

ÉCOUTE ACOUSTIQUE ET DURABILITÉ DES OUVRAGES EN BÉTON PRÉCONTRAIT

Gilles HOVHANESSIAN, Eric LAURENT

ADVITAM

1. INTRODUCTION

La question de la durabilité des ouvrages est une question qui est de plus en plus présente dans le monde du Génie Civil. Les raisons sont multiples. Un grand nombre d'ouvrages, construits en particulier dans les années 60 à 80, nécessitent de plus en plus d'entretiens et de maintenances qui peuvent être classifiés en quatre catégories :

1. Equipements non structurels
2. Equipements structurels
3. Problèmes structurels ne remettant pas en cause l'intégrité de la structure dans son ensemble
4. Problèmes structurels majeurs remettant en cause l'intégrité de la structure.

Le coût de remplacement d'un ouvrage est aujourd'hui bien souvent supérieur au coût d'un ouvrage neuf. Il est donc important d'un point de vue économique d'éviter d'arriver au remplacement d'un ouvrage.

Dans cette présentation, nous proposons donc de traiter la catégorie n°4 à travers les ouvrages précontraints. Ceux ci présentent en effet plusieurs particularités qui les distinguent des autres ouvrages :

- Les méthodes de construction employées par le passé impliquent une susceptibilité à la corrosion de ces ouvrages. Cette susceptibilité est particulièrement avérée en France sur les VIPP et les câbles de précontrainte extérieure.
- Les modes de détérioration des câbles et des ouvrages précontraints sont complexes mais toujours brutaux et peuvent mener à la ruine de l'ouvrage.
- Les phénomènes qui mènent à la ruine sont très locaux et difficiles à détecter avant que la détérioration ne soit très avancée.

Nous allons donc dans un premier temps détailler la problématique de la durabilité des ouvrages précontraints, puis présenter une étude de cas d'un ouvrage étudié par l'Institute of Structural Engineering du Swiss Federal Institute of Technology de Zurich (EPFZ).

2. LE PROBLÈME DE LA DURABILITÉ DES OUVRAGES PRÉCONTRAINS

Lorsque l'on réalise une analyse de risque, on qualifie en général le risque de voir apparaître un événement redouté par sa criticité qui est définie comme le produit de :

- Sa sévérité : si le risque est avéré, les conséquences sont elles graves ? (coût financier, sécurité des usagers, ...) ;

- Sa probabilité temporelle ou quantitative (l'événement arrive une fois tous les 10 ans ; ou sur un pont sur 100) ;
- Sa détectabilité : y a t'il des indicateurs qui permettent d'être alertés suffisamment tôt pour intervenir et éviter l'événement redouté ?

Dans le cas des ponts précontraints, la criticité du risque particulier de la corrosion des armatures est souvent élevée :

- Sévérité élevée : risque de ruine de l'ouvrage, risque de mort de plusieurs personnes ;
- Probabilité : d'un point de vue quantitatif, peu de problème ont été recensés en France. On estime néanmoins que certaines catégories d'ouvrages sont sensiblement plus à risques ; principalement en raison des méthodes et matériaux de construction employés :
 - VIPP : sur un inventaire d'environ 1200 VIPP, on considère que les 720 ouvrages construits avant 1967 sont particulièrement à risques
 - Une vingtaine ont été démolis pour des raisons de portance
 - Plusieurs se sont effondrés tout seuls à l'étranger, notamment au Royaume Unis, en Belgique ou au Mexique,
 - Ouvrages à précontrainte extérieure : sur une centaine d'ouvrages, au moins 6 ont été l'objet d'un problème de corrosion ayant entraîné la rupture d'un câble.
- Détectabilité : La corrosion est un phénomène qui reste prisonnier à l'intérieur des gaines et qui est totalement invisible avant d'avoir atteint un stade de développement important qui bien souvent correspond à la rupture d'un câble.

