

430627

83 Date

RAPPORT DU COMITE SUR LA
PROTECTION DES DALLES DE PONTS

Membres du comité: Yves Armstrong, ing., président
André Drapeau, ing.
Michel Lacroix, ing.
Pierre Grenon, ing.
Clément Tremblay, ing.
Daniel Vézina, ing.

QTRD

CANQ

TK

GE

148

MINISTÈRE DES TRANSPORTS
CENTRE DE DOCUMENTATION
930, CHEMIN SAINTE-FOY
6^e ÉTAGE
QUÉBEC (QUÉBEC)
G1S 4X9

REÇU CENTRE DE DOCUMENTATION 01 DEC. 2006 TRANSPORTS QUÉBEC
--

TABLE DES MATIERES

	PAGE
INTRODUCTION	1
1ère Partie - DESCRIPTION DES PHENOMENES ENTRAINANT LA DETERIORATION DES DALLES DE PONTS	2
Corrosion des aciers d'armature	3
Ecaillage du béton	5
2ième Partie- DESCRIPTION DE METHODES SUSCEPTIBLES DE PROLONGER LA VIE DES DALLES DE PONTS	7
1- Recouvrement de béton des aciers d'armature	9
2- Scellants de surface	10
3- Membrane d'imperméabilisation	11
4- Recouvrement avec un béton dense	17
5- Recouvrement avec un béton au latex	23
6- Béton polymère	30
7- Béton renforcé de fibres	32
8- Béton scellé par l'intérieur	32
9- Adjuvants chimiques pour prévenir la corrosion des aciers dans le béton	34
10- Revêtements des aciers d'armature	38
11- Protection cathodique	46
12- Imprégnation de polymères en profondeur	51
13- Suppression de chlorures par procédés électrochimiques	53
14- Agents déglaçants non corrosifs	55
3ième Partie- OBSERVATIONS CONCERNANT LES DALLES DE PONTS DU QUEBEC	57
4ième Partie- RECOMMANDATIONS	61
CONCLUSION	68

INTRODUCTION

La durabilité des dalles de ponts est depuis longtemps un problème important pour les ingénieurs qui ont à travailler dans ce domaine. Suite à de récentes études effectuées par le Laboratoire central du ministère des Transports sur différents types de membrane d'étanchéité actuellement utilisés et qui laissaient entrevoir un mauvais comportement in situ, suite également aux représentations faites par différentes compagnies sur la possibilité d'utiliser de nouveaux produits pour protéger les dalles de ponts, il a été demandé de former un comité dans le but de poursuivre l'étude sur la protection des dalles de ponts.

Les membres de ce comité ont décidé de procéder d'abord à une étude bibliographique afin de constituer une synthèse de la recherche effectuée principalement aux U.S.A. et au Canada sur la protection des dalles de ponts. Ensuite, à l'aide de cette synthèse, des études réalisées au Laboratoire central et de l'expérience acquise au ministère des Transports, le comité a préparé ce rapport.

Celui-ci comporte quatre parties bien distinctes présentées comme suit:

- I- Description des phénomènes entraînant la détérioration des dalles de ponts;
- II- Description des méthodes susceptibles de prolonger la vie des dalles de ponts;
- III- Observations concernant les dalles de ponts du Québec;
- IV- Recommandations.

lère Partie

DESCRIPTION DES PHENOMENES ENTRAINANT LA
DETERIORATION DES DALLES DE PONTS

I- DESCRIPTION DES PHENOMENES ENTRAINANT LA DETERIORATION
DES DALLES DE PONTS

- 1) Détérioration provenant de la corrosion des aciers d'armature (éclatement du béton).
- 2) Détérioration provenant de l'écaillage du béton qui est le résultat des cycles gel-dégel.

1) Corrosion des aciers d'armature

La corrosion de l'acier tient aux trois facteurs suivants:

- La présence d'humidité
- La présence d'oxygène
- Un pH capable de rompre l'état de passivité de l'acier.

Si l'on peut éliminer un ou deux de ces facteurs, on réduit à peu près à néant la corrosion.

On note que les structures qui sont soumises à une atmosphère dont l'humidité relative est inférieure à 50% ont un taux de corrosion négligeable. Par contre, celles qui baignent dans une atmosphère où le taux d'humidité est constamment supérieur à 50% se corrodent rapidement.

L'acier dans le béton est dans un milieu où le pH est aux environs de 13, il est assez bien protégé. Par contre, s'il y a baisse de pH, dans l'ordre de 11,5 à 12,75, il peut y avoir corrosion.

Ce phénomène est surtout susceptible de se produire dans les dalles de ponts soumises aux sels de déglacage constitués, dans la très grande majorité des cas, par du chlorure de sodium. La baisse du pH est produite par l'infiltration des chlorures. Il est généralement admis que pour qu'il y ait corrosion, il faut que la concentration des chlorures au niveau des armatures atteigne au moins $0,9 \text{ kg/m}^3$ (1.5 lb/v^3).

D'après certains auteurs (Crumpton et Bukovatz), il semblerait que sur le pourtour immédiat des armatures d'acier, c'est-à-dire à 1 ou 2 mm, on peut retrouver une valeur de pH aussi basse que 1, à cause de l'acide chlorhydrique formé au contact des chlorures. Cette forte acidité dans le voisinage immédiat des armatures expliquerait la rapidité de corrosion lorsque les microfissures dans le béton permettent à l'humidité et à l'oxygène de l'air d'atteindre l'acier.

Dès que les trois conditions mentionnées plus haut sont réalisées, le phénomène ne peut que s'accélérer.

Les produits de la corrosion occupent un volume vingt fois supérieur à l'acier lui-même. Selon les auteurs de la publication "Bridge Decks" de l'Ontario, si l'on parvient à empêcher toute expansion dans le béton avoisinant l'armature, les produits de la corrosion peuvent alors exercer une pression allant jusqu'à 32 MPa (4700 lb/po^2).

D'autre part, les auteurs de "Corrosion Testing of Bridge Decks", Spellman et Stratfull, ont trouvé qu'une perte en corrosion de 0,03 mm (0,001 pouce) est suffisante pour fissurer un recouvrement de béton de 22 mm (7/8 pouce) d'épaisseur. Dans ces conditions, la moindre fissure devient sérieuse, puisqu'elle constitue le prélude à l'apparition de fissures plus grandes et à l'éclatement du béton.

2) Ecaillage du béton

L'écaillage est l'effritement du mortier de surface souvent accompagné par la perte de granulats. Dans le cas d'écaillage sévère, le mortier du béton est complètement décomposé et les granulats se retrouvent sans cohésion.

L'écaillage est le résultat de la détérioration du béton par le gel. Lorsque le béton se refroidit au-dessous du point de congélation, des cristaux de glace se forment dans les plus larges capillaires. Etant donné que l'eau dans la pâte de ciment existe sous la forme d'une faible solution alcaline, les alcalis contenus dans la partie non-gelée de ces capillaires augmentent en concentration. Une pression osmotique est ainsi créée et l'eau se déplace des pores non-gelées vers les cavités gelées.

La combinaison de la pression due à l'accumulation de glace et de la pression osmotique dans les pores peut causer la fissuration de la pâte de ciment.

L'air entraîné ajouté au mélange est une méthode éprouvée de minimiser les effets du gel sur la pâte de ciment. Par contre, avec la présence des sels déglaçants, l'air entraîné ne donne pas toujours une protection complète contre l'écaillage. En effet, à cause de la basse pression de vapeur d'eau de la solution saline, les vides créés par l'air entraîné sont susceptibles de se remplir d'eau et de ne plus agir comme réservoirs par la suite. Lorsque le béton est près d'être saturé d'eau, le béton à air entraîné est très susceptible de subir des dommages dus au gel à cause de sa grande porosité et de la quantité importante d'eau en mesure de geler; le phénomène de l'effritement du béton est alors amorcé si celui-ci n'est pas protégé adéquatement.

2ième Partie

DESCRIPTION DES METHODES SUSCEPTIBLES DE PROLONGER
LA VIE DES DALLES DE PONTS

II- DESCRIPTION DES METHODES SUSCEPTIBLES DE PROLONGER LA
VIE DES DALLES DE PONTS

- 1- Recouvrement de béton des aciers d'armature.
- 2- Scellants de surface.
- 3- Membranes d'imperméabilisation.
- 4- Recouvrement avec un béton dense.
- 5- Recouvrement avec un béton au latex.
- 6- Béton polymère.
- 7- Béton renforcé de fibres.
- 8- Béton scellé par l'intérieur.
- 9- Adjuvants chimiques pour prévenir la corrosion des armatures dans le béton.
- 10- Revêtements des aciers d'armature.
- 11- Protection cathodique
- 12- Imprégnation de polymères en profondeur.
- 13- Suppression des chlorures par procédés électrochimiques.
- 14- Agents déglaçants non corrosifs.

1- Recouvrement de béton des aciers d'armature

Bien que l'on obtienne actuellement des mélanges de qualité et que l'on utilise des méthodes reconnues de manutention, de finition et de mûrissement, le béton conventionnel se fissure. Cette fissuration est surtout due au retrait du béton lors du mûrissement ainsi qu'à la présence des barres d'armature près de la surface.

Ces fissures en elles-mêmes ne sont pas dramatiques du point de vue de la capacité de l'ouvrage, mais, lorsque l'on considère la durabilité de celui-ci, elles le deviennent. En effet, si aucune protection additionnelle n'est apportée, ces fissures permettent aux sels de déglacage de s'infiltrer jusqu'à l'acier d'armature et de le corroder.

Il a été démontré en Ontario que l'efficacité du recouvrement des aciers est directement proportionnelle au carré de son épaisseur et que, plus spécifiquement, elle augmente avec le rapport C/D, où:

C: épaisseur du recouvrement

D: diamètre des armatures.

Cette étude précise qu'un rapport $C/D \geq 3$ peut apporter une protection suffisante.

L'étude faite par l'état de New-York sur cinquante structures, afin de déterminer l'épaisseur réelle du recouvrement, a permis de démontrer que celle-ci n'était pas régulière et qu'une tolérance de ± 13 mm pouvait être considérée comme normale lors de la pose des armatures, en employant des pratiques courantes de construction.

