



République Algérienne Démocratique et populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de  
la Recherche Scientifique



**Ecole Nationale Polytechnique**  
**Département de Génie Civil**

**Laboratoire de Génie Sismique et Dynamique des Structures**  
**(L.G.S.D.S)**

**Mémoire de master**

En vue de l'obtention du diplôme de master en Génie Civil

***Surveillance, entretien et réparation des ouvrages en béton***

Présenté et soutenu en public le 09 /10/2016 par :

**OUITAS Naziha**

**Composition du Jury :**

<b>Président :</b>	<b>M S. BELKACEMI</b>	<b>Pr</b>	<b>ENP</b>
<b>Promotrices :</b>	<b>Mme D. CHERID</b>	<b>MAA</b>	<b>ENP</b>
	<b>Mme H. MOHABEDDINE</b>	<b>MAA</b>	<b>ENP</b>
<b>Examineur :</b>	<b>M S. LAKEHAL</b>	<b>MAA</b>	<b>ENP</b>
	<b>Mme R. KETTAB</b>	<b>Pr</b>	<b>ENP</b>

**Promotion 2016**

Ecole Nationale Polytechnique 10, rue des frères OUDDEK Hassen BADI- El-Harrach Alger (Algérie)  
*Tel : 213 21 52 53 01/03 – Fax : 213 21 52 29 73 [www.enp.edu.dz](http://www.enp.edu.dz)*

## ملخص :

هذا المشروع يركز على دراسة المراقبة التي تجرى على المنشآت الخرسانية و مختلف أشغال الصيانة التي تعمل على حفظ المنشأ في حالة جيدة و مختلف تقنيات الإصلاح في حالة الإعتلال، التي تسمح بإعطاء المنشآت محيط يضمن أداؤها والاستدامة.

الغرض الرئيسي من هذه الدراسة يكمن في معرفة تقنيات الإصلاح لاستعادة جزئيا أو كليا المنشأ في حالة الخدمة المتوقعة

**الكلمات المفتاحية :** منشأة خرسانية، أشغال الصيانة ، تقنيات الإصلاح.

## Abstract :

This project focuses on the study of the monitoring conducted in the concrete structures, different work of entrtien which work to keep the structure as a serviceable and different repair techniques in the event of disorders, which allow to give the structures an environment ensuring their smooth operation and durability.

The main purpose of this study lies in the knowledge of repair techniques to return partially or fully a structure alerted in an expected operating condition.

**Key words :** concrete structure, maintenance works, repair techniques.

## Résume :

Ce projet porte sur l'étude de la surveillance effectuée sur les ouvrages en béton, les différents travaux d'entrrien qui auront lieu pour maintenir l'ouvrage dans son bon état de service et les différentes techniques de réparation en cas de désordres, qui permettent de donner aux ouvrages un environnement assurant leur bon fonctionnement et leur pérennité.

Le but essentiel de cette étude réside dans la connaissance des techniques de réparation pour remettre partiellement ou totalement un ouvrage alerté dans un état de service attendu.

**Mots clés :** ouvrage en béton, travaux d'entretien, les techniques de réparation.

# *Dédicace*

*A ma mère*

*A mon père*

*A toute ma famille*

*Je dédie ce travail...*

*Naziha...*

# Remerciements

*Je remercie ALLAH pour ses grâces à mon endroit, qui m'a fortifiée dans la persévérance pour mener à bien ce modeste travail.*

*Je remercie infiniment mes chers parents de m'avoir offert tout ce dont j'ai besoin pour être toujours à la hauteur et réussir dans ma vie.*

*Je remercie vivement mes promotrices, Mme D.CHERID et Mme H.MOHABEDDINE, pour l'aide qu'elles m'ont apportée, et leurs conseils instructifs durant l'élaboration de ce mémoire.*

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

*Je voudrai exprimer mon profond respect à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation universitaire à l'Ecole Nationale Polytechnique.*

# Sommaire

Liste des tableaux	
Liste des figures	
Introduction générale .....	9
Chapitre 1. La surveillance de l'état des ouvrages en béton.	
1.1. Introduction .....	11
1.2. La surveillance continue .....	11
1.3. La surveillance périodique .....	12
1.3.1. Les contrôles annuels .....	13
1.3.2. Les visites d'évaluation IQOA .....	13
1.3.3. Les inspections détaillées périodiques .....	14
1.3.4. Les visites spécifiques périodiques .....	14
1.4. Actions particulières de surveillance .....	15
1.4.1. Inspection détaillée initiale .....	15
1.4.2. Visites particulières de fin de garantie contractuelle ou de responsabilité .....	15
1.4.3. Visites ou inspections détaillées exceptionnelles .....	15
1.5. Conclusion .....	16
Chapitre 2. Entretien et réparation des ouvrages en béton.	
2.1. Introduction .....	18
2.2. L'entretien courant .....	18
2.3. L'entretien spécialisé .....	19
2.4. Les réparations .....	19
2.5. Les principales techniques de réparation ou de renforcement des ouvrages en béton .....	20
2.5.1. Traitements de surface .....	20
2.5.2. Protection du béton .....	25
2.5.3. Régénération des matériaux .....	27
2.5.4. Ajout de forces ou de déformations .....	30
2.5.5. Ajout de matière .....	32
2.6. Conclusion .....	41
Conclusion générale .....	43
Bibliographie.....	44
Annexe .....	45

## **Liste des tableaux**

Tableau 1.1. Classification des ouvrages d'art selon la méthodologie I.Q.O.A.....	14
---	----

## Liste des figures

Figure.1.1. surveillance d'une structure.....	12
Figure.1.2.surveillance périodique d'un pont. ....	12
Figure. 2.1. le ragréage d'une structure en béton.....	21
Figure 2.2. Injection des fissures .....	23
Figure 2.3.Renforcement par précontrainte additionnelle. ....	28
Figure 2.4. Extraction des chlorures par traitement électrochimique. ....	28
Figure 2.5. Réalcalinisation électrochimique de béton.....	30
Figure 2.6. Projection par voie sèche.....	32
Figure 2.7. Projection par voie mouillée.....	33
Figure 2.8. Renforcement par ajout d'armature.....	36
Figure 2.9. Renforcement d'un appui par un tissu composite. ....	38

*Introduction  
générale*

Toutes les structures créées par l'homme s'usent et se dégradent avec le temps, certaines parfois très tôt après leur construction. En outre, les conditions d'utilisation évoluent et l'amélioration continue des connaissances techniques peut éclairer les problèmes d'un jour nouveau.

Les ouvrages d'art n'échappent pas à la règle générale mais doivent assurer en permanence et en toute sécurité les services pour lesquels ils ont été construits.

Il est donc nécessaire, pour assurer la sécurité publique, de surveiller systématiquement et attentivement leur état et leurs conditions d'utilisation et d'exécuter, en temps utile et de la façon la plus économique, les opérations de sauvegarde, d'entretien ou de réparation qui permettent de les maintenir en état de service.

Le présent mémoire est une étude comportant les étapes suivantes :

La première partie présentera la surveillance de l'état des ouvrages qui est déterminante pour l'entretien du patrimoine et la sécurité des usagers.

La deuxième partie s'agit des tâches courantes d'entretien à effectuer et les méthodes de réparation en cas de désordres.

Et enfin du rapport, on finira par une conclusion générale.

*Chapitre 1*

*La surveillance de  
l'état des ouvrages  
en béton*

### 1.1. Introduction :

L'état de service d'un ouvrage est l'état permettant à cet ouvrage d'offrir, pour son exploitation, un niveau de service donné tant en ce qui concerne la sécurité, le confort des usagers que la pérennité de l'ouvrage, dans des conditions d'utilisation conformes à sa destination.

La surveillance d'un ouvrage doit donner à tout moment une juste idée de son état pour vérifier notamment :

- ✓ soit que l'état de service est normal : les opérations d'entretien doivent le maintenir ;
- ✓ soit que l'état de service est anormal ou risque de le devenir : des mesures doivent être prises alors pour assurer la sécurité des usagers et des tiers ; les opérations permettant de remettre l'ouvrage en état de service doivent être étudiées puis réalisées.

Elle s'exerce de façon continue ou périodique afin de suivre l'évolution d'un ouvrage à partir d'un état de référence.

### 1.2. La surveillance continue :

La surveillance continue doit s'exercer sur tous les ouvrages d'art du réseau routier de franchissement provisoires ou définitifs : ponts, viaducs, aqueducs, etc., c'est-à-dire toute ouverture supérieure ou égale à deux mètres.

Elle s'applique aux tunnels et tranchées couvertes quelle que soit leur longueur et à tous les ouvrages dont la stabilité est nécessaire à la sécurité d'une voie (murs de soutènement), quel que soit le matériau constitutif, qui ont plus de deux mètres de hauteur et qui supportent une plateforme routière ou un terrain surplombant une voie routière [1].

Elle doit permettre [2] :

- de donner l'alerte en cas d'inquiétudes relatives à la sécurité et, au besoin, de prendre, en cas de danger immédiat, les mesures nécessaires,
- de suivre, dans le temps, les actions subies par les ouvrages :
  - ✓ évolution des lits des cours d'eau due, par exemple à la suite d'extractions de matériaux,
  - ✓ forte augmentation de la circulation des poids-lourds due, par exemple à la mise en place d'une déviation provisoire, à l'installation à proximité de chantiers, carrières, industries,
  - ✓ salage d'un itinéraire,
  - ✓ passage de convois exceptionnels,
  - ✓ crue, glissement de terrain, vent violent, action des glaces en cas d'hiver exceptionnel,
  - ✓ accident ou incident grave, etc.

- de guetter l'apparition éventuelle d'anomalies dans le comportement tant des fondations que des superstructures des ouvrages sous l'effet d'actions permanentes ou exceptionnelles.



Figure.1.1. surveillance d'une structure.

### 1.3. La surveillance périodique :

La surveillance périodique comprend les contrôles annuels, visite d'évaluation image de qualité des ouvrages d'art (IQOA), les visites spécifiques périodiques et les inspections détaillées périodiques.

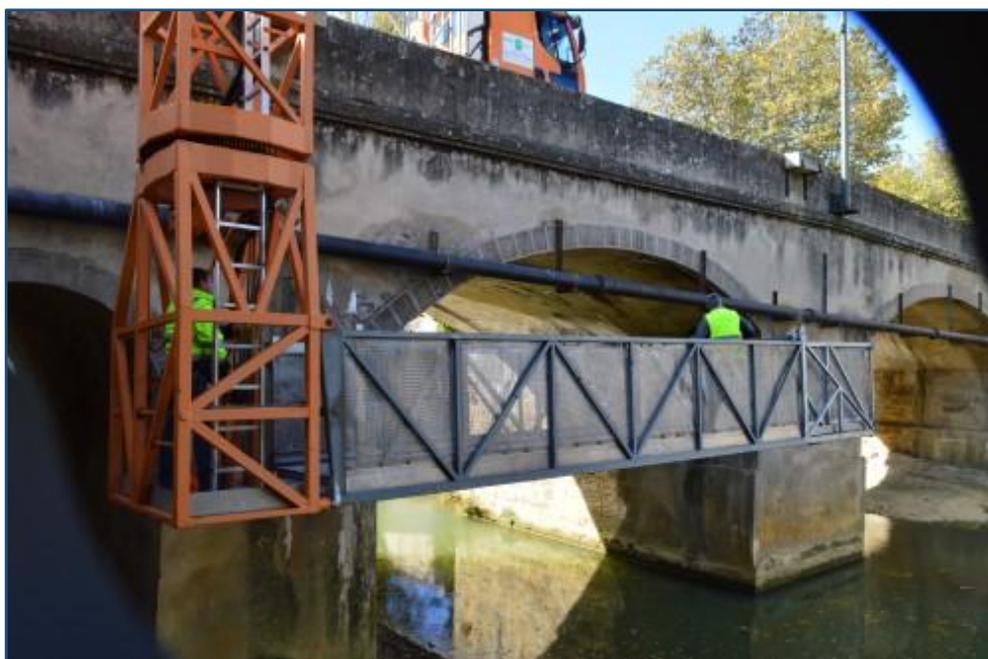


Figure.1.2. surveillance périodique d'un pont.

### 1.3.1. Les contrôles annuels :

Le contrôle annuel s'applique sur tous les ouvrages d'ouverture supérieure à 2 mètres et murs de soutènement de hauteur supérieure à 2 mètres s'ils ne font pas la même année l'objet d'une autre action, (visite d'évaluation IQOA, Inspection Détaillée Périodique)[1].

