

**TECHNIQUE INNOVANTE DE TRAITEMENT DES CÂBLES DE  
PRÉCONTRAÎNTE PAR INJECTION D'UN INHIBITEUR DE  
CORROSION AU MOYEN D'UNE POMPE À ULTRASONS DE  
PUISSANCE  
APPLICATION SUR DEUX VIADUCS SUR L'AUTOROUTE E 411 À  
COURRIERE**

**ir JEAN-LUC LECOMTE**

**SPW - Direction Générale Opérationnelle – Routes et Bâtiments – Direction des  
routes de Namur**

**ir PIERRE MARIE DUBOIS**

**P.M.D. sprl**

**DANIEL MICHAUX**

**ATEAV sarl**

**Résumé**

En 2006, une expertise de la Division du Contrôle Technique du SPW, a mis en évidence d'importants défauts d'étanchéité du tablier sur deux des trois viaducs contigus sur l'E411 à Courrière principalement sous les filets d'eau. Les infiltrations ont entraîné une contamination par des chlorures des câbles de précontrainte dans les zones supérieures au droit des piles. Cette contamination s'accompagne d'un début de corrosion généralisé de la précontrainte.

Vu le succès déjà rencontré sur plusieurs applications test du procédé PMD/ATEAV de stabilisation des corrosions des câbles de précontrainte par injection d'inhibiteur de corrosion à l'aide des ultrasons de puissance, la Direction des Autoroutes de Namur a pris la décision d'appliquer le procédé aux deux viaducs.

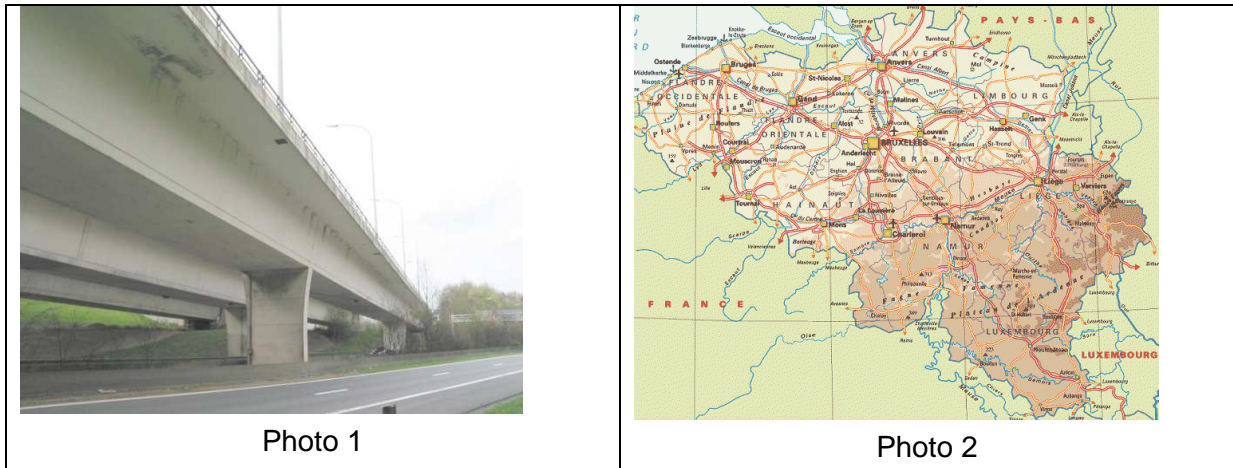
**Samenvatting**

In 2006 heeft een onderzoek van de Technische Controle Dienst van de MET, belangrijke mankementen ten aanzien van waterdichtheid bij twee van de drie viaducten aan de E411 bij Courrière aangetoond, voornamelijk onder de waterstromen. Het doordringende water heeft aantasting van de voorgespannen kabels veroorzaakt door chloren in de zone boven. Deze aantasting gaat gepaard met een beginnende algemene corrosie van de kabels. Gezien het reeds verkregen succes op verschillende testtoepassingen van het procédé PMD/ATEAV ten aanzien van stabilisatie van corrosie op voorgespannen kabels middels injectie van een corrosievertrager met behulp van ultrasone kracht, heeft de Directie van de snelwegen van Namen besloten om het procédé toe te passen bij deze twee viaducten.

## 1.- PREMIERE PARTIE : ANALYSE DE LA PATHOLOGIE DES OUVRAGES

### 1.1.- PRESENTATION DES OUVRAGES

Les viaducs de Courrière sont au nombre de trois (photo 1). La structure de pont en caisson unique à 4 travées continues en béton postcontraint est la même pour chaque viaduc.



Deux ouvrages permettent à la nationale 4 de passer au-dessus de l'autoroute E411.

