

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Supérieure Polytechnique
Département de Génie Civil
Laboratoire de Génie Sismique et Dynamique des Structures (L.G.S.D.S)



Mémoire de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme Master en Génie Civil

Réparation et rénovation des ponts métallique

Réalisé par :
Fares MATI

Encadré
Mme D. CHERID
Mme H.MOHABDDINE

Septembre 2013

Remerciement

Nous remercions, avant tout, Dieu le Tout puissant de nous avoir donné patience, santé et volonté tout au long de nos études. Nous remercions également nos familles pour les sacrifices qu'elles ont faits pour que nous terminions nos études.

Nous tenons aussi à remercier, nos deux promoteurs, Mme CHERID et Mme MOHABDDINE pour leur suivi et leurs conseils durant l'évolution de ce travail.

Nous exprimons notre reconnaissance à tous les enseignants qui ont contribué de près ou de loin à notre formation.

.

Résumé

Aujourd'hui, l'étude sur les actions de réhabilitation des ponts présente l'un des thèmes incontournables dans leur gestion; alimentée par la susceptibilité des ouvrages à se dégrader au cours du temps par des mécanismes d'endommagement très variés, l'importance des études de réhabilitation apparaît très clairement après la comparaison des couts des réparations qui restent très favorables et plus économiques par rapport aux constructions de structures nouvelles. Il est donc obligatoire d'avoir une profonde connaissance sur les pathologies, les méthodes de diagnostic et surtout les différentes méthodes et techniques de gestion et réparation.

Mots clés : réparation, rénovation, charpente, ponts métallique, ouvrage d'arts.

Abstract

Nowadays, the study of rehabilitation actions works of reinforced concrete bridges, has become among the most important subject; which cannot be neglected especially in their management. This importance influenced by the susceptibility of such works to deterioration by several pathologies, circumstances, and also the advantage of maintenance cost in comparison with construction activities, since reconstruction works for bridges are usually less than rebuilding them. This should makes the deep knowledge about damages and their causes and how to make a correct diagnostics to them as a necessity.

Keywords: repair, renovation, carpentry, metal bridges, book arts.

Sommaire

Chapitre I : Pathologies Des Ouvrages d'art Causes Et Désordres

1.1. Introduction.....	.1
1.2 Historique des matériaux métalliques en ouvrages d'art.....	1
1.2.1 Rappels de métallurgie.....	1
1.2.2 Les propriétés des matériaux métalliques	2
1.2.3. Les matériaux utilisés.....	3
2. Défauts rencontrés sur matériaux métalliques anciens	5
1.3. Phénomène de la fatigue.....	7
1.4. Fissuration.....	8
<i>1.5. La ségrégation</i>	<i>11</i>
<i>1.6. Efflorescence</i>	<i>12</i>
1.7.Conclusion	12

CHAPITRE II Méthodes De Diagnostic Et Investigation

II.1 Introduction	13
II.2 Pourquoi un diagnostic ?.....	13
II.3 Les données nécessaires pour la surveillance d'un Ouvrage	13
II.4 Différents types de surveillance	15
II.5 Conclusion	23

Chapitre III

Méthodes et techniques de réparation

III.1. Introduction	24
III.2. Répartition des ponts par type de matériaux de superstructures	24
III.3. Techniques renforcement des structures	26
III.4 .Méthode de réparation	31
III.4 .1 .Réparation par soudage	31
III.4 .2 .Réparation par boulonnage	37

III.4 .3 .Réparation par rivetage	42
III.4 .4 .CONCLUSION	44
III.4 .5. Recommandations	45
II.4 .6.Conclusions générales et Perspectives	46

Liste des figures

<i>Fig. I.1. Transformations allotropiques du fer (document OTUA)</i>	<i>1</i>
<i>Fig.I. 2. Diagramme de phase Fer-carbone (diagramme simplifié).....</i>	<i>2</i>
<i>Fig. I.3 : Courbe de traction et caractéristiques mécaniques</i>	<i>3</i>
<i>Fig. I.4 .Schéma de principe d'un essai de résilience.....</i>	<i>3</i>
<i>FIG I. 5. Rupture d'une diagonale tendue sur un point de soudure</i>	<i>5</i>
<i>FIG I.6. Fragilité au choc sur acier</i>	<i>6</i>
<i>FIG I.7. Pailles sur éprouvette d'essai et sur ouvrage</i>	<i>6</i>
<i>FIG I.8. Inclusions sur zone de rupture d'une éprouvette de traction</i>	<i>7</i>
<i>Figure I. 9 : Age d'apparition de fissures à partir mise en place de béton.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure I.10 : les différentes causes de fissuration.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure I.11. phénomène de ségrégation</i>	<i>12</i>
<i>Figure I.12. Efflorescence de dalle du pont.....</i>	<i>12</i>
<i>FIG III.1. répartition du pont routier par type de matériaux de superstructure</i>	<i>24</i>
<i>Figures III.2. Distribution des ouvrages selon leurs états sur RN, CW, CC</i>	<i>26</i>
<i>Fig III.3. Remplacement d'un montant d'une poutre treillis</i>	<i>27</i>
<i>Fig III.4. Ajout de matière sous la membrure inférieure entre lignes</i>	<i>29</i>
<i>Fig III.5. Remplacement le rivet défectueux.....</i>	<i>30</i>
<i>Fig III.6. Pont Pigeaud – assemblages par boulons ordinaires.....</i>	<i>37</i>
<i>Fig III.7 .Pont Warren - Construction soudée –assemblages boulons HR</i>	<i>38</i>
<i>Fig III.8. Coupe d'un boulon HR galvanisé rompu par fragilisation par l'hydrogène.</i>	<i>42</i>
<i>Fig III.9. Rivet, constitution d'un assemblage</i>	<i>42</i>
<i>Fig III.10. Principe du rivetage.....</i>	<i>43</i>
<i>Fig III.11. Différents modes d'assemblage.....</i>	<i>43</i>
<i>Fig III.12 Défauts de pose de rivet.</i>	<i>44</i>

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Qualité minimale d'acier selon l'épaisseur de la tôle	4
Tableau I.2 Qualités couramment utilisées dans les ponts mixtes routiers français	4
Tableau I.3 Limite élastique d'une tôle en fonction de son épaisseur	5
Tableau I.4 : Causes des différentes sortes de fissurations et les Précautions	11
Tableau II.1: Extrait de la classification des défauts des poutres pour les ponts à poutres sous chaussées en béton armé selon la méthodologie I.Q.O.A	16

Chapitre I

Pathologies Des Ouvrages d'art Causes Et Désordres

I: Pathologies des ouvrages d'art causes et désordres

1.1. Introduction :

Après la maçonnerie et le bois, les matériaux métalliques ont été employés pour la construction des ouvrages dès la fin du XVIII^{ème} siècle. C'est en 1779 avec la construction du pont sur la Severn, en Angleterre que débute l'histoire des ponts métalliques. Cette action ou invention à d'inconvénients (pathologie) dont on les détails sont données dans ce présent chapitre.

1.2 Historique des matériaux métalliques en ouvrages d'art

1.2.1 Rappels de métallurgie

En fonction de la température, le fer pur présente différentes formes de réseaux cristallo graphiques. D'un réseau cubique centré CC (fer α ou ferrite) à basse température, le fer se transforme en réseau cubique à faces centrées CFC (fer γ ou austénite) à 912°C pour ensuite retrouver un réseau cubique centré à haute température avant la transformation solide –liquide.

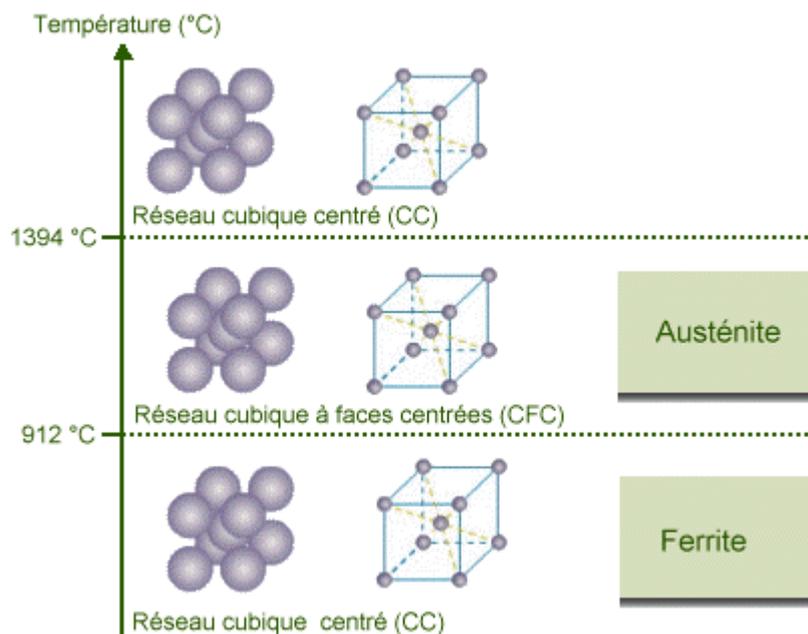


Fig. 1.1. Transformations allotropiques du fer (document OTUA)

Les propriétés des alliages fer - carbone sont caractérisées dans le diagramme de phases en fonction de la composition chimique et de leur processus d'élaboration (cycles thermiques). Le diagramme de phases Fe – C présente les domaines de solubilité des atomes de carbone dans le fer aux différentes températures et les niveaux de transformations allotropiques. Le diagramme simplifié présenté ci-après est établi dans des conditions de chauffe et refroidissement lents. Nous pouvons

remarquer que la structure CFC – fer γ à haute température « dissout » une quantité d'atomes de carbone plus importante que la structure CC – fer α à basse température.

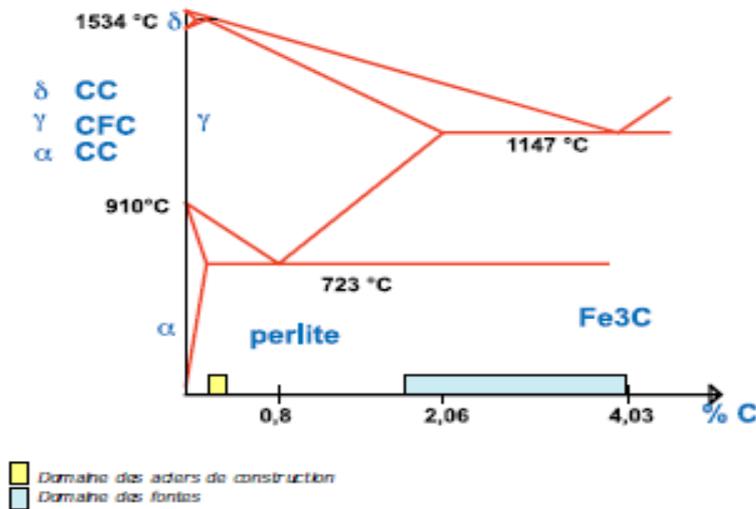


Fig. 2 : Diagramme de phases Fer - Carbone (diagramme simplifié)

Fig.I. 2. Diagramme de phase Fer-carbone (diagramme simplifié)

1.2.2 Les propriétés des matériaux métalliques :

Pour la compréhension de ce guide technique, nous limiterons la présentation aux seuls essais de traction et de résilience qui caractérisent les nuances et qualités des aciers. L'essai de traction constitue l'essai mécanique le plus classique dont les procédures sont totalement normalisées (NF EN 10002).

➤ **Sur un diagramme Effort – Déformation les caractéristiques classiques mesurées sont :**

- La limite élastique de l'acier R_e successivement exprimé en kg/mm² puis hbars, puis Mpa ou N/mm².
- La charge maximale en traction R_m ou charge de rupture successivement exprimée en kg/mm² puis hbars, puis Mpa ou N/mm².
- L'allongement exprimé en %.

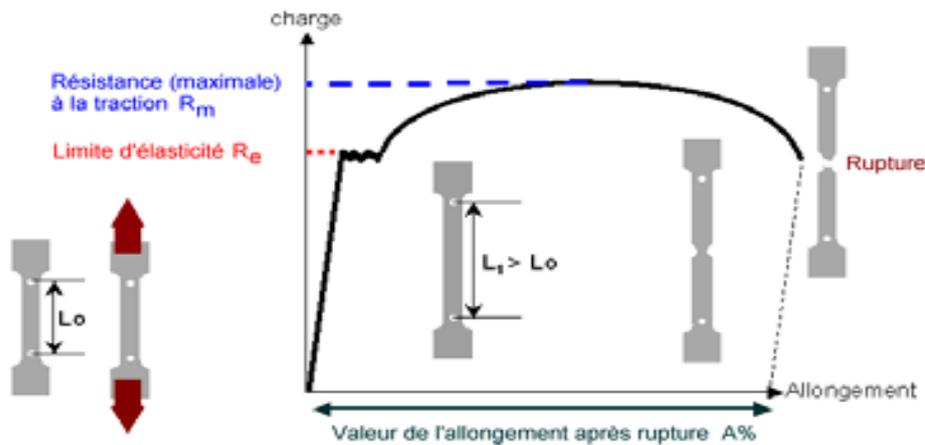


Fig. I.3 : Courbe de traction et caractéristiques mécaniques

L'essai de résilience caractérise l'énergie absorbée par la rupture d'une éprouvette entaillée (NF EN 10045). Cet essai réalisé à différentes températures permet le classement des qualités d'acier et représente une caractérisation du risque de rupture fragile et de la soudabilité du matériau. D'abord pratiquée sur éprouvette à entaille en U et exprimé en J/cm², cet essai est maintenant réalisé sur entaille en V et exprimé en joules.