Ce contrôle est fait par les agents désignés par le subdivisionnaire. Il nécessite la connaissance du patrimoine et des ouvrages. Il peut être fait à l'occasion des opérations d'entretien courant (nettoyage) et permet de programmer d'autres interventions.

Il peut être fait séparément par l'agent désigné pour :

- ✓ déceler l'évolution manifeste des désordres déjà constatés,
- ✓ constater des désordres graves présentant une menace,
- ✓ peut permettre de relever la nature des travaux d'entretien courant et des petits travaux d'entretien spécialisé à réaliser.

### 1.3.2. Les visites d'évaluation IQOA :

La visite d'évaluation IQOA est effectuée tous les trois ans, pour des précisions complémentaires, se référer aux instructions relatives à IQOA [2].

La visite est faite en suivant les documents méthodologiques IQOA (Image de la Qualité des Ouvrages d'Art) destinés à faciliter la cotation des ouvrages par un agent spécialisé chargé de ces visites. Cet agent peut être un contrôleur spécialisé ou le correspondant ouvrages d'art. Cette visite doit être effectuée après nettoyage complet de l'ouvrage, débroussaillage y compris son environnement.

Elle comprend essentiellement les ouvrages suivants :

- ✓ Pont en maçonnerie à une arche unique avec élargissement éventuel.
- ✓ Ponts en béton armé
- ✓ Ponts dalles en béton précontraint.
- ✓ Buses métalliques d'ouverture inférieure à 5 m.
- ✓ Buses en béton à arche unique d'ouverture inférieure à 5 m.

La qualité des ouvrages est donc vérifiée selon 6 classes d'état [3]:

Tableau 1.1. Classification des ouvrages d'art selon la méthodologie I.Q.O.A [3].

Classe	Etat de l'ouvrage
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

### 1.3.3. Les inspections détaillées périodiques :

Cette action de surveillance nécessite l'intervention de personnel spécialisé et de matériel particulier pour établir un bilan de santé de l'ouvrage inspecté [4].

Elle a une périodicité normale de 6 ans. Elle peut être ramenée à 3 ans pour les ouvrages sensibles ou malades ou portée à 9 ans pour les ouvrages robustes.

### 1.3.4. Les visites spécifiques périodiques :

Cette action de surveillance nécessite l'intervention de personnel spécialisé et de matériel Particulier, elle est effectuée pour les ouvrages soumis ou non à inspection détaillée périodique dont certaines parties ne sont pas observables lors de la visite IQOA ou de l'inspection détaillée périodique afin de compléter les actions classiques de surveillance organisée.

La périodicité normale est de 6 ans. Elle peut être modulée entre 3 et 9 ans en fonction du risque d'évolution ou d'application de désordres sur les parties concernées.

#### **1.4. Actions particulières de surveillance [1]:**

##### **1.4.1. Inspection détaillée initiale :**

Cette inspection définit l'état de référence de l'ouvrage à partir duquel la surveillance permet d'apprécier son évolution. Elle sert à la gestion de l'ouvrage et non à la réception des travaux et permet d'acquérir la connaissance de l'ouvrage, de son accessibilité et de ses particularités. Cette inspection doit être très minutieuse.

Elle est dirigée et exploitée par un spécialiste en ouvrages d'art et en pathologie. Elle a lieu avant la remise de l'ouvrage au gestionnaire. Elle donne lieu à l'établissement d'un procès-verbal. Après exploitation, ce procès-verbal est classé dans le dossier d'ouvrage selon les modalités définies par le chef de service.

##### **1.4.2. Visites particulières de fin de garantie contractuelle ou de responsabilité :**

La Direction des Travaux Publics des Wilaya établit chaque année la liste des ouvrages devant faire l'objet d'une visite particulière en mentionnant la nature de la visite. Dans certains cas, cette visite peut être effectuée par un agent de la subdivision désigné par le subdivisionnaire.

Les procès-verbaux de ces visites servent de base aux actions de recours le cas échéant. Après exploitation, les procès-verbaux sont classés dans le dossier de l'ouvrage.

Cette visite sert à la vérification de l'état d'un ouvrage ou de parties d'ouvrage sous garantie contractuelle ou sous responsabilité décennale.

##### **1.4.3. Visites ou inspections détaillées exceptionnelles :**

A la suite de phénomènes naturels susceptibles d'endommager l'ouvrage, Le chef de la subdivision doit prendre l'initiative d'une visite, Cette visite doit être effectuée dans les plus brefs délais après que l'incident se soit produit.

Cette visite a pour buts :

- ✓ 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.
- ✓ connaître l'étendue des désordres et donc d'évaluer les méthodes les plus adaptées pour effectuer les réparations.

- ✓ faire 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.

### **1.5. Conclusion :**

On a donc procédé dans ce chapitre à la présentation des différents contrôles et visites effectués lors d'une surveillance qui permettent de donner une idée sur l'état de l'ouvrage, ce qui nous a permis, par la suite, de découvrir les désordres apparus.

*Chapitre 2*

*Entretien et  
réparation des  
ouvrages en  
béton*

### 2.1. Introduction :

L'entretien est une opération ayant pour but de maintenir un ouvrage dans son bon état de service. L'entretien a essentiellement un caractère préventif. Tous les ouvrages en béton doivent être entretenus.

On distingue l'entretien courant et l'entretien spécialisé, qui comportent des opérations systématiques et des opérations à la demande, précisées dans la deuxième partie de la présente instruction. Cette distinction est parfois difficile à faire.

### 2.2. L'entretien courant :

L'entretien courant s'agit des tâches courantes d'entretien à effectuer par les équipes d'exploitation chargées. Elles ne nécessitent pas la connaissance de techniques particulières et peuvent être effectuées avec les moyens dont disposent les Directions des Travaux Publics des Wilaya. Chaque tâche est présentée en indiquant les défauts ou désordres qui peuvent être constatés, l'intervention nécessaire, les moyens à mettre en œuvre, le mode opératoire.

Pour les moyens, ceux-ci étant très variables d'une Directions des Travaux Publics à une autre, et suivant la nature de la voie routière où se situe l'ouvrage, il s'agit d'indications générales, de conseils.

L'eau et la végétation constituent les principales causes de dégradation des ouvrages d'art. Les opérations d'entretien courant visent principalement à remédier à ces attaques, afin de faire en sorte que l'eau soit évacuée le plus efficacement possible de l'ouvrage afin qu'elle ne pénètre pas dans la structure et d'éliminer la végétation sur l'ouvrage et aux abords car elle désorganise les structures par ses racines et emprisonne l'humidité. L'entretien courant peut être réalisé par les communes par la régie (par exemple, les équipes d'exploitation chargées de la voirie) ou par un prestataire extérieur.

#### Les opérations d'entretien courant :

Il s'agit des opérations suivantes [4] :

- ✓ Elimination de toute végétation nuisible sur l'ensemble de l'ouvrage et à ses abords (perrés, talus).
- ✓ Nettoyage des dispositifs d'écoulement des eaux : gargouilles, barbacanes, fossés, caniveaux, drains.
- ✓ Nettoyage des dépôts en rives de la chaussée et sur les trottoirs.
- ✓ Nettoyage des joints de chaussée, des joints de trottoirs et de leurs accessoires.
- ✓ Nettoyage des sommiers d'appui, de l'intérieur du tablier.
- ✓ Contrôle de l'état et nettoyage des dispositifs de retenue (garde-corps, glissières, barrières) et des accès de visite (trappes, portes, échelles, nacelles), s'ils existent.

- ✓ Contrôle des dispositifs de fixation des réseaux concessionnaires à l'ouvrage.
- ✓ Nettoyage des graffitis et des affiches.
- ✓ Maintien en état de la signalisation relative à l'exploitation de l'ouvrage et située sur ses abords ou sur les voies (restrictions de circulation, de vitesse, limitation de tonnage...).
- ✓ Entretien courant de la chaussée sur ouvrage.

### 2.3. L'entretien spécialisé :

L'entretien spécialisé est celui qui concerne des opérations soit relevant de techniques spéciales (par exemple : soulèvement pour examen, remise en état ou éventuellement changement des appareils d'appui, changement des joints de chaussée et leurs accessoires, réfection des chapes d'étanchéité, réfection des couches de roulement, etc.), soit nécessitant des moyens particuliers (par exemple : passerelle pour l'exécution de certains travaux ou opérations d'entretien, mise en place d'enrochements, travaux immergés, boulonnage du rocher dans les tunnels, etc.). Ces opérations sont normalement prévisibles et doivent donc faire l'objet de programmes éventuellement pluriannuels.

La deuxième partie de l'instruction précise les différentes opérations qui peuvent être effectuées, au titre de l'entretien spécialisé, sur chaque type d'ouvrage.

Une fois les opérations décidées, après études conduites par la D.D.E (direction départementale de l'équipement), il est recommandé d'utiliser, pour la réalisation des travaux, la procédure de l'appel d'offres restreint qui permet de ne consulter que des entreprises compétentes spécialisées dans l'entretien ou la réparation des ouvrages en béton.

Les travaux doivent être préparés et exécutés avec beaucoup de soin et doivent être surveillés avec beaucoup d'attention. L'expérience enseigne en effet que des travaux simples (comme le rejointoiement de maçonneries, la réfection d'un talutage, la réfection partielle d'une peinture anticorrosion d'ouvrage métallique, etc.) sont plus complexes qu'il ne paraît à première vue et peuvent donner lieu à déboires, voire accident, s'ils ne sont pas précédés d'une étude, même sommaire, par un spécialiste averti.

Toutes les opérations d'entretien spécialisé effectuées sur un ouvrage font l'objet d'un sous-dossier qui est inséré dans le dossier d'ouvrage.

### 2.4. Les réparations :

La réparation et/ou le renforcement est une opération fixée à la suite d'une étude qui a porté sur la recherche des causes des désordres et la mise au point d'un projet de réparation ou renforcement. Il reste à choisir les matériaux et produits, le matériel de mise en œuvre, à réaliser les travaux et à contrôler l'ensemble de l'opération.

La réparation consiste à remettre, partiellement ou totalement, un ouvrage altéré dans un état de service attendu. Elle doit être précédée :

- ✓ d'investigations,
- ✓ d'un diagnostic,
- ✓ d'une réflexion sur le choix du type de réparation,
- ✓ d'une étude approfondie des différentes phases de la réparation, tenant compte notamment des conditions d'exploitation et servant à définir les conditions de réception et de contrôle de l'efficacité de la réparation dans le temps, réalisés par un bureau d'étude spécialisé dans la réparation des ouvrages en béton.

Un maître d'œuvre spécialisé est requis pour cadrer le marché des travaux et surveiller leur réalisation. Les opérations sont réalisées par des entreprises spécialisées dans la réparation des ouvrages d'art. Toutes les réparations effectuées sur un ouvrage font l'objet d'un archivage dans le dossier de l'ouvrage.

Suivant l'importance et les causes des désordres ou des insuffisances affectant un pont en béton, le projet de réparation repose, en général, sur la mise en œuvre d'une combinaison de plusieurs techniques que l'on peut ranger dans l'une des cinq catégories suivantes (auxquelles s'ajoute, dans les cas extrêmes, la solution de la démolition-reconstruction) :

- ✓ Les traitements de surface : ragréages et injection des fissures ;
- ✓ La protection du béton et des armatures ;
- ✓ La régénération des matériaux ;
- ✓ L'ajout de forces (ou de déformations) ;
- ✓ L'ajout de matière.

Dans ce qui suit, les principes généraux sont examinés pour les ponts en béton armé et en béton précontraint.

## **2.5. Les principales techniques de réparation ou de renforcement des ouvrages en béton :**

### **2.5.1. Traitements de surface :**

L'objectif du traitement de surface est de créer un support sain, propre, rugueux afin d'assurer une bonne adhérence sur la surface de reprise. Les principaux traitements de surface sont les ragréages et l'injection des fissures.

#### **➤ Ragréages :**

Le ragréage est une opération qui permet de combler les trous et de masquer les imperfections du béton par l'application d'un enduit de finition sur la surface travaillée.

L'expérience acquise dans le domaine des ponts au cours des vingt dernières années a conduit à sélectionner les produits les plus efficaces parmi ceux proposés par l'industrie chimique et à

réduire l'emploi des produits à base de résines synthétiques qui étaient en vogue dans les années quatre-vingts pour revenir vers l'utilisation plus traditionnelle de produits hydrauliques modifiés par l'ajout de polymères organiques.