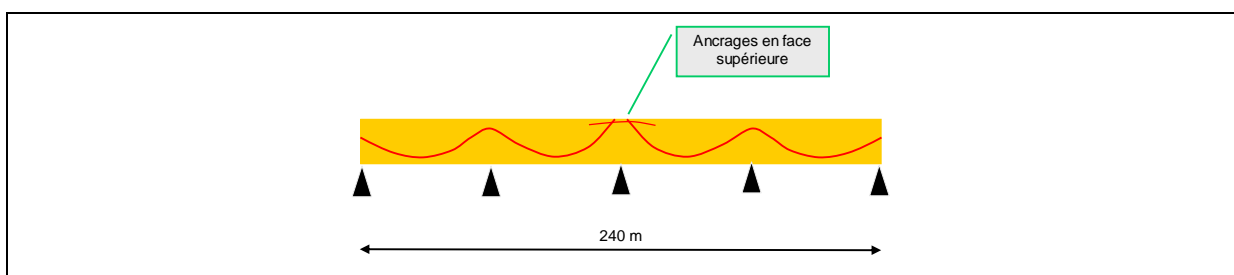
Le troisième ouvrage construit plus récemment, permet de rejoindre la N4 en direction d'Arlon à une bretelle venant de la E411 (figure 2).

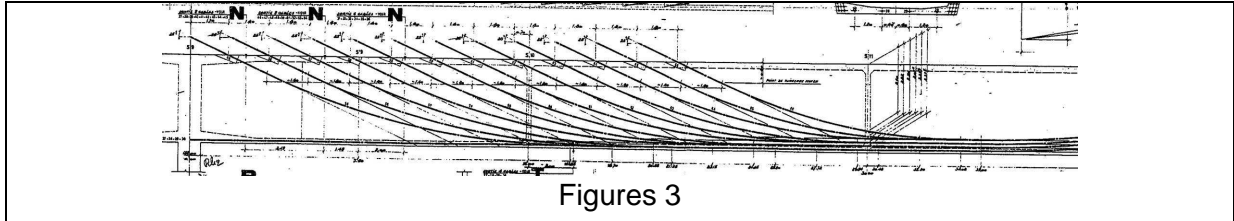
Les ouvrages ont été construits en 1973.

### 1.2.- STRUCTURE DES OUVRAGES

Les trois viaducs ont la même structure de pont caisson continu. La postcontrainte est située dans les voiles.

Pour les deux premiers viaducs, les câbles sont interrompus au droit de la pile centrale. Des câbles cloche placés dans la dalle supérieure réalisent la continuité des efforts de précontrainte. Des câbles cloches sont aussi présents mais en moindre quantité au droit des piles latérales où les câbles des voiles ne sont pas interrompus (Figures 3).





Figures 3

Au droit de la pile centrale, les câbles voiles viennent s'ancrer en partie supérieure de la dalle supérieure. Suivant les cas, cette zone correspond à la position du filet d'eau ou non comme l'illustre la figure 4 :

