

Université Mohamed khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil et
d'Hydraulique Référence :...../ 2019

جامعة محمد خيضر- بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية و الري
المرجع:...../2019



Mémoire de Master
Filière : Travaux Publics
Spécialité : Voies Et Ouvrage D'art

Thème :

Entretien du pont d'oued DJEDI

Etudiant :

ACHIBA MOUNDHER MAROUAN

Encadrant:

Pr. ABDELHAMID GUETTALA

Promotion: Juillet 2019

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

Je remercie avant tous mon Dieu le tout puissant qui m'a donné la force et la volonté de réaliser et achever ce travail.

Je remercie de tout mon cœur mes parents et toute ma famille pour leurs sacrifices, leurs encouragements, leurs soutiens jusqu'à ce que j'ai réalisé ce travail.

*Je remercie tout d'abord le Professeur **GUETTALA A** de m'avoir proposé ce sujet de thèse, de l'attention qu'il a portée à mon travail. Je le remercie pour ses conseils qui ont Contribué à l'élaboration de ce travail.*

Mes remerciements vont aux membres de jury d'avoir accepté d'examiner, d'évaluer et d'enrichir ce travail.

Je remercie mes amis qui ont soutenu moi à ce stage.

Enfin, toute ma gratitude, ma reconnaissance et mes très vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin et en particulier l'ensemble des enseignants du département de génie civil de Biskra et Sidi Bel Abbes, à ma formation d'études de la graduation et de la post graduation.

RESUME

La réparation des bétons nécessite non seulement une bonne connaissance du support à réparer, des matériaux de réparation et de l'environnement dans lequel ils vont être mis en œuvre, mais aussi une compréhension des mécanismes à la base de l'adhésion. Les compatibilités dimensionnelle, électrochimique, chimique, porosimétrique et perméabilité sont les clés de la réussite et de la durabilité de la réparation. L'objectif de ce projet est de comprendre et d'étudier les pathologies qui affectent le béton en général et les ponts en particulier. Nous appliquons donc ces principes sur le pont d'oued DJEDI qui porte RN03 au PK 343+900 comme exemple vivant, en raison des travaux de restauration en cours à ce jour.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre 1 : <i>Pathologies des ouvrages d'art</i>	
INTRODUCTION	3
1. Généralités sur les ponts	4
1.1. Définition	4
1.2. Classification Des Ponts	4
Description des pathologies du béton armé	5
2. Dégradation des matériaux	5
2.1. Dégradations mécaniques	6
2.2. Dégradations chimiques	6
2.2.1. Réactions Alcalis-Granulats (RAG)	6
2.2.2. Attaques Sulfatiques	6
2.2.3. Attaques Acides	7
2.2.4. Lixiviation	7
2.3. Dégradations physiques	8
2.3.1. Cycles de gel-dégel	8
2.3.2. Sels de déverglaçage	8
A. Pathologies à risque élevée	9
1) La carbonatation	9
1.1) Mécanismes de la carbonatation	9
1.2) Causes de la carbonatation	10
1.3) Conséquences de la carbonatation	11
2) La corrosion	13
2.1) Aspect physico-chimique de la corrosion	13
2.2) Phases de la corrosion	13
2.3) Formes de la corrosion	14
Facteurs influençant la corrosion des armatures	14
Réactions de corrosion des aciers dans le béton	15

- Causes de la corrosion	17
- Conséquences de la corrosion	18
3) Fissure	18
4) Lézardes	23
5) Retrait	24
B) Pathologies à risque moyen	25
1) Faïençage	25
2) Epaufrure	25
3) Lichen	25
4) Le ressuage	26
4.1) Type de ressuage	26
4.2) Les raisons du ressuage des bétons	26
CONCLUSION	27

Chapitre 2 : *Diagnostic*

INTRODUCTION	29
1. Réalisation d'un diagnostic	30
1.1. Choix des investigations	30
1.2. Types d'investigation	31
1.2.1. Investigations non destructives	31
• Relevé visuel	31
• Scléromètre	32
• L'auscultation Sonique	32
1.2.2. Investigations Destructives	35
• Carottage d'éléments en béton armé	35
• Prélèvements d'aciers	36
• Test à la carbonatation	37
2. Etanchéité	38
2.1. Revêtements de chaussée	38

2.2. Chapes d'étanchéité	38
2.2.1. Constitution de la chape	38
2.2.2. Position	38
2.2.3. Détails de réalisation	39
2.2.4. Ouvrages sans chape d'étanchéité	39
2.3. Les trottoirs	39
3. Evacuation des eaux pluviales	40
3.1. Les pentes	40
3.2. Les caniveaux	40
3.3. Les gargouilles	41
3.3.1. Espacements	41
3.3.2. Diamètre et coudes des tuyaux d'évacuation	41
3.3.3. Orifices des gargouilles	41
3.4. Dispositions spéciales au droit des joints	42
CONCLUSION	42

Chapitre 3 : *Techniques et matériaux de réparations*

1. Présentation de la norme européenne EN 1504	44
1.1. Domaine d'application de la norme	44
1.2. Mise en œuvre et interaction avec les normes nationales	44
1.3. Les documents formants la série EN 1504	45
2. Matériaux de réparation pour le béton	45
2.1. Mortiers à base de ciment modifiés ou non par des polymères	46
2.2. Mortiers de ciment de polymères – latex	46
2.3. Durabilité des latex	47
2.4. Mortiers à base de résine époxy	47
2.5. Choix entre matériaux de réparation cimentaires et polymères	48
3. Techniques de réparation	49
3.1. Investigations et diagnostic(Rappel)	49
3.2. Préparation des surfaces	50
3.3. Sélection, application et maturation du système de réparation	50
Conclusion	53

Chapitre 4 : Cas d'étude : Pont d'oued DJEDI

1. Présentation de l'ouvrage	55
FICHE D'IDENTIFICATION DU PONT	56
2. Présentations des dégradations	57
• Historique de l'entretien du pont d'oued DJEDI	62
3. Réparation des dégradations	64
- Préparation de la surface et du périmètre de la réparation	64
• Piquage du béton	64
• Bouchardage	65
• Sablage et grenailage	66
- Protection contre la corrosion	66
• Reconstitution de la couche d'enrobage	66
• Protection additionnelle de l'armature	67
- Techniques de mise en œuvre pour la réparation des épaufrures	67
4. Choix et application des matériaux pour l'entretien du pont	69
4.1. Choix des matériaux	69
A. Remplacement du béton	70
1. Exigence	70
2. Solutions Sika : Sika Monotop® SF 126	70
2.1. Avantage	70
2.2. Résistances mécaniques	71
2.3. Mode d'emploi	71
B. Réparation du béton	71
1. Exigence	71
2. Solutions Sika : Sika Monotop®-412 N	71
2.1. Avantage	72
2.2. Mode d'emploi	72
C. L'étanchéité	73
1. Exigence	73
2. Solutions Sika pour un scellement de joint élastique : SikaHyflex®-160	74

2.1. Caractères généraux	74
2.2. Conditionnement	74
D. Formulation du béton de réparation	74
4.2. Présentation des résultats de l'entretien	75
4.2.1. Les piles	75
4.2.2. Chevêtres	76
4.2.3. Joints de chaussée	77
Conclusion	78
Références bibliographique	79
 <i>Annexes</i>	
Annexe A: La fiche d'identification	82
Annexe B: La fiche d'inspection	84
Annexe C: Le marquage de conformité	90

Liste des figures

Figure 1 : dégradations du béton armé	5
Figure 2 : Dégradation due aux sels de déverglaçage	9
Figure 3: Phénomène de la carbonatation	10
Figure 4: Les phases de carbonatation	11
Figure 5 : Les états de corrosion	17
Figure 6: Fissure de béton	19
Figure 7 : Lézardes	23
Figure 8 : Graphique enrobage-carbonatation	37
Figure 9 : Les chapes d'étanchéité	39
Figure 10 : position des Chéneau	41
Figure 11 : Emplacement géographique du pont d'oued Djedi	55
Figure 12 : Vue panoramique du pont	56
Figure 13 : Vue en plan du pont	57
Figure 14 : Chevêtre dégradée	58
Figure 15 : les palplanches forment des quais sur les semelles	59
Figure 16 : Fissuration des piles	59
Figure 17 : dégradations des trottoirs	60
Figure 18 : dalles de trottoirs démolies	61
Figure 19 : joints de chaussée dégradée	62
Figure 20 : les joints de chaussée ne sont pas étanches	63

Figure 21 : Préparation de la surface des chevêtres	65
Figure 22 : Bouchardage et renforcement du chevêtre	65
Figure 23 : Mise en place d'un matériau de ragréage par projection voie sèche	69
Figure 24 : Sika Monotop® SF 126	71
Figure 25 : Renforcement par voile	75
Figure 26 : Restauration des chevêtres	76
Figure 27 : Remplacements les joints de chaussée	77

Liste des tableaux

Tab 1 : Les 10 documents formant la série EN 1504	45
Tab 2 : Essais et observations nécessaires l'évaluation du béton suivant la norme EN 1504-10.	50
Tab 3 : Sélection du système de réparation.	51
Tab 4 : Fiche d'identification du pont.	56
Tab 5 : Présentation des dégradations.	58
Tab 6 : Résistances mécaniques Sika Monotop® SF 126.	71
Tab 7 : Renseignements Sur L'application Sika Monotop®-412 N.	73
Tab 8 : Formulation du béton de réparation	74

INTRODUCTION GENERALE

Les visites et les inspections des ouvrages d'art, faites dans le cadre de la surveillance et de l'entretien du patrimoine, mettent souvent en évidence un vieillissement prématuré de certains éléments des structures et des équipements.

L'analyse des défauts rencontrés montre que les problèmes liés à un mauvais fonctionnement mécanique des structures sont rares. Dans la plupart des cas, les défauts sont initiés par une mauvaise conception, un choix de constituants mal adaptés aux conditions d'environnement, des erreurs dans la mise en œuvre, ou encore un manque d'entretien.

Pour ce qui concerne la conception par exemple, on note qu'une meilleure approche des problèmes à l'amont permettrait d'améliorer de nombreux points de détails. Ainsi on pourrait éviter des erreurs qui s'avèrent coûteuses durant la vie des ouvrages, moyennant des surcoûts mineurs au stade de la construction.

Dans un premier temps, il a été décidé de cibler l'analyse des pathologies existantes sur les erreurs de conception que celles-ci aient des conséquences au cours de l'exécution ou qu'elles n'apparaissent qu'à terme sous forme de désordres ou de difficultés d'entretien et d'exploitation. Par ailleurs, il a semblé raisonnable de ne pas traiter le sujet dans son ensemble mais plutôt par thème.

Pour cela le diagnostic préalable de l'ouvrage constitue la base nécessaire pour le choix d'une stratégie de réparation la plus adéquate en fonction du type de dégradation et pour permettre une évaluation plus précise des coûts, il faut donc prévoir une campagne d'évaluation la plus détaillée possible de l'état de la structure, qui a comme but d'obtenir des informations sur l'étendue des dommages et d'établir les causes des dégradations.

Ce travail présente les résultats du diagnostic réalisé sur la dégradation du pont **d'oued DJEDI** (w. BISKRA) de moins de 40 ans, permettant de mettre en évidence les causes principales de l'accélération de sa dégradation dans un demi temps. Après plusieurs réparations précédentes qui n'étaient que superficielles, Il était donc nécessaire de rétablir le pont a sa condition initiale.

Pathologies des ouvrages d'art

INTRODUCTION

Le béton est un matériau qui possède des qualités, techniques et économiques si intéressantes. Ces multiples applications lui permettent d'occuper la première classe des matériaux de construction les plus utilisés à notre époque et la deuxième classe mondiale des produits consommés après l'eau potable. Mais les problèmes de dégradation ont engendré des inquiétudes à travers le monde entier, à cause des dépenses importantes pourvues lors de la réparation.

L'analyse du comportement pathologique des ouvrages d'art peut mettre en évidence des désordres et des comportements particuliers qui trouvent leurs explications dans la dégradation des matériaux constitutifs (corrosion des aciers, vieillissement physico-chimique des bétons, alcali réaction, fluage, relaxation...), qui peuvent aussi s'expliquer par d'éventuelles erreurs de conception (erreurs de calcul, défauts d'exécution) ou la prise en considération de sollicitations accidentelles (séisme, choc, impact).

L'intégrité des structures en service dépend essentiellement de la variation de leurs résistances au cours d'exploitation. Dans le secteur du génie civil ou de travaux publics, les fissures dues aux sollicitations dynamiques ou statiques, sont la cause principale des défaillances. Il est donc nécessaire de protéger les structures, de les réparer et parfois de les renforcer.

1. Généralités sur les ponts

1.1. Définition

Un pont est une construction qui permet de franchir une dépression ou un obstacle (cours d'eau, voie de communication, vallée, ravin, canyon) en passant par-dessus cette séparation. Le franchissement supporte le passage d'humains et de véhicules dans le cas d'un pont routier, ou d'eau dans le cas d'un aqueduc. On désigne également comme écoduc ou écopont, des passages construits ou « réservés » dans un milieu aménagé, pour permettre aux espèces animales, végétales, fongiques, etc. de traverser des obstacles construits par l'être humain ou résultant de ses activités.

1.2. Classification Des Ponts

Couramment, la classification adoptée se rapporte plus à la structure du tablier qui est la partie plane de l'ouvrage qui permet de porter la voie de communication et de raccorder entre les deux rives de l'obstacle. Dans le cas des portiques et des ponts en voûtes, la structure d'ensemble de l'ouvrage assure cette classification.

On distingue alors :

- Pont à poutres.
- Pont en caisson.
- Pont a voûtes.
- Pont en arc.
- Pont haubané.
- Pont suspendu.

- **Description des pathologies du béton armé**

Dans cette partie, nous nous intéresserons aux principales pathologies apparaissant dans le béton armé durci. Ces pathologies ont des causes et conséquences variables. Elles sont décrites dans ce qui suit : dégradations mécaniques, chimiques, est physiques.

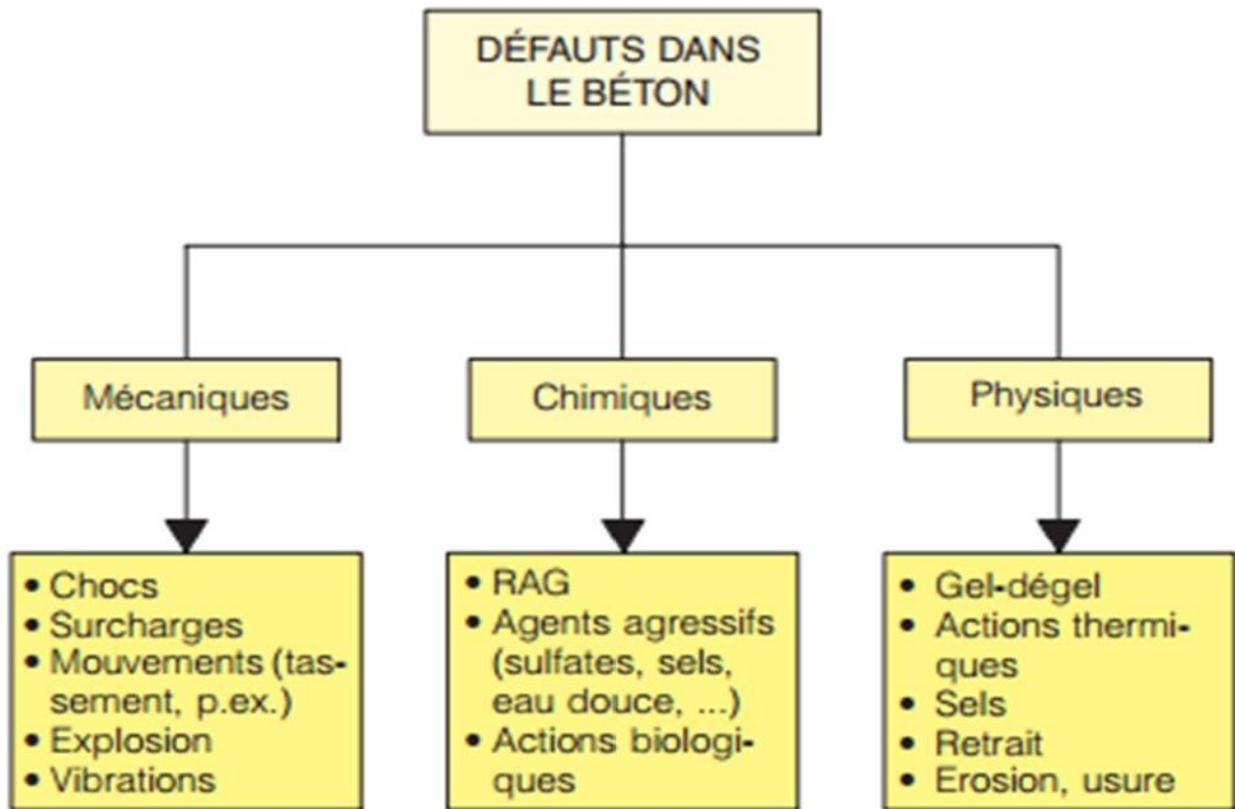


Figure 1 : dégradations du béton armé

2. Dégradation des matériaux

Les propriétés physiques et, plus particulièrement, le comportement mécanique du béton et des aciers sont susceptibles de se dégrader en fonction des conditions d'environnement définies par la localisation géographique de l'ouvrage.

Les principales causes de vieillissement sont liées aux phénomènes suivants :

2.1. Dégradations mécaniques

- Erosion, abrasion et choc

Les ouvrages les plus touchés par l'érosion se situent essentiellement en milieu fluvial et maritime. Ils sont soumis au charriage d'éléments solides induits par les courants et à l'action des vagues à chaque

marée.

La dégradation du béton par frottement se traduit par la création de défauts géométriques de surface, l'apparition d'épaufrure et par des éclatements superficiels qui entraînent la mise à nu des armatures et l'accélération des risques de corrosion.

2.2. Dégradations chimiques

2.2.1. Réactions Alcalis-Granulats (RAG)

La réaction alcalis-granulats (RAG) résulte d'une interaction entre les alcalis du béton (provenant du ciment, des additions, des adjuvants, ...) et des granulats potentiellement réactifs (c'est-à-dire sensibles aux alcalis) qui contiennent de la silice réactive (acide silicique) se présentant sous forme d'opale, de calcédoine, de cristobalite, de tridymite et de quartz cryptocristallin.

C'est la raison pour laquelle on parle également de réaction alcalis-silice. La RAG entraîne la formation de produits expansifs et notamment d'un gel d'alcalis-silice capable d'attirer l'eau et donc de gonfler. Il en résulte des contraintes de traction internes au béton qui conduisent à une fissuration de ce dernier et, parfois, à la rupture des armatures. Pour qu'une réaction alcalis-granulats se produise, les conditions suivantes doivent être réunies:

1- présence de granulats potentiellement réactifs.

La réaction se produit seulement si la teneur en réactifs se situe à l'intérieur d'un domaine critique dont les limites dépendent de la composition minéralogique des constituants.

2- humidification permanente ou régulière de la structure teneur élevée du béton en alcalis.

Dans un béton non armé, la RAG se manifeste par un faciès de fissuration plutôt aléatoire. Dans un béton armé ou précontraint, les armatures empêchent la libre dilatation du béton dans le sens des barres d'acier, de sorte que le tracé des fissures épouse celui des armatures sous-jacentes.

En l'absence d'examen complémentaire, le risque est grand d'attribuer la dégradation, à tort, à un phénomène de corrosion. Dans certains cas, le béton prend une teinte ocre et l'on constate la disparition de lichens et de mousses présents au préalable le long des fissures^[1].