2.1 Origines et effets de la corrosion des armatures de précontraintes

On distingue trois types de corrosion :

- Corrosion par dilution qui correspond à la réaction d'oxydo réduction classique entre le Fer, l'Oxygène et l'eau. Cette réaction peut être initiée de différentes manières, mais en général elle intervient lorsque les 3 composants nécessaires sont présents, et que les aciers sont mal passivés ou dépassivés suite à un problème de carbonatation ou de pénétration de chlorures ;
- Corrosion par piqûres, qui est du même type, mais qui est très localisée et a tendance à pénétrer en profondeur du métal plutôt qu'à se diffuser latéralement ;
- Corrosion sous contrainte et réaction avec l'hydrogène. Il s'agit d'une corrosion intermoléculaire qui crée une fissuration de l'acier et le fragilise. Ce type de corrosion est en général lié au choix des matériaux de construction employés.

Dans tous les cas ces phénomènes de corrosion réduisent progressivement la résistance des fils des câbles de précontrainte et finissent par rompre les fils touchés. L'effet de gangrène conduit inéluctablement à la ruine des câbles touchés.

Ces phénomènes sont en fait principalement liés à des défauts de construction. Les deux principaux sont le choix de matériaux inadaptés (aciers sujets à la fissuration sous tension par exemple), ou défauts d'injection du coulis dans les gaines.

Ce second défaut est extrêmement courant. Il se manifeste de deux façons :

- Présence de bulle après les points hauts. Ce phénomène apparaît systématiquement, et même en présence d'évents, lorsque la composition du coulis est mal contrôlée. Ces bulles sont évidemment une source d'oxygène, élément nécessaire à la corrosion.
- Présence d'eau résiduelle. Ce phénomène apparaît lorsque le rapport E/C des coulis employés est trop élevé et que le ciment ne peut pas absorber toute l'eau. Le surplus d'eau s'évacue en partie le long des gaines, mais peut se concentrer au niveau des bulles citées ci dessus. Les

conséquences sont plus graves si les gaines sont étanches car dans ce cas, l'eau reste prisonnière dans la gaine. D'où la problématique particulière des câbles de précontrainte extérieure.

L'eau, si elle n'est pas présente dès la construction peut pénétrer ultérieurement dans les gaines soit par diffusion à travers le béton (phénomène très lent) ; soit par des défauts d'étanchéité, en particulier au niveau des ancrages. Les ouvrages les plus sensibles sont ceux pour lesquels il n'y a pas de chape d'étanchéité ou ceux sur lesquels la chape a été mal entretenue. Un autre facteur aggravant courant concerne les ouvrages pour lesquels les câbles sont relevés et remontent au niveau du tablier. D'une manière générale, tout élément qui peut favoriser la diffusion de l'eau et des chlorures utilisés en abondance aujourd'hui sur nos routes est un signe indicateur d'un risque de corrosion plus probable.

Il est à noter que dans le cas particuliers des VIPP, bon nombre de facteurs énoncés ci dessus sont présents.

2.2 Déteabilité du phénomène

La ruine d'un câble est un événement grave en soit ; en particulier lorsqu'il s'agit d'un câble de précontrainte extérieur qui peut en cassant provoquer des dommages irréremiables. Dans le cas d'un ouvrage à précontrainte intérieure, la ruine d'un câble reste bien souvent invisible extérieurement. Les phénomènes de réancrages par frottement des fils rompus sur le coulis permettent à l'ouvrage de conserver une tenue d'ensemble quasi inchangée. Le premier phénomène visible est en général une fissuration en flexion ou en effort tranchant qui est le signe d'une très forte perte de précontrainte. A ce stade, les efforts sont largement transmis aux aciers passifs qui ne sont évidemment pas dimensionnés pour cela. Une rupture brutale de l'ouvrage est donc possible.

