

## **Une alternative pour la réhabilitation des bétons armés: traitement minéral et revêtement mince.**

Bernard Malric, MFP SA, Genève, Suisse.

### **Résumé :**

La méthode habituelle de réparation des bétons armés souffrant de corrosion des armatures consiste à enlever le béton contaminé en dégageant les aciers, et à reconstituer les surfaces au moyen d'un béton spécialement formulé. Cette méthode est très intrusive et onéreuse, et on constate souvent une fissuration importante des réparations, permettant une recontamination rapide du béton. Une alternative avantageuse consiste à n'enlever que le béton éclaté ou trop contaminé, et à utiliser un mortier de finition mince et étanche pour éviter toute contamination subséquente. Cette solution est rendue possible par l'utilisation d'une imprégnation à base de monofluorophosphate qui permet à la fois de diminuer le risque de corrosion, de renforcer le béton et d'augmenter sa résistance à l'écaillage, et de diminuer le risque de fissuration des réparations et des enduits minces. Un exemple d'un tel traitement utilisé près de Genève au Pont de Peney sur le Rhône en 1994 montre après 15 ans l'efficacité de cette solution. Cette approche est particulièrement adaptée à l'assainissement de façades architecturales souffrant de carbonatation mais est aussi applicable aux ouvrages d'art de façon sélective en fonction de l'état de contamination par les chlorures.

### **Introduction**

Pour réparer des structures en béton armé montrant des éclatements et des délaminations dus à la corrosion des armatures, il est habituel d'enlever le béton des zones souffrant de corrosion sur une épaisseur d'environ 10 cm de façon à dégager les armatures. La surface est ensuite reconstituée par un mortier spécial ou un béton projeté. Parfois un inhibiteur de corrosion est appliqué en fonds de réparation avant reconstitution pour réduire le risque de corrosion galvanique autour de la zone réparée.

Cette méthode est toutefois coûteuse, très intrusive, et les réparations montrent le plus souvent une importante fissuration après quelques mois, par suite des tensions générées par les retraits du mortier de réparation. Ces fissures peuvent permettre une recontamination rapide du béton par les sels de déverglaçage. Enfin, la contamination des zones avoisinant les réparations peut être suffisante pour permettre la poursuite des phénomènes de corrosion des armatures.

Une alternative intéressante consiste à n'enlever que le béton éclaté ou délaminé, ainsi que les zones dans lesquelles les armatures ont subi une perte de section significative ou sont recouvertes d'une corrosion feuilletée, à traiter ensuite l'ensemble des surfaces avec un produit à base de monofluorophosphate permettant à la fois de réduire le risque de corrosion des aciers, de renforcer la peau du béton, et de réduire le risque de fissuration des revêtements, et enfin à reconstituer les zones dégagées et à appliquer un mortier mince étanche qui empêchera la poursuite de la contamination par les chlorures.

## Propriétés des monofluorophosphates

Le monofluorophosphate de sodium, utilisé depuis la fin des années 40 dans les pâtes dentifrices pour le renforcement de l'émail dentaire, a été étudié comme inhibiteur de corrosion à partir de 1985 à la fois par l'Ecole de Chimie de Toulouse pour l'utilisation dans les circuits de refroidissement utilisant de l'eau de mer, et par la société Domtar à Montréal pour le béton armé. L'intérêt du monofluorophosphate comme inhibiteur de corrosion a été démontré par ces deux programmes de recherche, et il a été développé ensuite comme technique d'assainissement des bétons armés par la société Locher de Zurich, et depuis 1997, par la société MFP SA de Genève, Domtar restant propriétaire des brevets. Cette technique est appliquée régulièrement sur des ouvrages en béton armé depuis 1993, et bénéficie donc d'un recul de plus de 15 ans.

Au-delà des propriétés d'inhibiteur de corrosion, similaires aux phosphates classiques bien connus et par ailleurs largement publiées [1-4], le monofluorophosphate de sodium possède vis-à-vis du béton durci plusieurs propriétés qui participent significativement à l'accroissement de la durabilité des ouvrages, et qui vont être plus particulièrement décrites dans cette communication.

