

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE.**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR**

**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE.**



***Université : de Jijel***

***Faculté des sciences et technologies***

***Département de génie civil et hydraulique***

# **Pathologies et Réparation des Ponts**

**Pour les étudiants de Master 2  
Voies et ouvrage d'art (VOA)**

**Dr : FATMA SAIDAT**

**2020-2021**

## ***Avant-propos***

*Ce manuscrit est un développement de certaines connaissances sur les pathologies et les réparations des ponts. Il est destiné, particulièrement, aux étudiants de master deux en travaux publics spécialité voies et ouvrages d'art (VOA) comme un support pédagogique au cours « Pathologies et réhabilitation des ouvrages d'art ».*

*Les ponts perdent avec le temps leurs performances initiales .Cette perte est due au vieillissement et à la modification des conditions de service. Des désordres peuvent être apparaître au fil du temps de différentes natures (corrosion des armatures, dégradation du béton...), qui deviennent un enjeu important pour l'économie de tous les pays.*

*Les chapitres sont construits pour offrir aux étudiants les connaissances nécessaires à détecter les pathologies des ponts et leurs causes probables, l'utilisation de différentes méthodes d'auscultation et en dernier une présentation des bases de réparation et de renforcement de pont afin de prolonger sa durée de vie et assurer le service prévu.*

*La rédaction du polycopié respecte le programme du ministère Algérien de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique.*

|  |    |
|--|----|
| <b>Avant-propos .....</b>  | 2  |
| <b>Introduction générale .....</b>   | 6  |
| <b>Chapitre 1- Les désordres dans les ponts .....</b>                                    | 7  |
| I. Vocabulaire d'un pont .....   | 8  |
| II. Différents types des ponts.....  | 8  |
| III. La durabilité des ponts .....   | 9  |
| IV. Les actions et déformations appliquées aux ponts .....                               | 10 |
| IV.1    Les actions permanentes.....   | 10 |
| IV.2    Actions liées au comportement rhéologique des matériaux .....                    | 10 |
| IV.3    Les effets du trafic routier et ferroviaire.....                                 | 10 |
| IV.4    Les effets des actions naturelles .....  | 11 |
| IV.4.1    La température.....  | 11 |
| IV.4.2    Le vent .....  | 11 |
| IV.5    Actions accidentielles.....  | 11 |
| IV.5.1    L'eau .....  | 11 |
| IV.5.2    Séisme.....  | 12 |
| IV.5.3    Navires et bateaux.....  | 13 |
| IV.5.4    Les véhicules.....   | 13 |
| V. Dégradation des matériaux .....   | 14 |
| V.1    Les altérations du béton.....   | 14 |
| V.1.1    Effet du gaz carbonique (carbonatation) .....                                   | 14 |
| V.1.2    Effet des ions sulfates.....  | 15 |
| V.1.3    Effet des ions sulfures .....   | 16 |
| V.1.4    Effet des chlorures.....  | 16 |
| V.1.5    Effet de L'alcali-réaction.....   | 17 |
| V.1.6    Le gel-dégel.....   | 17 |
| V.1.7    Pathologies d'origine physique .....  | 18 |
| V.2    La corrosion de l'acier .....   | 18 |
| V.2.1    Corrosion atmosphérique :.....  | 19 |
| V.2.2    Corrosion des armatures dans les structures en béton armé et précontraint. .... | 19 |
| V.2.3    Autres formes de corrosion.....   | 20 |
| <b>Chapitre 2 - Pathologies des différents types des ponts.....</b>                      | 21 |
| I. Ponts en maçonnerie.....  | 22 |
| I.1    Les manifestations apparentes .....   | 22 |
| I.1.1    Les anomalies géométriques.....   | 22 |
| I.1.2    Les ruptures.....   | 23 |
| I.1.3    Défauts de parement.....  | 23 |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| I.2     | Les origines des désordres .....                         | 23 |
| I.2.1   | La nature des matériaux.....                             | 23 |
| I.2.2   | La construction .....                                    | 24 |
| I.2.3   | La vie de l'ouvrage .....                                | 24 |
| I.2.4   | L'environnement .....                                    | 24 |
| II.     | Ponts métalliques .....                                  | 24 |
| II.1    | Pathologie des ponts métalliques .....                   | 25 |
| II.1.1  | Désordres dus à la corrosion .....                       | 25 |
| II.1.2  | Désordres dus à la fatigue .....                         | 26 |
| III.    | Ponts en béton.....                                      | 27 |
| III.1   | Pathologie des ponts en béton armé ou précontraint.....  | 27 |
| III.1.1 | Les erreurs liées aux modèles .....                      | 27 |
| III.1.2 | Les erreurs d'exécution .....                            | 27 |
| IV.     | Pathologie des fondations .....                          | 29 |
| IV.1    | Causes des pathologies .....                             | 29 |
| IV.1.1  | Défaut de reconnaissance incomplète de sol .....         | 29 |
| IV.1.2  | Défaut de conception de l'ouvrage .....                  | 29 |
| IV.1.3  | Défauts à l'exécution des travaux .....                  | 30 |
| IV.1.4  | Affouillements .....                                     | 31 |
| a-      | Affouillements généralisés .....                         | 31 |
| b-      | Affouillements locaux.....                               | 31 |
| IV.1.5  | Abrasions et érosion des matériaux .....                 | 32 |
| IV.1.6  | Altération des mortiers et bétons .....                  | 32 |
|         | <b>Chapitre 3 : L'auscultation des ponts .....</b>       | 33 |
| I.      | Auscultations non destructives .....                     | 34 |
| II.     | Les matériaux.....                                       | 34 |
| II.1    | Les études sur prélèvement .....                         | 34 |
| II.1.1  | Caractéristique des essais sur prélèvement.....          | 34 |
| II.1.2  | Essais mécaniques .....                                  | 35 |
| II.1.3  | Essais physiques .....                                   | 35 |
| II.1.4  | Essais chimiques .....                                   | 35 |
| II.2    | Étude du matériau en place .....                         | 36 |
| II.2.1  | Le métal et les câbles de ponts suspendus .....          | 36 |
| II.2.2  | Auscultation des bétons .....                            | 36 |
| III.    | Le fonctionnement .....                                  | 41 |
| III.1   | Mesure des déformations générales et des mouvements..... | 41 |
| III.2   | Mesure des déformations sous chargement.....             | 41 |
| III.2.1 | Mesure des flèches.....                                  | 42 |

|  |  |           |
|--|--|-----------|
| III.2.2  | Mesure des rotations .....   | 42        |
| III.2.3  | Mesures des déplacements sous actions dynamiques .....                             | 43        |
| III.2.4  | Mesure des forces sur ouvrage .....  | 44        |
| III.2.5  | Étude géométrique des fissures dans les ponts en béton et béton précontraint ..... | 49        |
| <b>Chapitre 4 : Les bases de réparation ou de renforcement des ponts</b> | .....  | <b>51</b> |
| I.   | Evaluation de l'ouvrage .....  | 52        |
| I.1  | Diagnostic préliminaire.....   | 52        |
| I.2  | Le recalcul de l'ouvrage.....  | 52        |
| II.  | Préparation du recalcul .....  | 53        |
| II.1   | Analyse structurale.....   | 53        |
| II.2   | Géométrie effective de la structure .....  | 53        |
| II.3   | Affaiblissement des matériaux.....   | 54        |
| II.4   | Évaluation de l'effort de précontrainte.....                                       | 54        |
| III.   | Le contexte du recalcul des ouvrages.....  | 55        |
| III.1  | La référence aux codes et normes de calcul .....                                   | 55        |
| III.2  | Cas des ponts en béton et béton précontraint .....                                 | 56        |
| III.3  | Cas des ponts métalliques ou en ossature mixte .....                               | 57        |
| IV.  | Conduite du recalcul d'un pont en état pathologique .....                          | 57        |
| IV.1   | Évaluation de l'état de l'ouvrage « à vide » .....                                 | 57        |
| IV.2   | Calcul de l'ouvrage sous charges d'exploitation .....                              | 58        |
| V.   | Chronologie de la réparation et de renforcement .....                              | 59        |
| VI.  | Produits de réparation et renforcement .....                                       | 59        |
| VII.   | Quelques réparation et renforcement .....  | 60        |
|  | <b>Conclusion générale .....</b>   | <b>62</b> |
|  | <b>Bibliographie.....</b>  | <b>63</b> |

## ***Introduction générale***

La dégradation des ponts, anciens et récents, est inévitable et inquiète les gestionnaires à tous les niveaux. Elle inquiète aussi les ingénieurs des bureaux d'études et des laboratoires en charge des auscultations sur les ouvrages existants, ainsi que les ingénieurs des entreprises de réparation et renforcement. L'objectif de ce travail est de donner les éléments de base à l'ingénieur qui doit entourer les différents mécanismes de dégradation, expertiser l'état d'un ouvrage existant pour déterminer et préciser les méthodes de réparation et de renforcement en mettant en œuvre des actions correctives tout en gérant la sécurité d'utilisation, afin de définir une politique de gestion et de maintenance et amener une amélioration à la conception et l'exécution des ouvrages futurs.

Ce travail comporte des connaissances pour pouvoir aborder l'évaluation fiabiliste des ponts; après une présentation de la problématique de la maintenance, elle aborde les pathologies du matériau béton, la pathologie et la réparation des fondations, des ponts en béton armé, en béton précontraint, en métal et en maçonnerie, la sécurité et l'évaluation structurale, les méthodes d'auscultation structurelle, et se termine par une réparation et renforcement des ouvrages d'art.

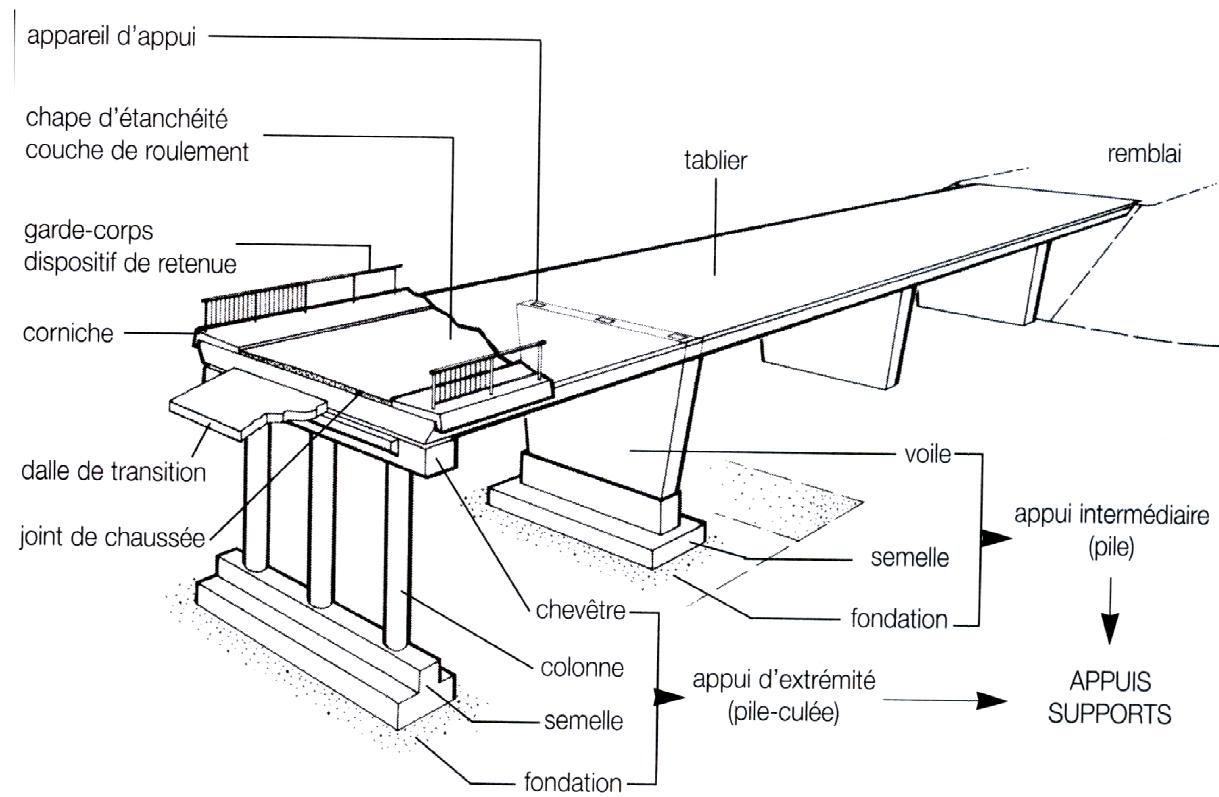
## **Chapitre 1- Les désordres dans les ponts**

*D'une façon générale, un pont permet à une voie de circulation de franchir un obstacle naturel ou une autre voie de circulation. Il existe de différents types du pont comme: pont-route, pont-rail, pont-canal. Tout ouvrage de passage supérieur construit *in situ*, ce qui supprime les buses totalement ou partiellement préfabriquées.*

*Les ouvrages d'art vieillissent naturellement par différents phénomènes comme la corrosion, la carbonatation, l'alcali-réaction et la fatigue. Malgré leur perfection initiale (comportement des matériaux, des structures, les méthodes de calcul les plus affinées). Le vieillissement est étudié afin de valoriser la réparation et le renforcement des ouvrages d'art comme celui de la conception des ouvrages neufs.*

## I. Vocabulaire d'un pont

Chaque pont est constitué de plusieurs éléments variant selon le type, la grandeur et la situation de pont, ainsi que chaque élément est désigné par un terme propre et bien précis qui permet de le distinguer. L'ensemble de cette terminologie constitue le vocabulaire de pont. Le vocabulaire unifié présente une étape essentielle dans la programmation de la surveillance et le suivi Figure I.1.



**Figure I.1: schéma présente les vocabulaires d'un pont**

## II. Différents types des ponts

- Les ponts en maçonnerie : Ex pont de Gard, construit au 1<sup>er</sup> siècle de l'ère chrétienne.
- Les ponts métalliques : convenablement entretenus, sont aussi d'une bonne longévité.
- Les ponts en béton armé : la corrosion s'avère le plus grand souci des armatures.
- Les ponts en béton précontraint : l'acier pour précontrainte est très sensible à la corrosion.
- Les ponts en bois : le bois est utilisé dès le néolithique pour le franchissement des rivières. On estime que des grumes posées à plat et recouvertes d'un platelage il y a 17 000 ans déjà constituent les premiers ponts en bois, avec toutefois des portées limitées à une dizaine de mètres. De façon générale, durant l'Antiquité, le progrès technique de la charpente en bois est à mettre au crédit de la construction navale, notamment chez les Égyptiens, les Phéniciens, les Grecs et les Celtes.