Si l'on combine le résultat de ces deux études et si l'on considère que le diamètre des barres dans les dalles de ponts est généralement de 15 mm, on arrive à un recouvrement minimal recommandable de 60 mm.

Un recouvrement supérieur à 60 mm assurerait une meilleure protection, mais augmenterait davantage la charge constante. Par conséquent, il faut être prudent lors de l'évaluation du coût réel de cette protection additionnelle. De plus, une question se pose sur l'efficacité de cette protection additionnelle dans les zones tendues des structures continues.

2- Scellants de surface

Ce procédé consiste à étendre sur la surface de la dalle un mélange qui pénètre dans le béton et y obstrue les pores afin d'empêcher la pénétration de l'eau et des sels qu'elle contient.

Les principaux mélanges employés sont à base de silicone, d'époxy ou d'huile de lin et se regroupent sous une multitude de marques de commerce.

Le mélange le plus connu est à base d'huile de lin. Bien que peu coûteux, il a le désavantage d'être non résistant à l'usure et il réduit considérablement l'adhérence entre le béton et l'enrobé bitumineux. Les recherches sur ce produit indiquent qu'il réduit la désagrégation d'un béton à faible teneur en air entraîné, mais que cet effet devient presque nul dans le cas d'un béton de qualité moyenne. Au Vermont,

une étude a démontré qu'un mélange à l'huile de lin, même répété annuellement, n'avait pas d'effet significatif contre la pénétration des chlorures dans le béton.

Les mélanges à base d'époxy, plus coûteux, ont donné des résultats généralement insatisfaisants. Il faut enduire la surface d'au moins deux couches de ces mélanges afin d'assurer un recouvrement d'épaisseur suffisante.

Parmi les autres mélanges étudiés dans ces recherches, plusieurs étaient sans intérêt et, si l'on considère l'efficacité et l'économie, aucun n'était supérieur au mélange à base d'huile de lin.

Malgré le coût peu élevé de ces produits, aucune des études à notre disposition ne recommande l'utilisation de ces mélanges pour la protection des dalles de ponts.

3- Membranes d'imperméabilisation

Le procédé le plus fréquemment utilisé pour prévenir la détérioration prématurée des dalles de ponts est l'utilisation d'une membrane d'étanchéité recouverte d'une surface de roulement en enrobé bitumineux.

Aux Etats-Unis, le "Federal Highway Work Association" exige une protection de la dalle pour les projets qu'il finance, et plusieurs états utilisent des membranes d'imperméabilisation comme moyen de protection. L'intérêt accru des concepteurs pour les systèmes de protection des tabliers est responsable d'une

multiplication des produits d'imperméabilisation sur le marché.

Les principales caractéristiques d'un bon système d'imperméabilisation sont les suivantes:

- La facilité d'installation.
- Une bonne adhérence à la dalle et à la surface de roulement.
- L'efficacité dans les conditions de service comme les températures extrêmes, l'impact des véhicules, la fissuration du béton et le vieillissement.
- Un coût peu élevé.

Plusieurs systèmes d'imperméabilisation ont été développés dans le but de rencontrer ces caractéristiques. Ces systèmes se divisent en 2 groupes:

- A) Membranes fabriquées sur place
- B) Membranes préfabriquées.

Evaluation comparative.

A) Membranes fabriquées sur place	B) Membranes préfabriquées
a) Difficulté de s'assurer de la qualité des matériaux mélangés ou chauffés sur place.	Facilité plus grande de contrôler les matériaux en usine.
b) Difficulté d'obtenir une épaisseur uniforme.	Epaisseur contrôlée mécaniquement.
c) Facilité d'installation sur les structures courbes en raison de leurs états liquides.	Difficulté d'installer des éléments rectangulaires sur une structure courbe.
d) Bonne adhérence au béton.	Difficulté d'adhérence sur une surface rugueuse.

A) Membranes fabriquées sur place

B) Membranes préfabriquées

e) Aucune précaution particulière près des joints, drains et chasse-roues.

Grande précaution dans le découpage et dans l'application d'un scellant aux drains, joints et chasse-roues.

f) Cloquage facilement réparable par perforation (autocolmatage).

Cloquage volumineux exigeant un colmatage avec scellant.

Toutes les membranes d'imperméabilisation exigent d'être recouvertes par une couche de roulement en enrobé bitumineux et certaines doivent même être protégées lors de la pose de cet enrobé bitumineux.

Résultats des recherches

a) "Evaluation of Membrane Waterproofing"
(Etat du Maine, 1974)

Cette étude présente une évaluation en laboratoire de 19 types de membranes, incluant la membrane type II décrite au Cahier des Charges et Devis Généraux du Québec. Ces membranes sont regroupées en deux catégories, selon qu'elles sont renforcées ou non.

Les membranes renforcées possèdent un support de fibre de verre ou de polypropylène ou un autre support. Ces membranes peuvent être fabriquées sur place ou préfabriquées.

Dans les membranes non-renforcées, on retrouve surtout les membranes liquides appliquées à chaud ou à froid, comme les caoutchoucs liquides ou les

polyuréthanes à deux composantes.

Cette étude souligne que le type de membrane constituée d'une émulsion asphaltique et de fibre de verre est très fragile à basse température et que son utilisation n'est plus recommandée.

Cette étude conclut que les membranes qui pourraient donner de meilleurs résultats au chantier sont de deux types:

- Caoutchouc liquide (genre Uniroyal 6125)
- Préfabriquée, caoutchouc et fibre de polypropylène (genre Bituthène HDG de Grace).

b) "Results of Vermont Field Trials of Waterproofing Membranes", 1974

Cette étude a été effectuée en chantier; 16 membranes ont été appliquées sur 28 structures. Ces membranes sont regroupées dans les catégories suivantes:

- Membranes liquides (polyuréthane, époxy, goudron, caoutchouc liquide)
- Membranes préfabriquées.

Cette étude conclut que les systèmes préfabriqués montrent les résultats les plus prometteurs pour la protection des dalles contre l'infiltration des eaux salines. Le principal inconvénient de ces systèmes réside dans le scellement des joints le long des chasse-roues.

Des études sont également en cours afin de vérifier la quantité de sel qui s'est infiltrée dans les dalles recouvertes de membranes liquides. Si les résultats démontrent que les infiltrations sont minimales, les membranes liquides seront utilisées plus largement.

- c) "Vermont's Experience with Bridge Deck Protective Systems", 1977

Cette étude sur les membranes liquides conclut que les matériaux les plus simples d'application et les moins coûteux devraient être choisis pour l'imperméabilisation des tabliers.

Les essais ont démontré que les membranes liquides offrent une protection adéquate contre la pénétration des sels. Même si on y retrouve des bulles ou de légères perforations, ce système est jugé supérieur aux dalles non protégées.

- d) "NCHRP Project 12-11/Waterproof Membranes for Protection of Concrete Bridge Decks"

Cette étude en laboratoire analyse l'efficacité de 147 membranes d'étanchéité de types différents. Parmi ces membranes, 25 ont été retenues pour des essais en chantier et celles-ci sont toutes de types préfabriquées.

e) Expérience de l'Ontario

L'expérience de l'Ontario dans la protection des dalles de ponts à l'aide de membranes révèle que ce genre de protection laisse filtrer l'eau dans la majorité des cas. Ces fuites sont localisées principalement près des joints, chasse-roues et drains. Les principales membranes utilisées sont l'émulsion asphaltique avec fibre de verre (type II), le mastic bitumineux (type I) et le bitume caoutchouté (Uniroyal 6125).

Une des principales objections émises, concernant l'utilisation des membranes d'étanchéité recouvertes d'enrobé bitumineux, est la durée limitée de la surface de roulement qui est d'environ 15 ans. Puisque le remplacement de la surface de roulement endommage la membrane existante, entraînant également une réfection d'étanchéité, l'utilisation de ce procédé demeure une solution à moyen terme pour la protection des dalles de pont.

f) Expérience du Québec

L'expérience du Québec sur les membranes d'imperméabilisation pour les tabliers de ponts se résume principalement à l'étude en laboratoire de treize (13) types de membranes, incluant celles mentionnées au CCDG. Ces membranes étaient regroupées en deux catégories: les renforcées et les non-renforcées. Cette étude avait pour but d'évaluer en laboratoire les propriétés physiques des membranes soumises aux essais et de déterminer celles qui pourraient

avoir des caractéristiques acceptables pour une utilisation en chantier. L'analyse des résultats obtenus dans cette étude nous permet de sélectionner quatre membranes qui sont susceptibles de donner de bons résultats en chantier.

Ces membranes sont:

- Type I du CCDG
- Membrane bitumineuse avec caoutchouc (Uniroyal 6125)
- Membrane préfabriquée avec un support en polypropylène (Bituthène HDG)
- Membrane imprégnée d'un monomère (Tex-El).

4- Recouvrement avec béton dense

La chape de béton dense consiste en une couche de béton de faible affaissement, compacté et mûri de façon à rendre cette couche le plus imperméable possible, avec laquelle on construit les surfaces de roulement des structures ou des routes pour qu'elles résistent mieux aux effets du gel et des sels de déglacage.

Cette technique a été développée et mise au point par l'état de l'Iowa. Aujourd'hui, ce type de béton est utilisé partout aux Etats-Unis et au Canada pour servir de chaussée pour de nouvelles structures et surtout pour refaire les surfaces de roulement en béton qui sont en mauvais état, spécialement sur les ponts. Dans la province de Québec, on s'est servi de cette méthode pour mettre en place la couche de roulement du tunnel Ville-Marie à Montréal et tout dernièrement pour refaire les surfaces de celles

des ponts Champlain et de Québec.

a) Caractéristiques du mélange de béton

Pour réduire au minimum la possibilité de formation de fissures de retrait à la surface de la couche de béton, c'est-à-dire pour que cette couche soit le plus imperméable possible, le mélange ne doit contenir que l'eau nécessaire à l'hydratation du ciment: le surplus d'eau que l'on ajoute habituellement pour rendre le mélange plus maniable est éliminé. De plus, la couche de béton doit avoir les propriétés physiques nécessaires pour résister aux chocs et à l'usure.