### 1. Réactions du monofluorophosphate avec la pâte cimentaire.

Le monofluorophosphate est appliqué sur la surface du béton durci (il n'est pas adapté à un usage en additif au béton frais) et pénètre jusqu'à l'armature par capillarité pour diminuer le risque de corrosion. De ce fait, une concentration importante se retrouve dans la zone de surface du béton (un cm environ), qui s'hydrolyse partiellement et catalyse une réaction dans les CSH qui deviennent fibreux (fig. 1). Ces fibres, composées seulement de calcium et de silicium, semblent être des tubes creux, suggérant un phénomène de transport osmotique.

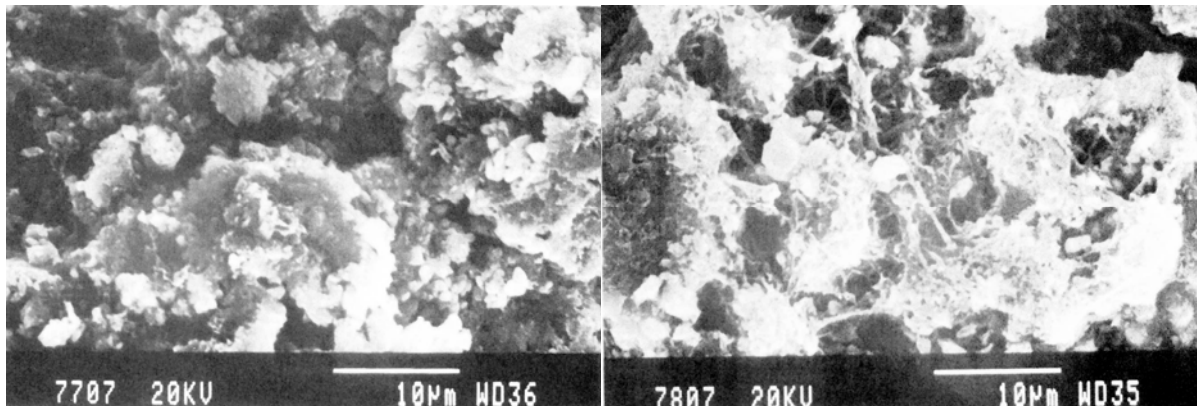


Fig. 1 – Transformation de la morphologie des CSH par le monofluorophosphate : CSH normal (à gauche), CSH fibreux après traitement au monofluorophosphate (à droite).

Cette transformation des CSH est à l'origine d'une augmentation de la résistance mécanique dans la zone considérée, avec une rupture moins fragile. Une autre conséquence importante est une augmentation très significative de la résistance du béton aux cycles de gel et dégel en présence de chlorures. Cet aspect a été étudié en détail par le SEM et l'Université Laval [5], en particulier en utilisant des paires de plaques d'essai ayant déjà subi 50 cycles de gel/dégel de façon à simuler l'application sur un béton existant déjà contaminé. Différents bétons avec des rapports E/C et des facteurs d'espacement différents ont été étudiés. Les résultats ont montré une amélioration systématique de la résistance du béton à l'écaillage, l'allure des courbes (Fig.2) suggérant un renforcement de la zone de surface des bétons.