2.2.2. Attaques Sulfatiques

Les sulfates en provenance de l'environnement (terres, milieu aqueux) peuvent réagir avec le béton pour former de l'ettringite.

Cette cristallisation s'accompagne d'une expansion très importante et peut se produire aussi bien durant la phase plastique du durcissement (ettringite primaire) qu'après le durcissement (ettringite secondaire). Seule l'ettringite secondaire est préjudiciable au béton, les contraintes internes causées par l'expansion entraînant la fissuration et la ruine de la structure. Toutefois, même en l'absence de source extérieure

de sulfates, un échauffement excessif du béton en cours de durcissement peut également donner lieu à la formation d'ettringite, notamment lors d'un traitement thermique (destiné à accélérer le développement de la résistance du béton) ou lors du dégagement de la chaleur d'hydratation dans le béton de masse. C'est la raison pour laquelle la température maximale est généralement limitée à quelque 65 °C durant la phase de durcissement.

En décalcifiant les composés primaires de la prise présents dans le ciment durci (C-SH), les sulfates peuvent aussi altérer la résistance mécanique du béton et donc affecter la stabilité de l'ouvrage ^[2].

2.2.3. Attaques Acides

Le béton présente un caractère basique élevé induit par les composés hydratés de la pâte de ciment (la phase interstitielle contenue dans le béton a un pH très élevé).

Il peut donc présenter une certaine réactivité vis-à-vis des solutions acides telles que les pluies acides, les eaux naturelles chargées en dioxyde de carbone, les eaux résiduaires, les eaux des industries agroalimentaires ou industrielles contenant des acides organiques, les eaux chargées en acides minéraux, mais aussi les eaux pures ^[3].

2.2.4. Lixiviation

Dans une structure en béton exposée à l'air ambiant, l'eau ne s'évapore que sur une épaisseur limitée à quelques centimètres.

Les pores sont saturés lorsque le béton est en contact de manière prolongée avec l'eau. Des ions en provenance du milieu extérieur peuvent alors transiter, dans la phase liquide interstitielle du béton. En fonction de la nature des éléments chimiques qui pénètrent dans le matériau, il peut en résulter des réactions chimiques de dissolution/précipitation et donc une lixiviation progressive des hydrates. Les eaux pures ou très peu chargées ont un grand pouvoir de dissolution, elles peuvent dissoudre les constituants calciques du béton (la portlandite notamment).

Malgré la complexité des réactions chimiques générées par les eaux agressives, l'application de quelques principes de prévention élémentaires respectés au niveau de la formulation du béton (formulation adaptée, dosage en ciment adéquat, faible E/C, béton compact et peu perméable), de la conception de l'ouvrage et lors de sa réalisation (vibration, cure) permettent d'obtenir des bétons résistants durablement dans les milieux agressifs ^[4].

2.3. Dégradations physiques

2.3.1. Cycles de gel-dégel

En l'absence de mesures appropriées, le bétonnage en période hivernale peut donner lieu à des dégâts de gel. La formation de glace conduit en effet à la dilatation de l'eau présente dans le béton frais.

Dans un béton encore plastique, ce gonflement s'opère librement; une fois durci, le béton ne présentera aucun dégât apparent, mais sera de mauvaise qualité. Dans un béton jeune déjà durci, le gonflement est entravé et des tensions internes apparaissent. Si le matériau n'a pas développé de résistance suffisante, les dégâts se manifesteront par un écaillage de la surface (le plus souvent en plusieurs couches). On considère généralement que le béton est apte à résister à ces tensions internes dès que sa résistance en compression dépasse 5 N/mm^2 . Cette résistance devrait être atteinte si l'on maintient une température ambiante supérieure à $5 \text{ }^\circ\text{C}$ pendant les 72 premières heures qui suivent la mise en œuvre.

Un béton durci peut, lui aussi, être endommagé par le gel : en se dilatant sous l'action du gel, l'eau présente dans les pores et les fissures crée des tensions susceptibles de provoquer ou d'aggraver des fissures. La sensibilité au gel du béton durci dépend dans une large mesure de sa structure poreuse et des dimensions des fissures. Le risque de dégâts de gel est plus important sur des dalles ou des plans horizontaux que sur des surfaces verticales, les pores étant davantage saturés en eau ^[5].

2.3.2. Sels de déverglaçage

Les sels de déverglaçage employés pour faire fondre la glace induisent une réaction endothermique, c.-à-d. une réaction au cours de laquelle le milieu environnant cède une partie de sa chaleur. En l'occurrence, la chaleur est prélevée dans la couche superficielle du béton qui, en raison de la chute brutale de température, subit un choc thermique et s'expose ainsi à un risque d'écaillage. Le risque de dégradation par le gel est encore accru lorsque des précipitations neigeuses prolongées alternent avec des épandages de sels répétés et que la couche superficielle du béton peut se trouver saturée en eau. La nature des sels de déneigement peut également avoir une incidence sur le processus de dégradation observé.

Par ailleurs, les ions chlore des sels de déverglaçage peuvent engendrer un risque de corrosion pour les armatures ^[6].



Figure 2 : Dégradation due aux sels de déverglaçage

Dans ce qui suit nous allons voir les différents types de pathologies que nous avons classées en deux grandes catégories à savoir Les pathologies à risque élevé et à risque moyen :

A. Pathologies à risque élevée

1) La carbonatation

La carbonatation du béton est un phénomène indissociable de ce matériau de construction. Pendant la durée de vie de l'ouvrage, le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère pénètre dans le béton à partir de la surface du matériau.

Le dioxyde de carbone peut alors réagir avec les produits résultant de l'hydratation du ciment. La carbonatation modifie progressivement la composition chimique et la microstructure interne du béton. Durant la vie de l'ouvrage, le béton piège ainsi du dioxyde de carbone à hauteur de 10 à 15 % du CO_2 émis lors de la décarbonatation du calcaire nécessaire à la fabrication du ciment.

1.1) Mécanismes de la carbonatation

L'atmosphère de notre planète contient en moyenne 0,03 à 0,04 % de CO_2 . Cette concentration en dioxyde de carbone varie localement avec la température, la pression atmosphérique et la proximité éventuelle d'une agglomération. Dans les zones fortement industrialisées, la quantité de CO_2 atmosphérique peut être multipliée par un facteur de majoration pour atteindre 0,1 %.

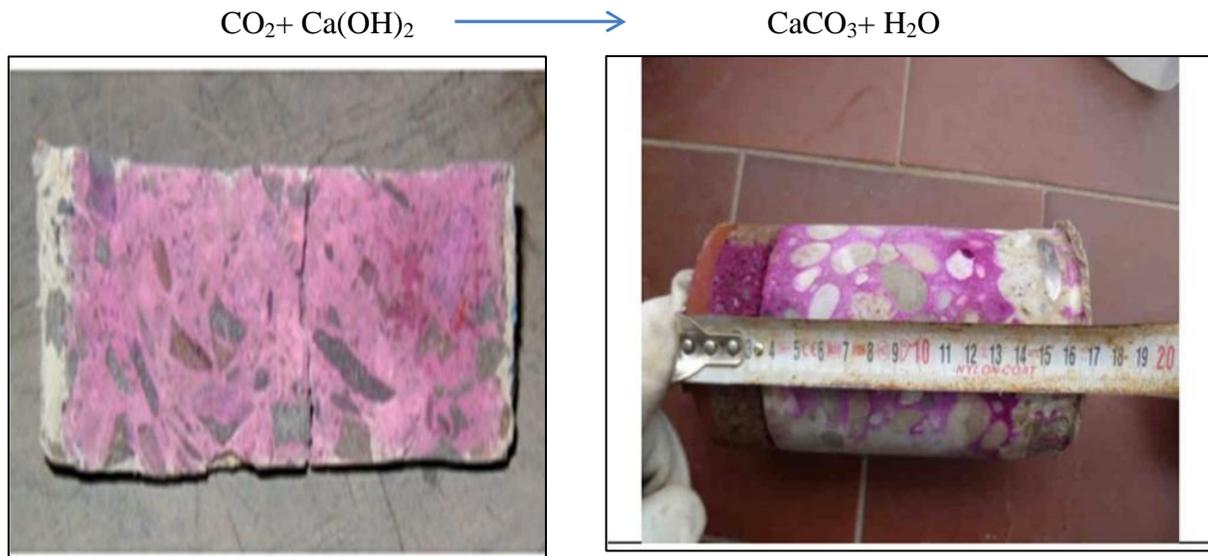


Figure 3: Phénomène de la carbonatation

1.2) Causes de la carbonatation

Le CO_2 présent dans l'atmosphère peut être à l'origine d'une carbonatation des matrices cimentaires. Il se diffuse alors sous forme gazeuse dans la porosité du béton ou du mortier et se dissout en formant des acides au contact de la solution interstitielle contenue dans la pâte de ciment (avec une prédominance de H_2CO_3 , HCO_3^- ou CO_3^{2-} suivant la gamme de pH).

Ce phénomène a pour conséquence d'abaisser le pH du milieu et de conduire à la dissolution des hydrates du ciment. L'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) est notamment affecté. Plus communément appelé portlandite, cet hydrate joue un rôle fondamental dans le maintien d'un pH élevé protégeant les armatures du béton armé ou prévenant la formation de micro-organismes.

Lorsque la portlandite a été entièrement consommée, ou qu'elle n'est plus suffisamment accessible pour réguler le pH par effet tampon, le milieu s'acidifie, permettant ainsi la corrosion des armatures. La carbonatation des silicates de calcium hydratés (C-S-H) est également possible.

La carbonatation des C-S-H, qui contribue de manière non négligeable à la fixation du CO_2 dans la matrice cimentaire, est à l'origine d'importantes évolutions de la microstructure. Les C-S-H se carbonatent suivant un mécanisme progressif de décalcification, les ions calcium venant se précipiter dans la porosité avec les ions carbonates sous forme de carbonate de calcium. La décalcification conduit à la formation d'un gel de silice très amorphe (fortement polymérisé) et plus ou moins hydraté. La carbonatation de la portlandite et des C-S-H est inéluctable, même pour des concentrations très faibles en CO_2 (0,03 %). La concentration en CO_2 venant simplement contrôler la vitesse à

laquelle ce phénomène va avoir lieu et la vitesse avec laquelle il pénétrera dans le matériau (on parle alors de cinétique de pénétration).

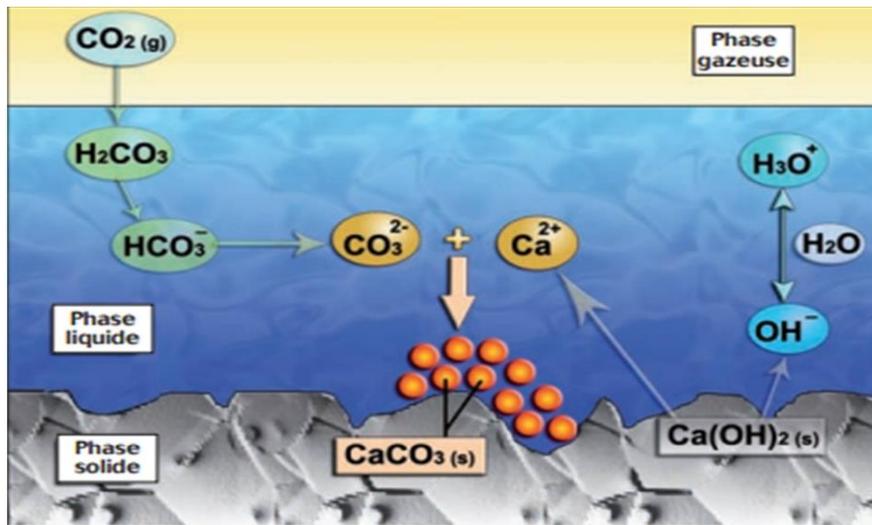


Figure 4: Phases de carbonatation (schéma IFSTTAR)

1.3) Conséquences de la carbonatation

Notons que les ciments contiennent également des oxydes d'alcalins (Na_2O et K_2O) qui se retrouvent sous forme de bases alcalines dans la solution interstitielle (NaOH et KOH). Ces espèces alcalines permettent de maintenir une basicité au-delà de la valeur imposée par la portlandite (c'est-à-dire au-delà de 12,4 à 20 °C). Néanmoins, leur carbonatation est très rapide puisque les alcalins sont quasiment uniquement présents sous forme aqueuse et sont donc facilement lixivés (on dit aussi lessivés) en présence de pluie.

Au cours du processus de carbonatation, l'élément principal de transformation est le carbonate de calcium (CaCO_3) dont il existe plusieurs variétés polymorphiques : calcite, vaterite et aragonite. La calcite est la variété la plus stable et correspond à la forme du calcaire qui a servi à obtenir le clinker après cuisson du cru dans le four de la cimenterie.

Du point de vue des structures en béton armé ou précontraint, la carbonatation est un phénomène délétère qui progresse de l'extérieur (parement) vers l'intérieur, à travers la zone d'enrobage des armatures, selon un processus physico-chimique qui associe la diffusion du CO_2 à travers la porosité et les réactions chimiques de fixation du CO_2 dans les hydrates. La neutralisation de l'alcalinité du milieu qui en découle devient problématique lorsqu'elle atteint le premier lit des armatures. En effet, si le pH diminue trop, la couche de passivation des aciers constituée d'oxydes et d'hydroxydes ferreux devient instable. Il s'ensuit une corrosion rapide, dite généralisée, sur toute la surface de l'armature. Les produits de corrosion, qui sont expansifs, endommagent le parement (fissuration,

épaufrures, etc.), forment des coulées de rouilles inesthétiques et conduisent à la réduction de la section d'acier des armatures. La valeur de pH seuil en dessous de laquelle la carbonatation peut conduire à une corrosion marquée des armatures fait encore débat dans la littérature. Situé entre 9 et 11, ce seuil dépend de la nature du ciment et surtout de l'état hydrique du béton ; il faut notamment suffisamment d'eau liquide pour faciliter les échanges ioniques au niveau des micro piles qui apparaissent sur la surface de l'acier, sans pour autant bloquer la diffusion de l'oxygène corrosif en phase gazeuse.

Il est possible de réaliser un diagnostic de l'état de carbonatation du béton en prélevant depuis un parement une carotte qui est fendue en deux et sur laquelle un indicateur colorimétrique de pH (phénolphtaléine) est pulvérisé. La partie carbonatée apparaît incolore et le noyau non carbonaté, c'est-à-dire très basique, se colore en rose (la zone de virage est voisine de $\text{pH} = 9$).

Toutefois il est stipulé dans la réglementation européenne REACH que la phénolphtaléine a un caractère cancérigène. Son utilisation doit être limitée ou sévèrement contrôlée.

C'est pourquoi la communauté scientifique se penche sur l'utilisation d'un nouvel indicateur coloré de pH.

La méthode colorimétrique ne renseigne pas sur la forme véritable du front de carbonatation comme cela est illustré où les armatures apparaissent protégées, car étant situées à l'aval du front détecté par projection de phénol -phtaléine, alors qu'en réalité le niveau de carbonatation y serait suffisant pour initier la corrosion. Pour gagner en précision, il existe des méthodes plus coûteuses telles l'analyse thermogravimétrique (réalisée sur une succession de fines tranches de matériau prélevées par sciage depuis la surface) et la gamma-densimétrie (méthode non destructive). L'utilisation de plusieurs indicateurs colorés présentant des zones de virage de pH différentes pourrait également être une solution à condition que les contrastes de coloration entre les zones saine et carbonatée soient suffisamment marqués.

L'humidité de l'air est un facteur très important puisque la carbonatation est lente, voire absente, dans une atmosphère saturée d'eau (la diffusion du CO_2 en phase gazeuse est alors quasiment impossible si la porosité du béton est saturée) et dans une atmosphère trop sèche (la dissolution du CO_2 en phase aqueuse n'a pas lieu car elle est cinétiquement très limitée). Ce comportement conduit à une carbonatation optimale pour une humidité relative comprise entre 50 et 70 %.

En revanche, notons que la corrosion sera quant à elle optimale pour une humidité relative avoisinant 90 %-95 %.

Du point de vue normatif, le risque de carbonatation est pris en compte pour formuler un béton (E/C, dosage en ciment et teneur en additions minérales) au travers de la norme NF EN 206-1. Il est intéressant de noter que la classe d'exposition la plus préjudiciable

vis-à-vis de la carbonatation (XC4) correspond à un climat avec alternance de phases sèches et humides. Cette situation n'est certes pas la plus favorable du seul point de vue de la carbonatation ; en revanche, eu égard au risque de corrosion, elle maximise la cinétique. Notons également l'existence de normes (Eurocode 2) permettant le dimensionnement de l'épaisseur d'enrobage en fonction de la classe de résistance du béton et de l'agressivité de l'environnement vis-à-vis de l'attaque du CO_2 .

2) La corrosion

2.1) Aspect physico-chimique de la corrosion

Avant d'être placée dans le coffrage, une armature en acier est rouillée, parce qu'elle a d'abord été exposée à l'atmosphère. Lorsque le béton frais est mis en place autour de cet acier, l'eau de gâchage pénètre à travers les pores de la rouille, où elle forme progressivement de la ferrite de calcium hydraté ($4\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$). Mais surtout, cette eau réagit avec l'acier et forme sur celui-ci une fine couche d'hydroxydes de fer $\text{Fe}(\text{OH})_2$ et de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Tous ces produits au voisinage de l'acier donnent à la solution interstitielle du béton un pH élevé, de l'ordre de 13 qui permet d'assurer la protection de l'acier par passivation. Une telle protection disparaît si la teneur en chlorure dépasse un certain seuil ou si la profondeur de carbonatation dépasse l'enrobage.

2.2) Phases de la corrosion

La durée de vie d'un ouvrage en béton armé vis-à-vis de la corrosion des aciers est souvent décrite à travers les étapes suivantes :

- phase d'initiation (ou d'incubation) : c'est le stade durant lequel les agents agressifs, tels que le dioxyde de carbone (CO_2) ou les chlorures (Cl^-), présents dans le milieu environnant, pénètrent dans le béton ;
- phase de propagation : cette phase commence lorsque ces agents agressifs se trouvent à des concentrations fortes au niveau des armatures. Cette phase correspond à la croissance de la rouille, qui peut ensuite faire éclater le béton d'enrobage.

Ainsi, pour décrire la corrosion des aciers dans les bétons, il convient de préciser, d'une part, la pénétration des agents agressifs dans le béton et, d'autre part, les conditions de dépassivation de ces armatures, puis la vitesse de dissolution du métal et la croissance de la rouille. L'observation de la dégradation d'un ouvrage en béton armé intervient souvent au cours de la phase de propagation, lorsque les destructions deviennent visibles, c'est-à-dire bien souvent tardivement. Il devient alors très lourd de réparer l'ouvrage et il convient donc de prévoir les effets à long terme de ces agressions. Cette prévision est fondée sur la définition des investigations à effectuer. Elle doit permettre en particulier d'ajuster une formulation adéquate du béton et de définir les paramètres d'exécution de l'ouvrage en fonction de son environnement.

2.3) Formes de la corrosion

La dissolution (anodique) d'un métal se produit en des zones très variables et la localisation de celles-ci détermine l'aspect de la corrosion. Il en résulte que l'aspect d'un métal corrodé est de différents types :

- corrosion généralisée : la corrosion a un aspect à peu près uniforme : ce type a lieu si la zone de réaction cathodique est loin de celle de dissolution, ou si les zones cathodiques et anodiques sont très petites et à peu près régulièrement alternées.
- corrosion localisée : ce type de corrosion a lieu si les zones anodiques sont petites et se trouvent à des endroits fixes ; il apparaît alors de petites cuvettes ou piqûres de corrosion. Dans le cas où le matériau métallique a des constituants très différents, il peut apparaître une dissolution sélective mais ceci ne concerne pas les aciers placés dans le béton.
- corrosion sous contrainte : celle-ci est induite par l'action simultanée de la corrosion et d'une sollicitation mécanique. Si cette sollicitation est maintenue dans le temps, il s'agit de corrosion sous contrainte. Dans ce cas, une fissure peut se former, se développer au cours du temps et éventuellement provoquer la rupture du métal tendu. Si la sollicitation oscille, alors il s'agit de corrosion par fatigue. Dans ce cas aussi, des fissures peuvent apparaître et se développer jusqu'à provoquer la rupture de l'élément sollicité mécaniquement.