Lors de la première conférence internationale sur la question de la durabilité des ouvrages précontraints qui a eu lieu à Ghent en 2002, M. Peter MATT a présenté un état des lieux des différentes techniques existantes. Cet état des lieux peut être résumé ainsi :

Analyse préliminaire du dossier d'ouvrage

Cette analyse permet à un ingénieur expérimenté d'évaluer la criticité de l'ouvrage, c'est à dire la probabilité qu'il y ait un problème de corrosion et son comportement probable s'il perdait une fraction importante de sa précontrainte.

Détection des vides dans les gaines

Il existe diverses méthodes (Rayons X, Impact echo) qui permettent de détecter des vides dans les gaines. Toutes ont des limitations, aucune ne permet de savoir si une corrosion se développe effectivement dans les vides repérés.

Mesure par ultrasons

Ne fonctionne que dans certains cas et à quelques mètres des ancrages. Cette méthode fonctionne en fait pour des câbles rectilignes et accessibles. En particulier les suspentes de ponts suspendus.

Rélectométrie

La conclusion de M. Matt est la suivante : « Les signaux réfléchis ne contiennent aucune information sur l'état des câbles. Ils ne sont que des artefacts liés à la méthode de mesure ».

Mesures de déplacement

Mesure utile pour comprendre le fonctionnement d'un ouvrage, mais inadaptée à la détection des ruptures dans les câbles ; phénomène qui crée des déformations très localisées et très faibles en regard des déformations courantes d'un ouvrage.

Mesures de contraintes dans le béton, mesures de force dans les câbles

Mesure utile pour comprendre le fonctionnement d'un ouvrage, mais inadaptée à la détection des ruptures dans les câbles. Les mesures ne montrent une variation que si elles sont faites à l'endroit où les fils sont rompus.

Ecoute acoustique

L'écoute acoustique détecte, identifie et localise les sons émis par la libération d'énergie consécutive à une rupture. Les commentaires de M. Matt étaient en substance que l'écoute acoustique est un moyen pouvant être appliqué à la détection des ruptures de fils dans les câbles de précontrainte ; mais que si la méthode était relativement convaincante sur les ouvrages type ponts suspendus, elle demandait à être testée et validée en situation réelle sur des ouvrages précontraints.

Cette conclusion fut le point de départ aux tests réalisés en Suisse sur un ouvrage nommé Ponte Moesa.

3. PONTE MOESA - CANTON DES GRISONS



Figure 1 - Vue du pont

Cet ouvrage enjambe la rivière Moesa à Roveredo dans le canton des Grisons. Construit en 1952, il fut l'un des premiers ouvrages précontraints en Suisse. C'est un ouvrage à dalle précontrainte de relativement petite taille constitué de deux travées de 30m. L'ouvrage est précontraint longitudinalement par précontrainte Freyssinet 12 fils $\varnothing 7$ mm. Il est composé de 84 câbles. La précontrainte est injectée au coulis, cependant de nombreuses zones de vide ont été identifiées par des sondages préalables à l'instrumentation. L'ouvrage avait été classé comme nécessitant une haute surveillance. Afin d'éviter la prolifération de la corrosion de la précontrainte, une chape d'étanchéité a été mise en œuvre sur le pont.



Figure 2 - Etat de la précontrainte avant installation de la surveillance acoustique

Compte tenu de sa pathologie, c'est cet ouvrage qui a été choisi pour tester la technique de surveillance acoustique Soundprint.

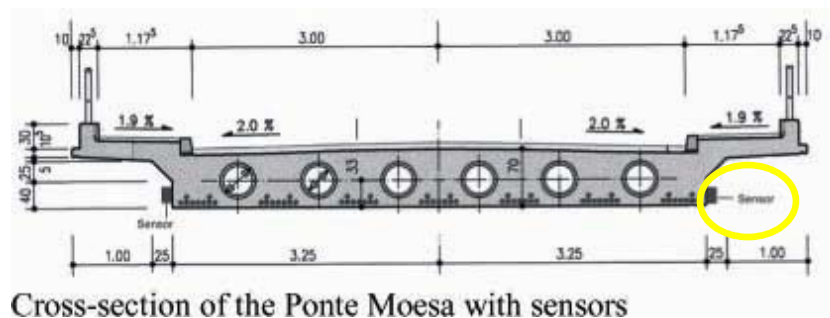


Figure 3 - Coupe type – positionnement des capteurs sur les flancs du pont

Le système de surveillance acoustique a été installé en 2004 et mis en route à la fin Avril. Il est constitué de 16 capteurs acoustiques positionnés sur le côté de la dalle et sur deux lignes comme indiqué sur les figures 3 et 4.

