

2^e Conférence spécialisée en génie des matériaux
de la Société canadienne de génie civil

*2nd Material Specialty Conference
of the Canadian Society for Civil Engineering*

Montréal, Québec, Canada
5-8 juin 2002 / June 5-8, 2002



DIAGNOSTIC ET REPARATION D'UN PONT EN BETON ARME

A. Guettala^A, S. Benmebarek^B

A Département de Génie Civil, Laboratoire de Recherche en Génie Civil, Université de Biskra et Chercheur Associé au CRSTRA

B Département de Génie Civil, Directeur de Laboratoire de Recherche en Génie Civil - Université de Biskra, Algérie

RÉSUMÉ : Le béton de ciment constitue certainement un des matériaux de constructions les plus durables. Certains ouvrages demeurent en excellent état après plus d'un siècle d'exposition à des conditions climatiques particulièrement rigoureuses. Il est quelque fois surprenant de constater que certains ouvrages récents présentent une détérioration importante, alors que les connaissances actuelles sur le ciment et le béton sont très approfondies

Cet article présente les résultats du diagnostic réalisé sur la dégradation d'un pont en béton armé de moins de 15 ans, permettant de mettre en évidence les causes principales de l'accélération de sa dégradation dans un premier temps. Les étapes de réparation et de renforcement sont discutées dans un deuxième temps.

1. INTRODUCTION

Le béton de ciment constitue certainement un des matériaux de constructions les plus durables. Certains ouvrages demeurent en excellent état après plus d'un siècle d'exposition à des conditions climatiques particulièrement rigoureuses. Il est quelque fois surprenant de constater que certains ouvrages récents présentent une détérioration importante, alors que les connaissances actuelles sur le ciment et le béton sont très approfondies.

Les questions que l'on se pose lors du diagnostic d'un ouvrage peuvent être résumées de la manière suivante :

Quelles sont l'origine et l'étendue des désordres ?

Quelles sont leur évolution probable et leurs conséquences sur la sécurité de l'ouvrage ?

L'ouvrage est-il réparable et quelles sont les méthodes de réparation et/ou de protection appropriée ?

Dans tous les cas, il paraît nécessaire de procéder à une enquête afin de collecter le maximum d'informations sur : âge, plans, nature des matériaux (ciment, dosage,...) et la nature de l'environnement. Ensuite, l'inspection visuelle détaillée permet de reconnaître la nature des désordres, de décrire leur localisation et, le cas échéant, d'analyser leur évolution depuis la dernière visite. Parmi les causes de désordres, la principale est la corrosion des armatures. Les désordres apparaissent sous la forme de fissures, d'éclats ou d'épaufrures. Mais la corrosion est généralement amorcée dans des zones voisines sans pour autant avoir encore provoqué de désordres visibles. Une détection s'impose. Après avoir identifié l'agent agressif à l'origine de la corrosion (carbonatation ou chlorures), et évalué sa profondeur

de pénétration, la mise en œuvre d'essais non destructifs (mesures d'enrobage et de potentiel) permet de déterminer correctement l'étendue des zones corrodées et d'en prévoir l'évolution (Taché 1998). Les principaux paramètres qui conditionnent le comportement d'un ouvrage vis-à-vis de la corrosion sont, dans l'ordre de leur importance : l'enrobage, la qualité du béton et l'environnement (Poineau 1994 et Baron 1992).

Dans cette optique, le présent article propose un diagnostic d'un pont en béton armé de moins de 15 ans, permettant de mettre en évidence les causes principales de l'accélération de sa dégradation dans un premier temps. Les étapes de réparation et de renforcement sont discutées dans un deuxième temps.

2. DESCRIPTION DU PONT

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 (Figure 1). 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 solidarisiées 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 (Figure 1).

Dans cette communication nous sommes essentiellement intéressés à la dégradation du béton des piles. Celui-ci 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.



Figure 1. Vue générale du pont

3. DESCRIPTION DES DESORDRES OBSERVEES SUR LES PILES

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 2 visualise la position et le degré de dégradation des chevêtres et des fûts.