Figure. 2.1. Le ragréage d'une structure en béton.

Avant de procéder à un ragréage, il est nécessaire de préparer avec soin les surfaces à traiter afin de créer un support sain, propre, rugueux, de nature à favoriser une bonne adhérence au niveau de la surface de reprise. Les techniques les plus courantes sont l'hydro démolition, le décapage au marteau pneumatique ou, dans les cas extrêmes, au brise-béton. Elles sont toutes traumatisantes pour le support à des degrés divers et doivent donc être sélectionnées avec soin en fonction des objectifs recherchés.

Pour un décapage en surface, le sablage (à sec ou humide) ou la projection d'eau sous très haute pression sont des techniques qui permettent d'obtenir d'excellents supports. Le décapage thermique, le décapage chimique et le rabotage mécanique sont des techniques déconseillées en raison de leur brutalité.

En présence d'aciers apparents corrodés, il est indispensable de les décaper (par sablage ou grenailage), puis de leur conférer une nouvelle protection à l'aide de produits hydrauliques ou de résines organiques, voire de les remplacer dans les cas extrêmes. Il est essentiel de dégager les armatures non seulement sur leur face apparente mais sur tout leur pourtour de façon à éliminer toute la partie dégradée du béton.

Il existe sur le marché une grande quantité de produits de ragréage qui peuvent être classés en trois catégories principales :

- ✓ les produits à base de liants hydrauliques, constitués par un mélange de sable, de ciment, de résines et, éventuellement de fibres ; ce sont les produits les plus utilisés ;
- ✓ les produits à base de résines de synthèse, constitués de sable (dans le cas de mortiers), de polymères organiques réactifs additionnés d'adjuvants spécifiques et, éventuellement, de charges minérales. Les produits les plus couramment utilisés sont ceux à base de résines époxydiques ou polyuréthanes ;
- ✓ les produits mixtes, qui sont des produits à base de ciment et de polymère organique réactif.

➤ **Injection des fissures :**

Selon l'origine des contraintes de traction qui les ont provoquées, les fissures offrent un faciès et un tracé typiques. Très souvent, notamment dans le cas de la flexion, la fissuration comporte des fissures principales nettes et rectilignes sur lesquelles se greffent de nombreuses ramifications. De telles ramifications peuvent exister aussi au voisinage des armatures proches de la fissure principale [6]:

Elles sont dues à l'effet d'entraînement des aciers dans la zone perturbée.

Les fissures sont caractérisées par :

- ✓ leur âge ;
- ✓ leur tracé, souvent révélateur de leur origine ;
- ✓ leur ouverture, mesurable à l'aide d'appareils spécialisés
- ✓ leur profondeur, permettant de distinguer les fissures traversantes, non visible ou de surface ;
- ✓ leur activité et/ou leur évolution, permettant de distinguer les fissures inertes des fissures actives dont l'ouverture varie en fonction de facteurs extérieurs tels que température, charges, vibrations, hygrométrie etc. La variation de cette ouverture définit le souffle de la fissure.

L'injection des fissures précède généralement un autre système de réparation. Il peut s'agir de simplement les colmater pour empêcher la pénétration de tout corps étranger et, en particulier, de l'eau, ou d'introduire un matériau en complément d'un ajout de forces par précontrainte pour rétablir le monolithisme de la structure.

On distingue deux grandes catégories de traitements : les traitements de surface et le traitement dans la masse.



Figure 2.2. Injection des fissures

➤ **Les traitements de surface :**

Les traitements de surface sont des traitements qui permettent essentiellement d'assurer ou de rétablir l'étanchéité de la surface d'une structure et d'éviter ou de stopper la corrosion des armatures.

Dans les zones soumises au gel, ce type de traitement peut en atténuer très efficacement les effets destructeurs. On peut citer :

- ✓ le calfeutrement, qui consiste à obturer la fissure par application d'un produit déposé dans une engravure façonnée le long de son tracé avec une ouverture de l'ordre des deux tiers de sa profondeur ;
- ✓ le pontage, qui rend hermétique l'ouverture de la fissure par application superficielle d'un film généralement armé et adhérent (épaisseur 3 mm) de part et d'autre des lèvres de la fracture. Le pontage s'insère le plus souvent dans un complexe de revêtement général ;
- ✓ l'imprégnation, qui permet d'étancher une surface présentant un réseau important et diffus de microfissures. Le produit est passé sur la surface concernée, à la brosse ou au rouleau. Il adhère à la surface et, en général, pénètre sur quelques millimètres dans les microfissures.

➤ **Le traitement dans la masse :**

Le traitement dans la masse consiste à injecter en profondeur un produit liquide qui, après durcissement, a des caractéristiques mécaniques voisines de celles du matériau environnant.

L'injection se fait par cheminement du produit liquide dans la fissure, de l'extérieur vers l'intérieur, après obturation de la partie visible de la fissure.

Dans le cas de fissures traversantes aveugles, l'injection est toujours difficile à réaliser puisqu'on ne peut intervenir que sur une seule face. La solution la plus couramment utilisée dans ce cas consiste à régler progressivement la viscosité du produit injecté en l'épaississant au fur et à mesure de l'injection, jusqu'à atteindre la pression dite de « refus » à partir de laquelle le liquide ne s'écoule plus.

### **Les produits pour injection :**

Deux grandes familles de produits existent, utilisables en traitement de surface comme en traitement dans la masse selon leur origine (minérale ou organique).

- ✓ Les produits minéraux sont des produits compatibles avec les milieux humides. Pendant la mise en œuvre sur le site, ils se présentent sous forme de solution ou de suspension aqueuse. Il s'agit principalement de coulis à base de ciments spéciaux, fabriqués à partir d'un clinker broyé très finement et adjuvantés par l'incorporation de produits synthétiques, de mortiers et pâtes modifiés par des résines qui leur confèrent une extrême souplesse en abaissant fortement leur module d'élasticité, et de silicates qui réagissent avec les ions calcium du béton et que l'on peut modifier par apport d'autres ions pour obtenir, après réaction, un réseau de cristaux insolubles.
- ✓ Les produits organiques sont des produits synthétiques à macromolécules formant une chaîne réticulaire : ce sont principalement des résines époxydiques, systèmes bi-composants therm durcissables, modifiables par des charges inertes, les résines polyesters et les polyuréthanes dont certains réagissent même presque instantanément au contact de l'eau (ce sont des résines dites « aqua-réactives », que l'on peut utiliser pour le blocage de venues d'eau). Ces résines permettent d'atteindre tous les degrés de dureté.

Leur résistance aux rayons ultraviolets est remarquable, ce qui en fait d'excellents produits de pontage.

Signalons l'existence de produits acryliques, d'emploi plutôt rare, et de silicones, produits mono-composants, qui réagissent avec l'humidité ambiante.

### **Les critères de choix :**

Les critères de choix des produits sont essentiellement liés aux objectifs visés et au milieu ambiant. Les plus importants sont :

- ✓ la compatibilité avec l'environnement ;

- ✓ la durée pratique d'utilisation (DPU), période de stabilité du produit dans sa phase d'application. La DPU permet de choisir un produit en fonction du temps d'application souhaité ;
- ✓ la viscosité, grandeur variable avec la température, qui caractérise la capacité d'un liquide à s'écouler ; l'injectabilité, notion complexe dans laquelle interviennent la viscosité, mais aussi les phénomènes de tension capillaire, de pouvoir mouillant, de porosité absorbante, de frottements, etc. L'essai d'injectabilité consiste à réaliser une véritable injection, sous pression constante (75 kPa), d'une colonne verticale transparente, remplie d'un sable silicieux calibré. On exprime l'injectabilité par le temps nécessaire au produit pour atteindre différents niveaux dans la colonne de sable.

### 2.5.2. Protection du béton :

Lorsque l'enrobage des aciers est trop poreux ou d'épaisseur insuffisante, ou lorsque l'environnement est particulièrement agressif, il est souvent nécessaire d'appliquer un traitement de protection du béton. Une telle protection peut aussi être appliquée à un mortier fraîchement déposé, vis-à-vis des agressions atmosphériques, de l'eau de mer, des attaques chimiques ou bactériologiques ou, tout simplement, vis-à-vis de la pénétration de l'eau, afin d'assurer une plus grande durabilité de la réparation. On distingue :

- ✓ les hydrofuges de surface ;
- ✓ les minéralisateurs ;
- ✓ les peintures ;
- ✓ les revêtements minces à base de liant hydraulique modifié ou à base de polymère ;
- ✓ les revêtements plastiques épais ;
- ✓ les produits d'imprégnation inhibiteurs de corrosion, dont les mono-fluorophosphates (MFP) dont le but, en pénétrant à travers le béton, est de ralentir et de stopper la corrosion des aciers. Apparus récemment sur le marché, leur mode d'action est encore mal connu.

#### ➤ Hydrofuges de surface :

Les hydrofuges de surface, encore appelés produits d'imprégnation, sont destinés à rendre la surface du béton imperméable à l'eau tout en assurant une perméabilité à la vapeur d'eau. Il s'agit principalement de silicones en solution aqueuse que l'on peut appliquer sur une surface légèrement humide ou de silicones. Ils présentent tous la propriété d'avoir un effet répulsif envers l'eau par modification de sa tension superficielle à la surface du matériau. Leur durée de vie est de l'ordre de quelques années, ce qui signifie que ce type de traitement doit être renouvelé régulièrement pour conserver son efficacité.

➤ **Minéralisateurs :**

Les minéralisateurs sont des produits qui contiennent des atomes de silicium capables de réagir avec le calcium contenu dans la chaux du ciment pour donner des microcristaux de C-S-H, dans le cadre d'une réaction de type pouzzolanique. Ce sont des produits d'imprégnation qui pénètrent dans les pores et créent une sorte de « minéralisation du support ». Les plus couramment utilisés sont les silicates alcalins qui sont parfois associés à des molécules organiques. Leur efficacité et leur durabilité sont semblables à celles des hydrofuges de surface.

➤ **Peinture :**

Les principales familles de peintures utilisées en génie civil sont :

- ✓ les copolymères acryliques ou vinyliques en émulsion aqueuse ;
- ✓ les copolymères acryliques en phase solvant ;
- ✓ les résines époxydiques ;
- ✓ les résines polyuréthanes
- ✓ les ciments-latex bi-composants.

Même si elles assurent une légère protection, les peintures ont essentiellement un rôle esthétique. Du point de vue des garanties, les systèmes actuels de peintures permettent d'obtenir une durabilité de 8 ans vis-à-vis des décollements, pelages et cloquages, et de 3 à 5 ans vis-à-vis de l'aspect. Les peintures à base de résines thermodurcissables (époxydiques, polyuréthanes) présentent en général de meilleures performances que les peintures à base de résines thermoplastiques (acryliques et vinyliques).

➤ **Revêtements minces à base de liant hydraulique modifié ou à base de polymère :**

Les revêtements minces à base de liant hydraulique modifié sont des produits bi-composants constitués d'un ciment additionné de charges minérales et d'une résine miscible souple (par exemple latex styrène-butadiène). Ils sont appliqués en une ou deux couches sur des épaisseurs totales de 1 à 3 mm. Les revêtements minces à base de polymère sont constitués de plusieurs couches de résines dont l'épaisseur totale est comprise entre 0,5 et 2 mm.

Ces revêtements minces constituent la meilleure protection contre les agressions extérieures. La normalisation développée dans le bâtiment pour classer les revêtements semi-épais d'imperméabilisation de façade peut être adoptée dans le domaine des ponts, en notant toutefois que celle-ci ne s'applique que pour les surfaces verticales. Pour les surfaces horizontales, la protection est plus difficile en raison des stagnations d'eau.

➤ **Revêtements plastiques épais :**

Les revêtements plastiques épais ont la même composition que les peintures classiques, mais comportent en plus des charges dont la granulométrie atteint le millimètre. Ils sont appliqués avec un dosage de 1,5 à 4 kg/m<sup>2</sup>, et donnent une épaisseur finale de 1 à 3 mm. Le liant est souvent une résine acrylique en émulsion.

Jusqu'à présent, leur intérêt n'a pas été prouvé dans le domaine de la protection des ponts.

### 2.5.3. Régénération des matériaux :

➤ **Réinjection des câbles de précontrainte :**

La technique de réinjection des câbles de précontrainte a beaucoup de points communs avec celle de l'injection de fissures. Il s'agit d'injecter des vides, souvent détectés par auscultation gamma-graphique et identifiés à l'aide de sondages, laissés par une injection incomplète de câbles de précontrainte.