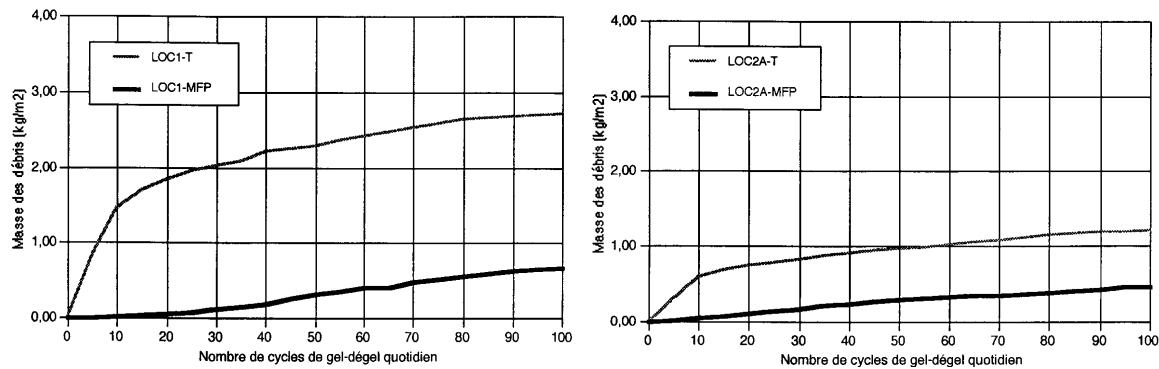


Fig.2 – Résultats d'essais d'écaillage selon la norme ASTM C-672, sur des bétons ayant déjà subi 50 cycles de gel dégel, rapport E/C 0,45, facteur d'espacement inférieur à 250 microns (à gauche) et de 400-500 microns (à droite).

## 2. Influence du monofluorophosphate sur le comportement des mortiers de réparation et les revêtements minces.

L'ion monofluorophosphate est également un retardateur de prise connu. En conséquence, un béton imprégné de monofluorophosphate aura un effet de retard de prise sur l'interface entre le béton et les mortiers de réparation ou les revêtements minces cimentaires. Ceci a pour conséquence d'augmenter artificiellement la capacité de fluage de ces mortiers, permettant aux tensions générées par les retraits de prise de se dissiper. D'autre part, les molécules issues du fluorophosphate sont hygroscopiques et le risque de perte d'eau prématurée dans le support est diminué. A plus long terme les réactions décrites plus haut induites par le monofluorophosphate sur la pate cimentaire à l'interface améliorent l'adhérence entre les matériaux.

Cette propriété a été utilisée par exemple sur la fontaine située à l'entrée du parc de La Ronde à Montréal (« Orbite Optique N°2 »). Après application du monofluorophosphate, un mortier mince (2mm) a été utilisé pour donner un aspect uniforme à l'ouvrage. Le mortier utilisé est connu pour générer beaucoup de microfissures au bout de quelques semaines, or il ne présente pas de microfissuration après 7 ans (Fig. 3).



Fig.3 – Aspect de surface de la fontaine de La Ronde avant réparations (à gauche) et 7 ans après les travaux : aucun faïençage ni fissuration du mortier mince de finition n'est observé.

### Exemple d'utilisation : le Pont de Peney sur le Rhône, à Genève

Le pont de Peney franchit le Rhône en aval de Genève. Il s'agit d'un pont bipoutre continu d'une longueur de 175m. Construit en 1942, l'ouvrage est en béton vibré, armé de barres d'acier doux lisses Fig. 4 et 5).

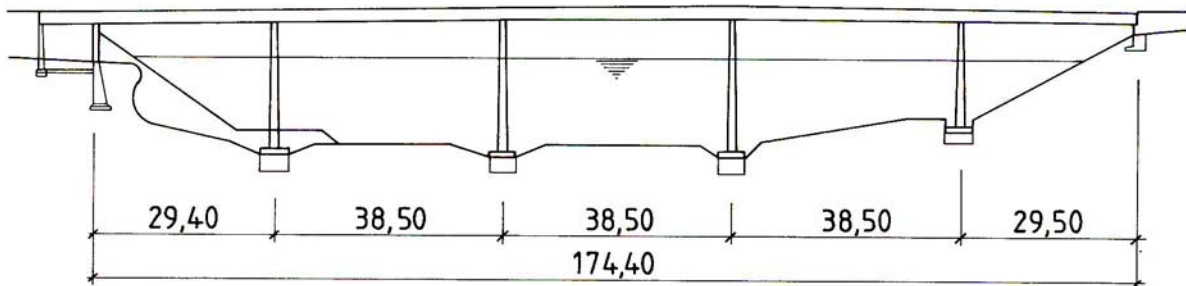


Fig.4 – Pont de Peney, élévation.