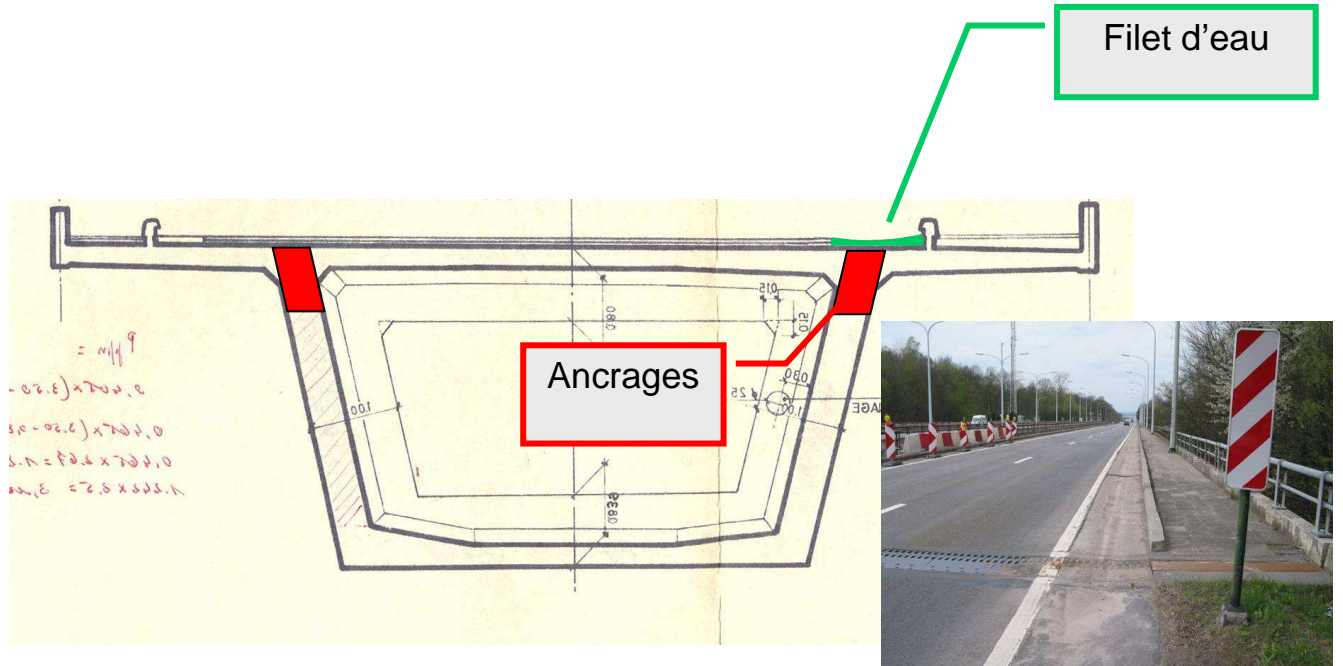


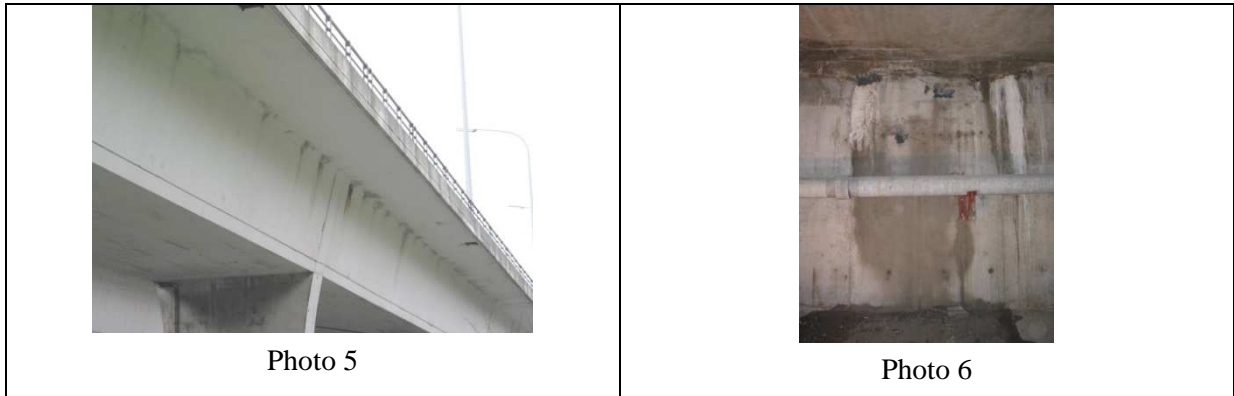
Figure 4

Les câbles de précontrainte sont des câbles type BBRV composés de 44 fils de 7 mm de diamètre.

### 1.3.- EXAMEN VISUEL DES CAISSONS

L'inspection A (mai 2005) a mis en évidence les défauts principaux illustrés sur la figure 5 :

- Abondantes infiltrations d'eau avec dépôts de carbonate de calcium dans le voile sous le filet d'eau, de part et d'autre de la pile centrale. Les infiltrations proviennent clairement des zones d'ancrage des câbles voiles (Photo 5).
- Ces infiltrations d'eau chargées en chlorures provoquent des corrosions d'armatures (Photo 6).



#### 1.4.- DEGAGEMENTS REALISES AU DROIT DES CABLES VOILES

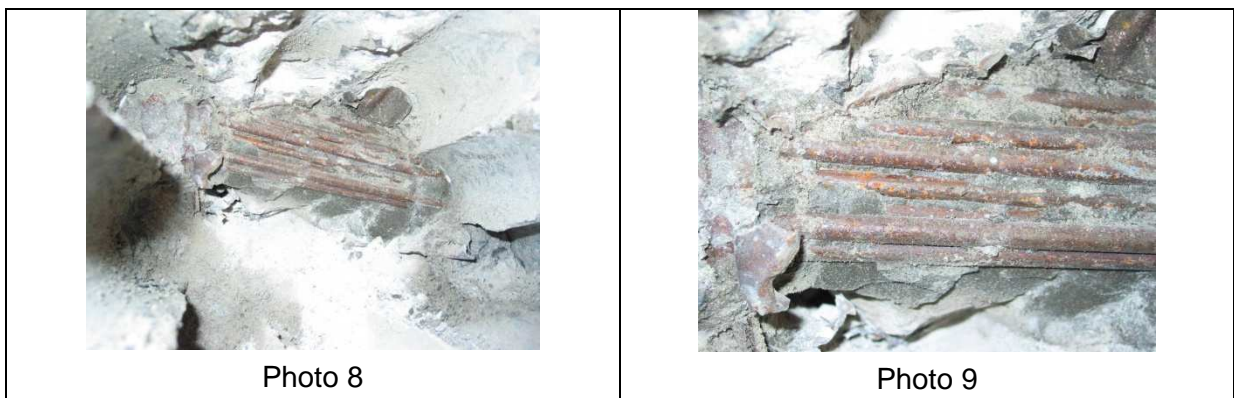
L'eau s'infiltrant dans les ancrages sous les filets d'eau, trois dégagements ont été réalisés aussi près que possible des zones d'ancrage.

L'enrobage des câbles voiles étant d'environ 20 cm, après localisation, des forages ont été réalisés pour atteindre les câbles (Photo 7).