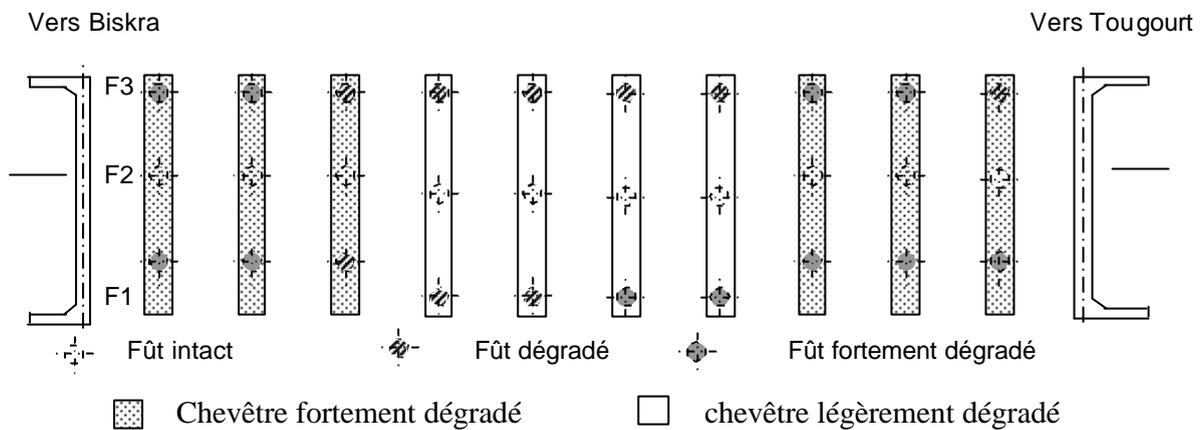


Figure 2. Vue en plan du pont

3.1 Chevêtres

Les chevêtres des piles N° P1, P2, P3, P8, P9 et P10 (Figure 2) sont les plus touchées. Les Figures 3 et 4 illustrent 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.



Figure 3. Dégradation du chevêtre



Figure 4. Les fissures multidirectionnelles localisées aux extrémités du chevêtre

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.

3.2 Fûts

? Les Figures 5 et 6 illustrent les dégradations constatées.



Figure 5. Corrosion des armatures



Figure 6. Fissures axiales sur les fûts

La Figure 2 indique aussi les fûts en fonction de leur degré de dégradation. On observe que les fûts intermédiaires sont intacts, par contre certains fûts de rive (amont et aval) présentent des dégradations. Les fûts P1-F1, P2-F1, P2-F3, P3-F1, P3-F3, P4-F1, P5-F1, P9-F1, P9-F3, P10-F1 et P10-F3 sont les plus touchés. La dégradation se manifeste sous les formes suivantes :

- ? fissurations parallèles, verticales et équidistantes, la position des fissures coïncide le plus souvent avec la position des aciers ;
 - ? Eclatement par endroits et début de décollement de plaques de béton ;
- Corrosion importante des armatures observée après décapage de béton d'enrobage fissuré.

4. CAUSES DE DEGRADATION

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 7). 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 (Figure 1).

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. Ce-ci 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 7. Infiltration des eaux à travers les joints de chaussées aux niveaux des trottoirs

5. MÉCANISMES DE LA CORROSION

La protection des armatures est liée à deux processus :

- ? *Chimique*, par l'alcalinité produite lors de l'hydratation du ciment;
- ? *Physique*, par l'enrobage, agissant comme une barrière vis-à-vis de l'environnement.

Il est admis que le mécanisme de la corrosion des armatures procède en deux étapes successives:

- ? La phase dite «*d'amorçage*» qui correspond à la pénétration des agents agressifs (principalement le gaz carbonique, l'air et les chlorures) au travers de la couche d'enrobage, jusqu'au démarrage de la corrosion de l'armature (destruction du «*film passif*»). La période d'amorçage ou d'incubation dépend en grande partie des processus assurant le transport des éléments agressifs jusqu'à l'armature, mais aussi des réactions chimiques se produisant au sein du béton et des réactions électrochimiques à l'interphase. La qualité de l'enrobage (perméabilité, épaisseur...) joue un rôle fondamental sur la pénétration des agents agressifs (Dhir et al. 1993).
- ? La phase dite «*de croissance* » qui correspond à la formation des oxydes de fer expansifs, et à l'endommagement du complexe armature béton. Elle est particulièrement liée à la vitesse de corrosion (Dhir et al. 1993).

