

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département de Génie Civil

Laboratoire de Génie Sismique et Dynamique des structures



Mémoire de Master en Génie Civil

Thème :

**Réparation et réhabilitation des ponts
métalliques**

Réalisé par :

DIF Kheir-Eddine

Soutenu devant le jury composé de :

Mme R.KETTAB

Présidente

Mme H. MOHABEDDINE

Encadreur

Mme D. CHERID

Encadreur

Mr S. LAKHAL

Examineur

Promotion 2015

*Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi BP182 El-Harrach
16200 Alger, Algérie*

Tel : +213 21 52 53 01/03 – Fax : +213 21 52 29 73

Remerciements

En tout premier lieu, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes parents qui m'ont soutenu tout au long de mes études et m'ont fourni toutes les conditions nécessaires à ma réussite.

J'adresse mes vifs remerciement à mes promotrices, mesdames D.CHERID et H.MOHABEDDINE pour leurs conseils et leur aide tout au long de l'élaboration de ce travail.

Je souhaite également manifester ma reconnaissance à tout le personnel de la SAPTA et plus particulièrement à Mr. DJERRIR, ingénieur chef d'études, pour sa disponibilité et pour toutes les informations et éclaircissements qu'il m'a fournis.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'examiner ce travail.

Je remercie tous les enseignants ayant contribué à ma formation.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents qui ont toujours cru en moi et m'ont soutenu

Ma chère sœur Meriem que j'aime tant

Toute ma famille adorée

Tous mes amis

DIF Kheireddine

ملخص:

إن الجسور معرضة لظاهرة التقدم في السن ، ولكن نظرا لأهميتها الاجتماعية يستوجب أن توضع محل عناية خاصة، بغية تمكّنها من ضمان تآدية وظائفها خلال مدة حياتها المحددة مسبقا . يمكن للجسور أن تتأثر بإضطرابات متفاوتة الشدة ، و التي قد تكون خطيرة نظرا للعديد من الأسباب، ولهذا فإنه للإبقاء عليها في حالة الخدمة و في أحسن شروط السلامة فلا بد من إعادة ترميمها.

يهدف هذا العمل المتواضع في هذا السياق إلى دراسة التدهورات وأسبابها المحتملة بالإضافة إلى الطرق الرئيسية للتشخيص وتقنيات الإصلاح أو تقوية وتدعيم المنشآت المعدنية.

كلمات مفتاحية: إصلاح المنشآت المعدنية ، فحص الجسور ، التدهورات، التآكل

Résumé :

Les ponts vieillissent, mais, compte tenu de leur importance sociale, ils doivent faire l'objet de soins particuliers pour qu'ils puissent assurer leurs fonctions pendant la durée de vie qui leur a été assignée. Ils peuvent être affectés par des désordres de gravité variables pouvant être dangereux et dont les causes sont multiples. Pour les maintenir en service dans les meilleures conditions de sécurité, ces ouvrages doivent être réhabilités.

Dans ce contexte, ce modeste travail consiste en l'étude des dégradations et leurs causes probables. Ainsi que les principales méthodes de diagnostic et les techniques de réparation ou de renforcement des ouvrages métalliques.

Mots clés : Réparation des ouvrages métalliques, Auscultation des ponts, dégradations, corrosion.

Abstract :

The bridges are aging, but, given their social importance, they must be the object of particular care to ensure that they can serve for the life that has been assigned. They may be affected by varying severity of disorders that can be dangerous. To keep the service in the best safety conditions, these structures must be rehabilitated.

In this context, the aim of this dissertation is the study of the damages and their possible causes. And the main methods of diagnosis and repair techniques or strengthening of metal structures.

Keywords: Repair of metal structures, auscultation of bridges, damage, corrosion.

Table des matières

Introduction générale	1
------------------------------------	---

Chapitre 1 : Généralités

I.1. Introduction.....	2
I.2. Classifications de ponts	2
I.2.1. Suivant le matériau principal dont ils sont constitués.....	2
I.2.2. Suivant leur fonctionnement mécanique.....	3
I.2.3. Suivant la nature de la voie portée	4
I.2.4. Suivant leur disposition en plan	4
I.2.5. Suivant leur forme des poutres	4
I.2.6. Suivant la structure transversale	5
I.2.7. Suivant les méthodes de construction	5
I.3. Différentes parties d'un pont	6
I.3.1. La structure du pont	7
I.3.1.1. Le tablier	7
I.3.1.2. Les appuis	8
I.3.2. Les équipements des ponts.....	9
I.3.2.1. Appareils d'appui	9
I.3.2.2. Joints de chaussée	9
I.3.2.3. Etanchéité.....	9
I.3.2.4 La couche de roulement	10
I.3.2.5. Dispositifs de retenue.....	10
I.3.2.6. Evacuation des eaux	10
I.4. Conclusion	10

Chapitre 2 : Principaux désordres dans les ponts

II.1. Introduction	11
II.2. Actions sollicitant les ponts.....	11
II.2.1. Actions dues au trafic	11
II.2.2. Actions climatiques	11
II.2.2.1. Effets de la température	11
II.2.2.2. Effets du vent.....	12
II.2.3. Actions accidentelles	12
II.2.3.1. Action mécanique de l'eau	12
II.2.3.2. Séismes	13
II.2.3.3. Chocs de véhicules routiers et ferroviaires.....	14
II.3. Nature des désordres affectant les ponts métalliques	14

II.3.1. La corrosion	14
II.3.2. La fatigue	15
II.3.3. Autres types de désordres	17
II.4. Erreurs de conception dans les ponts métalliques ou en ossature mixte	18
II.5. Conclusion	21

Chapitre 3 : Auscultation des ponts métalliques

III.1. Introduction	23
III.2. Différences entre les techniques d'auscultation	23
III.3. Auscultation du matériau	23
III.3.1. Études sur prélèvements	23
III.3.1.1. Examens métallographiques	23
III.3.1.2 Essais mécaniques	24
III.3.1.3 Essais physiques	24
III.3.2. Examen du matériau en place	24
III.3.2.1. Essai de ressuage (acier)	24
III.3.2.2. Magnétoscopie	24
III.3.2.3. Contrôle par ultrason	25
III.3.2.4 Contrôle par radiographie	25
III.3.2.5. Mesure d'épaisseur de peinture (Epaissimetre)	26
III.4 Auscultation de la structure	26
III.4.1 Mesure des déformations générales et des mouvements	26
III.4.2 Mesures de force sur ouvrages (Pesée de réactions d'appui)	28
III.4.3 Mesures locales de fonctionnement	29
III.4 Évaluation des ouvrages	29
III.4.1 Étapes de l'évaluation	30
III.5 Conduite du recalcul d'un pont en état pathologique	31
III.5.1 Évaluation de l'état de l'ouvrage « à vide »	31
III.5.2 Calcul de l'ouvrage sous charges d'exploitation	31
III.6 Conclusion	32

Chapitre 4 : Réparation des ponts métalliques

IV.1 Introduction	33
IV.2 Méthodes et techniques de réparation et renforcement des structures	33
IV.2.1 Remplacement d'éléments endommagés	33
IV.2.2 Ajout de matière	35
IV.2.3 Utilisation de la soudure, des boulons HR et des rivets	36
IV.3 Conclusion	39

Chapitre 5 : Etude d'un cas pratique

V.1. Introduction	40
V.2. Description de l'ouvrage	40
V.2.1. Type de construction	40
V.2.2. Caractéristiques géométriques :.....	40
V.3. Constat des désordres	41
V.4. Procédure adoptée pour la réhabilitation.....	42
V.4.1. Calage des tabliers sur palets métalliques	43
V.4.1.1. Travaux préparatoires.....	43
V.4.1.2. Travaux d'étaieement du tablier.....	43
V.4.2. Exécution des butées transversales.....	45
V.4.3. Remise du tablier à l'état initial	45
V.4.3.1. Travaux de vérinage	45
V.4.3.2. Travaux de ripage des tabliers.....	48
V.4.4. Réparation des poutres endommagées.....	53
V.4.4.1. Poutre de rive.....	53
V.4.4.2. Poutre intermédiaire	57
V.5.2. Remise à niveau de l'ouvrage	58
V.5.2.1. Travaux de remplacement des appareils d'appuis.....	58
V.5.2.2. Travaux de remplacement des joints de chaussée	58
V.5.2.3 Travaux de reprise des dalles de continuité.....	60
V.5.2.4. Travaux de finition	61
V.6. Conclusion.....	62
Conclusion générale	63
Références Bibliographiques	64

Liste des figures

Figure I.1 Pont en maçonnerie	2
Figure I.2 Pont en beton armé	2
Figure I.3 Pont métallique	3
Figure I.4 Pont à poutre	3
Figure I.5 Pont en arc	3
Figure I.6 Pont suspendu	4
Figure I.7 Pont à poutres caissons	4
Figure I.8 Ponts à poutres à âme pleine	5
Figure I.9 Ponts à poutres treillis	5
Figure I.10 Construction sur étaielements	6
Figure I.11 Construction par encorbellement	6
Figure I.12 Construction par poussage	6
Figure II.1 : Effet du vent sur le tablier d'un pont suspendu	12
Figure II.2 : Affouillement des fondations d'une pile de pont	13
Figure II.3 : Effondrement d'un pont suite à un séisme	14
Figure II.4 : Déformation de la membrure inférieure d'une poutre principale dus au choc de véhicule	14
Figure II.5 : Rivets attaqués par la rouille	15
Figure II.6 : Fissure due à la fatigue d'un raidisseur longitudinal d'âme de poutre	16
Figure II.7 : Rupture par fatigue d'une diagonale tendue sur un point de soudure	17
Figure II.8 : Jeu d'assemblage	17
Figure II.9 Voilement d'âme d'une poutre métallique	18
Figure II.10 Stagnation d'eau due à une mauvaise disposition constructive	19
Figure II.11 : Exemple de défaut d'épuration des barres	19
Figure II.12 Contraintes dans des tôles réunies par soudure	20
Figure II.13 Désordre au niveau de la connexion : décollement entre dalle et poutre	21
Figure III.1 : Principe du contrôle par ultrasons	25
Figure III.2 : Appareil pour la mesure de l'épaisseur de peinture (epaissimetre)	26
Figure III.3 Flexigraphe laser	27
Figure III.4 : Clinomètre fixé sur l'âme d'un pont-caisson (Photo LCPC)	27
Figure III.5 : Évolution de la réaction d'appui en fonction du déplacement lors de la pesée ..	28
Figure III.6 : Techniques de soulèvement du tablier d'un pont	28
Figure III.7 : Représentation symbolique de la perte de valeur dans le temps d'une construction	29
Figure IV.1 Remplacement d'un montant d'une poutre treillis avec dispositif provisoire de prise des efforts par barres de précontrainte	33
Figure IV.2 Remplacement de gousset	34
Figure IV.3 Renforcement par placage d'une poutre en I	36
Figure IV.4 Principe de renforcement de l'âme d'un longeron	37
Figure IV.5 Déformations dues au soudage	38
Figure V.1 Viaduc au PK 11+080 sur oued El-Harrach	40
Figure V.2 Déplacement transversal de 15 à 60 cm au niveau des piles	41
Figure V.3 Rotation des travées	41
Figure V.4 Etat de l'ouvrage après le séisme	41
Figure V.5 Endommagement des poutres	42
Figure V.6 Ecrasement des appareils d'appuis	42
Figure V.7 Endommagement des joints de chaussée	42
Figure V.8 Réalisation des accès à l'ouvrage	43

Figure V.9 Montage des palets métalliques	44
Figure V.10 Montage des profilés HEB 180 pour supporter le tablier métallique	44
Figure V.11 Exécution des butées transversales	45
Figure V.12 Vérins utilisés pour l'opération.....	45
Figure V.13 Suppression de la continuité de la dalle	46
Figure V.14 Pose des vérins hydrauliques sur le support	46
Figure V.15 Exécution de l'opération de vérinage et calage par phase	47
Figure V.16 disposition des vérins	47
Figure V.17 Schéma explicatif rigidification le tablier	48
Figure V.18 Rigidification le tablier	48
Figure V.19 Photo du rouleau express utilisé	49
Figure V.20 Mise en place du tablier sur rouleaux	49
Figure V.21 Exécution de l'opération de ripage par poussée en utilisant le vérin.....	50
Figure V.22 Plaque en inox et plaque en polyamide.....	50
Figure V.23 Mise en place du tablier sur les plaques en polyamide.....	51
Figure V.24 Ripage longitudinal du tablier	51
Figure V.25 Schéma explicatif du ripage par rouleau express.....	52
Figure V.26 Schéma explicatif du ripage par plaque polyamide	53
Figure V.27 Déformation de l'âme de la poutre de rive	54
Figure V.28 Mise en place de la poutre de renforcement	54
Figure V.29 Découpage de la partie endommagée de la poutre de rive.....	55
Figure V.30 Exécution de chanfreins sur le tronçon de poutre	55
Figure V.31 Soudure de la nouvelle partie de la poutre	55
Figure V.32 Inspection des soudures	56
Figure V.33 Renforcement de la poutre	56
Figure V.34 Application de la peinture protection.....	57
Figure V.35 Déformation de la poutre intermédiaire	57
Figure V.36 Remplacement des appareils d'appuis	58
Figure V.37 Démolition de béton de la dalle de part et d'autre des joints.....	59
Figure V.38 Bétonnage de la dalle autour du joint	59
Figure V.39 Pose des barres de recouvrement	60
Figure V.40 Exécution de la chape d'étanchéité.....	61
Figure V.41 Mise en place du coffrage des corniches	61
Figure V.42 Réalisation des gardes corps	62

Introduction générale

Introduction générale

Le pont ouvrage d'art par excellence occupe une place très particulière parmi les constructions ; il est un symbole, un moyen de communication entre les hommes, d'expansion de la civilisation, mais aussi un instrument de conquête et d'invasion. Depuis l'Antiquité, il a été célébré comme la plus accomplie des constructions.

Les ponts vieillissent, mais, compte tenu de leur importance sociale, ils doivent être l'objet de soins particuliers pour qu'ils puissent assurer leur fonction pendant la durée de vie qui leur a été assignée. Ils ne sont pas toujours en bonne santé, et il n'est pas toujours facile de diagnostiquer une maladie, puis de prescrire le bon remède.

Le patrimoine d'ouvrages métalliques est très important, la nature des ouvrages est très variée et certains d'entre eux sont plus que centenaires. Pour les maintenir en service dans les meilleures conditions de sécurité, ces ouvrages doivent être réhabilités. Les décisions permettant d'assurer dans les conditions optimales l'entretien, la réparation et le renforcement des ouvrages métalliques reposent sur un diagnostic pertinent et sur un choix approprié des techniques de réparation.

L'objet de ce modeste travail est la réparation et la réhabilitation des ponts métalliques ou a ossatures mixtes. Le plan de travail est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, nous donnerons quelques généralités sur les ponts.

Puis nous citerons dans le second chapitre, les divers pathologies et désordres susceptibles de toucher les ponts.

Le troisième chapitre concernera les méthodes d'auscultation des ponts.

Le quatrième chapitre traitera des principales méthodes de réparation et de renforcement des ponts métalliques.

Le cinquième chapitre fera l'objet de l'étude d'un cas réel portant sur la réparation du Viaduc de l'oued El-Harrach se trouvant sur la Rocade sud d'Alger.

Enfin, on clôturera ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre 1 : Généralités

I.1. Introduction

Un pont est un ouvrage en élévation, construit in situ, permettant à une voie de circulation (dite voie portée) de franchir un obstacle naturel ou artificiel : rivière, vallée, route, voie ferrée, canal, etc.

I.2. Classifications de ponts

L'existence de plusieurs possibilités de différencier les ponts entre eux ne permet pas d'en établir une classification unique et indiscutable. Pour définir un ouvrage d'art on distingue plusieurs critères de classification que nous allons citer dans ce qui suit.

I.2.1. Suivant le matériau principal dont ils sont constitués

On parle de :

- Ponts en maçonnerie ;
- Ponts en béton armé ;
- Ponts en béton précontraint ;
- Ponts métalliques (fer, fonte, acier).



Figure I.1 Pont en maçonnerie



Figure I.2 Pont en béton armé



Figure I.3 Pont métallique

I.2.2. Suivant leur fonctionnement mécanique

Les ponts sont classés en trois grandes catégories suivant les dispositions de leurs éléments porteurs principaux.

- Les ponts à poutres ;
- Les ponts en arcs ;
- Les ponts suspendus et à haubans.



Figure I.4 Pont à poutre



Figure I.5 Pont en arc



Figure I.6 Pont suspendu

I.2.3. Suivant la nature de la voie portée

- Ponts-routes : servant de passage à une route ;
- Ponts-rails : servant de passage à une voie ferrée;
- Ponts-canaux : servant de passage à un canal
- Ponts-aqueduc: servent à faire passer des canalisations

I.2.4. Suivant leur disposition en plan

Ils sont classés en :

- Ponts droits ;
- Ponts biais ;
- Ponts courbes.

I.2.5. Suivant leur forme des poutres

On parle, de:

- Ponts à poutres caissons ;
- Ponts à poutres à âme pleine ;
- Ponts à poutres treillis ;



Figure I.7 Pont à poutres caissons



Figure I.8 Ponts à poutres à âme pleine

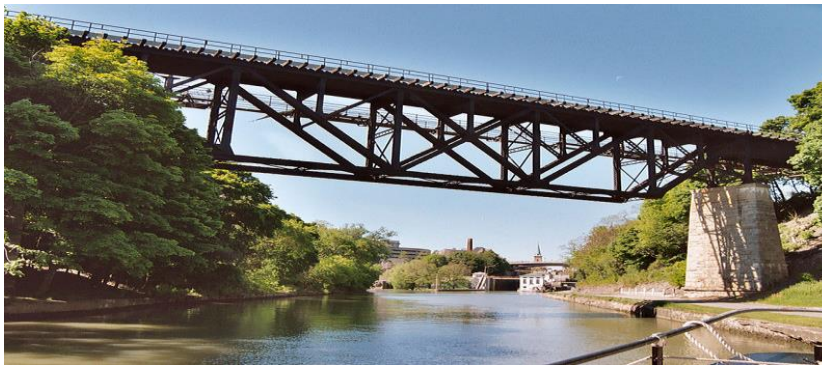


Figure I.9 Ponts à poutres treillis

I.2.6. Suivant la structure transversale

- Dalle rectangulaire ;
- Dalle à large encorbellement ;
- Dalle nervurée ;
- Ponts à poutres sous chaussée ;
- Pont à poutres latérales ;
- Pont caisson.