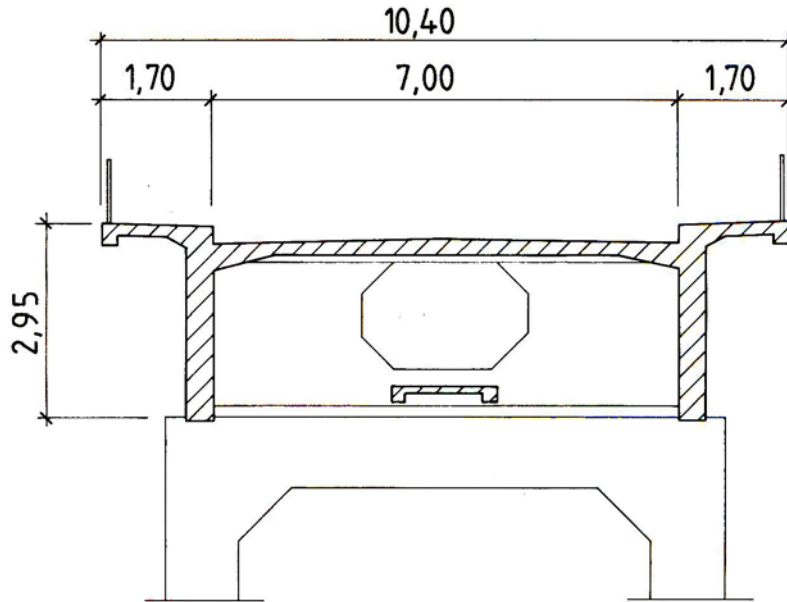


Fig.5 – Pont de Peney, coupe.

### 1. Etat initial.

En 1983, le Département des travaux publics du canton de Genève (DTPE) mandate un laboratoire qui relève d'importantes dégradations, à savoir une fissuration d'origine statique (fissures traversantes d'ouverture jusqu'à 1mm), un état caverneux en de nombreuses zones, des éclats dus à la corrosion des armatures provoquée par la carbonatation du béton et l'infiltration de chlorures provenant des sels de déverglaçage. Il faut ajouter une importante contamination générale en chlorures et sulfates provenant de la présence proche d'une usine d'incinération des ordures ménagères (Fig. 6).

Le mandataire a pu mettre en évidence que sur les faces latérales des sommiers, 55 à 100% des aciers n'étaient plus protégés de la corrosion. Comme méthode de réfection, le laboratoire a alors préconisé le repiquage sur les poutres maîtresses de la totalité du béton carbonaté ou contaminé par les chlorures et l'application d'un béton projeté assurant un enrobage des aciers d'au moins 20 mm.



Fig.6 – Pont de Peney, défauts.

### *2. Evaluation de la sécurité structurale par l'ingénieur civil.*

L'évaluation selon les normes en vigueur fut réalisée à la demande du DTPE en 1991. Il en ressort que malgré l'augmentation des charges depuis l'époque de la construction, la sécurité globale de l'ouvrage est assurée et qu'un renforcement n'est pas nécessaire.

### *3. Contre-indications à une démolition du béton en place.*

Tout d'abord, lorsque le béton en place offre une bonne résistance, le dégrappage des surfaces s'avère très « énergivore » tandis qu'il est difficile de garantir que le matériau rapporté présentera une résistance et une adhérence au moins égales à celles du matériau enlevé.

Ensuite, dans certaines zones de transfert de contrainte entre l'armature et le béton, un dégrappage du béton superficiel serait dangereux :

- a) près des barres relevées proches du parement,
- b) dans la zone d'ancrage des armatures sur appuis des poutres maîtresses,
- c) sous les charges de roues, enfin, il y a un risque de poinçonnement du tablier.

Il faut encore mentionner les contraintes et vibrations que l'ouvrage continuera de subir pendant la prise des mortiers ou des bétons de ragréage, le pont devant rester en service durant les travaux de réfection.

