

Thème 8 – Ponts routiers en conditions hivernales

Évaluation et réparation des ponts soumis à des sels de déverglaçage

M. Ulrik Sloth Andersen  
Directeur de projet, MSc  
Ramboll Danemark  
Hannemanns Alle 53  
2300 Copenhague S  
Danemark  
[ulsa@ramboll.dk](mailto:ulsa@ramboll.dk)

M. Henrik Nielsen  
Gestionnaire de projet, MSc  
Services danois des ponts et chaussées  
Niels Juelsgade 13  
1020 Copenhague K  
Danemark  
[hn@vd.dk](mailto:hn@vd.dk)

SUJETS : IMPACT DES SELS DE DÉVERGLAÇAGE SUR LES PONTS, MÉTHODES ALTERNATIVES DE DÉGIVRAGE ET MESURES DE PROTECTION

## RÉSUMÉ

Au Danemark, nombre de ponts routiers ont été édifiés entre 1960 et 1980. La plupart de ces ponts sont construits en béton armé souvent composé de granulats sensibles aux réactions alcali-silice (RAS).

Dans notre pays, il faut environ 300 000 tonnes de sels de déverglaçage par an pour traiter une zone de quelque 43 000 km<sup>2</sup>. En décembre, janvier et février, la température moyenne est proche de 0 °C, ce qui implique de nombreux jours de gel et une utilisation intensive de sels de déverglaçage.

Le présent exposé aborde quelques cas de ponts en béton armé (BA) ou en béton précontraint par post-tension qui ont fait l'objet de réhabilitations majeures visant à enrayer les détériorations principalement dues aux sels de déverglaçage. L'impact majeur des sels de déverglaçage sur la durabilité des tabliers de pont est dû aux mécanismes suivants :

- Leur teneur élevée en chlorures induit la corrosion de l'armature ;
- Les sels de déverglaçage sont généralement composés de NaCl. Lorsque le béton est susceptible de développer une RAS, l'apport alcalin additionnel pouvant accélérer la réaction est fourni par le Na (sodium) ;
- Les fissures dues à la RAS vont favoriser la pénétration d'eau, laquelle renforcera les effets des chlorures et, par conséquent, la dégradation de la structure.

Le but de cet article est de démontrer qu'il est tout à fait possible d'entreprendre une réhabilitation complète des tabliers de ponts soumis aux sels de déverglaçage. Dans la plupart des cas, le rapport coût/efficacité peut être optimisé en combinant réhabilitation et renforcement en fonction du moment et/ou de la résistance au cisaillement.

## INTRODUCTION

Pour certains ponts au Danemark, l'effet combiné des chlorures, du gel-dégel et des RAS peut, en quelques années, entraîner des dégradations telles qu'il n'est plus possible de réparer le tablier du pont et qu'un remplacement s'avère nécessaire.

La photo ci-dessous illustre la sous-face du tablier d'un pont en BA exposé aux chlorures, à des réactions alcali-silice (RAS) et au gel-dégel :



Fig. 1. Tablier de pont soumis aux sels de déverglaçage.

L'un des effets de la RAS est une expansion importante du béton. L'expansion se produit dans la direction où il faut le moins d'énergie pour la provoquer. Ainsi, comme illustré ci-dessus, les dalles équipées d'étriers d'ancrage présentent souvent des fissures de forme horizontale.

Les ponts construits de 1960 à 1984 par les Services danois des ponts et chaussées sont recueillis dans le diagramme ci-dessous (nombre par an) :

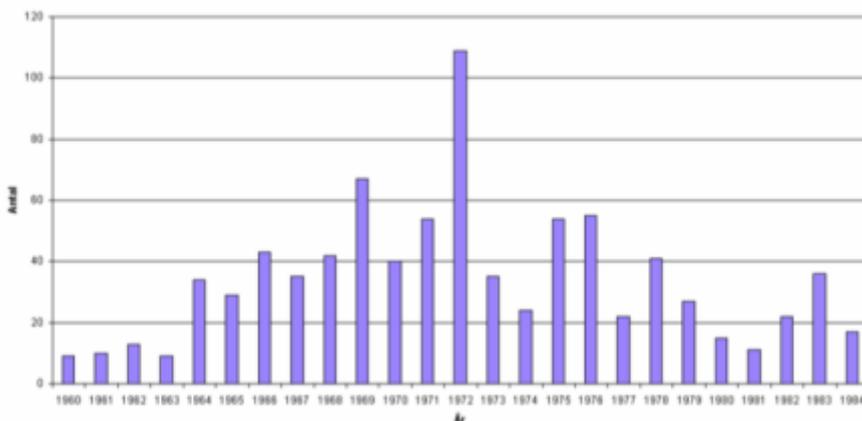


Fig. 2. Nombre de ponts construits par les Services danois des ponts et chaussées entre 1960 et 1984