- Facteurs influençant la corrosion des armatures

La corrosion dépend de plusieurs facteurs dont certains sont liés au milieu environnant et d'autres aux caractéristiques du béton. Une description des différents facteurs contribuant à la corrosion est présentée par [Raharinaivo et al. 1998].

- **Humidité relative**

- **Enrobage**
- **Température**
- **Teneur en chlorure**
- **Oxygène**
- **Agents agressifs autres que les chlorures :**

L'eau qui entoure le béton ou qui pénètre par intermittence dans celui-ci (pluie, etc.) peut contenir divers sels. Ceux-ci contribuent à la formation des produits de corrosion de l'acier enrobé. C'est ainsi, par exemple, que les sulfates réagissent comme les chlorures, au niveau qualitatif. Une rouille verte peut se former en l'absence d'oxygène. Celle-ci peut ensuite se transformer en produits classiques en relâchant des sulfates solubles. Mais, au niveau quantitatif, l'effet des sulfates reste négligeable. En pratique, sauf en cas de pollution d'origine industrielle, seuls les chlorures et le dioxyde de carbone sont les facteurs de dépassivation des aciers dans le béton.

- **Réactions de corrosion des aciers dans le béton**

L'exposition des armatures à l'air permet la formation d'une couche naturelle de rouille. Vu la porosité élevée de cette rouille, l'eau de gâchage du béton frais pénètre par capillarité à travers ses pores et des cristaux de ferrite de calcium hydraté peuvent se former ($4 \text{ CaO} \cdot \text{FeO}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$).

L'hydratation du ciment produit également l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) qui assure un pH élevé à la solution interstitielle. D'une façon générale, les constituants à base d'alcalins du ciment, notamment de calcium et, dans une échelle moins importante de potassium et de sodium, contribuent à la réserve alcaline du béton [Almusallam, 2001].

Dans la zone de contact du béton et de la couche dérouille formée pendant le stockage, l'hydratation du béton est perturbée. Ainsi, entre le béton sain et l'acier, des couches superposées peuvent être identifiées. La première est une couche non influencée par les aciers ; la deuxième, qui est une zone intermédiaire entre le béton sain et la couche la plus proche du métal, assure une transition entre les propriétés mécaniques et la microstructure.

Enfin, la troisième, fortement adhérente à l'acier et étanche, est responsable de la protection de l'acier ou, en d'autres termes, de sa passivation. Tant que le microfilm protecteur dû au ciment sain existe, l'acier dans le béton reste intact.

Les ions chlorures en contact avec le béton pénètrent dans l'ouvrage par l'intermédiaire de l'enrobage. La nature du produit formé à la surface de l'acier est modifiée par les chlorures. Il apparaît une réaction

de dissolution (appelée anodique ou d'oxydation) dans laquelle les ions ferreux dissous sont formés (anode). Les électrons libres réagissent à la surface de la barre d'acier dans la zone dite cathodique. Ces électrons réduisent l'oxygène gazeux dissous dans l'eau, de façon à générer les ions hydroxydes. Les deux réactions élémentaires d'oxydation et de réduction sont simultanées :



Dans les cas les plus courants, les ions ferreux dissous se combinent avec les ions Hydroxydes de façon à former les hydroxydes :

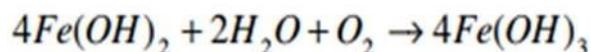
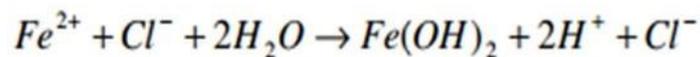


Cet hydroxyde ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) peut continuer à s'oxyder et former de la rouille anhydre (Fe_2O_3) ou de la rouille hydratée ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) et du FeOOH , sachant que [Raharinaivo et al., 1998] :



En l'absence de chlorure, les produits formés à la surface de l'acier protègent celui-ci : c'est la passivation. Une représentation schématique du mécanisme de corrosion induite par les chlorures.

Si des ions chlorures arrivent au contact de l'acier et que leur teneur atteint un seuil critique, la couche n'est plus protectrice et la corrosion peut commencer. En conséquence, les ions chlorures pénétrés dans le béton contribuent à l'activation de la surface des armatures de façon à former l'anode, la surface encore passivée fonctionnant comme cathode. Si on ne tient pas compte de la rouille verte, les réactions dans l'anode se déroulent comme suit :



Les états du béton correspondants à la formation de chacun des produits de corrosion :

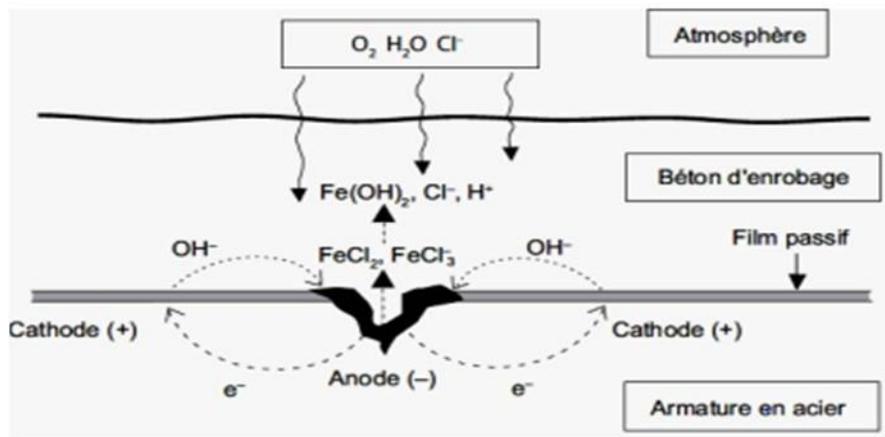


Figure 5 : Les états de corrosion

Anode= électrode où se produit la réaction d'oxydation (dissolution du métal), où le courant passe du métal vers la solution.

Cathode= électrode où se produit la réaction de réduction (déposition à la surface du métal), où le courant passe de la solution vers le métal.

On note aussi que, dans les réactions liées à la corrosion, les ions chlorures ne sont pas présents dans la rouille, même si on les trouve dans les étapes intermédiaires de la réaction. On remarque encore que la porosité de la pâte de ciment est un facteur de grande influence dans la corrosion, puisque le pont entre l'anode et la cathode se fait à partir de la solution interstitielle d'une part et de l'armature, d'autre part. Les principaux paramètres qui ont une influence sur la résistivité électrique du béton sont l'humidité, le système poreux de la pâte de béton durci et la composition ionique de la solution interstitielle.

➤ CAUSES DE LA CORROSION

On distingue principalement deux facteurs favorisant l'apparition de la corrosion dans le béton armé. Tout d'abord, il y a la carbonatation du béton, lorsque le pH du béton descend en dessous de 9 les armatures ne sont plus passivées.

Ce phénomène est occasionné par la réaction entre les hydrates de la pâte de ciment et le CO₂ atmosphérique.

L'autre facteur étant les chlorures, la dé passivation s'opère lorsque la teneur en chlorures au niveau des armatures dépasse un certain seuil. Il est admis que ce seuil correspond à une teneur de 0,4% par rapport à la masse du ciment ^[7].

➤ **CONSÉQUENCES DE LA CORROSION**

La formation de la corrosion s'effectue aux dépens de métal d'origine. Ce phénomène entraîne à la fois une augmentation importante de volume ainsi qu'une perte de la section efficace de l'armature.

Cela a pour conséquences d'une part l'apparition de différentes pathologies au niveau du parement suite à l'augmentation de volume, mais aussi une perte de capacité portante due à la diminution de la section efficace ^[8].

Ces pathologies peuvent être des fissures, des épaufrures, des décollements, ...

3) Fissures

Fente visible affectant la surface d'une maçonnerie, d'un dallage, d'un appareil sanitaire, etc.

Par convention, la fissure a entre 0.2 et 2mm de largeur; au-dessous il s'agit d'un faïençage ou d'un simple fil, au-dessus, la fissure est une lézarde.

Dans leur majorité, les fissures n'ont qu'un inconvénient esthétique: fissure de retrait, ou de mouvement différentiel à la jonction de deux matériaux.

Les fissures sont graves si elles portent atteinte à l'imperméabilité des parois (fissures Pénétrantes laissant passer l'eau de pluie à travers un mur exposé); plus graves encore sont les fissures traduisant un affaissement des fondations, ou des mouvements du sol. est important avant tout de souligner qu'il est impossible aujourd'hui d'éviter la fissuration du béton armé, que ce soit lors de la mise en œuvre, due par exemple au retrait de dessiccation ou sur le béton durci, dû au vieillissement du matériau.

Les causes de la fissuration sont multiples, mais peuvent être répertoriées en quatre catégories :

- 1- Les causes dues aux propriétés des matériaux, avec par exemple le retrait suite à l'évaporation de l'eau de gâchage, le gonflement engendré par la réaction exothermique du liant ou encore à la résistance mécanique de la cohésion du liant.
- 2- Les causes directes externes, avec notamment les déformations excessives sous l'action des charges ou encore des déformations sous l'action des variations de température ou sous l'action de l'humidité.
- 3- Les causes externes indirectes, à savoir les répercussions sur certaines structures d'actions provenant d'autres éléments tels que les tassements différentiels des fondations.
- 4- Les causes dues à un phénomène de corrosion des armatures, les armatures corrodées ayant un

volume plus important que les aciers en bon état, l'état de contrainte du béton au droit d'une armature corrodée est plus important et la fissuration s'enclenche.

Parmi les différents types de fissures, on distingue principalement trois catégories :

A- Le faïençage, c'est un réseau caractéristique de microfissures qui affecte principalement la couche superficielle du béton.

B- Les microfissures, ce sont des fissures très fines dont la largeur est inférieure à 0,2 mm.

C- Les fissures, ce sont des ouvertures linéaires au tracé plus ou moins régulier dont la largeur est d'au moins 0,2 mm.

Il est important lors du processus de réhabilitation d'un ouvrage, de s'intéresser à l'évolution de la largeur d'une fissure. Il est possible de classer les fissures en deux catégories selon leur évolution :

- Les fissures passives ou mortes, pour les fissures dont les ouvertures ne varient plus dans le temps, quelles que soient les conditions de température, d'hygrométrie ou de sollicitation de l'ouvrage. Cependant, elles sont rares, car les matériaux alentour à la fissure varient selon la température, c'est le phénomène de dilatation thermique.
- Les fissures stabilisées, lorsque leur ouverture varie dans le temps en fonction de la température [9].



Figure 6: Fissure de béton

4) Lézardes

Les lézardes dans les briques et dans les joints de mortier sont causées par le tassement du sol sous une construction. Le sol peut être un "terrain rempli" où les vides ont été obturés sans qu'on laisse le remblayage se fouler convenablement. La glaise sous la fondation a pu sécher et rétrécir ou, peut-être, s'est déplacée sous l'effet d'une inondation. Le drainage ou l'imperméabilisation font peut-être défaut, ou la fondation a été érigée au-dessus de la ligne de gel. Le sol sous les maisons construites sur une colline se déplace quelquefois vers le bas de la pente. Le pourrissement et le séchage du bois peuvent occasionner des déplacements de terrain et les racines de gros arbres déplacer ou éventrer une fondation. Peu importe la cause, les lézardes causées par affaissement et qui ne sont pas réparées à temps se détériorent rapidement.

Des lézardes continues sur les murs extérieurs indiquent des problèmes d'affaissement : elles sont plus apparentes là où une rallonge a été construite. Elles se forment également dans le haut des portes, aux seuils et aux cadres des fenêtres. Déterminez d'abord si le déplacement et la progression des lézardes sont terminés. Le déplacement dans une maison neuve peut ne jamais plus se reproduire, une fois la maison placée. Vérifiez la lézarde d'un mur extérieur pour savoir si le déplacement est terminé en suivant les deux méthodes que voici : faites un pont sur la lézarde avec un morceau de verre. Collez le verre à l'époxy de chaque côté de la lézarde. Le moindre changement dans le mur ou la fondation brisera le verre ^[10].



Figure 7 : Lézardes

5) Retrait

Contraction d'un matériau provoquée par l'élimination de l'eau de gâchage excédentaire (bétons, enduits). Les tensions internes provoquées par les retraits ont pour effet soit de réduire les dimensions extérieures des matériaux, soit de les déformer, soit de provoquer leur rupture: Faiéncage des enduits, microfissuration du béton.

Le retrait des bétons et mortiers de ciment commence par un retrait plastique (légère contraction par évaporation, dès la mise en place); puis intervient le retrait hydraulique, élimination d'eau de gâchage excédentaire, qui se poursuit de façon décroissante pendant longtemps. De façon générale, un béton ou un mortier a d'autant plus de retrait que sa concentration en ciment est importante.

La mesure du retrait s'effectue sur des éprouvettes (4x4x16cm), d'une part sur la pâte pure, d'autre part sur le mélange constitué.

Le retrait correspond à des variations dimensionnelles mettant en jeu des phénomènes physiques avant, pendant ou après la prise des bétons. Lorsqu'elles ne sont pas maîtrisées par le ferrailage ou la présence de joints, ces variations dimensionnelles donnent lieu à l'apparition de fissurations précoces, d'ouverture conséquente. Les fissurations liées au retrait doivent être différenciées des phénomènes de fissuration fonctionnelle des ouvrages, ces derniers étant généralement maîtrisés par les règles de calcul, et restent compatibles avec la bonne tenue des ouvrages dans le temps, notamment en raison des faibles ouvertures des fissures.

Quatre types de retrait peuvent être à l'origine de l'apparition de fissures sur la surface des parements : retrait plastique, retrait de dessiccation, le retrait thermique et le retrait d'auto- dessiccation.

a- Le retrait de plastiquées :

En relation avec des déformations par tassement général du béton frais, déformations qui peuvent être gênées et créer une fissuration de surface au droit d'obstacles tels que des armatures. Ce retrait est limité à la période précédant la prise du béton, lorsque ce dernier reste suffisamment déformable pour subir des tassements.

b - Le retrait de dessiccation :

Est lié au séchage qui se manifeste avant, pendant et après la prise du béton. Dans des conditions courantes, il est de l'ordre de 1 mm/m. La fissuration qui en résulte est due à la dépression capillaire qui se produit lorsque des ménisques d'eau se forment dans les pores capillaires du béton frais. Ce retrait, qui est donc consécutif à l'évaporation de l'eau, peut se manifester quelques minutes après la

mise en Ouvre du béton, et se poursuivre quelques semaines après. Il est piloté par la cinétique de dessiccation.

c- Le retrait thermique :

Est lie au retour à température ambiante des pièces en béton ayant au préalable subi une élévation de température due aux réactions exothermiques déshydratation du ciment. Ce retour à la température ambiante est accompagné par une contraction qui génère des déformations empêchées susceptibles de conduire à l'apparition de phénomènes de fissuration. Ce type de retrait, qui ne concerne que des pièces d'épaisseur supérieur à 60 à 80 cm, se manifeste de quelques dizaines d'heures après la mise en œuvre, Jusqu'à quelques semaines, sa durée étant dépendante de la nature des éléments en béton considérés (plus une pièce est massive, et plus la contraction thermique sera lente).

d - Le retrait d'auto-dessiccation :

Est lie à la contraction du béton en cours d'hydratation et protégé de tout échange d'eau avec le milieu environnant. Il provient en fait d'un phénomène d'auto- dessiccation de la pâte de ciment consécutif à la contraction. Le Chatelier (le volume des hydrates formes est plus petit que le volume de l'eau et du ciment anhydre initial). Le phénomène conduisant à la contraction est dû à des forces de traction capillaires internes, similaires à celles responsables du retrait plastique. Ce dernier type de retrait concerne plus particulièrement les bétons à hautes performances (BHP) ou à très hautes performances (BTHP). Il devient négligeable pour les bétons ordinaires ^[11].

B) Pathologies à risque moyen

1) Faïençage

Le phénomène de faïençage se manifeste à la surface du béton et affecte son apparence. Il est reconnaissable à la formation sur la dalle de fissures très minces, dont la dimension moyenne varie de 10 mm à 40 mm Ces fissures se présentent en réseaux plus ou moins hexagonaux. Elles se développent rapidement, pouvant atteindre une profondeur de 3 mm, et apparaissent dans les jours suivant la finition du béton. Souvent, le faïençage est seulement visible lorsque la surface est mouillée et commence à sécher. Problème d'ordre esthétique, le faïençage affecte rarement la durabilité de la surface ou la résistance de la dalle de béton ^[12].

2) Epaufrure

Défaut de surface dû à un choc ou à des intempéries sur le parement ou l'arête d'un élément de béton durci ou d'un bloc de pierre, dans une construction ^[13].

3) Lichen

Lichen est un champignon qui grandit avec les algues et se propage sur la roche, des arbres, béton et

autres surfaces solides pour créer une substance de la croûte comme. Lichen est plus fréquent dans les climats humides et à proximité des plans d'eau, comme les lacs, les rivières, les ruisseaux ou des étangs. Nettoyage lichen hors du béton peut être un défi, mais il est possible de supprimer certains articles de la quincaillerie jumelé avec un nettoyage agressif ^[14].

4) Ressuage

Le ressuage est un type spécial de ségrégation où les particules solides ont un mouvement général inverse à celui du liquide. En fait, pendant la période dormante du béton, les particules solides qui sont plus denses que l'eau sédimentent. L'eau est ainsi chassée vers le haut dans le cas de coffrages imperméables.

Le ressuage est, avec la ségrégation, l'une des deux manifestations de la dégradation de l'homogénéité d'un béton frais. Dans le cas de la ségrégation, les grains présentent au cours du temps un mouvement relatif entre eux. Certains (les plus denses ou les plus volumineux) tombent alors que les autres (les fins ou ceux ayant une masse volumique réduite) remontent vers la surface.

Que le ressuage se présente sous sa forme normale ou localisée, une pellicule d'eau claire apparaît à la surface du matériau. Cette pellicule d'eau a, bien entendu, des conséquences sur la qualité du béton, qui peuvent être positives ou négatives selon la caractéristique considérée. Dans une optique d'amélioration constante de la qualité des bétons, la connaissance des causes du ressuage ainsi que de ces effets est primordiale.

4.1) Type de ressuage :

Le ressuage peut être divisé sommairement en :

- ❖ Ressuage visible dû à la restitution d'eau à la surface de l'élément de construction après le compactage de mortiers ou de bétons.
- ❖ Ressuage interne dû à la restitution d'eau sous l'armature ou sous les gros granulats après le compactage de mortiers ou de bétons.

Le ressuage ne doit pas forcément être négatif: la perte d'eau diminue le rapport e/c et le béton devient plus dense du moins dans les parties inférieures. Sur les surfaces de béton inclinées ou verticales, l'élimination de l'eau de ressuage au moyen de lés de coffrage dissipant l'eau fait partie des méthodes ayant fait leurs preuves pour améliorer la qualité du béton superficiel.

4.2) Les raisons du ressuage des bétons

Pratiquement, tout béton fraîchement mis en place ressue. Les bétons avec une teneur en eau élevée (rapport e/c) sont davantage sujets au ressuage que les bétons dont le rapport e/c est bas. Et plus le pourcentage de fines dans le béton est élevé, plus la tendance au ressuage diminue.