Dès qu'un conduit est ouvert, on peut, grâce à un endoscope à fibre optique, faire une évaluation de l'état des armatures tendues (degré de corrosion) ; on peut également connaître avec précision le type de conduit de précontrainte utilisé et son diamètre. Il reste alors à évaluer l'importance du vide, c'est-à-dire le volume à injecter. La méthode la plus courante est la méthode par mise sous pression. Mais la mise en pression peut être remplacée par une mise en dépression : c'est le principe de la méthode d'injection par le vide.

Lorsque l'on procède à l'injection d'un câble, on introduit le coulis par une extrémité et on le fait progresser vers l'autre extrémité.

Dans le cas de défauts d'injection, il existe des zones vides dont on ne connaît pas l'étendue ; rechercher leurs extrémités conduirait à multiplier les sondages, avec le risque d'affaiblir dangereusement les sections résistantes pour constater en fin de compte que les extrémités se trouvent dans une zone inaccessible. C'est pour cette raison que la technique mise au point pour la réinjection est basée sur l'utilisation d'un seul point d'accès au câble qui peut se situer en n'importe quel point du tracé.

L'opération de réinjection consiste à remplacer l'air présent dans la cavité par un produit du type coulis de ciment très fluide et stable.

Le remplissage ne peut être complet que si l'on parvient à évacuer l'air emprisonné. Pour ce faire, on utilise la technique du vide qui exige l'emploi de tuyauteries et de raccords spéciaux, tant pour le circuit de mise sous vide, que pour celui d'injection qui est, lui aussi, à un certain moment, mis en dépression.

On injecte de préférence des produits ayant peu de parties volatiles et de forte densité (coulis de ciment par exemple), de façon à se réserver la possibilité de procéder à un contrôle gamma-graphique, une fois la réinjection terminée.

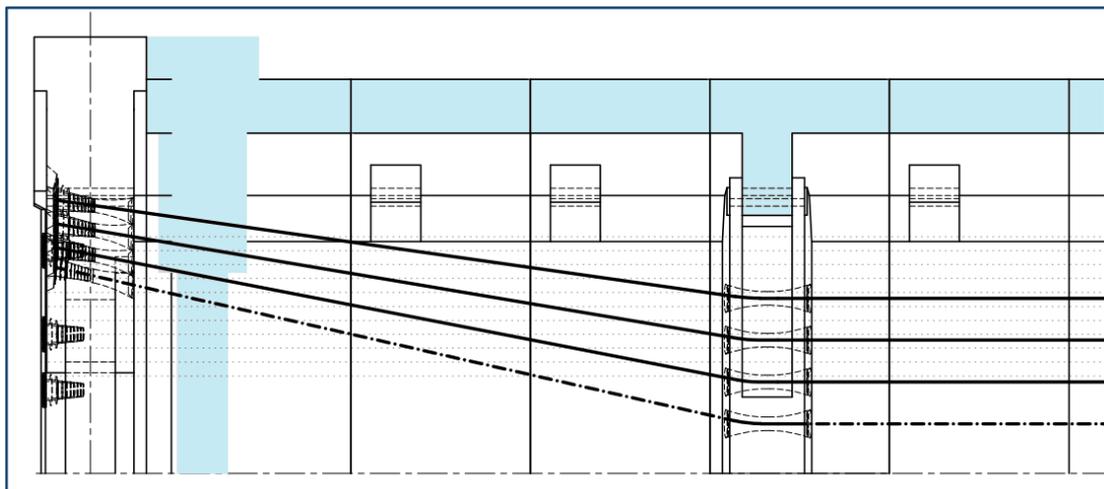


Figure 2.3. Renforcement par précontrainte additionnelle.

➤ **Extraction des chlorures [7]:**

Selon un procédé breveté, un treillis est fixé sur la paroi de béton à traiter, puis enrobé par une couche de pâte à papier humide projetée. Une tension électrique continue est appliquée entre ce treillis (anode) et la nappe d'armatures de l'ouvrage (cathode). Ce treillis est constitué d'acier, dans le cas d'une anode sacrificielle, et de titane, dans le cas d'une anode inerte. Les ions négatifs et, en particulier, les ions chlorures  $\text{Cl}^-$  placés dans ce champ électrique migrent vers l'anode. Cette opération provoque aussi, à la cathode, une réaction électrochimique avec création d'ions hydroxydes  $\text{OH}^-$  qui tendent à renforcer le pH autour de l'armature, mais qui migrent aussi, en partie, en direction de l'anode.

La densité de courant habituellement utilisée est d'environ  $1 \text{ A/m}^2$ , et les tensions se situent entre 30 et 40 V. Le traitement, qui peut durer de 6 à 12 semaines, permet d'extraire 40 à 50 % des chlorures situés dans le béton, surtout au voisinage de la surface.

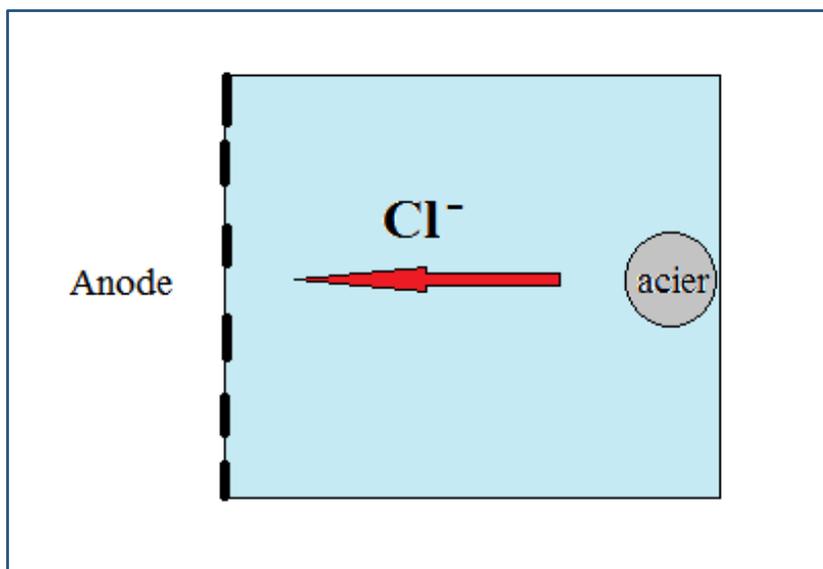


Figure 2.4. Extraction des chlorures par traitement électrochimique.

Le procédé est relativement coûteux et ne saurait apporter une solution définitive.

➤ **Réalcalinisation du béton [9]:**

Le principe et la mise en œuvre de la ré-alkalinisation du béton sont très proches de ceux relatifs à la méthode d'extraction des chlorures. Les deux différences principales résident dans le remplacement de la pâte à papier humide par une pâte à papier imprégnée d'une solution alcaline généralement à base de carbonate de sodium, et dans l'application d'une densité de courant plus faible (0,1 A/m<sup>2</sup>).

Pour la ré-alkalinisation électrochimique du béton carbonate, on insère un treillis métallique dans une couche de pâte de papier appliquée à la surface du béton, laquelle sert à emmagasiner une solution molaire 1,0 de carbonate de sodium. Le treillis métallique et l'armature sont reliés à une source de courant continu.

L'armature sert de cathode, et le treillis d'anode. Avec des tensions continues jusqu'à 40 V, on observe des densités de courant entre 0,5 et 1,0 A/m<sup>2</sup>.

Sous l'influence du courant électrique, il se forme à la surface de l'armature des ions hydroxyle, grâce auxquels la couche protectrice détruite se reconstitue et la rouille se transforme en combinaisons du fer passives. Il y a simultanément migrations de ions : les ions hydroxyle quittent l'armature à charge négative (cathode) et se dirigent vers le filet extérieur (anode), et les ions natrium, ainsi que d'autres à charge positive, migrent de la surface du béton en direction de la cathode. De plus, sous l'influence du champ électrique, la solution de carbonate de sodium pénètre dans le béton (électro-osmose).

Une fois le courant continu coupé, différentes réactions se produisent dans les pores du béton, qui se terminent par la formation de carbonate et de bicarbonate de sodium. Ces deux combinaisons protègent l'armature contre une nouvelle dépassivation et contre la corrosion s'ensuivant : elles forment ce qu'on appelle un «système tampon», qui maintient la valeur pH au-dessus de 10,0, même en cas de nouvelles attaques par le CO<sub>2</sub> contenu dans l'air.

On utilise cette méthode lorsque des surfaces de béton apparent ne doivent pas changer d'aspect (protection des monuments historiques) ou que, pour des raisons de stabilité, un poids supplémentaire n'est pas admissible.

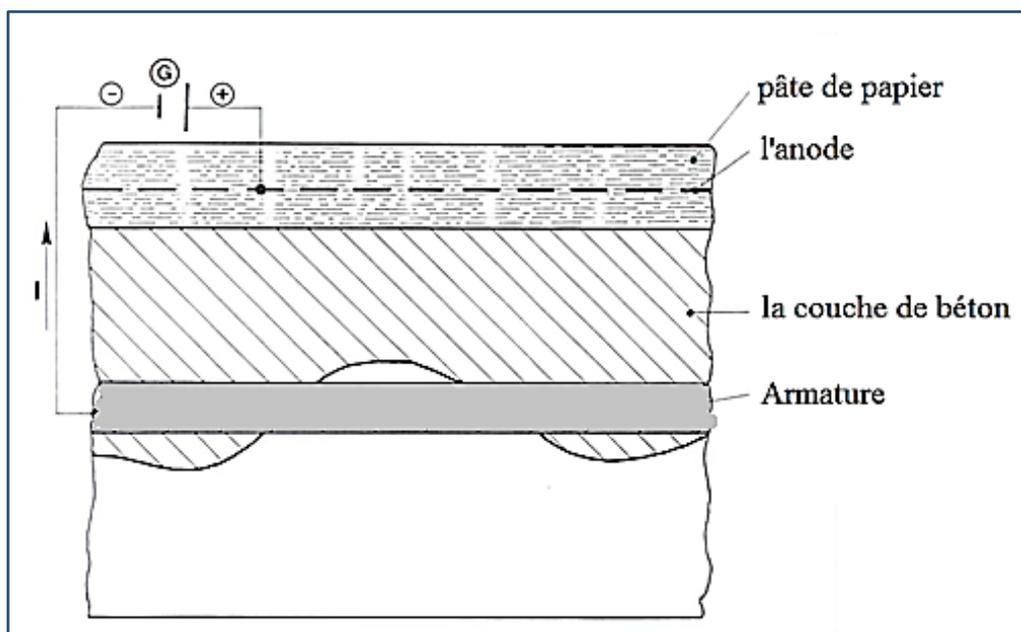


Figure 2.5. Réalkalinisation électrochimique de béton.

#### 2.5.4. Ajout de forces ou de déformations :

La précontrainte permet d'appliquer des efforts d'une intensité connue, en des points et suivant des directions bien définis, capables de s'opposer aux efforts générateurs des désordres. Elle est qualifiée d'additionnelle lorsqu'on l'applique à des ouvrages existants pour augmenter leur capacité portante ou prolonger leur durée d'exploitation.

La précontrainte additionnelle est, en général, extérieure. Ce n'est que pour des précontraintes très courtes (étriers actifs) ou pour des précontraintes prévues dès le projet pour être mises en place dans des réservations spécifiques que la précontrainte additionnelle peut être placée à l'intérieur même du béton. En règle générale, son application suppose un traitement préalable des fissures par injection car elle ne peut, à elle seule, refermer les fissures. Il est rare que l'on cherche à modifier le schéma statique initial théorique d'un pont en le renforçant ou en le réparant. Cela s'est rencontré dans le cas de tabliers à travées indépendantes, qui ont été rendus continus en supprimant les joints de dilatation (continuité géométrique) et en appliquant une précontrainte additionnelle sur toute leur longueur (continuité mécanique).

Dans tous les cas, la précontrainte additionnelle doit être démontable pour pouvoir être facilement remplacée en cas de défaillance [5].

#### ➤ Renforcement des ouvrages en flexion :

La plupart des renforcements par précontrainte de tabliers de ponts visent à augmenter leur résistance en flexion. Le tracé des armatures de précontrainte additionnelle peut être rectiligne ou polygonal. Un câblage rectiligne est facile à mettre en œuvre et les pertes d'effort par frottement sont localisées au voisinage des zones d'ancrage (donc très faibles). Il n'est véritablement efficace

que dans le cas d'un tablier de hauteur variable puisqu'il bénéficie de l'effet d'arc dû à la courbure de la fibre moyenne. Il est nettement moins efficace dans un tablier de hauteur constante lorsqu'il s'agit de renforcer la résistance en flexion à la fois sur appuis et en travée.