I.2.7. Suivant les méthodes de construction

- Construction sur cintres ou échafaudages ;
- Construction sur cintres mobiles :
 - Cintres autolanceur qui se déplacent en s'appuyant sur les piles et la partie déjà construite du tablier ;
 - Construction par encorbellements successifs sur des équipages mobiles qui s'accrochent à la partie déjà construite des fléaux de l'ouvrage.
- Construction au sol et mise en place par déplacement :
 - Poussage ;
 - Ripage ;
 - Rotation.
- Préfabrication d'éléments ;
 - Poutres
 - Voussoirs



Figure I.10 Construction sur étaievements

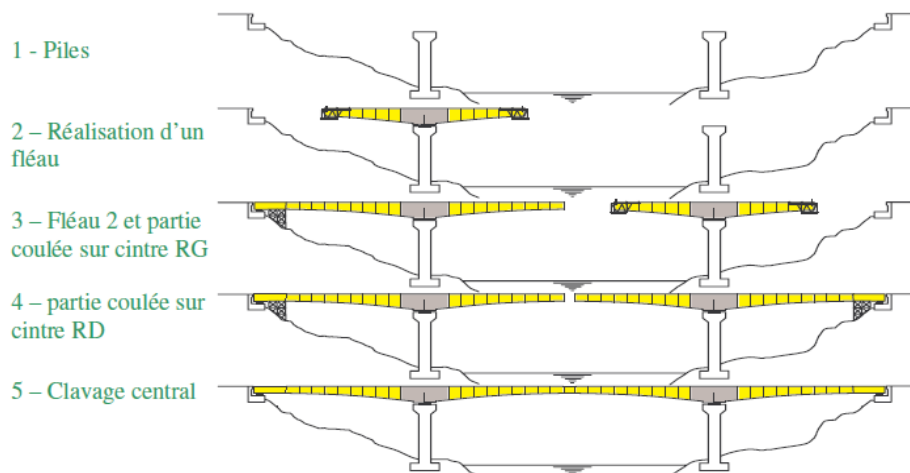


Figure I.11 Construction par encorbellement

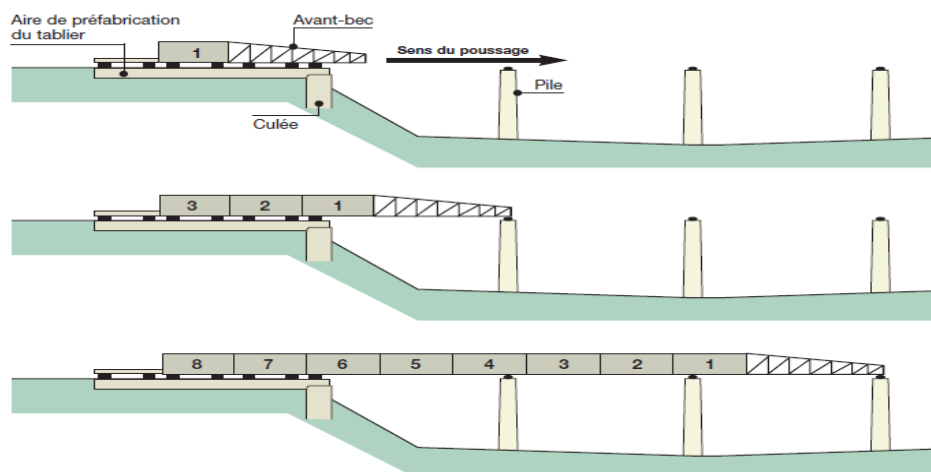


Figure I.12 Construction par poussage

I.3. Différentes parties d'un pont

Dans ses grandes lignes, un pont est constitué d'une structure résistante capable de porter la voie et ses charges d'exploitation. Il possède par ailleurs des équipements spécifiques

concourant à son bon fonctionnement, à la sécurité des usagers et à la durabilité de l'ouvrage, Un pont se compose des parties suivantes (figure I.13).

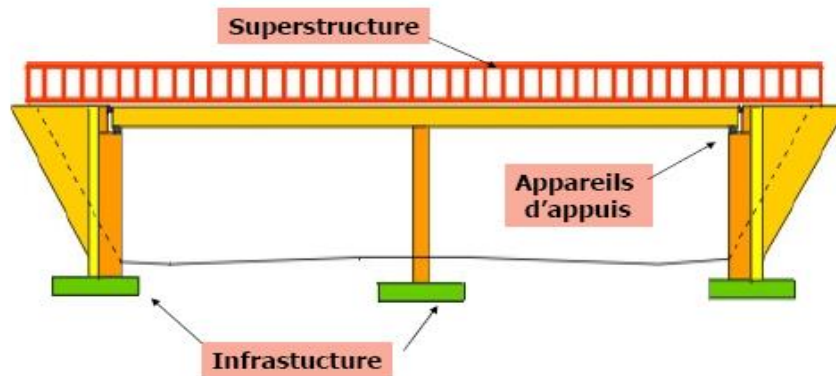


Figure I.13 Différentes parties d'un pont

I.3.1. La structure du pont

I.3.1.1. Le tablier

C'est la partie de l'ouvrage supportant la chaussée au-dessus de la brèche à franchir. Dans les ponts à poutres, on distingue les ponts à poutres latérales et les ponts à poutres sous chaussée. Que ce soit dans l'un ou l'autre cas, une dalle, des entretoises et parfois des longerons sont associés aux poutres pour former le tablier.

En plan, le tablier d'un pont peut être droit, biais (suivant l'inclinaison de la ligne d'appuis par rapport à l'axe longitudinal du pont), ou courbe. On appelle angle de biais (θ) l'angle entre la ligne d'appuis et l'axe longitudinal de l'ouvrage ; ainsi, pour un pont droit, $\theta=90^\circ$. [1]

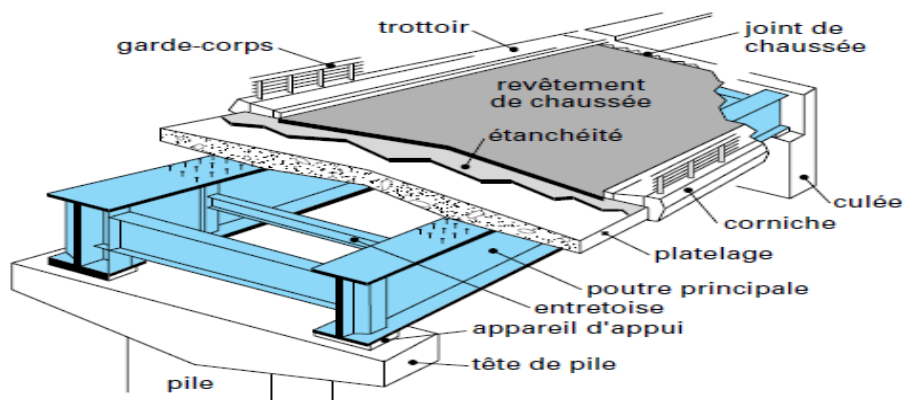


Figure I.14 Les différentes parties du tablier d'un pont

a/ Le platelage (la dalle)

Le platelage ou dalle sert d'élément de couverture, c'est lui qui reçoit la couche de roulement et les surcharges des véhicules. Outre le rôle de couverture, c'est le premier élément de résistance du pont et dont la fonction principale sera de reporter les charges permanentes et les surcharges d'exploitations aux poutres, longerons et entretoises.

b/ Entretoises

Les entretoises sont perpendiculaires aux poutres qu'elles relient entre elles. Elles ont un double rôle : celui de contreventement de l'ouvrage en s'opposant au déversement des poutres et celui de solidarisation, en répartissant les surcharges et le poids propre sur les poutres.

Les entretoises doivent être aussi raides que possible et assez nombreuses pour assurer la solidarité effective des poutres. On distingue trois types d'entretoisement qui sont :

- entretoises en treillis ,
- entretoises cadre :
 - simple,
 - à pièce de pont,
 - à pièce de pont avec console.
- entretoises pleines ou diaphragmes.

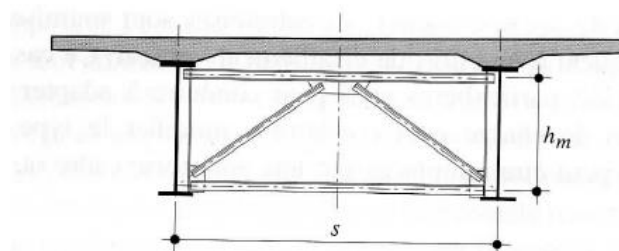


Figure. I.15 Entretoise en treillis [3]

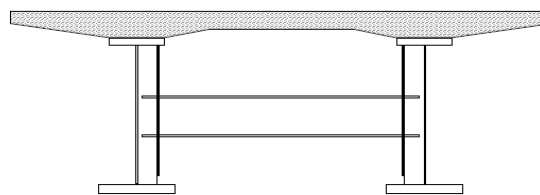


Figure. I.16 Entretoise cadre simple [3]

c/ Longérons

Les longérons essentiellement utilisés dans les ponts métalliques, sont disposés parallèlement à l'axe longitudinal de l'ouvrage et relient entre elles les différentes entretoises.

d/ Poutres principales

Les efforts dus au poids propre (de la dalle, des longérons et des entretoises) et aux surcharges, sont transmis aux poutres qui reportent sur les appuis constitués par les piles et les culées.

I.3.1.2. Les appuis

Nous venons de voir que les efforts de toute nature agissant sur l'ouvrage se trouvent reportés sur les poutres qui les transmettent aux appuis constitués par les appuis

intermédiaires, appelés piles, et des appuis d'extrémités, appelés culées qui à leurs tour ont pour mission de les reporter sur le sol par l'intermédiaire des fondations.

a/ Piles et les Culées

Les piles et les culées dépendent des deux éléments qu'elles unissent : le sol et le tablier. Elles sont donc conçues au mieux, en tenant compte de ces facteurs, ce qui se traduit par : résistance mécanique, stabilité et aspect. En plus de leur rôle de support des extrémités des ouvrages d'art, les culées doivent souvent soutenir les terres des ouvrages d'accès et sont étudiées en conséquence.

b/ Fondations

Elles permettent d'assurer la liaison entre les appuis et le sol.

I.3.2. Les équipements des ponts

I.3.2.1. Appareils d'appui

Sous l'effet des différences de températures, ou sous l'application des surcharges, les tabliers se déplacent par rapport aux piles et culées, il est nécessaire d'interposer entre eux des dispositifs permettant ces mouvements : ce sont les appareils d'appui. Ils sont conçus pour transmettre dans les meilleurs conditions possibles les efforts principalement verticaux (poids de l'ouvrage, composante verticale des efforts dus aux charges d'exploitation), mais aussi horizontaux (dilatations, forces de freinage, d'accélération, centrifuges, etc.).

Les appareils d'appui se répartissent en trois grandes familles :

- Les appareils d'appui en acier, (pour certains grands ponts métalliques);
- Les appareils d'appui en caoutchouc fretté, constitués par un empilage de plaques d'élastomère et de feuilles d'acier (ce sont les plus répandus pour l'ouvrage courant) ;
- Les appareils d'appui spéciaux.

I.3.2.2. Joints de chaussée

Les joints de chaussée (ou de dilatation) sont les dispositifs permettant d'assurer la continuité de roulement à la jonction entre tablier et culées. Lorsque les tabliers sont très longs, des joints intermédiaires sont prévus pour diminuer de l'intensité des efforts transmis en tête des appuis et limiter l'amplitude des variations de longueur dues à la température ou aux effets différés dans le cas des structures en béton (retrait, fluage).

I.3.2.3. Etanchéité

La pénétration de l'eau à l'intérieur du tablier (eaux de pluie, eaux de lavage et surtout eau chargée de sels anti-verglas) entraîne des risques graves de corrosion des armatures en acier (passives et actives) et doit être évitée, quel que soit le matériau utilisé.

La chape d'étanchéité a pour fonction de protéger la structure contre la pénétration de l'eau. Les systèmes les plus couramment réalisés sont les suivants :

- Les feuilles de préfabriquées (des feuilles à liants et armatures améliorés) ;
- Les couches d'asphalte ;
- Les systèmes à base de résine (des films minces).

Quel que soit le procédé employé, des précautions très strictes doivent être prises à l'exécution pour que la chape soit réellement imperméable et durable.

I.3.2.4 La couche de roulement

La couche de roulement qui vient au-dessus de la chape d'étanchéité est constituée le plus souvent d'une couche de béton bitumineux de 4 à 5 cm d'épaisseur. Sur les itinéraires à forte circulation, il faut prévoir la possibilité d'ajouter une deuxième couche portant l'épaisseur totale à une dizaine de centimètres.

I.3.2.5. Dispositifs de retenue

Ce sont des équipements, placés sur les bords latéraux des ponts, destinés à retenir les piétons ou les véhicules en perdition. Les dispositifs de retenue comprennent les garde-corps, les glissières et les barrières.

- **Les garde-corps** : Les garde-corps ont essentiellement pour objet la protection des piétons.
- **Les glissières** : Les glissières sont des éléments destinés à retenir des véhicules légers dont les conducteurs ont perdu le contrôle. Il existe des glissières souples et des glissières rigides.
- **Les barrières** : Les barrières sont destinées à empêcher des véhicules lourds de tomber du pont, et d'essayer de les remettre, si possible, dans la bonne direction. On distingue les barrières légères, les barrières normales et les barrières le lourdes.

1.3.2.6. Evacuation des eaux

Le système d'évacuation des eaux pluviales sur un ouvrage est un ensemble complexe destiné à recueillir, conduire et évacuer les eaux. Ce système est nécessaire pour éviter la stagnation des eaux qui risqueraient de créer des désordres dans la structure.

L'objectif d'un système d'évacuation des eaux, qui doit être prévu au niveau de la conception de l'ouvrage, est d'assurer :

- une évacuation rapide des eaux pluviales pour éviter l'inondation de la chaussée.
- une protection de la structure vis-à-vis des infiltrations d'eau plus ou moins chargées d'agents nocifs.

I.4. Conclusion

Maintenant que nous avons vu de plus près la constitution d'un pont nous allons nous intéresser dans le prochain chapitre aux principaux désordres les affectants.

Chapitre 2 : Principaux désordres dans les ponts

II.1. Introduction

Les ponts peuvent connaître des désordres de gravité très variable et dont les causes sont multiples. L'inventaire qui en est fait ci-après ne saurait être exhaustif : il propose seulement une classification des désordres les plus fréquemment observés pour faciliter l'exposé des méthodes permettant de les caractériser et de les traiter.

La présence de déformations ou de fissurations inhabituelles est souvent la manifestation tangible d'un endommagement, qu'il s'agisse de ponts en béton ou métalliques.

II.2. Actions sollicitant les ponts

Le poids propre est rarement une cause directe d'apparition de désordres, il est vrai que pendant la vie de l'ouvrage, le poids de certains équipements peut évoluer de façon significative, comme par exemple le rechargement de la couche de roulement dans les ponts routiers, mais ce sont surtout les actions variables, dues au trafic et actions naturelles, ou accidentelles qui sont en partie responsables de la dégradation des ouvrages [1].

II.2.1. Actions dues au trafic

Au fil des années, avec le développement des systèmes de transport routier, les véhicules sont devenus de plus en plus lourds et le trafic de plus en plus dense. Ce qui a nécessité une évolution régulière de la réglementation pour assurer aux constructions le niveau de sécurité approprié.

Le trafic sur les ponts est l'une des causes majeures de leur vieillissement, tant par ses effets extrêmes que par ses effets répétitifs susceptibles d'entraîner le phénomène de fatigue. En effet il sollicite dynamiquement les ponts entraînant une amplification des charges statiques qui peut être élevée, notamment au voisinage des discontinuités de la surface de roulement, comme les joints de dilatation, où l'on observe souvent une fissuration des dalles de couverture en béton armé [1].

II.2.2. Actions climatiques

Les principales actions climatiques affectant les ponts sont la température et le vent. La neige ne concerne que les ouvrages en site montagneux.

II.2.2.1. Effets de la température

Les effets de la température dans les ponts se manifestent de nombreuses façons, en modifiant la vitesse de certaines réactions chimiques, ou bien les propriétés des matériaux ou encore le comportement structural.

➤ **L'action de la température sur les matériaux :**

L'action de la température sur les matériaux est généralement bien connue. Lorsque la température est élevée, elle est par exemple, une des causes de la fissuration du béton en cours de durcissement du fait de son séchage naturel (fissuration due au retrait de dessiccation). L'acier quant à lui est encore plus sensible à la température. En effet lorsqu'on fait varier la température d'une éprouvette d'acier soumise à un effort de traction, on constate une variation de ses caractéristiques de ductilité. Pour certains aciers, si la température descend au-dessous d'un certain seuil, on constate une tendance à la fragilité et la rupture se produit pratiquement sans déformation plastique préalable [1].

➤ **Les effets de la température sur les structures :**

La température engendre, dans les structures hyperstatiques, des efforts dont on a parfois sous-estimé l'intensité ou que l'on a même négligés.

Les répartitions non uniformes de température dans un tablier de pont dépendent de l'ensoleillement, du vent et dans le cas des ponts mixtes, des différences de capacité et de conductivités thermiques respectives de l'acier et du béton.