Le ressuage provient de ce que le béton est composé de matériaux dont la densité diffère fortement:

- granulats avec du domaine de 2,6 à 2,7 kg/dm³
- ciment 3,0–3,2 kg/dm³
- eau 1,0 kg/dm³

Pour que le béton puisse être aussi dense que possible, les particules fines du mélange doivent migrer dans les vides se trouvant entre les particules plus grosses, jusqu'à ce que ces vides soient remplis. Ce processus est déclenché par le malaxage, la vibration ou une autre méthode de compactage.

CONCLUSION

Dans ce chapitre on a fait la connaissance aux différents types de pathologies du béton qui est, dans la majorité des cas, la cause essentielle dans l'effondrement des structures. Comme on a vu les causes et les types (dangereuses et la moins dangereuses) de ces pathologies. Evidemment la dangereuse est prise en considération pour la neutraliser, par conséquent, la moins dangereuse, devient dangereuse, si elle n'est pas prise en compte pour des éventuelles réparations plus tard.

Diagnostic

INTRODUCTION

De nos jours, le béton est un des matériaux de construction les plus usuels. Ce matériau, outre ses nombreux avantages, évolue et réagit avec son environnement. En effet, au cours du temps, les ouvrages en béton armé développent de nombreuses pathologies (corrosion des aciers, gel-dégel, fluage, réactions chimiques, etc.). Sous l'action de ces agressions physico-chimiques, ce dernier se dégrade et présente alors des désordres allant de la simple fissure à la détérioration structurale grave. La majorité des infrastructures existantes ont été construites avec ce matériau et cela depuis plus d'une cinquantaine d'années. Ce patrimoine national est donc vieillissant ce qui nécessite un entretien et un suivi régulier. Cependant, la maintenance des ouvrages de ce patrimoine bâti est très onéreuse. Une démarche scientifique rigoureuse est donc nécessaire pour réduire ce budget par la mise en place d'outils visant à optimiser et fiabiliser le diagnostic structural des ouvrages.

Les méthodes de contrôle non destructif (CND) constituent l'une des voies adaptées pour une évaluation à grand rendement. En effet, le CND permet de donner des informations quantitatives sur la totalité de la surface auscultée et de limiter ainsi le nombre de prélèvements.

1. Réalisation d'un diagnostic

Le diagnostic d'un ouvrage est une étape importante dans le processus de sa réhabilitation. Il permet avant tout de se prononcer sur son état de santé et de voir quelles sont les éventuelles pathologies ainsi que leur ampleur. Généralement lorsque l'on effectue un diagnostic, c'est quand un client a découvert quelque chose qui n'allait pas dans le fonctionnement de l'ouvrage ou bien l'apparition de Désordres.

Le diagnostic peut avoir principalement deux finalités. Dans un premier temps, il peut être demandé de suivre l'évolution des différentes pathologies dans le temps, que ce soit à court, moyen ou long terme. Cela permet d'évaluer le comportement de l'ouvrage sous l'effet de ces troubles, de voir s'il y a une stagnation du phénomène ou s'il y a une dégénérescence, auquel cas il est important de prévoir des réparations. L'autre finalité d'un diagnostic c'est de répertorier tous les désordres, mais aussi la constitution de chaque élément, en vue d'un traitement immédiat.

1.1. Choix des investigations

Le choix des investigations dans un diagnostic d'ouvrage dépend de plusieurs paramètres. Il est primordial de les évaluer afin de mettre en œuvre mission. Ces différents paramètres sont les suivants :

- Type de mission à réaliser.
- Etat de l'ouvrage.
- Environnement de l'ouvrage.
- Type de structure.
- Nature des Matériaux.

En effet, le choix des investigations dans un diagnostic d'ouvrage dépend :

- Du type de mission à réaliser : selon ce que souhaite le client, il est possible de réaliser différents types de missions à savoir :

- Une inspection de l'ouvrage.
- Un diagnostic.
- Un diagnostic approfondi.
- Un suivi d'ouvrage.

Chacune de ces missions met en œuvre différentes méthodes de diagnostic, de plus ou moins grande ampleur, mais aussi une interprétation des résultats plus ou moins poussée.

De la nature des matériaux ; Le diagnostic d'un ouvrage en béton armé ne fera pas appel aux mêmes techniques d'investigation que pour un ouvrage en bois, en acier ou en pierre. De plus, chacun de ces matériaux a ses propres pathologies types.

- Du type de structure ; Les moyens à mettre en œuvre seront différents selon qu'il s'agisse d'un ouvrage d'art ou bien d'un bâtiment industriel ou un bâtiment d'habitations. La géométrie et la

taille de l'ouvrage rentrent aussi en compte dans le choix des investigations.

- De l'environnement de l'ouvrage ; Il est important de prendre en considération l'environnement dans lequel se trouve l'ouvrage, car il peut être à l'origine de ces pathologies. C'est le cas notamment pour les structures en milieu chimique ou pour les structures en milieu chimique ou pour le bâtiment « La Saline » pour lequel sa structure se trouve dans un milieu, avec beaucoup d'éléments de chlorures, directement lié à l'activité se déroulant dans le bâtiment.
- De l'état de l'ouvrage ; Les investigations dépendent d'une part des désordres qui affectent l'ouvrage, le matériel et le type d'investigation à mettre en œuvre seront différents pour des armatures corrodées ou pour des fissures. Mais cela dépend aussi de la fragilité de l'ouvrage.

1.2. Types d'investigation

Il est possible de classer les différentes investigations en deux catégories soit les méthodes non destructives, soit les méthodes destructives. Les principales méthodes rencontrées lors de diagnostics sont décrites dans la suite.

1.2.1. Investigations non destructives

Le principe de ces méthodes de diagnostic réside dans le fait que l'on analyse l'ouvrage ou une partie de l'ouvrage sans porter atteinte à son intégrité. Ceci est à privilégier dans différents cas, par exemple les bâtiments classés monuments historiques, pour lesquels il est difficile de faire accepter aux architectes des bâtiments de France qu'il soit utile d'effectuer des prélèvements de la structure pour pouvoir la caractériser. Ces méthodes sont à favoriser aussi dans le cas d'ouvrage dont la structure est très atteinte et affaiblie. Effectuer des prélèvements sur ce type de structure risque de la fragiliser encore plus.

Il existe différentes méthodes non destructives :

- **Relevé visuel**

Le diagnostic visuel consiste à aller sur site et d'analyser chaque élément de la structure en détail. Ainsi, cela permet dans un premier temps de connaître les caractéristiques géométriques de chaque élément et aussi les matériaux constitutifs. Cela permet d'évaluer le comportement global de l'ouvrage, de connaître les éléments porteurs ainsi que l'acheminement des charges dans la structure. Dans un second temps, il est nécessaire de répertorier les différentes pathologies présentes sur la structure. Les principaux désordres rencontrés pour les structures en béton armé sont les suivants :

- Les fissures, avec leur ouverture et leur longueur.
- Les fractures, avec leur ouverture, décalage ou rejet.
- La présence de coulures de calcite.
- Les zones d'altération superficielles et profondes.
- Les zones humides.
- Les zones de mousses ou de végétation.
- Les zones de faïençage.
- Les éclats de béton en formation ou profonds.
- Les aciers apparents.
- Les zones de ségrégation.

- **Scléromètre**

Le principe de l'essai sclérométrique repose sur la corrélation entre la dureté d'un matériau et sa résistance à la compression. Pour une sonde en contact avec l'ouvrage à inspecter. Lors de son rebond, la bille entraîne un index coulissant sur une règle de mesure. Plus le rebond sera important, plus le matériau sera dur.

Il convient de réaliser un certain nombre d'essais sur l'élément à ausculter, vingt-sept dans la norme actuelle, afin d'obtenir un résultat cohérent. L'indice sclérométrique I_s d'élément diagnostiqué est

la médiane de 27 mesures effectuées sur la zone d'ouvrage testé. Par report de l'indice sclérométrique sur un abaque, on obtient la résistance à la compression estimée de l'élément considéré.

Il est important de savoir que différents paramètres peuvent influencer sur les résultats, tels que l'inclinaison du scléromètre ou encore l'homogénéité du béton. Il peut être intéressant de coupler ces résultats avec des essais de résistance à la compression sur des prélèvements de la zone étudiée.

- **L'auscultation Sonique**

Le principe de la méthode :

Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde, d'où le nom de la méthode (essai de vitesse de propagation d'ondes sonores) à parcourir une distance connue. D'après LESLIE et

CHEESMAN, l'état du béton totalement inconnu peut se déterminer approximativement selon la vitesse mesurée.

Les impulsions sont produites par des cristaux piézo-électriques à excitation par choc des cristaux semblables sont utilisées dans le récepteur JONS.R et FACAOARU (1969).

La fréquence de générateur d'ondes est comprise entre 10 et 150 HZ, le temps de propagation des ondes dans le béton est mesuré par des circuits de mesure électroniques.

La relation entre la vitesse de propagation des ondes ultrasonique et la résistance à la compression est affectée par un nombre de variables tel que l'âge du béton, les conditions d'humidité, le rapport entre les granulats et le ciment, le type des granulats et la localisation des aciers et les fissures. La technique ne peut pas être employée pour la détermination de la résistance de béton fabriqué par différents matériaux dont on ne connaît pas les proportions.

Ces facteurs représentent un inconvénient majeur des essais non destructifs dans lequel la propriété du béton que l'on mesure est affectée par divers facteurs dont l'influence est différente de ce qu'elle est dans la résistance du béton. Cette technique pour l'estimation de la résistance du béton in situ n'est pas encore considéré e, dans la pratique, comme un outil de remplacement au cylindre standard et aux cubes, mais peut être utilisée comme une technique additionnelle , quand elle sera exécutée avec des essais de carottage.

A l'utilisation de la valeur de la vitesse de propagation d'une onde sonore pour déterminer la résistance du béton, il faut mentionner qu'il n'y a pas de relation physique entre les deux selon STURRUP, VECCHIO ET CARATIN (1984).

Les essais consistant à mesurer la vitesse de propagation des impulsions peuvent être effectués sur des éprouvettes de laboratoire comme sur des ouvrages en béton terminés. Certains facteurs influent toutefois sur la prise de mesures :

1- Les ondes sonores se déplacent plus vite à travers un vide rempli d'eau qu'à travers un vide rempli d'air. Par conséquent les conditions d'humidité du béton influencent la vitesse des ondes sonores selon STURRUP, VECCHIO et CARATIN (1984).

2- La surface sur laquelle l'essai est effectué doit épouser parfaitement la forme de l'appareil qui lui est appliqué, il est recommandé d'employer un matériau intermédiaire entre le béton et les transducteurs. Les matériaux d'interposition sont la vaseline de commerce, un savon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de Glycérol. Lorsque la surface de béton est très rugueuse, il est nécessaire de poncer et d'égaliser la partie de la surface où le transducteur sera fixé.

3- Une augmentation de la vitesse des impulsions se produit à des températures sous le point de congélation à cause du gel de l'eau; entre 5 et 30°C, la vitesse des impulsions n'est pas subordonnée à la température. FELDMAN (1977).

4- La présence d'acier d'armature dans le béton en particulier l'armature qui suit le trajet de l'onde entraîne une augmentation de la vitesse BUNGEY (1989). Il est par conséquent souhaitable et souvent indispensable de choisir des parcours d'impulsions qui ne sont pas influencés par la présence d'acier d'armature ou d'effectuer des corrections si de l'acier se trouve sur le parcours de l'impulsion.

Mode Opérateur :

a) Travaux préparatoires

- Poncer et égaliser la partie de la surface de l'élément à ausculter où le transducteur sera fixé,
- Employer un matériau intermédiaire entre les deux et en prenant soin de vérifier que l'appareil est bien appliqué contre la surface à tester à l'aide d'un matériaux d'interposition comme la vaseline, un savon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de glycérol.

b) Points de mesures

Le nombre de points de mesures dépend des dimensions de l'ouvrage à tester. Pour un grand panneau (dalle, voile, radier, etc.) les points de mesures sont situés aux intersections d'un quadrillage d'une maille de 0.5m. Le cas des petits éléments (poteaux, poutres, etc.), les mesures se font en six points.

- Distances minimales entre points de mesures

On recommande une distance minimale de parcours de 400 mm pour les mesures en surface.

- Étalonnage de l'appareil

L'ultrason doit toujours être contrôlé par des essais d'étalonnage avant chaque utilisation. L'étalonnage consiste à vérifier le temps de propagation à travers la tige étalon dont le temps est connu à l'avance. Il faut ajuster l'ultrason dans le cas où le temps mesuré ne correspond pas à celui marqué sur la tige étalon.

Manières de mesure :

La détermination de la vitesse de propagation des ultrasons se fait de trois manières, suivant le type de l'élément à tester :

- a- Mesure en transparence (directe)
- b- Mesures en surface (indirecte)
- c- Mesures semi directe

Elles sont utilisées sur tous les éléments de structure et sur les éprouvettes, mais plus particulièrement sur les éléments de structure où on ne peut pas utiliser les deux autres manières ^[15].

- **Le radar**

Le radar a une large gamme d'applications potentielles dans plusieurs domaines, des activités militaires et aériennes en premier temps au CND du béton. La description en détail des techniques radars a été réalisée par Daniels (Daniels 2004). Le principe de cette technique en génie civil est basé sur la réflexion et l'atténuation d'ondes électromagnétiques dans le milieu du matériau. La propagation d'ondes électromagnétiques dépend de la permittivité diélectrique, de la conductivité et de la perméabilité du matériau ausculté.

La technique radar est souvent utilisée sur des ouvrages réels, plus particulièrement pour inspecter le revêtement des tunnels, ou détecter le délaminage sur des ponts en béton armé à l'aide de système mobile et moderne, par exemple le système HERMES (High Speed electromagnetic Roadway Mapping and Evaluation System) (IAEA 2002). Ces applications sont présentées dans les normes ASTM D4748, ASTM D6087, ASTM D6429-99, ASTM D6432-99. Les nouvelles applications concernent l'évaluation de la variabilité spatiale des bétons in situ pour détecter des zones de probabilité de dégradation (SENSO 2009, EvaDéOS2012). Cette technique peut être également utilisée comme une technique complémentaire en combinaison avec d'autres mesures CND plus locales

(Résistivité électrique, ultrason) pour améliorer l'évaluation des propriétés des bétons (ex. saturation, porosité, résistance mécanique) ^[16].

1.2.2. Investigations Destructives

Les investigations destructives dans les structures en béton armé peuvent prendre plusieurs formes. Soit on y a recours pour effectuer un prélèvement de matériau pour connaître ses caractéristiques géométriques, mécaniques et chimiques, soit c'est pour avoir accès à des éléments interne ou sous-jacent à la structure. Cela permet aussi de connaître leur état d'altération en profondeur ainsi que l'ampleur des pathologies.

- **Carottage D'éléments En Béton Armé**

Le recours au carottage du béton armé peut avoir plusieurs objectifs.

- Tout d'abord dans un dallage afin de permettre la réalisation d'essais géotechniques sur le sol en place tel que des pénétromètres dynamiques ou des tarières. Ceci pour caractériser le sol sous la structure dans le cadre d'une rénovation ou d'une restructuration de l'ouvrage.
- Afin de pouvoir déterminer les caractéristiques chimiques et mécaniques d'un élément en béton de la structure, en effectuant des essais de compressions sur les carottes prélevées, mais aussi

des analyses chimiques et microscopiques afin de déterminer les différents constituants et leur quantité. Cela permet de déterminer quel type de ciment a été utilisé ainsi que le rapport E/C.

- Déterminer les caractéristiques des couches constituantes de l'élément (épaisseur du revêtement, de la chape, du béton,...).

La norme NF EN 13791 de septembre 2007 indique deux méthodes pour «l'évaluation de la résistance à la compression sur site des structures et des éléments préfabriqués en béton». La méthode à utiliser varie selon le nombre d'éléments carottés dans la structure concernée, mais dans tous les cas, elle permet d'estimer la classe de résistance du béton.

Cette méthode nécessite le recours à une carotteuse et il peut être nécessaire de déterminer préalablement le ferrailage de l'élément afin d'éviter d'avoir des aciers dans la carotte. Ceci pour deux raisons : d'une part, cela fragilise plus la structure si les aciers prélevés ont un rôle important, d'autre part les résistances à la compression obtenue, sur une carotte dans laquelle il y a présence d'acier, sont faussées. Pour les mêmes raisons, il faut éviter de carotter un élément sur une fissure.

- **Prélèvements D'aciers**

Le prélèvement d'acier peut s'avérer utile notamment lorsqu'un recalcul d'une structure est demandé. Dans ce cas, il est important de connaître les aciers présents dans un ouvrage. Ainsi, en prélevant des aciers, cela permet de déterminer leur type, que ce soit des aciers Haute Adhérence, lisse, TOR, etc. Mais aussi leurs caractéristiques mécaniques telles que la limite d'élasticité de l'armature. Tous ces éléments sont nécessaires afin de pouvoir déterminer quelles sont les charges pouvant s'appliquer sur l'élément et s'il est nécessaire de prévoir de renforcer la structure soit avec des tissus de fibre de carbone ou par ajout d'armatures afin de pouvoir répondre aux besoins du client ou des utilisateurs.

Le prélèvement d'aciers peut se faire par tronçonnage de l'armature, après l'avoir préalablement dégagé du béton adjacent. Il est préférable de le faire dans des zones saines pour ne pas risquer de fragiliser encore plus la structure à cet endroit.

Il peut parfois s'avérer utile de prélever localement des armatures dans des zones touchées par des pathologies, telle que la corrosion des armatures afin de pouvoir déterminer son avancement ainsi que la section restante d'acier pouvant être exploitée afin de déterminer les quantités d'armatures nécessaires à rajouter pour redonner à l'élément au minimum sa section d'acier initiale^[17].

- **Test à la carbonatation**

Le principe du test à la carbonatation repose sur le fait que le pH du béton carbonaté est plus faible que celui du béton sain. Pour déterminer la zone carbonatée, il est généralement utilisé un indicateur coloré tel que la phénolphtaléine.

La phénolphtaléine est un composé organique de formule $C_{20}H_{14}O_4$. L'utilité de ce composé est qu'il change de couleur selon le pH de l'élément avec lequel il entre en contact. Il fait partie des indicateurs de pH ou indicateur coloré. Ce changement de couleur est dû modification de la structure chimique de la molécule lors du passage de la forme protonée (milieu acide) à la forme déprotonnée (milieu basique). La couleur que prend la phénolphtaléine dépend du pH. Elle sera rose pour un pH compris entre 8,2 et 12 et incolore au-delà et au-deçà de cette zone de virage.

Cet essai se réalise généralement sur une coupe fraîche de béton. Il faut y pulvériser la solution de phénolphtaléine, si la phénolphtaléine ne réagit pas, il faut approfondir la coupe dans le béton par paliers d'un centimètre et répéter les étapes précédentes jusqu'à ce que la phénolphtaléine vire au rose. Puis il est nécessaire de mesurer l'épaisseur entre le parement extérieur et la zone à laquelle commence la coloration du béton. Cela nous donne la profondeur de carbonatation du béton de cette zone. Il peut être utile de réaliser cette mesure en différents points d'un élément afin de pouvoir cartographier les profondeurs de carbonatation associées.