### III. La durabilité des ponts

La préoccupation exclusive des ingénieurs est la tenue des ponts aux

- efforts de diverses origines qu'ils sont amenés à subir influences d'un environnement agressif,

Depuis quelques années, des travaux importants ont permis de mieux approcher et comprendre les notions de durabilité.

Pour garantir une durabilité correcte de la structure, il faut prendre en compte les facteurs suivants:

- l'utilisation prévue de l'ouvrage et son utilisation future différente;
- les critères de performance requis;
- les influences prévues de l'environnement, c'est-à-dire l'ensemble des actions chimiques et physiques auxquelles est soumis la structure globale ainsi que ses éléments constitutifs, et dont leurs effets ne sont pas pris en compte dans les hypothèses de charge estimées lors du calcul structural;
- la performance, la composition et les caractéristiques des matériaux;
- le choix du système structural;
- les dispositions constructives et la forme des éléments structuraux
- la qualité de la mise en œuvre et le niveau de contrôle;
- les mesures de protection spécifiques;
- la maintenance au cours de la durée de vie prévue de l'ouvrage.

Les effets de charges sur un pont cessent d'être complètement réversibles au-delà d'un certain seuil de façon, fissuration ou fatigue. Le pont perd graduellement de sa valeur, qui possède deux états limites «états limites de service » et «états limites ultimes ». L'apparition de désordres est le signe efficace de la non vérification des états limites de service.

L'évaluation d'un pont existant consiste à en évaluer l'état physique et mécanique. Parmi les composantes de l'évaluation est d'une part l'estimation de la fiabilité structurale de l'ouvrage considéré et d'autre part, les durées de vie prennent une certaine importance.

Les méthodes de détermination de la fiabilité structurale d'un pont existant sont très spacieuses et donnent lieu à de plusieurs recherches théoriques. Les développements qui suivent se limitent à décrire les bases d'une méthodologie d'évaluation des ouvrages existants.

Les pathologies se présentent visiblement sous forme de déformations ou de fissurations inhabituelles.

Certaines fissurations affectant des ponts en béton précontraint (ouverture de joints entre voussoirs) ou métalliques (fissures dues à la fatigue) peuvent sembler bénignes à l'œil nu : il faut procéder à des mesures fines de leur mouvement pour mettre en évidence un défaut de résistance de la structure qui peut être sérieux.

Le diagnostic de l'état d'un pont ce n'est pas une chose facile et il ne peut être effectué que par des ingénieurs spécialistes et expérimentés connaissant bien en particulier, les multiples causes de dégradation des ouvrages.

## IV. Les actions et déformations appliquées aux ponts

### IV.1 Les actions permanentes

L'évaluation des actions dues à des charges aussi banales que les charges pont (propre) et des sollicitations qu'elles induisent peut être entachée d'erreurs ou d'imprécision parfois inacceptable.

- La masse volumique du béton, fixée conventionnellement à  $2,5 \text{ t/m}^3$  par la plupart des codes de calcul peut être sensiblement plus élevée si on emploie des granulats « lourd » (ex : basalte ou autre granulat d'origine volcanique).
- Erreurs de métrés (oublie portant sur le poids de certaines pièces (bossage d'ancrage, etc).
- Sous-estimation du poids des équipements du pont et des ouvrages.
- Pendant la vie de l'ouvrage, évolution du poids de certains équipements (rechargement de couche de roulement ou de ballaste.....).

### IV.2 Actions liées au comportement rhéologique des matériaux

L'évolution dans le temps du comportement des matériaux utilisés dans la réalisation des ponts sous l'effet des contraintes et des déformations, provoque l'apparition de sollicitations dans les ponts en béton (sous forme des contraintes additionnelles)

La présence des désordres dans un pont en béton précontraint construit par phases est due à l'insuffisance d'estimation des phénomènes liés à l'évaluation du comportement des matériaux dans le temps. le fluage, la relaxation des aciers et le phénomène thermique ont été pris en considération par les règlements de calcul.

### IV.3 Les effets du trafic routier et ferroviaire

La nécessité d'assurer aux ponts le niveau de sécurité approprié exige une évolution de la réglementation (véhicules plus lourds, trafic plus dense, circulation des trains).

Le trafic des véhicules sur les ponts a des effets multiples :

- effets pondéraux (les embouteillages, grèves ...)
- effets dynamiques (utilisation des engins pendant la construction...)
- effets de répétition (fatigue...).

Les effets du trafic des trains sur les ponts ferroviaires sont :

- effets dynamiques
  - 1- souffle causé par les TGV sur les équipements placés en bordure de pont,
  - 2- force de freinage, redémarrage et d'accélération importante,
  - 3- situation accidentelle de déraillement
- chocs provoqué lors du passage des trains sur des rails interrompus, qui entraîne une déconsolidation des assemblages rivés ou boulonnés des ponts métalliques et soudés;

## IV.4 Les effets des actions naturelles

### IV.4.1 La température

Deux types d'actions de la température selon qu'elle affecte directement les propriétés des matériaux ou le comportement mécanique des ouvrages.

#### IV.4.1.1 Sur les matériaux

La variation de la température engendre :

- une fissuration du béton du au retrait de dessiccation.
- Une expansion de béton due au risque de gel
- Une variation des caractéristiques de ductilité d'un acier en traction.
- Une tendance fragile de l'acier.Une sensibilité de la vitesse des réactions chimiques.

#### IV.4.1.2 Sur les ouvrages :

La température a sur les ouvrages hyperstatiques entraîne:

- un changement de l'intensité des efforts sous-estimés ou négligés.
- une répartition non uniforme de température dans un tablier de pont dépend de l'ensoleillement ou de la couleur et l'épaisseur de son revêtement. Ces répartitions sont dues :
  - ✓ à l'ensoleillement,
  - ✓ au vent,
  - ✓ aux différences entre les conductivités thermiques et les capacités et de l'acier et du béton (ponts mixtes). .
- une répartition non uniforme de températures dans le sens transversal selon l'exposition de l'ouvrage.
- Une détérioration de la qualité de connexion des matériaux (différence entre les coefficients de dilatation et de contraction dans les ponts mixtes).

### IV.4.2 Le vent

L'action du vent sur les structures se présente dans :

- L'effet de dessiccation du béton frais en surface,
- La pression dynamique appliquée aux ouvrages et à leur mise en mouvement éventuelle, provoque des phénomènes de flottement ou de galop dans les ponts à câbles,
- l'écoulement tourbillonnaire produit des efforts alternés, qui peuvent engendrer des phénomènes de fatigue dans les câbles.

## IV.5 Actions accidentielles

### IV.5.1 L'eau

La présence d'eau autour de l'ouvrage peut engendrer des actions mécaniques sur les structures et produire deux phénomènes connus : l'affouillement Figure I.2 et l'abrasion.

- la principale cause de destruction des ponts dans le passé : est les affouillements des rivières autour des piles de pont.
- Actuellement, le problème d'affouillements ne se pose pas pour les ouvrages neufs correctement fondés grâce aux techniques d'exécution de fondations profondes bien maîtrisées par les entreprises spécialisées. ne sont plus à craindre pour les

Les affouillements consistent à un creusement du lit de la rivière, il existe deux types d'affouillement général et local. La profondeur totale d'affouillement est la somme de la profondeur des deux types.

Horseshoe and Wake Vortices around a Cylindrical Element

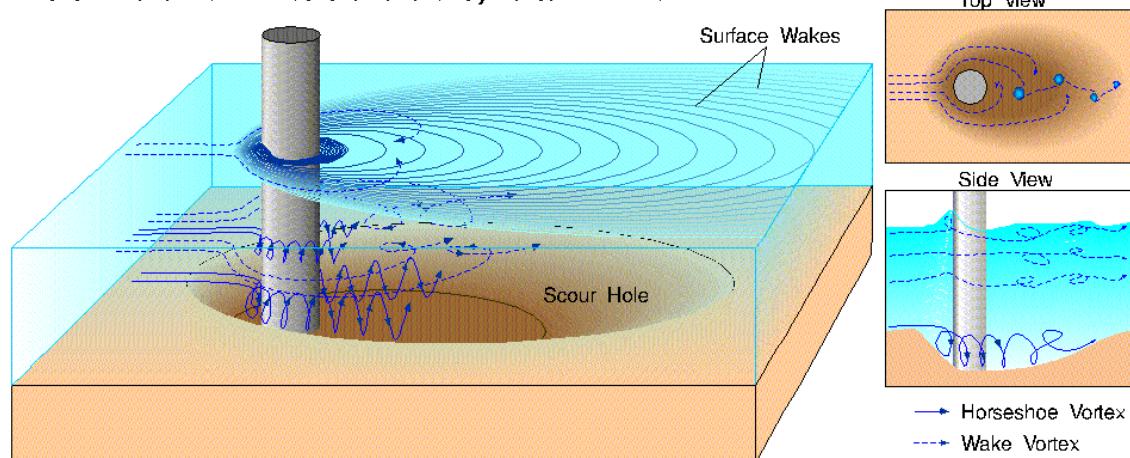


Figure I.2: Phénomène d'affouillement au pied d'une pile de pont

#### IV.5.2 Séisme

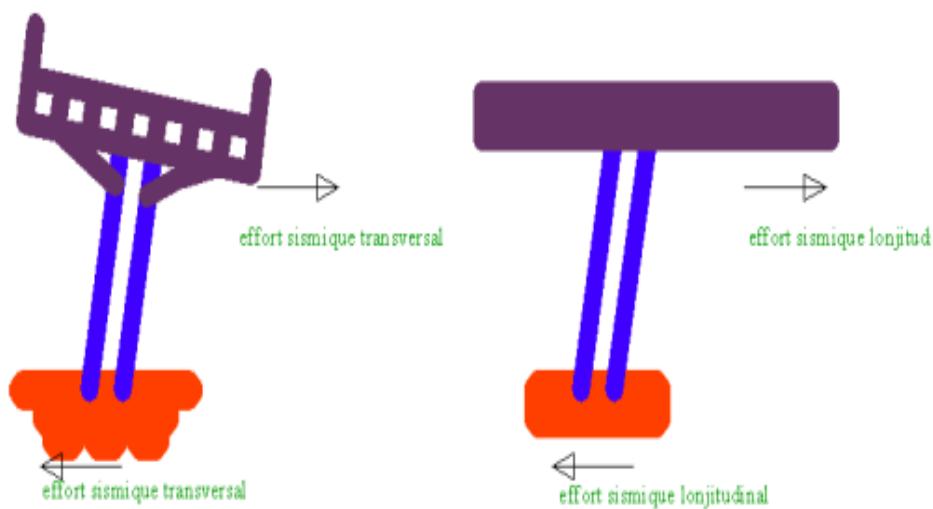
Un séisme est un déplacement imposé qui peut atteindre les diverses parties d'un pont, plus ces dernières sont lourdes et rigides plus l'intensité de séisme et plus élevée. Les conséquences d'un séisme peuvent devenir dramatiques dès que l'accélération au sol dépasse  $0,3g$  Figure I.3.

Le séisme est la source de désordres importants au niveau de :

- des fondations (effet de vibration modifiant la consistance du sol d'assise),
- liaisons piles / poutres (effet de cisaillement dû à la secousse),
- fixations, ancrages et assemblages qui auront eu à souffrir de soulèvement, torsion ou arrachage des pièces qu'ils maintenaient.

En revanche, les effondrements les plus spectaculaires ont été observés dans le cas de structures :

- peu hyperstatiques comportant des éléments de ductilité insuffisante, liée à une insuffisance d'armatures transversales
- un excès d'armature longitudinale, qui est mal maintenue dans les zones sollicitées au-delà du domaine élastique.



*Figure I.3: Sollicitations sismiques agissant sur un pont*

#### **IV.5.3 Navires et bateaux**

Un pont peut être soumis aux chocs de navires (en site maritime) ou de bateaux (sur les voies navigables) contre des piles de ponts. Dans le monde, ces chocs peuvent avoir des conséquences catastrophiques (pertes de vies humaines, dégâts importants de l'ordre de 1,5 pont/an affectant les ouvrages).

#### **IV.5.4 Les véhicules**

Les chocs de véhicules sur les piles de ponts sont des accidents les plus fréquents Figure I.4. Les chocs sur tabliers sont dangereux surtout dans les cas des passerelles (sa légèreté) et des tabliers à poutrelles précontraintes par fils adhérents.



*Figure I.4 : Choc sur une glissière de sécurité et une pile de pont*

## V. Dégradation des matériaux

L'environnement agressif affecte les ponts en béton, qui peut entraîner de nombreuses pathologies durant la vie du béton. La cinétique de pénétration de l'eau et des gaz est fonction de la porosité et la perméabilité du béton. Cette cinétique a un effet sur l'intensité des agressions physiques, physico-chimique et chimiques.

### V.1 Les altérations du béton

La durabilité du béton est toujours en question vue que le béton subit de nombreuses agressions tableau I.1.

Les agents agressifs extérieurs ( $\text{CO}_2$ , sulfates, chlorures) se trouvent dans le sol, l'eau et l'air, ils réagissent avec les hydrates du ciment en formant des composés expansifs ou solubles.

Les principaux modes de dégradation du béton sont : la carbonatation, l'action des sulfates et des chlorures, l'alcali-réaction et le gel dégel...

*Tableau I. 1: Les différentes causes de dégradation du béton*

| Dégâts accidentels         | Erosion                           | Corrosion des armatures                |
|----------------------------|-----------------------------------|--|
| <b>Actions chimiques</b>   |                                   |  |
| Attaque acide              | Abrasion                          |  |
| Attaque de l'eau agressive | Cavitation                        |  |
| Action alcali-carbonate    | <b>Changements de température</b> |  |
| Action alcali-silice       | A l'intérieur et à l'extérieur    |  |
| Attaque chimique diverse   | <b>Retrait</b>                    |  |
| Attaque de sulfate         | Phase plastique/Séchage           |  |
|                            | <b>Gel</b>                        |  |
|                            |                                   | <b>Erreurs de conception</b>           |
|                            |                                   | Détails de conception inadéquats       |
|                            |                                   | Conception structurale insatisfaisante |
|                            |                                   | <b>Distorsion ou mouvement</b>         |
|                            |                                   | <b>Vieillissement</b>                  |
|                            |                                   | <b>Erreurs de construction</b>         |

#### V.1.1 Effet du gaz carbonique (carbonatation)

Le béton est soumis à l'action du dioxyde de carbone en contact avec l'air ambiant. Ce dernier se dissout aisément dans l'eau pour produire un acide faible  $\text{H}_2\text{CO}_3$ . Il réagit alors avec des hydrates du ciment et cette réaction appelée la carbonatation Figure I.5. La carbonatation se produit quand l'acide  $\text{H}_2\text{CO}_3$  pénètre dans les pores du béton, autrement dit si ces pores ne sont pas totalement obturés. Lorsque le béton est carbonaté les armatures en acier commencent à s'oxyder, la carbonatation attaque donc la couche passive qui peut amorcer le processus de corrosion. L'éclatement du béton d'enrobage est du à la formation de rouille qui est accompagnée d'une augmentation de volume.