### **Ancrage des câbles :**

L'ancrage des câbles se fait soit directement sur les entretoises existantes (d'extrémité et intermédiaires) si elles sont suffisamment résistantes et si elles offrent des conditions d'accès correctes.

Il n'est pas toujours nécessaire, ni même possible, de prolonger les câbles de renfort jusqu'à une extrémité de l'ouvrage : on les ancre alors en partie courante en confectionnant des pièces spéciales : pièces rapportées s'appuyant sur une entretoise intermédiaire, solidarisés aux âmes de la structure.

Dans tous les cas, l'effort de précontrainte se trouve excentré par rapport à l'élément de structure qui le reçoit, et il convient de s'assurer que la structure existante est apte à supporter un tel effort excentré. Si ce n'est pas le cas, il faut créer de véritables entretoises, souvent conçues comme des systèmes de tirants-boutons avec compensation éventuelle des effets du retrait, du raccourcissement élastique et du fluage ultérieur à l'aide de vérins plats.

### **Déviations et maintien des câbles :**

Pour dévier un câble dans une entretoise existante on scelle un tube cintré (métallique ou en matériau synthétique) dans un trou foré dans l'entretoise.

Lorsqu'il est nécessaire de dévier l'armature en dehors des zones où l'on trouve des entretoises et lorsque les efforts à reprendre sont importants, il n'y a guère d'autre solution que de confectionner une nouvelle entretoise.

Dans la partie courante du tracé, les câbles doivent être maintenus pour éviter leur mise en résonance sous l'effet des vibrations induites par le trafic. On les fixe donc, par exemple à l'aide d'étriers métalliques, à des intervalles de l'ordre d'une quinzaine de mètres.

### **➤ Renforcement des ouvrages vis-à-vis de l'effort tranchant :**

Un câblage permet souvent de traiter simultanément les insuffisances de résistance à la flexion et à l'effort tranchant d'un tablier de pont : en jouant, dans une certaine mesure, sur l'inclinaison des câbles au voisinage des appuis intermédiaires, et donc sur l'emplacement des points de déviation, il est souvent possible d'optimiser le tracé des câbles de précontrainte. En général, les angles de déviation sont de l'ordre de  $10^\circ$  à  $15^\circ$ .

Lorsque le problème majeur est celui de la résistance à l'effort tranchant, et si l'inclinaison de câbles de précontrainte additionnelle n'est pas possible ou suffisante pour le traiter, on recourt à l'emploi d'étriers actifs, généralement verticaux et constitués de fils, de barres ou de mono-torons.

En tout état de cause, le renforcement par étriers actifs est une opération délicate, qui exige une analyse fine des contraintes.

### 2.5.5. Ajout de matière :

#### ➤ Béton projeté :

Il existe deux techniques principales de projection du béton, dont la différence principale réside dans la chronologie des opérations élémentaires : la projection par voie sèche et la projection par voie mouillée.

#### **Projection par voie sèche (avec ou sans prémouillage) :**

Avec cette technique, le mélange des constituants (à l'exception de l'eau) est introduit dans la machine à projeter, puis propulsé dans une canalisation par un flux d'air comprimé. Dans la projection sans prémouillage, l'eau est introduite au droit de la lance de projection, tandis qu'avec prémouillage l'eau est ajoutée dans la conduite deux à trois mètres avant la lance, ce qui a pour effet

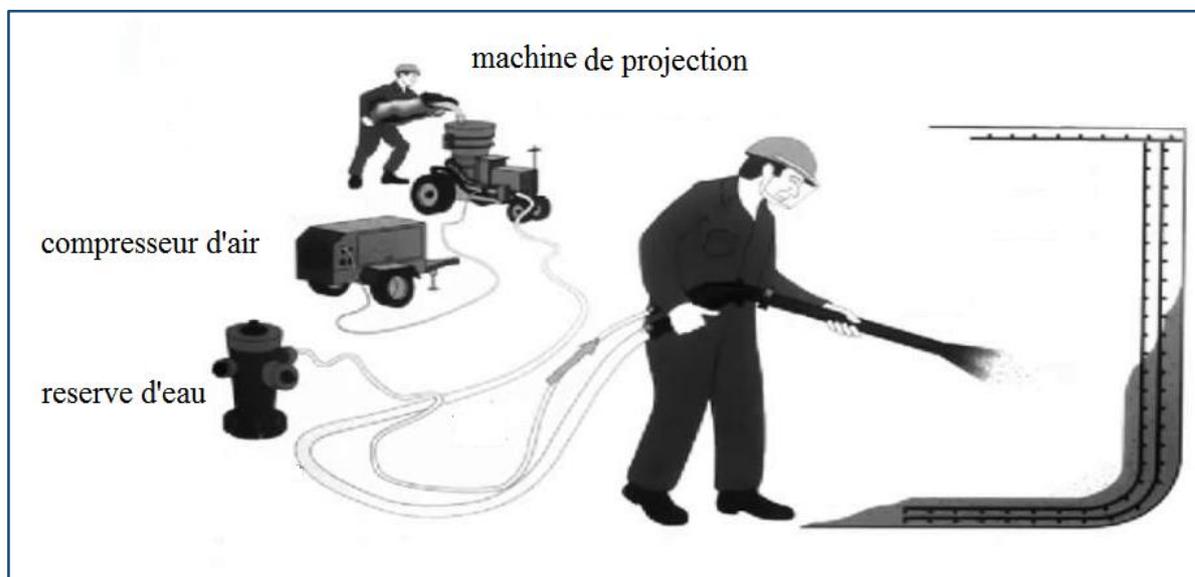


Figure 2.6. Projection par voie sèche.

de diminuer l'émission de poussières [10].

#### **Projection par voie mouillée :**

Le mélange de tous les constituants du béton, y compris l'eau, est introduit dans la machine à projeter. Le transport est effectué dans une canalisation, soit par un flux d'air comprimé pour la voie mouillée à flux dilué, soit par pompage pour la voie mouillée à flux dense. Dans les deux cas, une injection d'air comprimé à la lance de projection est nécessaire pour accélérer la vitesse de projection. Le béton peut être fabriqué dans une centrale à béton de chantier ou une centrale de béton prêt à l'emploi [11].

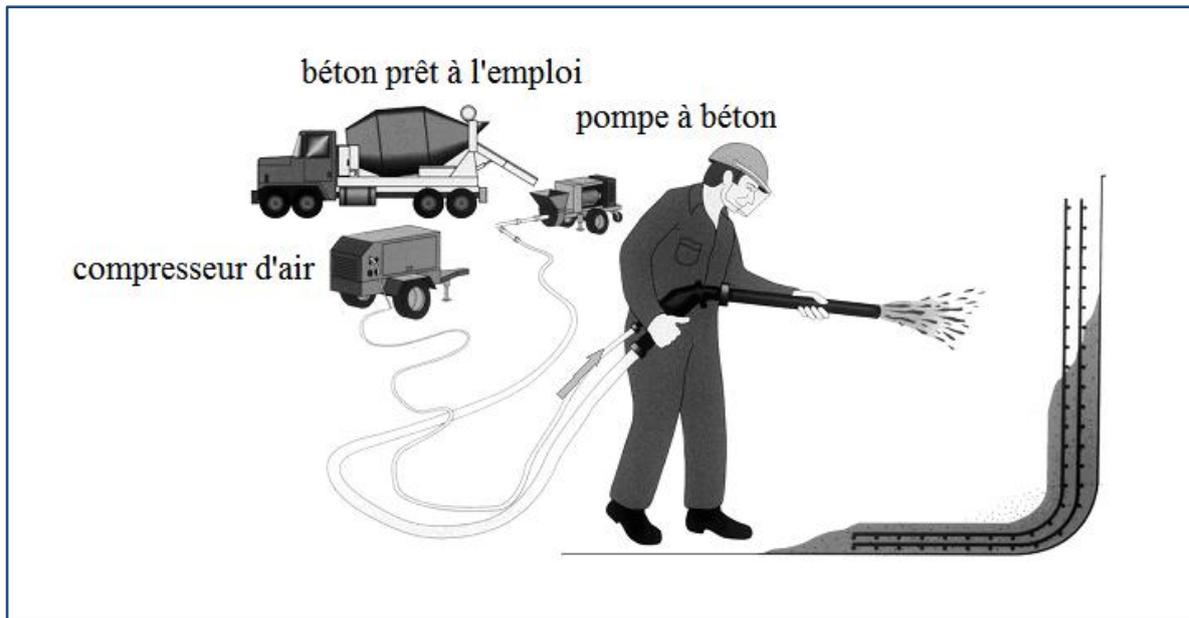


Figure 2.7. Projection par voie mouillée.

Chacun des procédés ayant ses avantages et ses inconvénients, il convient donc de choisir le mode de projection à utiliser suivant la nature des travaux à réaliser. Actuellement, l'emploi de la voie sèche est fortement recommandé pour la réparation des ouvrages en béton.

#### Formulation du béton :

La plupart des adjuvants et additions utilisés dans la fabrication des bétons spéciaux mis en place par coulage peuvent être incorporés dans le béton projeté, par exemple :

- ✓ les bétons à base de ciment fondu ou de ciment prompt ;
- ✓ les bétons légers à base de granulats légers (argile ou schiste expansé) ;
- ✓ les bétons à base de fibres métalliques, de verre ou de polypropylène ;
- ✓ les bétons avec incorporation de fumée de silice.

Il y a lieu de faire une distinction entre le béton et le mortier projeté utilisés en réparation de structures. Le mortier, appelé parfois « gunite », a des granulats dont la dimension est inférieure ou égale à 5 mm tandis que le béton contient des granulats dont la dimension peut aller jusqu'à 16 mm en voie sèche et 12 mm en voie mouillée.

Concernant le béton projeté utilisé en réparation ou renforcement d'ouvrages en béton, la dimension maximale des granulats doit être limitée par la nécessité de réaliser la mise en place du béton projeté en plusieurs passes d'épaisseur 5 à 7 cm, sans recours à l'emploi d'accélérateur de prise.

**Mise en œuvre du béton projeté :**

Le processus de mise en place du béton est différent selon le type de voie utilisé.

**En voie sèche [10]**, les divers éléments sortent de la lance avec une vitesse très élevée (de l'ordre de 100 m/s), et les gravillons qui arrivent avec une forte énergie sur le support rebondissent, alors que les grains de ciment et les gouttelettes d'eau forment un film de pâte pure qui adhère au support et qui accueille des grains de sable de plus en plus gros. La couche de mortier ainsi formée permet ensuite aux gravillons de s'insérer ; le rebond des gravillons diminue et la forte énergie cinétique des gravillons qui viennent frapper le béton en place assure son compactage et procure à ce matériau de meilleures performances mécaniques que celles du béton mis en œuvre par voie mouillée. Ce mécanisme d'adhésion rend inutile toute interposition d'une résine d'accrochage. Selon cette méthode, il est possible de transporter le béton sur des distances importantes : plus de 500 m à l'horizontale, et plus de 100 m à la verticale.

La voie sèche, en raison d'une résistance élevée, d'une bonne adhérence au support et d'une faible fissuration du béton projeté mis en œuvre, est donc bien adaptée à la réparation du béton et aux renforcements structuraux de ponts en béton ou en maçonnerie.

**Pour la voie mouillée [11]**, les rebonds de gravillons sont beaucoup plus faibles qu'en voie sèche, car ceux-ci arrivent sur le support en étant déjà enrobés par du liant, ce qui facilite leur accrochage. La projection d'un matériau mouillé évite la production de poussières qui constitue un inconvénient de la voie sèche. Dans le cas de la voie mouillée à flux dense, la vitesse de sortie du béton à la lance est relativement faible (de l'ordre de 1 m/s), et les caractéristiques mécaniques du matériau s'en trouvent diminuées par comparaison avec la voie sèche. La voie mouillée à flux dilué constitue une solution intermédiaire de mise en œuvre, qui fournit un béton projeté dont les caractéristiques mécaniques se rapprochent davantage de celles du béton projeté par voie sèche. La voie mouillée est donc employée préférentiellement dans le domaine des tunnels, de la projection sur terrain (talus, fouilles, berges...) et de la réparation des maçonneries (garnissage de vides, rejointoiements...).