Le gradient thermique traduit une différence de température entre la fibre supérieure, plus chaude, et la fibre inférieure du tablier. Sous l'effet de ce gradient thermique, la fibre la plus chaude est donc plus dilatée que la fibre la plus froide, ce qui tend à cambrer la structure et les liaisons hyperstatiques surabondantes, en s'opposant à ces déformations, auront tendance à créer des efforts supplémentaires dans la structure [1].

II.2.2.2. Effets du vent

En ce qui concerne le vent, son action sur les structures se manifeste de nombreuses manières : cela va de l'effet de dessiccation du béton frais en surface à l'application d'une pression dynamique sur la structure entraînant sa mise en mouvement, ce qui risque de provoquer des phénomènes de flottement dans le cas de structures souples (ponts à câbles).

En l'absence de dispositions appropriées, les efforts alternés résultant d'un écoulement tourbillonnaire dus au vent peuvent engendrer des phénomènes de fatigue dans les câbles, aboutissant à leurs ruptures [1].



Figure II.1 : Effet du vent sur le tablier d'un pont suspendu

II.2.3. Actions accidentelles

II.2.3.1. Action mécanique de l'eau

L'action mécanique de l'eau sur les structures se manifeste à travers les phénomènes d'affouillement et d'abrasion.

La présence des piles en rivière crée des mouvements tourbillonnaires de l'eau qui sont susceptibles d'en remanier le lit ayant pour conséquence la naissance d'un affouillement qui peut mettre en péril la stabilité de l'ouvrage en déchaussant ses fondations.

Dans le passé, l'affouillement des rivières autour des piles fut, l'une des principales causes de destruction des ponts. De nos jours, les techniques d'exécution de fondations profondes sont parfaitement maîtrisées par les entreprises spécialisées et les conséquences accidentelles d'affouillements ne sont plus à craindre pour les ouvrages neufs correctement fondés. Elles le sont, par contre, toujours pour les ouvrages anciens ou même récents lorsque leurs fondations manquent de robustesse [1].



Figure II.2 : Affouillement des fondations d'une pile de pont

II.2.3.2. Séismes

Nombreuses sont les régions du monde qui connaissent une activité sismique régulière, atteignant parfois une rare violence.

L'observation et interprétation des dégâts causés par les séismes sur les ponts ont permis d'une part de mieux comprendre la nature des sollicitations de type sismique sur ces ouvrages et d'autre part d'identifier un certain nombre de causes de fragilité classique et récurrentes liées à des défauts de conception.

Au cours d'un séisme, les efforts induits dans une structure sont essentiellement liés aux forces inertielles horizontales qui résultent de la mise en mouvement des masses induisant, dans les diverses parties d'un pont, des efforts dont l'intensité est d'autant plus élevée que les parties en question sont plus lourdes et rigides.

Sur les ponts, l'essentiel de la masse est généralement concentré au niveau du tablier. L'effort provient donc de celui-ci et descend dans les appareils d'appui, les piles, les culées pour finalement être transmis aux fondations.

Les effondrements les plus spectaculaires ont été observés dans le cas de structures peu hyperstatiques comportant des éléments de ductilité insuffisante, liée le plus souvent à une insuffisance d'éléments de contreventements [1].



Figure II.3 : Effondrement d'un pont suite à un séisme

II.2.3.3. Chocs de véhicules routiers et ferroviaires

Les chocs de véhicules sur les piles de ponts sont des accidents relativement fréquents. Les chocs sur tabliers sont moins fréquents, mais beaucoup plus dangereux surtout dans le cas de tabliers de ponts peu robustes (par exemple, tabliers à poutrelles précontraintes par fils adhérents).



Figure II.4 : Déformation de la membrure inférieure d'une poutre principale dus au choc de véhicule

II.3. Nature des désordres affectant les ponts métalliques

Les désordres affectant les ponts métalliques ont principalement deux origines :

- l'une physico-chimique comme la corrosion,
- l'autre mécanique comme la fatigue, la désorganisation d'assemblages boulonnés ou rivés, les voilements ou déversements.

II.3.1. La corrosion

La corrosion est le phénomène naturel par lequel les métaux ferreux tendent à se transformer en oxyde ou hydroxyde ce qui entraîne une dégradation de ses propriétés.

Les facteurs de corrosion sont très nombreux. De manière simplifiée et non exhaustive, on peut dire que les uns dépendent du métal lui-même et que les autres dépendent du réactif. Les premiers se répartissent en facteurs métallurgiques (composition, traitements thermiques, mécaniques et de surface) et en facteurs liés aux conditions d'utilisation (conception des pièces et des assemblages, sollicitations mécaniques, état de surface). Les seconds sont essentiellement la nature du réactif, sa concentration, son PH, sa teneur en oxygène, la température et la pression [2].

Dans les ouvrages de génie civil, le type de corrosion prédominant de l'acier est la corrosion dite en solution, résultant d'un processus électrochimique faisant intervenir des transferts de charges électriques élémentaires entre le métal et le milieu environnant.

Un autre type de corrosion peut concerner certains éléments particuliers (boulons à haute résistance, tiges d'ancrage précontraintes, fils de câbles de ponts suspendus), c'est la corrosion fissurante sous contrainte (ou sous tension) qui, comme son nom l'indique, se traduit par la formation de fissures transversales aboutissant, à terme, à la rupture brutale de l'élément. Elle affecte surtout les pièces soumises à d'importants efforts de traction, présentant en outre une composition chimique et une structure métallurgique défavorables [2].

La corrosion du type "par aération différentielle" est la plus répandue. Un ouvrage non protégé par un revêtement anticorrosion finirait par périr par corrosion généralisée mais, même en présence de peinture, le vieillissement de cette dernière et sa dégradation par manque d'entretien permettent à la corrosion de s'installer dans des zones préférentielles (zones de rétention d'eau et d'humidité).



Figure II.5 : Rivets attaqués par la rouille

II.3.2. La fatigue

Beaucoup plus rares que les désordres dus à la corrosion et limités à des parties d'ouvrages particulièrement sollicitées ou à des dispositions constructives défectueuses, les désordres dus à la fatigue méritent, une attention particulière car ils sont plus insidieux, donc bien moins facilement repérables, et ils peuvent, suivant leur localisation, provoquer la rupture brutale d'éléments vitaux d'une structure s'ils ne sont pas détectés à temps.

La fatigue se traduit par une fissuration des éléments métalliques, fissuration qui, après un stade d'amorçage, progresse pour aboutir au stade où le métal sain subsistant n'est plus à même de transmettre les efforts auxquels il est soumis et où l'on assiste à la ruine de la pièce.

Si, d'une façon très générale, on peut dire qu'il y a fatigue toutes les fois que l'on est en présence d'efforts variables dans le temps, l'endurance d'une pièce ou d'un assemblage, dépend de nombreux facteurs tels que la géométrie de la structure, l'histoire des efforts

appliqués, la loi de comportement à la déformation et la loi de fissuration du matériau considéré.

Parmi les facteurs occasionnant des désordres dus à la fatigue, on cite les concentrations de contraintes, les nombreux cycles de chargements variables et l'amplitude de variations de contraintes. On rencontrera donc ces désordres principalement dans les parties les plus sollicitées d'ouvrages supportant une circulation lourde et intense [2].

Sur les ouvrages anciens à ossature rivée, les désordres dus à la fatigue se localisent souvent aux assemblages de liaison entre différents éléments (pièces de pont/poutres principales par exemple), de même que dans les sections où il y a discontinuité d'éléments entraînant une mauvaise transmission des efforts. La fissuration s'amorce dans les angles rentrants des découpes, ou à partir des trous de rivets.

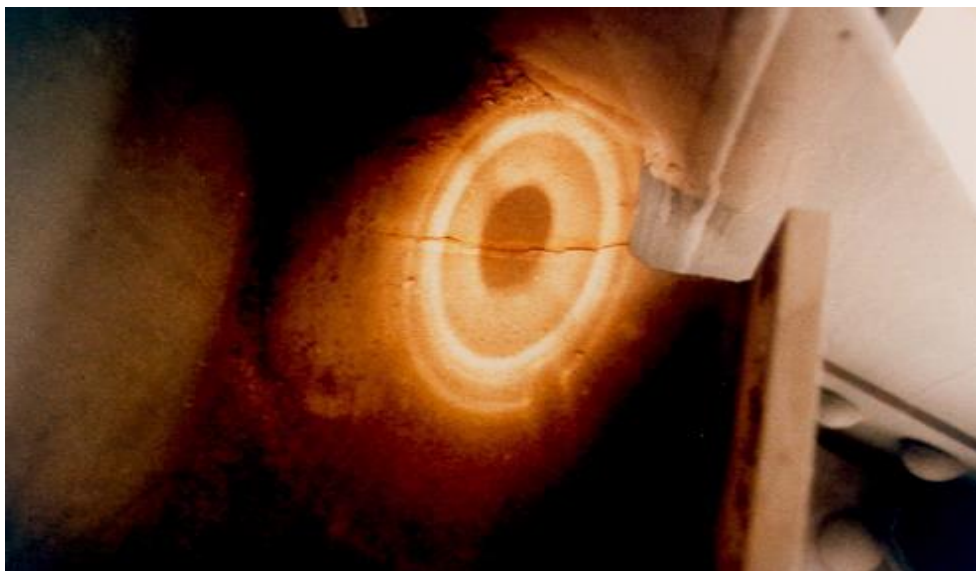


Figure II.6 : Fissure due à la fatigue d'un raidisseur longitudinal d'âme de poutre

Les désordres dus à la fatigue apparaissent principalement dans les zones d'assemblages où l'on constate les effets suivants [1].

a/Dans les assemblages rivés

- des concentrations de contraintes au voisinage des rivets ;
- des défauts d'épurage de barres provoquant des moments parasites ;
- des concentrations de contraintes dues à l'arrêt brutal d'une membrure ou d'une cornière.

b/Dans les assemblages soudés

- des concentrations de contraintes souvent importantes dues au tracé des pièces mais aussi à des défauts (parfois minimes) de soudage (caniveaux, stries, etc.) ou d'usinage (stries d'oxycoupage) ;
- des contraintes internes parfois importantes dues à des retraits de soudage bridés ;
- un durcissement du métal de base au voisinage de la soudure qui réduit son allongement à rupture et, par voie de conséquence, sa ténacité ;
- dans certains cas, des sous-dimensionnements de tôles ou de cordons de soudure ;
- des défauts d'exécution ou des parachèvements mal faits (soudures non ou mal meulées).



Figure II.7 : Rupture par fatigue d'une diagonale tendue sur un point de soudure

II.3.3. Autres types de désordres

D'autres types de désordres peuvent être rencontrés sur les ouvrages métalliques. Les uns affectent les assemblages, les autres le corps même des pièces.

Les premiers concernent les assemblages rivés ou boulonnés ; ce sont, pour les ouvrages rivés, des désorganisations localisées telles que des insuffisances de serrage, des jeux, des ovalisations de trous résultant de l'action du trafic (figure II.8). [2]



Figure II.8 : Jeu d'assemblage

Pour les assemblages par boulons à serrage contrôlé, on peut assister à un déplacement de pièces dû à une mauvaise prise en compte du coefficient du glissement des pièces entre elles, soit à une relaxation des boulons au cours du temps, soit encore à un défaut de serrage initial.

Plus rarement, on rencontre des ruptures de rivets, la plupart du temps provoquées par un foisonnement de rouille entre les pièces assemblées, ou des ruptures de boulons entraînées par un excès de serrage à l'origine.

Le second type de désordres recouvre les phénomènes d'instabilité élastique localisés, tels que flambement de semelle entre deux cours de rivets, voilement d'âme de poutre, ou d'ensemble tels que déversements de poutre. A l'origine de ces phénomènes, on retrouve

souvent un excès de sollicitations dû, par exemple, à un passage de convoi en surcharge, ou à des opérations de vérinage mal conduites.



Figure II.9 Voilement d'âme d'une poutre métallique

II.4. Erreurs de conception dans les ponts métalliques ou en ossature mixte

Les erreurs les plus fréquentes concernent la non-prise en compte des risques de corrosion dans la conception ; sans être limitatifs, on peut citer les cas suivants :

- absence de chape d'étanchéité ;
- évacuation des eaux mal conçue, provoquant des ruissellements sur des semelles de poutres ;
- fil d'eau disposé à la verticale d'un longeron ou d'une poutre ;
- espace insuffisant entre le mur garde-grève et l'extrémité du tablier ne permettant pas l'entretien de l'entretoise d'about et de l'extrémité des poutres ;
- joints de chaussée laissant l'eau ruisseler sur la charpente métallique ;
- membrures inférieures en forme de U ouvert vers le haut facilitant l'accumulation d'eau et de détritux ;
- montants et diagonales constitués par quatre cornières reliées par des barrettes. L'espace libre entre les deux cornières, égal à l'épaisseur des barrettes (de 6 à 10 mm) est trop faible pour permettre le moindre entretien et favorise l'accumulation de poussière et d'humidité ;
- trop grand entraxe des rivets, ce qui permet à l'humidité de pénétrer entre deux tôles et d'y développer de la corrosion ; le foisonnement de la rouille provoque un écartement des tôles entre deux rivets, écartement qui, lui-même, favorise la pénétration et la stagnation d'eau.



Figure II.10 Stagnation d'eau due à une mauvaise disposition constructive

Outre ces erreurs qui provoquent des désordres par corrosion, on constate parfois des fautes de conception qui ont des conséquences directes sur la tenue des ouvrages. Par exemple, lorsque les fibres moyennes des barres aboutissent à un même nœud ne sont pas concourantes au sein de la matière, des moments secondaires non négligeables se développent, pouvant provoquer des ruptures de rivets ou de déchirures de pièces (figure II.11) [1].

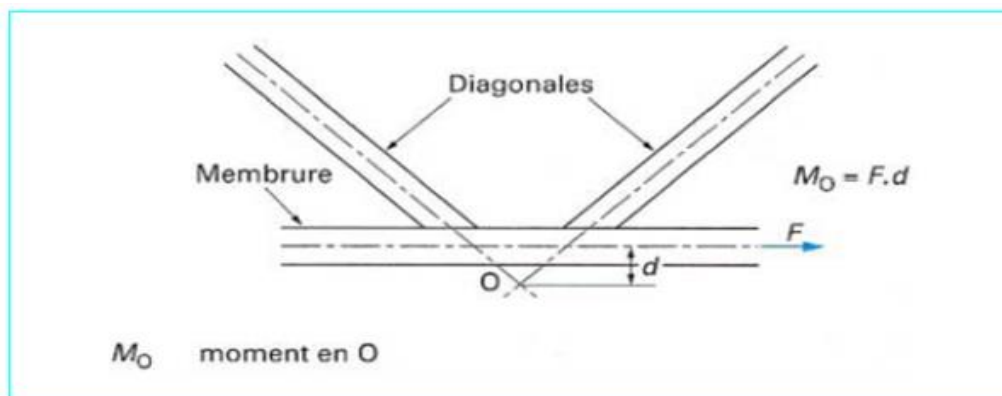


Figure II.11 : Exemple de défaut d'épuration des barres

a/Rivets travaillant à l'arrachement des têtes

Ce défaut se rencontre surtout à l'attache des longerons sur les pièces de pont. Les longerons étant calculés comme une suite de travées isostatiques, certains constructeurs se contentaient d'attacher l'âme du longeron sur celle de la pièce de pont à l'aide de cornières. La continuité des longerons de part et d'autre des pièces de pont provoque l'apparition de moments de flexion qui sollicitent les têtes de rivets à l'arrachement, provoquant, dans les cas extrêmes, leur rupture [1].

b/Discontinuité brutale dans la section d'une pièce

L'exemple le plus courant est celui des membrures constituées par un empilage de tôles réunies par soudure où l'on n'a pas pris la précaution de délarder l'extrémité de la semelle additionnelle : il se produit une concentration de contraintes à l'extrémité de cette semelle (figure II.12). Cette concentration, qui se cumule aux contraintes de retrait de soudage ou même aux effets de défauts de surface des cordons de soudure tels que caniveaux, stries, etc.,

peut provoquer la fissuration de la soudure et de la première semelle. Ce phénomène est encore plus dangereux lorsque la semelle additionnelle a été arrêtée en pleine largeur : le cordon de soudure, qui tourne à 90° suivant un rayon très faible, engendre localement des contraintes de retrait selon deux directions perpendiculaires, ce qui accroît fortement les risques de fissuration.

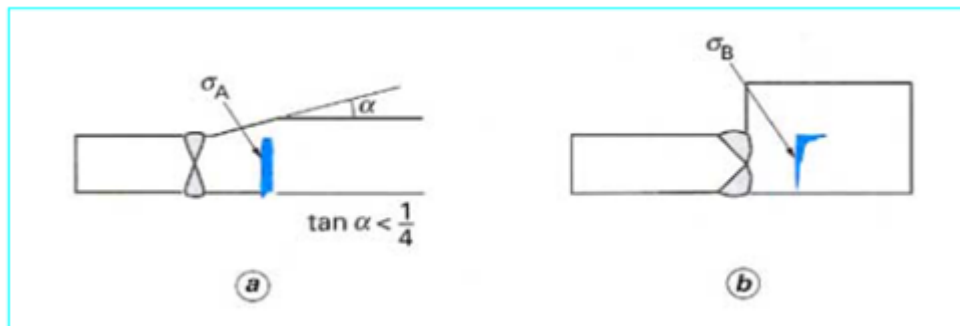


Figure II.12 Contraintes dans des tôles réunies par soudure

c/Réparations « abusives »

Le renforcement ou la réparation d'un ouvrage métallique sont plus simples et plus faciles à concevoir et à mettre en œuvre que pour un ouvrage en béton, mais une réparation mal conçue ou mal exécutée peut provoquer des désordres graves, voir la ruine de l'ouvrage.