Figure I .5: phénomène de la carbonatation

### V.1.2 Effet des ions sulfates

Les ions sulfates peuvent être présents dans les eaux souterraines sulfatées, l'eau de mer, certains remblais (schistes houillers), certaines pluies acides déplacent le calcium de son hydroxyde pour former de l'anhydrite, le sulfate de calcium anhydre  $\text{CaSO}_4$  produit relativement soluble qui peut soit conduire à un lessivage soit s'hydrater avec un léger gonflement en gypse moins soluble. L'action la plus nocive se produit lorsque ce gypse secondaire réagit à son tour avec les aluminaux de calcium, formant de l'Ettringite (sulfate hydraté de calcium et d'aluminium) dont la cristallisation sous forme d'aiguilles développe des pressions considérables pouvant conduire à la ruine du béton.



Figure I.6 : Pathologie due à l'attaque des sulfates

### V.1.3 Effet des ions sulfures

Le sulfure d'hydrogène a une action nocive sur le béton qu'en présence de bactéries aérobies, qui catalyse l'oxydation des sulfures en soufre puis en sulfates, en produisant de l'acide sulfurique. L'acide sulfurique par une réaction acide-base entraîne un lessivage de l'hydroxyde de calcium et une expansion sous forme d'Ettringite.

### V.1.4 Effet des chlorures

Les ions chlore détruit la couche passive, parmi les sources de chlorures sont les sels antiverglas et l'eau de mer.

Lorsque la migration des chlorures par diffusion leur réaction avec les aluminaux de calcium forme le chloroaluminate (produit stable ne provoque pas la dégradation du béton). Dans un tablier de pont, les ions chlorures non fixés attaquent les armatures.

Les armatures et les bétons situés dans la zone de marnage sont les plus exposées à l'attaque du sulfate et du chlorure de magnésium dans l'eau de mer. Le sulfate de magnésium, sel acide, réagit avec l'hydroxyde de calcium pour former du sulfate de calcium et de l'hydroxyde de magnésium. Le sulfate de calcium conduit à la précipitation d'Ettringite secondaire. Le chloroaluminate se transforme en Ettringite expansive en présence d'ions sulfates.



Figure I.7 : Piqûre causée par une attaque de chlorure

### V.1.5 Effet de L'alcali-réaction

Les mécanismes des alcali-réactions est réaction entre les alcalins du liquide interstitielle et les particules réactives contenues dans les granulats (silice amorphe ou cryptocrystalline).

Il existe trois types de réactions, connues les réactions alcali-silice, alcali-silicate et alcali-carbonate. La réaction alcali-silice est la plus fréquente oùles alcalins proviennent essentiellement du ciment migrés dans la solution interstitielle entrent en contact avec les particules de silice réactive des granulats pour produire un gel de silicate alcalin. Ce dernier en combinaison avec le calcium ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) issue de l'hydratation du ciment forme un gel silico-calco-alcalin gonflant en absorption d'une grande quantité d'eau. Ce gel provoque une expansion du béton et une tension dans les armatures.

Les fissures produisent par l'alcali-réaction sont de l'ordre de :

- Faïençage avec des mailles de petite dimension (20 à 50 mm) et une profondeur de fissure assez faible (quelques centimètres),
- Réseau de fissures de dimension plus grande (30 à 40 cm) et de profondeur plus importante (supérieure à 10 cm).



*Figure I.8 : Pathologie due à l'alcali réaction*

### V.1.6 Le gel-dégel

Les cycles de gel - dégel peuvent être l'origine de certaines dégradations du béton. Car, la baisse de la température au-dessous du degré de congélation, présente une transformation en glace de l'eau contenue dans les granulats ou dans les capillaires de la pâte de ciment, cette eau gelée peut entraîner une augmentation du volume du béton qui favorise une expansion engendrant des pressions internes importantes dépassant la capacité de résistance à la traction du béton. Un réseau dense de microfissures peut apparaître à la surface du béton du à la répétition fréquente d'effet gel - dégel. Lequel réseau évolue plus ou moins rapidement vers un feuillettage ou un écaillement de la surface. Les cycles de gel et de

dégel rapides et fréquents engendrent le désordre du béton. Les parois de béton horizontales présentent une dégradation par gel-dégel plus que les parois verticales.



**Figure I.9. : dégradation due au gel-dégel**



**Figure I.10 : Microfissuration du béton due au mécanisme de gel interne**

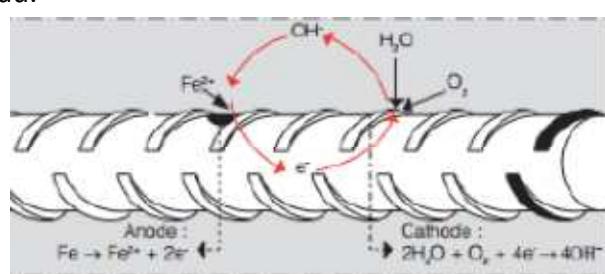
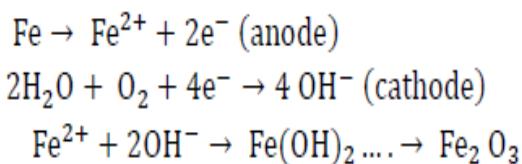
### V.1.7 Pathologies d'origine physique

L'ensemble des causes physiques qui peuvent provoquer l'éclatement du béton sont :

- le retrait.
- le ressage.
- L'érosion.
- L'exposition répétée à des cycles gel-dégel.
- L'usure.
- les phénomènes thermiques, y compris les incendies.

### V.2 La corrosion de l'acier

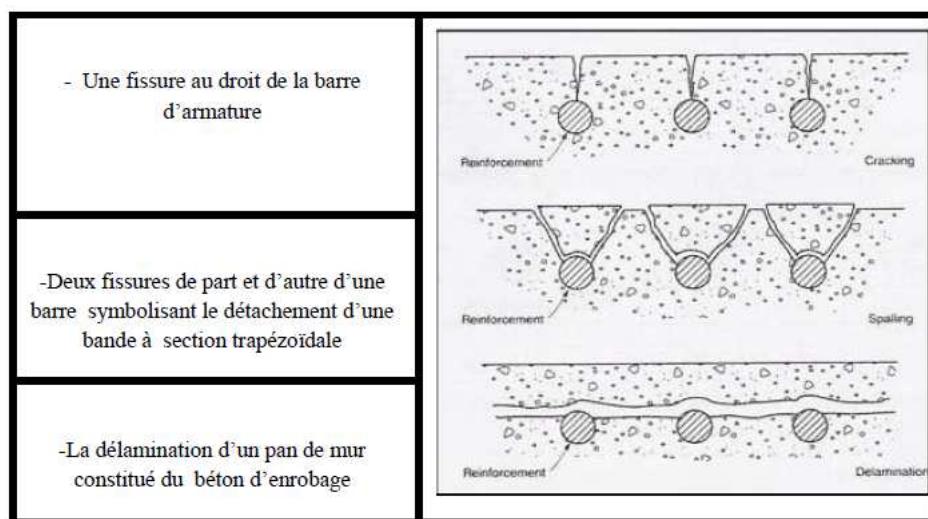
La corrosion est un processus chimique qui présente une rouille formé lors de la réaction des atomes de fer et d'oxygène en présence d'eau.



**Figure I.11 : Processus général de corrosion**

Le phénomène de la corrosion présente 80% des dégradations du béton, qu'elle est la pathologie la plus fréquente dans les ouvrages de génie civil.

Les facteurs de corrosion sont très nombreux, ils dépendent du métal en facteurs métallurgiques (composition, traitements thermiques, mécaniques et de surface) et en facteurs liés aux conditions d'utilisation (conception des pièces et des assemblages, sollicitations mécaniques, état de surface). Les facteurs de corrosion dépendent aussi du réactif (sa concentration, son pH, sa teneur en oxygène, la température, la pression, la présence d'impuretés ou d'inhibiteurs).



*Figure I.12 : Types de fissures développées lors de la corrosion des aciers d'armature*

### V.2.1 Corrosion atmosphérique :

Un acier ordinaire se corrode à l'air ambiant et un taux d'humidité relative, de l'ordre de 50 à 70 %. La présence de poussières, sulfate d'ammonium, gaz sulfureux acides et les chlorures hygroscopiques activent cette corrosion ainsi que la température qui joue un rôle déterminant.

### V.2.2 Corrosion des armatures dans les structures en béton armé et précontraint.

La corrosion des armatures du béton est le passage de l'acier à l'état de rouille qui entraîne un éclatement du béton. Le béton forme une couche de passivation pour protéger les armateurs contre la corrosion.

Les alternances régulières de sécheresse et d'humidité rendent le taux de corrosion plus élevé.

La corrosion de l'acier se développe lors du processus de carbonatation ou lorsque les ions chlorures rentrent en contact de l'acier

Pour le béton précontraint, la corrosion des armatures est pareille comme le béton armé, plus particulièrement quand l'enrobage des armatures et la qualité de leur injection sont insuffisants. D'autre type de corrosion peut toucher les câbles de précontrainte comme la corrosion fissurante sous contrainte, la fragilisation par l'hydrogène atomique et le phénomène de « fretting-fatigue ».

### V.2.3 Autres formes de corrosion

La corrosion des armatures se fait par :

- ✓ l'influence de courants vagabonds sur des pièces en acier situées à proximité de chemins de fer ou de tramways alimentés en courant continu;
- ✓ la présence des bactéries qui produisent de l'acide sulfurique ou du sulfure d'hydrogène.

## ***Chapitre 2 - Pathologies des différents types des ponts***

*Des désordres des ponts peuvent être présents, dès la mise en service, où les ponts sont soumis à de multiples sollicitations et agressions. La présence de désordres est importante lorsque le pont est plus ancien. Des dégradations rapides peuvent être présentes quand les sollicitations, comme un trafic au-delà des seuils pris en compte lors de la conception se répètent.*

## I. Ponts en maçonnerie

Les ponts en maçonnerie sont les ponts les plus anciens. Ils sont, comme tous les ponts, soumis à des agressions multiples susceptibles de mettre en péril leur stabilité ou leur durabilité. Des visites ou investigations sont réalisées sur les ponts en maçonnerie pour recenser l'ensemble des pathologies, puis d'en déterminer les causes possibles Figure II.1.

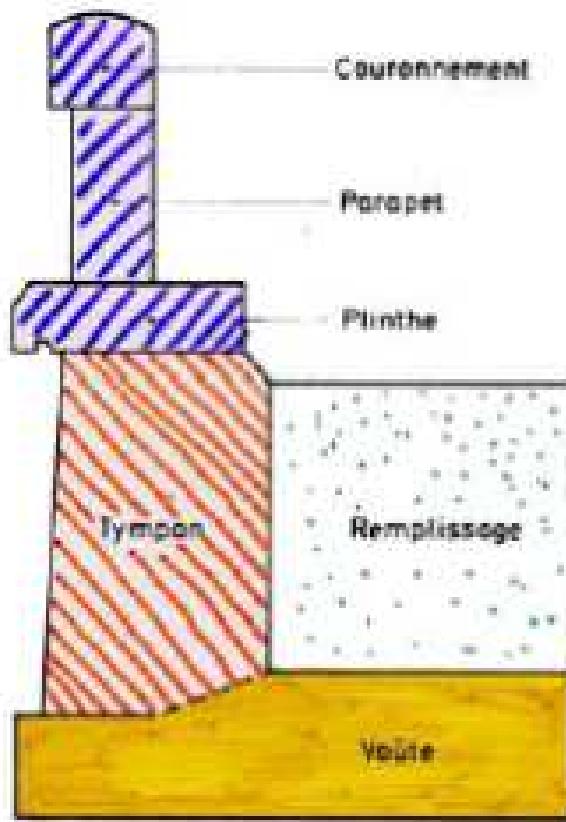


Figure II.1 : schéma d'un pont en maçonnerie

### I.1 Les manifestations apparentes

#### I.1.1 *Les anomalies géométriques*

Il existe plusieurs types d'anomalies géométriques:

- Les défauts d'alignement.
- Les affaissements.
- Les défauts de verticalité.
- Les bombements.
- Les déversements.

En général, ces désordres ne datent pas de la réalisation du pont ; ils entraînent souvent de désordres plus graves. Ils doivent être suivis attentivement, pour préciser leur caractère évolutif ou non. Les défauts de verticalité, les bombements et les déversements peuvent être trouvés plus particulièrement dans les ouvrages de soutènement (tympans ou murs de soutènement).

### I.1.2 *Les ruptures*

Il s'agit d'un stade avancé du dysfonctionnement d'un pont. Dans les cas dangereux, elles peuvent amener à la ruine du pont.

Le décollement est la séparation entre deux parties de nature différente d'un ouvrage. Le décollement du bandeau par rapport à la voûte est l'exemple le plus courant.

Les fissures sont plus dangereuses qu'elles ont tendance à traverser les pierres ou les moellons.

Les fractures sont des fissures leur ouverture est importante.

Une dislocation ou désorganisation est un signe de dégradation des ponts en maçonnerie ; c'est souvent le résultat d'un choc extérieur.

L'effondrement partiel ou total de l'ouvrage présente le stade ultime des pathologies.

### I.1.3 *Défauts de parement*

Ces défauts de parement peuvent prendre des différentes formes :

- Absence de briques ou de pierres.
- Formation de calcite et efflorescences dues aux circulations d'eau au travers de la maçonnerie.
- Desquamation ou désorganisation superficielle (effet cyclique des agents atmosphériques ...).
- Apparition de tâches noirâtres.
- Envahissement par la végétation.
- Disjoints des joints et disparitions locales.

## I.2 Les origines des désordres

Les origines des désordres des ponts en maçonnerie sont recherchées selon une vision globale de l'état de l'ouvrage. Vouloir trouver une cause de chaque désordre est important mais ça reste imprudent et dangereux.

Afin de parvenir à une réparation efficace, des investigations doivent être menées jusqu'à leur terme ou jusqu'à la détermination des origines initiales des désordres constatés.

