essentiel des outils numériques dans l'aide à la décision et dans l'optimisation des interventions avant leur mise en œuvre sur le terrain.

Apports scientifiques

Le principal apport de ce travail réside dans la mise en œuvre d'une démarche d'évaluation appliquée à une pile de pont en béton armé, permettant d'étudier l'influence d'une technique de réhabilitation à travers une modélisation numérique cohérente.

Cette recherche a permis :

- d'illustrer l'intérêt des outils de simulation dans l'analyse du comportement sismique des ouvrages existants ;
- de mettre en évidence l'impact du confinement par matériaux composites PFR sur la réponse structurale d'une pile de pont ;
- de montrer que l'évaluation d'une intervention de réhabilitation doit dépasser la simple vérification de l'augmentation de la résistance mécanique ;
- de proposer une approche comparative basée sur l'analyse de la structure avant et après renforcement afin d'apprécier plus objectivement les effets de l'intervention ;
- de contribuer à la réflexion sur l'application des techniques de réhabilitation sismique aux ouvrages d'art dans un contexte où la préservation des infrastructures existantes constitue un enjeu croissant ;

- de souligner l'importance d'intégrer les notions de performance et de résilience dans les stratégies de gestion des ponts exposés au risque sismique ;
- d'apporter une base méthodologique pouvant servir de référence pour des études similaires portant sur d'autres configurations d'ouvrages.

Au-delà des résultats obtenus, ce travail met en évidence la nécessité d'adopter une approche multidisciplinaire associant connaissances théoriques, outils numériques et retour d'expérience afin d'améliorer la fiabilité des décisions relatives à la réhabilitation des infrastructures.

Limites de l'étude

Comme tout travail de recherche, cette étude présente certaines limites qu'il convient de rappeler afin de situer la portée des résultats obtenus.

En premier lieu, l'analyse a porté sur une pile représentative étudiée à travers un modèle numérique élaboré sous SAP2000. Les conclusions tirées ne peuvent donc être généralisées à l'ensemble des configurations de ponts sans investigations complémentaires. Les caractéristiques géométriques, les détails de ferrailage et les conditions d'appui propres à chaque ouvrage peuvent influencer significativement la réponse obtenue.

Par ailleurs, les résultats dépendent des hypothèses adoptées lors de la modélisation, notamment en ce qui concerne les propriétés mécaniques des matériaux, les conditions aux limites et les scénarios de chargement considérés. Toute simplification introduite dans le modèle peut avoir une incidence sur la précision des résultats.

L'étude n'a pas intégré de validation expérimentale permettant de confronter directement les résultats numériques au comportement observé sur des éléments réels. De même, certains phénomènes susceptibles d'influencer la réponse globale des ouvrages, tels que l'interaction sol-structure, les effets de vieillissement, la dégradation progressive des matériaux ou la variabilité des caractéristiques mécaniques, n'ont pas été examinés de manière approfondie.

En outre, l'analyse s'est limitée à une seule technique de renforcement. Une comparaison avec d'autres méthodes de réhabilitation, telles que le chemisage métallique ou le chemisage en béton armé, aurait permis d'élargir la portée des conclusions et d'établir une évaluation plus complète des solutions disponibles.

Malgré ces limites, les analyses réalisées fournissent des éléments utiles à la compréhension du comportement des piles renforcées et constituent une base de réflexion pour le développement d'études plus étendues portant sur des ouvrages complets et des approches de réhabilitation plus avancées. Elles ouvrent également des perspectives intéressantes pour des travaux futurs intégrant des validations expérimentales, des analyses non linéaires plus poussées et des approches probabilistes tenant compte des incertitudes.

En définitive, ce mémoire met en évidence l'importance d'une démarche d'évaluation rigoureuse dans le choix des stratégies de réhabilitation sismique. L'amélioration de la sécurité des ouvrages d'art ne repose pas uniquement sur l'adoption de techniques innovantes, mais également sur la capacité à comprendre le comportement réel des structures et à adapter les solutions d'intervention aux spécificités de chaque ouvrage.