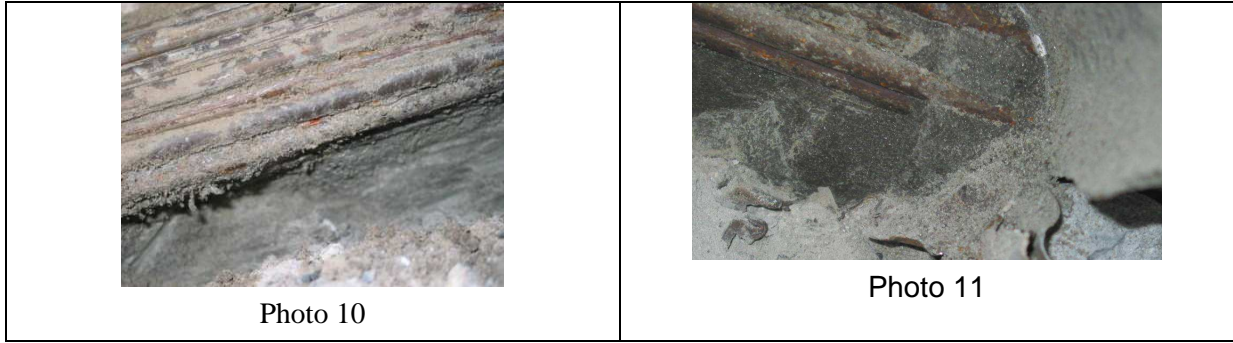


Les dégagements réalisés en octobre 2005 n'ont pas été rebouchés directement. Les dégagements ont fait l'objet de plusieurs examens périodiques.

Les dégagements ont mis en évidence une légère corrosion généralisée des points oranges pouvant traduire la présence de chlorures (Photos 8 et 9)



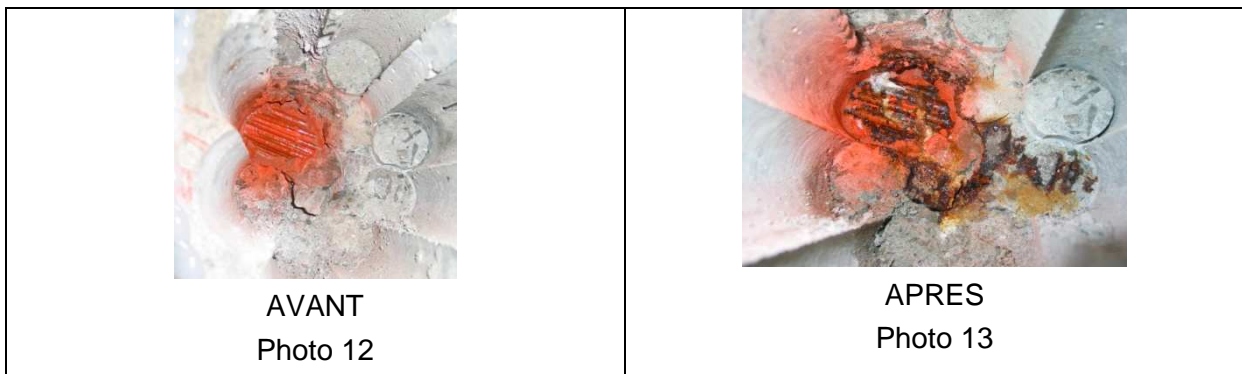
Parfois, le coulis est localement pâteux (Photo 10).



La présence de petites gouttes d'eau dans le mortier a été observée un jour après les dégagements (Photo 11).

Les fils ont été protégés du milieu extérieur par de la peinture de couleur orange et un cordon de silicone a été appliqué autour du dégagement afin d'empêcher les percolations d'eau s'écoulant le long du voile de pénétrer dans le dégagement.

Après une période de 7 mois d'exposition incluant l'hiver 2005-2006, à l'air ambiant, on a observé une évolution significative d'aspect qui traduit la présence d'eau chargée en chlorures provenant des ancrages (Photos 12 et 13).



Pour confirmer que l'origine des chlorures provient bien des ancrages, des mesures de teneurs de chlorures ont été réalisées à différentes profondeurs du béton d'enrobage pour évaluer un éventuel gradient de chlorures.

Ces résultats montrent que le béton ne contient pas de chlorures (valeur nettement inférieure à la limite de 0,06 % admissible pour du béton armé) - Tableau 14.

| Distance face interne (mm) | Teneur chlorures (acide) (%) béton |
|----------------------------|------------------------------------|
| 0-15                       | 0.10                               |
| 15-30                      | 0.16                               |
| 50-70                      | 0.07                               |
| 140-160                    | 0.04                               |

Tableau 14

L'écoulement d'eau sur le parement intérieur du voile de caisson ne pollue donc pas le béton en chlorures en profondeur.

### 1.5.- ESSAIS SUR COULIS

Les prélèvements réalisés en octobre 2005 ont fait l'objet d'une mesure de pH, de la teneur en ciment et de la teneur en chlorures (extraction à l'acide). Voir tableau 15.

| Teneur en chlorures Extraction à l'acide<br>(% m/m) | Teneur en ciment<br>(% m/m) | pH    |
|---|-----------------------------|-------|
| 0.170   | 74.1                        | 12.67 |
| 0.046   | 73.6                        | 12.82 |
| 0.131   | 69.2                        | 12.74 |

Tableau 15

Les teneurs en chlorures dépassent la valeur limite de 0,07 % (p/r masse de coulis)

Les teneurs en ciment indiquent un coulis riche en ciment (environ 70%)

Les valeurs de pH sont tout à fait normales et conformes à un coulis à l'abri de l'air.