Toutes les causes possibles de désordres peuvent être classées en quatre catégories principales :

- La nature des matériaux ;
- La construction ;
- La vie de l'ouvrage ;
- L'environnement.

### I.2.1 *La nature des matériaux*

Les défauts propres des pierres d'un pont en maçonnerie, qui ne sont pas de meilleure qualité, sont l'une des principales sources des désordres d'un pont ou une partie du pont.

Les défauts propres des pierres comme l'inclusion, le feuilletage, les fissures d'origine et la porosité influent la durabilité de la maçonnerie comme ils modifient les caractéristiques mécaniques des pierres.

L'utilisation d'explosifs ou d'outils trop puissants lors d'extraction et d'équarrissage des pierres peut provoquer une micro fissuration des pierres et influe sur leurs caractéristiques finales.

### **I.2.2 La construction**

Les désordres dus à la construction des ponts en maçonnerie comme suivant :

- Les pierres se détériorent rapidement par insuffisance de résistance au fendage. Le type du soin apporté à la réalisation du mortier (excès d'eau, chaux grasses). La réalisation de joints trop minces. Des élargissements destinés à réduire le poids du matériau de remplissage.
- Les variations thermiques sur l'ouvrage, la présence et la percolation d'eau au travers de la maçonnerie.
- Des chapes d'étanchéité de très mauvaise qualité (carton bitumineux, chape en mortier).

### **I.2.3 La vie de l'ouvrage**

Des désordres dans les ponts en maçonnerie peuvent être dus à :

- L'augmentation de la charge permanente par reprofilage de la chaussée (les anciens ponts "en dos d'âne") ;
- L'augmentation des surcharges routières (vibration et effet dynamique);
- L'augmentation de la largeur roulable par suppression des trottoirs (poussée horizontale importante).
- élargir l'ouvrage sans une étude des conditions d'appuis des élargissements,
- des reports de charges néfastes pour la structure de l'ouvrage (élargissements par dalle générale en béton armé, des rejoindoiements abusifs),
- l'absence d'entretien (la croissance sur l'ouvrage d'une végétation),

### **I.2.4 L'environnement**

Le pont en maçonnerie peut être dégradé par :

- Les agents climatiques l'eau, le vent et la température l'érosion par le vent et l'éclatement par l'effet des cycles gel-dégel. les agents chimiques (sels de dé verglaçage, eaux polluées...).

## **II. Ponts métalliques**

Le rôle de résistance de l'ossature en acier d'un pont métallique permet de résister aux charges qui lui sont exercés.

Pour un pont métallique, l'acier utilisé est un acier isotrope, homogène, a des caractéristiques garanties et il a un bon comportement par rapport la théorie de l'élasticité. Il doit être ductile pour assurer la bonne répartition les charges dans les assemblages.

L'acier est soudable, est un matériau d'usage courant et il a des caractéristiques plus élevées pour un poids plus faible. Les principales causes des désordres sont :

- une mauvaise qualité des études,
- des erreurs de montage due à des instabilités provisoires, malfaçons et fausses manœuvres,
- des erreurs de fabrication,
- des défauts du matériau.

Le contrôle intervient dès le stade de la conception et des études du pont.

## II.1 Pathologie des ponts métalliques

### II.1.1 Désordres dus à la corrosion

La corrosion est la principale cause de dégradation des ponts métalliques. La corrosion est phénomène électrochimique où l'acier joue le rôle d'anode et il se transforme en oxyde de fer. Le problème d'entretien (stagnation des eaux de pluie ou de condensation, l'inaccessibilité de certaines parties de l'ouvrage, défaut de conception) peut favoriser le développement de la corrosion.

En règle générale, la stagnation des eaux et l'air humide accélèrent le phénomène de la corrosion par exemple pour les ponts rivés anciens à base de fer puddlé, l'eau de pluie joue le rôle d'électrolyte et l'acier écroui des rivets joue le rôle d'anode soluble d'où la formation de plans de corrosion transforme progressivement la tôle en «mille-feuilles». Dans les ouvrages avec des membrures se forme d'un U constituées des tôles assemblées par des cornières, la membrure supérieure est ouverte vers le bas pour et la membrure inférieure est ouverte vers le haut. La membrure inférieure est corrodée parce qu'il est transformé en «bac à fleurs» et accumule l'eau de pluie et de condensation, mais sur la membrure supérieure l'eau est évacuée.

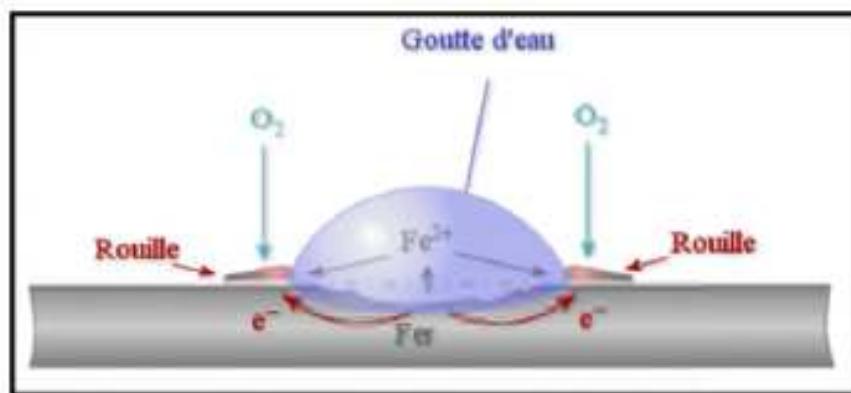
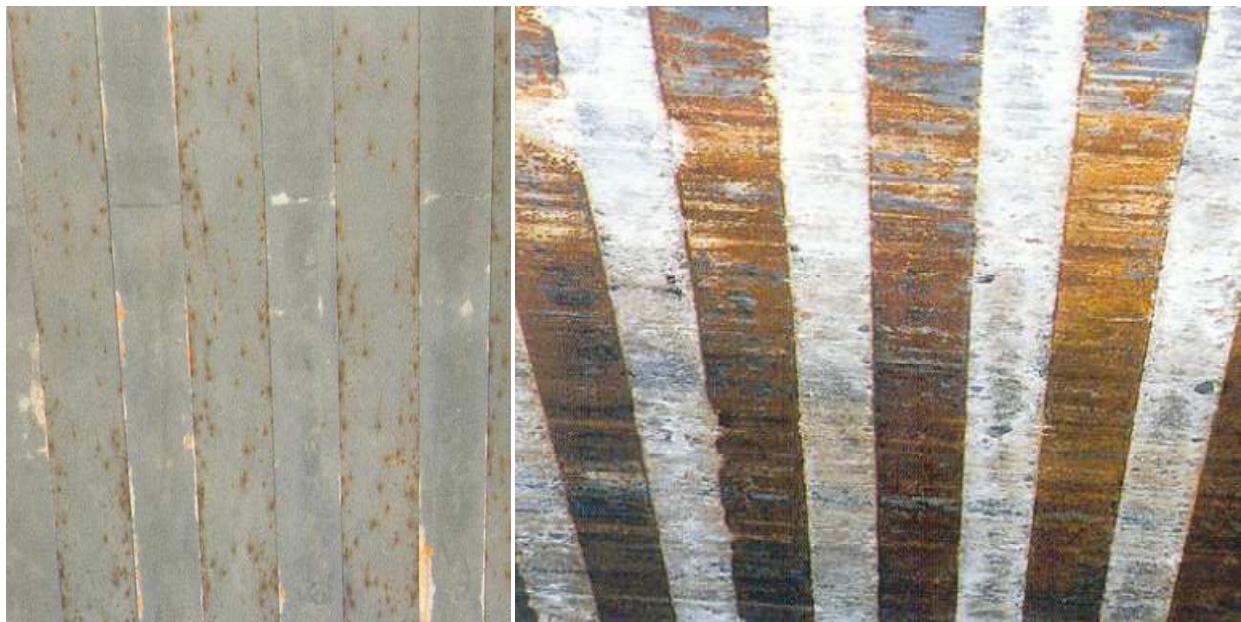


Figure II.2 : le processus de corrosion



**Figure II.3: piqûre de corrosion et corrosion généralisée des poutrelles métalliques enrobées**

### **II.1.2 Désordres dus à la fatigue**

Les ponts métalliques ont tendance de se dégrader en fatigue, cette fatigue est due aux intensités et fréquences élevées de contraintes variées et cycliques engendrées par les trafics routiers et ferroviaires.

La fatigue dans le cas des ponts routiers ne dépond ni des charges apportées par les essieux légers ni par les essieux très lourds, plutôt rares mais par les charges intermédiaires.

Pour les tabliers à dalle orthotrope, qui sont particulièrement exposés, le non respect des règles de la conception à la fatigue des assemblages soudés des cadres avec les raidisseurs transversaux des âmes des poutres principales engendre des fissures, particulièrement dans les endroits où la flexibilité de la couverture orthotrope subissait une discontinuité brutale sous l'effet des charges de trafic, d'où les chocs comme actions dynamiques augmentant des variations de contraintes locales.

Les endommagements par fatigue se traduit en générale par :

- une dégradation de l'adhérence entre le béton et les armatures entraîne une fissuration qui peut affecter la durée de vie de l'ouvrage,
- des déformations irréversibles sous l'effet des charges de service.Une dégradation principalement dans les zones d'assemblages rivés et soudés..

✓



Figure II.4: Fissure de fatigue

### III. Ponts en béton

Les phénomènes de vieillissement naturel touchent les matériaux béton et acier. Ils fonctionnent correctement dans un milieu stable, en revanche l'environnement agressif favorise la corrosion des armatures du béton armé, quand les enrobages ne sont pas respectés.

#### III.1 Pathologie des ponts en béton armé ou précontraint

##### III.1.1 Les erreurs liées aux modèles

Un pont (structure tridimensionnelle), il est transformé en modèles plus ou moins simplifiés pour l'étudier. Ce modèle utilisé pour étudier la résistance d'ensemble, il est formé par un réseau de barres reliées par des nœuds, chaque barre représente une poutre dont les caractéristiques géométriques et mécaniques sont évaluées en méthodes de Résistance des Matériaux. Mais la plus part du temps des modèles numériques complexes (modèles aux éléments finis) ont été sollicité pour analyser et étudier en détail certaines parties des ouvrages. Une erreur systématique est introduite lors de la présentation d'une structure réelle par un modèle, où les effets sont théoriquement couverts dans les codes de calcul aux états limites par un coefficient partiel approprié qui ne pouvait pas couvrir des erreurs résultantes de simplifications abusives ou de calculs erronés.

##### III.1.2 Les erreurs d'exécution

Les erreurs d'exécution sont dues généralement à une insuffisance des documents d'exécution, engendrant des improvisations, des déficiences dans l'organisation, le contrôle de la qualité ou encore au non-respect de certaines règles de l'art. Les erreurs les plus fréquentes sont mentionnées ci-dessous..

- des plans de ferraillage incomplets ou illisibles.

- la mise en œuvre des armatures passives présente fréquemment des défauts (. la position et à l'arrimage des armatures à l'intérieur des coffrages). Non respect des enrobages à cause de déplacement des armatures pendant le bétonnage.
- Les armatures se corrodent sous l'effet de carbonatation du béton en engendrant l'éclatement du béton d'enrobage.
- L'éloignement d'acières de frette de la surface directement sollicitée (difficulté d'assurer leur fonction).
- la négligence de quelques documents d'exécution en fournissant des indications imprécises. fixation des points de passage des câbles de précontrainte des plans de câblage traditionnel (des pertes par frottement élevés, des éclatements par poussée au vide, des enrobages aléatoires). La construction par phases (pont construit en encorbellement) ne prends pas en compte les déformations imposées au moment des clavages dans les notes de calcul qui peut engendrer des fissurations préjudiciables.
- mauvaise qualité de mise en œuvre des différents matériaux (irrégularité de fabrication du béton, délais de transport aléatoires, reprises de bétonnage mal exécutées, mise en œuvre dans des coffrages mal nettoyés, ségrégation due à une hauteur de chute trop importante, traitements thermiques...).



*Figure II.5: dégradation d'un pont à poutre en béton*



*Figure II.6: déformations des gaines et rupture de câbles dans un béton précontraint*

## IV. Pathologie des fondations

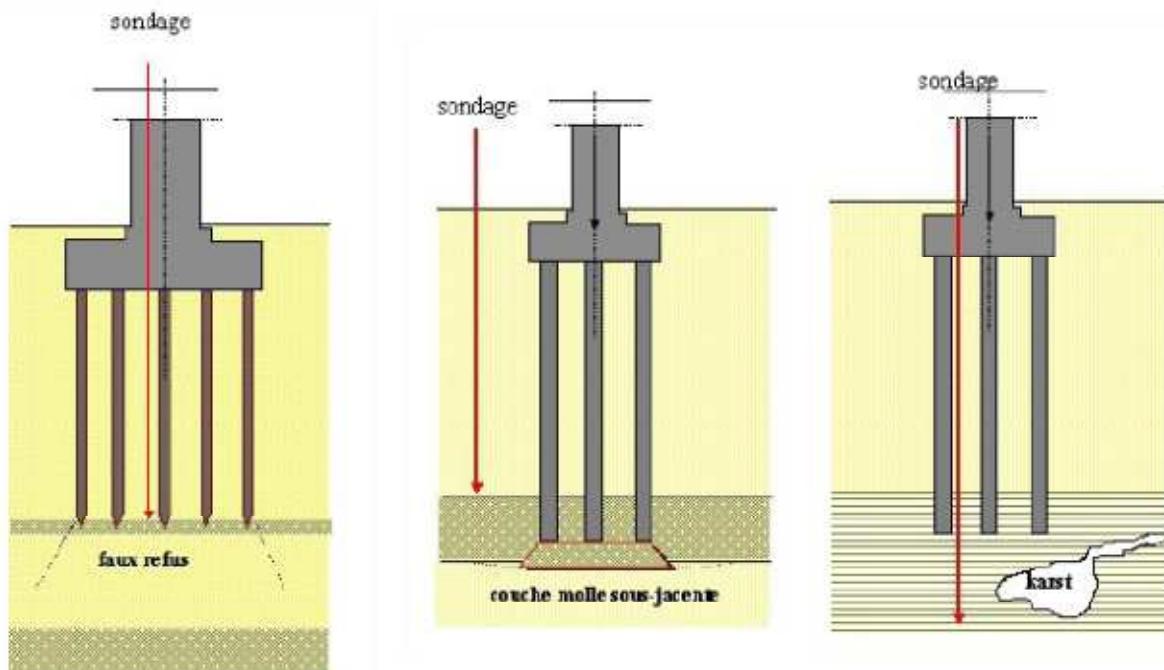
Lors d'une visite ordinaire de l'ouvrage la dégradation des fondations de ponts n'est pas toujours visible, en raison de leur immersion dans le sol ou dans l'eau. Néanmoins, les pathologies des fondations sont à l'origine de graves désordres affectant les ponts.