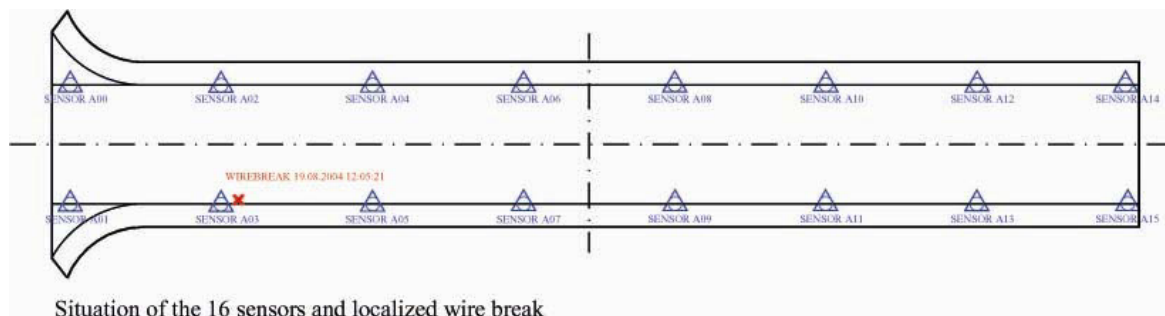


Figure 4 - Emplacement des capteurs

Chaque capteur (figure 5) est relié à une centrale d'acquisition (figure 6).



Figure 6 - Centrale d'acquisition



Figure 5
Capteur surmoulé



Figure 5 - Boîte de jonction

L'objectif de cette installation pilote voulue par l'EPFZ était de valider la technologie Soundprint, de façon à :

- Vérifier sa capacité à détecter effectivement les ruptures des fils ;
- Vérifier sa capacité à ne pas donner de fausses alertes, c'est à dire à confondre le bruit ambiant avec des ruptures de fils.

L'ensemble des tests a donc été réalisé en conservant le trafic sur l'ouvrage. L'aptitude du système à la détection des ruptures de fil a été dans cet essai réalisé directement sur la précontrainte du pont. Des ruptures de fils ont été provoquées par l'ETH à l'aide d'une pile à corrosion permettant de créer et d'accélérer la corrosion des fils. Le principe était le suivant :

- Les fils sur lesquels la corrosion devait être créée étaient isolés des autres fils de façon à ce que le phénomène ne se propage pas, ce qui serait préjudiciable à l'ouvrage.
- Une solution saline a été appliquée sur les fils, et un courant forcé a été appliqué par l'intermédiaire d'une batterie de 12 V de façon à accélérer le phénomène.

Le système permettait de corroder des fils pour atteindre la rupture en environ 20 à 30 heures. Le test s'est réalisé en aveugle, seul l'EPFZ connaissait le moment où la pile de corrosion était mise en service.

La photo suivante montre le dispositif fixé en intrados de la dalle.



Corrosion-cell and sensor A03

Figure 6 - Boîtes de corrosion

L'EPFZ connaissait ainsi la date approximative de la rupture, et l'enregistrement des signaux était consultable directement sur internet. La transparence de la méthode était donc totale. Le diagnostic était rendu comme à l'accoutumée sur ce genre de sites, quelques jours après l'évènement, de façon à analyser dans le détail les caractéristiques des signaux.

La surveillance a été effective à partir de Mai 2004. Au cours de cette période, 7 ruptures de fils ont été détectées, 2 provoquées et 5 spontanées.