Il peut s'avérer intéressant de coupler les mesures de profondeur de carbonatation avec les mesures d'enrobages données par exemple avec un phacomètre de type Ferro scan. En effectuant un certain nombre de mesures, il est possible d'obtenir une courbe du type :

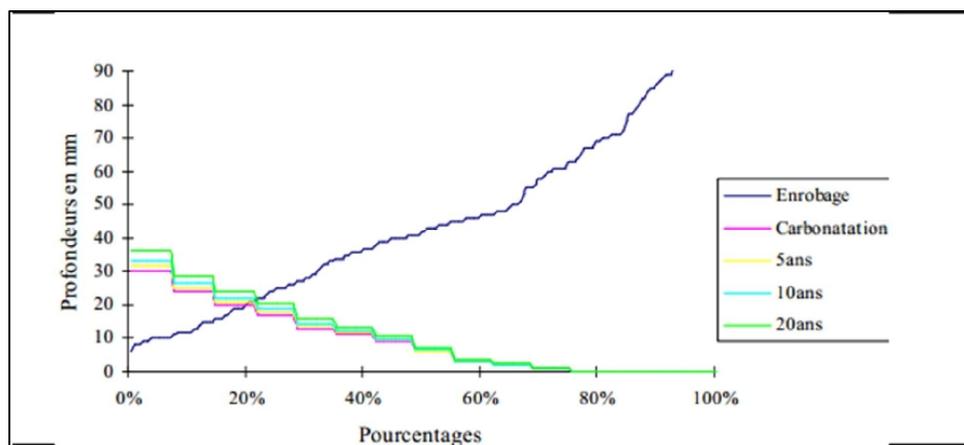


Figure 8 : Graphique enrobage-carbonatation

[Réhabilitation des ouvrages en béton armé-*par* Nabila BOUALLA, Univ Oran]

2. Etanchéité

2.1. Revêtements de chaussée

Les ponts-routes sont pratiquement toujours revêtus d'un tapis bitumineux, même lorsqu'ils font partie d'une section de route dont la chaussée est en béton. Dans ce dernier cas, le revêtement bitumineux se prolonge au-delà des culées sur une longueur égale à celle de la dalle de transition.

Ce tapis est relativement mince: de 4 à 6 cm suivant les cas. Sur les itinéraires très fréquents et notamment sur les autoroutes, on prévoit la possibilité d'ajouter ultérieurement une deuxième couche portant l'épaisseur totale à 8 ou 10 cm. Suivant sa constitution (béton bitumineux, enrobes denses ou enrobes ouverts) il présente déjà une certaine étanchéité par lui-même. Mais il n'est pas considéré comme suffisant pour assurer à lui seul l'étanchéité de l'ouvrage: Même s'il est particulièrement compact, il risque toujours de se fissurer et d'être traversé par les eaux de pluie.

2.2. Chapes d'étanchéité

Nombreux sont les anciens ponts qui ont subi des dégâts importants à cause de l'absence de dispositifs d'étanchéité: de grands ponts métalliques de la fin du siècle dernier ont été très fortement oxydés, dans des ponts en béton armé on a vu apparaître de véritables stalactites calcaires sous la dalle de couverture, et dans certains ponts en pierre, l'infiltration de l'eau a entraîné de coûteuses réparations. En outre, dans quelques ponts en béton armé, l'eau qui avait pénétré dans les poutres a provoqué quelques éclatements pendant les périodes de gel.

2.2.1. Constitution de la chape

Dans la grande majorité des ponts, cette chape est asphaltique. Son épaisseur minimale est de 1 cm et dans des cas spéciaux elle peut atteindre 23 mm (une première couche d'asphalte pur de 8 mm et une contre chape de 15 mm en asphalte sable). Quelquefois, la chape est constituée d'une couche de mortier fortement dose en ciment, de 2 à 3 cm d'épaisseur. Plus rarement, on a employé des chapes comportant des armatures ou constituées de caoutchouc de synthèse ou de matières plastiques.

2.2.2. Position

La chape est souvent placée directement sous le revêtement de la chaussée. Quelquefois elle est posée sur la partie supérieure de la dalle sous chaussée, quand cette dalle n'est pas bombée transversalement; elle est alors séparée du revêtement par le renformis en béton qui donne à la chaussée son profil transversal (constitué en général de deux pentes à 2 ou 3% raccordées paraboliquement sur 0,50 m de part et d'autre de l'axe).

Plusieurs Ingénieurs insistent sur l'intérêt d'interposer entre la chape d'étanchéité, quand elle est en asphalte, et le revêtement de chaussée, une contre chape en mortier ou en béton (qui peut être constituée par le renformis).

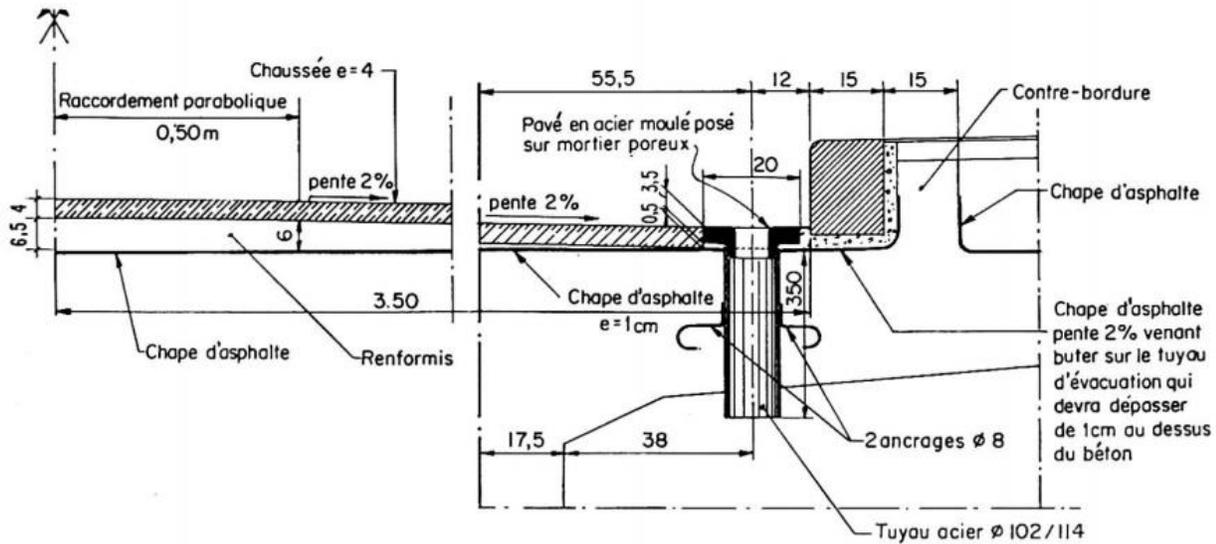


Figure 9 : Les chapes d'étanchéité

Dans le but d'éviter la dégradation de cette chape au cours des réfections du revêtement. D'autres, au contraire, observent qu'une contre chape en béton placée entre le revêtement et la chape asphaltique est exposée à se disloquer et à se broyer. A leur avis, il faut placer la chape sous le revêtement sans aucune interposition de béton, ce qui ne présente pas d'inconvénient puisque les revêtements actuels s'entretiennent normalement par rechargement en surface.

2.2.3. Détails de réalisation

Il est important que la chape soit relevée dans un élément de béton vertical et ceci non seulement le long des bords de la chaussée, mais aussi le long des joints transversaux.

2.2.4. Ouvrages sans chape d'étanchéité

On admet que la chape d'étanchéité n'est pas indispensable lorsque le béton de la dalle sous chaussée est toujours comprimé, ce qui est le cas dans les travées indépendantes en béton armé ou encore lorsque les eaux pluviales ne peuvent pas traverser la dalle, par exemple lorsque cette dalle est associée à une tôle continue.

2.3. Les trottoirs

La pente transversale des trottoirs (en général de l'ordre de 2%) est toujours inclinée vers la chaussée pour que les eaux s'écoulent dans les caniveaux. Le revêtement habituel des trottoirs, qui consiste en une couche de 1,5 à 2 cm d'asphalte sable, constitue par lui-même une bonne étanchéité.

Lorsque le trottoir est plein, c'est-à-dire, lorsque la bordure peut être appuyée contre le béton maigre qui le remplit, la chape d'étanchéité sous chaussée peut être prolongée sous le trottoir et relevée derrière la corniche. Lorsque le trottoir comporte une galerie pour canalisations, la chape sous chaussée se relevé obligatoirement le long de la contre bordure. Il est prudent alors de prévoir une chape d'étanchéité spéciale pour la galerie, surtout dans le cas où celle-ci est couverte de dalles amovibles: l'expérience montre en effet que des infiltrations se produisent très souvent autour de ces dalles amovibles, malgré les précautions prises pour leur étanchéité.

3. Evacuation des eaux pluviales

3.1. Les pentes

D'une manière générale, pour assurer l'écoulement des eaux pluviales, il est recommandé de prévoir des pentes de l'ordre de 2% et de ne pas descendre au-dessous de 0,5%. Transversalement, le bombement de la chaussée (rapport entre la flèche dans l'axe et la largeur) qui est habituellement voisin de 1/100 est porté à 1/80 ou 1/70 dans les ouvrages soumis à de fortes pluies ou à des arrosages fréquents.

3.2. Les caniveaux

Le plus souvent, le revêtement de la chaussée se poursuit jusqu'au pied de la bordure de trottoir sans discontinuité, c'est-à-dire avec la même pente transversale (2 ou 3%) et le même matériau. Dans des cas particuliers (forte pluviosité, ponts urbains soumis à des arrosages, etc.) le revêtement du caniveau peut être constitué d'asphalte coulé, et sa pente transversale (sur 80 cm à 1 m de la bordure) fixée entre 4 et 7 % suivant la perméabilité du revêtement et la pente longitudinale de la chaussée.

Lorsque la pente longitudinale de la chaussée est très faible ou nulle, on est amené à disposer le fond du caniveau suivant une suite de pentes et contrepenes. Les points bas, où l'on place des gargouilles, sont alors espacés d'une dizaine de mètres au maximum. L'expérience montre que les pentes longitudinales ne doivent pas être inférieures à 5 mm par m, surtout dans les cas où des déformations du tablier sont à craindre. Ces pentes et contrepenes sont obtenues de préférence en faisant varier la pente transversale du caniveau.

Les quelques exemples d'ouvrages comportant trois ponts séparés et accolés, un pont sous chaussée et deux ponts sous trottoirs, ont donné lieu à des appréciations favorables en ce qui concerne l'évacuation des eaux dans l'intervalle subsistant entre le pont sous chaussée et les ponts sous trottoirs.

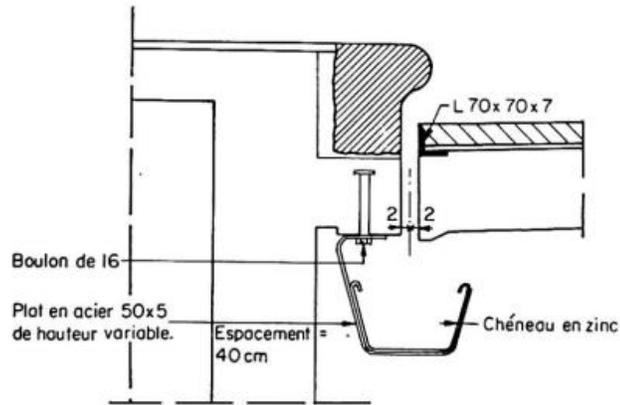


Figure 10 : position des Chéneau

3.3. Les gargouilles

3.3.1. Espacements

Lorsque la pente longitudinale du pont est nulle ou très faible, les gargouilles peuvent être espacées au maximum d'une dizaine de mètres. Plus la pente longitudinale est forte et plus cet espacement augmente: il existe même beaucoup de ponts dans lesquels il n'y a aucune gargouille et où les eaux pluviales sont évacuées par les caniveaux au dehors de l'ouvrage.

3.3.2. Diamètre et coudes des tuyaux d'évacuation

Beaucoup de petites difficultés d'entretien proviennent des dimensions insuffisantes des tuyaux qui se colmatent ou se bouchent et qu'il n'est pas possible de déboucher lorsque les coudes sont trop prononcés. Il semble que le diamètre intérieur du tuyau d'évacuation doit être d'au moins 10 cm et que l'angle des coudes ne doit pas être inférieur à 135°.

3.3.3. Orifices des gargouilles

Les orifices des gargouilles sont soit laissés ouverts, soit couverts d'une grille dont l'espacement des barreaux doit être assez grand pour éviter des obturations trop fréquentes. Dans tous les cas, il faut prévoir un entretien régulier de ces orifices qui risquent toujours d'être bouchés par les gravillons, les poussières et surtout par les feuilles mortes. L'orifice se trouve le plus souvent dans le caniveau lui-même; lorsqu'il se trouve sous le trottoir, il est nécessaire de prévoir dans celui-ci un tampon de visite permettant le ringardage vertical de la gargouille. Il est très important que les gargouilles puissent évacuer, non seulement les eaux ruisselant sur la surface du revêtement, mais aussi celles qui ont pénétré sur la chape d'étanchéité. Un dispositif efficace consiste à poser le pavé supérieur sur un bain de mortier poreux placé au niveau de la chape. Les orifices de sortie doivent se trouver à une dizaine de centimètres au minimum des parements des maçonneries pour que ceux-ci ne soient pas salis par les descentes d'eau. Malgré cette précaution, le vent risque de projeter l'eau sur les parements; lorsqu'une

gargouille débouché à proximité d'une surface verticale d'une pile ou d'une culée, il est donc préférable de la relier à un tuyau descendant jusqu'à la rivière ou jusqu'au sol.

3.4. Dispositions spéciales au droit des joints

Beaucoup de types de joints de chaussée et de trottoir n'étant pas étanches par eux-mêmes, il convient de prévoir des dispositions spéciales pour recueillir les eaux et les conduire par des tuyaux jusqu'à l'extérieur de l'ouvrage. La précaution la plus importante consiste d'ailleurs à placer des gargouilles immédiatement à l'amont de ces joints pour limiter la quantité d'eau qui pourrait y pénétrer. Pour mieux protéger les parements des piles et des culées, il est préférable de prévoir à leur partie supérieure, des pentes dirigées vers l'intérieur et conduisant les eaux vers des tuyaux prolonges autant que possible jusqu'à leur partie basse.

Les eaux qui franchissent les extrémités des ponts s'infiltrent dans les remblais. Pour les empêcher de couler sur les parements vus des culées, il convient de prévoir un drainage de ces remblais comportant un chemisage constitué de matériaux poreux avec des barbacanes à la partie inférieure. Il est recommandé aussi de protéger les faces arrière des maçonneries en contact avec le sol au moyen d'un enduit bitumineux ou de coaltar désacidifié.

Enfin, il y a un gros intérêt à ce que les abouts des tabliers au droit des joints soient facilement visitables.

CONCLUSION

Dans cette partie nous avons vu l'importance du diagnostic dans l'opération de réhabilitation d'un ouvrage ainsi que des différents moyens disponibles pour le réaliser. C'est l'étape clé qui permet de déterminer les types de pathologies dont souffre l'ouvrage ainsi que leur ampleur. Cela permet aussi de faire des prévisions quant à l'évolution de ces troubles. Mais c'est avant toute chose, l'étape qui va permettre de mettre en œuvre la méthode de réparation la plus adaptée. Cela permet aussi d'évaluer la cause de ces problèmes. Cette cause peut être tout simplement le vieillissement naturel de la structure, mais cela peut aussi être à cause de l'environnement alentours. Afin de rendre les réparations pérennes, il est nécessaire de mettre en œuvre des travaux de réparation et de protection adaptées, mais aussi de travailler sur l'origine du problème afin d'éviter l'apparition rapide de nouvelles pathologies semblables.

Techniques et matériaux de réparations

1. Présentation de la norme européenne EN 1504

La norme Européenne EN 1504 normalise les activités de réparation et fournit un cadre de travail amélioré qui permet de réaliser des réparations durables et réussies, et de satisfaire les clients. Un diagnostic exact, des solutions intégrées et adaptées aux besoins des clients : une recette simple mais infaillible !

1.1. Domaine d'application de la norme

L'intitulé de la norme Européenne EN 1504 est le suivant :

Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton. Elle s'adresse à tous les Intervenants dans le domaine de la réparation des structures en béton.

Pour la première fois dans le secteur, la norme EN 1504 couvre tous les aspects des processus de réparation et/ou de protection, parmi lesquels :

- définitions et principes de réparation
- nécessité d'un diagnostic exact des causes de la détérioration avant la détermination d'une méthode de réparation.
- identification en détail des besoins du client.
- exigences en matière de performances des produits et méthodes d'essai.
- contrôle de la production en usine et évaluation de la conformité, notamment certification CE.
- application sur site des méthodes et systèmes de contrôle de la qualité des travaux.

Le respect scrupuleux de ce document complexe mais complet garantit la qualité des travaux de réparation et de protection réalisés sur site, ce qui augmente le degré de satisfaction des maîtres d'ouvrages.

1.2. Mise en œuvre et interaction avec les normes nationales

La norme Européenne EN 1504 est intégralement mise en œuvre par les membres du Comité Européen de Normalisation (regroupant les organes de normalisation nationaux de 28 pays européens). Toutes les parties harmonisées de la norme Européenne sont des normes nationales dans chacun des pays. Les normes nationales incompatibles ont été retirées en décembre 2008. Certaines normes d'application nationales ou locales peuvent rester sous le contrôle des organes de normalisation nationaux. L'ingénieur en normalisation doit comprendre les exigences du maître d'ouvrage tout en respectant les directives locales d'application, ainsi que les exigences édictées par la norme EN 1504. Même si la mise en œuvre de la norme est entrée en vigueur en 2009, l'industrie de la protection et de la réparation des structures en béton n'a pas encore totalement pris conscience de l'importance de cette norme Européenne EN 1504.

1.3. Les documents formants la série EN 1504

Pour la première fois dans le domaine de la réparation du béton, il est possible de comparer les performances des différents produits étant donné que la norme Européenne EN 1504 ne se contente pas de définir des exigences minimales, mais indique et normalise également des méthodes d'essai. Dans de nombreux cas, il est indispensable d'avoir testé les produits dans leurs conditions d'utilisation prévues et d'avoir vérifié que les performances obtenues soient conformes ou supérieures à ces critères minimaux.

1504-1	principes généraux de protection et de réparation des structures en béton.	2005
1504-2	systèmes de protection de surface pour le béton.	2004
1504-3	réparation structurale et non structurale.	2005
1504-4	collage structural.	2004
1504-5	produits et systèmes d'injection du béton.	2004
1504-6	ancrage de barres d'acier d'armature.	2006
1504-7	protection contre la corrosion des armatures.	2006
1504-8	maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité.	2004
1504-9	Principes généraux d'utilisation des produits et du système.	1997 ENV
1504-10	application sur site des produits et systèmes de contrôle de la qualité des travaux.	2003

Tab 1 : Les 10 documents formant la série EN 1504

La partie 8 de la norme européenne concerne tout spécialement le fabricant et l'institut de certification désigné par les termes « organisme notifié ». La partie 8 de la norme EN 1504 indique les procédures de contrôle de la qualité, d'évaluation de la conformité (y compris les essais de type initial), de marquage CE et d'étiquetage des produits. Les produits de protection et de réparation du béton utilisés pour les immeubles et les travaux de génie civil requièrent d'avoir recours à un système d'attestation de conformité 2+ (Annexe C).

2. Matériaux de réparation pour le béton

Il existe une large variété de matériaux disponibles pour la réparation des ouvrages en béton, des matériaux cimentaires (CC) usuels s'apparentant au béton d'origine aux matériaux à base de polymères (PC), en passant par les matériaux cimentaires modifiés avec des polymères (PCC). Le choix entre un mortier ou un béton de l'une de ces catégories dépend de plusieurs facteurs, dont les conditions de mise en œuvre, les conditions d'exposition et les conditions d'utilisation de l'ouvrage. La décision quant à

elle d'opter pour un mortier ou un béton dépend essentiellement de la profondeur à réparer. De façon générale, on a avantage à opter pour le calibre de granulats le plus gros compatible avec la géométrie de la réparation, de manière à minimiser la quantité de pâte et/ou résine et réduire les risques de fissuration thermique et hygrométrique.