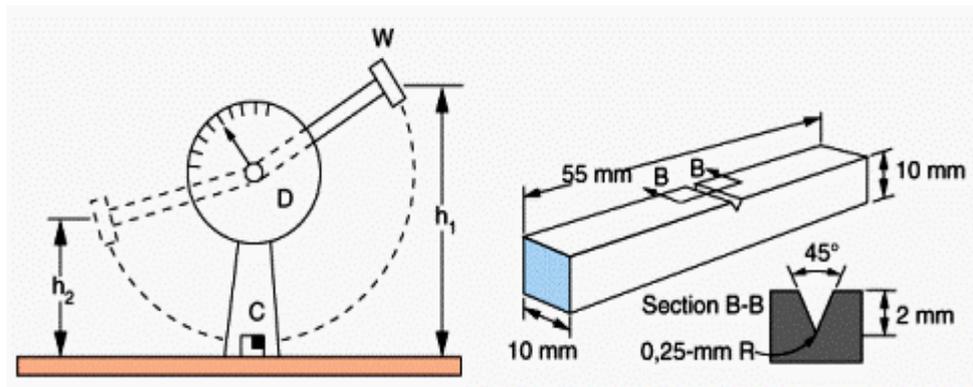


Fig. I.4 .Schéma de principe d'un essai de résilience : mouton pendule et éprouvette à entaille en V

1.3. Les matériaux utilisés

Les aciers utilisés pour la construction des ponts sont désignés par une nuance (exemple S355) et une qualité (exemples K2+N, M, ML, etc.). On parle ainsi d'aciers "S355K2+N", "S420M" ou encore "S460ML".

a) Nuance des aciers

La nuance est constituée de la lettre S (pour acier de construction métallique) suivie de la limite élastique en N/mm² (355, 420, 460). Cette dernière est celle des tôles dont

l'épaisseur est la plus faible de la gamme, la limite élastique diminuant légèrement avec l'épaisseur. La nuance la plus courante est le S355 mais des nuances encore plus performantes, dites à haute limite élastique, sont également disponibles (S420, S460, S690,...), étant entendu que seules les nuances inférieures ou égales à S460 sont couvertes par la partie 2 de l'Eurocode 4.

Les éléments longitudinaux de la majorité des ouvrages sont entièrement réalisés avec des aciers de nuance S355. Quelques ouvrages récents de grandes dimensions comme le viaduc de Verrières et le second pont sur le Rhône à Valence comportent toutefois des tronçons sur piles entièrement en acier S460, cette disposition permettant de limiter un peu le poids de la charpente (jusqu'à 10 % environ) et facilitant son lançage.

b) Qualité des aciers

La qualité (K2+N, N, M, etc.) est un paramètre qui caractérise la ténacité de l'acier, c'est-à-dire sa capacité à absorber l'énergie des chocs sans risque de rupture fragile. Ce risque augmentant avec l'épaisseur de la pièce et la nuance de l'acier, la qualité dépend de ces deux paramètres. Les normes 10025-1 à 6 spécifient pour chaque type d'acier considéré (non allié, à grains fins à l'état normalisé, etc.), les nuances utilisables et les qualités dans lesquelles peuvent être fournies ces nuances. En outre, l'annexe nationale de la norme NF EN 1993-2 définit des exigences supplémentaires relatives à la ténacité de l'acier. Celles-ci précisent la qualité minimale à utiliser en fonction de l'épaisseur de la tôle (voir tableau 3.1).

Epaisseur de la tôle	Qualité minimale
$t \leq 30 \text{ mm}$	J2
$t > 30 \text{ mm}$	N ou M ou Q (aciers à grains fins)

Tableau I.1 : Qualité minimale d'acier selon l'épaisseur de la tôle [2]

Pour le marché français, les qualités couramment utilisées dans les ponts mixtes routiers sont les suivantes :

Nuance	Epaisseur	Qualité
S355	$e \leq 30 \text{ mm}$	K2
S355	$30 < e \leq 80 \text{ mm}$	N ou M
S355	$80 \text{ mm} < e \leq 150 \text{ mm}$	NL ou ML
S460	$e \leq 50 \text{ mm}$	M
S460	$50 \text{ mm} < e \leq 120 \text{ mm}$	ML

Tableau I.2 Qualités couramment utilisées dans les ponts mixtes routiers français [2]

c) Limite d'élasticité [4]

La limite d'élasticité à prendre en compte dans les calculs dépend de l'épaisseur de la pièce à justifier. Le tableau 3.3 ci-dessous, issu des différentes parties de la norme NF EN 10025, donne des exemples de la variation de la limite élastique d'une tôle en fonction de son épaisseur e en millimètres.

Désignation	$e \leq 16$	$16 < e \leq 40$	$40 < e \leq 63$	$63 < e \leq 80$	$80 < e \leq 100$	$100 < e \leq 120$	$120 < e \leq 150$
S355N ou NL	355 MPa	345 MPa	335 MPa	325 MPa	315 MPa	295 MPa	295 MPa
S460M ou ML	460 MPa	440 MPa	430 MPa	410 MPa	400 MPa	380 MPa	-

Tableau I.3 Limite élastique d'une tôle en fonction de son épaisseur [2]

2. Défauts rencontrés sur matériaux métalliques anciens [1] :

➤ La soudabilité :

La soudabilité des matériaux métalliques employés dans la construction des ouvrages d'art n'a fait l'objet de prescriptions qu'avec l'emploi de la soudure comme mode de réalisation des assemblages. En conséquence, tout ouvrage rivet, mais aussi soudé (antérieur à 1970 env.) doit faire l'objet d'une étude métallurgique de caractérisation de ce critère. La figure 21 présente la rupture d'une diagonale tendue de poutre triangulée sous l'effet d'une soudure de faible dimension destinée à solidariser un garde-corps à la diagonale.

cette disposition a entraîné la rupture de la pièce par effet de trempe locale avec formation de structures métallographiques fragiles, la formation d'une fissure puis la rupture de la pièce.



FIG I. 5. Rupture d'une diagonale tendue sur un point de soudure

➤ **La fragilité aux chocs :**

Les aciers anciens généralement non soudables sont sensibles aux chocs et présentent des ruptures en pleine tôle par manque de déformation plastique



FIG I.6.Fragilité au choc sur acier

➤ **Les pailles :**

Ces défauts de surface correspondent à des **repliures** lors du laminage dont les faces oxydées forment une discontinuité du métal dans le sens de l'épaisseur.



FIG I.7.Pailles sur éprouvette d'essai et sur ouvrage

➤ **L'état inclusionnaire :**

Les inclusions dans l'acier sont :

- les oxydes
- les aluminates
- les silicates
- les sulfures

Les deux premières de type globulaire sont peu nocifs au soudage, les deux autres de type allongé génèrent de concentrations de contraintes en extrémité d'inclusions et peuvent initier des fissures à froid qui, par la suite, peuvent se développer sous effet de fatigue.

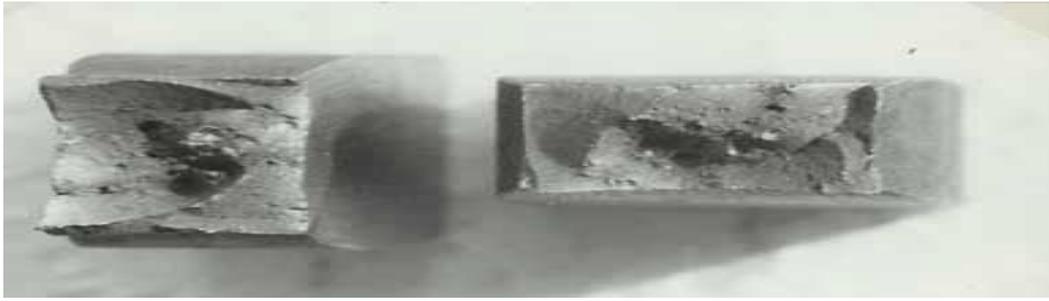


FIG I.8. Inclusions sur zone de rupture d'une éprouvette de traction

I.3. Phénomène de la fatigue [5] :

Le phénomène de la fatigue désigne la dégradation progressive des structures soumises à des sollicitations fluctuantes ou répétées, qui se traduit par l'apparition et le développement de fissures, endommageant ces structures et pouvant les amener à la ruine par rupture brutale.

Le dommage physique que subissent ces structures est l'amorçage et la propagation de microfissures au cours du temps ; il peut être quantifié par une notion arbitraire mais vérifiée par des essais, appelée D , pour dommage par fatigue, ou aussi endommagement par fatigue. C'est un paramètre sans dimension, de valeur comprise entre G et 1 , défini et utilisé pour rendre compte de l'état d'avancement de la fissuration.

La capacité d'un élément de structure à résister à la fatigue est caractérisée par sa durée de vie à la fatigue. Celle-ci est définie par le nombre de cycles d'étendues de contrainte l'ayant conduit à la ruine. La notion plus concrète pour le projeteur est la durée de vie de calcul qui est la durée de référence pendant laquelle l'élément se comporte en sécurité vis-à-vis de la fatigue.

De nombreux facteurs peuvent avoir une influence notable sur la durée de vie à la fatigue des éléments. Il est largement admis maintenant et par simplification que les facteurs les plus importants pouvant être retenus pour les justifications sont les nombres de cycles (N) et les étendues de contrainte nominale (Aa) dans les éléments, leur géométrie et l'exécution de leur assemblage.

La géométrie et l'exécution des assemblages sont caractérisées par la notion de catégorie des détails d'assemblage. La contrainte nominale est la contrainte dans le métal de base calculée selon la théorie élastique simple de la résistance des matériaux, à l'exclusion de tous les effets de concentration de contrainte. L'étendue de contrainte nominale, Aa , est la différence algébrique entre deux extrêmes successifs d'un cycle de contrainte nominale.

I.4. Fissuration [6]

I.4.1. Définition

En général, une fissure est considérée comme une discontinuité dans le champ de déplacement à travers laquelle les contraintes de traction sont nulles ou diminuent en fonction de l'ouverture de cette même fissure (hypothèse de Griffith 1920). La fissuration peut se produire par compression, traction, cisaillement, aussi bien sous chargement statique qu'en fatigue, sous l'effet des charges permanente ou des surcharges ou lors du déplacement des charges.

I.4. 2. Mécanismes de Formation des Fissures

A) *Fissuration gouvernée par des contraintes de traction :*

On a deux étapes à distinguer :

- 1) Une microfissuration se développe au sein du matériau.
- 2) Les microfissures se connectent pour créer une ou plusieurs macro-fissures, c'est une phase de localisation de la fissuration.
- 3) Les macro-fissures se propagent, conduisant à la rupture du volume du matériau considéré.

B) *Fissuration gouvernée par des contraintes de compression*

On a trois étapes encore à distinguer :

- 1) Les microfissures sont créées aléatoirement au sein de l'éprouvette. ce caractère aléatoire est lié à l'hétérogénéité du matériau et à l'existence de points durs (les granulats) , l'orientation des fissures, quant à elle, est gouvernée par la différence de raideur de la pâte de ciment et des granulats.
- 2) Les microfissures se rejoignent pour former des macro-fissures, toujours orientées parallèlement à la direction de la sollicitation, délimitant ainsi des « colonnettes ».
- 3) Des fissures obliques apparaissent à l'intérieur des « colonnettes ». ces fissures obliques se rejoignent pour former un plan de glissement également oblique à l'échelle de l'éprouvette.

I.4. 3. Les Caractéristiques Des Fissures

Les caractéristiques des fissures se résument en

- **L'âge et l'évolution:** il nous permette de connaître la cause de génération mais d'une façon approximative ; La figure suivante montre l'âge de l'apparition des fissures.