#### 4. Variante d'exécution avec recours à l'imprégnation de monofluorophosphate.

En 1993, le DTPE lance un appel d'offres pour la réfection du pont selon la méthode traditionnelle de dégrappage de l'ensemble des surfaces du béton et le ragréage par béton projeté. Les entreprises Perret SA et Locher & Cie SA proposent une variante consistant en une réfection ponctuelle des seules zones éclatées, la protection contre la corrosion étant assurée par une imprégnation générale de monofluorophosphate de sodium. Se révélant non seulement la moins coûteuse (-25%), mais permettant également d'éviter certains problèmes posés par la méthode traditionnelle, cette solution est adoptée.

#### 5. Stratégie de réfection retenue.

La figure 7 montre le principe de réfection finalement exécuté. L'application de monofluorophosphate permet à la fois de réduire le risque de corrosion des armatures et de renforcer le béton de peau.

Les réparations locales ont tout d'abord été exécutées par hydrodémolition à 2000 bars. Face aux difficultés rencontrées pour l'exécution satisfaisante des très nombreux taconnages, l'ingénieur a décidé de modifier la méthode de la façon suivante : le béton n'est que légèrement décapé (pression de la lance hydraulique ramenée à 400 bars), ce qui débarrasse des fragments non adhérents. Par contre, même si la barre présente une corrosion superficielle, elle n'est pas dégagée lorsque le béton est sain. Les seules zones subissant le traitement haute pression sont les nids de gravier importants. Après l'imprégnation de monofluorophosphate, les zones éclatées sont réparées au moyen d'un mortier spécial et les surfaces extérieures des sommiers sont lissées avec un enduit bouche-pores à base de ciment.

Aucune peinture de protection n'a été acceptée par l'ingénieur de façon à ne pas modifier la perméabilité à l'eau de l'ouvrage.

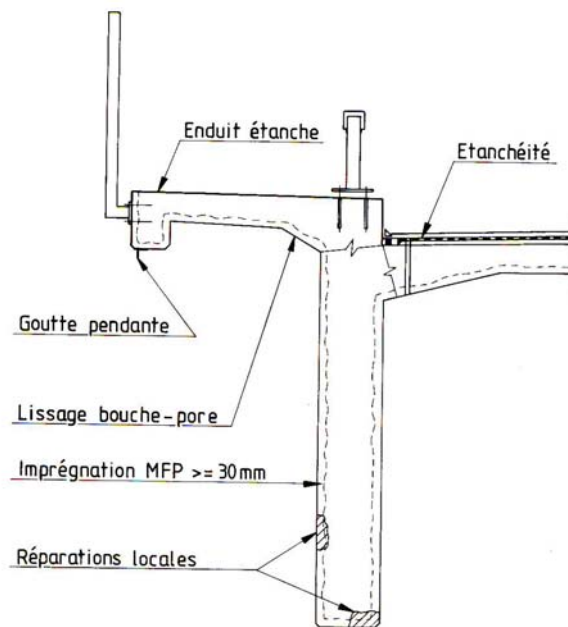


Fig.7 – Pont de Peney : principe de réfection.

## 6. Comportement de l'ouvrage après 15 ans.

Au début de 2009, le DTPE a mandaté un bureau d'ingénieurs pour vérifier le comportement des réparations réalisées en 1994, ainsi que la teneur en monofluorophosphate toujours présente dans le béton. Les conclusions sont les suivantes :

- Tous les taconnages sont intacts et ne présentent aucune fissure en leur centre ou leur pourtour.
- Le bouche pore cimentaire sur l'extérieur des sommiers ne présente aucune microfissuration ou faïençage, y compris sur les zones qui comportaient des aciers affleurants (Fig. 9).
- Quelques fissures de charge sont constatées.
- L'analyse de la teneur en monofluorophosphate réalisée sur une zone test sur laquelle des contrôles avaient déjà été effectués en 1997 et 2004, ne montre pas de changement significatif dans le profil de concentration en fonction de la profondeur. En effet, au-delà des réactions d'hydrolyse initiales, le monofluorophosphate est chimiquement stable dans le milieu du béton (Fig.8).