Depuis la construction de ces ponts, la circulation a significativement augmenté en intensité et en charge. Par ailleurs, les ponts ont été fortement exposés aux sels de déverglaçage. Dans la plupart des cas, l'étanchéité est assurée par des membranes bitumineuses d'une durée de vie prévue de 30 à 40 ans. Il est par conséquent nécessaire de remplacer les matériaux d'étanchéification de nombreux ponts dont la réhabilitation est actuellement en cours.

Bon nombre de ces ponts ayant été construits au cours de la même période, leurs structures doivent souvent être réparées dans les mêmes délais. Les principaux travaux de réparation comprennent :

Années 80 : Réparation/remplacement de plusieurs colonnes en raison de la corrosion de l'armature de précontrainte due aux sels de déverglaçage (La durée de vie réelle des colonnes construites au cours de cette période a été de 15 à 20 ans).

Années 90 : Remplacement de nombreuses poutres de rive (Durée de vie réelle : 20 à 30 ans).

Années 2000 et ultérieures : Remplacement de l'étanchéification et resurfaçage.

Le remplacement des matériaux d'étanchéification étant très onéreux et entraînant maints désagréments pour les usagers de la route, il est important de parfaitement évaluer la capacité de charge de l'ouvrage au cours du processus de planification. Dans la plupart des cas, une réhabilitation complète incluant le remplacement des matériaux d'étanchéification, peut être entreprise de façon rentable en même temps qu'un renforcement.

Cet article présente des cas de ponts en béton armé (BA) ou en béton précontraint par post-tension ayant fait l'objet de réhabilitations majeures principalement motivées par la corrosion des armatures et les réactions alcali-silice (RAS) graves dues aux effets des sels de déverglaçage. Par ailleurs, le gel-dégel peut entraîner une détérioration accrue de l'ouvrage si le volume d'air occlus du béton n'est pas suffisant.

## INSPECTIONS ET ESSAIS RÉALISÉS SUR LES OUVRAGES D'ART

L'exploitation et l'entretien des ponts sont généralement effectués dans l'ordre indiqué ci-dessous :

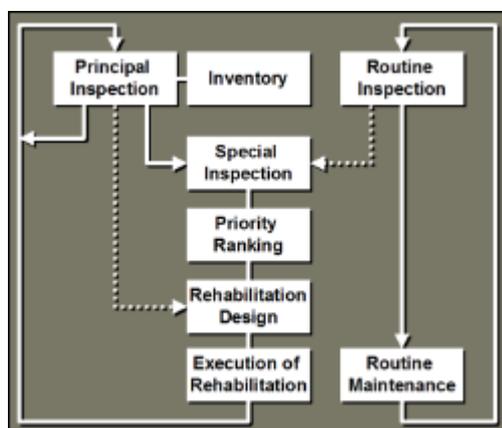


Fig. 3. Organigramme d'exploitation et d'entretien.

Avant d'envisager la réfection d'un pont en béton et les substantiels travaux qui en découlent, il est nécessaire de disposer des bases suivantes :

- Tous les dessins existants sur l'ouvrage et les réparations dont il a fait l'objet, y compris son analyse structurale
- Principales inspections
- Inspections spéciales
- Suivi géométrique
- Capacité de charge nominale

#### Inspection spéciale

L'inspection spéciale est le principal document sur lequel va se baser le projet de réhabilitation. Une inspection spéciale contient généralement les sous-tâches suivantes :

- Étude théorique de tous les documents pertinents
- Capacité de charge nominale
- Inspection visuelle
- Formulation d'une hypothèse concernant la cause et l'étendue des défauts
- Planification et exécution des essais (essais destructifs ou non destructifs (NDT))
- Recherche des causes et de l'étendue des défauts localisés. Évaluation visant à déterminer si l'hypothèse était correcte.
- Analyse du taux de détérioration prévu si aucune réparation n'est effectuée
- Profilage de 2 ou 4 stratégies de réhabilitation
- Estimation des coûts, y compris les coûts pour les usagers de la route en cas de congestion routière ou de détournement
- Calcul des conséquences techniques et financières en cas de report de la réhabilitation
- Calcul de la valeur actuelle nette des 2 à 4 stratégies envisagées afin de circonscrire la stratégie réalisable sur une période de 20 à 50 ans