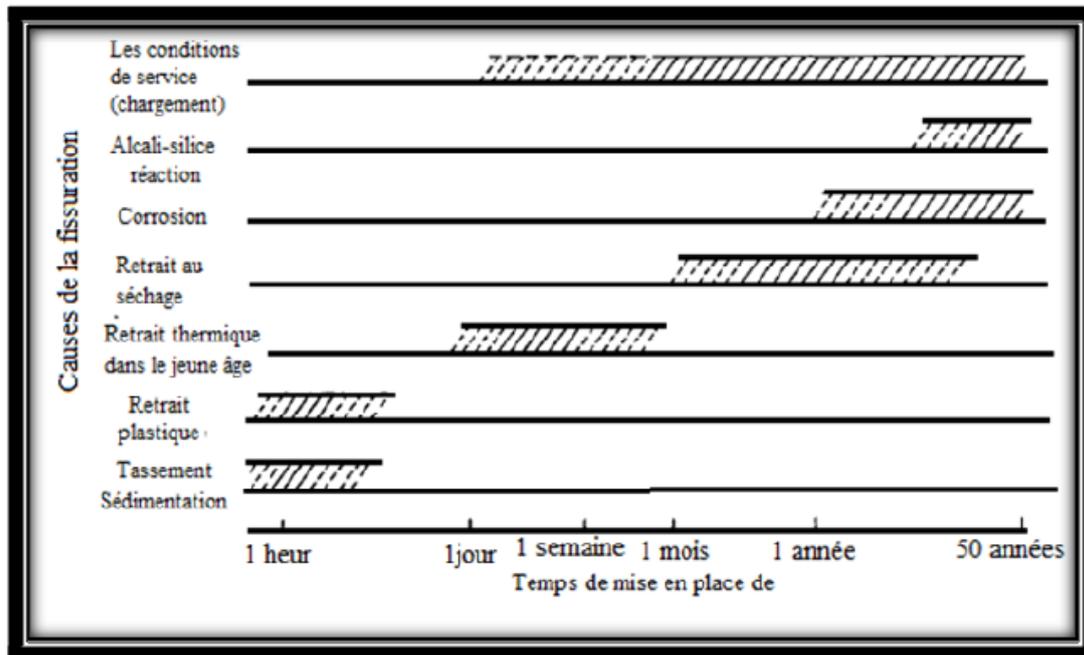


Figure I. 9 : Age d'apparition de fissures à partir mise en place de béton [1]

- La morphologie des fissures

■ **Le tracé:** Le tracé d'une fissure se définit par son orientation et sa longueur mesurable sur l'ouvrage. L'orientation est souvent révélatrice de son origine, lorsque la fissure est continue sur l'axe de l'orientation, elle est dite fissure franche, lorsque l'axe d'orientation est défini par plusieurs fissures successives, elle est dite discontinue.

■ **L'ouverture:** On définit l'ouverture d'une fissure par l'ouverture maximale relevée sur le tracé.

■ **La profondeur:** on distingue

■ Une fissure traversant : lorsqu'elle est visible sur deux faces de la structure.

■ Une fissure aveugle : si elle est supposée traversant mais bouchée sur la face non accessible de la structure (exemple fissure d'un mur de soutènement) elle est souvent d'ouverture importante.

■ Une fissure dite de surface : si l'ouverture est maximale en surface et s'annule au sein du matériau.

- **L'activité:** L'activité caractérise la variation dimensionnelle de l'ouverture de la fissure dans le temps.

❖ Une fissure est dite morte : si l'ouverture reste constante quelles que soient les variations de températures ou de charges.

❖ Une fissure active : si l'ouverture varie en fonction de facteurs extérieurs tels que température, charges, vibrations, hygrométrie ...etc.

❖ L'ouverture moyenne d'une fissure active est la demi-somme de l'ouverture min et max.

Type de fissuration	Position sur la Figure	Sous division	Localisation la plus fréquente	Cause première (exceptés retrait)	Causes secondaire (facteur)	remèdes	Délais d'apparition
Tassement, Sédimentation Du béton frais	A	Proximité Des armatures et des étrépillons	Grande hauteur	Excès de ressuage	Conditions de séchage au jeune âge trop rapide	Réduire le ressuage ou vibration plus soutenue	10mn à 3h
	B	Effet des voûtes	Partie haute des colonnes				
	C	Changement d'épaisseur					
Retrait plastique	D	Diagonal	Chaussées et dallages	Dessiccation rapide du béton frais	Vitesse de ressuage faible	Améliorer la cure au jeune âge	30mn à 6 h
	E	Aléatoire	Dalles armées	Dessiccation du béton plus armatures en surface			
	F	Proximité des armatures	Dalles armées				
Retrait thermique endogène	G	Déformation empêchée par l'extérieur	Mur épais	Exothermie Trop importante	Refroidissement rapide	Réduire la chaleur et/ou isoler	1 j à 2 ou 3 semaines
	H	Déformation empêchée par l'intérieur	Pièces épaisses	Gradient de température élevé			
Retrait de dessiccation exogène	I		Murs et dalles minces	Distance insuffisante entre les joints	Retrait excessif, cure inefficace	Réduire le dosage en eau, améliorer cure	Quelques semaines ou mois
divers	J	Contre les coffrages	Surface laide	Coffrage imperméable	Formule riche en ciment, mauvaise cure	Améliorer la cure et la finition	1 à 7 jours, parfois plus tard
	K	Béton de surface	dalles	Talochage excessif			
Corrosion des armatures	L	naturel	Colonnes et poutre	Enrobage insuffisant			
Réaction alcali-silice	M		Sites humides	Granulats réactifs et teneur en alcalis élevée		Eliminer les causes	Plus de 5 ans
Réaction alcali-granulaire	N		Les emplacements humides	granulats réactifs plus ciment alcalin		Eliminer les causes de réaction	

Tableau I.4 : Causes des différentes sortes de fissurations et les Précautions [1]

1.5. La ségrégation

Variation dans la répartition des éléments du béton, se traduisant par des concentrations différentes des composants du béton. Une ségrégation dans la masse de l'ouvrage conduit à un affaiblissement de sa résistance et une diminution de son étanchéité.



Figure I.11. phénomène de ségrégation

1.6. Efflorescence

L'efflorescence est le résultat de l'hydrolyse des composants de la pâte de ciment dans le béton. L'efflorescence est indiquée par la présence des dépôts blancs sur le béton, le plus souvent sur le dessous des ponts et viaducs et indique que l'eau utilisée dans le processus de mélange de béton a été contaminée.



Figure I.12. Efflorescence de dalle du pont

1.7. Conclusion :

On a vu dans ce Chapitre que tous les mécanismes de dégradation des matériaux et perte de performance ou de comportement sont dues par plusieurs facteurs qu'on ne peut pas les maîtriser tous, donc ***la notion de la structure parfaitement durable c'est une notion irréalisable***, cette vulnérabilité des structures nous exige à faire recourir à des réparations ou des renforcements à travers le cycle de la vie de l'ouvrage. A cet effet il nous faut plus de la compréhension des mécanismes dégradant, la maîtrise des méthodes des détections des causes et pathologie ainsi que celles des séparations entre ces pathologies pour l'élaboration d'un diagnostic le plus juste possible.

Chapitre II

Méthodes De Diagnostic Et Investigation

II.1 Introduction

On entend par surveillance, toute visite ou inspection visant à déceler tout disfonctionnement ou dégradation au niveau des éléments ou des parties de l'ouvrage. La surveillance des ouvrages est destinée à tenir à jour une connaissance suffisante de son état de dégradation, afin de permettre d'effectuer dans un délai adéquat, les opérations nécessaires d'entretien ou de remise en état, ainsi, le suivi d'évolution des désordres détectés dans un ouvrage (dégradation par corrosion ou autres) est fondamental dans l'efficacité de ces actions. De ce fait, l'inspection des ouvrages dégradés constitue une étape importante dans l'évaluation des conditions d'état et dans la définition des éventuels travaux de réparation.

II.2 Pourquoi un diagnostic ?

Le diagnostic d'un ouvrage au sens large du terme permet d'évaluer dans quelles mesures il remplit ses fonctions structurelles et de service, c'est-à-dire de vérifier qu'il satisfait aux conditions de sécurité et d'utilisation qui sont définies par la réglementation et par les besoins de son propriétaire ou usager. Le vieillissement d'un ouvrage est marqué par l'apparition de désordres spécifiques. Dans le cadre d'un diagnostic, deux types de missions peuvent être réalisées :

- Sur un ouvrage sain, il peut vouloir estimer, vérifier ou contrôler les caractéristiques de la construction, c'est notamment le cas des ouvrages à « caractère exceptionnel » (grand ponts...etc.) ou des structures innovantes dont il souhaite connaître le comportement en service ;
- Sur un ouvrage supposé endommager : l'inspection visuelle ou l'auscultation peut alors être utilisée pour détecter l'endommagement ;
- Sur un ouvrage visiblement endommagé dont les désordres sont susceptibles ou non de s'aggraver ou de mettre en cause la sécurité : il peut faire appel à l'auscultation pour caractériser l'endommagement (gravité de l'endommagement, étendue spatiale...etc.).

Dans une réparation ou d'un confortement, le diagnostic a pour but de bien définir les travaux à réaliser. Le traitement des désordres demeurera en effet pérenne puisque ciblé sur leurs origines et leurs conséquences. Cette optimisation des travaux de pérennisation, tant du point de vue qualitatif que quantitatif, est naturellement source d'importantes économies pour le maître d'ouvrage.

II.3 Les données nécessaires pour la surveillance d'un Ouvrage

Les informations nécessaires pour mettre en application une surveillance rigoureuse à un ouvrage se répartissant de la façon suivante :

II.3.1. Les données de recensement

Elles renseignent ce qui suit :

- la localisation du pont ;
- les caractéristiques géométriques de l'ouvrage ;
- le type d'ouvrage et les matériaux utilisés dans sa construction ;
- l'importance historique du pont ;
- la possibilité et la longueur de déviation en cas de nécessité ;
- l'importance de réseau dans lequel se trouve le pont ;
- l'année de construction du pont ;
- la charge admissibles ainsi que l'historique de réparation si elle existe.

II.3.2. Les données d'évaluation

Les données permettant l'évaluation de l'endommagement d'un ouvrage en béton sont nombreuses. On peut alors classer les informations recherchées en quatre catégories selon leur nature ou leur origine :

- **caractéristiques de l'ouvrage** : mesure de l'épaisseur de béton, mesure de l'enrobage des barres d'armatures dans un béton armé, positionnement et dimensionnement du ferrailage passif/actif, localisation des joints de coulées
- **caractéristiques du matériau** : caractérisation de la composition, évaluation de l'ensemble des caractéristiques mécaniques et physique des matériaux.
- **caractéristiques pathologiques** : détection et localisation des parties d'un ouvrage atteinte d'alcali-réaction, détection et quantification des zones d'un ouvrage contaminées par des chlorures, détection, localisation et dimensionnement de vides ou d'hétérogénéités (fissures, microfissures, délaminations, nids d'abeille)...etc.

II.3.3. Les données décrivant le niveau de service rendu.

S'obtiennent en comparant le niveau de service, effectivement offert par le pont, avec le niveau de service actuellement requis par rapport à un nouveau pont que l'on construirait sur le même réseau ou pour une nouvelle condition du trafic sur le même réseau. À cet effet on peut conclure que ces données permettant l'évaluation de l'état de gravité des ouvrages et le type d'insuffisance soit :

A) L'insuffisance structurelle :

Signifie que le pont n'a plus sa résistance mécanique originelle, à cause de sa dégradation ; il ne peut donc plus supporter sans risques le trafic pour lequel il a été conçu. En conséquence, il doit être limité en charge, ou en vitesse ,ou

en nombre de voies de circulation, voire fermé complètement au trafic;

B) L'insuffisance fonctionnelle

Signifie que la conception originelle du pont l'a rendu inadapté aux nouvelles conditions du trafic, à cause par exemple, d'une insuffisance des charges admissibles, ou du gabarit, ou de la largeur utile[61].

II.4 Différents types de surveillance

Tout au long de sa vie, l'ouvrage devra être soumis à des inspections, de plusieurs types ou niveaux, afin de savoir l'état. :

II.4.1 Inspection visuelle

II.4.1.1 Définition

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

II.4.1.2 La Procédure IQOA, 1995

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

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

Tableau II.1: Extrait de la classification des défauts des poutres pour les ponts à poutres sous chaussées en béton armé selon la méthodologie I.Q.O.A. [1]

II.4.1.3 La Référence ACI, 1993

Présente une méthode de classification visuelle des dégradations à partir d'une codification. Celle-ci est attribuée sur l'identification et la description du désordre. Il fournit aussi les causes probables et suggère les détails qui doivent être collectés pendant l'inspection. Le Tableau 5.2 représente un extrait de la méthode de classification proposée par ACI, 1993. On note, dans les situations illustrées, que l'investigation ne concerne pas seulement les dégradations de la structure provoquées par la corrosion (B2 et C4).