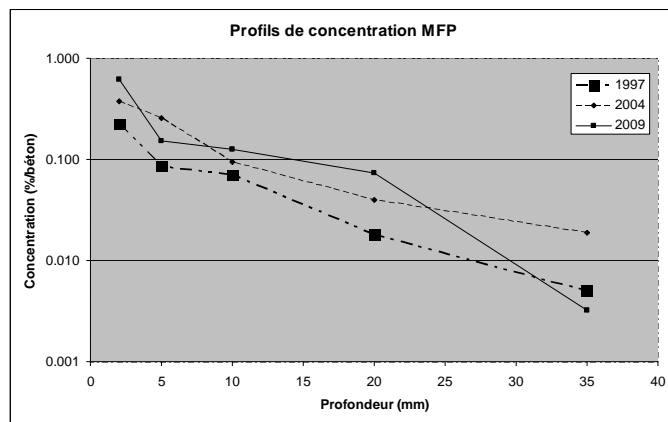


Fig.8 – Pont de Peney : concentration en monofluorophosphate dans le béton observée sur une même zone au cours du temps.



Fig.9 – Pont de Peney : vue d'un sommet avant les travaux en 1993 (à gauche), et en 2009, 15 ans après les travaux (à droite).



## Conclusions

Nous reprenons les conclusions de l'ingénieur civil responsable des travaux au Pont de Peney :  
« En présence d'un ouvrage dont la sécurité structurale est assurée, l'opinion de l'ingénieur est que la méthode traditionnelle de dégrappage de l'ensemble des surfaces et ragréage au béton projeté présente un risque d'affaiblissement de la structure et devrait être réservée à des ouvrages constitués d'un béton peu résistant ou dont l'armature est sous-dimensionnée ou très altérée. L'imprégnation de monofluorophosphate permet de ne pas perturber le fonctionnement statique d'un ouvrage, tout en traitant des armatures qu'il est tout simplement impossible de dégager pour des raisons de sécurité. »

Pour pouvoir utiliser une telle méthode, il faut cependant que le monofluorophosphate puisse atteindre les armatures et que la contamination en chlorures soit inférieure à 2% en poids de ciment, ce qui nécessite donc un bon diagnostic préalable, ainsi que des essais in-situ. Des exemples de structures adaptées à ce traitement sont par exemple les façades et parapets de balcon et de façon générale toutes les structures souffrant de carbonatation du béton, ainsi que les zones d'ouvrages d'art avec un recouvrement mince (parapets, plafonds).

## Références :

1. DUPRAT, M, LAFONT, M. C., MORAN, F. and ROCHER, S., *"Inhibition de la corrosion d'un acier au carbone en milieux neutres aérés par les monofluorophosphates"*, Revue Française des Sciences de l'Eau, V. 4, 1985, pp. 1-15.
2. ALONSO, C., ANDRADE, C., ARGIZ, C. and MALRIC, B., *"Na<sub>2</sub>PO<sub>3</sub>F as Inhibitor of Corroding Reinforcement in Carbonated Concrete"*, Cement and Concrete Research, V. 26, No 3, 1996, pp. 405-415.
3. M. BACH, *Inhibition de la corrosion des armatures métalliques dans les maçonneries anciennes*. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 2002.
4. T. CHAUSSADENT, V. NOBEL-PUJOL, F. FARCAS, I. MABILLE, et C. FIAUD, *« Effectiveness conditions of sodium monofluorophosphate as a corrosion inhibitor for concrete reinforcements*. Cement and Concrete Research, 2005.
5. F. SAUCIER, M. PIGEON. *Additional tests on the effect of the MFP treatment on the freeze/thaw scaling resistance of cement concrete. Effect of 5 applications on 8 different concrete types*. SEM report N°93080b, 1994.