**Dispositions générales :**

Pour obtenir une épaisseur fixée de béton, le nombre de passes doit être aussi faible que possible sans, toutefois, chercher à projeter des couches très épaisses, sous peine de provoquer une décohésion du béton ou même de faire retomber les couches. C'est ainsi qu'avec la voie sèche l'épaisseur souhaitable est de 5 cm à 7 cm maximum. De même que l'adhérence entre béton support et béton projeté doit être bonne, celle entre les diverses couches de béton projeté doit être de qualité; pour cela, il est conseillé d'éliminer par balayage la laitance de la surface de la couche précédente lorsque celle-ci termine sa prise, et de traiter par sablage accompagné d'une humidification de cette même surface lorsque la couche précédente a déjà fait prise. En aucune manière il ne faut interposer de résine d'accrochage entre couches, ni talocher une couche de béton projeté qui joue un rôle structurant : seule peut être talochée une éventuelle couche de finition de faible épaisseur.

Si le béton projeté par voie sèche pose rarement des problèmes de retrait, il convient toutefois d'effectuer une cure soignée pendant plusieurs heures, en particulier pour les parements exposés au soleil ou au vent.

Comme dans le cas des réparations structurales, les adjuvants sont inutiles dans la mesure où les qualités intrinsèques du béton projeté par voie sèche sont suffisantes.

#### ➤ **Coulage ou injection de béton ou de mortier :**

Lorsque le volume de béton à reconstituer est assez important ou de forte épaisseur (au moins 5 à 10 cm), les techniques de ragréage et de béton projeté peuvent être inadaptées pour des raisons techniques ou économiques. Une technique alternative permet alors de reconstituer une partie de structure en béton dégradé : le coulage ou l'injection de béton, de mortier ou de coulis. Ce type de réparation est généralement durable, pourvu que la compatibilité chimique entre le nouveau ciment et le ciment en place ait été vérifiée. En raison des épaisseurs mises en œuvre, on ne rencontre pas les phénomènes de gradient thermique de surface qui endommagent parfois la surface de reprise et provoquent le décollement des ragréages. En plus, les épaisseurs mises en œuvre permettent d'armer le béton rapporté et de le connecter à son support.

La technique traditionnelle de remplissage par coulage consiste à remplir les coffrages à l'aide de béton ou de mortier en évitant l'emprisonnement d'air et la ségrégation du matériau coulé. Mais on peut également mettre en place, dans un premier temps, les granulats à l'intérieur du coffrage, puis injecter un coulis de ciment ou un mortier fluide pour remplir les interstices entre les granulats (béton « prepacked »). La principale difficulté de cette méthode réside dans la maîtrise des vides laissés entre les granulats, car des bouchons peuvent se former lors de la mise en place des granulats sans que l'on puisse toujours s'en apercevoir. Enfin, une injection de coulis peut être pratiquée lorsque l'on désire consolider des nids de cailloux qui présentent une certaine résistance et que l'on ne souhaite pas détruire. Le coulis doit être suffisamment fluide pour remplir les interstices restés vides. L'opération d'injection nécessite le perçage de deux trous dans le nid de cailloux afin de disposer le tube d'injection, équipé d'une vanne permettant de maintenir une légère pression après l'injection, et le tube servant d'évent.

#### ➤ **Ajout d'armatures :**

Cette technique consiste, après repiquage du béton existant (et éventuellement élimination du béton dégradé), à disposer des aciers passifs et à les solidariser à la structure par du béton projeté ou du béton (voire du mortier) coulé en place. Ces aciers sont reliés à la structure à l'aide d'aciers de couture dimensionnés par application de la « règle des coutures », en assimilant l'interface entre le nouveau béton et la structure à une reprise de bétonnage.

Si un pourcentage important de la section des aciers existants a disparu en raison de la corrosion, il peut être nécessaire de procéder à un remplacement ou un ajout d'aciers passifs. Dans le cas des ragréages, lorsque les longueurs de recouvrement sont insuffisantes, il est alors possible de souder les nouvelles armatures sur les aciers existants, à condition que la soudabilité de ces derniers ait été vérifiée au préalable. Si les aciers existants ne sont pas soudables, on peut utiliser

des coupleurs mécaniques dont l'encombrement peut nécessiter localement un dégagement plus important de béton.

Enfin, le scellement des connecteurs dans le béton support est assuré de façon pratique à l'aide d'une résine époxydique spécialement choisie pour ses capacités de scellement.

En cas de recours à du béton projeté, et dans le cas où le projet nécessite de superposer plusieurs lits d'armatures ou plusieurs treillis, il faut éviter de poser toutes les armatures avant la projection en les mettant en place après enrobage de la nappe précédente. De même, il faut éviter de regrouper les barres par paquets et laisser un espace suffisant entre chaque armature (au moins 3 à 4 cm), sinon il se produit un phénomène d'ombre derrière l'armature où le béton présente de nombreux vides qui sont nuisibles à l'adhérence des aciers. En outre, pour éviter que la mise en vibration des armatures sous l'effet de la projection ne provoque une décohé sion du béton projeté, il est nécessaire de les fixer par un nombre suffisant de points (4 points au mètre carré pour du treillis soudé).

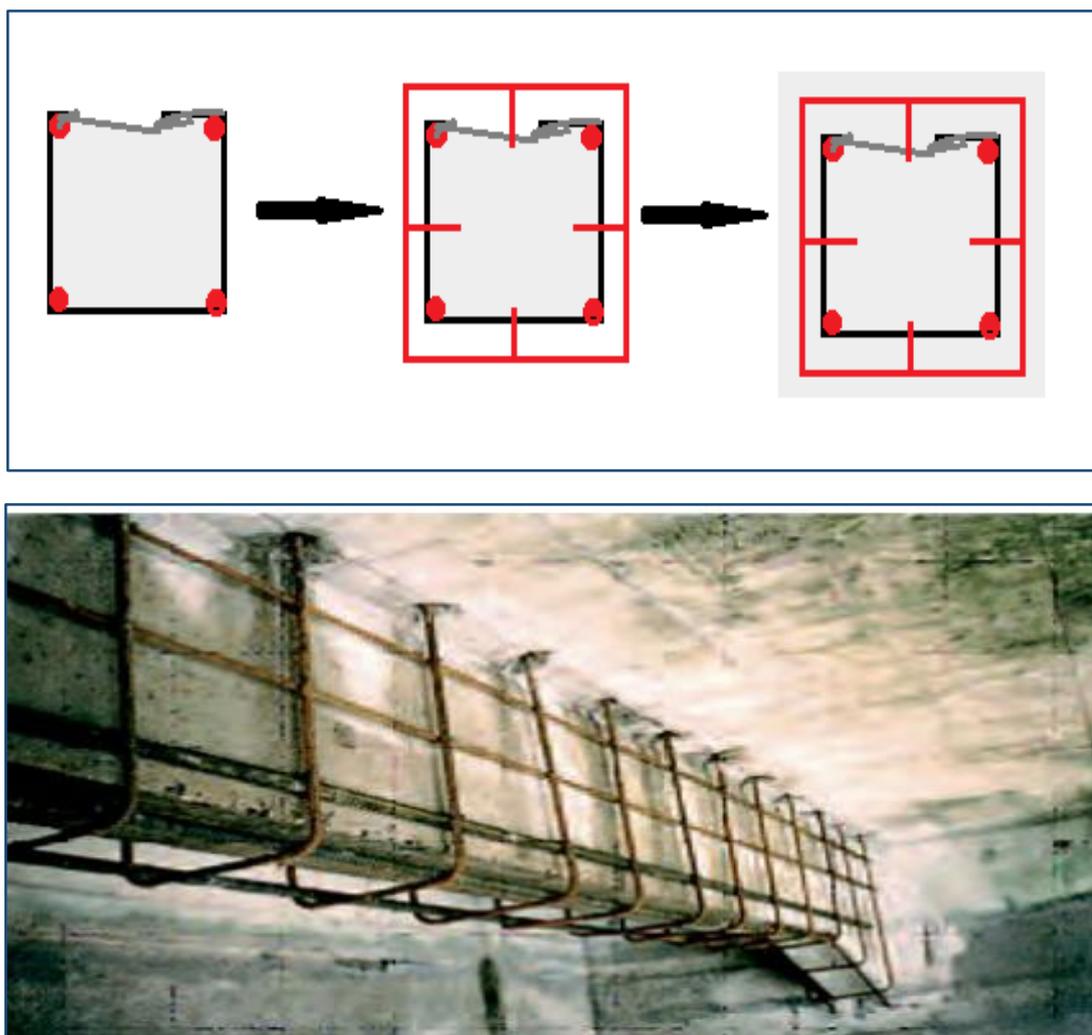


Figure 2.8. Renforcement par ajout d'armature.

➤ **Renforcement des structures à l'aide de plats métalliques collés :**

La technique des tôles collées, qui fut utilisée d'abord dans le domaine du bâtiment industriel, s'est vite répandue dans le domaine des ouvrages d'art où, dans bien des cas, elle a permis soit d'accroître la capacité portante d'un ouvrage, soit de renforcer localement une structure présentant des insuffisances de résistance.

Elle est applicable aux structures en béton armé et aux zones fonctionnant en béton armé des structures précontraintes. Diverses conditions doivent être réunies pour la bonne réussite d'une opération de renforcement ou de réparation.

La surface du béton doit subir, avant tout, une préparation soignée (burinage, bouchardage, voire sablage à sec ou humide selon les conditions du chantier) ayant pour but d'éliminer toutes les parties peu adhérentes et de supprimer les imperfections locales afin de la rendre la plus plane possible.

Le mortier de ragréage est destiné à pallier, dans certains endroits, le manque d'enrobage des armatures internes ou bien à reprofiler la surface qui n'aurait pu efficacement être traitée par les précédentes techniques, en limitant la surface à ragréer à 20 % de la surface de collage et en s'assurant qu'il n'y a aucune zone ragréée en extrémité de tôles.

L'acier de renfort est constitué, dans la plupart des cas, de tôles en acier E24-2 répondant au minimum aux caractéristiques de la norme NF A 35-501 (cf. [Doc C 4 503]). Dans le cas où il est nécessaire de souder les tôles, on utilise de l'acier E 24-3. Ces tôles ont une épaisseur de 3 à 5 mm. Le choix d'un acier de nuance supérieure ou d'épaisseur plus importante est à déconseiller car il faut que l'acier se plastifie avant son décollement de façon à obtenir une structure ductile et non fragile.

La protection des aciers contre la corrosion sur leur face visible doit être assurée en utilisant les produits les plus classiques pour la protection des aciers de structures.

Le primaire d'accrochage est destiné à assurer une bonne adhérence entre la colle et le béton.

La colle est en général une résine époxydique choisie pour ses propriétés d'adhérence à l'acier et au béton. L'épaisseur minimale de colle est de l'ordre du millimètre.

Pour que l'adhérence entre l'acier et la colle ait une bonne tenue, les tôles utilisées doivent recevoir toute leur préparation en usine (découpage, préassemblage si besoin est, abattage des arêtes et enfin sablage). Le sablage doit donner à la surface une rugosité supérieure à 12, classe 10 de la norme NF E 05-51 (cf. [Doc C 4 503]).

Sans protection particulière, il est possible d'utiliser les tôles ainsi préparées dans la demi-journée suivante. Pour des délais d'attente supérieurs entre la préparation et la mise en œuvre, les tôles doivent être protégées en utilisant une pellicule souple, de type vernis compatible avec les colles utilisées, ou bien en appliquant un primaire époxydique de même nature que la colle, qui doit être rayé (déglacé) soigneusement avant encollage. Le transport entre l'usine et le lieu de mise en œuvre doit être réalisé avec soin afin d'éviter d'endommager cette protection.

Le dispositif de serrage peut, suivant les cas, être constitué de serre-joints, de barres filetées traversant l'élément ou scellées, d'étais ou de coins. Il doit permettre d'appliquer sur toute la tôle une pression voisine de 4 kPa durant toute la durée de polymérisation de la colle. Il convient de s'assurer préalablement que la structure peut reprendre les efforts de serrage sans dommage.

Dans quelques cas particuliers, la section de tôle à mettre en œuvre est supérieure à celle que l'on peut mettre en place en utilisant des tôles d'épaisseur comprise entre 3 et 5 mm. Plutôt que d'avoir recours à des tôles de forte épaisseur difficiles à mettre en œuvre et dont le comportement peut amener certaines restrictions, on préfère superposer des tôles par collage. Mais la répartition des efforts entre les différentes tôles nécessite une étude soignée à l'aide de modèles aux éléments finis.