II.4.1.4 Outils et équipement pour l'inspection visuelle

En cours de l'inspection visuelle l'ingénieur doit être bien équipé avec des outils pour faciliter l'inspection. Il s'agit notamment d'une série d'accessoires courants tels que les rubans de mesures, décimètre, des marqueurs, des thermomètres, des anémomètres et autres. Jumelles, télescopes, ou autres instruments un peu plus chers tel que les fibroscopes qui sont utiles lorsque l'accès est difficile. Un microscope de largeur des fissures ou une Jauge de profondeur, tandis qu'une loupe ou un microscope portable est pratique pour l'examen de près. Un bon appareil photo avec un bon zoom nécessaires et des microlentilles et autres accessoires, tels que des filtres polarisés, facilite la documentation picturale de défauts, et un tableau des couleurs

portables est utile pour identifier les variations dans la couleur du béton. Un ensemble complet de dessins adaptés montrant des vues en plan, élévations et les détails structuraux permettant l'enregistrement des observations à faire.

II.4.1.5 Buts de l'inspection visuelle

L'inspection visuelle sert à :

✓ **Qualifier**

Un désordre spécifique à une origine et des conséquences particulières. La qualification permet de savoir à quel désordre on est confronté et donc quel type de traitement/réparation est à mettre en place.

✓ **Localiser**

La position d'un désordre sur l'ouvrage donne des indications sur son degré d'importance et son origine. En outre, la localisation permet de cibler d'emblée les zones à traiter de manière urgente et de choisir les travaux en fonction des contraintes d'accès.

✓ **Quantifier**

Ceci a pour but de connaître l'étendue des désordres et donc d'évaluer les méthodes les plus adaptées pour effectuer les réparations.

✓ **Comparer**

Une comparaison de l'état de l'ouvrage par rapport à l'état précédent ou par rapport à un état de référence, et cela en vue de déceler et de signaler à temps toute nouvelle anomalie ou toute évolution anormale d'une anomalie existante.

II.4.2 Inspections Détaillée

Elle est réalisée par un organisme spécialisé. C'est une inspection qui est menée avec soin et dans le détail, en employant tous les moyens d'accès nécessaires pour accéder aux différentes parties et éléments de l'ouvrage, ainsi que l'outillage adéquat de maître d'ouvrages ;

Dans l'inspection détaillée, il est utilisé les moyens d'accès spécifiques pour accéder à toutes les parties d'ouvrage avec tout l'outillage nécessaires à cet effet, à savoir : nacelles, échafaudages, matériel élévateur, barques, équipements de plongée, aides visuelles, marteau, fil à plomb, Cette inspection est complétée éventuellement par le nivellement des appuis et la mesure des flèches de travées. La périodicité de ces inspections ou visites est en moyenne de cinq (05) ans jusqu'à dix (10) ans, si l'ouvrage ne présente pas de dégradation, elle est réduite à une (01) ou à deux (02) années pour le cas d'ouvrages spécifiques. Cette visite sera sanctionnée par un procès-verbal ou rapport de visite dans lequel apparaîtront en détail tous les

renseignements et résultats de la visite (appuyée par des prises de vues), ainsi qu'une évaluation précise de l'état de l'ouvrage. L'inspection détaillée peut défaire sur :

II.4.2.1 Une visite annuelle

Pour certains ouvrages comportant des dégradations ou désordres particuliers et pour les ouvrages relativement anciens, avant de les programmer pour l'entretien ou la réparation.

II.4.2.2 .Une auscultation approfondie

D'éléments ou parties d'ouvrage, ou de tout l'ouvrage. Des investigations sont menées au moyen d'appareillages spécifiques pour apprécier la qualité et les caractéristiques des matériaux en place, le comportement de l'élément ou de la structure en service, évalué les efforts et contraintes.

II.4.2.3 Une surveillance renforcée

Lorsque l'auscultation ne permet pas de répondre à certaines questions qui se posent sur l'état de l'ouvrage, ou lorsqu'il y a possibilité de remplacement de l'auscultation, on recourt suivi de l'évolution de certaines dégradations par des examens fréquents et des mesures périodiques, pendant une certaine durée (une année au minimum).

II.4.2.4. Une haute surveillance [7]

Est une mesure d'exception, destinée à surveiller l'apparition ou à suivre l'évolution d'un état considéré comme dangereux et à permettre de prendre en temps utile toutes les dispositions nécessaires pour maintenir la sécurité.

L'objectif fondamental de la haute surveillance est d'assurer une sécurité permanente, compte tenu de l'utilisation qui sera faite de l'ouvrage avant réparation. Un deuxième objectif est de suivre l'évolution réelle des désordres, pour qu'il puisse en être tenu compte dans le projet de réparation.

II.4.2.5. Inspection des dommages [22]

Dans le cas de l'endommagement d'un pont, une inspection des dommages est généralement appelée à évaluer la gravité des dégâts et de déterminer la nécessité de restrictions de charge ou de fermeture complète. Le niveau et le détail d'inspection

II.4.2.6. Inspection détaillée particulières

Elles sont effectuées en dehors du programme d'inspections périodiques (primaires et détaillées). Elles sont déclenchées par l'administration :

a) Suite à des circonstances anormales : Crues, glissement de terrain, passage de convois exceptionnels, défaillance imprévue, désordre occasionné par choc, séisme, ... etc.

b) A l'occasion de la mise en service d'un ouvrage neuf ou d'un ouvrage ayant subi des travaux de confortement ou de réhabilitation.

c) En vue de réévaluation de la portance vis-à-vis de nouvelles réglementations.

II.4.3. Procédures d'inspection des Parties des ponts

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

a) Fondations:

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

b) Infrastructure

C'est la partie apparente des appuis du tablier. Il y a lieu de vérifier la présence et la nature des fissures, l'existence d'éclatements de béton, la corrosion des armatures, l'état des joints de maçonneries, vérifier si la maçonnerie n'est pas dérangée par la végétation et les arbustes, ... etc.

c) Appareils d'appuis :

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

d) Superstructure :

- Tabliers en béton : vérifier le contact tablier appui, noter en particulier l'existence de fissures et leurs directions sur chaque élément porteur, relever les avaries de nature chimique, les éclats de béton et écaillages, la corrosion des armatures, les dégâts accidentels, étanchéité de la dalle, ...
- Tabliers métalliques : vérifier l'état de la protection (peinture), la présence de fissures, relever les déformations permanentes (flèches, flambements, voilements, torsion, ondulations, vérifier l'état des soudures, des assemblages, des boulons et rivets, étanchéité du tablier, ...

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

e) Joints de dilatation :

Il faut porter attention aux défauts suivants : desserrement des boulons, insuffisance du souffle, étanchéité du joint, ...

f) Systèmes d'évacuation des eaux :

Vérifier si les barbacanes et gargouilles ne sont obstruées, si les conduites et descentes d'eau sont en bon état, ...

g) Système de retenue latérale :

Relever les dommages occasionnés par les véhicules, l'état de la protection (peinture) des gardes corps et glissières métalliques,

II.4.8L'interprétation

L'interprétation est un processus continu à travers les étapes d'investigation qui permettra l'utilisation la plus efficace des ressources sur le site, et conduire à la maximisation de la valeur des informations obtenues.

L'importance de l'interprétation compris entre jugements qualitatifs concernant les caractéristiques observées pendant les relevés visuels, à l'analyse détaillée et l'évaluation statistique des résultats des tests numériques avec évaluation quantitative des propriétés physiques menant à la formulation des conclusions.

L'évaluation des résultats des inspections visuelles s'appuiera fortement sur les compétences et le jugement subjectif de l'ingénieur effectuant l'inspection.

II.4.9L'évaluation

L'évaluation est un processus de détermination de la suffisance d'une structure ou d'un composant pour l'usage prévu par l'analyse logique des 'informations et de données collectées auprès des documents existants, l'inspection sur site, étude de l'état, et des essais de matériaux. Le processus d'évaluation ne peut être généralement normalisé dans une série d'étapes bien définies, car le nombre et le type de mesures varient en fonction de l'objectif spécifique de l'enquête, le type et l'état physique de la structure, l'intégralité de la conception et la disponibilité des documents, et la force et la qualité des matériaux de construction existants.

Le choix de la méthode d'évaluation dépend de facteurs tels que la nature de la structure et la quantité d'informations connues au sujet de son état actuel. Les choix typiques sont:

1) L'évaluation par l'analyse:

La méthode la plus courante, est recommandée lorsque l'information suffisante est disponible sur les caractéristiques physiques, les propriétés du matériau, l'aspect structurel, et les charges auxquelles la structure a été ou elle sera soumis.

2) L'évaluation par l'analyse et test de charge à pleine échelle,

3) L'évaluation par l'analyse et la modélisation structurelles (ACI 437R).

Ces deux sont recommandées dans le cas des conception complexe et le cas de manque d'expérience concernant le système structural ;dans cet cas l'évaluation est faite uniquement par des méthodes analytiques fiables, ou lorsque la nature de désordre actuelle introduit une incertitudes importante sur la richesse des paramètres nécessaires pour effectuer une évaluation analytique, ou lorsque la géométrie et les caractéristiques du matériau des éléments de structure en cours d'évaluation ne peut pas être facilement déterminée.

Les composants structurels, parties de jonction (les nœuds) doivent être identifiés par l'évaluation basée sur l'examen des documents, la dimension et de vérifier la géométrie, l'évaluation du matériel. Les capacités des composantes structurelles doivent être déterminées de préférence par la méthode de génération de force, méthodes sophistiquées telles que deséléments finis.

Toutes les charges existantes (permanentes), surcharges, charges de l'équipement et les charges exiger par les règlements appliqués telle que le vent et charge dynamique de séisme doit être envisagée et utilise dans analyses. Le cas échéant, les éléments non structuraux doivent également être évalués pour s'assurer qu'ils sont capables de résister aux charges prescrites et des déformations. L'effet d'éléments non structuraux sur la performance globale de la structure devrait également être envisagéII.4.9.4

✓ **Evaluation de la cause**

C'est de loin l'étape la plus difficile et la plus importante de tout. Il n'est pas possible d'évaluer l'importance des réparations à faire ni de choisir les meilleurs méthodes de réparation si la causes des dommages n'est pas connue. Ce qui ne signifie pas que la cause spécifique doit être décelée. En fait, surtout pour le béton, il est fréquent que l'on ne puisse pas l'identifier soit parce que les données pour trouver l'origine du mal sont insuffisantes, soit parce que plusieurs agent destructeurs agissent en même temps. On peut toutefois éliminer des possibilités jusqu'à ce qu'il n'en reste que quelques-unes et choisir alors une méthode de réparation qui améliore l'état

présent et empêchera l'extension des dommages dus à tous les agents destructeurs dont on soupçonne l'action

Comme il n'était pas possible de déterminer lequel des quatre agents était responsable des dégâts on choisit une méthode de réparation qui empêchât toute détérioration ultérieure par l'un quelconque d'entre eux. Les résultats obtenus donnèrent entière satisfaction. Toutefois le fait de n'avoir pas pu isoler la cause eut pour conséquence que le cout de la réparation fut sensiblement plus élevé que ce qu'il aurait pu être si la cause avait été déterminée avec précision. C'est ce que se produit en général, et pour des raisons d'économie il est bon de s'efforcer autant que possible d'identifier la ou les causes probables des dégâts avec précision.

A cette égard il convient de remarquer si l'on ne réussit pas à déceler la cause des dommages son peut être amené à choisir une méthode de réparation qui soit nuisible plutôt que salutaire. Il n'existe pas de règles ni de méthodes toutes faites pour déterminer la ou les causes de dégradation. Chaque cas pose un problème particulier et doit faire l'objet d'un diagnostic particulier. Toutefois l'expérience permet de dégager un certain nombre de schèmes de principe.

Par exemple les fissures dans les murs dues aux tassements des fondations se forment en général en diagonale. La pâte de ciment d'un béton soumis à l'attaque de sulfates a un aspect blanchâtre et terne caractéristiques. Les fissures dues à la corrosion des armatures forment des lignes droites parallèles équidistants et laissent apparaître des traces de rouille. On apprend aussi très vite où il faut chercher la corrosion dans les ouvrages métalliques et /ou les poutres en bois sont susceptibles de pourrir. En général, pourtant, le diagnostic est difficile à faire et il faut se contenter de savoir parfaitement ce qui peut se détériorer, éliminer les causes possible de difficultés jusqu'à ce que la bonne solution apparaisse.

II.4.9.5. Evaluation des couts

Une évaluation des coûts devrait être réalisée pour toutes les possibilités de réparation ou réhabilitation. Le coût de réhabilitation est soumis à de nombreux facteurs, mais le coût pour certains types de réparations structurelles ou des travaux de renforcement peuvent souvent être raisonnablement estimé sur la base d'expérience antérieure. Une telle estimation peut constituer la base d'une décision initiale concernant la solution appropriée pour être sélectionné et la faisabilité économique d'ensemble du projet. Une plus détaillée des coûts de réhabilitation doivent être documentées, en tenant compte de la localisation du projet et le travail existantes et disponibles et des entrepreneurs qualifiés. Ces coûts doivent être calculés pour l'heure approximative de l'échéancier de construction réels.