2.1. Mortiers à base de ciment modifiés ou non par des polymères

Les mortiers et bétons ordinaires à base de ciment Portland (CC), d'eau et de granulats sont très souvent utilisés comme matériaux de réparation. Suivant les besoins du projet et spécificités de l'ouvrage à réparer, on utilisera des adjuvants (fluidifiants, agents viscosants, entraîneurs d'air, accélérateurs / retardateurs de prise, inhibiteurs de corrosion, réducteurs de retrait, etc.) et ajouts cimentaires (fillers calcaires, fumée de silice, cendres volantes, laitiers de haut-fourneau, pouzzolanes naturelles) pour obtenir ou améliorer certaines propriétés. Dans tous les cas, les bétons et mortiers doivent être conçus de manière à en maximiser la compatibilité avec le béton d'origine. Dans les mortiers et bétons à base de ciment modifiés par des polymères (PCC), ces derniers sont normalement ajoutés au ciment à raison de 0,05 à 0,20 kg de polymère pur par kilogramme de ciment et cette quantité est généralement spécifiée par le rapport P/C :

$$P/C = \text{masse de polymère} / \text{masse de ciment}$$

Généralement, les polymères se présentent en dispersion ou en émulsion à 50 % en masse de polymère dans l'eau. De ce fait, si le rapport polymère/ciment est, par exemple, égal à 0,2, la dispersion sera introduite dans le mélange à raison de 0,4 kg de dispersion par kg de ciment.

2.2. Mortiers de ciment de polymères – latex

Les latex sont les adjuvants polymères les plus répandus pour les bétons. Ils sont constitués d'une dispersion de particules de polymère dans de l'eau. Les polymères-latex sont en général des élastomères (caoutchouc) ou des thermoplastes amorphes. Les taux de dispersion approchent habituellement 50%. Les latex sont produits par polymérisation dans l'eau d'une émulsion du monomère liquide.

Les polymères de type élastomères les plus employés dans ces latex sont : le caoutchouc naturel, le styrène butadiène (SBS), le polyacrylonitrile (PAN), le butadiène et le polychloroprène.

Les polymères thermoplastiques les plus utilisés sont :

- le polyvinyle acétate, ou copolymère de vinyle acétate avec un monomère comme le chlorure de vinyle, le chlorure de vinylidène.
- le polystyrène ou copolymère de styrène avec différents monomères acrylate;

- le PVC ou copolymère de chlorure de vinyle avec des monomères tels que le chlorure de vinylidène;
- les polyacrylates et leurs copolymères.

Les mortiers modifiés au latex peuvent être mis en œuvre par les procédés classiques, par exemple, dans un mixer rotatif ou à la main. Malgré cela, ils ont tendance à mousser lorsqu'on les agite; dès lors, des agents anti-moussants, comme les huiles de silicone, sont ajoutés. La quantité d'agents anti-moussants est d'environ 1 % de la masse de polymère pur. Des agents entraîneurs d'air ne peuvent être ajoutés à ces mélanges parce qu'ils sont incompatibles avec les latex.

2.3. Durabilité des latex

Il est maintenant bien connu que les latex imperméabilisent les mortiers et diminuent fortement leur perméabilité en fonction du rapport P/C. Si le polymère reste stable, la durabilité de la pâte à ciment vis-à-vis des agents agressifs sera d'autant plus grande. Par exemple, la résistance au gel/dégel sera augmentée par suite de la plus faible pénétration de l'eau dans la structure du produit. Les latex élastomères seront attaqués par les solvants puissants. Ces attaques peuvent être très rapides. Le polymère va gonfler et, dans certains cas, il sera complètement dissout par le solvant. Bien sûr, il y a de nombreuses applications où les solvants sont absents et où les latex fonctionnent normalement.

2.4. Mortiers à base de résine époxy

Dans les bétons et mortiers à base de résine époxy (famille des PC), la teneur en résine époxy peut varier de 4 à plus de 20% suivant l'utilisation :

- faible teneur (4 - 8 %) : économiques, mais peu maniables et perméables, ils doivent être mis en place par vibrodamage;
- teneur moyenne (8 - 15 %) : matériau "truellable"; les plus courants;
- forte teneur (plus de 15 %) : systèmes autolissants, ne nécessitant plus de primer d'accrochage (à appliquer en surface horizontale).

La prise et le durcissement sont fortement dépendants de la température. La température optimale de mise en œuvre se situe entre 10 et 30 °C. En-dessous de 5 °C, la mise en œuvre est aléatoire et les performances mécaniques seront diminuées du fait des propriétés hygroscopiques des durcisseurs. Les résistances mécaniques sont généralement atteintes après 2 à 3 jours de polymérisation :

- $R_{\text{compression}}$ de 50 à 110 N/mm² (MPa);
- R_{flexion} : environ 1/3 des résistances en compression;

- Résistance à l'abrasion : 5 à 15 fois supérieure à celle des bétons de ciment;
- Adhérence supérieure à la cohésion du béton;
- Bonne résistance aux agents chimiques. Néanmoins, ce type de produit, outre son prix, présente une série de désavantages :
- Coefficient de dilatation supérieur à celui du béton; on risque donc des décollements du mortier dans le cas de variations de température trop importantes ou de couches trop épaisses; l'épaisseur de la couche doit être limitée, en fonction du matériau considéré; o 20 à 30 mm pour les mortiers contenant moins de 15 % de résine; o 2 à 3 mm pour les mortiers autolissants.
- Fluage élevé, au-delà de 30 à 40 °C;
- Chaleur de réaction élevée (2 à 3 fois celle du ciment);
- Sensibilité à la température (selon la température de transition vitreuse du liant); ne pas dépasser des pointes de température de 120 °C et éviter de longues expositions à plus de 40 à 50 °C.

2.5. Choix entre matériaux de réparation cimentaires et polymères

Le choix dépend de l'application et des contingences imposées lors de la mise en œuvre. De manière assez générale, et surtout lorsqu'il est prévu que le ragréage participe activement à la protection des armatures, on préfère utiliser les formulations à base de liant hydraulique. Leur forte teneur en ciment leur confère un haut degré d'alcalinité, de sorte qu'ils peuvent participer à la réalcalinisation du béton par diffusion d'ions OH⁻. Au cas où cette réalcalinisation est indispensable, par exemple dans le cas d'une application sur béton carbonaté, il est préférable de ne pas doser le polymère à plus de 10 % par rapport à la masse de ciment, afin que les ions hydroxydes soient suffisamment mobiles.

Les ragréages à base de PC sont intéressants :

- lorsque l'ouvrage doit pouvoir être rapidement utilisé. Les PC développent en effet d'importantes résistances après 24 h;
- lorsque les ragréages ne concernent que de faibles surfaces;
- pour les ragréages de tabliers de ponts, en-dessous des couches bitumineuses;
- lorsque le béton est soumis à l'action d'eaux agressives (acides, séléniteuses, etc.);
- utilisés comme revêtements épais (8 à 15 mm) dans les cas suivants :

- o résistances élevées;
- o durcissement rapide;
- o imperméabilité aux gaz et liquides;
- o résistance aux agents chimiques;

3. Techniques de réparation

La réparation passe par 4 étapes fondamentales :

- détermination des causes des dégradations.
- préparation de la surface à réparer.
- sélection, application et maturation du produit de réparation.
- contrôle de la qualité.

De nombreuses recommandations ont été publiées, à travers de guides techniques, de normes ou de documents scientifiques. Même si certaines spécificités existent, elles visent toutes au développement des conditions d'adhérence après élimination du béton défectueux ou malade. Mais la première étape passe bien entendu par un diagnostic complet de la structure.

3.1. Investigations et diagnostic(Rappel)

Les investigations devront porter au minimum sur les points suivants :

- profondeur de carbonatation.
- épaisseur de recouvrement de l'acier.
- niveau ou risque de corrosion de l'acier.
- cohésion du béton (zone superficielle).
- résistance à la compression du béton; • teneur en chlorure, en alcalins et teneur en sulfate.
- réserve d'alcalinité (teneur en Ca(OH)_2).

Tout autre test approprié et utile en fonction de l'environnement spécifique doit évidemment être mené en complément.

Le Tableau présente un aide-mémoire mis au point pour éviter d'oublier les principales caractéristiques et propriétés du béton à vérifier dans le diagnostic. Les valeurs requises sont présentées à titre indicatif pour donner une idée de ce qui devrait être prévu, mais les besoins réels peuvent différer, selon les codes et les pratiques locales en vigueur.

Caractéristique	Méthode d'essai / Observation	Exigences
Délamination	Marteau	Pas de délamination
Résistance en traction de la couche superficielle	Pull-off test	≥ adhésion (1,5 - 2 MPa) = f_{ct} ≥ 1 MPa
Mouvement de fissure	Jauges mécaniques ou électriques	Pas de mouvement
Largeur et profondeur de fissure	Jauges mécaniques ou électriques, carotte, inspection visuelle ou ultrasonique	-
Profondeur de carbonatation	Test à la phénolphthaléine, épaisseur de recouvrement	< épaisseur de recouvrement
Teneur en chlore	Echantillonnage et analyse chimique	recommandations EN 206
Corrosion de l'acier	Potentiel de corrosion (mapping)	recommandations ASTM C876
Pénétration/présence d'autres contaminants	Echantillonnage et analyse chimique	recommandations spécifiques
Résistance en compression	Carottage et essai de compression Marteau Schmidt (mapping)	Fonction du comportement structurel et dimensionnement

Tab 2 : Essais et observations nécessaires l'évaluation du béton suivant la norme EN 1504-10 et le guide ACI 364.1-R07

Le recours aux méthodes non destructives est bien souvent judicieux et utile, en particulier quand de grandes surfaces doivent être investiguées.

3.2. Préparation de surface

La préparation des surfaces avant réparation constitue une étape essentielle dans le processus de réparation : elle va permettre à la fois d'enlever le béton dégradé mais aussi de rendre la surface propre et rugueuse, contribuant par-là à un meilleur accrochage du système de réparation.

La préparation de surface comporte quatre étapes fondamentales :

- localisation de la zone à réparer;
- enlèvement du béton détérioré;
- préparation de la surface et du périmètre de la réparation;
- nettoyage de la surface et des aciers d'armature.

3.3. Sélection, application et maturation du système de réparation

• Sélection

Dans l'ordre, les principales étapes dans la sélection du matériau de ragréage et de la technique de mise en œuvre appropriés sont les suivantes :

- Choix d'un matériau de ragréage rencontrant les exigences générales de résistance mécanique, de durabilité et de compatibilité (déformationnelle, perméabilité, chimique et/ou électrochimique), de façon à restaurer l'intégrité et les qualités originales de l'élément ou de l'ouvrage.

- Choix d'une méthode de mise en œuvre adaptée aux conditions in situ et permettant la mise en place adéquate du matériau de ragréage sélectionné.
- Revue des caractéristiques du matériau de ragréage et des exigences de mise en place / installation pour apprécier correctement si le système de réparation sélectionné est approprié.
- Modifier / adapter au besoin le choix du matériau et/ou de la méthode de mise en œuvre pour assurer une application satisfaisante et le succès de l'intervention.

Famille générique de matériaux	Type de matériau		Applications			
			Réparations profondes		Réparations minces	Chapes
	Béton	Mortier	Surfaces horizontales	Surfaces verticales		
Matériaux cimentaires (CC ¹)	*	*	X	X	X	X
Matériaux cimentaires à hautes performances (HP ²)	*	*	X	X	X	X
Matériaux auto-compactant (SCC, SCM)	*	*	X	X	X	X
Matériaux cimentaires modifiés avec des polymères (PCC)	*	*	X	X	X	X
Matériaux à base de polymères (PC)	*	*	X	X	X	X
Autres matériaux de spécialités ³	*	*	X		X	X

Tab 3 : Sélection du système de réparation

- 1) Incorpore souvent des ajouts cimentaires (fumée de silice, cendre volante, laitier).
- 2) Incorpore généralement de la fumée de silice.
- 3) Ciment alumineux, ciment de phosphate de magnésium, etc.

- **Application**

L'expérience démontre que toutes les étapes dans la mise en œuvre d'une réparation en béton sont importantes et, de manière générale, aucune ne saurait être omise sans hypothéquer la durabilité de l'intervention. Peu importe qu'il s'agisse de la main d'œuvre, des procédures et/ou des matériaux, des carences résultent presque inévitablement en des réparations de qualité moindre, avec pour résultats une durée de vie réduite. La séquence d'application devrait être bien planifiée et rigoureusement contrôlée tout au long de l'intervention, de manière à s'assurer que les caractéristiques rhéologiques du matériau demeurent à l'intérieur d'un spectre d'acceptabilité et à éviter l'introduction de tout joint froid. Suivant la technique de mise en œuvre préconisée, l'équipement utilisé, les procédures observées et la main d'œuvre disponibles doivent permettre une mise en place adéquate et bien cadencée du matériau de réparation, sans ségrégation, et en assurer la consolidation et la finition appropriées. L'obtention de surfaces finies ayant les qualités esthétiques et la durabilité souhaitées nécessite une attention particulière et la mise en œuvre de procédures adaptées. Pour les matériaux de ragréage mis en place de façon gravitaire – hormis le cas des matériaux autoplaçants, les opérations de compactage sont importantes pour obtenir un ragréage dense et uniforme, et une interface de résistance optimale. Le compactage est particulièrement critique lors de la mise en place sur une surface au relief très accidenté, pour prévenir la formation de vides et de nids de cailloux à l'interface, potentiellement très pénalisants pour la durée de vie de l'intervention. L'utilisation d'aiguilles ou de plaques vibrantes est recommandée. Enfin, après le compactage, les opérations de régilage, l'aplanissement et de finition doivent être accomplies de manière à ce que le matériau soit manipulé et déplacé de façon minimale. La manipulation excessive du matériau favorise la ségrégation du matériau par remontée des particules fines et de l'eau vers la surface, hypothéquant la qualité de la surface avec des risques accrus de faïençage (patron de fissuration fine) et de faible résistance à l'abrasion (surface poussiéreuse).

- **Mûrissement**

La mise en œuvre d'un mûrissement approprié (type et durée suivant la nature du matériau de ragréage) est fondamentale pour l'obtention d'une réparation de qualité satisfaisant les exigences du cahier des charges. Non seulement le mûrissement est important pour assurer la durabilité et une résistance à l'abrasion satisfaisante, mais il permet également de réduire les risques de conséquences défavorables liées au retrait de séchage. Dans les réparations de surface, le mûrissement se révèle encore plus critique que dans la construction d'éléments nouveaux et doit être mis en œuvre dès que possible. En effet, en raison de leur volume limité et de leur géométrie (rapport surface/volume en général relativement élevé), les couches de ragréage sont davantage sujettes à une dessiccation séchage rapide.

CONCLUSION

L'entretien et la maintenance de nos structures et infrastructures constituent un défi majeur pour nous. Les dégradations subies par les structures en béton armé sont liées dans tous les cas à la présence d'eau et, dans les environnements courants, à la corrosion des armatures, qui engendre gonflement de l'acier et épaufrures dans le béton. La prise en compte de l'environnement dans lequel l'ouvrage est construit est fondamentale, non seulement dans le cas de la construction neuve, mais aussi en situation de maintenance et de réparation. Le produit utilisé, en particulier pour la réparation des épaufrures, doit apporter une résistance supplémentaire par rapport à l'environnement extérieur, en même temps qu'une bonne compatibilité – essentiellement dimensionnelle – avec le support à réparer. En vue de favoriser l'adhérence et donc la durabilité de la réparation, les études montrent à suffisance l'importance de l'adhérence initiale du produit de réparation : c'est une condition nécessaire mais pas une condition strictement suffisante de longévité. A ce sujet, la préparation adéquate de la surface à réparer, consistant à enlever le béton de mauvaise qualité, à garantir une rugosité minimale pour favoriser l'accrochage mécanique, à obtenir une surface propre sont des opérations indispensables pour garantir l'adhérence. L'emploi de plus en plus généralisé de bétons auto-plaçant mais aussi de bétons à ultra-hautes performances posent question pour l'avenir à moyen et long termes : les techniques et les matériaux employés aujourd'hui sur des bétons de moindres qualités seront-ils toujours valables pour des matériaux plus résistants, moins poreux ? Ces produits sont-ils eux-mêmes susceptibles de servir de produits de réparations pour les bétons actuels ? Sont-ils compatibles ?

Cas d'étude : Pont d'oued DJEDI

1. Présentation de l'ouvrage

L'ouvrage faisant l'objet de cet article est situé sur la route nationale 3 (RN3) (PK : 343 + 655) à quelques 25 km de la ville de Biskra. Il permet à la route de franchir Oued Djedi. Il a été achevé et mis en service en 1985. Il s'agit d'un pont mixte horizontal d'une longueur totale de 340 m, constitué de 11 travées isostatiques de 30 m de chacune. Le tablier de 10 m de largeur est composé de trois poutrelles métalliques en P.R.S. de 1,50 m de hauteur. Ces poutrelles sont solidarises par deux entretoises d'about, trois entretoises intermédiaires et surmontées par une dalle en béton armé. Son profil en travée est constitué d'une chaussée de 8 m de large encadrée par deux trottoirs de 1 m de largeur. Le support de la chaussée est formé de deux appuis en béton armé avec murs en retour et dix piles intermédiaires constituées de : Chevêtre de 1,20 m de largeur et 0,8 m de hauteur reposant sur trois (03) fûts circulaires de 1,0 m de diamètre. Les fondations des piles implantées dans l'Oued sont protégées par des batardeaux en palplanches métalliques. Le béton a été dosé à 400 kg/m³ de ciment portland CPA 325 avec un rapport E/C (eau /ciment) de 0.55, 750 kg /m³ de sable roulé 0/5 et de 1100 kg/m³ de gravier 5/25 provenant des carrières de la région de Biskra. ^[18]



Figure 11 : Emplacement géographique du pont d'oued Djedi

Tab 4 : FICHE D'IDENTIFICATION DU PONT

WILAYA : BISKRA	VOIE PORTEE : RN 03 PK : 343+900
DESIGNATIONS	OBSERVATIONS
TYPE DE L'OUVRAGE	O.A MIXTE
LONGUEUR TOTALE (ML)	341
LARGEUR TOTALE (ML)	10
TYPE DE TABLIER	Mixte
NOMBRE DE TRAVEES	11
NOMBRE ET TYPE DE JOINTS DE CHAUSSEE	12
NOMBRE ET TYPE D'APPAREILS D'APPUI	66 Lasto Frettées
ANNEE DE MISE EN SERVICE	1982
DATE DE LA DERNIERE VISITE	2018
DATE DE LA DERNIERE INSPECTION DE TAILLEE	2018
TRAVAUX D'ENTRETIEN ET DE REPARATION (DEPUIS LA DERNIERE ACTION DE SURVEILLANCE)	2010

[Par DTP- wilaya de Biskra]



Figure 12 : Vue panoramique du pont

2. Présentation des dégradations

De nombreux désordres ont été constatés sur cet ouvrage principalement fissuration du béton et corrosion des armatures provoquant l'éclatement du béton d'enrobage. Ces dégradations ont été observées sur les chevêtres et les fûts, en particulier, celles protégées par des batardeaux en palplanches métalliques. La Figure 13 visualise la position et le degré de dégradation des chevêtres et des fûts.