Pour rappel, la limite de 0,07 % en teneurs en chlorure a été déterminée comme suit :

Norme : Ciment – contact précontrainte : 0.1 % m/m ciment

Teneur en ciment : Essais sur coulis : 70 %

Limite sur le coulis :  $0.1 \times 0.7 = 0.07$  % m/m coulis

## 1.6.- SYNTHÈSE DES OBSERVATIONS

Le défaut principal des deux premiers viaducs de Courrière réside dans l'infiltration d'eau chargée en chlorures dans les remontées des câbles des voiles de part et d'autre de la pile centrale.

Ce défaut est directement lié à la présence d'un filet d'eau au-dessus de ces ancrages.

Les trois dégagements opérés ont mis en évidence les éléments importants suivants :

- Pas de vide d'injection observé
- Coulis souvent compact mais parfois pâteux
- Souvent forte pollution par les chlorures
- Traces d'écoulement d'eau dans les câbles
- Corrosion limitée à la surface des fils

## 1.7.- ACTION CURATIVE NECESSAIRE

La conclusion de ce constat est qu'il est nécessaire de bloquer rapidement la situation en l'état. Car attendre conduirait à terme, au remplacement des ouvrages.

Il est donc impératif de bloquer les venues d'eaux chargées en sels et par ailleurs d'apporter une protection complémentaire aux fils de précontrainte.

Pour arrêter les venues d'eau, il convient de prévoir le remplacement de la chape d'étanchéité.

Pour bloquer l'évolution des corrosions, il faut d'une part établir une cartographie de la répartition des pollutions en chlorures le long des câbles et ensuite bloquer les corrosions dans ces zones à fort risque de corrosion par une action appropriée.

La seule action appropriée connue à ce jour est celle proposée un nouveau procédé développé conjointement par la firme belge P.M.D. et la société française ATEAV qui introduit des inhibiteurs de corrosion dont l'action est validée jusqu'aux aciers de précontrainte à l'aide de la technique des ultrasons de puissance. Ce procédé a déjà fait l'objet de nombreuses applications pilotes avec succès. Il est validé par le CSTC et dispose d'un recul de 14 années.

## **2.- DEUXIEME PARTIE :**

### **DETERMINATION DES ZONES A FORT RISQUE DE CORROSION CARTOGRAPHIE DES CHLORURES**

Il est primordial que toute la zone polluée par les chlorures soit traitée avec les inhibiteurs de corrosion car si la progression de l'inhibiteur de corrosion devait s'arrêter dans une zone significativement polluée, il y aurait semble-t-il mais ce n'est pas démontré, un risque de corrosion local accru dans la zone de transition.

Le chantier de réhabilitation des deux viaducs a débuté au printemps 2008.

La première préoccupation a été la détermination des taux de pollution en chlorures le long des câbles à l'arrière des ancrages.

Première surprise, le dégagement des têtes d'ancrage remontant dans le tablier a mis en évidence de nombreux vides d'injection avec corrosion parfois importantes de plusieurs fils (Photos 16 et 17)



Photo 16



Photo 17

On a ensuite procédé à des mesures systématiques de teneur en chlorures par carottages jusqu'aux câbles et prélèvement de coulis (Photo 18).

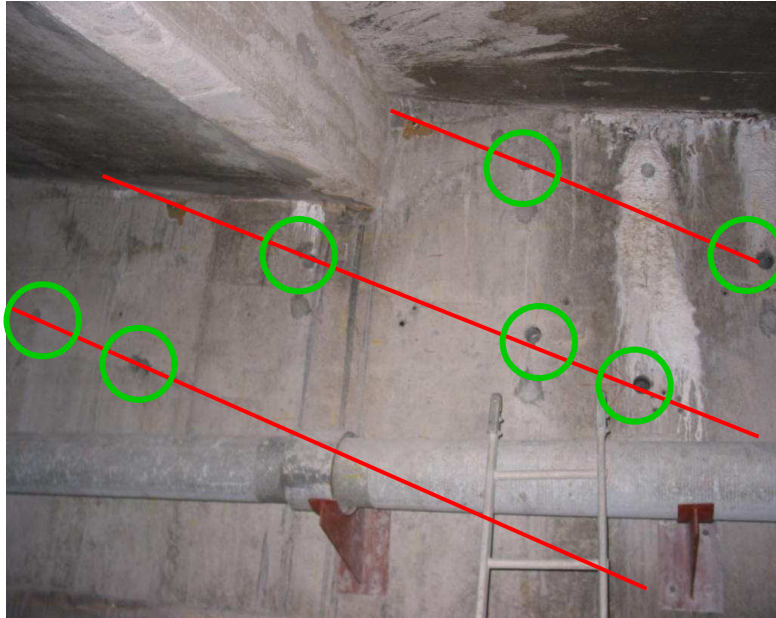


Photo 18

Les teneurs ont été reportés sur un graphe qui montre l'évolution des teneurs au fur et à mesure que l'on s'écarte des ancrages (Figures 19 et figure 20)