Il faut reconnaître que les conditions imprévues nécessitant un coût supplémentaire sont courantes dans de nombreux projets de réhabilitation et éventualités adéquate doit être fournie. Dans le cas où les coûts estimés dépassent le budget disponible, un

autre cycle de réductions possibles doit être étudié. Le programme de réhabilitation définitive peut alors être modifié et approuvé par le propriétaire, qui doit être informés que les coûts réels peuvent être déterminés qu'après une préparation de documents contractuels détaillés (plans et devis).

Après l'obtention d'offres fermes d'entrepreneurs, Si le coût de la mise à niveau est déterminé à être excessif, d'autres utilisations possibles de la structure devrait être étudié, ou une recommandation faite à la poursuite de son utilisation actuelle ou pour l'élimination de son utilisation.

II.5 Conclusion

L'évaluation de l'état des ouvrages aux points de vue matériaux, état structurelles et fonctionnalité ainsi que la détermination précise des causes engendrant les désordres dans les ouvrages d'art sont des opérations très compliquées puisque les désordres sont dans la plupart des cas difficiles à analyser et à évaluer car leurs origines peuvent être diverses et nous conduisent parfois à remonter jusqu'à la conception de l'ouvrage, mais ont une très grande importance, constitue la base nécessaire pour le choix d'une procédure de remédier « stratégie de réparation adéquate » .

Les méthodes et les techniques à assurer la réparation et la rénovation des ponts métalliques dégradés font l'objet du prochain chapitre.

Chapitre III

Méthodes et techniques de réparation

II.1. Introduction

La dégradation des ponts c'est un état qui influe directement sa fonctionnalité, ses caractéristiques géométriques, sont aspect d'art, une influence qui nécessitera une intervention rapide sur l'ouvrage afin d'améliorer et maintenir ses aspects.

Les méthodes et techniques de réparations sont très élaborées et de plus en plus variées, leur utilisation demande un savoir-faire et une maîtrise sans failles des moyens de plus en plus sophistiqués. Le choix d'une technique de réparation est fonction de sa faisabilité, des délais nécessaires, des couts directs (démolition, réparation et travaux provisoires) et des couts indirects (déviation de la circulation, incidence, ...etc.).

II.2. Répartition des ponts par type de matériaux de superstructures

Dans sa constitution, le parc algérien a subi à des différentes étapes de développement de la technologie des ponts, et c'est tout naturel que fait un ensemble très hétérogène sur le plan typologie et matériaux utilisés. En résumé, le patrimoine des ponts sur routes nationales et chemins de wilaya les chemins communaux non compte, en 2006, environ 3992 ponts. Ses ponts se répartissent, par type de matériaux, comme la montre la figure ci-dessous :

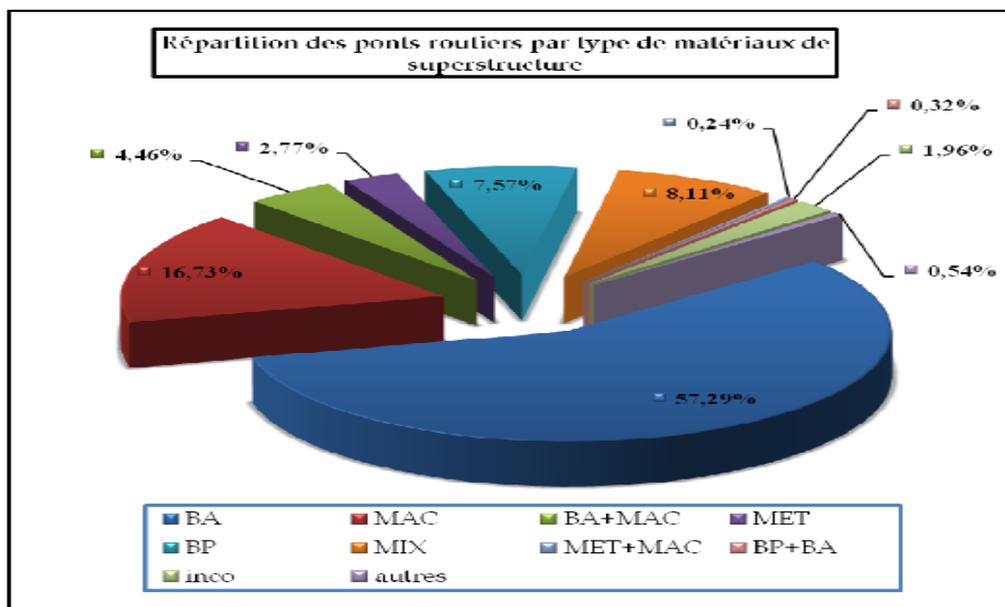


FIG III.1. répartition du pont routier par type de matériaux de superstructure [3]

La partie des ponts en béton armé dans l'effectif total est de 57.29% ; puis viennent les ponts en en maçonnerie béton armé avec 16.73% de l'effectif ; ensuite on trouve les ponts mixte avec 8.11% de l'effectif ; ensuite on trouve les ponts en béton

précontrainte avec 7.57% de l'effectif ; en fin les ponts métallique, béton armé maçonnerie, métallique + maçonnerie, béton armé + béton précontrainte et d'autre type totalisent 8.34 % de l'effectif ; la partie inconnu des ponts présentant 1.96 %.

a) Récapitulatif des causes des pathologies courantes

D'après la réparation précédente des ouvrages les causes pathologiques qu'on peut rencontrer habituellement dans notre parc sont :

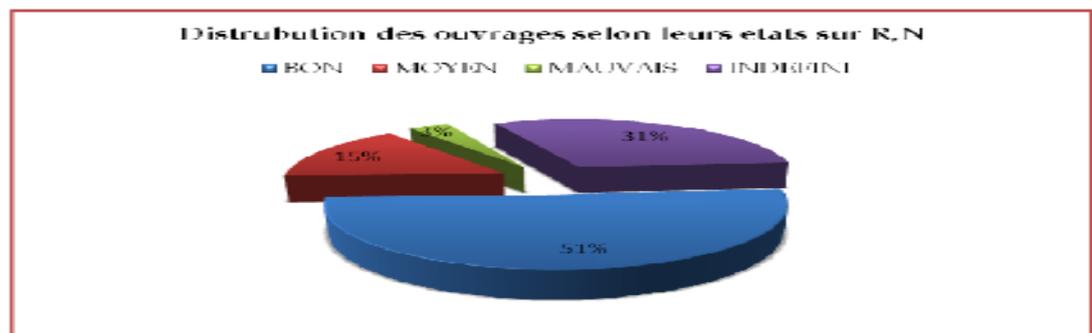
➤ Métallique

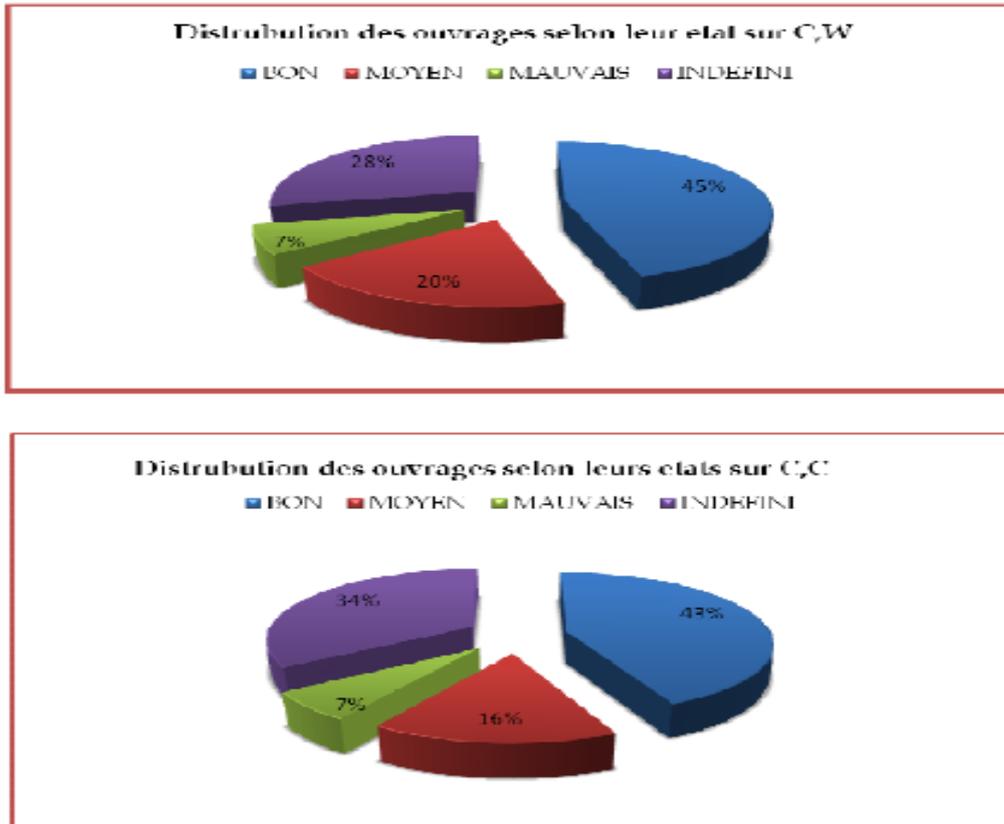
- Des détériorations sous charges roulants : fissures de fatigue, déconsolidation d'assemblage rivés, décèlement et blocages d'appareils d'appuis ;
- De la corrosion creusent ou foisonnant ;
- Des dégradations dues aux faibles caractéristiques des vieux matériaux : fissures et cassures de traction, ruptures sous chocs thermiques ou mécanique ;
- De défaut de conception d'origine.

b) L'état des ouvrages d'art

Dans la présente thèse on a classé les ouvrages sur la base de l'inventaire réalisé en 2006 selon quatre classes comme suit :

- 1) Bon état** : il caractérise les ponts neufs ou des ponts qui ne présentent pas des dégradations et servent une très bonne qualité de service ;
- 2) Etat Moyen** : il caractérise les ouvrages dont la structure est en bon état apparent, mais les équipements ou les éléments de protection présentent des défauts ou alors, la structure présente des défauts mineurs qui mènent la structure à un entretien spécialisé sans caractère d'urgence ;
- 3) Mauvaise Etat** : il concerne les ouvrages qui ont une structure altérée et qui nécessite des travaux de réparation avec ou sans urgence
- 4) Inconnu**: il fait référence aux ouvrages non-évalués.





Figures III.2. Distribution des ouvrages selon leurs états sur RN, CW, CC. [3]

D'après la figure IV.6, l'état du parc national des ouvrages d'art sur RN, CW et CC est comme suit :

- 46.33 % des ouvrages sont en **bon état**.
- 17 % des ouvrages sont en **état moyen**.
- 5.66 % des ouvrages sont en **état mauvais**.
- 31 % des ouvrages sont en **état indéfini**.

En analysant cette distribution on a constaté que 63.33 % des ouvrages (**bon état + état moyen**) n'ont pas besoin des interventions, aussi le taux de 31% pour les ouvrages en état indéfini et un peu élevé, ce qui reflète un manque important de surveillance permanente.

II.3. Techniques renforcement des structures

II.3.1. 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.



Fig III.3. Remplacement d'un montant d'une poutre treillis

II.3.1.1. dispositif provisoire de reprise des efforts par barres de précontrainte

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 :

- ✓ 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.

II.3.2. 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. Cette facilité ne doit pas faire oublier les 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:

- ✓ Installation de l'ouvrage sur appuis provisoires. Mais cette méthode, simple et efficace, n'est que rarement envisageable pour d'évidentes raisons de site ;
- ✓ Mise en œuvre d'un précontraint 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 de la section sollicitée 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 .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.

> **En ce qui concerne les dispositions constructives, il faut :**

a) Eviter les concentrations de contraintes et les efforts parasites en débardant les extrémités des pièces de renfort, en meulant les extrémités des cordons de soudure, en réalisant l'attache des pièces de renfort dans des zones où l'effort est aussi faible que possible, en respectant le tracé des lignes d'épures, etc. ;

b) Eviter de créer des «pièges à eau» ; cette exigence est parfois en contradiction avec le maintien de la position des centres de gravité. La figure illustre cette contradiction le renfort de la membrure supérieure modifie la position du centre de gravité de cette membrure mais ne gêne pas l'évacuation des eaux de pluie. Le renfort de la membrure inférieure présente le défaut inverse. Dans le cas où il n'est pas possible de concilier les deux exigences, il y a lieu d'éviter les pièges à eau et de réaliser un modèle de calcul tenant compte des excentricités des centres de gravité



Fig III.4. Ajout de matière sous la membrure inférieure entre lignes de rivets (Pont de Douarnenez) [7]

II.3.3. Déconsolidation d'assemblages rivés

Dans les assemblages les plus sollicités, le desserrage d'un ou plusieurs rivets surcharge les rivets encadrant et le défaut peut s'aggraver rapidement. Il importe donc de remplacer au plus vite les rivets défectueux :

- soit par de nouveaux rivets au moins du diamètre immédiatement supérieur à ceux remplacés, posés avec soin,
- soit, si l'on est dans l'impossibilité de poser de nouveaux rivets, par des boulons HR, à condition de remplacer tous les rivets constituant l'assemblage,
- soit, dans le cas où le nombre de rivets à remplacer est faible, par boulons calibrés,
- soit, par des boulons injectés.