### IV.1 Causes des pathologies

En général, les désordres dans les fondations entraînent des frais importants. Les différents désordres mentionnés au niveau des fondations peuvent être dus à :

#### IV.1.1 Défaut de reconnaissance incomplète de sol

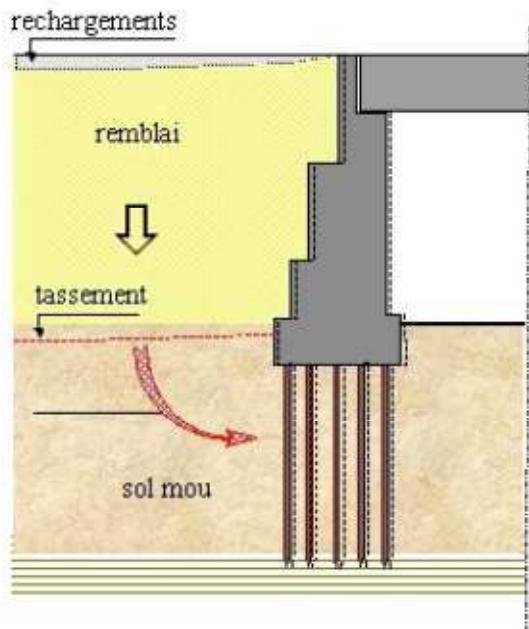
- profondeur insuffisante des sondages,
- présence de cavités non détectées,
- nappe d'eau insoupçonnée,
- agressivité de l'eau,
- point dur sous un radier,
- terrain d'assise peu résistant ou non homogène et très compressible,
- sol compressible d'épaisseur variable sous radier,
- sols différents sous un même bâtiment,



*Figure II.7 : désordres dus aux reconnaissances insuffisantes ou mal adaptées*

#### IV.1.2 Défaut de conception de l'ouvrage

- Ouvrage mal adapté aux conditions de sol (déformations, tassements excessifs...), d'environnement (agressif) ou de site (site aquatique, site instable...).
- Etudes insuffisantes ou incomplètes (stabilité, fondations, structures,...).
- Surestimation des résistances ou sous estimation des efforts (sols, matériaux de structure,...)



*Figure II.8 : désordres dus aux défauts de conception de l'ouvrage*

#### IV.1.3 Défauts à l'exécution des travaux

- non respect des plans (positionnement des armatures, niveau de fondation, épaisseur des sections ...);
- non contrôle de la conformité d'adaptation des fondations avec la nature et la qualité des terrains rencontrés;
- arrêt précoce de pieux battus ou forés;
- mis en œuvre des matériaux de qualité insuffisante;
- détériorations des matériaux par des engins de chantier...



*Figure II.9 : désordres dus aux défauts dans l'exécution des travaux.*

#### **IV.1.4 Affouillements**

La géométrie du lit, la pente d'écoulement, le débit liquide et les apports solides de sédiments facilitent le creusement du lit et qui assurent son équilibre ou les évolutions naturelles avec érosion, creusement et atterrissements. La construction d'un ouvrage d'art réduit l'emprise du lit majeur et/ou mineur d'un cours d'eau liée à la construction des piles ou des culées de l'ouvrage, qui peut provoquer localement un exhaussement et une accélération de vitesse de la ligne d'eau en amont et en aval.

I



*Figure II.10 : Affouillement d'une fondation d'ouvrage en rivière*

##### **a- Affouillements généralisés**

Les ouvrages anciens fondes insuffisamment bas et mal protégés se détruisent rapidement par les grandes crues (approfondissement général du lit, remaniement des alluvions).



*Figure II.11: désordres dus aux affouillements généralisés*

##### **b- Affouillements locaux**

L'implantation des ouvrages anciens dans le lit du cours d'eau constitue un obstacle à l'écoulement et la réduction fréquente du débouché, qui favorise l'apparition de fosses

d'affouillement à l'amont et à l'aval des ouvrages, de vides sous les appuis et de contournement de culées. Après la crue, il reste difficile de connaître la profondeur maximale du surcreusement temporaire se trouve partiellement ou totalement comble pendant la décrue de matériaux.



*Figure II.12 : désordres dus aux affouilements locaux*

#### **IV.1.5 Abrasion et érosion des matériaux**

- Abrasion des pièces en bois, des voiles verticaux et des radiers.
- Dégradation de la pierre due au milieu aquatique.



*Figure II.13 : désordres dus à l'abrasion et l'érosion des matériaux*

#### **IV.1.6 Altération des mortiers et bétons**

En site fluvial, la chaleur libre issue de l'hydratation du ciment s'hydrate elle-même pour produire l'hydrate de chaux soluble dans l'eau qui favorise le vieillissement et la dissolution du mortier.



*Figure II.14 : désordres dus à l'altération des mortiers et bétons*

## ***Chapitre 3 : L'auscultation des ponts***

*L'auscultation est une opération importante pour se faire des causes probables de la pathologie constatée essentiellement visuelles.*

*En générale, une auscultation efficace a pour but d'apprécier la qualité du matériau en place, et de caractériser le mode de fonctionnement actuel de la structure.*

## I. Auscultations non destructives

Une auscultation est une opération qui précède les constatations visuelles des désordres.

L'idée principale d'auscultation est de connaitre les causes possibles des désordres

Les objectifs généraux d'une auscultation sont:

- Apprécier la qualité des matériaux en place
- Analyser le mode de fonctionnement réel de la structure.

Pour les ouvrages en béton armé, il existe différentes méthodes non destructives Figure III.1.



*Figure III.1 : Schéma des auscultations non destructives*

## II. Les matériaux

### II.1 Les études sur prélèvement

Les études réalisées sur prélèvements ont pour but d'identifier les matériaux en place et d'évaluer ses propriétés. L'identification du matériau et la consultation de documents présentés dans le dossier de l'ouvrage peut être aussi importante que des essais sur prélèvements.

#### II.1.1 Caractéristique des essais sur prélèvement

La taille et le nombre des échantillons sont limités pour ne pas aggraver l'endommagement potentiel de la structure. Les résultats présentent une partie de l'ouvrage, ils sont utilisés comme référence d'étalonnage ou de comparaison.

### ***II.1.2 Essais mécaniques***

Les essais mécaniques effectués sur les prélèvements sont l'essai de compression et de traction. Il faut prendre en compte que ses essais sont effectués sur des éprouvettes dont la forme et la dimension différente de celles des éprouvettes normalisées (effet d'échelle). Dans le cas d'un échantillon métallique, les essais mécaniques peuvent donner des renseignements intéressants sur la nature du matériau utilisé.

### ***II.1.3 Essais physiques***

Les essais physiques sont des mesures de densité, mais aussi de porosité, de teneur en eau... Des matériaux spécifiques sont utilisés comme des appareils de gamma densimétrie par transparence difficilement utilisables sur ouvrage. En général, les résultats des essais physiques permettent d'obtenir des renseignements intéressants par comparaison car ces mesures ont peu de signification en valeur absolue.

### ***II.1.4 Essais chimiques***

L'avantage des essais chimiques se présente sur les points suivants:

- Ces essais sont relativement développés.
- ces essais nécessitent des petits échantillons,
- ces essais fournissent de très riches informations sur les matériaux,

Mais le seul inconvénient c'est que ces essais sont coûteux et ça nécessite une grande précision.

#### **II.1.4.1 Analyse des métaux**

Pour l'analyse des métaux, des méthodes d'analyse métallographique sont utilisées. Elles déterminent les constituants élémentaires du métal par voie chimique, et aussi la nature, la structure et le mode d'élaboration d'un métal...

#### **II.1.4.2 Analyse chimique et minéralogique d'un béton**

L'emploi de différentes techniques actuelles (puissantes) facilite l'expertise du béton et donner sa composition exacte (dosage et nature du ciment, nature des granulats, dosage en eau et granulométrie). Ces méthodes regroupent :

Elles regroupent

- les méthodes d'analyse chimique élémentaire (effectuées à l'aide d'une torche à plasma),
- les méthodes d'analyse thermique (dosage par pesage des éléments du béton qui se détruisent à des températures données au cours d'une montée progressive en température),
- les analyses diffractométriques, qui utilisent le diffractomètre des rayons X envoyés sur un morceau de béton réduit en poudre pour repérer les différents minéraux qu'il contient,
- les examens au microscope électronique à balayage (MEB) et les analyses pétrographiques (MEB ou microscope optique) qui permettent d'identifier certains produits comme ceux issus d'une alcali-réaction ou l'Ettringite comprimée.

## II.2 Étude du matériau en place

### II.2.1 *Le métal et les câbles de ponts suspendus*

L'auscultation magnétique et la surveillance acoustique sont les deux principales techniques d'inspection des câbles car il apparaît impossible de faire un examen en place de l'acier d'un pont. Par contre des essais de billage sont possibles avec certaines précautions opératoires. L'auscultation électromagnétique est utilisée pour détecter une réduction ou d'une fissuration de fils d'acier.

La surveillance acoustique permet de détecter, en temps réel, les ruptures de fils survenant, à compter de sa mise en service, au cours de la vie de l'ouvrage. La méthode vibratoire est une méthode simple et rapide pour mesurer la tension en place des câbles.

La méthode de l'arbalète a pour but d'évaluer la tension résiduelle de câbles tendus.

### II.2.2 *Auscultation des bétons*

#### II.2.2.1 Mesure de la résistance mécanique à la compression (scléromètre)

Le scléromètre est un appareil pour mesurer la résistance à la compression d'un parement de béton en place Figure III.1. Cette méthode est simple et rapide mais les informations fournies sont très imprécises et il convient défaut leur attribuer une valeur relative.

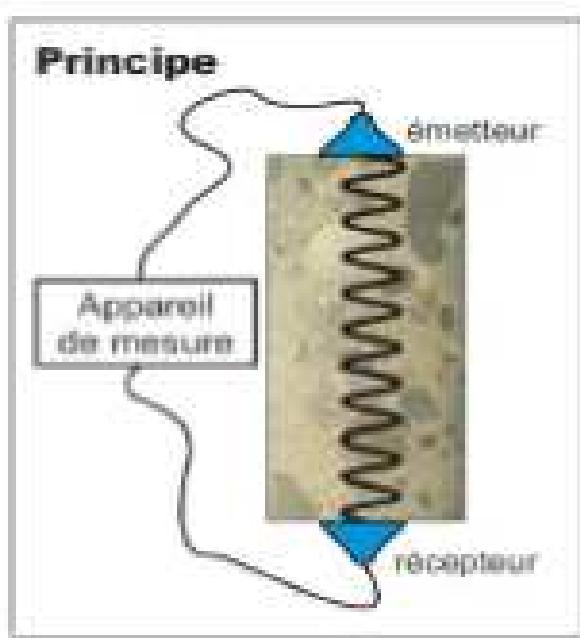


*Figure III.1 : Le scléromètre sur une paroi de béton*

#### II.2.2.2 Méthode sonique

Cette méthode permet de mesurer la vitesse de propagation d'une onde ultrasonique dans le béton, cette vitesse est reliée au module d'Young E et au coefficient de Poisson  $\nu$  du béton.

Dans la pratique, la méthode sonique est utilisée pour apprécier l'homogénéité d'un béton, localiser un défaut éventuel et estimer la résistance à la rupture du béton Figure III.2

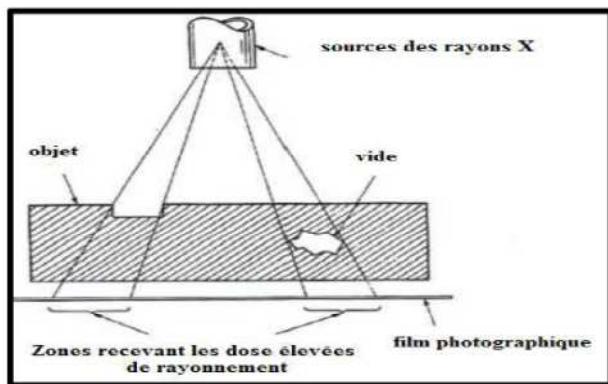


*Figure III.2 : Auscultation du béton par la méthode sonique*

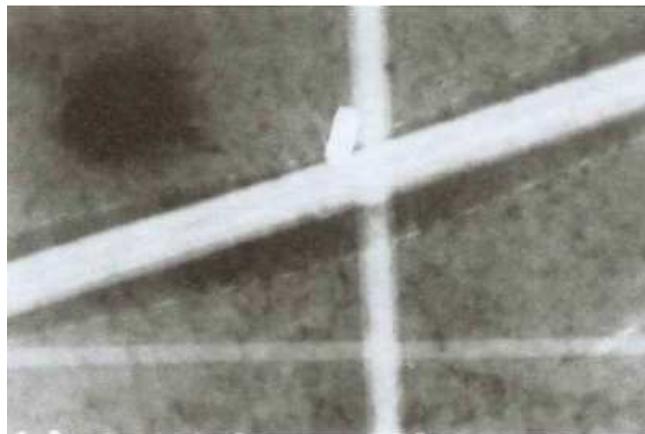
#### II.2.2.3 Radiographie (ou gammagraphie)

La radiographie permet de :

- contrôler les assemblages et soudures en construction métallique (défauts d'adhérence armatures-béton et gaines-béton, déformation ou perforation des gaines, mauvais raccordement, manque d'injection dans les gaines, câbles de précontrainte rompus ou détendus et position incorrecte des aciers par rapport aux plans) Figure III.3,
- détecter les défauts dans le béton (hétérogénéité : vides- reprises de bétonnage mal faites, certaines fissures internes),
- assurer la qualité des injections dans le béton précontraint (présence de fissure (cheminement possible pour l'eau), câble mal injecté Figure III. 4.



*Figure III.3 : Principe général de la radiographie*



*Figure III.4 : Absence totale de coulis d'injection et déformation de la gaine (Photo LCPC)*

#### II.2.2.4 Radioscopie

La radioscopie par Rayonnement (SCORPION) permet d'Inspecter des Ouvrages en béton).

Enfin, le système SCORPION permet d'obtenir de radiogrammes comme en gammagraphie classique avec une possibilité de traverser des épaisseurs plus grandes de béton plus un temps de pose plus court.