Ainsi, les résultats obtenus confirment que le renforcement par matériaux composites PFR constitue une solution prometteuse pour l'amélioration de la performance sismique des piles de pont en béton armé. Toutefois, son efficacité dépend d'une analyse préalable approfondie et d'une mise en œuvre adaptée aux caractéristiques de l'ouvrage concerné. Ce travail contribue modestement à l'enrichissement des connaissances dans le domaine de la réhabilitation sismique des ponts et rappelle que la résilience des infrastructures de transport demeure un objectif essentiel pour garantir la sécurité des usagers et la continuité des services en cas de séisme.

Annexe

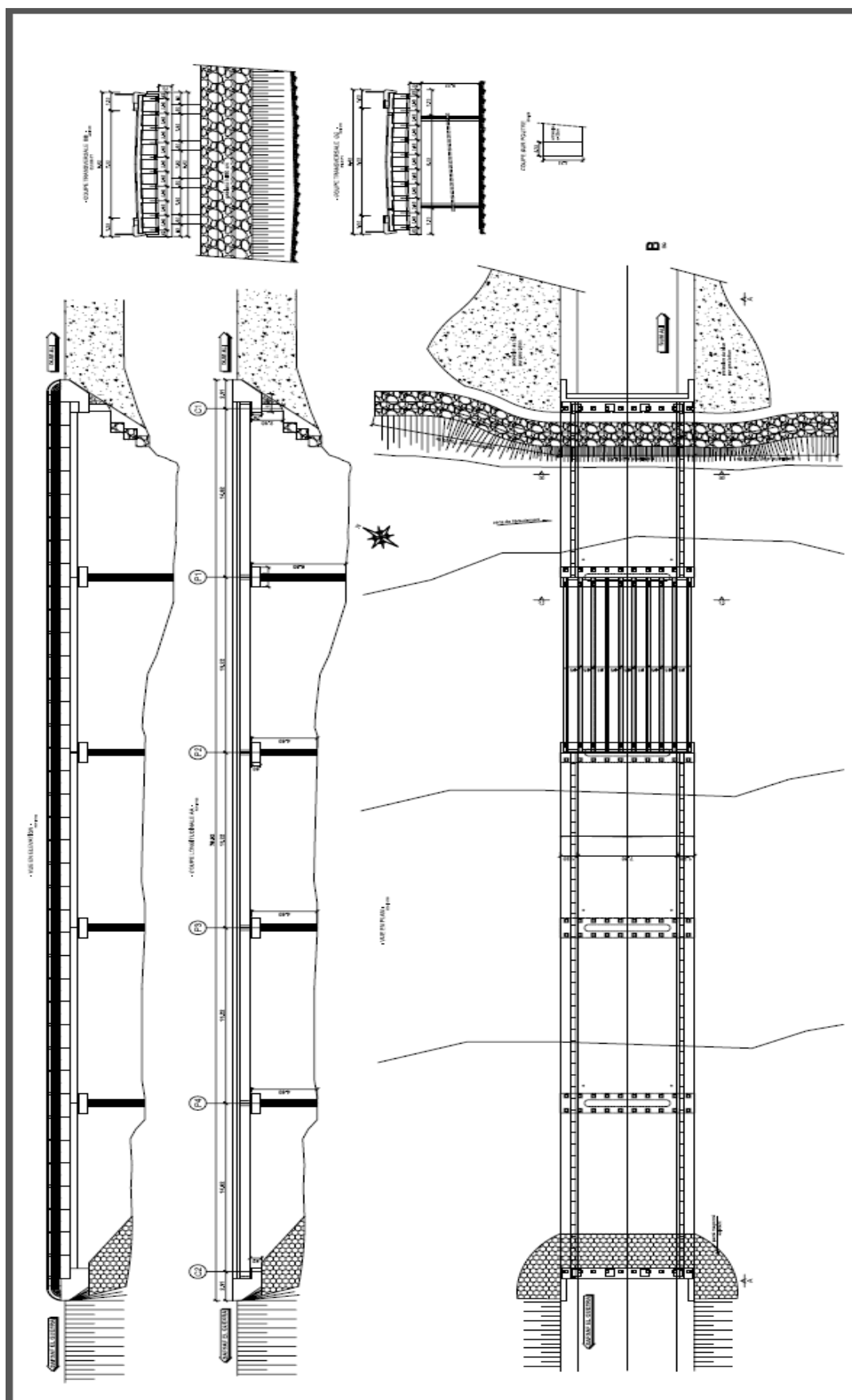


Figure 01-Plan de reconstitution CW02 PK53+900

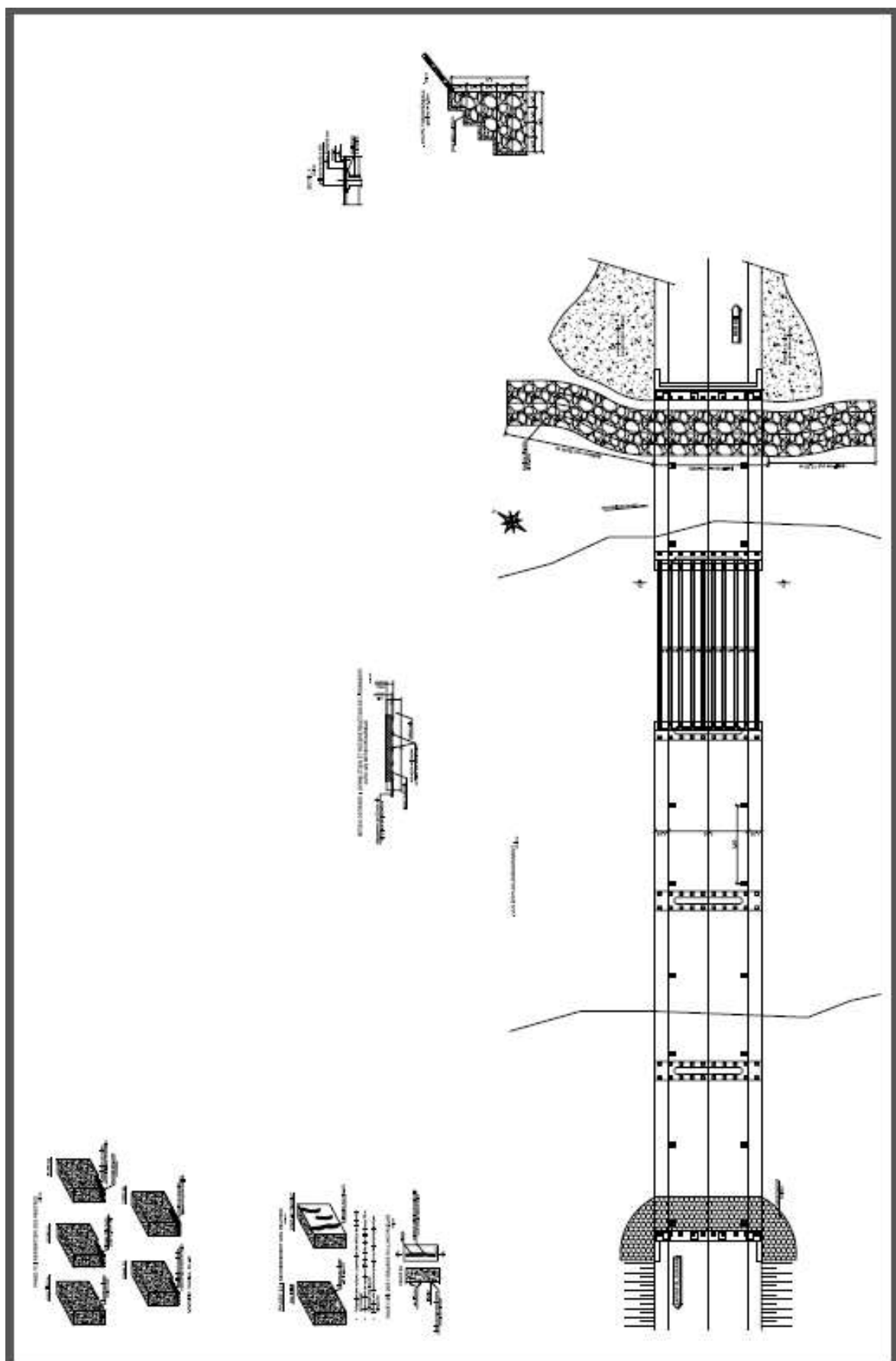


Figure 02 -Plan de réhabilitation CW02 PK53+900

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AFPS. Rapport préliminaire sur le séisme de Boumerdès (Algérie) du 21 mai 2003. Association Française du Génie Parasismique, France, 2003.