L'alésage définitif avant la pose du rivet ou du boulon de substitution doit avoir fait complètement disparaître l'ovalisation éventuelle du trou engendrée par l'ébranlement.

Il arrive fréquemment que l'état des pièces se soit dégradé dans le temps en raison de l'ébranlement ou que les rivets soit mal posés. D'autre part, l'enlèvement des anciens rivets et la pose de nouveaux, si ces opérations ne sont pas réalisées dans les règles de l'art, fatiguent toujours quelque peu le métal des pièces à assembler (chocs, déformations). Si bien qu'un tablier métallique peut se trouver en plus mauvais état après réparation qu'avant. Ces travaux doivent donc être réalisés par des entreprises qualifiées et nécessite une surveillance continue.

- Les réparations des ébranlements nécessitent toujours une étude préalable en vue de déterminer :
 - s'il est nécessaire, pour éviter le retour de l'avarie, de réaliser un renforcement de l'assemblage (par exemple : établissement d'une continuité entre longerons, pose d'un raidisseur sous dispositif d'attache de voie),
 - si le diamètre du rivet ou boulon définitif est compatible avec les règles de trusquinage (pas, pince). Dans le cas contraire, il y aurait lieu de remplacer les pièces concernées.



Fig III.5. Remplacement le rivet défectueux

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 ; en effet il est rare de trouver un acier ancien dont la soudabilité soit équivalente à celle des aciers modernes ; de plus les soudures étant réalisées in situ et en position, l'utilisation de certaines techniques de soudage est exclue. Le soudage relève de la métallurgie. La soudabilité des aciers (des fers puddlés de la fin du XIXème siècle aux aciers modernes) a évolué considérablement.

Depuis 1950 environ, les sidérurgistes ont basé le développement des aciers en privilégiant leur soudabilité.. Avant toute opération, il faut connaître le matériau, sa composition chimique, son élaboration et la façon dont il interagit dans la structure (les efforts qu'il transmet, son niveau de bridage, de sollicitation en fatigue...) pour le souder de façon efficace. Cette connaissance est d'autant plus cruciale que les assemblages seront fortement sollicités.

II.4 .Méthode de réparation :

Afin d'exécuter et pouvoir réaliser les technique citées ci-dessus, on est obligé de passer et utiliser une des méthodes suivantes, méthodes comme, réparation par soudage, réparation par boulonnage, réparation par rivetage.

II.4 .1 .Réparation par soudage

II.4 .1 .1 . Définitions

Le soudage est l'opération d'assemblage qui assure la continuité métallique de deux pièces par phénomène de fusion locale.

Les aciers modernes se caractérisent par leur soudabilité : aptitude à être soudé, d'où la nécessité dans le cadre d'une réparation d'ouvrage ancien de s'assurer de la soudabilité des matériaux en présence.

La recommandation R 581/1967 de l'ISO définit ainsi la soudabilité : « On considère qu'un matériau métallique est soudable à un degré donné par un procédé et pour un type d'application donné, lorsqu'il se prête, moyennant les précautions correspondant à ce degré, à la réalisation d'une construction entre les éléments de laquelle il est possible d'assurer la continuité métallique par la constitution de joints soudés qui, par leurs caractéristiques locales et les conséquences globales de leur présence satisfont aux propriétés requises et choisies comme base de jugement. »

> Derrière cette définition typiquement normative, il est possible de distinguer plusieurs définitions de la soudabilité en fonction des paramètres qu'elle fait intervenir :

- La soudabilité métallurgique, qui est fonction du matériau et uniquement de lui, tout autre paramètre étant fixé ;
- La soudabilité opératoire, qui est fonction du matériel et du personnel nécessaire à la réalisation de la soudure ;
- la soudabilité globale, qui fait intervenir le tracé des pièces destinées à la réalisation du joint soudé.

> **Dans la notion de soudabilité métallurgique, on peut encore distinguer trois aspects de jugement, qui sont fonction du type de défauts métallurgiques constatés :**

■ **La fissuration à chaud** : se traduit par la présence de fissures, le plus souvent dans le métal fondu, attribuables à la présence de contraintes importantes au moment où le métal est encore très chaud. Ces incidents sont facilement décelables par un contrôle correct à la fabrication ;

■ **La fissuration par «arrachement lamellaire** », conséquence d'une fissuration, se produit dans des plans parallèles à la peau du produit laminé, au droit d'une soudure sollicitant ce matériau dans la direction de l'épaisseur ;

■ **la fissuration à froid**, qui apparaît généralement dans le métal de base, est, de loin, le type de défaut le plus redouté dans le soudage des aciers, au point que la notion de soudabilité des aciers est souvent confondue avec leur susceptibilité à ce défaut.

Au cours de l'opération de soudage, une grande quantité de chaleur est apportée localement à la pièce soudée. Cet apport calorifique engendre :

■ Un chauffage très rapide jusqu'à une température comprise entre la température initiale du métal et la température de fusion de celui-ci, suivant la distance entre la zone fondue et le point considéré ;

■ Un refroidissement qui succède immédiatement au chauffage et dont la cinétique dépend essentiellement, comme nous le verrons, de l'ensemble des conditions opératoires (et notamment des paramètres de soudage, de la géométrie du joint, du procédé de soudage et de son rendement thermique ...).

Un tel cycle thermique provoque des transformations structurales qui dépendent de la température maximale atteinte, de son temps de séjour, et des conditions de refroidissement du métal au point considéré.

> **La figure ci-après reproduit un exemple des modifications structurales se produisant au voisinage d'une soudure sous flux solide d'acier du type E 36 C-Mn à l'état normalisé. Il est possible de distinguer :**

■ La région du métal de base où la température maximale atteinte reste inférieure à environ 600°C, dans laquelle, à l'examen métallographique, on ne détecte pas de modification structurale visible ;

■ Une zone où la température maximale atteinte est comprise entre 600°C et Ac1 (transformation du diagramme de phase – voir la 1ère partie du guide). Certaines modifications métallurgiques peuvent déjà avoir lieu dans cette zone, précipitation et coalescence en présence d'éléments dispersives, légère globalisation de la perlite ;

II.4 .1 .2 .Défauts métallurgiques au soudage [1] .

a) Fissuration à chaud

La fissuration à chaud est causée par l'action des contraintes de retrait lorsque le métal est encore très chaud après le soudage et que sa ductilité est insuffisante. Elle apparaît donc sans délai et se manifeste sous forme de fissures longitudinales, localisées le plus souvent dans la partie centrale de la zone de métal fondu. Elle peut être amplifiée par la présence d'hydrogène.

> **Il est possible d'éviter la fissuration à chaud en veillant aux points suivants :**

■ Composition chimique du métal fondu (mélange de métal de base et de métal d'apport) : les teneurs en soufre et en phosphore doivent être suffisamment faibles et le rapport Mn/S doit être suffisamment élevé (>20), afin d'éviter la formation de composés à bas point de fusion ; les aciers de construction et les métaux d'apport actuels satisfont aisément à ces conditions ;

■ Configuration du cordon de soudure : la largeur du cordon doit être suffisante par rapport à sa profondeur (rapport recommandé usuellement supérieur à 0,7).

Les incidents de fissuration à chaud sont rares. Ils sont en principe facilement décelables par le contrôle des soudures à la fabrication et les cordons défectueux peuvent être refaits immédiatement.

b) Arrachement lamellaire

L'arrachement lamellaire est une décohésion qui se produit parallèlement au plan de laminage d'un produit, au droit d'un assemblage soudé sollicitant le produit en traction perpendiculairement à sa surface. Les fissures sont le plus souvent amorcées sur des inclusions. Elles se propagent dans le métal de base, généralement en dehors de la zone affectée thermiquement et suivent un tracé «en marches d'escalier" parallèlement à la limite de la zone fondue .Elles peuvent demeurer entièrement sous la surface, ce qui les rend impossibles à détecter par inspection visuelle, ou bien émerger en pied de cordon précautions contre l'arrachement lamellaire .Il convient en premier lieu de rechercher une bonne conception des dispositions constructives :

- il faut éviter, dans la mesure du possible, les dispositions qui sollicitent fortement les tôles en traction perpendiculairement à leur surface.

> Lors de la construction, l'entrepreneur doit prendre certaines précautions quand un risque est prévisible :

- effectuer la soudure avec un métal d'apport ayant une limite d'élasticité si possible égale ou la plus proche de la limite d'élasticité minimum garantie sur le métal de base, pour absorber les déformations ;
- choisir le procédé de soudage et l'ordre des séquences pour limiter les contraintes dues au bridage.

II.4 .1 .3 . Les procédés de soudage

a) Principes généraux

Les procédés de soudage des métaux sont nombreux et basés sur des techniques très diverses. Cependant, dans le domaine des ponts en acier et plus particulièrement en réparation, on utilise uniquement le soudage à l'arc et les principes de base adoptés sont toujours les mêmes, à quelques exceptions près : l'arc électrique est entretenu entre une électrode et les éléments à souder ; il y a fusion du métal de base, ainsi que de l'électrode ; celle-ci est donc consommable et fournit du métal, dit métal d'apport.

Le soudage à l'arc nécessite une protection contre l'air : à la température de fusion, le fer se combine avec les constituants de l'air (oxygène et azote) pour donner des oxydes et des nitrures qui rendraient la soudure extrêmement fragile. Cette protection est assurée par des produits introduits sous différentes formes : enrobage des électrodes, flux en poudre, garnissage intérieur des fils-électrodes, gaz... C'est essentiellement par le mode de protection que se différencient les procédés de soudage des constructions métalliques.

> Deux procédés de soudage à l'arc utilisés pour les structures métalliques font exception à ces principes :

- Le soudage des goujons de ponts mixtes, dans lequel l'arc est entretenu entre le goujon et la tôle support, sans utilisation d'électrode ni apport de métal ;
- Le soudage TIG, utilisé exceptionnellement pour les ouvrages d'art, dans lequel le métal d'apport est fourni en dehors de l'électrode, laquelle n'est donc pas fusible (c'est le cas de la refusions TIG utilisé en amélioration de la géométrie des cordons vis-à-vis de la fatigue).

✓ Le procédé de soudage est choisi par l'entrepreneur.

Nous indiquons ci-après les procédés utilisés pour les ponts, en mentionnant pour chacun d'eux le numéro d'identification suivant la norme NF EN 24063 : cette norme

fournit un classement systématique des procédés de soudage des métaux, avec pour chacun une désignation normalisée et un numéro d'identification. Dans le cas des réparations d'ouvrages nous nous limiterons aux procédés utilisés sur site.

La préparation des pièces en atelier sur aciers actuels relève de la construction métallique classique.

b) Soudage à l'arc avec électrode enrobée (n° 111 de la norme)

C'est la première solution mise au point pour le soudage à l'arc, utilisée dès 1907. Il s'agit d'un procédé manuel : le soudeur tient et guide à la main le porte-électrode

Les électrodes sont constituées d'une âme métallique et d'un enrobage. Le diamètre, enrobage compris, est de l'ordre de 6 mm. L'âme conduit le courant électrique et fond en fournissant le métal d'apport.

c) Soudage à l'arc des goujons

Les goujons de connexion des ponts mixtes peuvent avoir un diamètre jusqu'à 22 maximum et doivent être conformes à la norme EN ISO 13918. Le soudage doit être réalisé selon la norme NF EN ISO 14555. L'opérateur conduit le soudage à l'aide d'un pistolet dans lequel est maintenu le goujon à souder. Le pistolet est connecté à l'alimentation électrique de façon à ce que le goujon joue le rôle d'électrode.

d) Les défauts des soudures

Les défauts des soudures peuvent être nocifs de différentes façons. Ils peuvent :

- affaiblir la résistance statique de l'assemblage;
- initier une fissure de fatigue;
- provoquer une rupture fragile, si d'autres facteurs défavorables sont réunis.

La nocivité des défauts dépend de leur taille et de leur forme géométrique. Une forme de défaut est d'autant plus nocive à l'égard de la rupture fragile qu'elle produit un effet d'entaille plus marqué. Il est possible de classer les défauts en cinq groupes suivant la norme NF EN ISO 5817 :

➤ Classement des défauts dans les soudures par fusion des métaux :

1. Fissures - Elles peuvent être dues à de la fissuration à froid ou à chaud. Ce sont les défauts les plus nocifs et toute fissure est interdite quelle que soit la classe de qualité de la soudure.