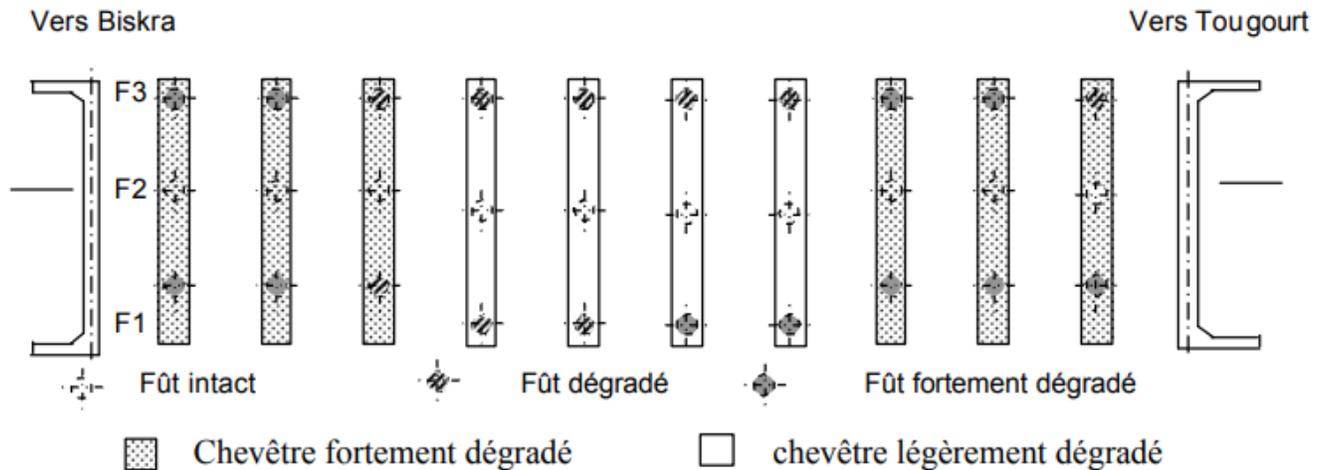


Figure 13 : Vue en plan du pont.

Les chevêtres des piles N° P1, P2, P3, P8, P9 et P10 (Figure 13) sont les plus touchées. La figure 14 illustre les dégradations constatées. Ces dernières se manifestent sous les formes suivantes :

- corrosion avancée des armatures ;
- détérioration du béton d'enrobage ;
- fissuration multidirectionnelle du béton ;
- poussée à vide des armatures d'encrage à retour d'équerre.

C'est aux extrémités des chevêtres que les dégradations sont importantes ; dans leur partie médiane, elles ne sont que très peu dégradées. Ceci s'explique par la stagnation des eaux au niveau de ces extrémités. Alors que les chevêtres des piles P6 et P7 sont pratiquement intacts. Le reste des chevêtres présente une légère dégradation.



Figure 14 : Chevêtre dégradée

Elément structural	Type de dégradation	Solutions SERO-EST
Semelles (Figure 15)	Accumulation des eaux	Remplissage par béton.
Piles (Figure 16)	Fissuration aléatoires. Surcharge.	Protection par chemisage. Renforcement par voile.
Chevêtres (Figure 14)	Corrosion des armatures. Fissuration aléatoires. épaufrure. Faïençage.	Brossage des armatures pour retirer la corrosion, application d'une peinture anticorrosion, couverture par mortier.
Tablier (Figure 17)	Joints de chaussée dégradée (Figure 19). Epaufrure. Corrosion des armatures. Ecoulement des eaux. Dalles de trottoirs démolies (Figure 18)	Remplacement des joints de chaussée. Brossage des armatures pour retirer la corrosion, couverture par mortier. Remplacement des dalles de trottoirs démolies

Tab 5 : Présentation des dégradations



Figure 15 : les palplanches forment des quais sur les semelles



Figure 16 : Fissuration des piles



Figure 17 : dégradations des trottoirs.



Figure 18 : dalles de trottoirs démolies



Figure 19 : joints de chaussée dégradée

- **Historique de l'entretien du pont d'oued DJEDI**

Les travaux de réalisation de l'ouvrage ont été exécutés entre 1983 et 1985 par l'entreprise nationale des ponts et des travaux d'art (SAPTA). En 1994, des murs cachés en parpaing plein ont été construits au-dessus des sommiers des piles et les culées et ce dans le but de protéger l'ouvrage contre d'éventuels actes de sabotage. Nous avons observé que les joints de chaussées aux niveaux des trottoirs ne sont pas étanche (Figure 20), ce qui a permis aux eaux de pluie de pénétrer à travers les joints de chaussées déversant sur les chevêtres où elles sont retenues temporairement par les murs cachés construits en parpaing, puis elles s'écoulent sur les fûts. Ces eaux sont retenues par les palplanches métalliques mâles conçues qui forment un réservoir. Nous avons constaté que là où il y a des signes d'écoulements les dégradations sont importantes et montrent que ces eaux sont très agressives. Ceci nous a mené à chercher l'origine de cette agressivité. Après enquête, il s'est apparu que l'augmentation de l'agressivité des eaux pluviales provient des sels chutant des camions faisant la navette entre le gisement Chat Malghigh et Biskra. La pluie permet de faire le lessivage du tablier et dissoudre le sel, l'eau salée pénètre à travers les joints inter-travées non étanches. Ainsi la cause principale des dégradations est l'attaque chimique par les ions de chlorure (Cl^-) qui provoque la corrosion des armatures et cette dernière engendre l'éclatement du béton. La dégradation concentrée au niveau des extrémités des chevêtres est vraisemblablement liée à la forme en toit des chevêtres (pente transversale symétrique de 2.5 %). Le manque d'enrobage dans certains endroits et la mauvaise qualité du béton

remarquée par l'état du parement et la présence des niches de graviers ont favorisé la corrosion des aciers.



Figure 20 : les joints de chaussée ne sont pas étanches

- Première opération :

Vers la fin des années 1990, elle consisté d'équiper l'ouvrage par des joints de dilatation, entre les 11 travées de l'ouvrage.

Expertise de 1993 :

En 1993, il a été procédé à une inspection de cet ouvrage par le CTTTP mettant en évidence des traces d'infiltration sur les chevêtres venant des joints de chaussée et trottoirs ainsi que la corrosion des poutres métalliques au niveau des joints. Cette expertise a bien signalé l'absence et la nécessité des joints de chaussée avec dispositif d'étanchéité, l'étude a été réalisée par bureau d'étude BECO pour la DTP de BISKRA.

- Deuxième opération :

Entre 1999 et 2000, elle consiste à la réhabilitation des piles et des dés d'appuis. A savoir :

Le confortement par gainage en béton armé:

- Des fûts d'extrémité des piles P2, P3, P4, P10, et P11
- Des fûts aval des piles P5 et P6

La réhabilitation partielle:

- Des fûts d'extrémité des piles P7, P8 et P9
- Des fûts amont des piles P5 et P6
- Des dés d'appuis des piles P2, P3, P4, P10, et P11

La réhabilitation totale:

- Des dés d'appuis des piles P5, P6, P7, P8, et P9

Expertise de l'année 2000 :

En 2000, une autre expertise a mis en évidence une dégradation générale de l'ouvrage particulièrement un état alarmant des chevêtres et des bases des colonnes de piles.

- Traces de venue des eaux sur les chevêtres.
- Stagnation de plusieurs jours de l'eau provenant de l'écoulement dans l'oued et les venues des eaux à travers les joints de chaussée à la base des piles dans les réservoirs formés par des batardeaux en palplanches métalliques.
- Fissuration des piles à leurs bases au niveau de stagnation des eaux.
- Corrosion avancée des armatures de chevêtres.
- Eclatement et gonflement du béton des parements des chevêtres.

Suite à ces constatations, les travaux de réfection ont été réalisés par l'entreprise SAPTA avec un devis proposé d'environ 19, 000, 000,00 DA, l'étude a été réalisée par bureau d'étude BECO pour la DTP de BISKRA.

- Troisième opération :

En 2011, elle a consisté principalement le traitement de la partie métallique du tablier (sablage, peinture), reprise partielle des joints de chaussée et remplacement des gargouilles.

Expertise de l'année 2007 :

L'expertise de 2007 a mis évidence les travaux réalisés en 2000 qui n'ont pas la durabilité voulue .c .ad les travaux n'ont pas éliminé la source de dégradation des chevêtres (infiltration d'eau à travers les joints de trottoirs).

3. Réparation des dégradations

❖ préparation de la surface et du périmètre de la réparation

• Piquage du béton

• manuel :

- o limité aux petites surfaces horizontales, verticales ou plafonds et sur support massique ou déformable.
- o effectué à la pointe ou au burin.
- o procédé irrégulier et lent (artisanal).
- o surtout utilisé pour l'enlèvement des dépôts de surface ou l'ouverture des fissures.
- o ne s'applique qu'aux surfaces de béton et piquage de barres apparentes.

- mécanique :

Les marteaux piqueurs pneumatiques ou hydrauliques sont à employer avec prudence. Il faut utiliser de préférence les outils électriques et seulement en dernier recours si aucune autre technique n'est applicable; ils ne conviennent que pour éliminer des dépôts importants sur des supports massiques; on distingue les marteaux piqueurs légers et les brise bétons.

- **Bouchardage**

Le bouchardage consiste en le martèlement de la surface avec un élément cylindrique ou carré à tête cruciforme ou munie de pointes. Le degré de finesse du traitement est proportionnel au nombre de pointes. C'est comme les précédents, un procédé violent. Il ne s'applique qu'aux surfaces en béton et ne peut être utilisé que dans le cas de support massique (surfaces horizontales, verticales ou plafonds).

On distingue :

- bouchardage manuel :

- o procédé lent.
- o permet d'éliminer les surépaisseurs ou les croûtes.
- o appliqué pour éliminer des anciens revêtements.
- o provoque l'éclatement de quelques millimètres d'épaisseur de la peau de surface.

- bouchardage mécanique :

- o procédé très énergique qui peuvent désorganiser la structure de surface.
- o ne peut s'appliquer qu'avec beaucoup de précautions aux bétons précontraints.
- o convient surtout pour des rectifications de planéité.
- o utiliser de préférence des outils électriques dont l'énergie incidente est plus faible qu'avec des outils pneumatiques.
- o appliqué aux grandes surfaces horizontales.



Figure 21 : Préparation de la surface des chevêtres



Figure 22 : Bouchardage et renforcement du chevêtre

- **Sablage et grenailage**

Le sablage est le meilleur procédé qui donne un très bon état de surface et une rugosité idéale pour les collages. Il ne peut être mené que par une main d'œuvre spécialisée et s'applique en général à toutes les surfaces (acier et béton). Dans tous les cas, un filtre déshydratant sera placé en aval du compresseur.

L'hydrosablage combine la technique de la lance sous haute pression d'eau et du sablage. Elle présente comme inconvénients d'être moins efficace que sablage et de livrer un support humide, qui nécessite un séchage. Elle permet toutefois d'éviter les poussières et les étincelles.

La projection de billes consiste à projeter à haute vitesse des billes d'acier (environ 2 mm de diamètre). Les billes d'acier sont aspirées immédiatement après leur projection sur le béton pour être réutilisées. Cette technique produit moins de poussière. La profondeur du béton qui est enlevé est généralement de quelques millimètres mais peut être plus importante si désirée.

Les trois procédés (sablage, hydrosablage et grenailage) s'appliquent à l'acier et au béton, sur supports massifs ou déformables ainsi qu'aux surfaces grandes, moyennes ou petites.

- ❖ **Protection contre la corrosion**

Il existe aujourd'hui une variété de méthodes et techniques pour restaurer et améliorer la résistance à la corrosion des ouvrages en béton armé. Dans l'optique de travaux de réparation, on peut classer les différentes méthodes d'intervention envisageables en trois catégories:

- reconstitution de la couche d'enrobage;
- protection par imperméabilisation;
- protection par traitement électrochimique:
 - o inhibiteurs de corrosion;
 - o réalcalinisation et extraction des chlorures;
 - o protection cathodique.

- **Reconstitution de la couche d'enrobage**

Cette opération vise à réparer la couche de parement et à restaurer la protection de l'armature, après élimination des zones dégradées, remplacement des barres d'armature trop endommagées et protection directe du ferrailage. Suivant la nature et la condition de l'ouvrage, les contraintes constructives et architecturales, de même que la sévérité des conditions d'exposition, les principaux paramètres à considérer pour la réparation de la couche d'enrobage sont la nature du matériau et l'épaisseur de la couche d'enrobage, laquelle pourra dans certaines situations être accrue pour relever le degré de protection offert. La reconstitution d'une couche d'enrobage de qualité adhérant fermement au béton de

support est une condition essentielle au succès et à la durabilité des réparations dans les ouvrages en béton armé.

- **Protection additionnelle de l'armature**

Au-delà de la protection fondamentale offerte par la couche d'enrobage, on peut opter pour la mise en œuvre de protections additionnelles. Essentiellement, on peut on peut diviser les types de protection en deux grandes catégories, soit l'imperméabilisation et les traitements de nature électrochimiques.

- **Protection par imperméabilisation**

Il existe différentes catégories de produits pour imperméabiliser les surfaces en béton, allant des produits appliqués par imprégnation (hydrofuges, consolidant) aux membranes, en passant par les revêtements de surfaces aux caractéristiques variées. Ces produits n'ont pas d'action directe sur la corrosion mais sont des traitements complémentaires, en limitant davantage l'accès d'humidité et de contaminants extérieurs.

- **Protection par traitements électrochimiques**

Les traitements de protection de nature électrochimique visent à contrôler l'activité de corrosion en intervenant directement dans le processus. Aux fins de la réparation d'ouvrages en béton armé, on peut subdiviser les approches possibles en trois familles : les inhibiteurs de corrosion, les méthodes de conditionnement et les méthodes de protection cathodique.

- ❖ **Techniques de mise en œuvre pour la réparation des épaufrures**

Il existe une très grande variété de situations. L'intervention peut servir à :

- combler un éclat provoqué par un impact;
- combler une cavité creusée par attaque chimique ou mécanique, ou résultant d'un défaut de mise en œuvre (nid de graviers);
- donner une texture à une surface en béton qui a été dégradée superficiellement par des effets climatiques (gel, pluie acide), par des effets thermiques (incendie) ou chimiques;
- rendre les caractéristiques mécaniques initiales d'un élément dégradé. Dans ce cas, le matériau participe au renforcement mécanique de l'élément.

A chaque situation correspondent un ou plusieurs types de ragréages mais aussi plusieurs modes d'applications (applications manuelles ou mécanisées (mortier ou béton projeté)). Chaque type d'application a ses exigences spécifiques. Néanmoins, il y a une exigence générale valable pour toutes les applications : il s'agit de l'adhérence du mortier de ragréage sur le support.

- **Application à la truelle**

Cette méthode consiste à mettre en place le matériau de ragréage à la truelle. Le matériau doit être préparé de façon à présenter une consistance plastique adaptée à l'opération. Cette technique est utilisée pour la réparation d'épaufrures de relativement faible profondeur où l'armature n'est pas exposée.

- **Application par consolidation à sec**

Dans la mise en œuvre par consolidation à sec (« dry packing »), le matériau de réparation est mélangé en incorporant la quantité d'eau et/ou d'adjuvant(s) minimale de manière à obtenir une consistance plastique uniforme (tout juste assez pour que le matériau soit cohésif).

- **Mise en place par gravité dans des coffrages**

Lorsque la localisation ainsi que l'étendue et/ou la profondeur des épaufrures le justifie, on peut procéder à l'installation d'un coffrage pour délimiter adéquatement les surfaces exposées.

Le matériau de ragréage est déposé dans le coffrage et consolidé par pilonnage ou, plus généralement par vibration, interne ou externe.

- **Mise en place par pompage et pressurisation des coffrages**

La méthode consiste à introduire un matériau de ragréage (préalablement malaxé) par pompage dans un coffrage étanche, via une conduite connectée à ce dernier, jusqu'à ce que le coffrage soit rempli et pressurisé. La génération d'une pression interne dans le coffrage la consolidation favorise une excellente consolidation de la couche de ragréage et, en raison du contact intime, une adhérence accrue.

- **Mise en place avec granulats pré-placés**

Cette méthode consiste à compacter un squelette granulaire à granulométrie discontinue dans un coffrage, à l'intérieur duquel on injecte ensuite un coulis sous pression pour combler tous les interstices. En raison du contact entre les granulats et du volume de pâte très réduit, le retrait du béton ainsi obtenu est très faible.

- **Mise en place par projection**

- **Projection par voie sèche**

Dans le procédé par voie sèche, le mélange sec (pré-ensaché) ou légèrement préhumidifié est introduit dans le compresseur à béton projeté et poussé dans les conduites au moyen d'air comprimé. Le mélange est ainsi transporté jusqu'à la lance d'extrémité dans laquelle l'eau de gâchage et, le cas échéant, certains adjuvants sont introduits, et d'où le béton pressurisé est ultimement propulsé vers la surface réceptrice.

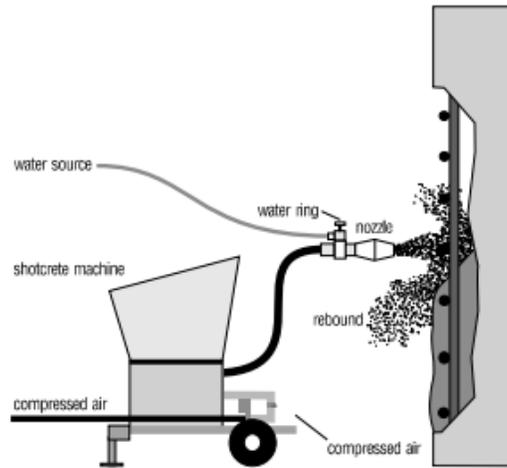


Figure 23 : Mise en place d'un matériau de ragréage par projection voie sèche

- **Projection par voie humide**

En projection par voie humide, les constituants, hormis certains adjuvants, sont d'abord dosés et complètement malaxés.

Le mélange obtenu est ensuite versé dans une pompe à béton et transporté jusqu'à la lance, à l'extrémité de laquelle de l'air comprimé et des adjuvants additionnels, le cas échéant, sont introduits. Le matériau est ainsi accéléré et propulsé sur la surface à réparer grâce à l'air comprimé.

La technique se prête bien aux applications sur de grandes surfaces et permet de bien ré-enrober l'armature dans la mesure où il n'y a pas trop de congestion et que les barres sont de taille modérée (< 20 mm). Le mélange doit être à la fois pompable et présenter un affaissement suffisamment faible pour ne pas s'affaisser après contact avec la paroi réceptrice.

4. Choix et application des matériaux pour l'entretien du pont

4.1. Choix des matériaux

Le choix des matériaux ne dépend pas seulement de la conformité aux exigences requises, mais doit être disponible. En raison de l'engagement de l'Algérie à se positionner sur les importations dans les décisions économiques de 2017, nos choix se limitent au marché local.

Après des recherches sur le marché local, nous trouvons le pionnier européen du ciment disponible sur le marché intérieur algérien.

SIKA –FOURNISSEUR DE SYSTÈMES COMPLETS

Sika est le leader mondial, en termes de marché et de technologie, des produits de la chimie de construction, dont les produits de rénovation de pont. Possédant des usines de fabrication dans le monde entier, et des filiales régionales dans plus de 70 pays. Les 100 dernières années passées à

travailler sur la rénovation de ponts et d'autres structures de génie civil en béton armé permis d'acquérir une expérience et une expertise reconnue. Sika fournit aujourd'hui un éventail complet de produits et de systèmes innovants, spécialement conçus pour relever tous les défis des exigences et des situations présentes dans les différents projets de rénovation spécifique de pont, et selon les conditions chantier partout dans le monde.

A. Remplacement du béton

Le plupart des remplacements sera effectuer au restauration des chevretres et au tablier.

1. Exigence :

- Béton à haute durabilité et à perméabilité réduite, possédant une excellente résistance aux expositions ultérieures prévues.
- Béton à haute résistance initiale afin de réduire les périodes de fermeture.
- Ouvrabilité prolongée et excellente plasticité permettant une mise en place du béton rapide, facile et sûre, avec des garanties de performance.
- Utilisation optimisée des matières premières disponibles.