#### ➤ Renforcement par collage de tissus composites :

Afin de s'affranchir des difficultés liées à la mise en œuvre des tôles collées, plusieurs groupes d'industriels et de laboratoires ont entrepris des recherches portant sur l'emploi de matériaux composites. La voie la plus prometteuse semble être le renforcement des structures en béton, en acier ou en bois par imprégnation et collage d'un tissu sec à base de fibres de carbone.

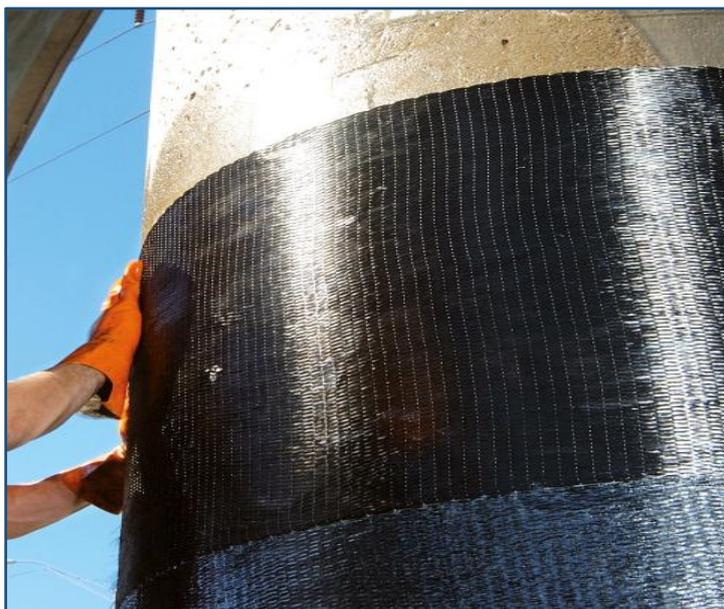


Figure 2.9. Renforcement d'un appui par un tissu composite.

#### Propriétés des fibres de carbone :

Les fibres de carbone [3], fabriquées en France par SOFICAR sous licence japonaise, sont obtenues par pyrolyse de fibres organiques réticulées et orientées en atmosphère contrôlée. Elles s'utilisent essentiellement sous la forme de matériaux composites pour conférer au produit fini le meilleur des propriétés physiques, statiques et dynamiques. Ces matériaux présentent une contrainte de rupture très élevée pour une densité cinq fois moindre que celle de l'acier.

Les composites issus de fibres de carbone bénéficient de caractéristiques sans équivalent et de propriétés physiques très étendues :

- ✓ grande résistance et haut module d'élasticité en traction ;
- ✓ grande résistance à la fatigue et à la déformation ;
- ✓ légèreté ;
- ✓ grande résistance à l'usure ;
- ✓ absorption des vibrations ;
- ✓ grande stabilité dimensionnelle ;
- ✓ grande stabilité thermique (le carbone est pratiquement incombustible) ;
- ✓ grande résistance à la corrosion ;
- ✓ bonnes conductivités thermique et électrique ;
- ✓ transparence aux rayons X.

#### **Propriétés du tissu de fibres de carbone :**

Le TFC, du type T700, est formé d'une chaîne et d'une trame dont les sections relatives peuvent être modulées à la demande de façon à présenter une résistance anisotrope. Il est livré en rouleaux de largeur standard, soit 150 et 300 mm, prêts à l'emploi. Sa souplesse lui permet de s'appliquer sans difficulté sur des surfaces courbes telles que les colonnes cylindriques par exemple [4] ; moyennant un calepinage convenable, il peut même être utilisé sur des surfaces non développables.

D'un transport et d'une manutention faciles (il ne pèse que 800 g par mètre carré), le TFC peut être aisément découpé sur place à la forme désirée ; sa mise en œuvre n'exige qu'un échafaudage léger.

À l'inverse des tôles d'acier, le TFC ne nécessite aucune pression de contact pendant le durcissement de la résine. Sa faible épaisseur (0,8 mm) permet son entraînement en traction par la résine durcie sans flexion parasite notable.

Le renfort à base de TFC présente aussi plusieurs avantages déterminants en service :

- ✓ insensibilité à la corrosion ;
- ✓ bonne tenue aux chocs ; collé en sous-face d'un pont-dalle, par exemple, le TFC est moins sensible que la tôle au frottement des bâches flottantes des camions passant sous l'ouvrage ;
- ✓ excellente résistance à la fatigue et aux sollicitations dynamiques.

**Propriétés de la résine de collage :**

L'un des avantages du procédé TFC réside aussi dans le fait que la résine est utilisée à double fin ; elle réalise à la fois l'imprégnation du tissu et son collage au support. Il en résulte, d'une part, une plus grande simplicité de mise en œuvre et, d'autre part, un fonctionnement mécanique amélioré, le renfort ne comportant qu'une seule surface de contact au lieu de deux dans le cas du collage d'une plaque rigide[12].

La résine peut être appliquée sur un support humide ; après mélange des deux composants, sa durée de prise et de durcissement est de quelques heures ; cette durée varie faiblement en fonction de la température. Pendant le durcissement de la résine, il n'est pas nécessaire de maintenir une pression de contact comme dans le cas des plaques rigides.

**Procédure de mise en œuvre du TFC :**

Dans le cas du béton, il convient d'effectuer un sablage à sec en vue d'obtenir un état de surface rugueux et uniforme en tous points avec des reliefs d'impact compris entre 0,5 et 1 mm ; les dépôts de poussières et les particules non adhérentes sont éliminés par un brossage énergétique. Dans le cas de l'acier, de la même façon, il convient d'éliminer les parties oxydées non adhérentes et de dégraisser la surface. Dans le cas du bois, il est nécessaire de mettre à nu le matériau sain en éliminant par exemple les couches de peinture ou les parties contaminées après un incendie.

Une couche de résine XEP 2919 est d'abord appliquée au rouleau à poils ras de façon à atteindre un dépôt de 650 à 700 g/m<sup>2</sup>[13].

. Le TFC, protégé par une feuille de polyéthylène, est ensuite appliqué. Si nécessaire, il est possible de juxtaposer plusieurs bandes bord à bord. Puis, une couche d'imprégnation de la même résine est mise en place à la spatule à raison de 700 g/m<sup>2</sup> environ. Si nécessaire, cette opération peut être renouvelée pour une deuxième couche de TFC. Enfin, une couche de fermeture, appliquée à la spatule, est constituée de la même résine additionnée d'une pâte colorante assortie au support.

**Dimensionnement des renforts :**

En règle générale, le TFC est appliqué sur une structure soumise à l'action de son poids propre et des charges permanentes ; il n'est donc sollicité que par les actions variables : charges d'exploitation et, le cas échéant, climatiques.

En partie courante, le TFC subit, sous l'action de ces charges, un allongement égal à celui de son support, lui-même dicté par l'allongement de son armature, active ou passive.

Le module élastique du TFC est sensiblement égal à la moitié de celui de l'acier ; donc, à allongement égal, la contrainte qu'il subit, du fait des charges variables, est voisine de la moitié de la variation de contrainte de l'armature d'acier sous les mêmes charges ; cette variation, pour un ouvrage courant, est de l'ordre de 150 MPa au maximum, soit 10 à 15 % de la contrainte de rupture. Elle est très inférieure au seuil de fatigue du matériau.

En section courante, le TFC se comporte comme une armature supplémentaire dont il est facile de tenir compte dans une vérification en flexion en application du diagramme des trois pivots

tel que proposé par l'article 6.3.3 des Règles BPEL ou l'article 4.3.1.2 de l'ENV1992-1.1 (Eurocode 2) (cf. [Doc C 4 503]).

Une bande de 300 mm de largeur en une seule couche est susceptible de mobiliser une force de 250 kN à la rupture ; on notera qu'il n'est pas nécessaire d'appliquer à cette force un coefficient minrateur comme on le fait pour une tôle collée, car la faible épaisseur du TFC et son mode d'imprégnation rendent négligeable l'effet de la flexion.

L'allongement à la rupture du matériau, compris entre 1,2 et 1,9 %, est supérieur à la limite conventionnelle de 1 % du diagramme des trois pivots, ce qui permet de prendre en compte la totalité des sections cumulées de l'armature existante et de celle de renfort. Les différents essais effectués sur poutres en béton armé confirment pleinement la validité de cette méthode simple de calcul.

L'examen des poutres après essais montre que la rupture s'amorce toujours dans la couche de béton non armé située entre l'armature inférieure et le renfort. Pour éviter des ruptures prématurées par cisaillement du béton, trois solutions sont possibles.

- ✓ Emploi d'un renfort d'une longueur suffisante pour que ses extrémités soient situées dans une zone où la contrainte du béton est faible ; cette solution est onéreuse et n'est pas toujours envisageable ;
- ✓ Découpe en sifflet de l'extrémité du plat ; cette forme en pointe, avec des pentes de l'ordre de 1/5, est directement dérivée de celle des plats de renfort soudés des structures métalliques qui rencontraient les mêmes difficultés ; elle permet d'étaler le pic de contrainte sur une longueur suffisante pour que la contrainte de rupture du béton ne soit pas atteinte ;
- ✓ Clouage de la bande par des goujons scellés dans la structure. Des essais de validation de cette solution sont en cours de réalisation.

Suivant la dimension des structures à renforcer et la nature des sollicitations, les solutions 2 et 3 peuvent être appliquées, séparément ou simultanément.

## 2.6. Conclusion :

Ce chapitre, est pour but de fixer les principes et les modalités de l'entretien des ouvrages en béton et les principales techniques de réparation en cas de désordres.

*conclusion  
générale*

Au terme de ce projet de Master, le bilan des connaissances et des compétences acquises me permet de conclure que cette expérience a été riche en enseignements. j'ai pu découvrir que toutes les structures créées par l'homme s'usent et se dégradent avec le temps, certains parfois très tôt après leur construction, et que la qualité d'un ouvrage d'art est le fruit d'une méthode qui suppose un travail organisé entre les différents acteurs.

En outre, les conditions d'utilisation évoluent et l'amélioration continue des connaissances peut éclairer les problèmes d'un jour nouveau.

Les ouvrages d'art n'échappent pas à la règle générale mais doivent assurer en permanence et en toute sécurité les services pour lesquels ils ont été construits.

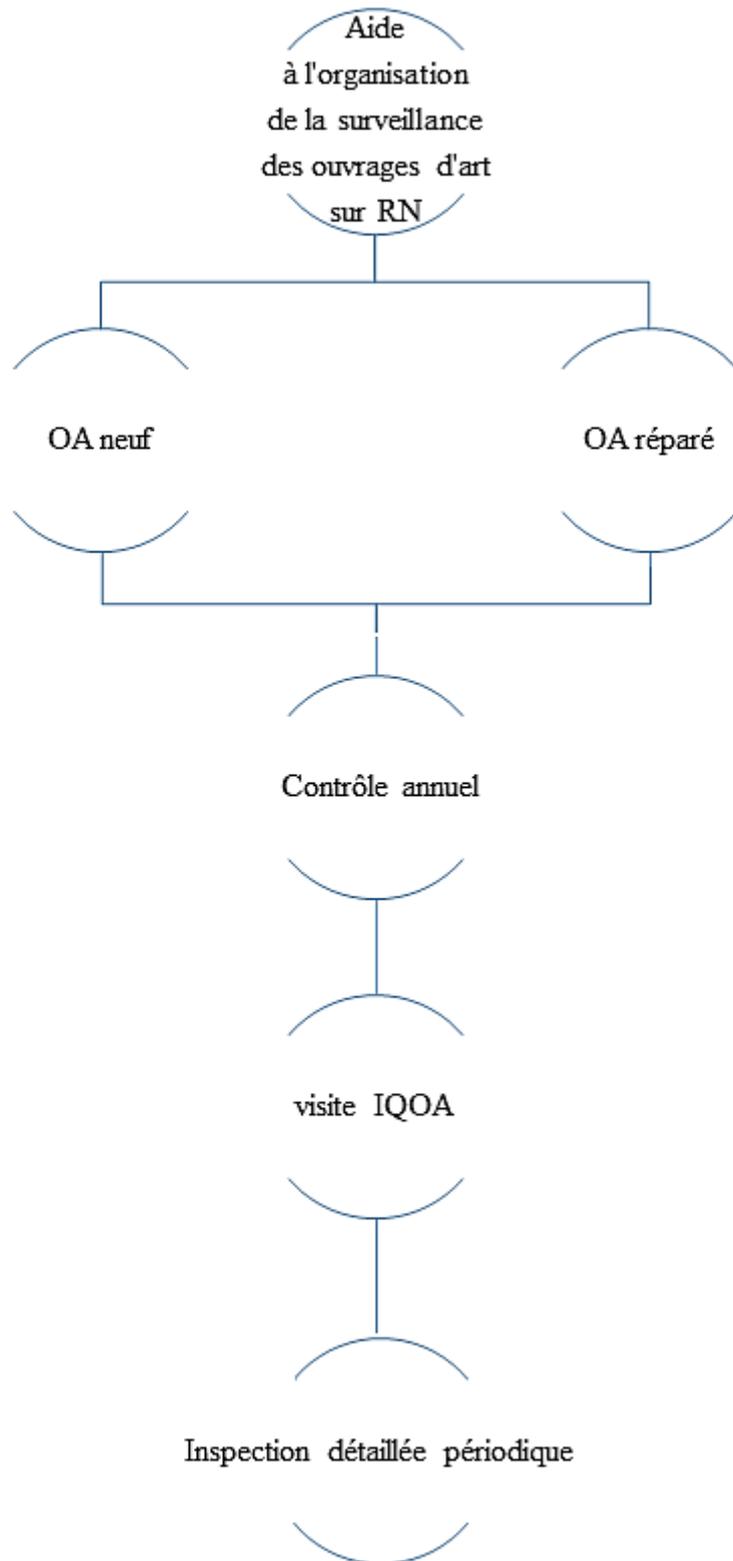
Il est donc nécessaire, pour assurer la sécurité publique, de surveiller systématiquement et attentivement leur état, leurs conditions d'utilisation et d'exécution. En temps utile et de la façon la plus économique, les opérations de sauvegarde, d'entretien ou de réparation permettent de les maintenir en état de service.