Le graphique suivant montre le nombre de ruptures en fonction de la période allant jusqu'à Mars 2005.

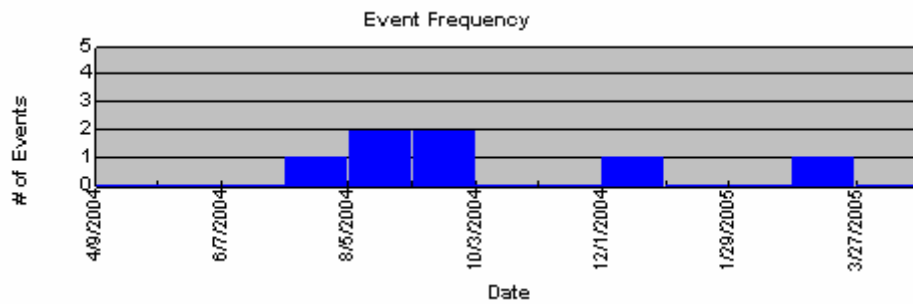


Figure 7 - Nombre et dates des ruptures de fils

Les 2 ruptures provoquées en aveugle ont été correctement diagnostiquées, et localisées. 5 autres ruptures se sont produites spontanément sur le pont. La première rupture spontanée s'est produite avant l'installation des piles à corrosion, et se localisait à proximité de la pile, en partie supérieure du tablier. Les signaux recueillis étaient inhabituels pour une rupture de fil, et les capteurs les plus éloignés avaient des signaux plus puissants que les capteurs à proximité. L'analyse a permis de conclure sur une rupture de fil, mais qui avait des caractéristiques incompatibles avec une bonne injection de la gaine. En effet, en cas de présence de vides dans la zone de rupture, les capteurs proches de l'évènement ne reçoivent qu'un signal très atténué et impropre à l'analyse. Ce sont les capteurs éloignés qui ont permis de conclure.

Cet évènement inhabituel a interpellé l'EPFZ, qui a tout de suite décidé d'entreprendre une ouverture de fenêtre à l'emplacement indiqué par la localisation fournie par Soundprint. L'ouverture de fenêtre a permis de mettre en évidence une zone où la précontrainte étaient particulièrement endommagée, et dans laquelle la plupart des gaines de précontrainte étaient vides de coulis. Par ailleurs plusieurs fils rompus ont pu être observés. Il ne s'agissait pas de ruptures récentes, et par conséquent, pas de la rupture qui venait d'être détectée.



Figure 8 - Fils rompus



Figure 9 - Etat de la précontrainte après ouverture d'une fenêtre d'investigation suite à une rupture spontanée. Les câbles sont vides de coulis

L'interprétation de ce sondage est que dans le cas où des vides d'injection sont présents dans les gaines, la localisation exacte de la rupture est plus imprécise le long du câble que celle habituellement attendue pour des câbles complètement injectés. Par ailleurs une analyse simple des signaux à proximité de la rupture aurait inévitablement conduit à considérer cet événement comme n'étant pas apparenté à une quelconque rupture de fil, et donc à classer l'évènement à tort.

Ponte Moesa

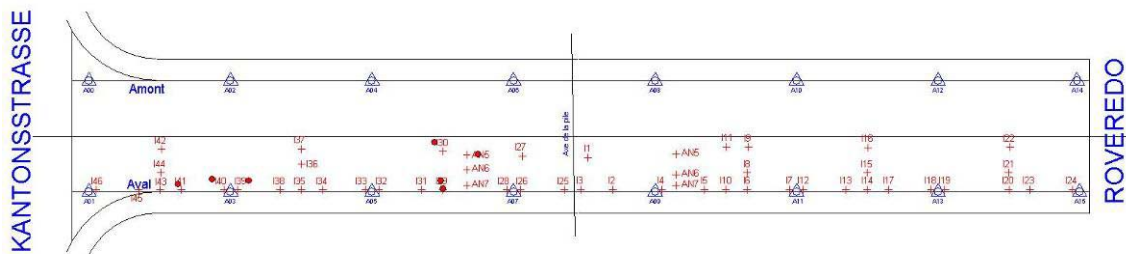


Figure 10 - Emplacement des ruptures de fils

Les autres ruptures spontanées qui se sont produites sur l'ouvrage n'ont pas fait l'objet de sondages. Néanmoins, deux d'entre elles se sont produites peu de temps après la deuxième rupture provoquée, et