Malgré que ce dispositif présente des avantages par rapport aux autres moyens d'examen de la géométrie interne des ouvrages, mais il reste lourd à utiliser (des contraintes dues à la géométrie de la passerelle et à la radioprotection).

#### II.2.2.5 La fissurographie

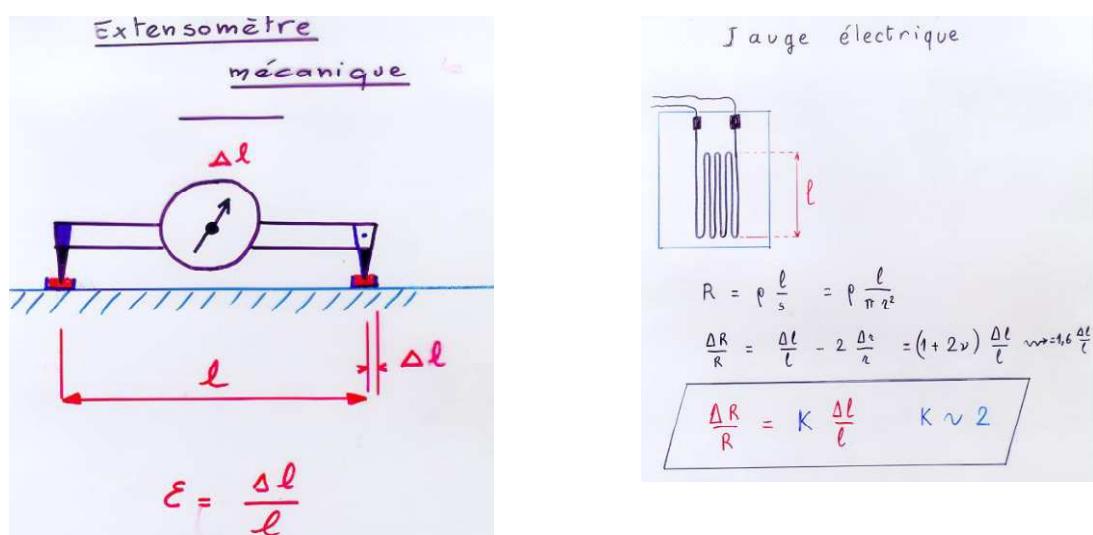
La fissurographie permet d'étudier la géométrie de fissures relevées d'une paroi de béton à l'aide d'un fissuromètre et à suivre son évolution au cours du temps pour déterminer l'indice de fissuration et de vérifier le fonctionnement local du pont Figure III.5.



**Figure III.5 :Principe de la mesure par un fissuromètre**

#### II.2.2.6 Mesures de déformations locales

Pour étudier le fonctionnement local d'un pont par la mesure des déformations locales, différents, plusieurs appareils ont utilisé comme l'extensomètre, les jauge électriques, témoin sonore et des jauge d'extensométrie.



**Figure III.6 :principe d'utilisation d'un Extensomètre**

### III. Le fonctionnement

#### III.1 Mesure des déformations générales et des mouvements

Les différentes mesures des déformations peuvent renseigner sur l'état de fonctionnement général de l'ouvrage (à vide) et de la structure en particulier (sous chargement).

Des déplacements peuvent résulter de:

- mouvements des fondations (mouvements verticaux des appuis des culées et piles),
- déformations permanentes du tablier en béton précontraint.
- mauvaise évaluation du fluge du béton.



Figure III.7 : mesure de distance

#### III.2 Mesure des déformations sous chargement

Les mesures des déformations sous chargement comportent les mesures de la flèche et de la rotation ces mesures permettent de donner des renseignements sur le fonctionnement de la structure du pont.

### **III.2.1 Mesure des flèches**

La flèche est calculée au milieu des travées étudiées, pour mieux connaître la déformée d'une travée il faut augmenter le nombre de points de mesure selon le tracé du diagramme des moments fléchissant.

Les principales techniques employées pour mesurer les flèches sont :

- le niveling topographique exécuté que par un personnel hautement qualifié ;
- le fleximètre mécanique ; cette méthode nécessite un point d'ancrage fixe sous l'ouvrage;
- les capteurs de déplacements à traduction électrique pour enregistrer les mesures ;
- l'utilisation du flexigraphe laser de conception plus récente.

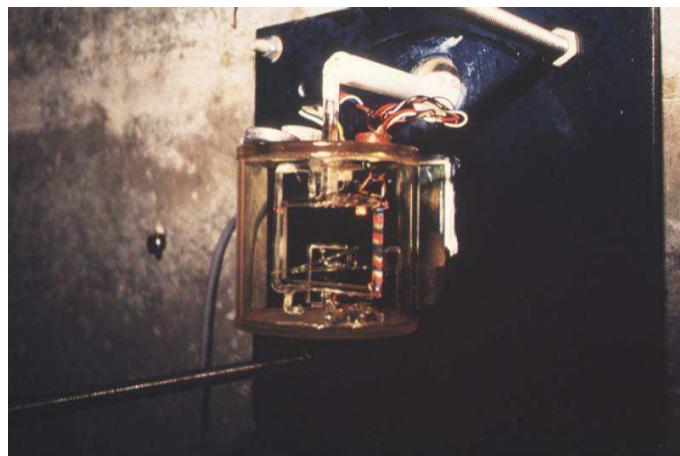


*Figure III.8 : Suivi topographique-mouvements (repérages de cibles)*

### **III.2.2 Mesure des rotations**

Un ouvrage sous l'effet de charges d'exploitation peut subir une rotation du tablier sur appuis ou une rotation de sections particulières mesurée à l'aide de clinomètres ainsi que l'inclinaison de piles ou de murs mesurée à l'aide de pendules.

Parmi les principaux appareils de mesure des rotations on trouve la nivelle mécanique qui est utilisée pour mesurer la rotation d'une masse suspendue à deux fils de silice de quelques micromètres de diamètre.



**Figure III.9 : Inclinomètre de précision 10-8rd**



**Figure III.10 : Pendule direct et distancemètre vertical**

### **III.2.3 Mesures des déplacements sous actions dynamiques**

Un accéléromètre ou de sismographes enregistreurs ont utilisé pour évaluer le comportement dynamique des ouvrages. Ces appareils mesurent la composante dynamique de la flèche du tablier (déplacement vertical) sous le passage d'un convoi ou les mouvements horizontaux des têtes de pile (déplacement horizontal) sous l'action du freinage d'un véhicule.

Les enregistrements fournis par les accéléromètres ont besoin d'une double intégration du signal pour obtenir des déplacements. Il paraît encore difficile de tous les enseignements de l'étude des vibrations propres d'un ouvrage.

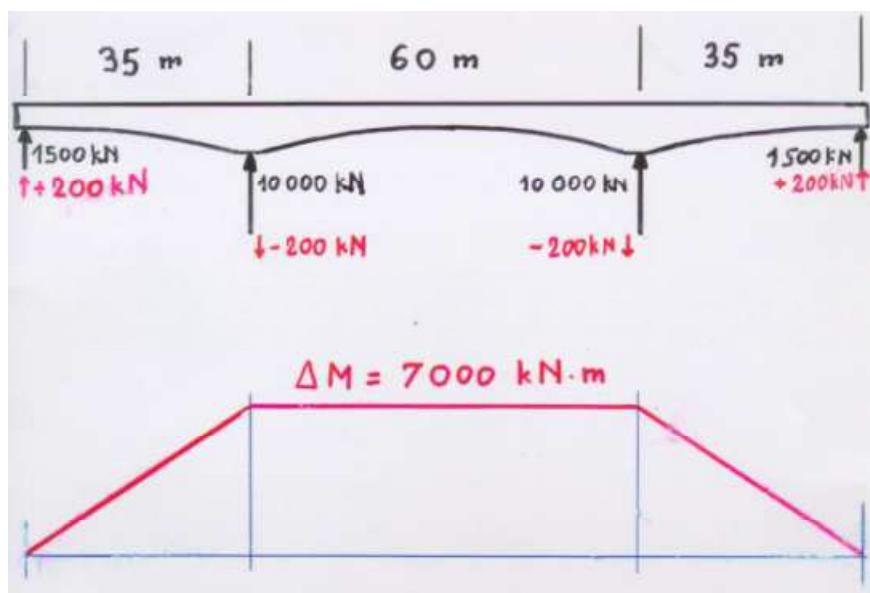
En général, pour voir une modification des caractéristiques dynamiques de l'ouvrage il faut atteindre un endommagement important qui est détecté à un stade plus avancé par d'autres techniques d'auscultation.

Dans le cas des ponts, la qualité du revêtement routier a une influence prépondérante dans l'analyse des signatures vibratoires, et la dégradation de l'état de la chaussée masque l'évolution du comportement dynamique de l'ouvrage.

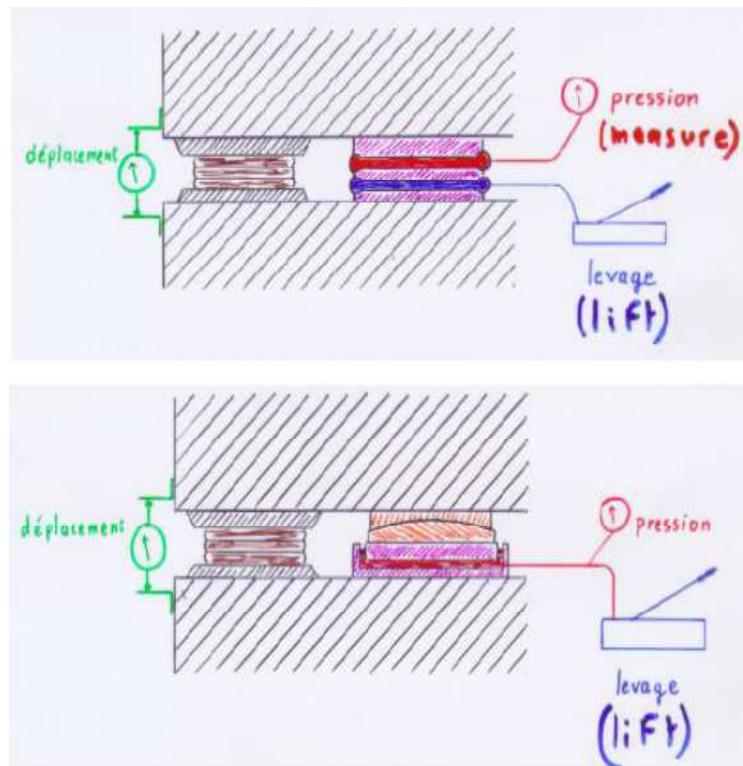
### ***III.2.4 Mesure des forces sur ouvrage***

#### ***III.2.4.1 Pesée de réactions d'appui***

La mesure de pesée des réactions permet d'évaluer les effets de la redistribution des efforts dus au fluage dans un pont précontraint réalisé par phases ou à la variation du gradient thermique. Pour la réalisation de ces mesures, la technique du double vérin plat ou celle du vérin à piston est utilisée pour soulever le tablier Figure III.7 afin de mesurer la force nécessaire à son soulèvement. L'utilisation d'un comparateur précis permet de mesurer avec précision le déplacement vertical du tablier lors du soulèvement.



*Figure III.11 : variation des réactions d'appui*



**Figure III.12: Principe de double vérin et vérin plat**

La présence des appareils d'appuis équipés de dispositifs permanents facilite la mesure de la force transmise.

#### III.2.4.2 Autres mesures directes sur ouvrages

- ***Mesure de forces dans les câbles de précontrainte***

Les principales méthodes de mesure de forces dans les câbles sont basées sur le principe de la « pesée », la théorie des cordes vibrantes ou la méthode de l'arbalète.

- Le principe de la pesée n'est applicable sauf si le câble de précontrainte est non injecté ou injecté avec un produit souple, et que son extrémité soit accessible. La présence d'un vérin et d'un capteur de déplacements peuvent reprendre l'effort existant dans les câbles. la mesure de la pression en fonction du déplacement pour déterminer la tension correspondant au décollement de l'extrémité du câble par rapport à la structure ou à la plaque d'ancre.
- La méthode vibratoire concerne plutôt les câbles des ponts suspendus et à haubans. elle est utilisée aussi pour déterminer la tension des câbles extérieurs au béton. cette

méthode est appliquée pour mesurer la tension dans des barres lorsque les conditions d'encastrement aux extrémités de celles-ci sont connus, ou de procéder par étalonnage avec la technique du collage de jauge sur certaines barres détendues.

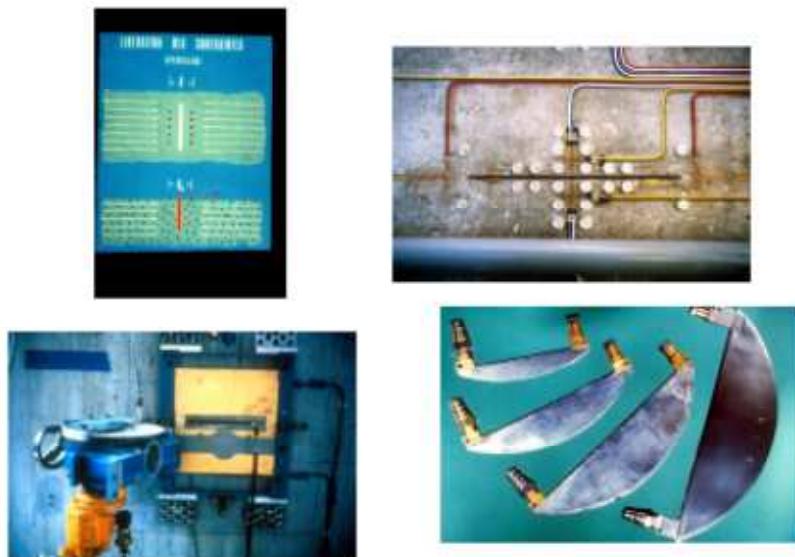
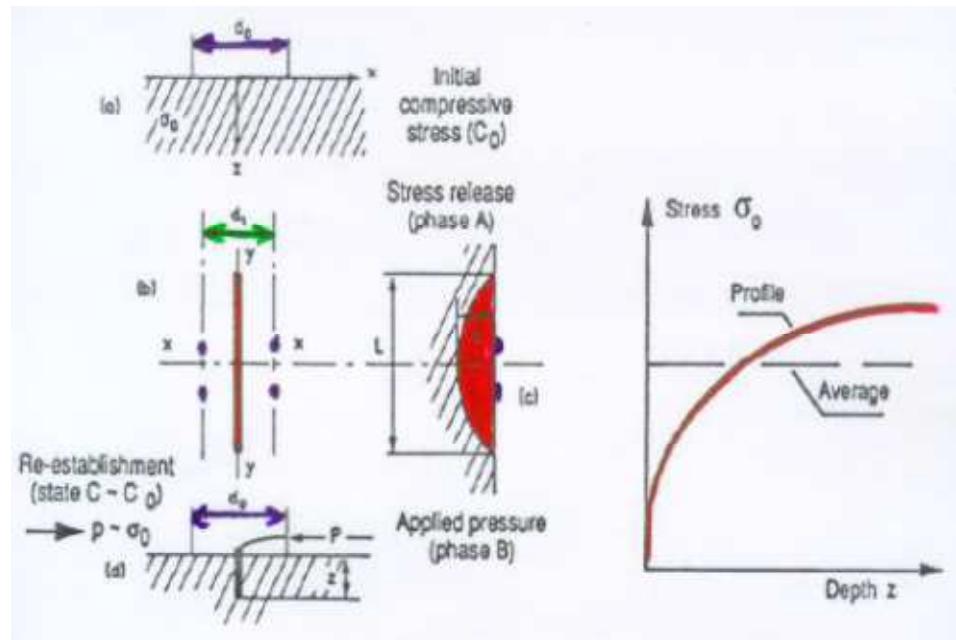
- La méthode de l'arbalète a pour but de mesurer la tension résiduelle de câbles tendus (intérieurs ou extérieurs au béton), en prenant en compte que l'effort nécessaire pour dévier un câble de son tracé est en fonction de sa tension (Figure III.13). Cette méthode consiste à :
  - Ouvrir une fenêtre dans le béton pour faire sortir le câble (sans son coulis de protection) sur une longueur de 60 cm, qui facilite la mise en place correcte de l'arbalète.
  - Appliquer une force perpendiculaire contrôlée au câble (à fils parallèles) ou à un toron, et suivre simultanément par un capteur de déplacement la valeur de la flèche prise par le câble. En général, la mesure de la tension sur les 2 ou 3 torons (ou fils) directement accessibles est possible.
  - La précision de tension est de 3 %.