Le mélange de béton qui rencontre ces exigences est composé comme suit:

- La quantité de ciment est d'au moins 475 kg par m^3 (800 lb/v³), ce qui procure une résistance à la compression du béton d'environ 50 MPa.
- Le rapport eau/ciment doit être très bas, soit environ 0,32, ce qui donne un affaissement maximum de 20 mm.
- Les petits granulats doivent être du sable naturel et les gros doivent être très durs, c'est-à-dire résistants à l'usure; pour faciliter les travaux de mise en place et de finition, leur dimension maximale doit être de 10 mm.
- Le pourcentage d'air entraîné doit être de 6%.

b) Mise en oeuvre

Ce type de mélange présente certains inconvénients lors de la mise en oeuvre:

- Le mélange a tendance à prendre rapidement, c'est-à-dire qu'il ne peut pas supporter les délais toujours possibles lors de la mise en oeuvre. On ne peut donc pas se servir de bétonnière mobile ordinaire pour préparer ce béton.
- Le mélange est difficile à placer et à compacter.

Pour le préparer, on doit donc se servir de camions malaxeurs d'un type spécial dont l'utilité consiste justement à fabriquer sur place et sur demande la quantité de béton désirée. Ce mélange est ensuite épandu et compacté à l'aide d'une épandeuse mécanique spécialement conçue à cet effet. Il est à noter que plusieurs unités de camions malaxeurs répondant aux exigences mentionnées plus haut ainsi que quelques unités d'épanduses mécaniques sont disponibles dans la province de Québec.

Pour faire le lien entre la surface de béton existante et la couche de béton dense, on applique un coulis de ciment sur la surface minutieusement préparée en procédant comme suit:

- La surface à recouvrir doit être nettoyée par piquage ou à l'aide d'un jet de sable de façon à enlever toutes traces de béton désagrégé, dégénéré ou contaminé (sels de déglacage), ainsi

que toutes traces d'huile, de graisse ou de laitance.

- Le coulis de ciment, constitué par deux parties égales en volume de sable et de ciment auxquelles on ajoute la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une consistance de crème épaisse, est ensuite appliqué à l'aide d'une brosse sur la surface préparée et sèche. Le coulis doit être appliqué juste avant le bétonnage de façon à ce qu'il n'ait pas séché avant l'application du béton.

Après le passage de l'épandeuse mécanique, la couche de béton dense doit être corrigée et texturée (rendue antidérapante) pour ensuite être mûrie à l'aide d'une toile de jute humide et de feuilles de polyéthylène. Le traitement de mûrissement doit durer au moins 72 heures.

c) Efficacité de la méthode

Plus de 600 projets de mise en place d'une chape de béton dense ont été exécutés par l'état de l'Iowa (dans la majorité des cas, pour réparer la surface de roulement de ponts), et plusieurs autres ont été réalisés à travers les Etats-Unis et le Canada. Cette technique a donné de bons résultats et ce type de recouvrement s'est avéré durable; cependant, la durabilité dépend des soins apportés lors de l'exécution des travaux:

- Si les travaux de préparation de la surface à recouvrir sont plus ou moins bien effectués et

si certaines traces de contamination par les sels de déglacage demeurent présentes dans le béton à recouvrir, le phénomène d'ionisation se poursuivra même après la mise en place de la chape, quoiqu'à un rythme beaucoup plus lent.

- Si le coulis de ciment a séché lors de la mise en place du béton, le lien ne se fait pas et les conséquences (fissuration, écaillage) ne tarderont pas à se faire sentir.
- Si le béton de la chape contient trop d'eau ou n'est pas assez compacté ou si les travaux de mûrissement sont plus ou moins bien exécutés, des fissures apparaissent en surface et les sels de déglacage pénètrent et détériorent la chape.

Des essais pour mesurer, entre autres choses, le taux de pénétration des ions de chlorure dans le béton ont été exécutés par l'état de l'Iowa sur 15 structures recouvertes d'une chape de béton dense.

Ces essais ont démontré que:

- La quantité d'ions de chlorure contenus dans le béton diminue rapidement avec l'épaisseur de la chape. La présence d'ions dans la partie inférieure de la couche de recouvrement montre que la chape de béton dense n'est pas imperméable aux ions de chlorure et que celle-ci ne fait que retarder leur pénétration.

- Dans plusieurs cas, la quantité de chlorure contenue dans la chape était supérieure à celle mesurée dans la dalle avant de la recouvrir.
- Dans quelques cas, la concentration de chlorure mesurée à une profondeur de 38 mm était supérieure à la concentration considérée comme acceptable; dans deux cas plus particulièrement, la concentration mesurée au niveau de l'armature était beaucoup plus élevée que celle acceptable.

L'absence ou presque de détérioration de l'armature, malgré la concentration d'ions de chlorure dans la couche de béton dense située au-dessus de l'armature, s'explique par le fait qu'il n'y a pas assez d'humidité ou d'oxygène qui filtre jusqu'à l'armature pour produire le phénomène ou qu'il se produit trop lentement pour être perceptible.

Il est à remarquer finalement que la chape de béton dense ne doit pas être mise en place sur une structure de type continu et que, pour être réellement efficace (c'est-à-dire pour qu'elle dure entre 15 et 20 ans), elle doit avoir une épaisseur minimale de 50 mm.

Le coût de mise en place de la chape de béton dense varie selon l'ampleur des travaux et l'éloignement des grands centres; il peut être estimé comme suit:

- Préparation de la surface à recouvrir:
10,00 à 15,00\$/m²

- Mise en place de la chape:
35,00 à 45,00\$/m²

Le coût total s'échelonne donc entre 900,00\$ et
1 200,00\$ le mètre cube.

5- Recouvrement avec un béton au latex

Le béton au latex est fabriqué à partir d'un béton conventionnel auquel on ajoute un latex dans une proportion variant entre 1 et 4 pour cent du poids du mélange. Ce béton est utilisé comme couche de protection sur les surfaces de roulement en béton des structures parce qu'il adhère très bien aux surfaces de béton existantes et qu'il a la propriété de résister beaucoup plus longtemps qu'un béton conventionnel à l'action des sels de déglacage.

Le latex est employé dans des mélanges de béton ou de mortier depuis plus de 40 ans. Les types de matériaux et la technique (machinerie pour le malaxage et la mise en place) relatifs à son emploi dans les travaux routiers ont été développés vers la fin des années 1960 et au cours des années 1970 par la firme Dow Chemical Co. Jusqu'en 1978, cette compagnie se chargeait de la fabrication et, jusqu'à un certain point, de la mise en oeuvre du matériau et voyait à ce que les travaux soient exécutés selon ses recommandations. Actuellement, aux Etats-Unis, on considère le matériau et la technique assez bien connus pour l'employer couramment. Au Canada, cette

technique est encore très peu employée et on en est au stade de la promotion.

Les latex (chlorures de polyvinyle, que l'on connaît sous le sigle PVC, ou autres) résultent de la dispersion colloïdale des particules de plastique dans l'eau. Certains latex peuvent être ajoutés à un mélange de béton sans modifier de façon appréciable les propriétés de ce mélange, celui-ci conserve la même couleur, la même consistance et la même maniabilité qu'un mélange conventionnel; d'ailleurs, l'outillage qui sert au malaxage et à sa mise en place se nettoie à l'eau. Après son mûrissement, les granulats et les particules du béton sont interreliés par des fibres continues formées de particules de latex, ce qui améliore sensiblement les propriétés mécaniques du béton. Les fibres de latex contenues dans le béton peuvent d'ailleurs être observées au microscope.

Les propriétés mécaniques d'un béton au latex dépendent de la qualité des constituants, de leur proportion, du rapport eau/ciment ainsi que du type et de la qualité de latex qu'on ajoute au mélange. De façon générale cependant, les capacités en traction et en compression sont augmentées de façon très significative.

a) Caractéristiques du mélange

Pour le recouvrement des surfaces, le mélange de béton au latex est fait dans les proportions approximatives suivantes:

- Une partie de ciment pour 2,5 parties de sable et deux parties de pierres. Les gros granulats doivent être résistants à l'usure et leur dimension maximale doit être de 12 mm.
- Le rapport eau/ciment peut varier entre 0,35 et 0,40 de façon à obtenir un affaissement variant entre 100 et 150 mm mesuré 5 minutes après le malaxage.
- La quantité de latex à ajouter au mélange doit représenter environ 15 pour cent du poids du ciment.
- Le pourcentage d'air entraîné ne doit pas excéder 6,0 pour cent.

b) Mise en oeuvre

Le mélange est préparé dans des camions malaxeurs d'un type spécial, dont l'utilité consiste à fabriquer sur place et sur demande la quantité de béton désirée; ce sont les camions malaxeurs que l'on emploie pour préparer le béton dense, auxquels on ajoute un récipient pour le latex.

Etant donné la consistance plutôt lâche du mélange (100 à 150 mm d'affaissement), la couche de béton peut être mise en place, finie et texturée à l'aide de la même machinerie et du même outillage que ceux utilisés pour le béton conventionnel.

Pour faire le lien entre la surface de béton existante et la couche de béton au latex, on applique

un liant au latex sur la surface minutieusement préparée en procédant comme suit:

- La surface de béton à recouvrir doit être scarifiée de façon à enlever le béton sur une profondeur minimale de 6 mm, puis, avant de procéder à la mise en place du béton, la surface doit être nettoyée par projection d'abrasifs.
- Le coulis de liaison au latex est ensuite appliqué à l'aide d'une brosse sur la surface préparée et humide. Le coulis doit être appliqué sur la surface immédiatement avant le bétonnage, de façon à ce qu'il n'ait pas séché avant l'application du béton.

Après le passage de l'épandeuse, la couche de béton doit être corrigée et texturée (rendue antidérapante) pour ensuite être mûrie.

La méthode employée pour mûrir un béton au latex diffère considérablement de celle employée pour mûrir un béton conventionnel:

- La surface de béton frais doit être recouverte d'une toile de jute humide aussitôt que la capacité du béton le permet. Cette toile de jute doit être maintenue humide pendant une période de 24 heures.
- La surface de béton doit être exposée à l'air libre pendant une période d'au moins 72 heures avant de permettre la circulation sur celle-ci. Cette période de séchage est nécessaire pour permettre la liaison des particules de latex

de façon à former les fibres désirées.