dans l'axe du câble concerné. Un fort doute est donc apparu sur la possibilité d'une détérioration en chaîne de la précontrainte, à cause de cette rupture. Les ruptures provoquées ont donc été stoppées.

Pendant cette même période, de nombreux événements ont déclenché des acquisitions, en particulier pendant une période de travaux. Ces événements, au nombre de 5285 pour être précis ont été classifiés comme suit :

Classification des 5285 événements détectés entre Septembre 2004 et Mars 2005

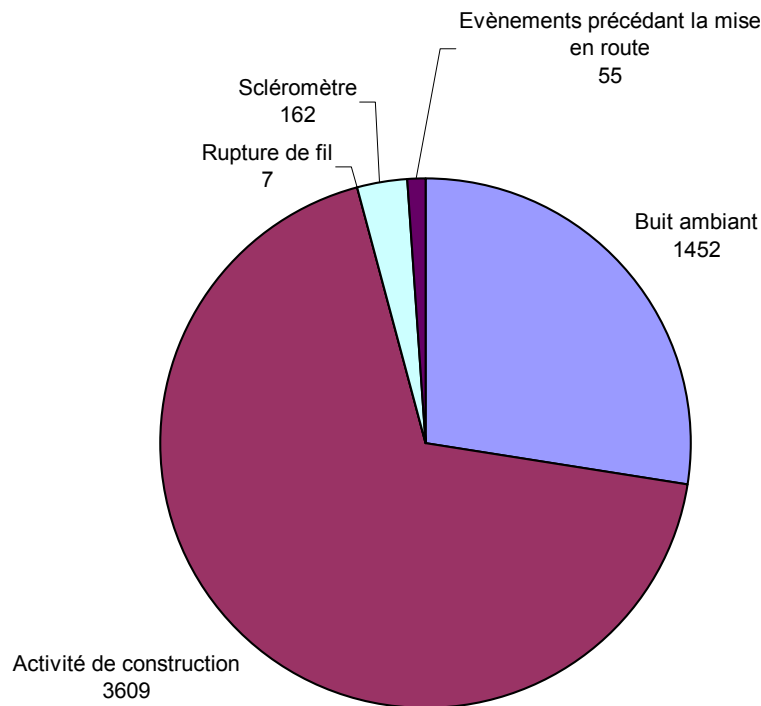
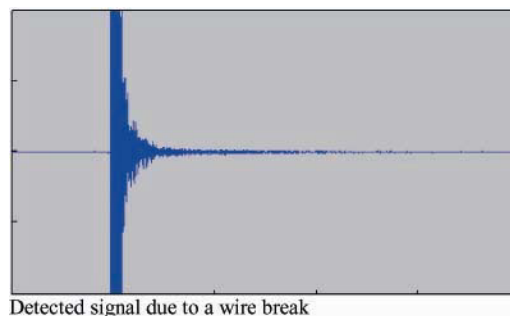


Figure 11 - Classification des événements acoustiques

Les 162 impacts de scléromètres ont été utilisés pour étalonner l'installation lors de la mise en route. Le système de traitement du signal a permis de distinguer les ruptures de fils du bruit ambiant et des bruits de construction.

Les trois graphiques ci après montrent trois signaux correspondant à trois types d'événements.