L'inspection visuelle offre un aperçu de l'état actuel de l'ouvrage ; c'est sur elle que va se baser l'hypothèse concernant la cause des défauts. Les essais non destructifs permettent de mieux appréhender l'étendue des défauts. Les méthodes les plus utilisées sont, entre autres :

- La cartographie du potentiel de corrosion
- Le pachomètre
- Le système de test à réponse impulsionnelle s'MASH
- La thermographie qui permet de localiser les défauts du béton
- Le géoradar
- La mesure de la largeur des fissures

La figure suivante illustre l'utilisation du système de test à réponse impulsionnelle s'MASH lors d'un essai non destructif :



Fig. 4. Essai non destructif réalisé à l'aide du système s'MASH

Les essais destructifs offrent des informations détaillées sur des zones délimitées de la structure ; par exemple :

- Fissurations en surface ou dans le béton
- Teneur en ions chlorures
- Mesures du degré de corrosion des armatures légères ou poutrelles/torons de précontrainte
- Carottage en vue de l'analyse du béton par un laboratoire spécialisé

Les tests effectués en laboratoire sur le béton et l'acier peuvent inclure :

- La teneur en ions chlorures
- La teneur du béton en humidité
- La qualité du béton (microstructure du matériau, ratio eau-ciment, fissures, RAS, etc.)
- Les RAS
- Les tirants en acier : résistance limite, ductilité, etc.

Les effets des différentes méthodes sont illustrés en figure 5 :

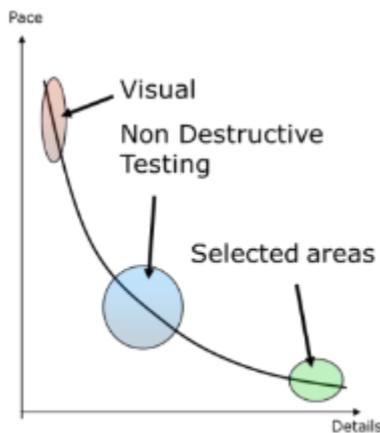


Fig. 5. Différentes méthodes de test. Vitesse *versus* détails.

La combinaison des méthodes ci-dessus permet d'obtenir une image complète de l'état du pont.

## RÉHABILITATION DES PONTS EN BÉTON SOUMIS À DES SELS DE DÉVERGLAÇAGE

Lorsque des travaux de réparation sont envisagés pour une structure exposée aux chlorures, la stratégie choisie dépend fortement de la teneur réelle en chlorures.

Si la teneur en chlorures est faible (inférieure à environ 0,05% du poids du béton) et qu'aucune corrosion n'est présente, la stratégie suivante peut être appliquée :

- Réparation de tous les défauts à l'aide d'un mortier spécial ou de béton projeté
- Facultatif : protection cathodique

- « Traitement de surface » (remplacement des membranes bitumineuses du tablier de pont, peinture des autres surfaces) comprenant un bon nettoyage du béton (sablage ou autre méthode semblable)

Si la teneur en chlorures est élevée (supérieure à environ 0,05% du poids du béton) et que l'armature présente des signes de corrosion, la stratégie de réparation suivante peut être adoptée :

- Réparation de toutes les zones présentant une teneur élevée en chlorures (retrait du béton contaminé et application d'un mortier spécial ou de béton projeté). Si l'armature présente des signes de corrosion, il peut être nécessaire d'ajouter des renforts supplémentaires.
- Facultatif : protection cathodique
- « Traitement de surface » (remplacement des membranes bitumineuses du tablier de pont, peinture des autres surfaces)

La photo ci-dessous montre un exemple de corrosion de l'armature de précontrainte due aux chlorures :



Fig. 6. Armature de précontrainte corrodée sous l'effet des chlorures.

Les brins des torons de précontrainte étant constitués de plusieurs fils de faible diamètre, leur état de corrosion est déterminant. Ainsi, un faible degré de corrosion peut entraîner une forte réduction de la section transversale de chaque fil.