Les erreurs les plus fréquentes sont les suivantes :

- Renforcement par soudage sans précaution sur un acier peu ou pas soudable.
- Mauvaise conception des réparations par soudure.
- Remplacement sans précaution d'un élément endommagé : Les poutres en treillis anciennes sont souvent intérieurement hyperstatiques et il est en général possible, sans mettre en cause la stabilité de la structure sous poids propre, de démonter et de remplacer une diagonale sans précaution particulière. Dans un tel cas, la nouvelle diagonale n'est sollicitée que par les charges d'exploitation. La totalité du poids propre et une fraction des charges d'exploitation sont alors reprises par les diagonales restées en place qui ne sont pas toujours capables d'y résister.
- Modification de la répartition des efforts dans une structure hyperstatique : Il est arrivé que des ouvrages ne présentent pas une résistance homogène dans toutes leurs sections, certaines zones étant surdimensionnées par rapport à d'autres. Dans un tel cas, il est tentant de renforcer les zones les plus faibles dans l'intention de conférer à l'ouvrage la même capacité portante dans toutes ses sections. Mais attention, le fait de renforcer certaines zones d'une poutre continue en modifie la loi d'inertie et, par voie de conséquence, la répartition des moments fléchissants. Certaines sections, qui présentaient une résistance suffisante avant renforcement, peuvent subir des contraintes excessives après réparation.
- Renforcement d'un assemblage rivé par de la soudure : Une erreur assez fréquente consiste à renforcer un assemblage rivé insuffisant par de la soudure. Il s'agit là d'une erreur grossière car :
 - la soudure ne travaille alors que sous charge d'exploitation ;
 - la répartition des efforts dus aux charges d'exploitation entre rivets et soudure dépend du tracé des pièces mais, en général, la mise en charge de la soudure n'intervient qu'après rupture de la première ligne de rivets ou déchirure de la pièce ;

— la soudure, souvent difficile à réaliser, risque d'être une cause de fissuration.

d/Cas particulier des ponts mixtes

Dans le cas des ponts mixtes, lorsque la connexion entre la dalle et les poutres n'a pas été correctement réalisée, des microfissures se développent dans le béton entourant les connecteurs, dues au retrait /fluage au jeune âge du béton ou à la corrosion des connecteurs. Ces derniers, ne pouvant suivre les déformations résultant de l'accroissement graduel de la fissuration, ont plastifié le béton environnant et réduit sa résistance. Un glissement relatif entre la dalle et les poutres s'est alors développé peu à peu, mettant en cause l'hypothèse de mixité de la structure.

D'une façon générale, le décollement d'une dalle de pont mixte par rapport aux poutres métalliques, favorisant en particulier l'infiltration de l'eau dans la poutraison ou dans le caisson, est dû à une insuffisance de la connexion. Cette insuffisance est souvent liée à une sous-estimation des efforts de glissement. Par ailleurs, les moments d'encastrement des dalles sur les poutres principales au droit des cadres d'entretoisement sont d'intensité élevée. La dalle a tendance à tourner (avec soulèvement unilatéral) par rapport aux membrures si sa connexion n'est pas suffisamment renforcée.



Figure II.13 Désordre au niveau de la connexion : décollement entre dalle et poutre

Un autre problème posé par les ponts en ossature mixte est lié à la fissuration transversale de la dalle en béton armé, due non seulement aux déformations imposées dans les zones de moment négatif, mais également aux retraits au jeune âge du béton (retrait thermique et retrait endogène). Si elle devient trop dense, elle peut mettre en cause la longévité de l'ouvrage [1].

II.5. Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre les principaux désordres et pathologies affectant les ponts métalliques et à ossatures mixtes. Les mécanismes de dégradation des matériaux et perte de performance sont dus à plusieurs facteurs qu'on ne peut pas maîtriser pleinement, donc la notion de la structure parfaitement durable est une notion irréalisable.

Maintenant que nous connaissons les principaux désordres nous allons nous intéresser aux méthodes permettant leurs identifications pour l'élaboration d'un diagnostic aussi précis que possible.

Chapitre 3 : Auscultation des ponts métalliques

III.1. Introduction

Les techniques d'auscultation diffèrent suivant la nature des désordres constatés, mais les choix sont guidés par l'idée que l'on peut se faire des causes probables de la pathologie relevée. Une auscultation efficace doit permettre d'apprécier la qualité des matériaux en place et de caractériser le mode de fonctionnement actuel de la structure.

III.2. Différences entre les techniques d'auscultation

On peut appliquer sur un ouvrage des techniques d'auscultation non destructives (qui ne causent aucune dégradation) ou destructives (qui nécessitent le prélèvement d'un échantillon).

Les techniques d'auscultation destructives sont souvent la seule possibilité permettant d'acquérir des données fiables sur les caractéristiques des matériaux et sur l'état à l'intérieur de l'ouvrage. Cependant, ces résultats ne concernent que l'échantillon testé et ne sont donc pas représentatifs de l'ensemble de l'ouvrage.

Les méthodes de mesure non destructives quant à elles, saisissent des mesures ponctuelles effectuées sur un réseau déterminé, nous permettant d'obtenir facilement des informations sur la surface d'un ouvrage. Par contre, leurs champs d'action sont restreints car l'acquisition de données à l'intérieur même de la structure est en général limitée en comparaison avec les méthodes destructives.

III.3. Auscultation du matériau

L'auscultation des matériaux s'appuie à la fois sur :

- des études effectuées sur prélèvements,
- des méthodes physiques d'examen en place.

III.3.1. Études sur prélèvements

Les prélèvements sont des échantillons qui sont pratiqués dans les zones les moins vitales et dont on limite la taille et le nombre pour ne pas aggraver l'endommagement potentiel de la structure.

III.3.1.1. Examens métallographiques

L'observation simple d'un objet métallique ne donne pas de renseignement particulier hormis l'état de surface (stries, fissures) c'est pour cela qu'on s'intéresse à la métallographie.

La métallographie est la technique consistant à déterminer la structure d'un métal en l'observant avec un microscope optique. On peut ainsi déterminer, selon les cas :

- la taille et la forme des cristallites (ou grains) ;
- la direction des lignes de glissement (intersection des plans de glissement avec la surface).

Ce qui permettra de déterminer de façon très complète la nature d'un métal, sa structure et son mode d'élaboration [4].

III.3.1.2 Essais mécaniques

Ils peuvent fournir des renseignements sur la nature même du matériau : par exemple, l'allure du diagramme allongement/contrainte ou l'analyse du faciès de rupture d'un échantillon d'acier permettent d'en préciser le type.

Les différents essais mécaniques effectués sont :

- Essais de compression, traction, cisaillement.
- Essai de mesure de dureté,
- Essai de résistance à la fissuration.

III.3.1.3 Essais physiques

Les essais mécaniques ne sont pas les seuls à être pratiqués sur les échantillons. On procède aussi à des mesures de densité, de porosité, de teneur en eau, perméabilité à l'eau ou au gaz ... etc.

III.3.2. Examen du matériau en place

Il est assez rare que l'on procède à l'examen en place de l'acier d'un pont. Cependant, moyennant certaines précautions opératoires, des essais sont possibles parmi lesquelles nous pouvons citer les exemples suivants :

- L'essai de ressuage ;
- Magnétoscopie ;
- Contrôle par ultra-sons ;
- Contrôle par Radiographie ;
- Mesure de l'épaisseur de peinture anticorrosion.

III.3.2.1. Essai de ressuage (acier)

Le procédé est utilisé pour détecter des fissures dans les constructions en acier. L'application se fait sélectivement là où d'éventuelles fissures sont à craindre (soudures, couvre-joints, nœuds de poutres, rivets).

Lors de l'essai, la surface à contrôler est recouverte d'une couche de peinture rouge qui va pénétrer dans les discontinuités. Puis, à l'aide d'un diluant on retire la peinture appliquée et on pulvérise une fine craie hygroscopique, qui va aspirer le colorant rouge pénétré dans la fissure, la rendant ainsi bien visible sur le fond blanc [4].

L'essai de ressuage est le procédé le plus utilisé pour la détection des fissures. Cependant, il ne permet pas d'observer les fissures très fines (< 2 à $3 \mu\text{m}$).

Comme essais à mener en complément, on peut envisager la magnétoscopie ou les ultrasons.

III.3.2.2. Magnétoscopie

Le contrôle par magnétoscopie (MT) est une méthode de contrôle qui permet de mettre en évidence des discontinuités ou des fissures débouchantes ou proche de la surface. Cette technique fonctionne uniquement sur matériau ferromagnétique.

Le principe de la méthode consiste à créer un flux magnétique intense à l'intérieur d'un matériau ferromagnétique. Lors de la présence d'un défaut sur son chemin, le flux magnétique est dévié et crée une fuite qui va attirer les particules fluorescentes du produit révélateur utilisé, fournissant ainsi une signature caractéristique du défaut.

III.3.2.3. Contrôle par ultrason

La méthode de contrôle par ultrason permet de détecter des défauts non visibles dans la pièce à contrôler (par exemple, des fissures sous peau, diminution de l'épaisseur, ...).

Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'une onde ultrasonore se propageant dans la pièce à contrôler. Le train d'onde émis se réfléchit sur les défauts puis revient vers le traducteur (qui joue souvent le rôle d'émetteur et de récepteur). L'interprétation des signaux permet de positionner le défaut et de définir ses dimensions relatives [7].

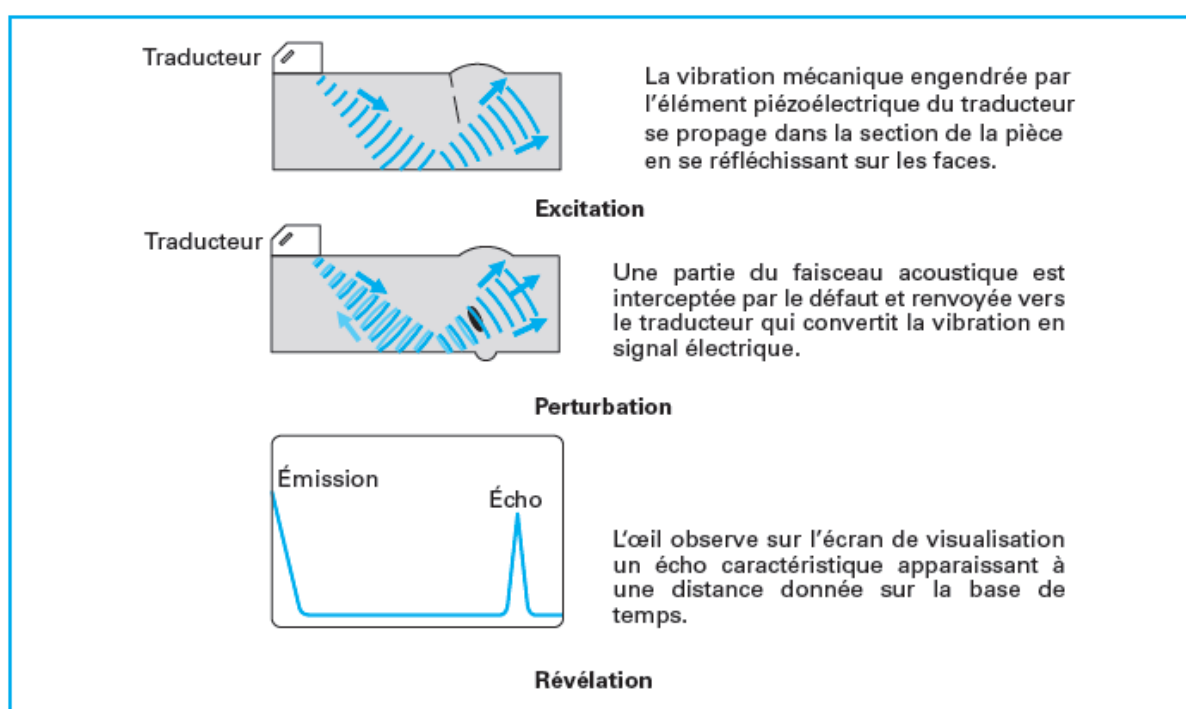


Figure III.1 : Principe du contrôle par ultrasons

III.3.2.4 Contrôle par radiographie

La radiographie est une méthode de contrôle non destructif qui consiste à obtenir une image de la densité de matière d'un objet traversé par un rayonnement électromagnétique X ou gamma. La quasi-totalité des matériaux peut être examinée en radiographie.

La radiographie permet de visualiser les manques de matière dans le volume de l'objet contrôlé, sur une image à deux dimensions (radiogramme), nous permettant ainsi de détecter tout type de cavité ou de matériaux étrangers inclus dans la pièce. Un rayonnement émis par une source traverse la pièce et interagit avec celle-ci avant d'être recueilli par un dispositif détecteur. Un changement d'épaisseur et/ou de matériau modifie la quantité de rayonnement

transmis et donc la densité optique conduisant à un noircissement de l'image obtenue lors de la révélation.

Une fois les radiogrammes obtenus on les compare avec des images de référence établies pour le type de matériau examiné, la gamme d'épaisseur concernée et le rayonnement utilisé.

III.3.2.5. Mesure d'épaisseur de peinture (Epaissimetre)

Le principe de la méthode repose sur le principe d'induction magnétique entre la sonde de mesure et l'acier sous la peinture. Plus la couche de peinture est épaisse, plus le champ magnétique est affaibli. Le résultat des mesures est une indication quantitative sur l'épaisseur de la couche appliquée, mais sans indication sur la qualité de la peinture [4].

La méthode est très bonne pour une détermination fiable de l'épaisseur des couches. Le procédé ne peut s'appliquer que sur des peintures complètement sèches et durcies (pour la mesure des couches non durcies il existe des appareils spéciaux, dont la précision est moindre).

La mise en œuvre est rapide, les résultats des mesures sont disponibles immédiatement et des essais complémentaires ne sont pas nécessaires.



Figure III.2 : Appareil pour la mesure de l'épaisseur de peinture (epaissimetre)

III.4 Auscultation de la structure

Le suivi d'un ouvrage comporte la vérification périodique de ses déformations éventuelles sous charges permanentes, en les comparant lorsque cela est possible, à un état de référence déterminé immédiatement avant sa mise en service.

III.4.1 Mesure des déformations générales et des mouvements

La mesure des flèches se fait traditionnellement au milieu des travées testées, mais rien n'empêche, si on a besoin de mieux connaître la déformée d'une travée, d'augmenter le nombre de points de mesure. Une limitation est tout de même donnée par la précision des mesures, qui est le plus souvent de l'ordre du millimètre.

Les principales techniques employées pour mesurer les flèches sont :

- le nivellement topographique, qui ne peut être exécuté que par un personnel hautement qualifié ;
- le fleximètre mécanique, cette méthode à l'inconvénient de nécessiter un point d'ancrage fixe sous l'ouvrage, qu'il n'est pas toujours possible de réaliser ;
- les capteurs de déplacements à traduction électrique permettant un enregistrement des mesures ;
- le flexigraphe laser : Ce dernier appareil comprend une source émettant un faisceau laser orientable, que l'on place en général sur un support fixe ; le faisceau constitue alors une base fixe dans l'espace. La cible frappée par le faisceau est constituée d'une cellule photoélectrique mobile sur un chariot vertical. Lorsque son support se déplace verticalement, la cible reste automatiquement centrée sur le faisceau et la flèche prise par l'ouvrage au droit du suiveur de spot (figure III.3b) est donc égale au déplacement de la cellule sur son chariot [1].

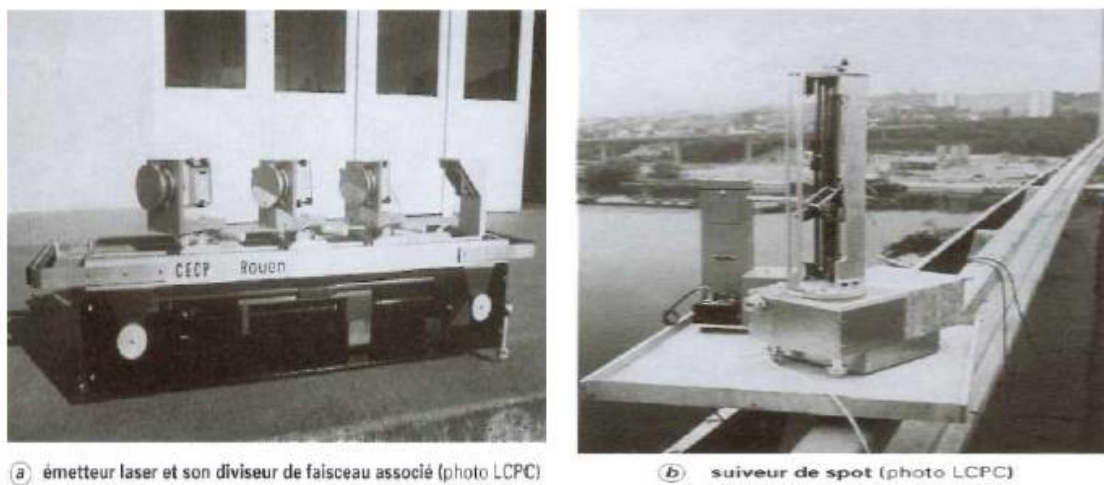


Figure III.3 Flexigraphe laser

Le comportement d'un ouvrage sous l'action de charges d'exploitation peut aussi être étudié en mesurant :

- la rotation du tablier sur appuis ou la rotation de sections particulières à l'aide de clinomètres,
- l'inclinaison de piles ou de murs à l'aide de pendules (pendules directs ou inverses, dont le point fixe est situé en bas et dont la mesure d'inclinaison est réalisée en haut).