Le béton au latex ne doit pas être mis en place à une température inférieure à 7°C et supérieure à 29°C, et la période de mûrissement doit être allongée si la température est inférieure à 13°C.

c) Efficacité de la méthode

Depuis une dizaine d'années, un total d'environ 8,36 millions de mètres carrés (10 millions de v^2) de ponts situés aux Etats-Unis ont été refaits avec un béton au latex. Au Canada, cette méthode a été utilisée comme surface de roulement de quelques ponts seulement, presque tous situés en Ontario. Dans la province de Québec, ce type de recouvrement n'a jamais été utilisé.

Toujours aux Etats-Unis, un grand nombre d'essais ont été effectués pour mesurer l'efficacité des recouvrements avec un béton au latex. Ces essais consistaient principalement à mesurer, en plusieurs endroits des tabliers:

- i) La concentration d'ions de chlorure à différents niveaux de la couche de béton au latex.
- ii) La différence de potentiel électrique entre le dessus de la couche de béton et l'armature.

Les résultats de ces essais peuvent être résumés comme suit:

i) Concentration de chlorure

-La quantité d'ions de chlorure contenus dans le béton diminue rapidement avec l'épaisseur de la chape. La présence d'ions dans la partie inférieure de la couche de recouvrement montre que la chape de béton au latex n'est pas imperméable aux ions de chlorure et que celle-ci ne fait que retarder leur pénétration.

-La quantité d'ions de chlorure contenus dans le béton varie en différents points d'un même tablier, cette quantité n'est pas nécessairement proportionnelle au taux d'application des sels de déglacage sur la structure ni à l'âge du recouvrement.

-Dans plusieurs cas, on a mesuré au niveau de l'armature une concentration d'ions de chlorure supérieure à $0,9 \text{ kg/m}^3$.

ii) Différence de potentiel

-Dans à peu près tous les essais, la différence de potentiel mesurée était égale ou inférieure à 0,35 volt, c'est-à-dire qu'il n'y avait pas de corrosion active.

Puisqu'à peu près tous les recouvrements inspectés paraissaient en bon état, bien que la concentration en ions de chlorure fut très élevée et puisque les différences de potentiel mesurées indiquaient la plupart du temps qu'il n'y avait pas

de corrosion active, on peut conclure:

- Que le recouvrement avec un béton au latex est très efficace comme surface de roulement de ponts.
- Que l'absence ou presque de corrosion de l'armature, malgré la concentration d'ions de chlorure dans la couche de béton au latex, s'explique par le fait qu'il n'y a pas assez d'humidité ou d'oxygène qui filtre jusqu'à l'armature pour produire le phénomène ou qu'il se produit trop lentement pour être perceptible.

Il est à remarquer que pour être efficace, le recouvrement avec un béton au latex doit avoir une épaisseur minimale de 32 mm et que sa vie utile, prévue par les spécialistes, est d'au moins 15 ans.

d) Coût

Le coût de mise en place d'un recouvrement avec un béton au latex varie selon l'ampleur des travaux et l'éloignement des grands centres, il peut être estimé comme suit:

- Préparation de la surface à recouvrir:
10,00 à 15,00\$/m²

- Mise en place du recouvrement:
18,00 à 28,00\$/m²

Le coût total s'échelonne donc entre 875,00\$ à 1 350,00\$ par mètre cube.

6- Béton polymère

Le béton polymère est un type de béton où l'on substitue au ciment et à l'eau des monomères. Les deux monomères les plus couramment utilisés sont le méthacrylate de méthyl et le polyester. La résistance de ce béton peut atteindre 100 MPa en compression et 13 MPa en flexion, comparativement à 40 MPa et 4 MPa pour le béton conventionnel. Ce béton possède une très bonne résistance à l'usure, une excellente liaison avec le béton conventionnel ainsi que peu de retrait et de porosité. Cette dernière propriété fait que le béton polymère ne peut être endommagé par le gel et les sels de déglacage.

Par contre, les principaux inconvénients reliés à l'utilisation du béton polymère sont:

- Un coefficient d'expansion thermique cinq fois supérieur au béton conventionnel.
- Une faible flexibilité.
- Une certaine difficulté à obtenir un mélange homogène avec certains polymères.
- La nécessité d'utiliser un granulats sec pour obtenir de hautes résistances.
- Les vapeurs dégagées par certains produits peuvent être nocives, inflammables et même explosives; en conséquence, la mise en place de ce béton exige beaucoup de précautions.

a) Résultats de la recherche

Les articles publiés sur le béton polymère concernent principalement l'utilisation de ce matériau comme béton de réparation des dalles de béton. La très grande résistance à court terme (2 heures) du béton polymère justifie son utilisation pour la réparation de dalles d'autoroute, de pont et d'aéroport, car il minimise les inconvénients dus à la fermeture des voies de circulation.

Les études effectuées aux Etats-Unis portent sur les types de monomères à utiliser, les proportions du mélange, les propriétés physiques obtenues.

Les recherches se continuent sur:

- Le procédé de mise en place
- Les types de mélange
- L'analyse des essais pratiques déjà réalisés.

Actuellement, au Québec, l'utilisation du béton polymère est assez réduite. Une expérience a été tentée pour la réfection d'un tablier de pont détérioré localement et comme revêtement de parapet; dans ce dernier cas, le revêtement en béton polymère est fabriqué en usine. Une étude est en cours au Laboratoire central afin de mettre au point un mélange qui pourrait servir à la réparation locale des dalles de béton.

b) Coût

En volume produit et mis en place, le béton polymère coûte trois à quatre fois plus que le béton conventionnel, c'est pourquoi, avant de l'utiliser,

il faut s'assurer des résultats et l'employer dans des cas vraiment valables.

7- Béton renforcé de fibres

Le béton renforcé de fibres est un béton conventionnel dans lequel on incorpore des fibres durant le malaxage afin de réduire la détérioration causée par l'éclatement du béton.

Plusieurs types de fibres ont été essayées, la gamme varie des filaments de polypropylène aux fibres de carbone, mais la plupart des recherches ont été faites sur l'emploi de fibres d'acier ou de fibres de verre.

L'addition de fibres accroît la résistance à la traction et à la flexion du béton. Des problèmes peuvent survenir lors du malaxage pour obtenir une distribution uniforme des fibres dans le mélange; les fibres ont généralement tendance à s'agglomérer. Des essais faits aux U.S.A. et en Ontario ont démontré que ce type de béton était très perméable et que son utilisation n'était pas techniquement justifiable pour les dalles de pont.

8- Béton scellé par l'intérieur

Le procédé consiste à incorporer des particules fusibles au mélange de béton conventionnel et, après mûrissement du béton, à faire fondre ces particules à l'aide d'un système chauffant.

Sous l'action de la chaleur, le matériau utilisé s'introduit dans les interstices du béton et empêche, par le fait même, la pénétration de l'eau et des sels de déglacage.

La paraffine semble être présentement le matériau le plus approprié à ce type de procédé; la raison en est que ce mélange d'hydrocarbures résiste très bien aux agents chimiques.

Les particules de cire sont préalablement fabriquées puis ajoutées aux composants du béton de ciment de la façon suivante: après avoir mélangé les composants secs du béton, les particules de cire sont ajoutées et lorsque le mélange est uniforme, on ajoute la quantité d'eau requise.

Ce procédé peut être employé sur toute l'épaisseur de la dalle ou seulement sur la partie supérieure de celle-ci.

L'apparence du béton scellé intérieurement ne permet pas de le distinguer du béton conventionnel, et ses propriétés antidérapantes lui sont comparables. Structuralement, ce béton se comporte comme un béton conventionnel et la présence de cire est étrangère à l'apparition de défauts subséquents.

Les résultats obtenus jusqu'à présent aux U.S.A. sont très satisfaisants. Ces résultats démontrent que cette méthode est la plus efficace contre la pénétration des chlorures. Cependant, les recherches se continuent pour trouver une particule qui aurait la même fonction, mais qui ne nécessiterait pas de chauffage.

En effet, le chauffage présente de graves inconvénients. Il augmente bien entendu le prix et surtout, il accroît les fissures au niveau des chasse-roues et des parapets, car ces éléments de la structure ne sont généralement pas traités.

Actuellement, ce procédé n'est utilisé que sur une base expérimentale.

9- Adjuvants chimiques pour prévenir la corrosion des armatures dans le béton

Certains produits chimiques peuvent être ajoutés au mélange de béton de façon à prévenir la corrosion des armatures lorsque le béton durci est exposé à un milieu salin ou est soumis à l'action des sels de déglacage.

On dénombre actuellement une vingtaine de produits, appelés sels anodiques, qui peuvent, avec une certaine efficacité, annuler le phénomène de corrosion des armatures dans le béton; cependant, les effets de ces produits sur les propriétés physiques du béton frais et du béton durci sont à considérer.

Une étude a été faite par le "Highway Research Board" aux Etats-Unis à partir de trois produits chimiques représentatifs de la gamme disponible, dans le but de mesurer:

- Leur efficacité à empêcher la corrosion des armatures.
- Leur influence sur la plasticité du béton frais.
- Leurs effets sur la capacité en compression et en traction du béton durci.

Les trois produits chimiques, à partir desquels l'étude a été faite, sont le nitrate et le benzoate de sodium ainsi que le chromate de potassium.

Relativement au phénomène de corrosion des armatures, ces produits sont reconnus pour avoir les propriétés suivantes:

- Une concentration de nitrate de sodium d'environ 1% de la masse de ciment entrant dans la fabrication du béton est suffisante pour empêcher le phénomène de corrosion des armatures.
- Une concentration de chromate de potassium d'environ 2% de la masse de ciment entrant dans la fabrication du béton est suffisante pour empêcher le même phénomène.
- Une grande concentration de benzoate de sodium (non précisée) est nécessaire pour empêcher le phénomène de corrosion des armatures.

Puisque le chlorure de calcium est souvent employé dans le béton comme accélérateur de prise et qu'il est reconnu comme étant une cause de la corrosion des armatures, ce produit a été ajouté en différentes quantités aux mélanges de béton des échantillons contenant déjà des sels anodiques.

Pour les essais relatifs à la corrosion, les échantillons ont été divisés en trois groupes:

- Un groupe a été exposé dans un milieu où la température était de 22°C (72°F) et où l'humidité relative pouvait varier entre 50 et 70%.
- Un autre groupe a été placé dans l'eau douce pendant une période de 10 mois.
- Le dernier groupe a été placé dans l'eau douce pendant une période de 9 mois puis soumis à un bain d'eau salée pendant une période de 1 mois.