Figure III.13 : la méthode de l'arbaléte et son application sur site

- ***Libération des contraintes***

La méthode de libération des contraintes permet d'évaluer directement les contraintes locales dans le béton, elle consiste à réaliser un relâchement partiel et local des contraintes par préparation d'une entaille suivie par une pression contrôlée à l'aide d'un vérin ultraplat (introduit dans l'entaille) Figure III.14.



**Figure III.14: principe de la méthode de libération de contrainte et son application sur site**

La zone est soumise à une contrainte de compression, lorsque les lèvres de l'entaille vont avoir tendance à se rapprocher. Un vérin (glissé dans l'entaille) mis en pression croissante jusqu'à ramener les lèvres de l'entaille dans leur position initiale. Cette pression de compensation à la valeur de la contrainte locale de compression moyenne dans le béton perpendiculairement au plan de l'entaille.

De la même façon pour une contrainte de traction. Mais en traction, l'entaille a tendance à s'ouvrir, au moment de la libération des contraintes. A partir de cette position, une montée contrôlée de pression va être effectuée et les déplacements correspondants mesurés. Une

loi locale de comportement déplacement-pression peut être définie. L'extrapolation de la courbe à une valeur de déplacement nul donne la contrainte de traction initiale dans le béton.

La connaissance, pour différentes profondeurs d'entaille, des déplacements en surface (lèvres de l'entaille) et des pressions de compensation dans le vérin permet de déterminer le profil de contrainte.

Un échauffement du béton (variation  $>1^{\circ}\text{C}$ ) et la carbonatation du béton en surface peut rendre les résultats de la méthode de libération des contraintes fausses.

Les informations fournies par la méthode de libération de contrainte sont:

- contrainte moyenne locale du béton au niveau de l'entaille,
- profil local des contraintes avec la profondeur par des mesures progressives au fur et à mesure de l'approfondissement de l'entaille et utilisation d'un modèle numérique,
- distribution des contraintes dans une section transversale de l'ouvrage par application de la méthode à différents niveaux dans une même section.

### ***III.2.5 Étude géométrique des fissures dans les ponts en béton et béton précontraint***

Le suivi de l'évolution dans le temps d'une fissuration sur un ouvrage en béton constitue un élément de diagnostic très important. Cette fissuration présente la manifestation extérieure du mode de fonctionnement de l'ouvrage et traduit clairement ce fonctionnement qui doit être correctement interprété. En générale, une fissure de fonctionnement est la preuve de la présence et le développement des contraintes de traction, où l'intensité a atteint la résistance du béton en traction.

Pour un ouvrage en béton armé, il faut savoir distinguer dès le stade de l'examen visuel entre la fissuration normale et la fissuration due à un défaut de fonctionnement. Toute fissure dans un ouvrage d'art en béton précontraint est a priori suspecte, mais il faut différencier les fissures réelles des fissures secondaires sans danger.

Dans un ouvrage en béton précontraint, pour faciliter l'interprétation de la fissuration, il est recommandé de reporter les fissures sur un plan comportant le tracé des câbles de précontrainte. Différentes techniques par l'utilisation d'extensométrie (la mesure de la déformation locale d'un corps sous l'effet d'actions diverses) ou de fissurométrie (la mesure des mouvements relatifs, sous l'effet d'actions extérieures, des deux lèvres d'une fissure à la

surface d'une pièce) sont nécessaires pour mesurer les variations d'ouvertures sous diverses actions pour compléter le relevé « statique ».

Les principaux appareils utilisés sont :

- Les jauge à fil résistant
- Les extensomètres mécaniques et extensomètres à corde vibrante
- Les capteurs de déplacements.

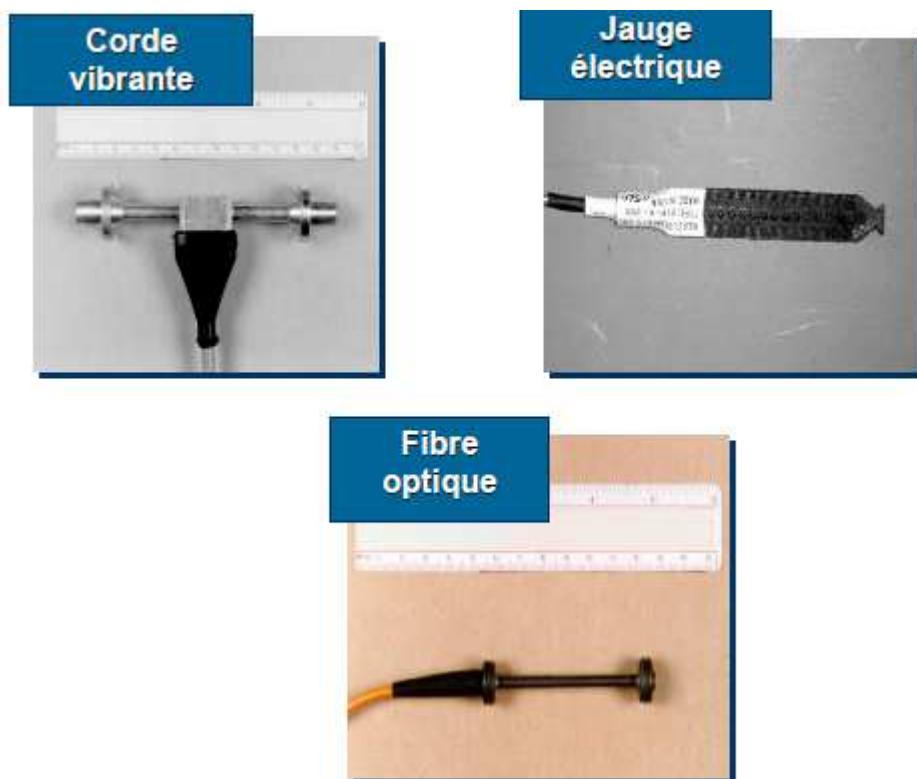


Figure III.15: jauge d'extensométrie

## ***Chapitre 4 : Les bases de réparation ou de renforcement des ponts***

*Un pont est sous l'effet de différentes charges, la perte graduelle de sa valeur est due à l'accroissance progressive de l'intensité de ces charges (fissuration, fatigue).*

*La modification des conditions d'exploitation (augmentation du nombre de voies de circulation) où le traitement de désordres révélateurs d'une pathologie (affectant la structure et/ou les matériaux) naissante ou avancée exige une évaluation de pont.*

*L'estimation de la fiabilité structurale d'un pont est une composante de l'évaluation de l'ouvrage considéré. C'est une idée complexe comprend à la fois :*

- *des données aléatoires et déterminées ;*
- *la connaissance précise des données ;*
- *la fiabilité de cette connaissance.*

## I. Evaluation de l'ouvrage

L'évaluation d'un pont comporte deux phases successives : 1) le diagnostic préliminaire. 2) le recalcule.

### I.1 Diagnostic préliminaire

En général, le diagnostic s'intéresse qu'aux éléments porteurs principaux pour définir et prendre les éventuelles mesures d'urgence qui s'imposent si la sécurité physique du public est en cause. Est une évaluation sommaire basée sur l'examen des documents existants et sur un constat réel de l'état de l'ouvrage dégradé. Un ingénieur expérimenté doit établir un diagnostic rapide en connaissant les origines probables et les conséquences possibles des désordres.

Pour réussir ce diagnostic, des essais sont programmés afin d'évaluer les propriétés des matériaux et d'actualiser les dimensions. Ces données déterminées sont nécessaires pour aboutir à un diagnostic précis au cours de l'étape de recalculation et à une évaluation quantitative fiable de la sécurité structurale, et pour permettre l'élaboration du projet de renforcement ou de réparation. Ces investigations peuvent comprendre :

- une réalisation des essais et interprétations des résultats par un laboratoire ou une entreprise spécialisée ;
- une actualisation des dessins et dimensions de l'ouvrage ;
- Une évaluation précise des propriétés des matériaux.

### I.2 Le recalcul de l'ouvrage

Le recalcul de l'ouvrage est un élément essentiel de l'évaluation de sa fiabilité structurale.

Les deux principaux objectifs du recalcul sont:

- une estimation précise de l'état de contrainte probable de la structure en prenant en compte le cas échéant des désordres constatés ;
- une évaluation des marges de sécurité vis-à-vis du dépassement de certains états limites irréversibles ou de rupture.

Cette étape favorise l'élaboration du projet de réparation et/ou de renforcement. Le recalcul se base sur les codes fixant les charges et épreuves des ponts et sur les règles de justification des constructions. Mais il ne peut pas se borner à l'application des codes actuels, sans pour autant les interpréter pour s'y référer.

De manière générale, le recalcul ne doit pas être confondu avec :

- un calcul de contrôle suivant des codes et réglementations validés et utilisés à la construction de l'ouvrage (ce calcul se justifie dans le cadre d'une procédure d'enquête pour établir d'éventuelles responsabilités).
- un calcul justificatif de l'ouvrage pour établir un projet de réparation ou de renforcement, même si les deux calculs utilisent le même modèle.

Une pré-étude technico-économique des différentes solutions envisageables est envisagée pour permettre au maître de l'ouvrage d'envisager ces solutions :

- un remplacement total ou partiel de l'ouvrage,
- une réparation ou de renforcement d'ouvrage, une démolition-reconstruction,
- Un maintien de l'ouvrage en l'état avec mesures particulières d'exploitation et de surveillance.

## II. Préparation du recalcul

Pour préparer le recalcul, selon des estimations motivées il existe les options suivants :

- 1- analyse structurale
- 2- Géométrie effective de la structure
- 3- Affaiblissement des matériaux
- 4- Évaluation de l'effort de précontrainte

### II.1 Analyse structurale

L'analyse structurale se fait par des méthodes numériques et de résistance des matériaux.

En générale les modèles globaux sont des modèles élastiques linéaires.

La géométrie effective de la structure, du processus réel de construction et l'affaiblissement des matériaux de construction facilite le calcul représentatif.

Pour étudier quelques problèmes locaux ou même généraux, des modèles non linéaires seront utilisés. D'autres modèles spéciaux (modèle d'endommagement, modèle de mécanique de la rupture) sont utilisés pour faciliter l'étude des autres pathologies (fissuration due à la fatigue dans les ponts métalliques ou en ossature mixte).

### II.2 Géométrie effective de la structure

Un contrôle par sondage se fait sur :

- la géométrie effective de la structure,

- les épaisseurs des hourdis en béton,
- le poids des équipements.

Une étude géométrique complète, en utilisant des techniques avancées d'interprétation numérique de clichés photographiques, est nécessaire dans le cas des ponts anciens à cause de manque de documentation.

Un contrôle de tracé des armatures actives par radiographie ou radioscopie est sollicité pour vérifier la position réelle des armatures passives (ont un effet sur la résistance des sections) et actives (ont un effet sur les sollicitations) à l'intérieur du béton par rapport leur position théorique définie par les plans d'exécution.

La reconstitution de ferraillage et/ou de câblage d'un pont en béton précontraint est un vrai travail de détective.

### **II.3 Affaiblissement des matériaux**

L'affaiblissement des matériaux de construction d'un ouvrage se présente dans :

- La dégradation de béton par des attaques diverses,
- Les sections de tôles de poutres métalliques sont réduites par la corrosion ou de blessures.
- la rigidité des sections affectée par des fissurations importantes dans les ponts en béton (modification de la répartition des sollicitations dans une structure hyper-statique).

Dans les ponts endommagés pour évaluer les pertes de section de l'acier par corrosion dans le cas d'un tablier en acier, il est nécessaire d'observer la corrosion des aciers après mise à nu locale (. Mais cela ne concerne que des. Mais, dans les ponts en béton il reste très difficile de connaître l'état de contraintes dans les armatures.

### **II.4 Évaluation de l'effort de précontrainte**

L'évaluation de l'effort de précontrainte présente une problématique importante dans un ouvrage réel.

La préoccupation des ruptures de fils ou torons de la précontrainte qui peuvent être détectées surtout pour les câbles situés dans des parois minces avec un accès facile par des appareils de mesure mais cette détection des ruptures reste impossible dans la pratique. Même si les ruptures de câbles sont localisés et identités l'incertitude subsiste sur l'efficacité rémanente du câble rompu (tension nulle au droit de la section où se situe la rupture).

Il est possible d'estimer l'effort résiduel par la méthode de l'arbalète en dehors des zones de rupture et la méthode de libération des contraintes peut fournir des informations importantes.

Pour faire le recalcul, une évaluation est nécessaire de la précontrainte moyenne sur la base du tracé contrôlé des câbles et avec l'utilisation des coefficients de frottement réalistes, en prenant en compte les caractéristiques usuelles du procédé considéré. L'introduction d'un taux d'affaiblissement estimé à partir des mesures d'un effort de précontraint quand il y a des doutes sur l'intégrité des câbles.