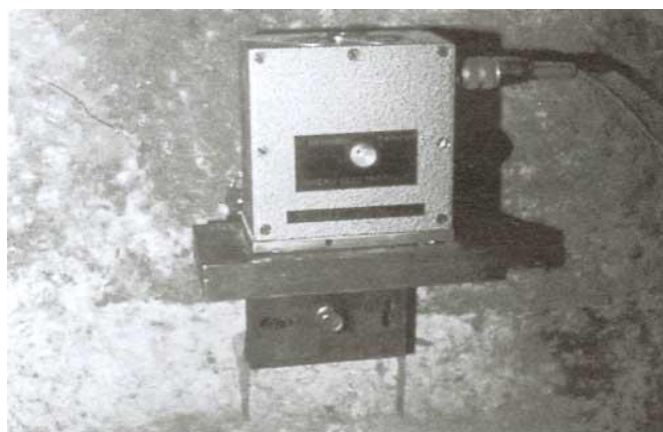


Figure III.4 : Clinomètre fixé sur l'âme d'un pont-caisson (Photo LCPC)

On peut évaluer le comportement dynamique des ouvrages à l'aide d'accéléromètres ou de sismographes enregistreurs. Avec ces derniers, on mesure, par exemple, la composante dynamique de la flèche sous le passage d'un convoi ou les mouvements horizontaux des têtes de pile, sous l'action du freinage d'un véhicule. Les données fournies par les accéléromètres nécessitent une double intégration du signal pour obtenir des déplacements [1].

III.4.2 Mesures de force sur ouvrages (Pesée de réactions d'appui)

L'un des objectifs majeurs d'une mesure de réactions d'appui est de fournir des informations sur les redistributions d'efforts dans l'ouvrage. Sur le plan pratique, on soulève le tablier à l'aide de vérins et on mesure simultanément la force nécessaire et le déplacement vertical du tablier, à l'aide d'un comparateur précis.

La figure III.5 montre l'allure de la fonction représentative de la force appliquée P en fonction du soulèvement d .

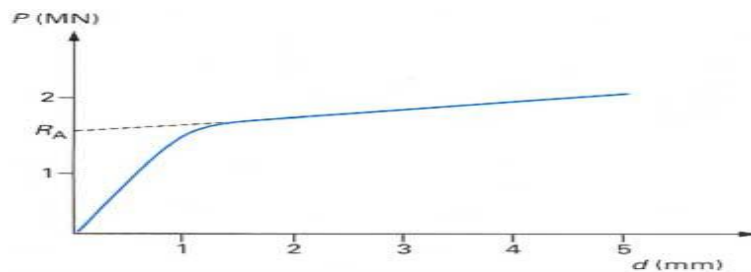


Figure III.5 : Évolution de la réaction d'appui en fonction du déplacement lors de la pesée

La première partie du graphe correspond à la libération des appareils d'appui, la deuxième partie, rectiligne, à la flexion du tablier, et sa pente en traduit la rigidité. En prolongeant cette deuxième partie jusqu'à $d=0$, on obtient la réaction cherchée.

Pour soulever le tablier, on utilise actuellement la technique du double vérin plat ou celle du vérin à piston (figure III.6 (a)).

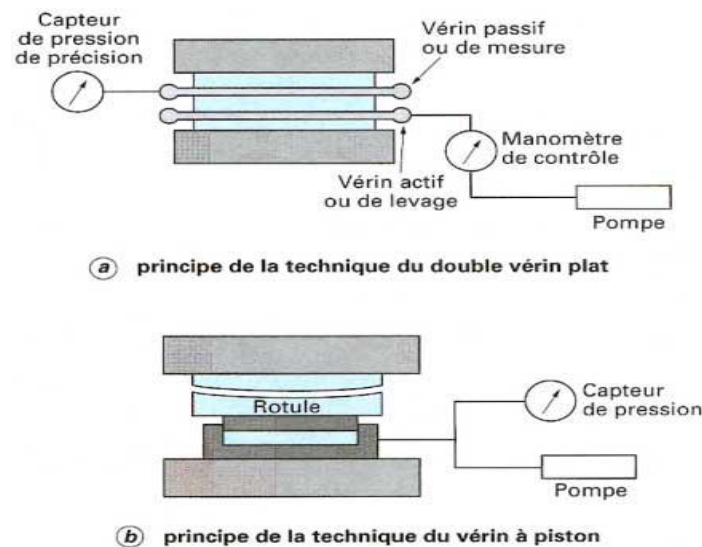


Figure III.6 : Techniques de soulèvement du tablier d'un pont

À noter qu'il est possible, de nos jours, de mettre en place des appareils d'appuis directement équipés de dispositifs permanents de mesure de la force transmise.

III.4.3 Mesures locales de fonctionnement

- Mesures de déplacement : fissuromètre, comparateur mécanique, capteur électrique.
- Mesures de rotation : nivelle, pendule, inclinomètre.
- Mesures de vibration et d'accélération sismomètres, accéléromètres.
- Mesures de déformations
 - jauges de déformations à fil résistant,
 - extensomètres mécaniques,
 - témoins sonores (ou cordes vibrantes).
- Mesures de contrainte (par la méthode de libération)
- Mesures de température sonde au platine, thermocouple.
- Mesures de teneur en eau et d'humidité

III.4 Évaluation des ouvrages

Lorsque l'on accroît progressivement l'intensité du système de charge auquel est soumise la structure, au-delà d'un certain seuil, les effets cessent d'être complètement réversibles. En d'autres termes, la structure perd graduellement de sa « valeur ». De façon schématisée, cette fonction de « perte de valeur » possède deux paliers correspondant à l'apparition de deux familles de phénomènes que l'on idéalise à travers les concepts d'états limites de service et d'états limites ultimes (figure III.7). L'apparition de désordres est le signe tangible du dépassement de certains états limites de service.

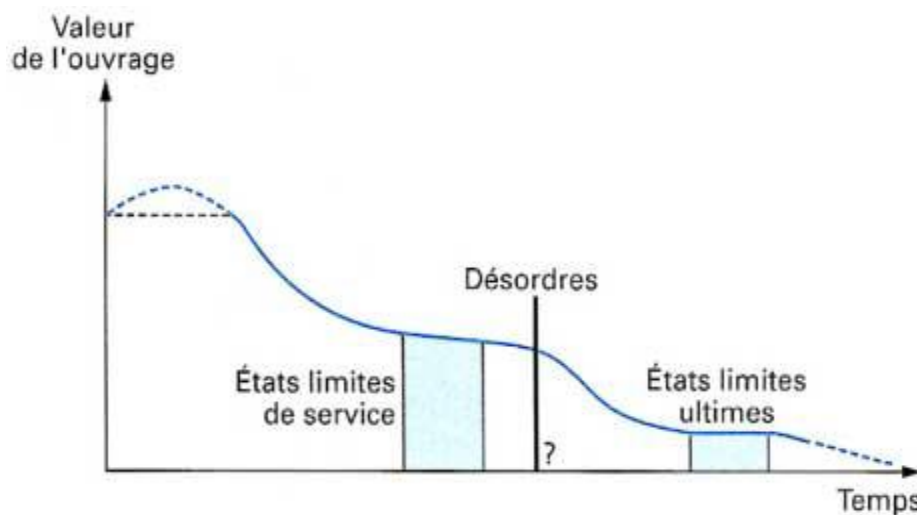


Figure III.7 : Représentation symbolique de la perte de valeur dans le temps d'une construction

L'évaluation d'un ouvrage existant consiste à en apprécier l'état physique et mécanique. Elle est nécessaire lorsqu'il est envisagé de modifier ses conditions d'exploitation (par exemple, augmentation du nombre de voies de circulation) ou de remédier à certains désordres révélateurs d'une pathologie affectant la structure et les matériaux.

III.4.1 Étapes de l'évaluation

En règle générale, l'évaluation d'un ouvrage comporte deux phases successives : le diagnostic préliminaire et le recalcul.

Au cours de la phase de diagnostic préliminaire, on ne s'intéresse généralement qu'aux éléments porteurs principaux afin de définir et de prendre les éventuelles mesures d'urgence qui s'imposent si la sécurité physique du public est en cause (par exemple, limitation, voire interdiction complète de la circulation sur un pont-route). Il s'agit donc d'une évaluation sommaire basée sur l'examen des documents existants et sur un constat de l'état de l'ouvrage examiné.

Il peut arriver, dans certaines circonstances exceptionnelles, qu'il soit nécessaire de procéder à un essai de chargement statique pour évaluer l'étendue du domaine de comportement élastique et réversible de la structure potentiellement endommagée. Un tel essai doit être conduit avec une charge d'intensité progressive que l'on applique par paliers.

Dans les cas usuels, le diagnostic préliminaire débouche sur l'élaboration d'un programme d'investigations qui seront nécessaires pour aboutir à un diagnostic précis et à une évaluation quantitative fiable de la sécurité structurale, et pour permettre l'élaboration du projet de renforcement ou de réparation. Ces investigations peuvent comprendre :

- un certain nombre d'essais tels que ceux décrits au paragraphe III.3, effectués et interprétés par un laboratoire ou une entreprise spécialisée ;
- une actualisation des dimensions et des dessins de l'ouvrage ;
- une évaluation aussi précise que possible des propriétés des matériaux.

Ces investigations permettent d'entreprendre, en deuxième phase, le recalcul proprement dit de l'ouvrage, qui est un élément essentiel de l'évaluation de sa fiabilité structurale. Les deux principaux objectifs du recalcul sont les suivants :

- une estimation aussi précise que possible de l'état de contrainte probable de la structure, compte tenu des désordres constatés ;
- une évaluation des marges de sécurité vis-à-vis du dépassement de certains états limites irréversibles ou de rupture.

Le calcul doit être préparé et conduit avec beaucoup de discernement car on sait généralement peu de choses sur les actions que l'ouvrage a supportées depuis sa construction, en particulier les véhicules anormalement lourds qui l'ont parcouru ainsi que d'éventuels tassements différentiels d'appuis. Il doit, bien évidemment, exploiter les renseignements tirés de la connaissance des règles de justification et des hypothèses de calcul en vigueur à l'époque de la construction, tout en tenant compte de l'évolution des connaissances sur le comportement des matériaux et des informations recueillies dans le dossier de l'ouvrage (par exemple, l'ordre et le calendrier réels d'exécution, les tassements d'appuis mesurés, etc.)

À la fin de cette étape, une pré-étude technico-économique des différentes solutions envisageables permet au maître de l'ouvrage de prendre une décision soit de remplacement total ou partiel, soit de réparation ou de renforcement, voir de maintien en l'état avec mesures particulières d'exploitation et de surveillance. Le projet soit de démolition-reconstruction, soit de réparation ou renforcement sera ensuite élaboré.

III.5 Conduite du recalcul d'un pont en état pathologique

III.5.1 Évaluation de l'état de l'ouvrage « à vide »

C'est le calcul de l'ouvrage « à vide » qui permet d'établir et de valider le modèle qui sera utilisé d'une part pour interpréter les désordres constatés et d'autre part pour établir le projet de réparation.

Évaluer l'état d'un ouvrage « à vide » consiste à en apprécier l'état de contrainte sous une combinaison de type « quasi permanente », c'est-à-dire comprenant :

- les charges permanentes, mais avec leur valeur moyenne (ou probable), si possible mesurée ;
- une action thermique dont on cale la valeur représentative en fonction d'une période de retour que l'on choisit en fonction de certains objectifs.

En ce qui concerne l'action thermique, il ne faut pas oublier que les méthodes de prise en compte par l'intermédiaire de gradients linéaires sont présentées comme des méthodes simplifiées pour les projets d'ouvrages neufs. De tels gradients ne peuvent donc fournir une description physique du phénomène réel. Cela étant, l'Eurocode ENV1991-2.5 fournit des diagrammes non linéaires de répartition de la température entre les fibres extrêmes des principaux types de tabliers de ponts pouvant servir de référence pour affiner l'approche par le calcul du comportement de l'ouvrage.

Il est clair que le calcul d'un pont sous combinaison de type quasi permanente doit permettre de retrouver le comportement réel de la structure et les résultats des mesures effectuées (par exemple, les réactions d'appui calculées doivent être voisines de celles mesurées, les déformations calculées doivent être du même ordre de grandeur que celles mesurées, etc.). Si ce n'est pas le cas, l'expertise est à reprendre car toute réparation ou tout renforcement effectué dans un tel contexte peuvent être voués à l'échec et de nouveaux désordres ne tarderaient pas à se manifester.

III.5.2 Calcul de l'ouvrage sous charges d'exploitation

Après avoir calé le modèle de l'ouvrage par un calcul sous combinaison de type quasi permanente, il est nécessaire de procéder à un calcul tenant compte des charges d'exploitation. Son objectif est :

- d'affiner le diagnostic et d'aboutir à une interprétation sûre et quantifiée des désordres constatés ;
- d'estimer la capacité portante avant l'établissement de tout projet de réparation.

L'interprétation des calculs doit être l'objet d'une réflexion approfondie. Deux cas peuvent se présenter :

a) le calcul permet d'interpréter les désordres constatés sur l'ouvrage : il est alors possible de lancer les études relatives au projet de réparation dans le but de rendre l'ouvrage apte à assurer le niveau de service initialement prévu ou, si l'opération est trop coûteuse, de réparer au mieux les désordres en limitant le poids des véhicules autorisés à l'emprunter ;

b) les désordres constatés ne sont pas explicables par le modèle de calcul choisi : il convient de recourir à un modèle plus fin tant pour les actions que pour la structure

proprement dite, par exemple un modèle numérique (calcul aux éléments finis de la partie endommagée).

Dans de nombreux cas, il y aura intérêt à compléter les calculs par des mesures in situ à l'aide des méthodes décrites au paragraphe III.4. Certains désordres pouvant être dus à des erreurs de construction ou d'exploitation, il convient de rechercher tous les témoignages sur les conditions d'exécution.

III.6 Conclusion

Nous avons vu que l'auscultation des ouvrages est une étape primordiale dans l'opération de réparation d'un pont car elle permet de déterminer avec précision les causes engendrant les dégradations constatées sur l'ouvrage, ce qui est essentielle pour la réussite des interventions en terme de qualité, durabilité et rentabilité.

Maintenant que nous avons cité les différentes méthodes d'auscultation, nous allons nous intéresser aux techniques de réparation et de renforcement des ouvrages métallique.

Chapitre 4 : Réparation des ponts métalliques

IV.1 Introduction

Tout projet de réparation doit faire l'objet d'une étude qui débute par la connaissance du matériau métallique employé et de son comportement métallurgique afin d'apprécier le comportement au soudage, et s'il y a lieu, d'exclure celui-ci au profit de techniques d'assemblage tels que le rivetage ou le boulonnage.

IV.2 Méthodes et techniques de réparation et renforcement des structures

L'ensemble des techniques et méthodes de construction sont utilisées en réparation, soit en atelier en préparation d'éléments, soit sur site pour raccorder ces éléments à la structure en place.

IV.2.1 Remplacement d'éléments endommagés

De très nombreux ouvrages sont constitués par des structures triangulées intérieurement hyperstatiques et il est souvent possible de démonter une barre (diagonale, ou montant) sans mettre en cause la stabilité de l'ouvrage sous poids propre. Si l'on se contente de démonter une barre et de la remplacer sans précautions particulières, il est évident que la barre neuve ne participera pas à la résistance de l'ouvrage sous l'effet des charges permanentes. Il convient donc de mettre en place un dispositif provisoire capable d'équilibrer les efforts existant dans la barre à remplacer. Dans le cas d'une barre tendue, ce dispositif peut être facilement réalisé à l'aide de barres de précontrainte [8].

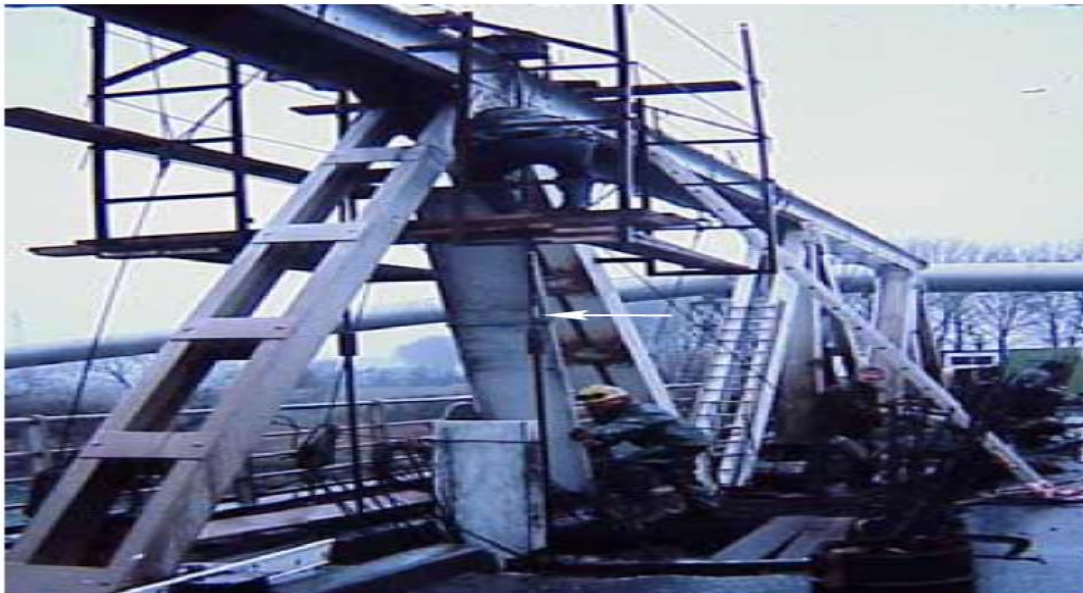


Figure IV.1 Remplacement d'un montant d'une poutre treillis avec dispositif provisoire de reprise des efforts par barres de précontrainte

Dans le cas d'une barre comprimée, il est possible d'imaginer un dispositif similaire composé de butons et de vérins mais un tel système est encombrant et plus difficile à ancrer en ses extrémités.

Afin d'éviter tout effort et déformation parasites, il faut veiller à ce que la résultante des efforts du dispositif provisoire soit portée par la fibre moyenne de la barre.