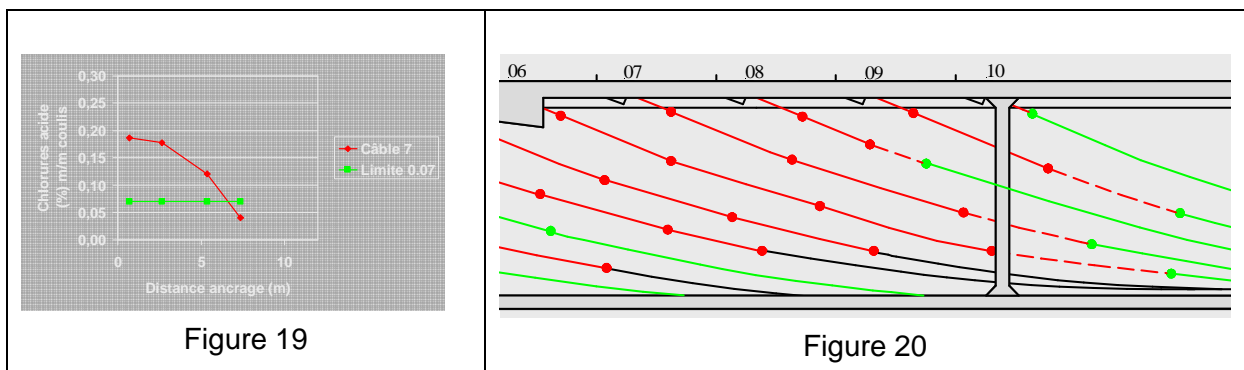


Figure 19

Figure 20

Ce dernier graphe constitue la cartographie des chlorures. Il constitue l'outil indispensable pour définir les zones à traiter par l'inhibiteur de corrosion.

#### Synthèse des constatations :

- Les profils en chlorures sont dégressifs avec la distance à l'ancrage
- La pénétration des chlorures par les ancrages est confirmée
- Il n'y a pas de pénétration de chlorures par le béton
- Les pollutions s'étendent parfois jusqu'à 30 m
- Il y a des vides d'injection sur les premiers mètres

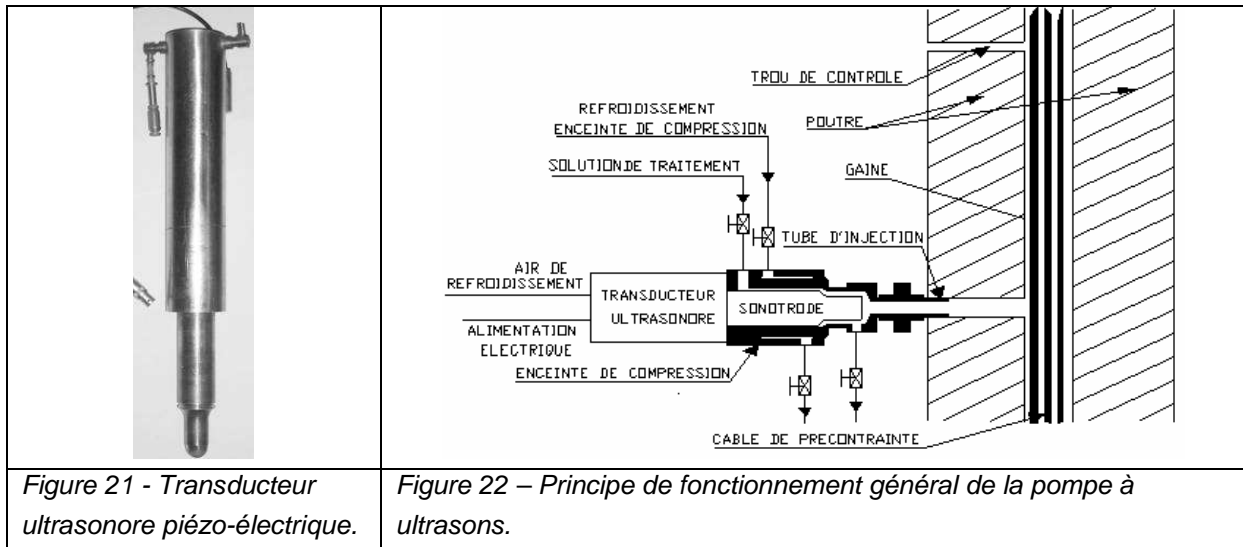
### **3.- TROISIEME PARTIE : DESCRIPTION DE LA TECHNIQUE**

#### **3.1.- Principe général**

Ce procédé d'injection est basé sur l'utilisation d'une pompe alternative de fréquence élevée correspondant à un transducteur ultrasonore de puissance dont la sonotrode est confinée



dans une enceinte de compression (figure 21). Elle se dilate et se contracte en créant des surpressions et des dépressions alternatives à la fréquence ultrasonore.