Les essais sur ces trois groupes d'échantillons ont été effectués 10 mois après leur fabrication.

Les résultats de cette étude peuvent être résumés comme suit:

a) Efficacité contre la corrosion

- Le benzoate de sodium et le chromate de potassium annulent le phénomène de corrosion des armatures lorsque le mélange de béton ne contient pas de chlorure de calcium; cependant, une concentration de 2% de chlorure de calcium dans le mélange est suffisante pour activer la corrosion.
- Le nitrate de sodium est le seul produit chimique qui, en présence d'une concentration de 0 à 2% de chlorure de calcium dans le mélange, annule le phénomène de corrosion.

b) Influence sur la plasticité du mélange de ciment

- L'addition des produits chimiques, pour prévenir la corrosion de l'armature dans un mélange de ciment, améliore la plasticité de ce mélange. Le maximum de plasticité est obtenu en ajoutant une quantité d'environ 2% de n'importe lequel des trois produits chimiques à l'étude.
- L'addition de chlorure de calcium au mélange contenant les produits chimiques à l'étude diminue considérablement l'amélioration de la plasticité obtenue avec les produits chimiques seulement.

c) Effets sur la capacité en traction et en compression

- L'addition des produits chimiques pour prévenir la corrosion de l'armature diminue la capacité en compression du béton d'une valeur variant entre 20 et 30% et, ce, en présence ou non de chlorure de calcium.
- Sauf pour le chromate de potassium, l'addition des produits chimiques pour prévenir la corrosion diminue la capacité en traction du béton d'une valeur variant entre 20 et 30% et, ce, en présence ou non de chlorure de calcium. L'addition du chromate de potassium en présence de chlorure de calcium a plutôt tendance à augmenter la capacité en traction du béton.

10- Revêtements des aciers d'armature

a) Revêtement des aciers d'armature par galvanisation

Le procédé de galvanisation à chaud appliqué aux aciers d'armature permet d'obtenir une épaisseur de zinc de 86 micromètres (.0034 po) et plus. L'adhérence de ce recouvrement à l'acier est très bonne, puisqu'une partie du zinc forme avec la surface d'acier un lien métallurgique se traduisant par la formation d'alliages fer-zinc. En conséquence, la manipulation des armatures galvanisées au moment de la construction n'exige pas de précautions particulières.

Même s'il se produit à l'occasion quelques porosités dans le béton sur le pourtour immédiat des aciers galvanisés, des essais de laboratoire ont démontré que l'adhérence entre les armatures et le béton n'est pas modifiée par la présence du zinc.

L'utilisation de l'armature galvanisée dans les dalles de ponts remonte tout au plus à 25 ans. Il y a plus de 200 dalles de ponts aux Etats-Unis avec armatures en acier galvanisé, dont la majorité se retrouve dans l'Etat de Pennsylvanie où elles continuent de faire l'objet d'observations.

En raison de l'incertitude relative à la bonne tenue de la galvanisation dans les dalles de ponts, le "Federal Highway Administration" a décidé, en 1976, de limiter les nouvelles constructions avec armatures galvanisées à trois ponts par Etat, en

attendant que les résultats de la recherche permettent une prise de décision finale.

Citons d'abord le rapport conjoint de "Portland Cement Association" et "International Lead Zinc Research Organization Inc" (ILZRO) d'octobre 75, intitulé: "The Performance of Galvanized Reinforcement in Concrete Bridge Decks".

Ce rapport fait mention de sept ponts. Au moment de la présentation du rapport, le pont Longbird aux Bermudes avait 20 ans. La protection originale de l'acier était de $1,1 \text{ kg/m}^2$ (3,6 onces de zinc/pi²), et on estimait la quantité de zinc résiduelle à 60 ou 75% de cette valeur, alors que la quantité de chlorure au niveau de l'armature était de 1 kg/m^3 (1,68 lb/v³) avec un pH de 12,7. La présence du sel dans le béton provient des éclaboussures de l'eau de la mer. Quant aux autres ponts, ils sont tous plus récents, y compris le pont sur la rivière Manicouagan. Sur chacun de ces ponts, le revêtement du zinc sur les armatures était demeuré inchangé.

Dans la publication de Kenneth Clear intitulée "Eliminate Premature Deterioration of Portland Cement Concrete", on rapporte les conclusions suivantes du laboratoire routier californien. Par rapport à l'acier noir, l'armature galvanisée retarde de 80% le temps d'apparition de fissures dans le béton pour un rapport eau/ciment de 0,72 et un facteur ciment de 5,0; mais si le rapport eau/ciment est de 0,42 et le facteur ciment 7,2, le temps d'apparition de fissures dans le béton n'est plus retardé que de 38%.

Le Centre de recherches de International Nickel a réalisé des essais en eau de mer sur des échantillons de béton avec armature en acier noir et armature en acier galvanisé à une épaisseur de 200 micromètres (.008 po). Après 4 ans d'exposition, on retrouvait des fissures sur 31% des échantillons avec acier noir et sur 12% des échantillons avec acier galvanisé; après 12 ans, des fissures apparaissaient sur 40% des échantillons avec acier noir et sur 30% des échantillons avec acier galvanisé.

Dans un article intitulé "Corrosion des aciers dans le béton armé", l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics de France a également réalisé des essais sur des éprouvettes de béton armé à l'acier noir et à l'acier galvanisé dans l'eau de mer dans l'estuaire de la Rance de 1959 à 1971; on démontre que la galvanisation retarde l'apparition de la corrosion, mais que le facteur de délai de la corrosion est surtout notable si le béton est de mauvaise qualité. Si le béton est de bonne qualité et le recouvrement d'au moins 3 cm, les armatures galvanisées n'ont pas un avantage marqué sur les aciers noirs sur une longue période.

b) Revêtement à l'époxy

Les résines époxydiques appliquées comme revêtement d'acier d'armature doivent être d'un type préalablement éprouvé. Le procédé d'application est réalisable dans une usine spécialement aménagée à cette fin et comporte les étapes suivantes:

- Chauffage des armatures aux environs de 230°C pour permettre d'éliminer calamine, graisses et saletés.
- Grenailage assurant un nettoyage presque à blanc.
- Reprise du chauffage jusqu'à température constante de 200 à 230°C.
- Application d'époxy au moyen de vaporisateurs électrostatiques.
- Durcissement et curage du revêtement à l'air et à l'eau.
- Inspection et rejet des barres comportant un revêtement inadéquat.

L'épaisseur de revêtement optimale est de 180 ± 50 micromètres (.007 ± .002 po).

Les armatures revêtues d'époxy offrent les avantages suivants:

- Un revêtement inerte: il ne se dégrade pas et empêche les réactions chimiques avec le béton ou les solutions salines qui ont tendance à s'infiltrer.
- Un revêtement imperméable à l'eau et aux solutions chlorurées: il scelle la surface de l'acier, empêchant ainsi l'apparition de rouille.

- Une bonne force d'ancrage: celle-ci est comparable à la force offerte par l'acier noir après mûrissement du béton et ne diminue pas avec le temps étant donné qu'aucune réaction ne se produit sur le pourtour des armatures.

Les inconvénients relatifs à l'utilisation des armatures revêtues à l'époxy peuvent se résumer comme suit:

- Usine spécialement aménagée pour ce travail et non utilisable à d'autres fins.
- Contrôle sévère requis à l'usine, retouches sur les bouts coupés et les bris mineurs.
- Revêtement plus fragile, manipulation plus délicate que l'acier noir et l'acier galvanisé.
- Bris du revêtement en chantier difficilement réparable par temps froid.

Pour éviter d'endommager le revêtement des armatures lors du transport en chantier, les barres sont attachées en paquets avec une broche revêtue, elle-même séparée des barres au moyen de caoutchouc-mousse; de plus, le transbordement des paquets doit s'effectuer au moyen de câbles de nylon et les paquets doivent être posés sur des pièces de bois en nombre suffisant pour éviter que les barres ne s'entrechoquent.

En 1973, l'Etat de Pennsylvanie réalisait en primeur une dalle de pont comportant des armatures recouvertes d'époxy; en 1977, 17 Etats avaient adopté le procédé.

Depuis lors, le revêtement à l'époxy des barres d'armature a été utilisé sur plus de 100 dalles de ponts aux Etats-Unis, et cette pratique a été adoptée comme standard pour la construction de structures bénéficiant de subventions fédérales.

Selon l'expérience acquise, on déplore assez peu de bris du revêtement en chantier; d'autre part, les défauts de recouvrement mineurs et les microfissures produites lors du pliage, qui sont tolérés dans les normes de fabrication, ne permettent pas à la corrosion de se propager sous le recouvrement; il en résulte que la très faible quantité de rouille qui pourrait être produite ne saurait apporter des problèmes de fissuration du béton.

Fabricant canadien

Les barres recouvertes d'époxy chez le fabricant canadien "Epoxicote" sont pliées, après recouvrement selon les exigences des devis, au moyen de mandrins recouverts de caoutchouc suivant des diamètres un peu supérieurs aux diamètres prescrits pour l'acier noir pour minimiser le danger de fissures du revêtement. Il y a actuellement six dépositaires de ce produit à travers le Canada, dont un à Montréal qui pourrait éventuellement fabriquer sur place.

Champ d'application

Les armatures à revêtement d'époxy sont particulièrement recommandées pour les dalles de ponts, les voies élevées, les rampes de stationnement, les diviseurs d'autoroutes, les parapets, les structures près du bord de la mer, les piscines, etc.

Pour les dalles de ponts, on peut noter que la pose du seul treillis supérieur en armatures revêtues d'époxy constitue généralement une protection suffisante contre l'éclatement du béton.

De plus, pour limiter au minimum l'apparition de la rouille causée par l'infiltration de sels, les barres disposées en treillis doivent être reliées entre elles avec de la broche recouverte de vinyle et être appuyées au besoin sur des supports en vinyle ou recouverts de vinyle.