Il n'est pas toujours facile de connaître avec précision l'effort exact existant dans une barre (charges permanentes mal connues, déformations imposées à l'ouvrage, phasage de construction inconnu ou mal connu, etc.). Pour compenser le manque d'informations, il est possible de procéder de la manière suivante [8] :

- mise en charge du dispositif provisoire à l'effort donné par le calcul ;
- réalisation d'un repère d'alignement de la barre et de son gousset d'attache (un simple trait de scie suffit dans la plupart des cas) ;
- élimination des rivets d'attache de la barre sur son gousset et de tout élément pouvant gêner un mouvement relatif ;
- vérification qu'il n'y a pas eu de mouvement relatif barre-gousset, sinon ajustement de l'effort dans le dispositif provisoire de sorte à réaligner le repère.

En appliquant les mêmes principes il est possible de remplacer des goussets d'attache de barres mais, ceux-ci assurant en général la liaison entre trois barres (deux diagonales et une membrure par exemple), il convient, soit de mettre en place un dispositif qui annule les efforts dans les deux diagonales simultanément (ce qui n'est pas toujours facile à réaliser), soit de procéder par étapes selon le phasage suivant :

- reprise des efforts dans la diagonale A par un dispositif provisoire ;
- coupe du gousset en deux parties suivant la bissectrice des deux diagonales ;
- dépose du demi-gousset attachant la diagonale A ;
- mise en place d'un demi-gousset neuf ;
- mêmes opérations pour la diagonale B ;
- soudure des deux demi-goussets entre eux.

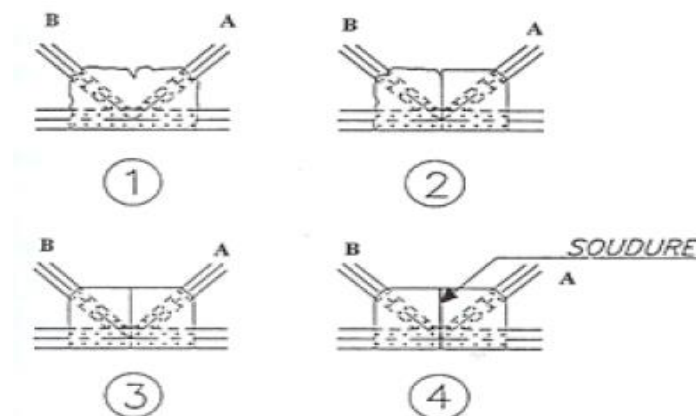


Figure IV.2 Remplacement de gousset

Afin de limiter les contraintes dues au retrait de soudage, les rivets voisins du joint ne seront mis en place qu'après réalisation de la soudure.

IV.2.2 Ajout de matière

Il est facile de renforcer une structure métallique en augmentant la section de ses éléments les plus faibles par ajout d'un profilé ou d'une tôle. Cependant, il y'a certaines précautions à prendre pour réaliser un tel renforcement.

Si l'on excepte certains cas particuliers où les efforts dus au poids propre sont nuls ou très faibles (ponts suspendus et viaduc métalliques démontables par exemple), il convient de soulager les efforts dans la structure lors du renforcement, de sorte que ce dernier participe au moins partiellement à la résistance sous poids propre. Pour ce faire, trois méthodes sont couramment utilisées [8] :

- installation de l'ouvrage sur appuis provisoires. Mais cette méthode, simple et efficace, n'est que rarement envisageable pour des raisons de site ;
- mise en œuvre d'une précontrainte provisoire. Lorsqu'il s'agit de renforcer une diagonale ou un montant, l'installation et l'ancrage de barres de précontrainte ne pose pas de problèmes majeurs dans les cas courants. Lorsqu'il s'agit de renforcer une membrure de poutre, l'ancrage des barres ou des câbles de précontrainte pose des problèmes technologiques (difficulté pour ancrer un effort concentré en partie courante d'une membrure, problèmes d'encombrement aux abouts de l'ouvrage) ;
- recours aux dénivellations d'appuis : cette méthode, facile à mettre en œuvre dans de nombreux cas, voit son domaine d'application limité par la résistance des sections sollicitées par les transferts d'efforts.

L'augmentation des sections des membrures modifie la rigidité et la loi d'inertie de la structure, ce qui provoque une modification de la courbe des moments fléchissant et il convient d'en tenir compte dans le calcul. De plus, il ne faut pas oublier de vérifier et, éventuellement, de renforcer les goussets d'attache.

Il est inutile de prévoir des renforts en acier à haute limite élastique, les contraintes à ne pas dépasser en service normal étant limitées par la qualité des aciers en place. Il convient, au contraire, de choisir des aciers qui présentent un grand palier plastique et, si nécessaire, une très bonne soudabilité, comme les aciers S 235 N et S 275 N.

Dans de nombreux cas, la résistance d'une barre (diagonale ou membrure) est limitée non par sa limite élastique mais par sa contrainte critique de flambement. Dans un tel cas, le problème est très simplifié puisqu'il n'est nécessaire ni d'annuler (ou de réduire) les contraintes à vide, ni d'assurer l'attache du renfort aux extrémités de la barre. Il convient toutefois de prendre les précautions élémentaires suivantes [8] :

- éviter que le renfort constitue un piège à eau ;
- maintenir la position des centres de gravité ;
- empêcher les concentrations de contraintes en évitant les changements de section trop brutaux ;
- tenir compte de la nouvelle loi d'inertie dans le cas du renforcement d'une membrure.

L'ajout de matière peut aussi être réalisé par des éléments plats au niveau des âmes et des membrures. L'assemblage pourra être effectué par soudage, par rivetage ou boulonnage. La figure V.3 présente différentes dispositions de renforcement par placage.

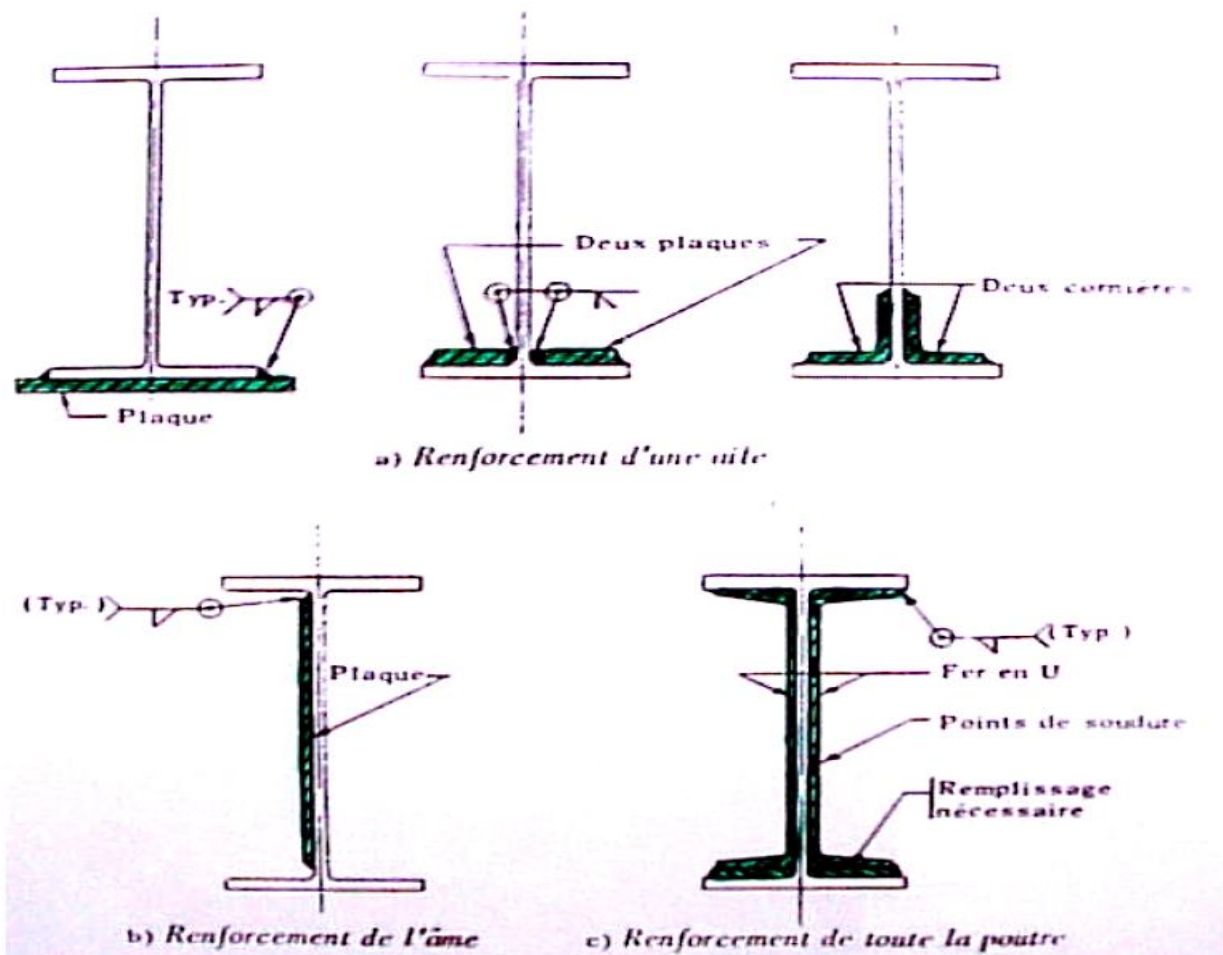


Figure IV.3 Renforcement par placage d'une poutre en I

IV.2.3 Utilisation de la soudure, des boulons HR et des rivets

Ces modes d'assemblage fonctionnent selon des principes très différents :

- les rivets fonctionnent par cisaillement ;
- la soudure reconstitue, en principe, la continuité de la matière ;
- les boulons HR transmettent les efforts par frottement.

Il est donc illusoire de vouloir associer deux de ces moyens pour transmettre un même effort. Remplacer un rivet endommagé par un boulon HR n'apporte quasiment rien à la résistance d'un assemblage. Le seul mérite d'une telle pratique est d'empêcher la corrosion de se développer au droit du trou à l'interface des deux tôles [9].

a/Assemblages rivés [9]

Deux cas se présentent :

- un ou plusieurs rivets présentent des défauts (corrosion, mauvais alignement, tête endommagée...);
- l'assemblage rivé est déconsolidé (jeu dans l'assemblage) avec, parfois, des fissures (cas des ponts-rails).

Dans le premier cas, après enlèvement des rivets en cause (perçage, oxycoupage, coupe au marteau-dériveur) et alésage des trous, si nécessaire, le remplacement d'un ou de plusieurs rivets peut se faire :

- par des rivets, on conserve ainsi parfaitement le mode de fonctionnement de l'assemblage;
- par des boulons à serrage contrôlé (HR), sous réserve de remplacer tous les rivets de l'assemblage et de recalculer le nouvel assemblage ainsi créé ;
- par des boulons injectés qui remplissent parfaitement le trou ;
- par des boulons calibrés au diamètre du trou, si le nombre de rivets à remplacer est faible.

Dans le second cas, il faut renforcer l'assemblage. Par exemple, ajouter une tôle de chaque côté de l'âme endommagée en interposant deux fourrures pour compenser l'épaisseur des cornières (figure VI.4). Dans le cas où l'âme est fissurée, il faut, pour empêcher la fissure de s'agrandir, percer un trou à son extrémité qui peut être repérée par un essai de ressuage [9].

Dans le cas où les trous sont ovalisés, un alésage est nécessaire. De plus, les assemblages de pièces neuves sur des anciennes imposent la mise en œuvre d'un revêtement anticorrosion à cause du jeu entre les pièces.

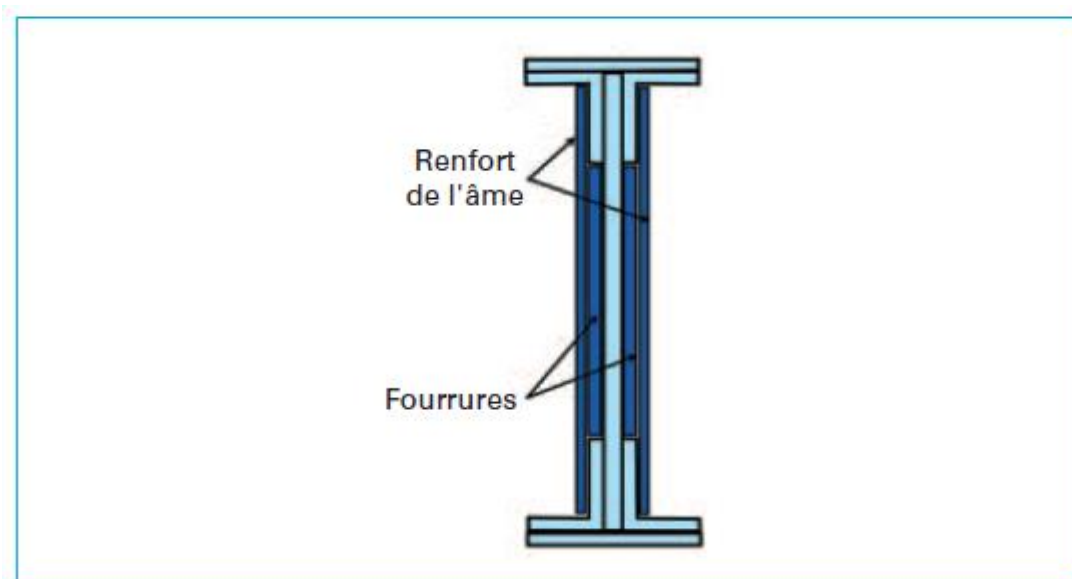


Figure IV.4 Principe de renforcement de l'âme d'un longeron

b/ Assemblages soudés [9]

La soudure est, en théorie, le moyen le plus souple et le plus efficace pour réparer ou renforcer un ouvrage. Son utilisation pose cependant des problèmes parfois difficiles à résoudre.

Les soudures étant réalisées in situ et en position, l'utilisation de certaines techniques de soudage est exclue (soudage sous flux solide, par exemple). Dans la plupart des cas, le soudage à la baguette à enrobage basique, à basse limite élastique et à bas hydrogène, s'avère être le moyen le mieux adapté.

Le dessin des pièces de renfort doit être réalisé de manière à faciliter l'exécution des soudures et à éliminer, ou au moins réduire le plus possible, les concentrations de contraintes sous les effets des déformations gênées par bridage (figure IV.5) et la section des cordons doit être réduite au strict nécessaire.

L'ordre de réalisation des différents cordons doit être étudié de façon à réduire à une valeur minimale les contraintes dues au retrait des soudures. Les surfaces à souder doivent être soigneusement meulées afin d'éliminer toutes traces de calamine, de rouille, de peinture ou de graisse, il convient aussi d'éliminer tous les défauts susceptibles d'engendrer des concentrations de contraintes (caniveaux, criques, etc.) ;

Un contrôle des soudures (ressuage, ultrasons, magnétoscopie, rayons X) s'impose pour détecter les éventuels défauts (fissuration à chaud, arrachement lamellaire, fissures à froid sous cordon).

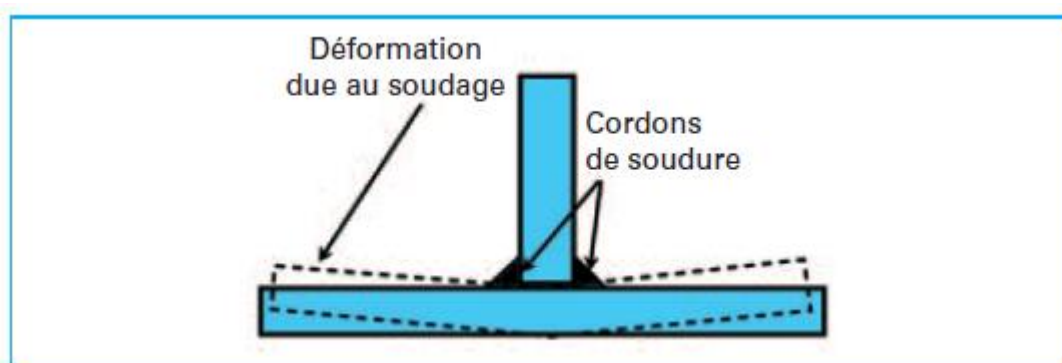


Figure IV.5 Déformations dues au soudage

c/Assemblages par boulons

On retrouve ici les principes appliqués pour les assemblages rivés :

- remplacement des boulons endommagés avec ou sans alésage des trous ;
- réfection de la totalité de l'assemblage en cas de déconsolidation.

IV.3 Conclusion

Malgré la diversité des méthodes de réparation et de renforcement, leur utilisation reste parfois limitée.

Le choix d'une méthode dépend de la situation concrète et des objectifs définis pour la réparation. Aussi, il reste de nombreux points à éclaircir, par des études expérimentales et théoriques, pour pouvoir déterminer la technique adéquate pour une réfection donnée.

Chapitre 5 : Etude d'un cas pratique

V.1. Introduction

Suite au séisme du 21/06/2003, le Viaduc sur oued El-Harrach au PK 11+080 de la Rocade sud d'Alger a subi des dégradations importantes, nécessitant sa fermeture au trafic.

V.2. Description de l'ouvrage

V.2.1. Type de construction

L'ouvrage faisant l'objet de réparation est un pont mixte isostatique, constitué de 10 travées identiques.

La superstructure est constituée d'un tablier métallique (profilés reconstitués soudés) supportant une dalle de couverture en béton armé, le tablier repose sur des appuis en béton armé, supportés par des fondations profondes.



Figure V.1 Viaduc au PK 11+080 sur oued El-Harrach

V.2.2. Caractéristiques géométriques :

- Longueur totale de l'ouvrage : 386.00 m.
- Largeur de la chaussée : 13.75 m.
- Largeur du trottoir aval : 1.75 m.
- Largeur du trottoir amont : 1.99 m.
- Longueur totale des poutres : 35.00 m.
- Hauteur des poutres : 2.00 m.
- Nombre de poutres par travées : 5.