## Bibliographie

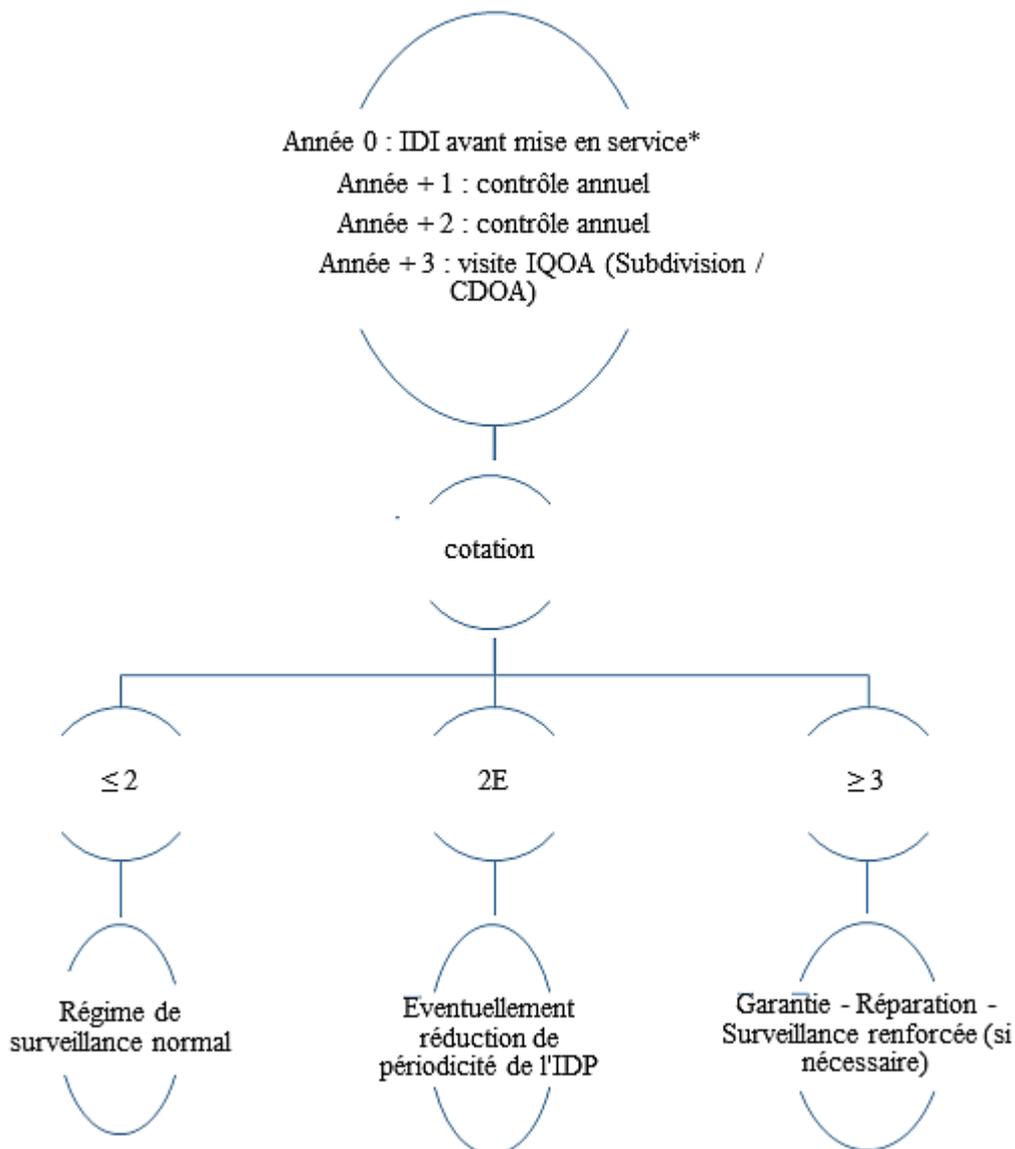
- [1] SETRA. Entretien des ouvrages d'art, France : janvier 2000, 186 p.
- [2] Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art. Paris : octobre 1979, 51 p.
- [3] Classification des ouvrages selon la méthodologie images de la qualité des ouvrages d'art, mai 1996, 26 p.
- [4] Instruction technique du 19 octobre 1979, 31 FASCICULE Ponts en béton non armé et en béton armé. Septembre 1990.
- [5] J.A.CALGARO et R.LACROIX, Maintenance et réparation des ponts, paris : 1997, 390 p.
- [6] Béton et maçonnerie I Traitements des fissures, FABEM 3 - Version 2, Novembre 2013.
- [7] Hermann, K, «Protection cathodique contre la corrosion», Bulletin du Ciment 61 [20] (1993).
- [9] J.Bennett et T.J. Schue, «Evaluation of Nor cure process for electrochemical Chloride removal from steel-reinforced concrete bridge components», Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC (1992).
- [10] J.V.MIRANDA, techniques et systèmes de renfort des structures en béton 2004.
- [11] A.PLUMIER, pathologie et réparations structurelles des constructions, ArGenCo, édition 2006.
- [12] Mouloud Abdessemed, Etude expérimentale et modélisation du comportement des poutres en béton armé renforcées par des matériaux composites sous flexion : Cas des ponts.  
Thèse de Doctorat : génie civil : Alger, Ecole Nationale Polytechnique : 2011.
- [13] A.PLUMIER, Mouloud Abdessemed, Ratiba Fatma Ghachi. Analyse numérique du renforcement des piles de pont par fibre de carbone.  
Projet de fin d'étude : génie civil : Alger, Ecole Nationale Polytechnique : 2012.

# Annexe

Logigramme d'aide à l'organisation de la surveillance des ouvrages d'art sur RN :

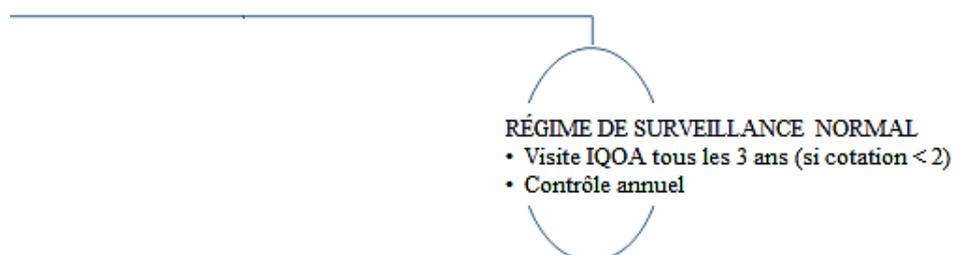


**Logigramme sur la surveillance organisée (ouvrage non soumis à IDP) :**

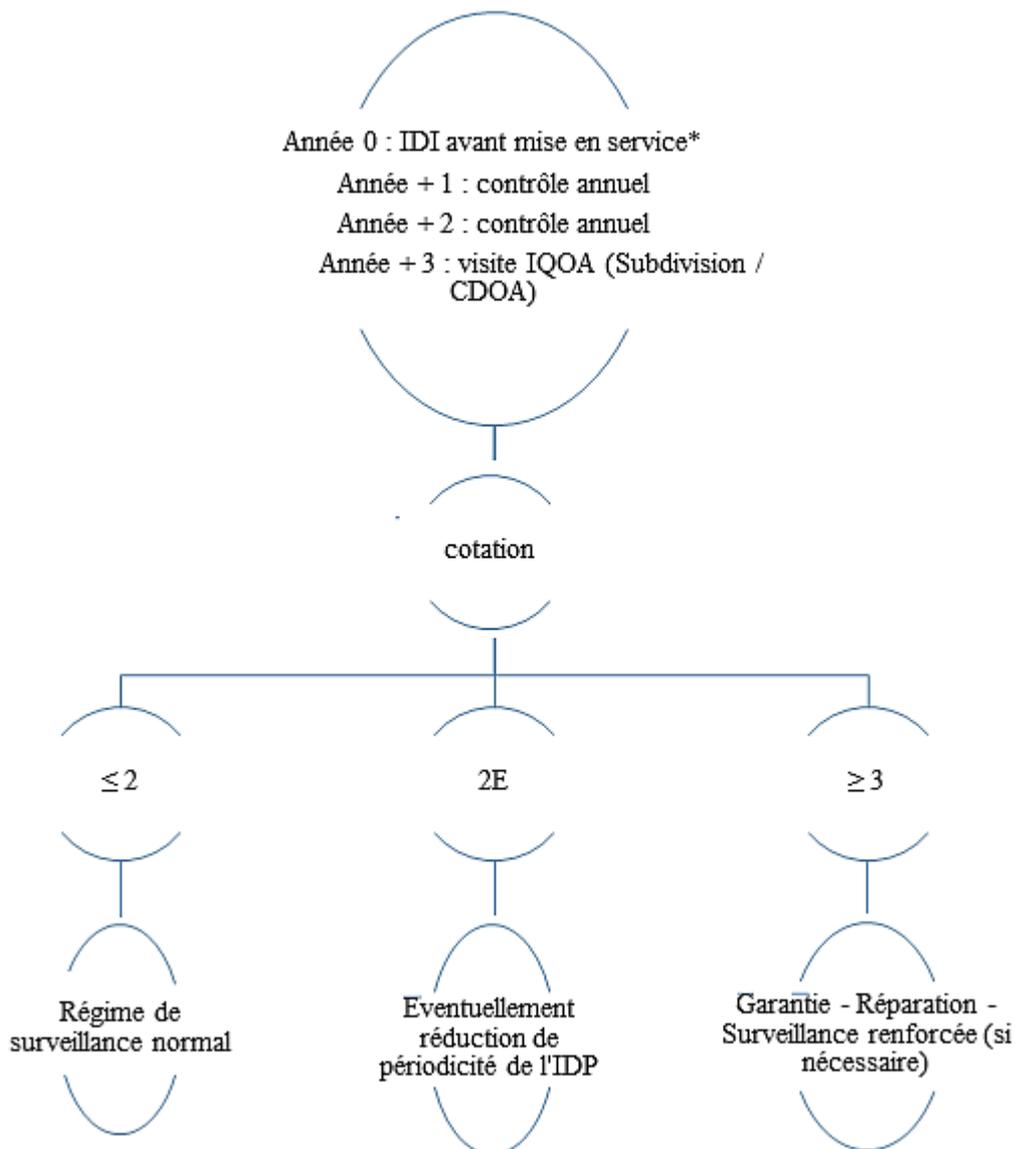


Année + 6 : visite QOA (Subdivision / CDOA)

Année + 9 : visite particulière de fin de période de responsabilité décennale avec cotation IQOA



**Logigramme sur la surveillance organisée (ouvrage soumis à IDP) :**



Année + 6: 1 re IDP avec cotation IQOA

Année + 9 : examen de fin de responsabilité décennale avec cotation IQOA