La corrosion observée est à la phase dite de croissance. Elle est de type uniforme (généralisée) qui se produit lorsque l'armature n'est plus protégée est qu'il peut se former des micro-piles sur toute sa surface (Figures 5 et 6).

6. RÉPARATIONS

6.1 Elimination des causes directes

- ? Démolition des murs cachés construits sur les sommiers des supports (à faire en urgence) ;
- ? Mise en place de joints de chaussée étanches y compris dans les zones des trottoirs ;
- ? Elargissement des ouvertures des gargouilles.
- ? Découpage des palplanches métalliques qui forment une cuvette, afin d'éviter la stagnation des eaux.

6.2 Fûts

La réparation concerne les fûts endommagés cités précédemment. Les opérations à exécuter sont :

6.2.1 Préparation de la surface

- ? Piquer tout le béton détaché ou désagrégé sur toute la hauteur des fûts (y compris les parties enterrées) jusqu'à atteindre le béton sein (Figure 8);
- ? Mettre les armatures à nu en les dégageant d'au moins 2 cm tout autour ;
- ? Débarrasser les barres d'armatures de toutes les traces de rouille par sablage ;
- ? Rinçage et nettoyage par sablage de toute la surface du béton ;
- ? Les barres non exposées aux jets de sables doivent être nettoyées à l'aide d'une brosse métallique ;
- ? Traitement des armatures corrodées (Figure 10) par un produit anti-corrosion généralement sous forme de kit pré-dosé composé de résine et durcisseur (Jonathan 1993).
- ? Renforcer les armatures dont la section à diminuer par le rajout de nouvelles barres (Figure 10) en assurant un recouvrement total à la base des fûts, si les barres existantes sont fortement corrodées ;



Figure 9. Piquage du béton



Figure 10. Traitement des armatures corrodées

6.2.2 Coffrage

Le coffrage, de préférence métallique, doit être muni de cales d'espacement destinées à assurer l'enrobage des armatures avec une augmentation du diamètre des fûts de 20 cm par rapport au diamètre initial. Cette augmentation de la section a pour but de faciliter le coulage du béton et de renforcer la résistance des fûts.



Figure 11. Renforcement des fûts dégradés

6.2.3 Remplissage des gaines

Le remplissage des gaines se fera par un béton de latex. Les bétons de latex ne sont pas complètement étanches à la pénétration des chlorures, mais ils offrent une protection bien supérieure à celle obtenue avec des bétons courants de type B 30. Selon différents auteurs, la durée de vie pour les resurfaçages en béton de latex (réparation) serait d'au moins quinze à vingt ans (Baron et al. 1997).

La formulation des bétons de latex est identique à celle des bétons de ciment Portland courants. Les proportions du mélange doivent simplement être ajustées pour tenir compte de la proportion d'eau

contenue dans l'émulsion de latex et de l'important effet de plastification du latex. Selon le dosage et le type de latex employé, le rapport E/C sera compris entre 0,30 et 0,40. Etant donné la diversité des latex disponibles, on devrait vérifier la compatibilité du produit sélectionné avec le ciment par des mélanges d'essais. La quantité de latex à employer (exprimée en extrait sec) se situe généralement entre 10 et 20 % de la masse de ciment.

L'amélioration des propriétés est proportionnelle à la quantité de latex ajoutée. A faible dosage, le gain est marginal ; il y a moins de polymère pour former le film et la réduction du rapport E/C est moins importante. Cependant, un dosage excessif n'est pas économiquement justifiable; il cause un entraînement d'air exagéré et, de toute façon, l'amélioration des propriétés plafonne ou même régresse. Le tableau 1. donne une formulation typique pour un béton de latex (Baron et al. 1997).