### **III. Le contexte du recalcul des ouvrages**

La présence des désordres dans un pont justifie le dépassement le stade de réversibilité des états limites de service.. Les désordres locaux, dans les ponts métalliques dus au phénomène de fatigue amène à mettre la structure hors service.

Le recalcul a pour objectif de :

- mettre au point un modèle de l'ouvrage,
- fournir un état de référence caractérisant le comportement probable de l'ouvrage, et les éléments permettant de définir les principes de réparation ou de renforcement.
- permettre d'établir un véritable bilan de santé de l'ouvrage.

#### **III.1 La référence aux codes et normes de calcul**

Les textes réglementaires et normatifs sont des bases générales d'un recalcul d'un ouvrage, elles sont relatifs aux charges dues au trafic et aux règles de justification des constructions qui peuvent être complétées par des règles relatives aux convois exceptionnels.

Les codes de calcul, passés ou actuels, ne sont pas pour évaluer l'état probable d'une structure existante ainsi que le recalcul d'un ouvrage ne peut pas se réduire à une simple application des règles de calcul actuelles.

Il est nécessaire d'interpréter les codes et les règlements pour s'y référer. Mais pour estimer le niveau de fiabilité de l'ouvrage, l'ingénieur a besoin d'utiliser des textes normatifs ou réglementaires qu'ils l'aide à définir le niveau de réparation ou de renforcement de l'ouvrage.

En général, les modifications des codes successifs (de charges et de projet) vont, pour augmenter la fiabilité d'un ouvrage, des modifications des codes et réglementations de calcul sont nécessaires.

En réalité, les nouveaux codes (méthodes d'états limites, diversité des valeurs représentatives des charges d'exploitation, etc.) sont beaucoup développés que les anciens codes parce que :

- les niveaux de connaissance des ouvrages et des conditions de circulation peuvent être accrus par des investigations, ne sont pas les mêmes au stade du projet d'un ouvrage à exécuter et lors des vérifications des ouvrages existants;
- consommation de la marge réservée par l'utilisation des coefficients partiels pendant la durée de vie de l'ouvrage ;

le degré optimal de viabilité est plus élevé pour des ouvrages à construire que pour des ouvrages existants parce que le coût d'une réparation ou d'un renforcement est plus élevé que l'adoption de dispositions raisonnablement surabondantes au stade du projet ; L'application numérique des principes relatifs aux degrés de fiabilité diffère selon :

- le mode de construction (ponts en béton, ponts métalliques),
- le type d'ouvrage et, même,
- la partie d'ouvrage concernée.

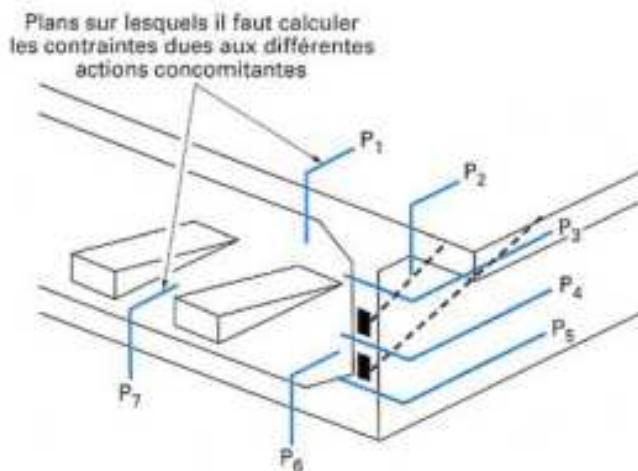
### **III.2 Cas des ponts en béton et béton précontraint**

Pour le recalcul ou la justification du projet de réparation ou de renforcement d'un pont en béton, les calculs se réfèrent aux états limites de service.

Pour les ponts en béton précontraint, il faut référer les calculs aux états limites de service, (Il faut vérifier la résistance aux cisaillements combinés dus à l'effort tranchant, à la torsion, à la diffusion des efforts de précontrainte.

En générale, le risque de rupture brutale se trouve dans des zones où l'effort tranchant est la sollicitation dominante et où la précontrainte peut avoir été affaiblie par corrosion.

Pour les ponts en béton armé, il faut référer les calculs et les codes aux états limites ultimes (un abaissement des coefficients partiels peut avoir une influence). Mais, en réalité, la réduction des coefficients exige de se référer principalement aux états limites de service.



*Figure IV.1 : Étude physique fine dans le cas des ponts en béton*

### III.3 Cas des ponts métalliques ou en ossature mixte

Il existe des ponts métalliques qui supportent actuellement des charges où l'intensité est supérieure à celle prise au calcul d'origine cas des ponts ferroviaires due à la prudence des codes anciens de charpente métallique.

Mais si les éléments porteurs principaux ont en général pu supporter sans dommage le trafic actuel, par rapport les pièces secondaires.

il est inutile d'évaluer la force portante d'un ouvrage ancien à partir de sa note de calcul d'origine.

La réparation ou le renforcement se réfère plutôt aux états limites ultimes de résistance. Les états limites ultimes sont beaucoup moins conventionnels pour les sections de ponts métalliques ou en ossature mixte que pour les sections de ponts en béton, et toute réduction des coefficients partiels jouera à plein.

Pour la fatigue, il est impossible de calculer la marge de sécurité offerte par un ouvrage existant. Les résultats de nombreuses études et recherches n'ont pas pu déterminer un indice de fiabilité vis-à-vis du phénomène de fatigue.

## IV. Conduite du recalcul d'un pont en état pathologique

### IV.1 Évaluation de l'état de l'ouvrage « à vide »

Le calcul « à vide » d'un ouvrage permet de valider le modèle utilisé pour interpréter les désordres constatés et pour établir le projet de réparation.

L'évaluation de l'état d'un ouvrage « à vide » consiste à en apprécier l'état de contrainte sous une combinaison de type « quasi permanente » comprenant :

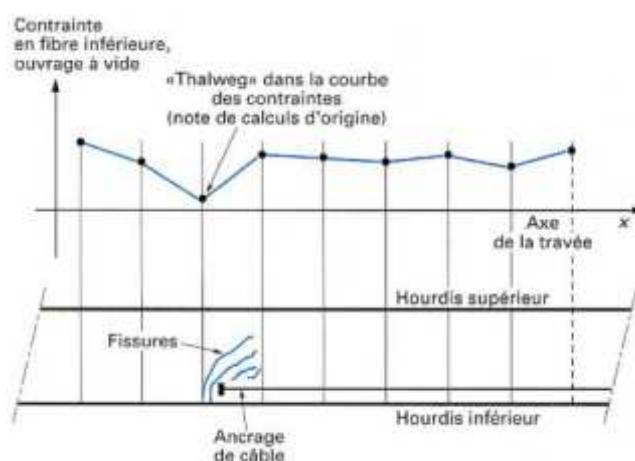
- les charges permanentes;
- l'effort éventuel de précontrainte;
- une action thermique.

Le calcul sous combinaison de type quasi-permanente d'un pont permet de retrouver le comportement réel de la structure et les résultats des mesures effectuées. Il prend en compte :

- la cinématique et le calendrier exacts de la construction;
- le résultat des investigations sur l'ouvrage;
- des lois du comportement des matériaux (le fluage et le retrait du béton, la relaxation des armatures).

L'introduction de fourchettes de précontrainte, dans les ouvrages en béton précontraint est favorisée s'il y a des doutes sur

- l'intégrité des armatures de précontrainte,
- si un recalcul basé sur une précontrainte qui n'explique pas le fonctionnement satisfaisant de la structure.



*Figure IV 2 : Les fissures apparaissent là où la note de calcul montre une section plus « faible »*

## IV.2 Calcul de l'ouvrage sous charges d'exploitation

L'objectif d'un calcul en prenant en compte les charges d'exploitation :

- quantification des désordres constatés en affinant le diagnostic;
- estimation de la capacité portante avant la réparation.

Les codes définissant les charges d'exploitation applicables aux ponts sont des modèles assortis de valeurs numériques destinés à couvrir les effets des charges réelles, ces codes ne représentent pas des charges réelles.

Une détermination réelle du comportement réel d'un ouvrage doit prendre en considération les combinaisons fréquentes et caractéristiques correspondant à deux niveaux distincts de sollicitation de la structure. Si les désordres constatés ont été interprétés à l'un ou l'autre de ces deux niveaux, le degré d'endommagement sera apprécié.

Une réflexion approfondie doit être apportée à l'interprétation des calculs, deux se présentent :

- le calcul peut interpréter les désordres observés sur l'ouvrage;
- le modèle de calcul choisi n'explique pas les désordres observés sur l'ouvrage.

## V. Chronologie de la réparation et de renforcement

- Identification de l'ouvrage ;
- Observation des effets constatés ;
- Identification des causes probables des pathologies ;
- Analyser et faire une étude approfondie (mesures, essais ...) ;
- Faire des conclusions ;
- Choisir une méthode de réparation et de renforcement ;
- préparer un projet ;
- commencer les travaux.

## VI. Produits de réparation et renforcement

Les produits de réparation ont des fonctions compensent les défauts du béton existant.

Les normes applicables sont :

- La norme NF EN 1504 norme européenne est pour définir le marquage CE des produits de réparation (performances fonctionnelles).
- La norme NF P95-103 norme française est pour définir la réparation et le renforcement des ouvrages en béton et maçonnerie – Traitement des fissures et protection du béton.

- La norme NF P95-101 norme française est pour définir la réparation et le renforcement des ouvrages en béton et maçonnerie – Réparation de surface des bétons.

## VII. Quelques réparation et renforcement

Les figures Figure IV.3, Figure IV.4 Présentent les différentes opérations de réparation et de renforcement comme :

- Les injections de fissures et les réparations ponctuelles.
- Une poutre renforcée par précontrainte additionnelle.



*Figure IV.3 : Les injections de fissures et les réparations ponctuelles*



Figure IV.4 Une poutre renforcée par précontrainte additionnelle

## ***Conclusion générale***

Les différents types des ponts sont soumis à de multiples sollicitations et agressions, dès leur mise en service, qui peuvent les ruiner. Le vieillissement des ponts et les sollicitations répétées présentent des désordres importants et rapides.

Les ponts en maçonnerie restent très longtemps en bon état. Mais des dégradations plus fréquentes peuvent être engendré par une défaillance des étanchéités, des disjointolements, des tassements d'appuis, insuffisance de résistance des structures en flexion ou à l'effort tranchant.

Les ponts métalliques sont agressés par l'environnement oxydant où les pathologies qui les atteignent sont dues généralement à la corrosion (peinture mal entretenue, fissurations de fatigue...).

Les matériaux béton et acier subissent des dégradations dans un environnement agressif, phénomène de carbonatation, pénétration de chlorures, attaque sulfatique et les réactions alcali-granulats. La corrosion atteint les armatures du béton armé quand les enrobages sont mal respectés, ou sous l'effet d'agressions dues aux sels de viabilité hivernale.

La dégradation des fondations se présente par tassement (défaillance du sous-sol d'appui) ou par affouillement (écoulements d'eau).

Toute réparation ou renforcement d'un pont est précédée par une auscultation et un diagnostic des désordres présentés. Des bases et des réglementations sont utilisées pour la réparation et le renforcement des ponts dégradés pour raccorder au pont son état initial.

## Bibliographie

- Benarbia Djamila « étude du comportement mécanique des poutres fissurées et renforcées par des matériaux composites », Universite djilali liabes de sidi-bel-abbes
- Boutaraa Zohra, « Pathologies et réhabilitation des ponts », Université Hassiba Benbouali de Chlef.
- Bruno GODART, « Pathologie durabilité et protection du béton armé » ENPC, MPREP, université Gustave Eiffel.
- Bruno GODART, « Pathologie des Ouvrages en Béton Armé et en Béton Précontraint » ENPC, MPREP, université Gustave Eiffel
- Bruno GODART et André ORCESI, « Les méthodes d'auscultation structurelle » ENPC, MPREP, université Gustave Eiffel.
- Daniel POINEAU, Jean-Armand CALGARO, « Conduite du recalculation des ouvrages Pathologie et évaluation des ponts existants- Évaluation des ouvrages »
- Daniel POINEAU, Jean-Armand CALGARO, « Préparation du recalculation Pathologie et évaluation des ponts existants- Évaluation des ouvrages»
- Daniel POINEAU, Jean-Armand CALGARO, « Étude du fonctionnement des structures existantes Pathologie et évaluation des ponts existants- Méthodes d'auscultation »
- Daniel POINEAU, Jean-Armand CALGARO, « Étude des matériaux en place Pathologie et évaluation des ponts existants- Méthodes d'auscultation »
- Davy Prybyla, « Les ponts en maçonnerie du diagnostic à la réparation », Cerema-DTerEst-Laboratoire de Nancy.
- Fdil i .Targaoui A, « Requalification d'un Ouvrage d'Art en béton armé », diplôme d'Ingénieur d'Etat, Université Mohammed Premier Ecole nationale des Sciences Appliquées d'Oujda.
- Ghobrini Mohammed Tadjeeddine et Cheikh Amina « l'impact de la corrosion des armatures sur les dégradations du béton ARME », Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem.
- Hamlaoui Salim, « Maintenance, entretien et réparation des ponts », Université Mohamed Khider – Biskra
- Itmaizeh Ehab, « pathologie de structures en béton armé », Université de Larbi Tébessi.
- Lacombe J. M, « Cours de pathologies des ponts », Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat. Lyon-France.
- Lacroix R. et Calgaro J.A, « Maintenance et Réparation des Ponts », Presse de l'école nationale des Ponts et chaussées.
- Le delliou,P. »Pathologie des ponts en maçonnerie »
- Olivier J.P et Vichot A, « Durabilité des bétons », Presse de l'école nationale des Ponts et chaussées.
- Patrick LE DELLIQU, « les ponts en maçonnerie »
- Poineau D. et Calgaro J, « Principales méthodes de réparation des ponts métalliques, Projet de renforcement ou de réparation d'un pont- Cas des ponts métalliques ». <http://www.techniques-ingenieur.fr>.
- Rouxel,N., »Fondations d'ouvrage d'art »,Cerema
- Stablon T, « Méthodologie pour la requalification des ponts en maçonnerie », Thèse de doctorat, université de Toulouse 3.

Site internet :

- <https://www.techno-science.net/>
- [www.cerema.fr](http://www.cerema.fr)
- [www.Cours génie civil.com](http://www.Cours génie civil.com)