2. Solutions Sika : Sika Monotop® SF 126

Mortier hydraulique mono-composant fibré à base de fumée de Silice pour la réparation des bétons soumis à des atmosphères agressives avec inhibiteurs de corrosion.

2.1. Avantage :

- Mise en œuvre simple et aisée.
- Bonne adhérence sur béton, mortier, brique, pierre.
- Applicable sur des épaisseurs de 3 à 100 mm par passe.
- Excellente imperméabilité.
- Excellent comportement au retrait.
- Excellente tenue au gel et aux sels de déverglaçage.
- Excellente résistance aux sulfates et aux eaux de mer.
- Très bonne protection du béton armé contre les environnements agressifs.
- Contient des inhibiteurs de corrosion.

**Coloris**

Gris

Conditionnement

Sac de 25 kg

Consommation2,1 kg/m²/mm d'épaisseur**Conservation**

12 mois en emballage intact

Figure 24 : Sika Monotop® SF 126

2.2. Résistances mécaniques :

Norme EN NF 12190	2 jours	28 jours
Compression	≥ 18 MPa	≥ 50 MPa
Flexion	≥ 4,5 MPa	≥ 8,5 MPa

Tab 6 : Résistances mécaniques **Sika Monotop® SF 126****2.3. Mode d'emploi**

- Application à la truelle ou par projection.
- Surfaçage à la taloche ou au polystyrène expansé dès que le mortier commence à tirer.
- Supporte la pluie environ 4 heures après application à + 20°C.
- Epaisseur minimale par couche : 3 mm.
- Application en vertical sans coffrage jusqu'à une épaisseur d'environ 10 cm en une seule passe.

B. Réparations Du Béton

Le plupart des reparations sera effectuer au restauration des piles et chevetres.

1. Exigence :

- Système totalement compatible (primaire, mortier de réparation, mortier de reprofilage).
- Homologué pour les réparations structurales si besoin.
- Faible sensibilité à la fissuration.
- Application rapide et aisée.

2. Solutions Sika : Sika Monotop®-412 N

Sika Monotop®-412 N est un mortier de réparation mon-composant à base de ciment PMES renforcé en fibres et à faible retrait. Prêt à gâcher.

2.1. Avantage :

- Réparation structurale, classe R4 selon la norme NFN 1504-3
- Maniabilité supérieure.
- Application sans primaire, méthode manuelle et par projection.
- Epaisseur par couche selon type d'application : jusqu'à 70 mm.
- Résistant à l'eau de mer et aux eaux sulfatées (contient fumée de silice et ciment PMES).
- Faible retrait, renforcé en fibres, réduit les risques de fissuration.
- pH élevé, passivant l'armature du béton armé.

2.2. Mode d'emploi

Appliquer Sika Monotop®-412 N à la truelle ou par projection en voie humide. Exemples de machines de projection : ALIVA 1900, PUTZMEISTER S5. Epaisseur minimale : 6 mm En vertical, il est possible d'appliquer jusqu'à 70 mm en une passe. La finition s'effectue à la taloche plastique, éponge ou polystyrène dès que le mortier commence à tirer. Protéger le mortier frais contre la dessiccation en appliquant le produit de cure ou en humidifiant légèrement la surface du mortier.

RENSEIGNEMENTS SUR L'APPLICATION (Sika Monotop®-412 N)	
Proportions du Mélange	3,5 à 3,7 L d'eau pour un sac de 25 kg (le ratio nominal est de 3,6 L pour un sac de 25 kg). En projection par voie humide : 3,7 à 4 L d'eau pour un sac de 25 kg.
Consommation	Dépend de la rugosité du support, env. 18 kg de poudre / m ² / cm d'épaisseur.
Rendement	Une quantité de 25 kg de poudre permet de remplir un volume de 14 litres environ.
Épaisseur de la Couche	min. 6 mm / max. 70 mm en vertical en une passe En sous-face, entre 6 et 50 mm (hors projection).
Température de l'Air Ambiant	+5 °C minimum; +35 °C maximum.
Température du Support	+5 °C minimum; +30 °C maximum Lorsque la température ambiante se situe entre +5°C et +10°C, le mortier peut être gâché avec de l'eau tiède afin d'accélérer la prise. Eviter l'application en plein soleil, en plein vent.
Durée Pratique d'Utilisation	env. 40 min à +20 °C
Temps de Prise initial	début de prise: <ul style="list-style-type: none"> ▪ + 5°C : 8h ▪ + 20°C : 4h30
Temps de Prise final	Fin de prise: <ul style="list-style-type: none"> ▪ +5°C : 12h ▪ +20°C : 6h

Tab 7 : Renseignements Sur L'application Sika Monotop®-412 N

C. L'étanchéité

La réparation sera effectuée juste pour les joints de chaussée.

1. Exigences

- Elastique, résistant à la fissuration, en particulier en cas de basse température.

- Résistance aux chlorures et aux produits chimiques tels que les carburants, les huiles et les liquides hydrauliques.
- Facile à appliquer et s'adaptant aux différences de niveaux du support.
- Application rapide afin de réduire les périodes de fermeture à la circulation.

2. Solutions Sika pour un scellement de joint élastique : SikaHyflex®-160

Systèmes de scellement de joint étanche à hautes performances, destinés aux tabliers de pont, aux parapets et à d'autres éléments.

2.1. Caractères généraux :

- Capacité de mouvement de : $\pm 35\%$.
- Polymérisation sans bulle.
- Application et lissage faciles.
- Bonne adhérence sur de nombreux supports.
- Teneurs réduites en composés organiques volatils.
- Très faibles émissions.
- Surface innovante :
 - aspect légèrement structuré si lissé à sec.
 - aspect lisse si lissé avec un liquide de lissage.

2.2. Conditionnement :

- Cartouche de 300 ml, Carton de 12 cartouches.
- Recharge de 400 ml, Carton de 12 recharges.
- Recharge de 600 ml, Carton de 20 recharges.

D. Formulation du béton de réparation

Pour le renforcement des piles par voiles nous proposons cette formulation du béton :

Résistance à 28 jours (MPa)	Ciment (kg)	Sable (kg)	Gravillon (kg)	Latex (%)	Rapport E/C
45.00	390	800	990	10	0.35

Tab 8 : Formulation du béton de réparation

4.2. Présentation des résultats de l'entretien

4.2.1. Les piles

En raison du dysfonctionnement mécanique et du manque de résistance du béton, le renforcement des piles a été réalisé au moyen des voiles. Devenir ces derniers le support principal du pont et le passage principal des contraintes aux fondations. Cette mesure a été prise à la suite des dommages causés aux chevêtres.



Figure 25 : Renforcement par voile.

4.2.2. Chevêtres

Après de nombreuses et nombreuses réformes de cet élément qui a toujours le premier élément affecté par les eaux du tablier descendant, il devint impossible de le remettre dans son état de service extrême. C'était l'obligation de le mettre entre les voiles pour ne devenir que l'élément le plus influent par la compression moins que la flexion.



Figure 26 : Restauration des chevêtres.

4.2.3. Joints de chaussée

Cet élément a été la principale cause de dégradation du pont, qui a dû être traité non pas maintenant, mais lors de sa première installation en 1990, avec un intérêt pour l'étanchéité.

Cette négligence humaine a été redécouverte en 2019 en laissant les dalles des trottoirs détruites et non étanchées (Figure 17).



Figure 27 : Remplacements les joints de chaussée

CONCLUSION

Après plusieurs réparations sur le pont, lors des réparations précédentes: 1990,1999 et 2011Il a été prouvé que le problème réel n'avait pas été complètement réparé, à savoir l'évacuation des eaux. Par conséquent, il était impératif d'être exposé au problème principal au lieu de n'effectuer que des réparations superficielles.

Il n'est pas possible de remettre le pont dans son état d'origine. Nous vous recommandons la DTP du wilaya de Biskra de rétablir un pont ou un autre passage avant la démolition du pont actuelle dégradée dans un délai ne dépassant pas dix ans en raison du danger que représentent les passagères.

Références bibliographique

1. réparation et protection des ouvrages en béton (bâtiment et génie civil)

Note d'information technique 231(CSTC) [W. De Caluwé (FEREB), M. Le Begge (CFE)] Septembre 2007.
Page7.

2. réparation et protection des ouvrages en béton (bâtiment et génie civil)

Note d'information technique 231(CSTC) [W. De Caluwé (FEREB), M. Le Begge (CFE)] Septembre 2007.
Page8.

3,4. Durabilité des ouvrages en béton <https://www.scribd.com/doc/295169554/CT-G12-8-31-pdf>.

5. réparation et protection des ouvrages en béton (bâtiment et génie civil)

Note d'information technique 231(CSTC) [W. De Caluwé (FEREB), M. Le Begge (CFE)] Septembre 2007.
Page 8.

6. réparation et protection des ouvrages en béton (bâtiment et génie civil)

Note d'information technique 231(CSTC) [W. De Caluwé (FEREB), M. Le Begge (CFE)] Septembre 2007.
Page 8.

7,8. La corrosion – C. CARDE – Béton[s] magazine.

9. Réhabilitation des ouvrages en béton armé

http://www.memoireonline.com/07/12/6023/m_Rehabilitation-des-ouvrages-en-beton- arme1.html

10. Par micha4125 dans Maçonnerie et carrelage le 20 Février 2012 à 12:38

<http://bien-bricoler.maison.com/maconnerie-bien-reparer-les-lezardes-d-un-mur-qui-s-affaisse- a121371746>

11. MATIERE (Le retrait des bétons) [Christophe Carde, directeur technique du LERM]

Septembre/Octobre 2006.

12. TECHNOBÉTON3 LE FAÏENÇAGE (2014).

13. Epaufrure

http://www.le-coin-des-bricoleurs.com/le-wiki-du-bricoleur/Epaufrure,_%C3%A9caillage,_d%C3%A9faut_de_surface

14. Comment nettoyer Lichen sur béton

<http://www.aac-mo.com/comment-nettoyer-lichen-sur-beton.html>

15. ESSAIS NON DESTRUCTIFS DU BETON univ-biskra partie I chapitre 2 2003.pdf.

16. Ngoc Tan Nguyen.

Evaluation non destructive des structures en béton armé : étude de la Variabilité spatiale et de la combinaison des techniques. Autre [cond-mat.other]. Université de Bordeaux, 2014. Français.

17. Projet de Fin d'Études. Réhabilitation d'ouvrages en béton armé

Du diagnostic au confortement (Lorry-Alan MOALIC, élève ingénieur de 5ème année).

18. A. Guettala, S. Benmebarek, « Diagnostic et réparation d'un pont en béton » 2^e Conférence spécialisée en génie des matériaux de la Société canadienne de génie civil ,Montréal, Québec, Canada 5-8 juin 2002.

Normes et standards

1. EN 1504-10: Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité - Partie 10 : Application sur site des produits et systèmes et contrôle de la qualité des travaux.
2. ACI 364.1-R07 (2007) Guide for Evaluation of Concrete Structures before Rehabilitation, committee 364 Rehabilitation, American Concrete Institute, Detroit (MI), USA, 22 p.

ANNEXES

Annexe A: La fiche d'identification

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DES TRAVAUX PUBLICS Fiche d'identification de l'ouvrage Le:...../...../.....			
Fiche N°:			
Direction des Travaux Publics :			
Subdivision de :			
Identification du pont : Wilaya...../Route...../Pk..... (Ex: 04RN101560) (Ex: 04RN101560 Wilaya Oum El Bouaghi route National 10 PK 1+560)			
Situation du pont : X=..... Y=..... Z=.....			
Année de construction : Âge de la structure:.....an			
Cout de réalisation: .....MDA			
Entreprise de réalisation :			
Qualification de l'entreprise :			
BET étude :			
BET suivi :			
Laboratoire de contrôle :			
Caractéristiques de situation :			
Nature de la route : <input type="checkbox"/> RN PK: <input type="checkbox"/> CW PK: <input type="checkbox"/> Autre (.....PK:.....)			
Condition du Trafic : <input type="checkbox"/> Dense <input type="checkbox"/> Moyen <input type="checkbox"/> Faible			
Limitation du tonnage (80% de la surcharge théorique) en T :			
Type du Franchissement : <input type="checkbox"/> cours d'eau <input type="checkbox"/> Route <input type="checkbox"/> Voie ferrée Autre :			
Nom de l'obstacle franchi :			
Emplacement de l'ouvrage : <input type="checkbox"/> zone urbaine <input type="checkbox"/> zone montagneuse <input type="checkbox"/> zone côtière <input type="checkbox"/> Autres (.....)			
Conditions Environnementales : <input type="checkbox"/> Très Agressive <input type="checkbox"/> Agressivité Moyenne <input type="checkbox"/> Agressivité faible			
Utilisation des sels de devglçage : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non			
Possibilité de déviation : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non			
Commentaires :			
Caractéristiques de conception :			
Type d'Ouvrage			
Pont voûté: Mac Béton			
Pont à poutres Pont en caisson Pont haubané Portique			
Pont dalle: pleine vousoir nervurée			
Pont en arc: Tablier inférieur supérieur intermédiaire			
Autre (.....)			
Nombre des Travée :			

Annexe B: La fiche d'inspection

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DES TRAVAUX PUBLICS**

Fiche D'inspection

Le:...../...../.....

Date de la dernière visite Le:...../...../.....

Fiche N°:

Direction des travaux publics :

Subdivision de :

Staff d'inspection

Nom	Prénom	Qualification
.....
.....
.....
.....
.....

Type d'Inspection:

- Inspection visuelle
- Une visite périodique (.....mois)
- Une visite d'inventaire
- Inspection des dommages
- Inspection détaillée particulières

But de l'Inspection :

.....
.....
.....
.....
.....

Les conditions climatique jour de l'inspection :

- La vitesse du vent :
- La température :
- L'humidité :
- Autre :

Matérielles utiliser

Matériel	But d'utilisation
.....
.....

.....
.....
.....

Dégradations Observées

Fissuration

Nb : La fissuration doit être identifiée par les caractéristiques suivantes : Orientation, Occurrence, Profondeur (mm), Ouverture (mm), Etat, cause probable,

- Orientation** 1-longitudinale 2-transversale 3-verticale 4-diagonale
Occurrence FM-fissures multiples FU-fissure unique
Profondeur FT- fissure traversant FS- fissure de surface
Ouverture TF-très fine < 0.5 mm F-fine entre 0.5mm et 1mm
 M-moyenne entre 1 et 2mm L-large > 2 mm
Etat AC-active P-passive S-stable E-évolutive

Ex: 1-FM-FT-TF-AC ça veut dire une fissure longitudinale, multiple, transverse, très fine et active

Emplacement	Type de fissure	Cause probable
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Autres Dégradations

Dégradation	Emplacement (s)	degré de gravite			Cause probable
		Léger	Moyen	Grave	
efflorescence				
écaillage de la surface				
soulèvement				
Piqûres				
éclatement localisé				
érosion				
désintégration				
Taches de rouilles				
la corrosion des armatures				
Armatures dénudés				
L'écaillage				
des traces de sel				

Su.fate attaque	.....			
Carbonatation	.....			
Perte de masse	.....			
Trace des venues d'eau	.....			
Décoloration	.....			
Su.ntement	.....			
Epaufures	.....			
Fleche	.....			
Affouillement	.....			
Tassement	.....			
Glissement	.....			
efflorescence	.....			
écailage de la surface	.....			
soulèvement	.....			
Piqûres	.....			
éclatement localisé	.....			

NB: l'emplacement des désordres peut se définir soit par la description de l'emplacement soit par situéele, sur le schéma décrivant l'ouvrage

Facteurs aggravant ou permutant la création des désordres au futur

	Emplacement	degré de gravité		
		Léger	Moyen	Grave
Régime de cours d'eau			
Approfondissement de lit d'oued			
Ré.récissement du débouche hydraulique			
Massif d'encrochement			
Présences des végétations nuisibles			

Les Causes probables

N°	Causes probables
1	La nature du trafic, et particulièrement au non-respect des charges ou des espacements imposés par la signalisation adaptée à la structure
2	L'intensité du trafic lourd,
3	L'état d'entretien des matériels
4	Une durée d'utilisation prolongée à l'excès
5	L'insuffisance de la structure
6	Un mauvais tracé des accès
7	Des chocs des véhicules

8	L'inadaptation ou la détérioration des appuis
9	Différents phénomènes naturels violents (crue, séisme.....)
10	Absence des joints de chaussée et trottoirs
11	Absence ou dysfonctionnement des systèmes d'évacuations des eaux
12	Défauts de conception
13	Affouillement
14	Caractéristiques des matériaux utilisés
15	Défauts des études
16	Défauts de réalisation
17	Excès d'utilisation des sels de déverglaçage
18	Le manque d'entretien
19	Type de sol
20	Absence ou dysfonctionnement des équipements de protection des fondations
21	L'évolution naturelle des cours d'eau
22	défauts de réparation
23	Les interventions humaines (prélèvements des matériaux, Obturation partielle de la section d'écoulement de l'ouvrage par le jet des déchets.....)
24	Chocs mécaniques

La fonctionnalité des équipements

	Bon	Moyen	Mauvaise	Désordres observés
Massif d'enrochement				
Appareil d'appui				
Système d'évacuations des eaux de ruissellements				
Gargouille				
Désordre du revêtement de chaussée				
Garde-corps				
Glissière de sécurité				
Gabionnage				
Battage d'eau				

Documents en joint

- 1) Schéma de l'ouvrage
- 2) Photos des Déficiences observées

Liste des photos prises au cours de l'inspection :

Photo :.....	Photo :.....	Photo :.....
Photo :.....	Photo :.....	Photo :.....
Photo :.....	Photo :.....	Photo :.....
Photo :.....	Photo :.....	Photo :.....
Photo :.....	Photo :.....	Photo :.....

Etat des anciennes réparations :

.....
.....
.....
.....
.....
.....

Conclusions :

le niveau de réussite de cette inspection "But atteint"

Oui Non

l'état de l'ouvrage **Bon** **Moyen** **Mauvais**

Une expertise approfondie doit être réalisé le plus vite possible

Travaux d'entretien courant à réaliser (à effectuer en régie) :

Type des Travaux 1 :
2 :
3 :
4 :
5 :

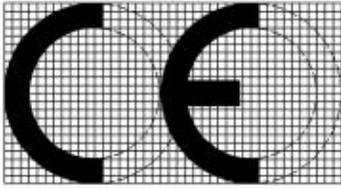
Travaux d'entretien courant à réaliser (avec des moyens extérieurs)

Type des Travaux 1 :
2 :
3 :
4 :
5 :
6 :

Autres commentaires

.....
.....
.....
.....
.....
.....

Annexe C: Le marquage de conformité

 01234
AnyCo Ltd, PO Box 21, B-1050 05 01234-DPC-00234
EN 1504-3 Produit de réparation du béton pour mortier CC de réparation structurale (à base de ciment hydraulique) Résistance en compression : classe R 3 Teneur en ions chlorure : $\leq 0,05 \%$ Adhérence : $\geq 1,5 \text{ MPa}$ Résistance à la carbonatation : essai réussi Module d'élasticité : 21 GPA Compatibilité thermique, partie 1 : $\geq 1,5 \text{ MPa}$ Absorption capillaire : $\leq 0,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-0,5}$ Substances dangereuses : conforme à 5.4 Réaction au feu : Euroclasse E

*Marquage CE de conformité,
constitué du symbole CE
spécifié dans la Directive 93/68/CEE*

*Numéro d'identification de l'organisme
de certification (le cas échéant)*

*Nom ou marque distinctive
et adresse déclarée du fabricant*

*Deux derniers chiffres de l'année
d'apposition du marquage*

Numéro du certificat (le cas échéant)

N° de la norme européenne

*Description du produit
et
informations sur les caractéristiques
réglementées*