Tableau 1. Formulation typique d'un béton de latex (pour 1 m³) et les caractéristiques du béton

Ciment (kg)	Latex (%)	E/C	Gravillon (kg)	Sable (kg)	Affaissant (cm)	Résistance à 28 jours (MPa)	Perméabilité aux ions chlorure (coulombs)	Retrait (pm/m)
390	15	0,30	985	805	15,5	45	850	660

L'intérêt pour les bétons de latex tient donc à ce qu'ils améliorent plusieurs propriétés (imperméabilité, durabilité, adhérence) tout en conservant une mise en oeuvre facile.

6.3 Chevêtres

Pour la réparation des chevêtres, l'utilisation de la matrice cimentaires renforcées de fibres de carbone est la mieux indiquée, même si elle exige une main d'œuvre qualifiée.

6.3.1 Préparation de la surface

- ? piquer tout le béton détaché ou désagrégé sur toute la longueur des chevêtres jusqu'à atteindre le béton sein.
- ? Rinçage et nettoyage par sablage de toute la surface du béton ;
- ? Débarrasser les barres d'armatures de toutes les traces de rouille et saletés par sablage ;
- ? Les barres non exposées aux jets de sables doivent être nettoyées à l'aide d'une brosse métallique.
- ? Traitement des armatures corrodées par un produit anti-corrosion généralement sous forme de kit pré-dosé composé de résine et durcisseur.

6.3.2 Mélange et mise place

Un des grands avantages des fibres de carbone est leur faible dimension. En effet, leur diamètre étant sensiblement le même que celui des grains de ciment, il devient alors possible de fabriquer des composites ayant une haute teneur en fibres. Cependant, pour pouvoir mettre en place de grandes quantités de fibres, un agent dispersant est utilisé afin d'obtenir une distribution tridimensionnelle uniforme des fibres dans la matrice. On peut utiliser comme agent dispersant des fumées de silice. Les fumées de silice sont l'agent dispersant le plus utilisé. En raison de la très petite dimension de leurs particules, les fumées de silice permettent d'améliorer l'adhérence entre les fibres et la matrice. De plus, pour faciliter la mise en place, l'utilisation d'un sable fin est recommandée, ainsi que l'ajout d'un superplastifiant à un dosage supérieur à la normale (souvent supérieur à 5 ml/kg de ciment). Lorsque tous les composants sont mélangés de façon adéquate, les matrices cimentaires renforcées de fibres de carbone (MCRFC) sont appliquées sur les chevêtres par crépissage (Banthia et al. 1993).

7. CONCLUSION

Cet article présente les résultats du diagnostic et réparation réalisé sur un pont en béton armé. L'un des objectifs de cette étude était de déterminer les causes de dégradation des chevêtres et des fûts du pont. Les résultats des investigations convergent vers une attaque chimique par les ions de chlorures (Cl) qui a provoqué la corrosion des armatures et cette dernière engendre l'éclatement du béton. Pour renforcement des chevêtres on a utilisé une matrices cimentaires renforcées de fibres de carbone et pour les fûts on a utilisé un béton de latex.

8. RÉFÉRENCES

- Banthia, N., Azzabi, M. and Pigeon, M. (1993) Restrained shrinkage cacking in fibre-reinforced cementitions composites, *Journal of Materials and structures*, 26: 405-413.
- Baron, J., Ollivier, J.P. (1997) *Les béton bases et données pour leur formulation*, Edition Eyrolles.
- Baron, R. (1992) *La durabilité des armatures et du béton d'enrobage*, in «*La durabilité des bétons* » Presses de l'ENPC, Paris, 173-225.
- Dhir, R.K., and Byars, E. A., (1993) *PFA concrete : chlorite diffusion rates*, *Mag.Con. Res.*, 45 : 1-9.
- Jonathan G.M.W, (1993) Quelques expériences étrangères en matières de prévention et de diagnostic: spécification pour des grands ouvrages: pont, tunnels et barrages, *Annales de ITBTP*, Paris, 518: 3 20.
- Poineau, D. (1994) Origine des pathologies, observation, diagnostic dans les ouvrages d'art, *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 523: 97-124.
- Taché, G. et Vié, D. (1998) Diagnostic des ouvrages en béton armé facteurs de vieillissement des ouvrages, *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*, 1: 27-37.