2. Cavités - Il s'agit notamment des soufflures dues à des inclusions gazeuses. Elles sont plus ou moins nocives en elles-mêmes ; elles peuvent aussi gêner la détection

d'autres défauts. Les soufflures débouchantes sont interdites dans les classes de qualité 1 et 2, les autres sont tolérées dans certaines limites.

3. Inclusions solides - Elles peuvent être constituées de résidu de laitier ou de flux emprisonné dans la soudure. Elles ont les mêmes conséquences que les soufflures

5. Défauts de forme - Ils peuvent concerner, soit la position des éléments l'un par rapport à l'autre (défaut d'alignement, défaut angulaire...), soit la soudure elle-même (défaut de raccordement des soudures aux éléments, surépaisseur, manque d'épaisseur, effondrement, caniveau, bombement excessif, dissymétrie d'une soudure d'angle, etc.). Les défauts de forme des soudures sont dus soit à un mode opératoire inadapté, soit, dans le cas de soudures d'angle, à une mauvaise tenue de l'électrode ou du pistolet par le soudeur.

e) Contrôle des soudures [1]

> **Comme en contrôle de construction neuve, outre le contrôle visuel, quatre procédés de contrôle non destructif sont pratiqués. Ce sont, en allant du plus superficiel au plus pénétrant :**

- Le ressuage
- La magnétoscopie
- La radiographie, par rayons X ou par rayons gamma
- Les ultrasons.

Ces procédés permettent non seulement de détecter les défauts, mais aussi d'obtenir des indications sur leur taille, leur forme, leur orientation et leur situation dans la soudure. Ils sont complémentaires, chacun d'eux n'étant utilisable que pour certains types de défauts et certains types de soudures.

Le contrôle des soudures doit être effectué avant application de la protection contre la corrosion, bien que certains procédés puissent être utilisés sur surface peinte sous réserve d'une épaisseur maximum de 150 à 200 μm . Cela est à éviter surtout pour le contrôle par ultrasons.

f) recommandations

Dans le cadre d'une réparation ou d'un renforcement, après caractérisation du matériau constitutif de l'ouvrage, l'emploi de la soudure à l'arc sur fer puddlé est tout à fait admissible à la condition d'appliquer certaines conditions opératoires adaptées à cause de la structure lamellaire et de la forte teneur en impuretés.

- intéresser une étendue relativement importante des fibres du métal,

- éviter de concentrer la soudure dans une même section (fig. 52)
- souder assez «froid» pour éviter la séparation thermique des feuilletts.

Les épaisseurs à souder sont généralement faibles (de l'ordre de 6 à 10 mm), le diamètre d'électrode le plus courant est donc le 3,15 mm ; dans certains cas on utilisera le 2,5 ou 4 mm.

II.4 .2 .Réparation par boulonnage [1]

La construction des ponts à poutres en treillis au début du XXème, avant le développement de la soudure, a fait appel au mode d'assemblage par rivetage et par boulonnage ordinaire. En France, il subsiste peu d'ouvrages présentant ce type d'assemblage par boulons ordinaires, en revanche de nombreux sont encore en exploitation dans les pays constituant les anciennes colonies des pays européens. Ainsi on rencontre de nombreux ouvrages de type« Pont Pigeaud », par exemple, constitués d'éléments de 2.5 m montés à l'avancement et assemblés par boulons ordinaires.(extrait de bibliographie [6])

Des boulons à haute résistance ont été utilisés en France dès les années 1950 pour la réparation et le renforcement de ponts rails rivés. Leur utilisation s'est étendue ensuite aux ouvrages neufs dans les années 1960. Sur certains ouvrages, tous les assemblages étaient des assemblages boulonnés ; sur d'autres, les assemblages en atelier étaient soudés, ceux sur chantiers boulonnés.

Quand le soudage s'est généralisé en atelier et sur chantier, l'usage des boulons a été restreint aux assemblages difficiles, par exemple ceux des ponts à poutres triangulées. Puis, ces ponts eux même sont pu être entièrement soudés, ce qui a diminué encore le champ d'utilisation des boulons.



Fig III.6. Pont Pigeaud – assemblages par boulons ordinaires

réparation par boulonnage 2.3 Des boulons à haute résistance ont été utilisés en France dès les années 1950 pour la réparation et le renforcement de ponts rails rivés. Leur

utilisation s'est rendue ensuite aux ouvrages neufs dans les années 1960. Sur certains ouvrages, tous les assemblages étaient des assemblages boulonnés ; sur d'autres, les assemblages en atelier étaient soudés, ceux sur chantiers boulonnés. Quand le soudage s'est généralisé en atelier et sur chantier, l'usage des boulons a été restreint aux assemblages difficiles, par exemple ceux des ponts à poutres triangulées. Puis, ces ponts eux-mêmes ont pu être entièrement soudés, ce qui a diminué encore le champ d'utilisation des boulons.



**Fig III.7 .Pont Warren sur le Rhin - Construction soudée –assemblages boulons
HR (~1965)**

Dans le cas de grands ouvrages, le boulonnage convient mal à l'assemblage des pièces épaisses et fortement sollicitées : il nécessite un nombre élevé de boulons et n'assure qu'un placage imparfait. Les assemblages boulonnés, quand ils sont utilisés, servent donc surtout assembler sur chantier les entretoises ou les pièces de pont aux poutres principales. Le boulonnage est aussi utilisé pour assembler aux tabliers des éléments secondaires (rails de passerelles de visite) et des éléments provisoires (avant-becs de lançage, entretoisements démontage). Pour certains petits ouvrages, le boulonnage peut permettre d'éviter tout assemblage soudé.

Dans le cadre de réparation d'ouvrages in situ, la technique du boulonnage est utilisée sur ouvrages anciens en remplacement du rivet ou en cas de difficultés de soudage métallurgiques / ou opératoire.

Dans ce qui suit, on désigne par boulon l'ensemble de l'élément de fixation composé d'un visa tête hexagonale, d'un écrou hexagonal et de rondelles.

> Les assemblages boulonnés se caractérisent :

■ Par le mode de sollicitation :

- efforts perpendiculaires à l'axe des boulons
- efforts parallèles à l'axe des boulons

■ Par le mode de fonctionnement

- non précontraint

- précontraint

II.4 .2 .1.Préparation des assemblages**a) Préparation des surfaces de frottement****> La norme NF P 22-463 art. 6 précise :****■P les surfaces non protégées en atelier, en classe 2 :**

« L'assemblage des pièces doit toujours être précédé d'un séchage au chalumeau si elles sont humides, d'un brossage à la brosse douce en acier destiné à éliminer la fleur de rouille qui aurait pu se former depuis le traitement de surface.

Si celui-ci a été effectué depuis plus de 24 heures, le brossage à la brosse douce sera remplacé par un brossage à la brosse dure ou même par un grenailage ou un sablage si le brossage ne suffit pas à rétablir l'état de surface exigé. »

■ Pour les surfaces protégées contre la corrosion – Classes 1 et 2 :

« Si les zones d'assemblage ont reçu un traitement contre la corrosion (prépeints, galvanisation à chaud, métallisation, etc. Elles seront nettoyées et dégraissées. Si ces protections ont été détériorées pendant le transport ou lors de manutentions, elles doivent faire l'objet de réparations avec des produits compatibles avec la protection initiale, qui assurent un coefficient de frottement au moins équivalent à celui prescrit.

- Préparation des surfaces de contact dans les assemblages résistant au glissement donne des indications sur les traitements qui sont censés fournir le coefficient de frottement minimal selon la classe de surface de frottement, sans essais (voir tableau XV).

> Les mesures suivantes doivent être prises en cours de fabrication et de montage afin de s'assurer que la classe de frottement requise est conservée :

➤ Au moment de l'assemblage, les surfaces de contact doivent être exemptes de toute souillure, par exemple, huile, terre ou peinture ; les bavures susceptibles d'empêcher l'accostage précis des parties assemblées doivent être éliminées ;

➤ Les traces d'huile doivent être éliminées des surfaces en acier à l'aide de produits de nettoyage chimiques et non au chalumeau ;

II.4 .2 .2.control de boulonnage

Après la mise en œuvre des boulons, leur serrage doit être contrôlé. L'objectif est de vérifier que le précontraint est effectivement prise en compte dans le calcul de dimensionnement.

> **Deux méthodes sont définies dans la norme NF P 22-466 :**

- contrôle par desserrage et resserrage de l'écrou ;
- contrôle par sur serrage de l'écrou.

La méthode par surserrage est obligatoire pour les boulons qui ont reçu une protection contre la corrosion (galvanisation...) et pour les boulons qui ont été serrés par contrôle de la rotation. Elle présente l'avantage d'être appliquée aux écrous dans leur état de pose définitif. En revanche, elle est mal adaptée à la détection d'un excès de serrage (il en est de même, mais dans une moindre mesure, de la méthode par desserrage - resserrage). Dans les deux méthodes, il doit être fait usage de clés dynamométriques.

> **Le contrôle doit être effectué :**

- Avant que les boulons ne reçoivent leur protection contre la corrosion définitive (peinture ou autre) ;
- Dans les 24 heures qui suivent le serrage des boulons si la méthode de contrôle retenue est celle par desserrage - resserrage de l'écrou ;
- Immédiatement après le serrage si la méthode de contrôle retenue est celle par surserrage.

Le contrôle doit être confié à des agents expérimentés dans le contrôle des assemblages métalliques boulonnés.

II.4 .2 .3. Remplacement de boulons

Du fait des modes de fonctionnement différents, le mixage des procédés d'assemblage est incompatible. Dans les assemblages les plus sollicités, le desserrage d'un ou plusieurs boulons surcharge les boulons encadrant et le défaut peut s'aggraver rapidement. Il importe donc de remplacer au plus vite les boulons défectueux.

> **La réparation des ébranlements, des déconsolidations d'assemblage nécessite toujours une étude préalable, afin :**

- De déterminer s'il s'agit d'un problème isolé, de mode de fonctionnement, de pose ou s'il est nécessaire, pour éviter le retour de l'avarie, de réaliser un renforcement de l'assemblage
- De vérifier si le diamètre du boulon définitif est compatible avec les règles de trusquinage (pas, pince). Dans le cas contraire, il y aurait lieu de remplacer les pièces concernées ;
- D'effectuer des contrôles non destructifs, qui peuvent être nécessaires pour s'assurer qu'il n'y a pas de fissures initiées en bord des trous dans les parties non visibles.

Suite à la déconsolidation d'un boulon isolé, celui-ci sera remplacé unitairement par un boulon neuf. Toutefois, en cas d'ovalisation du trou ou de désordre (amorce de fissure en bord dépeçage...) un alésage sera nécessaire et le remplacement sera effectué par un boulon neuf de diamètre supérieur. L'alésage définitif avant la pose du boulon de substitution doit avoir fait complètement disparaître l'ovalisation éventuelle du trou engendrée par l'ébranlement.

Suite à la déconsolidation de l'ensemble de l'assemblage, l'alésage sera systématique avec utilisation de boulons neufs d'un diamètre supérieur. Le remplacement des pièces sera envisagé si nécessaire

II.4 .2 .4.Pathologie des assemblages boulonnés

➤ **Les principales pathologies des assemblages boulonnés sont :**

Les défauts de pose : principalement liés au mauvais dimensionnement et choix des boulons : longueur de tige insuffisante, non-respect des conditions de pose.

■ La corrosion peut prendre plusieurs aspects, d'abord enrrouillement de surface par défaut de protection anticorrosion pouvant aller jusqu'à la dégradation des boulons. La corrosion spécifique des écrous sur ouvrages anciens en boulonnage ordinaire est généralement la conséquence de l'utilisation d'acier resulfurés dans le but d'améliorer l'usinabilité.

■ La corrosion entre pièces peut entraîner des efforts de traction sous tête excessif.

■ La déconsolidation de boulons ordinaires par suite de serrage insuffisant et/ou de sollicitations répétées excessives se manifeste par le desserrage de boulons qui se propage l'ensemble des boulons de l'assemblage et engendre le mouvement relatif des pièces et par suite le mauvais transfert des efforts.

Le glissement des pièces par suite de dépassement de la résistance de l'assemblage sur un assemblage précontraint peut intervenir conditions extrêmes. L'assemblage est non réparable partiellement, la reprise de l'ensemble (en l'absence de désordres autres) sera nécessaire par remplacement des couvres joints, l'élimination de l'ovalisation des perçages des tôles à rabouter et l'utilisation de boulons de diamètre supérieur.

La rupture des boulons (bibliographie [8]). Outre les phénomènes de corrosion, deux types de rupture font l'objet de la majorité des expertises de laboratoire.