Si on estime que chacun des treillis des dalles de ponts comporte $12,2 \text{ kg/m}^2$ d'acier d'armature (2.5 lb/pi^2), on peut établir les coûts suivants:

Acier noir posé:

$0,75\$/\text{kg}$ ($0,34\$/\text{lb}$), soit $9,15\$/\text{m}^2$ ($0,85\$/\text{pi}^2$)

Protection à l'époxy:

$0,55\$/\text{kg}$ ($0,25\$/\text{lb}$), soit $6,72\$/\text{m}^2$ ($0,63\$/\text{pi}^2$)

Total: $15,87\$/\text{m}^2$ ($1,48\$/\text{pi}^2$).

c) Armatures non corrosives et revêtements spéciaux

L'acier patinable, qui connaît un certain succès dans la construction de structures métalliques, se comporte plutôt mal dans un béton où il y a présence d'humidité et de sel.

En Afrique du Sud et en Angleterre, on fabrique sur une faible échelle de l'armature en acier inoxydable, 18% Cr, 10% Ni et 3% Mo. Cet acier est utilisé principalement pour soutenir les panneaux de béton sur des façades d'édifices, et, à cause de son coût, on ne peut songer à son utilisation dans les dalles de ponts.

Le "Federal Highway Administration" a mis à l'essai des armatures recouvertes d'acier inoxydable en alliage 316 (17,6% Cr, 10,3% Ni) par le procédé de "cladding". Ce procédé utilisé à diverses fins consiste à introduire dans le laminoir des lingots d'acier au carbone d'usage courant recouverts d'acier inoxydable. On obtient comme résultat des barres d'armature recouvertes d'une couche d'acier inoxydable d'environ 0,5 mm. Des essais comparatifs ont démontré qu'après 20 mois d'application de sels sur une base journalière, les dalles de béton avec acier superficiellement inoxydable montraient des signes de corrosion et de fissuration, quoique à un degré moindre que les dalles de béton fabriquées à l'aide d'acier noir.

L'Etat de Pennsylvanie a utilisé, à titre expérimental, ce type d'acier superficiellement

inoxydable sur une dalle de pont en 1976, et, à la date de publication du rapport de mai 1979, aucun résultat n'était disponible.

Le "Federal Highway Administration" a également effectué un certain nombre de recherches sur des recouvrements non métalliques pour armatures à béton. Les produits mentionnés sont: les goudrons, les résines époxydiques, les asphaltes, les uréthanes et les vinyles. Parmi tous ces produits, seules quelques résines époxydiques ont donné des résultats intéressants. Les 21 types de résines époxydiques liquides mises à l'essai n'ont pas été retenus, et parmi les 15 résines époxydiques en poudre, seulement 4 sont susceptibles de donner des résultats valables, lorsqu'appliquées selon le procédé décrit à l'article précédent: "Revêtement à l'époxy". Le type de résine époxydique utilisé par les fournisseurs canadiens d'armatures revêtues d'époxy est actuellement le "Scothkote" de la compagnie 3M et correspond à la liste d'approbation du "Federal Highway Administration".

11- Protection cathodique

La protection cathodique consiste à prévenir la corrosion des armatures au moyen d'une force électromotrice.

Deux méthodes sont généralement employées:

- Dans une des méthodes, l'acier d'armature supérieure du tablier constitue la cathode, alors que l'anode

est formée par un métal plus actif que le fer, comme le Zn, Mg et Al. On est alors en présence d'une protection cathodique avec anode sacrificielle.

- Dans l'autre cas, l'anode sacrificielle est remplacée par une anode non corrosive et une force électromotrice extérieure. Cette méthode est la plus couramment utilisée.

La première application de ce type de protection revient à Stratfull du "California Department of Transportation" en 1958 sur une structure avec poutres de béton préfabriquées. Une installation expérimentale fut réalisée en 1973 par cet état. L'Ontario a suivi, en 1974, avec une installation similaire sur la structure Duffin's Creek. Toutefois, l'application par contrat remonte à 1978.

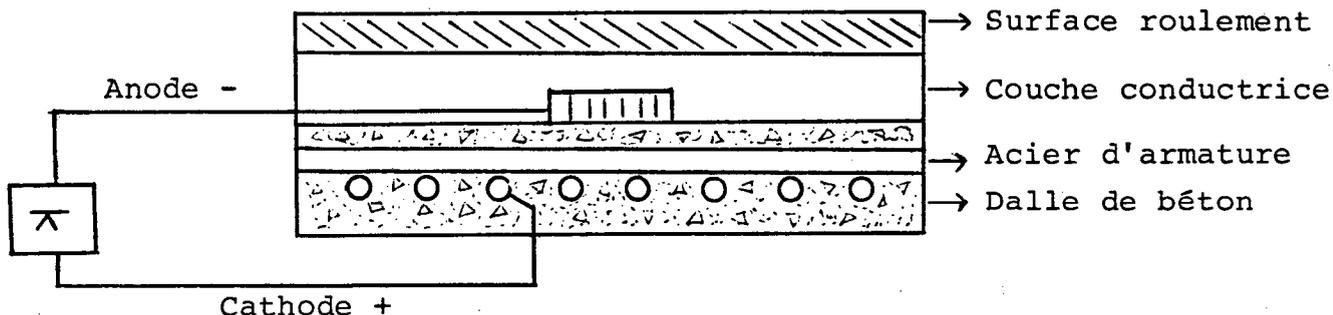
a) Procédure de réalisation par anode sacrificielle

La méthode consiste à créer une pile galvanique entre l'acier d'armature et un autre métal plus électronégatif. Une différence de potentiel est engendrée lorsque ces deux métaux sont reliés ensemble, et l'anode est corrodée en protégeant la cathode (l'acier d'armature supérieure). Habituellement, le Zn ou le Mg sert d'anode.

Cette méthode est limitée dû au fait qu'un faible potentiel électrique est engendré entre l'anode et la cathode; dans un milieu de grande résistance électrique comme le béton, on doit donc utiliser un très grand nombre d'anodes.

b) Procédure de réalisation de la protection cathodique à l'aide d'une source extérieure

Illustration du système



La couche conductrice qui entoure l'anode dans ce type de protection est un mélange bitumineux auquel on incorpore un granulat à base de carbone (poussière de coke). Cette couche doit avoir 5 cm d'épaisseur. Comme les propriétés mécaniques de cette couche ne sont pas très bonnes, il est nécessaire de la recouvrir d'une couche de roulement conventionnelle.

Les anodes sont de deux types, soit un alliage fer-silice ou du graphite. Ces anodes ont 30 cm de diamètre. Pour une structure de 310 m² de surface, environ sept anodes peuvent être utilisées pour obtenir une distribution uniforme du potentiel. Le courant provient soit de piles ou d'une source de courant alternatif redressé.

Pour que la protection cathodique soit efficace, il faut:

- Que le réseau d'acier supérieur soit au même potentiel, ce qui exige que tous les aciers soient en contact.
- Que la distribution du courant sur la dalle soit uniforme.
- Que le béton qui recouvre l'acier soit d'une bonne qualité pour éviter une détérioration du système.

Conclusions de différentes études réalisées:

NCHRP, No 57, mai 1979

- Il est démontré qu'il n'y a plus de progression de la corrosion de l'armature lorsque ce type de protection est appliqué, sauf dans les endroits où il y a délaminage du béton et de l'acier. Il est donc nécessaire de réparer ces endroits avant d'appliquer une protection cathodique.
- Le béton doit être d'une très bonne qualité si on veut prévenir une détérioration de celui-ci par l'infiltration d'eaux salines à travers les deux couches d'enrobé bitumineux qui sont poreuses.

La principale restriction à l'utilisation générale de ce type de protection est le fait qu'elle exige:

- Une modification dans le design.

- Une expertise détaillée de la structure (déla-
minage, corrosion de l'acier, qualité du béton,
réparation des zones endommagées, quantité de
NaCl dans le béton).
- Une couche conductrice appliquée de telle sorte
qu'elle ne soit pas en court-circuit avec l'a-
cier de la dalle, surtout près des drains et
des joints de dilatation.
- Une source de courant à proximité.

Inconvénients:

- Il y a peu ou pas d'entrepreneurs qui peuvent
installer ce système.
- Le vandalisme est un problème à considérer.
- La durée de vie et le coût à long terme de la
couche conductrice et son effet sur la dalle de
béton sont incertains.
- Une membrane ne peut pas être utilisée pour pro-
téger le béton, car c'est un isolant.
- Dû au fait qu'il faut surveiller régulièrement
le potentiel et le réajuster, un entretien con-
tinuel est nécessaire.
- Le coût de cette protection est très variable
selon la disponibilité de la poussière
de coke et de la volonté du producteur d'en-
robé bitumineux d'interrompre sa production

régulière pour produire ce type de mélange conducteur. Le coût varie de 22,50\$/m² (2,10\$/pi²) à 47,30\$/m² (4,40\$/pi²).

12- Imprégnation de polymères en profondeur

Le procédé consiste à sécher en profondeur le béton d'un nouveau tablier, à y faire pénétrer un monomère, généralement le méthacrylate de méthyl, puis à procéder à la polymérisation.

Le procédé décrit ci-dessous a été développé pour les tabliers nouvellement construits non déjà contaminés par des chlorures. Cependant, il est probablement applicable à de vieilles structures, quoiqu'il n'a pas été complètement vérifié pour cette application.

a) Description du procédé

- Préparer la surface de béton afin d'enlever les matières contaminantes telles que l'huile, l'asphalte et les composés employés pour la cure du béton qui pourraient réduire la pénétration du monomère.
- Sécher le béton à une profondeur suffisante pour faciliter la pénétration du monomère.
- Imprégner le béton avec le liquide monomère.
- Polymériser le monomère dans le béton afin d'assurer une barrière protectrice.

- Après avoir nettoyé la surface, généralement au jet de sable, il faut la recouvrir d'une couche de sable propre et uniforme de 10 mm d'épaisseur. Pas plus de 5% de ce sable ne doit être retenu sur le tamis 1,18 mm, et pas plus de 5% ne doit passer le tamis de 150 micromètres.

- Le séchage du béton se fait généralement en employant un système infrarouge ou à l'air chaud, et sous un abri peu élevé afin de minimiser les pertes de chaleur. La température sous l'abri doit être maintenue entre 120°C et 150°C pendant une période de 6 à 8 heures. Le taux d'augmentation ou de refroidissement de la température ne doit pas dépasser 50°C par heure. Le temps requis pour élever ou abaisser la température n'est pas inclus dans la période ci-dessus mentionnée.