AASHTO. Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., USA, 2011.

Applied Technology Council (ATC). ATC-40: Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. California, USA, 1996.

Cerema. Diagnostic et renforcement sismiques des ponts existants. Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement, France, 2016.

Computers and Structures Inc. SAP2000 Integrated Software for Structural Analysis and Design – User's Manual. Berkeley, California, USA, 2020.

Eurocode 8. NF EN 1998-2 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes – Partie 2 : Ponts. Comité Européen de Normalisation (CEN), Bruxelles, Belgique, 2005.

FEMA. FEMA 356: Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., USA, 2000.

Fédération Internationale du Béton (fib). Seismic Assessment and Retrofit of Reinforced Concrete Buildings. Bulletin fib, Lausanne, Suisse.

Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R. "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete." Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 8, 1988, pp. 1804–1826.

Michel ROBERT, « Les composites aéronautiques 40 ans déjà et ce n'est que le début » , Colloque Composite de Toulouse , octobre 2007 .

Daniel Gay, « Matériaux composite », Hermes, 4ème édition, 1997.

Vu Anh Thang, « Endommagement de stratifiés aéronautiques à fibres de carbone et matrice polymère soumis à des chargements monotones ou cycliques à plusieurs température, essais et modélisation », Thèse, L'école nationale supérieure de mécanique et d'aérotechnique, France, 2009.

Payan Juliette, « Etudes du comportement de composites stratifiés sous chargements statique et de fatigue », Thèse, université de la méditerranée Aix-Marseille II, 2004.

-Valery V, Vasiliev & Evgeny v Morozov , « Mechanics and Analysis of Composite Materials », Elsevier, 2001.

Priestley, M. J. N., Seible, F., and Calvi, G. M. *Seismic Design and Retrofit of Bridges*. John Wiley & Sons, New York, USA, 1996.

Kawashima, K. "Seismic Design and Retrofit of Bridges." *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 4, No. 1, 2000, pp. 1–33.

Chartrand, L.-P. *Réhabilitation sismique des piliers de ponts rectangulaires à l'aide de chemises en polymères renforcés de fibres de carbone*. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Canada, 2009.

Boucher-Proulx, G. *Réhabilitation sismique des piliers de ponts rectangulaires à l'aide de chemises en BFUP et en BRF*. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Canada, 2008.

Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS). *Règles Parasismiques Applicables au Domaine des Ouvrages d'Art (RPOA 2008)*. Alger, Algérie.

IQOA. *Image de la Qualité des Ouvrages d'Art : Guide méthodologique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art*. SETRA, France, 1995.

ACI Committee 437. *Code Requirements for Load Testing of Existing Concrete Structures and Commentary*. American Concrete Institute, Farmington Hills, USA.

DTU 13.2. *Travaux de fondations profondes pour le bâtiment – Règles de calcul et de conception des micropieux*. France.

Velev, N., Fortier, J., and Lemay, C. "Réhabilitation sismique d'un pont existant avec des appuis en élastomères frettés." 18e Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, Québec, Canada, 2011.

Cerema ITM. *Techniques de renforcement des piles de ponts par chemisage en béton armé*. France.

Toutlemonde, F., and Resplendino, J. *Les essais non destructifs appliqués aux ouvrages en béton*. Presses des Ponts et Chaussées, France.

Malhotra, V. M., and Carino, N. J. *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. CRC Press, USA, 2004.

ACI Committee 440. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R)*. American Concrete Institute, USA.

ISIS Canada. *Design Manual No. 4: Strengthening Reinforced Concrete Structures with Externally-Bonded Fibre Reinforced Polymers*. Winnipeg, Canada.