■ Ruptures brutales, soit fragiles, soit ductiles sous chargement statique ou sous l'effet de chocs.

- Ruptures progressives de fatigue sous sollicitations d'amplitudes variables.



Fig III.8. Coupe d'un boulon HR galvanisé rompu par fragilisation par l'hydrogène.

➤ Rupture sous tête

Les ruptures sous tête ont souvent eu pour cause la fragilisation par l'hydrogène qui avait pour origine la préparation par bain acide du traitement de surface par galvanisation. Ce procédé est maintenant abandonné.

II.4 .3 .Réparation par rivetage

II.4 .3 .1.Définition

Un **rivet** est un élément d'assemblage définitif. Il se présente sous la forme d'une tige cylindrique, généralement métallique, pleine, qui est munie à l'une de ses extrémités d'une "tête" c'est-à-dire une partie de section plus grande.

L'autre extrémité sera forgée à chaud, de façon à former une tête seconde pour solidariser les éléments à assembler. Cette opération est désignée sous le terme de **rivetage**

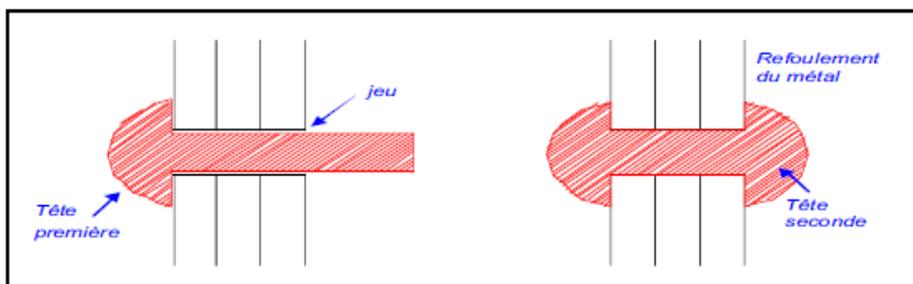


Fig III.9. Rivet, constitution d'un assemblage

Le rivetage a constitué le principal mode d'assemblage de pièces métalliques

jusqu'au développement de la soudure, qui, avec la technique du boulon à haute résistance, l'ont progressivement remplacé dans les années 1960. Aujourd'hui, cette technique est réservée au domaine de la réparation des ouvrages métalliques anciens rivés.

Dans ce qui suit, on désigne par rivet l'ensemble de l'élément de fixation composé d'une tige avec sa tête première formée en usine. La tête seconde sera réalisée en atelier ou sur site lors de la réalisation de l'assemblage. La pose des rivets s'exécute à chaud par forgeage du métal de la tige au moyen d'outils spécifiques (bouterolles, tas...).



Fig III.10. Principe du rivetage

II.4.3.2. Phases de réalisation de rivetage

- Réalisation du trou par perçage, ou poinçonnage avec alésage. Le perçage au chalumeau est interdit ;
- Mise en place du rivet à chaud, avec maintien ;
- Refoulement du métal de la tige ;
- Formation de la tête seconde au moyen d'une bouterolle.

> **Le rivetage permet la réalisation de différents modes d'assemblages :**

- Assemblage bout à bout par couvre joint.
- Assemblage d'angle par l'intermédiaire de cornières.
- Assemblage de semelles par superposition

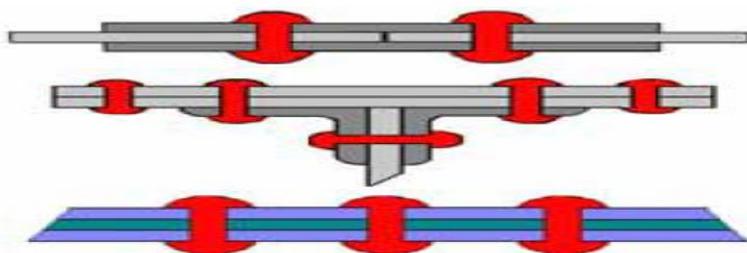


Fig III.11. Différents modes d'assemblage

II.4 .3.3.Mode de sollicitation des assemblages rivés

Dans un assemblage rivé, le mode de transmission des efforts s'effectue par sollicitation au cisaillement des tiges des rivets aux interfaces des tôles assemblées. Ceci implique le remplissage parfait des trous par les tiges de rivets. Compte tenu du refroidissement, donc de la contraction thermique, l'assemblage présente un effort de serrage des pièces, ce qui confère une certaine part de fonctionnement au frottement. Toutefois celui-ci n'est pas pris en compte dans le dimensionnement.

➤ **Les assemblages rivés se caractérisent par le mode de sollicitation (NF P 22-410) :**

- Effort perpendiculaire à l'axe du rivet (cisaillement) ;
- Effort parallèle à l'axe du rivet (traction) ;
- Effort incliné sur le plan du joint.

II.4 .3 .4.La pathologie des assemblages rivés

a) **Les défauts de pose se détectent par l'examen de la tête seconde sur l'assemblage, ce sont :**

- Tête mal pincée
- Tête excentrée
- Développement de fissures autour du trou, initiées lors de la réalisation du trou.



Fig III.12 Défauts de pose de rivet.

II.4 .4 .CONCLUSION

La réparation des ouvrages est devenue aujourd'hui une nécessité économique et un impératif technique dans la gestion des patrimoines. Elle implique des entreprises spécialisées qui cumulent une grande expérience, une maîtrise des moyens matériels et jouissant de compétences humaines de qualité.

Elle permet à moindre cout de réhabiliter des ouvrages et assurer ainsi leur état de service initial ce qui nous permet de nous économiser par ne pas recourir à la construction nouvelle.

II.4 .5. Recommandations :

- Tenir en compte la problématique de la durabilité les processus de vieillissement dans la conception et la réalisation des ouvrages.
- Mettre en place un contrôle rigoureux sur les opérations de conception et construction des ouvrages comme un 1ere étape de protection de notre ouvrage
- Procéder au recensement exact et précis de tout le patrimoine d'ouvrages sur le réseau routier (l'outil informatique contribuera pour beaucoup de précision).
- Intégrer aussi bien les données que le retour d'expérience ou encore les données extérieures disponibles ;
- Procéder au recensement exact et précis de tous les travaux de réparation ainsi que leurs durabilités, réalisé à travers le territoire nationale.
- Procéder à la collaboration entre les différents organismes intervenant dans la gestion des ouvrages et pourquoi pas une collaboration importante avec les universités.
- Exploitez les politiques de gestion qui ont déjà été utilisée avec succès pour des infrastructures à forts caractères que la nôtre.
- Classifier et hiérarchiser les ouvrages afin de évalue l'importance de chacun d'eux.
- Procéder une inspection détaillée de tous les réseaux pour l'établissement de documents de références sur l'état de chaque ouvrage (archives, documents reconstitués, ...).
- Elaborer et maitre en application un Guide de gestion des ouvrages d'art, et il faut qu'il soit assez générale pour être appliquée à n'importe quel type d'infrastructure et permette l'exploration de tous les modes de dégradation et défaillance.
- Elabore des cahiers de charges très précis pour le contrat d'expertise, plus performante.
- Assurer une formation au personnel chargé de la surveillance et entretien.
- Encouragés l'investissement dans le domaine de réparation des ouvrages pour évite le monopole et aller vers le développement du domaine.
- Mettre en place une organisation conséquente pour l'application du programme de surveillance.
- Assurer un personnel stable chargé de la surveillance.

Conclusions générales et Perspectives

■ Une enveloppe nécessaire doit être établie et évaluée à partir de la surveillance et des expertises de détails. Cette enveloppe résulte de la sommation des évaluations établies pour chaque pont pris individuellement

II.4 .6.Conclusions générales et Perspectives

Vue que la notion de la structure parfaitement durable est une notion irréalisable, vue le déficit d'entretien et les processus de dégradation des ouvrages accélérés par plusieurs facteurs que on ne peut pas les maîtriser tous, nos ouvrages sont affectés par des dégradations menaçant leurs sécurités et leurs durées de la vie ; et afin d'augmenter ou tout simplement de tenir la durée de vie de l'ouvrage d'art des interventions dite de réparation ou maintenance sont inévitable à réaliser, mais ces interventions ressortissent autant à l'art qu'à la technique et elles ne sont pas l'objet d'un enseignement spécifique, et l'ingénieur de terrain est souvent livré à lui-même face à un problème urgent.

La démarche proposée dans cette thèse a finalement nous a aidé à comprendre mieux le problème de maintenance et réparation des ouvrages d'art et spécialement les ponts pour le gestionnaire d'un parc des ouvrages, et nous a permis de sortir avec les conclusions suivantes :

Dans la partie bibliographie on a arrivé à :

- identifier les causes de la dégradation et des pathologies des ouvrages;
- identifier les moyens qui permettent de diagnostiquer les pathologies ;
- identifier les solutions de réparation ou de renforcement les plus adaptées aux plans techniques et économiques.

Dans la deuxième partie, elle fait objet du point suivant:

- Une vue générale sur le parc des ouvrages d'art dans notre pays, basés sur l'inventaire réalisé par le MTP en 2006 même si il ne s'appuie que sur des observations visuelles
- Le parc des ouvrages en Algérie est un ensemble très hétérogène sur le plan typologie et matériaux utilisés, dans la grande part des ponts sont construits en béton armé avec un effectif total de 57.29%.
- Le patrimoine des ouvrages d'art est relativement récent car environ 76% des ponts gérés par la direction de l'exploitation et de l'entretien des routes ont moins de 50 ans,

- Plus de 45% des ouvrages sont en mauvaise ou en état inconnue ce qui présente l'absence de la surveillance rigoureuse.
- La cause principale de la dégradation dans tous les cas étudié due par l'absence d'entretien. Certaines dégradations pouvaient être évitées ou atténuées par un minimum d'entretien ne demandant pas de grands moyens matériels et financiers.
- On a essayé aussi établir quelque défaillances dans la politique de gestion des ouvrages d'art différentes défaillances remarquées dans la politique Algérienne de gestion des ouvrages d'arts, de points de vues : réglementation, gestion, formation et perfectionnement du personnel, études et expertises.
- Et à la fin de cette thèse on a mis quelques recommandations peuvent être le noyau pour mettre une vrai politique de gestion.
- Les différentes étapes à suivre pour mettre en place une réparation adéquate, traduisant dans un organigramme.

Donc il est devenu urgent d'envisager à court terme une politique national d'entretien avec planification de budget substantiel pour préserver ce patrimoine. Les cas des ouvrages dégrader ou réparer peuvent constituer une orientation pour mieux concevoir la construction de nos ouvrages d'art en tenant compte toutes les éventualités.

Compte tenu du manque d'expérience qu'on a et le temps limité de cette recherche, des insuffisances et des lacunes de traitement du problème peuvent être décelés, car l'étude en question s'appuie essentiellement sur des statistiques et des observations visuelles, peut passer à côté des informations capitales concernant le sujet que ce soit au point de vue évaluation des états des ouvrages existants ou les données recueillies auprès du ministère des travaux publics(M.T.P.) demeure la seule source fiable.

Les perspectives à apporte à ce travail peuvent s'articuler autour des axes suivants :

- Des études sur les matériaux et les techniques de réparation du point du vue faisabilité et durabilité.
- Proposer des systèmes de gestion des ouvrages d'art dans les quelle on peut intégrer les différents types d'enjeux : humains, économiques, environnementaux, financiers, sociaux et politiques, etc.
- étudier profondément la problématique de la durabilité des ouvrages d'art en Algérie, d'un manieur permettant l'élaboration des facteurs influant cette durabilité a traverses différentes régions.
- Choisir quelques ouvrages précis, pour suivre l'évolution des phénomènes de dégradation et confirmer ou infirmer les constats sur la dégradation.

Bibliographie

- [1] Anne BERNARD-GÉLY et Jean-Armand CALGARO, « conception des ponts », document Technique de l'ingénieur, traité de construction. Doc.C4500.
- [2] Le projet européen COMBRI “competitive steel and composite bridges by improved steel plated structure”.
- [3] Jean-Pierre DUCOUT, « pont métallique (conception générale) », document Technique de l'ingénieur, traité de construction. Doc .C2675.
- [4] jean PERCHAT et jean ROUX, Pratique du BAEL 91, Eyrolles, 2003
- [5] Cours Béton Armé et Précontraint, ENP 2007/2008, R.BOUTEMEUR
- [6] Magazine «Travaux », n° 793, janvier 2003
- [7] Yannick SIEFERT « l'entretoisement des ponts mixte » thèse de doctorat à l'Institut Nationale des Sciences Appliquées de Lyon.
- [8] FASCICULE N°61 titre V «Conception, calcul des ouvrage d'art»
- [9] Manfred A. Hirt et Rolf Bez, construction métallique (notions fondamentales et méthodes de dimensionnement) Volume 10.