Après perçage de l'enrobage de béton et de la gaine de confinement des câbles de précontrainte, la pompe injecte l'inhibiteur sous basse pression (figure 22).

Elle est couplée à l'action des ultrasons qui favorisent la progression de la solution en agissant à différents niveaux :

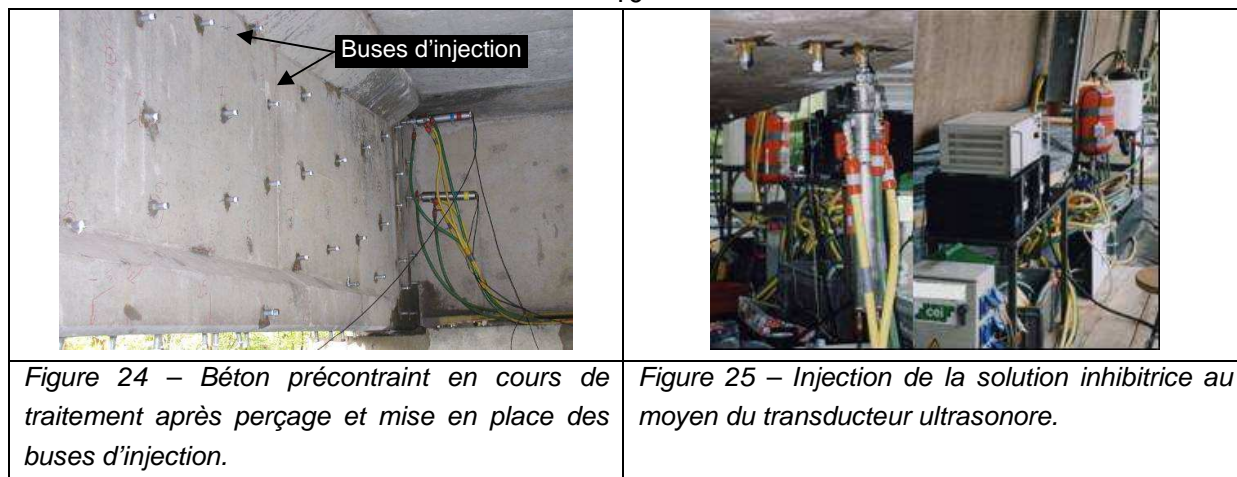
- Tout d'abord, les cycles rapides de surpression et de dépression poussent le liquide inhibiteur dans les pores et dans les microfissures présentes dans le coulis de remplissage ;
- Les ondes acoustiques, transportées par le liquide, agissent également sur les microfissures en les dilatant et en les rétractant à la fréquence ultrasonore. Ce phénomène favorise aussi la progression de la solution inhibitrice ;
- Ces ondes acoustiques provoquent une mise en vibration générale de très faible amplitude qui favorise la progression du liquide entre la gaine et le coulis de remplissage ;
- Enfin, le liquide est en état de cavitation en phase vapeur, ce qui permet de dégager les entrées des interstices et des micro-fissures, favorisant par-là même, la pénétration de la solution.

### 3.2.- Mise en œuvre du procédé

Ce procédé d'injection intervient en phase finale de restauration des structures. Trois principales étapes sont nécessaires à sa mise en œuvre.

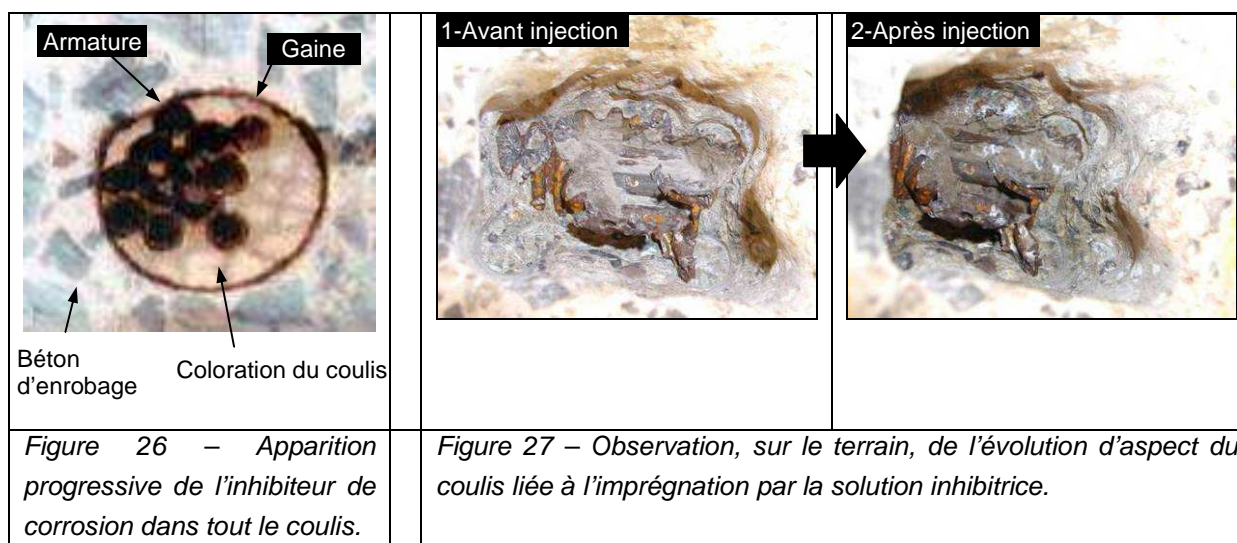
#### 1<sup>ère</sup> étape : Perçage de la gaine de précontrainte et mise en place des buses d'injection