Detected signal due to a wire break

Figure 12 - Signal correspondant à une rupture de fil

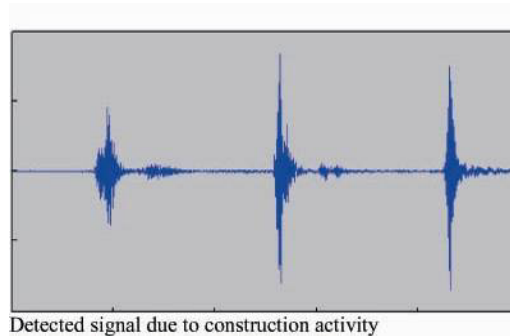


Figure 13 – Signal correspondant à des travaux

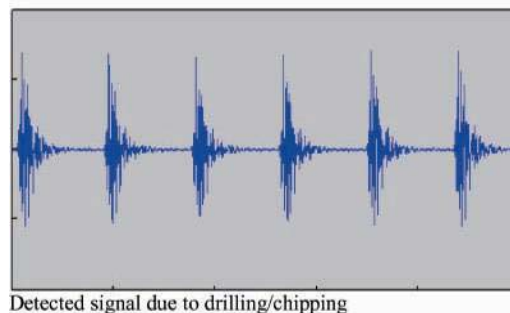


Figure 14 - Bruit de perforation

La discrimination des signaux se fait par l'intermédiaire de plusieurs niveaux de filtrages, allant du filtrage matériel, à la mise en place de filtres spécifiques et intelligents basés sur les caractéristiques intrinsèques des signaux. Notre expérience a montré cependant que ces derniers ne sont pas suffisants pour permettre une classification fiable, et qu'il n'est pas possible d'automatiser complètement le processus d'analyse. Les caractéristiques de chaque ouvrage doivent effectivement être prises en compte, ainsi que les bruits environnants qui peuvent avoir parfois des caractéristiques intrinsèques très proches de ceux recherchés.

4. CONCLUSION

L'expérience acquise lors de cette étude est intéressante à double niveau.

- Au niveau de l'ouvrage de Ponte Moesa tout d'abord. L'étude a certes montré un phénomène de détérioration par corrosion sur l'ouvrage. Mais elle a montré que ce phénomène restait très lent et très localisé. A ce jour, le maître d'ouvrage a prévu des investigations complémentaires localisées aux emplacements atteints et a décidé de prolonger la surveillance.
- A un niveau plus général, le retour d'expérience sur le comportement des ouvrages précontraints est intéressant. Cette étude a confirmé la sensibilité de ces ouvrages à la corrosion. Elle a montré également qu'une réfection de la chape d'étanchéité est insuffisante pour stopper le phénomène. Et elle a montré finalement que l'écoute acoustique est applicable aux ouvrages à précontrainte intérieure ; même sur des ouvrages à dalles minces comme c'est le cas sur Ponte Moesa, et même si la qualité des injections est hétérogène. Pour finir, elle montre que l'écoute acoustique, en communiquant des informations précises sur l'état de la structure permet de définir avec pertinence les actions d'investigation ou de renforcement complémentaires qui sont à réaliser.

A ce jour, plus de 60 ouvrages précontraints sont placés sous surveillance à travers le monde ; dont une vingtaine de ponts. Les vitesses de détérioration observées vont de 0 à quelques dix fils rompus par mois. Dans quasiment tous les cas, on constate le même phénomène que sur Ponte Moesa, à savoir que ces ruptures de fils sont localisées en un petit nombre d'emplacement et restent très localisées.

BIBLIOGRAPHIE

- Ponts en béton précontraints par post-tension – Highways Agency, Transport Research Laboratory, Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées – Thomas Telford - 1999
- Workshop Durability of post-tensioned tendons - Ghent – FIB - 2001 –
- Durable Cable Stays; A Design Challenge - Karl H. Frank, John E. Breen - The University of Texas at Austin – High Performance Stay Cable System, Hong Kong 2004
- Guide méthodologique pour la surveillance et l'auscultation des VIPP – SETRA LCPC - Octobre 2001
- D.W. Cullington & al: "continuous acoustic monitoring of grouted post tensioned concrete bridges" – NDT & E International, Elsevier Science Ltd, V34 n°2, March 2001.