- L'imprégnation de monomère doit se faire dans les 24 heures qui suivent le cycle de refroidissement. Cette imprégnation se fait en épandant sur le sable le monomère à un taux de 4 kg/m² de façon uniforme. Après cette application, on doit prévenir l'évaporation en recouvrant la surface d'un film de polyéthylène et laisser pénétrer le monomère pendant 4 à 6 heures.

- La polymérisation du monomère se fait en chauffant uniformément la surface traitée à une température de 70°C et 90°C pendant 4 heures. Le taux d'accroissement ou de réduction de la température doit se faire comme mentionné précédemment pour le séchage du béton.

b) Résultats de la recherche

Le procédé ci-haut décrit a été essayé sur plusieurs structures aux Etats-Unis; il semble qu'il donne satisfaction et empêche ou diminue considérablement la pénétration des chlorures dans le béton. Cependant, des recherches supplémentaires sont actuellement en cours afin de connaître les effets des hautes températures de séchage sur les contraintes induites dans le béton, et conséquemment sur la fissuration de celui-ci.

13- Suppression des chlorures par procédés électrochimiques

Le procédé consiste à extraire les ions de chlorures du béton durci en les faisant migrer dans un électrolyte placé sur le dessus du béton au moyen d'un courant électrique; le courant force les ions de chlorures à migrer vers l'électrolyte où ils sont captés.

Cette méthode a été utilisée en 1975 à Marysville, Ohio, sur une dalle âgée de 8 ans et qui montrait un état actif de corrosion des armatures. En effet, des échantillons du béton pris au niveau des armatures ont indiqué une teneur en chlorure allant jusqu'à 4,75 kg/m³. Pour les fins du traitement, la surface de 20 m² a été divisée en cinq parties de 4 m².

Un cadre de bois est placé sur les surfaces, scellé puis rempli sur un pouce de profondeur avec une solution d'eau saturée de chaux servant d'électrolyte.

Une résine permettant l'échange d'ions est placée dans l'électrolyte. Ensuite, l'anode, constituée de titane platiné, est supportée sur des blocs de bois et baigne dans l'électrolyte. Une source de courant continu (100 volts) est reliée à l'anode et aux barres d'armature supérieure (cathode). Le courant force alors les ions de chlorure à migrer vers l'anode où ils sont captés par la résine.

Au Kansas, un projet visant à éliminer les chlorures du béton par des techniques électro-osmotiques a aussi été réalisé. Le procédé employé est similaire, sauf que le voltage est plus important (220 volts) et qu'un rideau de cuivre est employé comme anode.

Résultats de la recherche

En Ohio, on a trouvé que la teneur en chlorure après traitement est descendue à un niveau aussi bas que 235 g/m^3 . Une mesure du potentiel électrique prise trois mois après l'essai a montré que la corrosion des armatures avait été complètement arrêtée. D'autres essais, faits sur une période de trente mois après l'application du procédé, ont aussi démontré qu'il n'y avait pas de migration de chlorures vers les aciers, même si aucune protection du tablier n'était utilisée et même si le tablier était salé fréquemment.

Au Kansas cependant, il a été démontré que le procédé utilisé à cet endroit avait comme conséquences d'accroître la perméabilité du béton et qu'une imprégnation subséquente de monomère pourrait être utile.

Sommairement, on peut dire que les procédés de migration électrochimiques pour la suppression des chlorures ont été vérifiés en chantier sur une petite échelle et qu'il semble que la corrosion des armatures soit stoppée. Cependant, des essais supplémentaires sont nécessaires pour connaître le comportement à long terme des bétons traités par cette méthode.

14- Agents déglaçants non corrosifs

On désigne comme agents non corrosifs les produits autres que les chlorures employés actuellement pour empêcher la formation de verglas sur les routes et les tabliers de ponts.

Depuis plusieurs années, les sels de déglacage utilisés occasionnent des dommages importants aux routes, aux ponts et aux véhicules qui y circulent. Pour ces raisons, de nombreuses recherches ont été effectuées afin de trouver des produits de remplacement. Ces nouveaux produits doivent être efficaces, non corrosifs, économiques et acceptables du point de vue écologique.

Jusqu'à présent, deux produits ont retenu l'attention:

- Le fluorure d'ammonium qui est plus efficace que les chlorures actuels, mais son prix en est sept fois plus élevé.
- Le chromate de sodium qui est deux à trois fois moins efficace et trois fois plus coûteux.

Ces deux produits sont particulièrement sujets aux objections des organismes de protection de l'environnement.

De nouveaux produits font leur apparition régulièrement et sont l'objet d'études sérieuses. Le plus prometteur de ces produits, en ce qui concerne les dalles de pont, serait un mélange d'urée et de calcium. Etant donné son coût élevé, l'application en serait restreinte aux tabliers et aux approches du pont. Les recherches sur ce produit ne sont pas complétées.

En fait, on peut conclure qu'il y a très peu de résultats positifs jusqu'ici. Certains produits sont plus efficaces que les produits utilisés actuellement, d'autres moins, mais tous sont dispendieux et dommageables pour l'environnement.

3ième partie

OBSERVATIONS CONCERNANT LES DALLES DE PONTS DU
QUEBEC

III- OBSERVATIONS CONCERNANT LES DALLES DE PONTS DU QUEBEC

Lors des réparations importantes réalisées sur des dalles de 20 ans, donc n'étant pas recouvertes de membranes d'imperméabilisation, on a pu remarquer que la détérioration provenait beaucoup plus de l'effritement du béton que de l'éclatement causé par la corrosion des armatures. Cette constatation semble différente de ce qui a été remarqué en Ontario et aux Etats-Unis où l'éclatement du béton demeure le problème majeur. Au Québec, par contre, on remarque que la détérioration due à l'éclatement du béton se présente surtout sur les parapets, chevêtres et colonnes exposés à l'action des sels déglaçants.

Au cours de l'été 1981, le Laboratoire central a entrepris une étude afin de vérifier si les membranes d'imperméabilisation préviennent l'infiltration des ions chlorures (CL)⁻ dans les dalles de ponts. L'étude consistait principalement à déterminer la teneur en ions chlorures dans les dalles de béton de 41 structures réparties à travers le Québec:

- 10 structures: sans imperméabilisation
- 17 structures: membrane d'imperméabilisation type I
- 8 structures: membrane d'imperméabilisation type II
- 5 structures: imperméabilisation identique aux culées
- 1 structure : bitume d'amorçage spécial

La façon d'évaluer les membranes comprenait, en plus de la détermination de la teneur en CL⁻, un relevé visuel de tous les défauts de la dalle, du drainage et de la surface de roulement.

Les résultats de l'étude sont regroupés au tableau I.

TABLEAU I

Imperméabilisation			Aucune	Type I	Type II	Autres types
Nombre de structure			10	17	8	6
Age moyen de l'imperméabilisation			> 20	14.13	7.75	14.67
Teneur en NaCl kg/m ³	Profondeur mm	25	7.34	1.08	0.67	3.45
		50	4.78	0.70	0.28	2.56
		75	4.40	0.57	0.20	2.12

Il est généralement admis que la corrosion active des aciers d'armature se produit lorsque la teneur en NaCl au niveau de l'armature se situe à 0.89 kg/m³ (1.5 lb/v³). Comme on peut le constater, il y a une énorme différence entre les teneur en sels obtenues, selon que la dalle a été protégée par une membrane ou non. Les résultats nous démontrent que les membranes du type I et II n'empêchent pas complètement la pénétration des sels dans la dalle mais la retarde, donc l'emploi de ces membranes ne peut être considéré comme une solution finale au problème de l'infiltration à travers le béton.

La teneur en NaCl est légèrement inférieure dans les dalles protégées par la membrane type II par rapport à celles recouvertes d'une membrane type I. Toutefois, si l'on considère les âges moyens de 7.75 et 14 ans apparaissant au tableau I, on peut noter que le taux de pénétration des sels est sensiblement le même dans les deux cas.

Cependant, les structures analysées recouvertes d'une membrane de type I sont toutes situées sur des routes à très grande circulation, alors que celles du type II se retrouvent sur des routes provinciales ou régionales où les quantités de sels appliquées sur les structures sont moins considérables.

L'examen visuel des structures a permis de compiler des informations concernant les surfaces de roulement. Les résultats mentionnés au tableau II indiquent le pourcentage de ponts présentant des fissures selon le type de membrane utilisée.

TABLEAU II

Type de fissure	Membrane type I	Membrane type II
Longitudinale	62%	100%
Transversale	36%	100%
Aléatoire	31%	100%

L'observation du drainage des structures nous révèle que 25% de celles-ci ont des drains en mauvais état, 10% ont des drains complètement obstrués et il y a un écoulement sur les poutres sur 12% des structures.

4ième partie

RECOMMANDATIONS

IV- RECOMMANDATIONS

Au chapitre II, nous avons décrit les méthodes susceptibles de prolonger la vie des dalles de ponts. Plusieurs de ces méthodes en sont encore au stade expérimental, ce sont:

- Béton scellé par l'intérieur;
- Protection cathodique;
- Imprégnation de polymères en profondeur;
- Suppression des chlorures par procédés électrochimiques;
- Agents déglaçants non corrosifs.

Il est donc facile de conclure que ces méthodes ne peuvent pour le moment faire l'objet d'une recommandation. Il est par contre bon de les connaître et de suivre les développements futurs afin d'être en mesure d'y recourir le temps venu.

D'autre part, certaines autres méthodes ont été essayées en laboratoire ou utilisées en chantier et se sont montrées inefficaces ou engendrent des problèmes importants concernant les propriétés du béton, ce sont:

- Scellants de surface;
- Béton renforcé de fibres;
- Adjuvants chimiques pour prévenir la corrosion des armatures du béton.

Les méthodes jugées jusqu'à présent les plus efficaces pour protéger les dalles de ponts sont:

- Recouvrement de béton des aciers d'armature;
- Membrane d'imperméabilisation;

- Revêtements des aciers d'armature;
- Recouvrement avec un béton dense;
- Recouvrement avec un béton au latex;
- Béton polymère.