Si la partie supérieure du pont présente des signes de corrosion et une teneur élevée en chlorures, la réparation du tablier peut être réalisée par enlèvement du béton contaminé, nettoyage approprié, insertion de renforts verticaux adaptés aux contraintes de cisaillement et mise en place de nouveaux renforcements. Une nouvelle couche de béton peut ensuite être coulée. Le procédé est illustré ci-dessous :

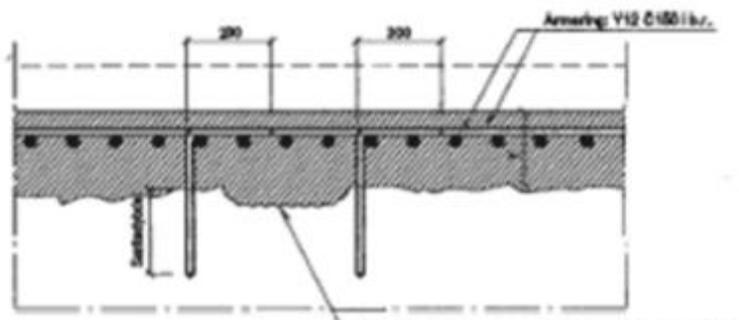


Fig. 7. Réparation de la partie supérieure d'un tablier de pont.

Le procédé est également illustré par la photo ci-dessous :



Fig. 8. Tablier de pont avec renforcement de la couche de béton

## CAS

CAS n° 1. Réhabilitation d'une dalle montrant des signes de corrosion de l'armature de précontrainte

Ce projet comprend la réhabilitation complète et le renforcement d'un pont d'autoroute à deux travées, précontraint par post-tension, situé à Roskilde, à environ 30 km à l'est de Copenhague.



Figur 1: Kortuddrag, der viser broens placering.

Fig. 9. Hauteur du pont

Les résultats obtenus à l'issue de l'inspection spéciale étaient les suivants :

- Problèmes d'étanchéité entraînant une pénétration d'eau à travers la dalle
- Corrosion des armatures de précontrainte au niveau d'un joint de reprise
- Capacité de charge insuffisante



Fig. 10. Problèmes d'étanchéité et de corrosion des éléments de renforcement par post-tension

Les moyens suivants ont été mis en œuvre pour réparer le pont :

- Retrait du béton contaminé par des chlorures sous jet d'eau à haute pression (ce qui a permis de retirer le béton sans nuire à l'armature ni au renforcement de précontrainte)
- Insertion et installation de renforts supplémentaires de façon à obtenir à une capacité de charge plus élevée
- Coulée de la nouvelle couche de béton
- Étanchéification de l'ensemble comprenant une base époxy et des membranes bitumineuses

Le procédé de réparation est illustré ci-dessous :

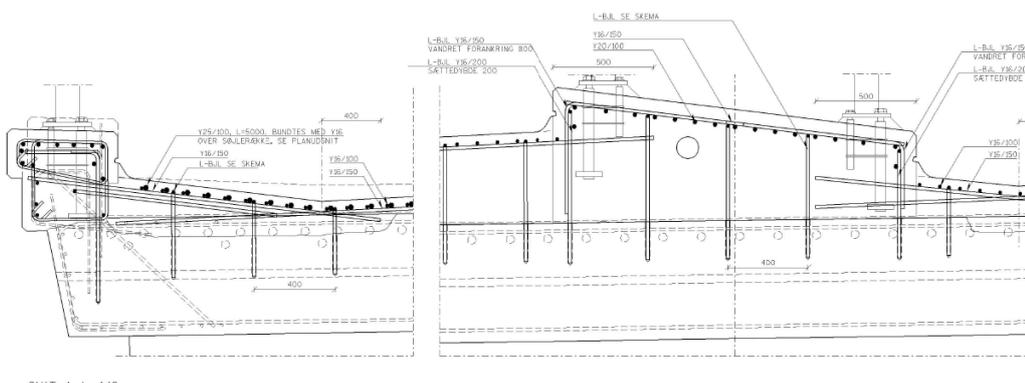


Fig. 11. Section transversale de la dalle et de la poutre de rive.

Conclusions après réhabilitation complète :

- La corrosion des câbles de précontrainte a été stoppée
- Les matériaux d'étanchéification ont été remplacés, prolongeant ainsi la durée de vie restante du pont
- Le renforcement de l'ouvrage a été mené à bien en même temps que les travaux de réparation

## CAS n° 2. Réhabilitation d'une dalle en BA présentant des signes de RAS

Ce projet comprend la réhabilitation complète et le renforcement d'un pont en béton précontraint par post-tension. L'ouvrage se situe dans le Sjælland, à proximité de Roskilde au Danemark.



Fig. 12. Carte et vue aérienne du pont.