V.3. Constat des désordres

Le constat de l'ouvrage a permis de relever les désordres suivants :

- Une rotation des trois travées côté Dar – El-Beida (Figure V.2),



Figure V.2 Déplacement transversal de 15 à 60 cm au niveau des piles



Figure V.3 Rotation des travées

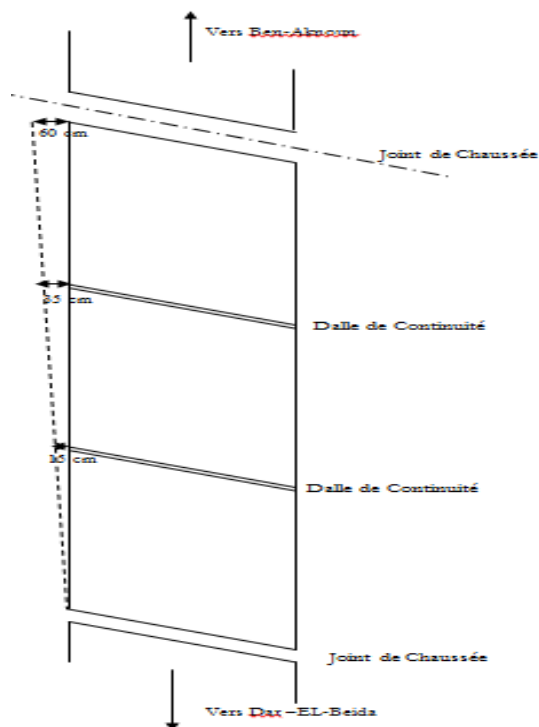


Figure V.4 Etat de l'ouvrage après le séisme

- Endommagement de la poutre de rive sur une longueur de 5 mètres, ainsi qu'une poutre intermédiaire de la troisième travée.



Figure V.5 Endommagement des poutres

- Ecrasement et déplacement des appareils d'appuis.



Figure V.6 Ecrasement des appareils d'appuis

- Endommagement des joints de chaussée

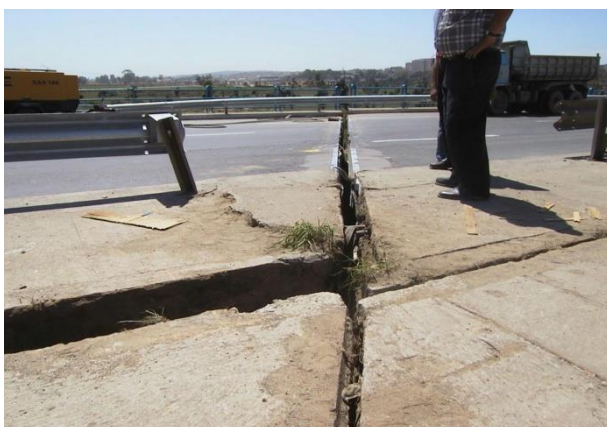


Figure V.7 Endommagement des joints de chaussée

V.4. Procédure adoptée pour la réhabilitation

Au vu de l'état de l'ouvrage et des dégradations constatées, on préconise le phasage suivant :

V.4.1. Calage des tabliers sur palets métalliques

V.4.1.1. Travaux préparatoires

Avant de commencer les réparations on doit aménager un accès à l'ouvrage et effectuer des terrassements pour permettre l'accès et le mouvement des engins.



Figure V.8 Réalisation des accès à l'ouvrage

V.4.1.2. Travaux d'étaieement du tablier

L'étaieement est réalisé par des palets métalliques

a/ Dimensionnement et vérification du palet :

1 - Evaluation des charges :

- Charges permanentes :

- Tablier métallique	:	3.5 T/ml.
- Dalle + trottoir	:	11.1 T/ml.
- Revêtement	:	1.9 T/ml.
- Garde de corps + glissières	:	0.5 T/ml.

Valeur de la charge permanente : $\underline{QCP = 17 \text{ T/ml.}}$

2 - Vérifications du tablier sur palet :

Pour plus de sécurité, nous supposons le cas le plus défavorable, le tablier repose directement sur la palée.

La valeur de la réaction à considérer pour l'évaluation du nombre des poteaux est :
 $\underline{R = 297,5 \text{ T.}}$

Le calcul du palet se fait de telle façon que les poteaux (unité de palée) peuvent reprendre le poids total de la charge permanente.

Pratiquement, un poteau de palet de type SAPTA peut reprendre 20 T. Donc le nombre de poteau à disposer est : $N = R_t / 20 = 297.5 / 20 = 15$ poteaux.

Pour des raisons pratiques, on prend 26 poteaux, soit deux files de treize (13) poteaux. Sachant que 26 poteaux peuvent reprendre : $26 \times 20 T = 520 T$. Et nous avons $520T > 297.5T$ (vérifié).

b/ Montage du palet métallique :

- Exécution des travaux de terrassement sur une profondeur de 3m.
- Mise en place de gros béton.
- Pose de profilés HEB 180 (support des palets)
- Montage du palet métallique de type SAPTA.
- Montage des profilés HEB 180 pour le support du tablier métallique.



Figure V.9 Montage des palets métalliques



Figure V.10 Montage des profilés HEB 180 pour supporter le tablier métallique

V.4.2. Exécution des butées transversales

Le tablier métallique a subi des déplacements très importants lors du séisme, pour pallier à des éventuelles répliques, des travaux d'urgence de mise en place de butées au droit des poutres de rive ont été exécutés.



Figure V.11 Exécution des butées transversales

V.4.3. Remise du tablier à l'état initial

V.4.3.1. Travaux de vérinage

Le vérinage est une opération qui consiste à soulever le tablier d'une hauteur minimale variable permettant la mise en place des systèmes glissants ou appareil d'appuis pour le ripage du tablier.

Les travaux de vérinage sont exécutés par un système de vérinage synchronisé à 4 vérins, le contrôle des pressions et la hauteur de levage sont réalisés par un système informatisé relié à une pompe hydraulique.



Figure V.12 Vérins utilisés pour l'opération

➤ **Désolidarisation de la travée :**

Le levage et le ripage du tablier ont nécessité la suppression de la continuité de la dalle aux niveaux des deux piles.



Figure V.13 Suppression de la continuité de la dalle

Les travaux ont consisté à :

- La démolition du béton de la dalle sur 1.00m de part de d'autre du joint de continuité.
- Découpage des aciers au niveau du joint de continuité.

➤ **Méthodologie des travaux :**

Les travaux de vérinage seront effectués comme suit :

- Réalisation des supports des vérins par l'exécution d'un appui en poteaux de palée de 1.00 m de hauteur posé sur le chevêtre.
- Pose des vérins hydrauliques sur le support.
- Exécution de l'opération de vérinage et calage par phase.
- Dépose du tablier et calage sur des traverses en bois.



Figure V.14 Pose des vérins hydrauliques sur le support



Figure V.15 Exécution de l'opération de vérinage et calage par phase

➤ **Dimensionnement et vérification :**

Les quatre (4) vérins utilisés ont une capacité portante de 150 Tonnes et sont disposés conformément au schéma suivant

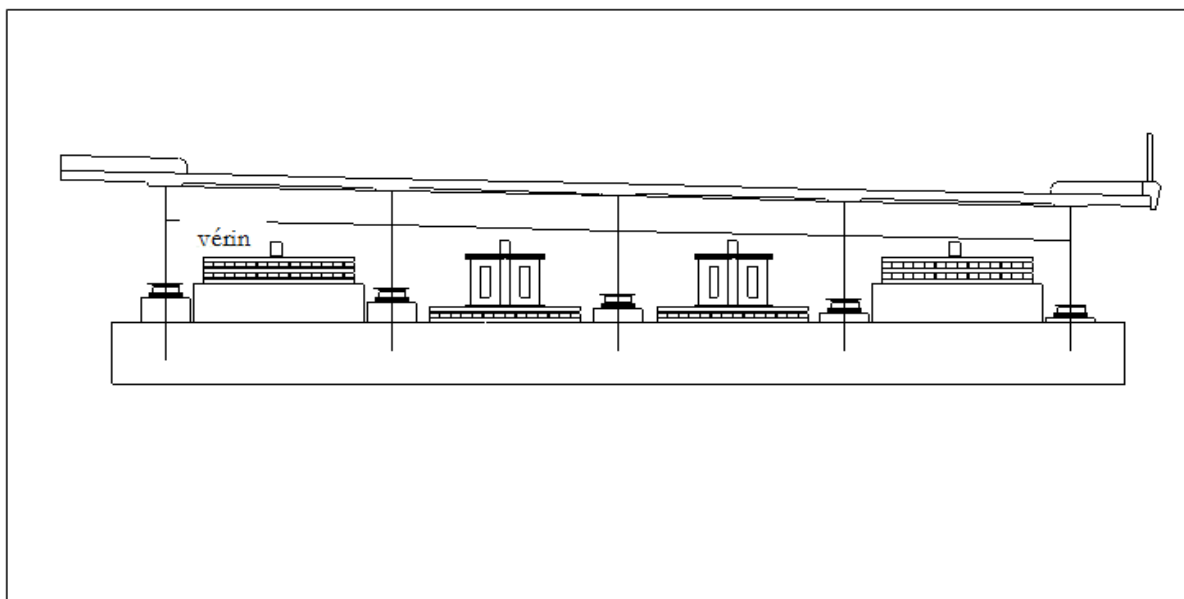


Figure V.16 disposition des vérins

Comme nous l'avons vu précédemment la réaction totale est : $R = 295.5 \text{ T}$. Puisque on a utilisé 4 vérins donc la capacité minimale admise pour chacun d'eux est de :

$$Q = R / 4 = 295.5 / 4 = 73.875 \text{ T}$$

D'où la force minimale de soulèvement de chaque vérin est de : $Q = 73.875 \text{ T}$.

La pression moyenne appliquée par chaque vérin pour le soulèvement du tablier est de l'ordre de 75 tonnes.

$$4(\text{vérins}) \times 75 \text{ T} = 300 \text{ T} > 297.5 \text{ T (Réaction totale)}$$

Donc les quatre (04) vérins utilisés, sont vérifiés pour le soulèvement du tablier.

V.4.3.2. Travaux de ripage des tabliers

L'opération de ripage consiste à pousser le tablier dans le sens transversal, en utilisant des vérins.

Pour le ripage des tabliers deux systèmes glissants ont été utilisés :

- Système à rouleaux sous poutre.
- Système utilisant des plaques inox et polyamide.

Pour rigidifier le tablier, les poutres sont liées entre elles par des profilés métalliques en HEB 180 soudés aux niveaux des semelles inférieures et âmes des poutres principales.

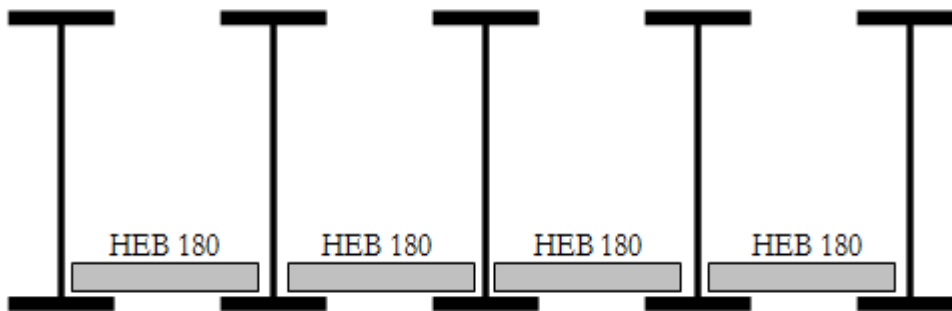


Figure V.17 Schéma explicatif rigidification le tablier



Figure V.18 Rigidification le tablier

1/ Ripage transversal :**a- Ripage par rouleaux express :**

Le rouleau express est composé d'une caisse métallique contenant des rouleaux liés entre eux permettant des mouvements.



Figure V.19 Photo du rouleau express utilisé

➤ METHODOLOGIE D'EXECUTION :

- Exécution d'un point d'appui au vérin lors de l'application de la force horizontale.
- Exécution de l'opération de vérinage du tablier sur une hauteur variant entre 15 à 18 cm pour permettre la mise en place des rouleaux express.
- Mise en place des rouleaux express sous chaque poutre.
- Dépose du tablier et réglage sur rouleaux.
- Exécution de l'opération de ripage par poussée en utilisant un vérin hydraulique préalablement posé.

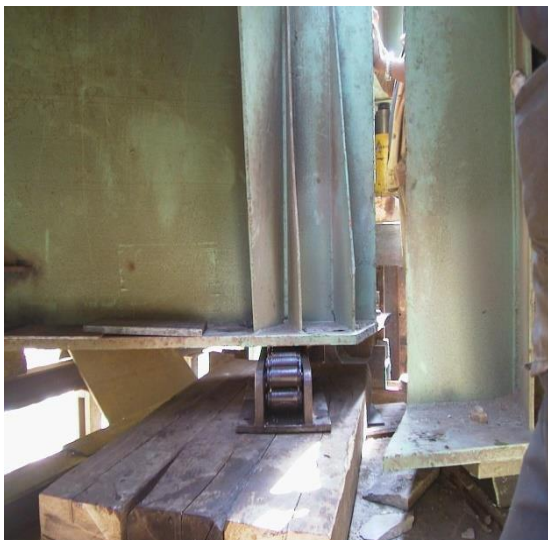


Figure V.20 Mise en place du tablier sur rouleaux

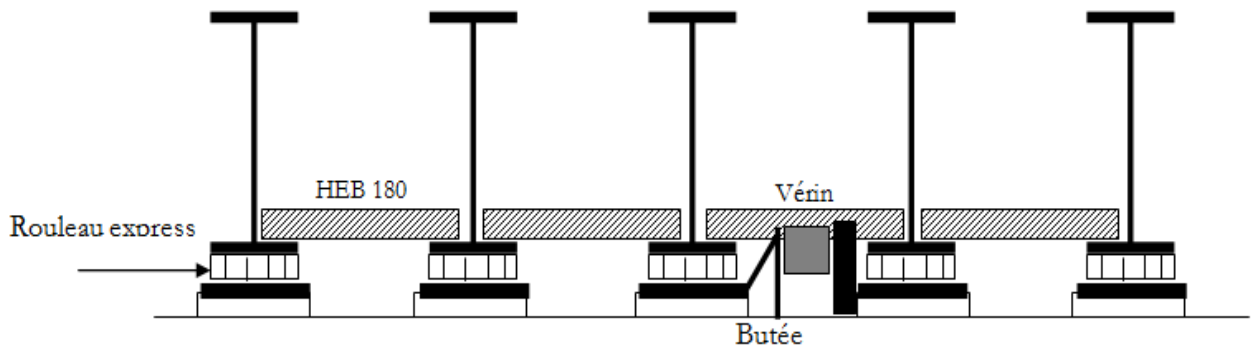


Figure V.21 Exécution de l'opération de ripage par poussée en utilisant le vérin

b- Le ripage par plaque polyamide :

L'opération est réalisée par l'emploi d'un système utilisant des plaques en inox et en polyamide.



Plaque en polyamide



Plaque en inox

Figure V.22 Plaque en inox et plaque en polyamide

➤ **METHODOLOGIE D'EXECUTION :**

- Mise en place d'une plaque en inox préalablement graissée et posée sur une plaque métallique sous chaque poutre.

- Mise en place de la plaque en polyamide sur une plaque en inox.
- Dépose du tablier et réglage sur les plaques en polyamide.
- Exécution de l'opération de ripage par poussée horizontale en utilisant un vérin hydraulique de 200 T préalablement posé.



Figure V.23 Mise en place du tablier sur les plaques en polyamide

2/ Ripage longitudinal :

➤ METHODOLOGIE D'EXECUTION

- Exécution d'un support de vérin en plaques métalliques, servant comme appuis aux vérins lors de l'application de force.
- Mise en place des rouleaux express sous chaque poutre après verinage du tablier.
- Exécution de l'opération de ripage par poussée en utilisant deux vérins hydrauliques de 100 T préalablement posé.

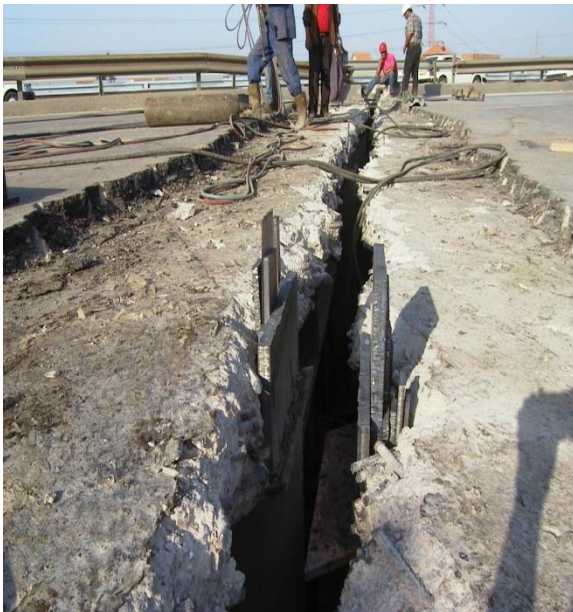


Figure V.24 Ripage longitudinal du tablier

3/ Dimensionnement et vérification:

A - Ripage sur rouleau express :

Le principe est expliqué dans la figure suivante

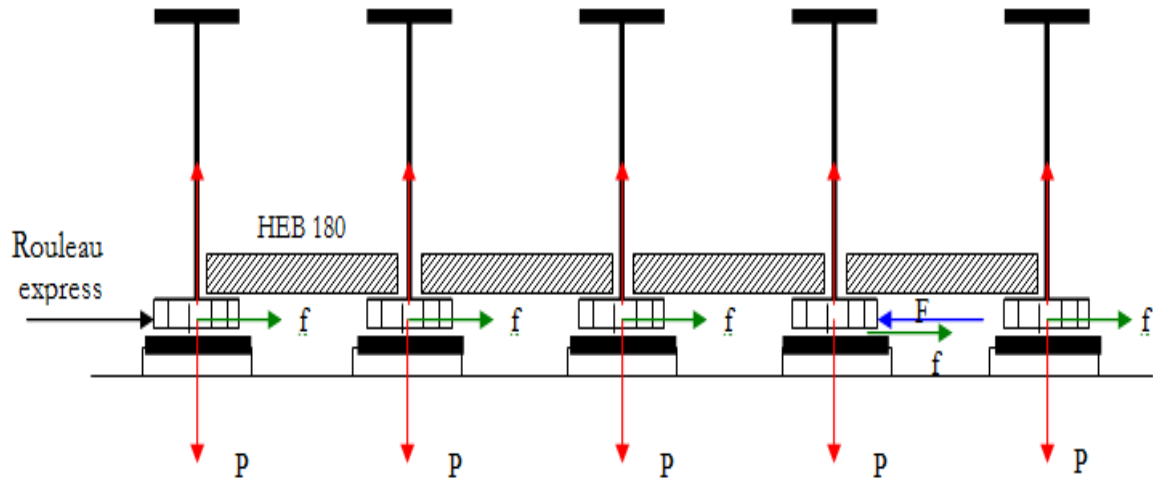


Figure V.25 Schéma explicatif du ripage par rouleau express

- La valeur de la réaction totale est de : $R = 297.5 \text{ T}$

- Valeur de la force de poussage :

Le coefficient de frottement dû au rouleau express «f» est pris égal à $0.20 P$. $f = 20 \% \times P$.