Suite à l'étude bibliographique et aux différentes observations faites sur les dalles de ponts du Québec, les membres du comité font les recommandations suivantes concernant chacune de ces six (6) méthodes:

1- Recouvrement de béton des aciers d'armature

Le recouvrement supérieur pour les dalles de ponts doit être porté de:

- 50 mm à 60 mm - Dalles avec membranes et enrobé bitumineux
- 65 mm à 75 mm - Dalles sans enrobé bitumineux
 - Dalles avec enrobé bitumineux sans membrane.

2- Membranes d'imperméabilisation

Il est recommandé:

- a) De ne plus utiliser le type II prévu au cahier des charges et devis généraux en raison de son coût élevé, de sa fragilité à basse température et de sa faible efficacité.
- b) D'utiliser le type I, mastic bitumineux, prévu au cahier des charges et devis généraux sur la majorité des dalles de ponts du Québec en raison de son coût peu élevé et de la protection suffisante qu'il procure.

c) Que soient introduits au cahier des charges et devis généraux d'autres types de membranes qui pourront être employés dans des cas spéciaux ou comme alternative au type I. Ces types de membranes sont:

- Membrane de bitume caoutchouté appliqué à chaud (mélange de bitume et de monomère synthétique).
- Membrane préfabriquée autocollante composée de la façon suivante: une trame de polypropylène enduite sur une face d'un composé à base d'hydrocarbure et de monomère.
- Membrane préfabriquée composée d'un tissu de polyester imprégné d'un monomère. Cette membrane n'est pas autocollante.

Les membres du comité sont d'avis que les membranes peuvent être omises sur les dalles de ponts situées sur des routes très secondaires ou dans des régions très éloignées des grands centres. Si cette solution est choisie, il faudra par contre augmenter le recouvrement de béton des aciers d'armature, tel que prescrit plus haut.

3- Revêtement des aciers d'armature

a) Par galvanisation

En raison de l'incertitude relative à la bonne tenue de la galvanisation dans les dalles de ponts, le comité recommande de limiter au minimum son emploi.

b) A l'époxy

En raison du prix de ce revêtement, le comité recommande de limiter son emploi à des structures où les risques de détérioration du béton sont très élevés conséquemment à l'emploi de quantités importantes de sels de déglacage, et où il n'y a presque pas de possibilité de restreindre la circulation en vue de réparations futures.

Il faut noter que seulement le lit supérieur d'armature de la dalle peut être traité à l'époxy. Puisque ce recouvrement n'évite que l'éclatement du béton, il est recommandé de l'utiliser avec une membrane d'imperméabilisation afin de réduire également le phénomène de l'écaillage.

De plus, le comité recommande d'utiliser les barres recouvertes d'époxy dans les chasse-roues, parapets, bande médiane de toutes les autoroutes. Par contre, ces armatures doivent être conçues de façon à éviter les pliages excessifs.

4- Recouvrement de béton dense ou au latex

Le comité recommande, lorsqu'il est requis de procéder à des réparations de la dalle existante et, par conséquent, de refaire la membrane d'imperméabilisation et la couche d'enrobé bitumineux, que l'on entrevoit la possibilité d'utiliser un recouvrement de béton dense ou de béton au latex.

Dans la majorité des cas, cette décision ne pourra être prise que si l'on tient compte des facteurs

suivants:

- L'état de la dalle existante (importance des réparations);
- L'importance de la structure et sa situation géographique;
- Les quantités de béton en jeu;
- La disponibilité de l'équipement spécial requis.

Quoique utilisables sur de nouvelles constructions, ces procédés ne sont pas recommandés pour le moment. Le comité estime que le système, comportant un recouvrement de 60 mm, une membrane d'imperméabilisation et un enrobé bitumineux, assure une protection équivalente à un coût moindre. Il faut par contre noter que ces procédés peuvent être avantageux sur certaines constructions où une diminution de la charge constante permet une économie importante sur l'ensemble de la structure.

5- Béton polymère

Compte tenu du coût élevé de ce béton, le comité recommande que celui-ci ne soit utilisé que dans des cas spéciaux où les quantités sont faibles et lorsque l'on dispose d'un temps limité pour la réparation:

a) Béton fabriqué en chantier

Réparations locales des dalles soumises à un trafic intense;

b) Béton polymère fabriqué en usine

Coffrage ou couche de protection du béton conventionnel (parapets, bande médiane, etc.).

CONCLUSION

Notre recherche nous a permis de constater qu'il existe des méthodes susceptibles d'améliorer la longévité des dalles de ponts. Toutefois, pour être efficaces, ces méthodes doivent être reliées à un mode de construction éprouvé auquel s'ajoutent l'ensemble des précautions qui doivent être prises lors de la conception, l'ensemble des soins à apporter lors de la construction ainsi que la qualité de l'entretien préventif.

On ne saurait passer sous silence l'importance de l'entretien préventif pour prolonger la vie des dalles de ponts. Les ornières et les fissures du pavage favorisent la rétention de l'eau et des solutions salines qui finissent par pénétrer dans le béton accélérant ainsi sa détérioration. Il est donc de première importance de suivre l'évolution de l'état du pavage et des drains et de voir à l'entretien de ceux-ci aussitôt que des signes évidents de détérioration sont remarqués.

En conséquence, les membres du comité espèrent fortement que les recommandations formulées au chapitre IV permettront aux Directions concernées du Ministère d'établir de nouvelles directives précises, aussi bien en ce qui concerne les méthodes de construction que les méthodes d'entretien.

De plus, comme il a été noté au cours de ce rapport, le domaine concernant la protection des dalles de ponts fait, un peu partout, le sujet de recherches intensives et doit donc nous laisser entrevoir une évolution constante, tant au niveau des produits utilisés que des méthodes de chantier pour assurer une protection toujours plus efficace.

BIBLIOGRAPHIE

Amsler, Duane E., Chamberlin, William P. - "Depth of Concrete Cover over Bridge Deck Reinforcement". Special Report 28, Engineering Research and Development Bureau, New York State Department of Transportation, January 13-17, 1975.

Beijers, G.M.H. - "Research to the Formation of Blisters which Occur by Application of Waterproofing Layers on Concrete Bridges". Delft University of Technology, February 16-18, 1976.

Clear, Kenneth C. - "Eliminate Premature Deterioration of Portland Cement Concrete". Annual Progress Report, September 30, 1978, Project No 4B.

Edgecomb, Walter C., Jr. - "Polymer Impregnation of New Concrete Bridge Deck Surface". Department of Transportation, Bureau of Highways, Maine, Final Report, Materials and Research Division, Technical Paper 81-2, March 1981.

Evers, R.C. - "Bridge Deck Waterproofing". Ministry of Transportation and Communications, Ontario, January 1979.

Frascoia, R.I. - "Initial Results of Vermont Field Trials of Waterproofing Membranes". Vermont Department of Highways, January 21-25, 1974.

Frascoia, R.I. - "Vermont's Experience with Bridge Deck Protective Systems". Chloride Corrosion of Steel in Concrete, ASTM STP 629, D.E. Tonini and S.W. Dean, Jr., Eds., American Society for Testing and Materials, 1977, pp. 69 - 81.

Fromm, H.F. - "Cathodic Protection of Concrete Bridge Decks". Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D.C., January 1980.

Kietzman, J.H., Hughes, G.E. - "Mastic Pavement Mix for Protection of P.C. Concrete". CTAA Report on Hot Mix Membrane.

Kuhlmann, L.A. - "A Performance History of Latex Modified Concrete Overlays". Presented at the 1980 Fall Convention (September 1980), American Concrete Institute, San Juan, Puerto Rico.

Manson, J.A., Chen, W.F., Vanderhoff, J.W., Mehta, H.D., Cady, P.D., Kline, D.E. and Blankenhorn, P.R. - "Use of Polymers in Highway Concrete". NCHRP Report 190, Transportation Research Board, 1978.

Meador, A.L., Jr., Schmitz, C.G., and Henry, J.E. - "Development of a Cold-Poured Bridge Deck Membrane System". Chloride Corrosion of Steel in Concrete, ASTM STP 629, D.E. Tonini and S.W. Dean, Jr., Eds., American Society for Testing and Materials, 1977, pp. 164 - 177.

Ministry of Transportation and Communications, Ontario, Research and Development Division - "Bridge Decks". April 1976.

Ministry of Transportation and Communications, Ontario, "Task Force on Durable Bridge Decks", Activities during 1976 and 1977.

Morrison, Garrett L., Virmani, Yash P., Stratton, F. Wayne, and Gilliland, William J. - "Chloride Removal and Monomer Impregnation of Bridge Deck Concrete by Electro-Osmosis". Report No. FHWA-Ks-RD. 74-1, Interim Report, Kansas Department of Transportation, April 1976.

National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of Highway Practice 4 - "Concrete Bridge Deck Durability". Highway Research Board, 1970.

National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of Highway Practice 57 - "Durability of Concrete Bridge Decks". Transportation Research Board, May 1979.

Nicholson, J.P. - "A New Approach to Cathodic Protection of Bridge Decks and Concrete Structures". Presented to the Transportation and Research Board, Washington, D.C., January, 1980.

Smith, E.V., Gopan, J.L., Bremner, S. - "Evaluation of Membrane Waterproofing". Mat. & Res. Technical Paper 73-1, June 1974.

Smoak, W.G. - "Polymer Impregnation of New Concrete Bridge Deck Surfaces". Report No. FHWA-RD-78-5, January 1978.

Transportation Research Record 604 - "Bridge Decks: Corrosion, Cathodic Protection, and Pavement Seals". 1976.

Transportation Research Record 651 - "Concrete, Aggregates, Marking Materials, Corrosion, and Joint Seals". 1977.

Van Til, C.J., Carr, B.J., and Vallerga, B.A. - "Waterproof Membranes for Protection of Concrete Bridge Decks" Laboratory Phase. National Cooperative Highway Research Program Report 165, 1976.

Vézina, Daniel - "Propriétés physiques des différentes membranes pour la Protection des Dalles de Ponts". Ministère des Transports, Mai 1979.

Vrable, John B. - "Cathodic Protection for Reinforced Concrete Bridge Decks" Laboratory Phase. National Cooperative Highway Research Program Report 180, 1977.