Construit en 1972, ce pont se compose d'une dalle en BA d'une longueur totale de 114 m sur 13,7 m de large, soit 1560 m<sup>2</sup> de surface.

Voici la section transversale de l'ouvrage.



Fig. 13. Section transversale de la dalle.

Avant réhabilitation, l'état général du pont était le suivant :

- Problèmes d'étanchéité entraînant une pénétration d'eau à travers la dalle
- Corrosion des armatures due aux sels de déverglaçage
- Signes de RAS au niveau de la dalle
- Capacité de charge insuffisante (problème de résistance au cisaillement au niveau des colonnes)

La réhabilitation prévoit l'application d'une nouvelle couche de béton armé. Le béton contaminé par les ions chlorures et endommagé a été retiré avant installation des renforts (insertion de renforts et renforcement horizontal). Par ailleurs, des tiges verticales (de qualité M30 8.8) ont été insérées autour de chaque colonne à travers la dalle, et une plaque d'acier a été installée en haut et en sous-face de la dalle, comme illustré ci-dessous :



Fig. 14. Réparation et renforcement

Les nouvelles membranes bitumineuses et le revêtement ont été mis en place après coulée de la couche supérieure et installation des nouvelles poutres de rive.

La majeure partie des travaux a eu lieu pendant la saison hivernale.



Fig. 15. Abri de chantier installé sur un pont semblable

En général, pour que la température intérieure de la tente permette de poursuivre les travaux, le chauffage de l'air est assuré par des brûleurs à mazout.

Cependant, dans ce cas, un système de tuyaux contenant de l'eau chaude a été installé dans la surcouche de béton. Ce système de chauffage a été utilisé lors de la coulée de la surcouche de béton puis lors de l'imperméabilisation (comprenant un apprêt et deux couches de membranes bitumineuses) et de la mise en place du revêtement :



Fig. 16. Tuyaux d'eau chaude du tablier.

L'effet obtenu est visible sur les images thermographiques ci-dessous :

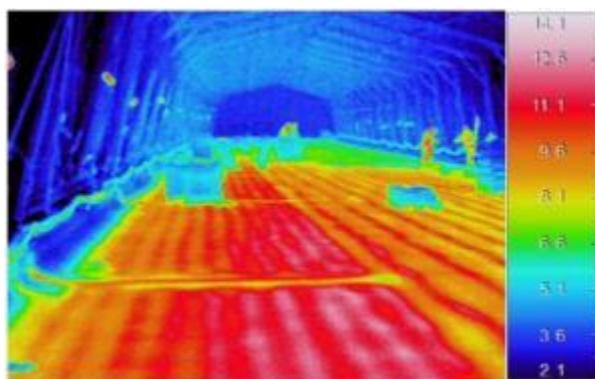


Fig. 17. Cliché thermographique de la plate-forme chauffée par des tuyaux

La méthode s'est avérée très efficace dans la mesure où la chaleur était directement appliquée là où elle était nécessaire. La consommation a été limitée à environ 400 litres de mazout par jour sur une période de dix jours, avec des températures extérieures de -2 à +5 °C. Grâce à ce système, la température de la partie supérieure de la dalle était d'environ 10 °C, ce qui a permis de poursuivre le chantier. À la fin des travaux, les tuyaux ont été remplis de mortier injecté de la même façon que pour les conduits de renforcement précontraint.

Conclusions après réhabilitation complète du pont :

- La corrosion de l'armature et les RAS ont été stoppées
- Les matériaux d'étanchéification ont été remplacés, prolongeant ainsi la durée de vie restante du pont
- Le renforcement de l'ouvrage a été mené à bien en même temps que les travaux de réparation
- Les travaux ont pu être menés pendant la période hivernale pour un coût supplémentaire très réduit grâce à la pose de tuyaux

## CONCLUSIONS

Avec des températures moyennes de l'ordre de 0 °C pendant la période hivernale, le climat du Danemark impose l'utilisation intensive de sels de déverglaçage. Dans la plupart des cas, ces sels de déverglaçage pénètrent directement dans les tabliers de ponts et les colonnes, entraînant de graves détériorations des structures dues à la corrosion des armatures et à l'augmentation des réactions alcali-silice (pour les bétons sensibles aux RAS).

Cet article démontre qu'il est possible d'entreprendre la réhabilitation complète d'un tablier de pont soumis à des sels de déverglaçage.

Dans la plupart des cas, le rapport coût/efficacité peut être optimisé en combinant réhabilitation et renforcement en fonction du moment et/ou de la résistance au cisaillement.