Le tablier dispose de 5 poutres donc la réaction par poutre «P» est de :

$$P = R / 5 = 59.4 \text{ T}$$

Donc la force de frottement est égale à : $f = 0.20 \times 59.4 = 11.9 \text{ T}$.

La force minimale appliquée F pour pousser le tablier est :

$$\sum F = P \gamma \vec{\gamma} \text{ avec } \gamma = 0 \text{ (vitesse de poussage étant constante, l'accélération est nulle)}$$

$$\begin{aligned} \sum \vec{F}_x = 0 &\Rightarrow F - 5xf = 0 \\ &\Rightarrow F = 5f \end{aligned}$$

$$\text{Soit : } F = 5 \times 11.9 = 59.5 \text{ T} \Rightarrow \underline{F = 59.5 \text{ T}}$$

La pression moyenne appliquée par le vérin lors de la poussée du tablier est de l'ordre de 75t.
 $75 \text{ T} > 52.11 \text{ T}$ (Vérifiée).

B - Ripage par plaque polyamide

Le principe est expliqué dans la figure suivante

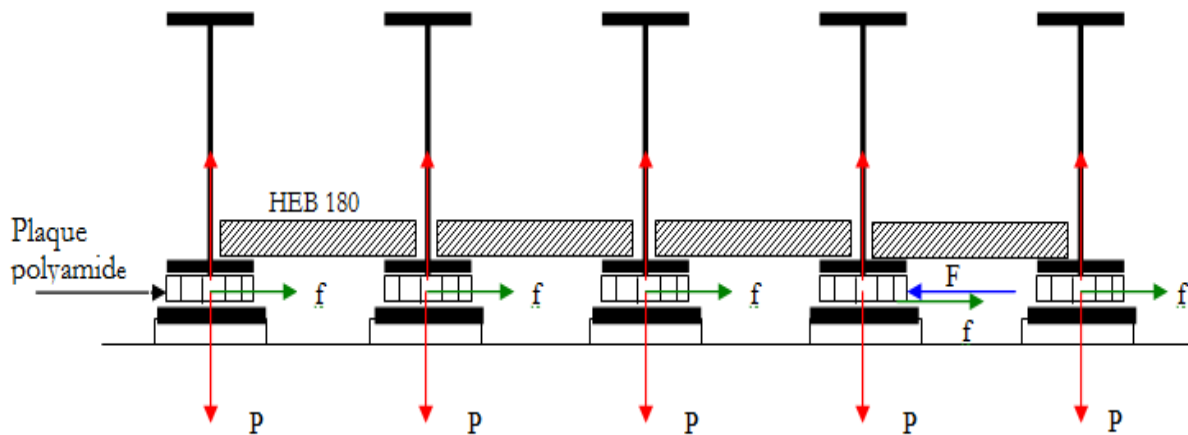


Figure V.26 Schéma explicatif du ripage par plaque polyamide

- La valeur de la réaction totale est de : $R = 297.5 \text{ T}$

- Valeur de la force de poussage :

Le coefficient de frottement de la plaque polyamide «f» est pris égal à 0.10 P. $f = 10 \% \times P$.
Le tablier dispose de 5 poutres donc la réaction par poutre «P» est de :

$$P = R / 5 = 59.4 \text{ T}$$

D'où $f = 10 \% \times 59.5 = 5.95 \text{ T}$.

La force minimale appliquée pour pousser le tablier est :

$\Sigma F = P \gamma \vec{\gamma}$ avec $\gamma = 0$ (vitesse de poussage étant constante, l'accélération est nulle)

$$\begin{aligned} \Sigma \vec{F}_x = 0 &\Rightarrow F - 5xf = 0 \\ &\Rightarrow F = 5f \end{aligned}$$

Soit : $F = 5 \times 5.95 = 29.75 \text{ T} \Rightarrow \underline{F = 29.75 \text{ T}}$

La pression moyenne appliquée par le vérin lors de la poussée du tablier est de l'ordre de 75t.
 $75 \text{ T} > 29.75 \text{ T}$ (Vérfiée).

V.4.4. Réparation des poutres endommagées

V.4.4.1. Poutre de rive

➤ Constat des désordres :

- La poutre de rive a subi une déformation très importante au niveau de l'âme sur une longueur de 5 mètres (Figure V.27).



Figure V.27 Déformation de l'âme de la poutre de rive

➤ **Méthodologie d'exécution :**

- Etaisement de la poutre par de la palée métallique.
- Renforcement de la poutre de rive endommagée : Avant de procéder à la découpe du tronçon endommagé de la poutre de rive, une poutre de renforcement type HEA 900 est posée sur la dalle, elle est solidarifiée à la dalle par des tiges filetées.



Figure V.28 Mise en place de la poutre de renforcement

- Travaux de dépose du tronçon endommagé : La découpe de la partie endommagée de la poutre de rive a été réalisée par un appareil spécifique « Pyromètre sur rail » fixé par des goussets à l'âme de la poutre (figure V.29)



Figure V.29 Découpage de la partie endommagée de la poutre de rive

- Exécution de chanfreins sur le tronçon de poutre en place.



Figure V.30 Exécution de chanfreins sur le tronçon de poutre

- **Mise en place du tronçon de poutre**

La manutention se fait par une grue, la fixation à l'aide de tire fort et l'assemblage par soudure.

- **Assemblage par soudure**

La soudure se fait avec chanfrein horizontal de 4 à 5 mm de chaque côté assurant un rabotage plein section de l'âme



Figure V.31 Soudure de la nouvelle partie de la poutre

➤ **Essai sur soudure**

Un essai de ressuage (Essai au liquide pénétrant) a été exécuté sur la première passe de soudure. L'essai permet la détection des fissures non apparentes à l'examen visuel sur les parties métalliques.

L'essai nécessite un Nettoyage parfait des parties métalliques de toutes les couches de peinture et de rouille à l'aide de décapant, brosse métallique et soufflage à l'air comprimé. Puis on applique un produit nettoyant (Solvant) sur les parties à examiner, ensuite on effectue un nettoyage au chiffon avant application du produit pénétrant. Après on procède à un nettoyage de la surface à traiter par un solvant afin d'éliminer le liquide pénétrant puis pour finir on applique le produit fixant (produit blanc) et on effectue l'inspection.



Figure V.32 Inspection des soudures

➤ **Renforcement du tronçon de poutre par des goussets**

Des goussets verticaux ont été mis en place afin de rigidifier l'âme de poutre.



Figure V.33 Renforcement de la poutre

➤ **Application de la peinture de protection**

Après avoir fini l'assemblage des deux parties de la poutre on applique une couche de peinture anti corrosion.



Figure V.34 Application de la peinture protection

V.4.4.2. Poutre intermédiaire

La poutre intermédiaire présente une Légère déformation de l'âme (Figure VI.35), la réparation a été réalisée à froid en procédant a un léger redressement au niveau de l'âme par un poussage de vérin hydraulique .



Figure V.35 Déformation de la poutre intermédiaire

V.5.2. Remise à niveau de l'ouvrage

V.5.2.1. Travaux de remplacement des appareils d'appuis.

Les appareils d'appuis sont placés entre une structure et ses supports, ils sont destinés à transmettre les charges normales à leur plan.

➤ **Méthodologie d'exécution :**

- Travaux de verinage du tablier.
- Réglage des surfaces d'appuis.
- Pose des appareils d'appuis.
- Dépose et réglage définitif du tablier sur les appareils d'appuis.



Figure V.36 Remplacement des appareils d'appuis

V.5.2.2. Travaux de remplacement des joints de chaussée

Les tabliers de pont subissent des variations dimensionnelles longitudinales dues au retrait, au fluage et à la différence de température.

Pour éviter les efforts parasites susceptibles d'être engendrés par ces variations, il convient de rendre le tablier librement dilatable par la mise en place des joints de chaussées appropriés qui peuvent être réduits à une simple renfort local dont le rôle est de permettre aux véhicules de les franchir dans les meilleures conditions de confort et de sécurité.

➤ **Méthodologie d'exécution :**

- Démolition de béton de la dalle de part et d'autre des joints de chaussée.
- Exécution des coffrages & ferrillages.
- Mise en place des joints de Chaussée.
- Bétonnage partie de dalle.



Figure V.37 Démolition de béton de la dalle de part et d'autre des joints



Figure V.38 Bétonnage de la dalle autour du joint

➤ **Dimensionnement et vérification :**

Le déplacement total (Δl) est la somme des déplacements dus : au retrait, au fluage et à l'effet de température. Il se calcule comme suit $\Delta l = \Delta l_r + \Delta l_f + \Delta l_t$

a/ Déplacement dû au retrait :

$$\Delta l_r = \varepsilon_r \cdot L_0 \quad \text{avec} \quad L_0 = 52.5 \text{ m et } \varepsilon_r = 4.10^{-4}$$

$$\text{D'où} \quad \Delta l_r = 4.10^{-4} \cdot 52,5 \cdot 10^3 = 21 \text{ mm.} \rightarrow \Delta l_r = 21 \text{ mm.}$$

b/ Déplacement dû au fluage :

Nous avons $\Delta l_f = \varepsilon_f \cdot L_0$ avec $\varepsilon_f = \varepsilon_i + \varepsilon_d = \frac{\sigma_b}{E_b (1 + \varphi_t)}$

$$\varepsilon_i = 0 \rightarrow \varepsilon_f = \frac{\sigma_b}{E_b \cdot \varphi_r} \quad \text{avec} \quad \varphi_r = 2 \text{ et } E_b = 21000 \sqrt[3]{1,1 \cdot f_{c28}} = 3.62 \cdot 10^5 \text{ bars.}$$

$$\text{Donc : } \varepsilon_f = \frac{68,5}{2 \cdot 3,62 \cdot 10^5} = 3,8 \cdot 10^{-4}$$

D'où :

$$\Delta l_f = 33,8 \cdot 10^{-4} \cdot 52,5 \cdot 10^3 = 19,95 \text{ mm.}$$

c/ Déplacement dû à la différence de température

Nous avons $\Delta l_t = \varepsilon_t \cdot L_0$ avec $\varepsilon_t = C \cdot \Delta T$

C : Coefficient de dilatation thermique = $1,1 \cdot 10^{-5}$

La variation de température est de $+20^\circ$ et $-20^\circ \rightarrow \Delta T = 40^\circ$.

On trouve $\varepsilon_t = 4,4 \cdot 10^{-4}$

$$\text{D'où : } \Delta l_t = 4,4 \cdot 10^{-4} \cdot 52,5 \cdot 10^3 = 23 \text{ mm.}$$

Donc le déplacement totale est de $\Delta l = \Delta l_r + \Delta l_f + \Delta l_t = 63,95 \text{ mm.}$

Puisque $0 \leq \Delta l_t = 63,95 \text{ mm} \leq 80 \text{ mm}$, on opte pour un joint de type GPE 80.

V.5.2.3 Travaux de reprise des dalles de continuité

➤ Méthodologie d'exécution :

- Pose des barres de recouvrement.
- Pose des coffrages.
- Bétonnage des parties de dalles par l'emploi de béton à haute performance, réalisé par rajout de SIKACRETE HD et SIKAFUID.



Figure V.39 Pose des barres de recouvrement

Le béton à haute performance est réalisé par rajout de SIKACRETE HD et SIKAFUID. L'addition de SIKACRETE HD concourt à l'obtention d'une porosité très faible d'où un accroissement très important des résistances mécaniques, mais également de la durabilité de ces bétons.

L'addition de SIKAFUID permet d'augmenter considérablement la fluidité du béton, faciliter sa mise en œuvre et augmenter en conséquence sa résistance.

V.5.2.4. Travaux de finition

➤ Travaux d'étanchéité :

- Nettoyage des surfaces par soufflage à l'air comprimé.
- Mise en place d'une couche d'émulsion en cut back.
- Exécution d'une chape d'étanchéité auto protectrice (en paxalumin).
- Protection du complexe étanche par un béton bitumineux.



Figure V.40 Exécution de la chape d'étanchéité

➤ Travaux de réalisation des corniches et trottoirs :

- Coffrage, ferrailage et bétonnage des corniches et trottoirs endommagés



Figure V.41 Mise en place du coffrage des corniches

➤ **Travaux de réalisation des gardes de corps et glissières de sécurité :**



Figure V.42 Réalisation des gardes corps

V.6. Conclusion

L'ouvrage faisant l'objet de réparation est un ouvrage situé sur un axe stratégique, (Rocade-sud : Ben Aknoun – Dar el Beida), sa fermeture engendre beaucoup de perturbation au niveau du trafic routier ; pour cela, il est impératif d'intervenir en urgence pour remettre l'ouvrage dans de meilleures conditions de service et assurer une bonne fluidité du trafic.

On notera que les travaux à entreprendre sur l'ouvrage sont des travaux spécifiques nécessitant un matériel adéquat, un personnel spécialisé et un savoir-faire dans le domaine de réparation des ouvrages.

Conclusion générale

Conclusion générale

Lors d'un projet de réparation ou de renforcement on doit soigneusement analyser les données du problème pour ensuite peser les avantages et inconvénients des diverses méthodes et techniques. Cela ne se révèle pas toujours facile car souvent les bases techniques manquent ou sont lacunaires. De plus certaines techniques de réfection se basent sur des autorisations particulières délivrées aux entreprises spécialisées. Elles sont souvent applicables dans un cadre bien particulier et ne sont donc pas appropriées à toutes les situations

Notre étude a débuté identification des différentes pathologies pouvant atteindre les ponts métalliques. Nous avons vu dans ce chapitre les principaux désordres et pathologies affectant les ponts métalliques. Les mécanismes de dégradation des matériaux et perte de performance sont dus à plusieurs facteurs qu'on ne peut pas maîtriser pleinement, donc la notion de la structure parfaitement durable est une notion irréalisable.

Ensuite, nous avons énoncé quelques méthodes d'auscultation, nous permettant de repérer ces pathologies. L'auscultation des ouvrages est une étape primordiale dans l'opération de réparation d'un pont car elle permet de déterminer avec précision les causes engendrant les dégradations constatées sur l'ouvrage, ce qui est essentielle pour la réussite des interventions en terme de qualité, durabilité et rentabilité.

Par ailleurs, nous avons vus les principales méthodes de réparation et de renforcement des ouvrages métalliques. Le choix d'une méthode dépend de la situation concrète et des objectifs définis pour la réparation. Aussi, il reste de nombreux points à éclaircir, par des études expérimentales et théoriques, pour pouvoir déterminer la technique adéquate pour une réfection donnée.

Enfin, nous avons procédé à l'étude du Viaduc de l'oued El-Harrach se trouvant sur la Rocade sud d'Alger.

Donc pour conclure ce mémoire nous pouvons dire que tout ouvrage construit doit faire l'objet d'une inspection régulière (au moins une fois par an) pour identifier et détecter les anomalies et les traiter dès leurs apparitions.

Ce travail nous a permis d'approfondir, de compléter et de mettre en application les connaissances acquises tout au long de notre formation au sein de l'Ecole Nationale Polytechnique, nous préparer à une bonne insertion dans le milieu professionnel.

Références bibliographiques

- [1] : Jean-Armand CALGARO, Technique de l'ingénieur C4502 « Pathologie et évaluation des ponts existants », 10/11/1997.
- [2] : Instruction techniques pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art, 1979.
- [3] : Recommandation SIA 169, Maintenance des ouvrages de génie civil; SIA, 1987, Zurich.
- [4] : Heinz Kneubühler, Techniques d'auscultation des ouvrages de génie civil, Consortium DAC / City Comp SA, Lausanne et Morges, 1991.
- [5] : Fares MATI, « Mémoire de Master Réparation et rénovation des ponts métalliques », 2013.
- [6] : Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art ,Deuxième partie, le Laboratoire central des Ponts et Chaussées, 1979.
- [7] : M.CHERFAOUI, Technique de l'ingénieur bm6450 « Essais non destructifs », 10/07/2006.
- [8] : Guide stress, Réparation et rénovation des structures métalliques
- [9] : D. POINEAU, J.A.CALGARO, Technique de l'ingénieur C7806 « Projet de renforcement ou de réparation d'un pont - Cas des ponts métalliques », 10/05/2010.
- [10] : Rapport SAPTA pour la réparation du viaduc d'El Harach.