Après localisation précise des câbles de précontrainte, des perçages de l'enrobage de béton sont pratiqués jusqu'au niveau des aciers. Ils sont réalisés à espacements réguliers, de l'ordre de 1 m, le long de la gaine de précontrainte (figure 24). Une buse d'injection est placée au niveau de chacun de ces perçages.



### 2<sup>ème</sup> étape : Injection de l'inhibiteur de corrosion

L'inhibiteur de corrosion est injecté au niveau de chaque buse à l'aide d'une pompe spécifique utilisant les ultrasons (figure 25). La progression de la solution inhibitrice à l'intérieur de la gaine est vérifiée au niveau des perçages réalisés de part et d'autre des buses d'injection en observant l'assombrissement du coulis de ciment correspondant à l'humidification du matériau. Des essais sur des tronçons de poutre, ont permis de vérifier que ce phénomène d'assombrissement correspond à la saturation du coulis de ciment par la solution inhibitrice. (figures 26 et 27).



Un relevé des temps de migration permet d'obtenir une cartographie fournissant des informations sur la qualité de remplissage du coulis. Un temps de migration important correspond à un coulis compact avec peu de défauts. Au contraire, un temps de migration très court permet de détecter une zone peu compacte pouvant présenter de nombreux défauts (figure 28).

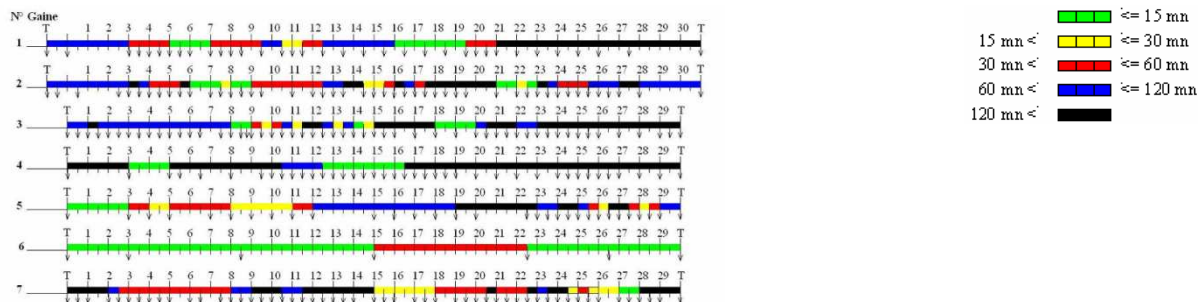


Figure 28 – Exemple de cartographie des temps de migration de la solution inhibitrice

### 3<sup>ème</sup> étape : Comblement des défauts du coulis

Après injection de la solution inhibitrice et à partir de la cartographie précédemment obtenue, les buses sont réutilisées pour l'injection d'un micro-coulis spécifique à base de ciment. A la fin de cette opération, les buses sont retirées et les perçages sont rebouchés.

## 3.3.- Réalisations pratiques

### 3.3.1.- Précédentes réalisations

A ce jour, plusieurs applications du nouveau procédé d'injection ont été réalisées depuis 1994. Des inspections régulières de ces ouvrages n'ont montré, jusqu'à présent, aucune évolution d'aspect pouvant indiquer une reprise de l'activité de corrosion. Par contre, pour certaines de ces structures, des zones restées non traitées ont continué à se détériorer et sont maintenant, pour certaines d'entre elles, devenues irréparables. Les premières applications montrent que le traitement par nitrite de calcium au moyen du nouveau procédé d'injection a pu prolonger la durée de vie de certaines structures sur une période supérieure à 13 ans.

## 4.- CONCLUSION

Le procédé d'injection utilisant des pompes à ultrasons de puissance est une nouvelle technique de traitement des câbles de précontrainte atteints par des processus de corrosion, induits notamment par la présence de chlorures.

Ce nouveau procédé de traitement a déjà fait l'objet de plusieurs publications et communications scientifiques. Des essais de caractérisation en laboratoire ont aussi été menés. Ils ont permis de vérifier l'imprégnation du coulis par la solution inhibitrice lors de l'injection par la pompe ultrasonore et ont montré une réduction significative des processus de corrosion dans le cas de concentrations en chlorures totaux inférieures à 1%. Il est à noter

que les pollutions par des chlorures au cœur des câbles de précontrainte restent le plus souvent très inférieures à ce niveau.

A ce jour, plusieurs ouvrages d'art ont été traités par le nouveau procédé. La plus ancienne application date de 1994.

Ce procédé vise à prolonger significativement la durée de vie des ouvrages en limitant leur remplacement. Il s'inscrit dès lors parfaitement dans le concept de développement durable.