

Évaluation de différentes méthodes d'auscultation non destructives avant autopsie d'un élément de poutre du Pont Neuf de Foix

Christophe AUBAGNAC

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de
Toulouse

Xavier DÉROBERT

Odile ABRAHAM

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

RÉSUMÉ

Après la démolition complète du Pont Neuf de Foix en 1999, un élément de poutre précontrainte, provenant d'une zone comportant des armatures de précontrainte probablement rompues, a été conservé pour évaluer des méthodes d'auscultation non destructives (ND). Les résultats obtenus sur cette poutre test par quatre techniques différentes (Techniques radar, magnétomètre, gammagraphie et Impact-Écho) sont présentés. Les résultats sont commentés après autopsie de la poutre.

La manière dont les auscultations par techniques ND peuvent répondre aux préoccupations des ingénieurs en ouvrages d'art, en utilisant des techniques ND complémentaires, est discutée. L'intérêt d'employer une deuxième technique complémentaire doit être justifié par un meilleur niveau d'interprétation, qui permet d'éliminer certaines ambiguïtés, d'améliorer la fiabilité des mesures ou de localiser les zones douteuses pour effectuer ultérieurement des mesures locales plus précises. Toutefois, un certain nombre de points importants restent non résolus par ces techniques.

DOMAINE : Sciences de l'ingénieur.

ABSTRACT

EVALUATION OF VARIOUS NON-DESTRUCTIVE MONITORING METHODS PRIOR TO THE POST-FAILURE ANALYSIS OF A BEAM ELEMENT ON THE PONT NEUF BRIDGE IN FOIX, FRANCE

Following the complete demolition of the Pont Neuf bridge in Foix (south-central France) in 1999, a prestressed beam element stemming from a zone containing prestressed reinforcements, which had most likely been ruptured, was conserved for the purpose of evaluating non-destructive (ND) monitoring methods. The results obtained on this test element using four distinct techniques (radar, magnetometer, gammagraphy and Impact-Echo) are all presented herein and then commented subsequent to the post-failure beam analysis.

This paper discusses to what extent ND-based monitoring efforts are capable of addressing the concerns of structural engineers through use of complementary ND techniques. The benefit of applying a second and complementary technique must be justified by developing a clearer interpretation, which enables removing a certain number of ambiguities, improving the reliability of measurement campaigns or locating suspicious zones where additional more accurate measurements need to be performed. This combination of techniques however is still not fully able to resolve all key aspects.

FIELD: Engineering sciences.

Contexte

Sur le Pont Neuf de Foix sur l'Ariège, plusieurs inspections détaillées (Aubagnac, 2002), incluant des contrôles gammagraphiques, la réalisation de fenêtres et l'ouverture de gaines, avaient abouti au constat que le problème principal de cet ouvrage était le mauvais remplissage des gaines de précontrainte et la corrosion des torons, en raison d'infiltrations d'eau pouvant être chargée en agents agressifs. Ce diagnostic avait entraîné la mise sous haute surveillance de l'ouvrage en 1995 avec implantation d'un dispositif de surveillance acoustique par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC).

En 1998, l'ouvrage a été fermé définitivement suite à l'alerte de niveau 2 (rupture probable d'un toron) enregistrée par le dispositif de surveillance acoustique dans une zone fragile d'une poutre (Robert *et al.*, 2000).

Suite à la décision de fermeture et de démolition de ce pont, le Laboratoire régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Toulouse a récupéré un morceau de poutre de cet ouvrage de type viaduc à travées indépendantes à poutres précontraintes (VIPP), en vue de réaliser l'autopsie de la précon-

trainte et de valider sur un ouvrage en béton précontraint la méthode de surveillance acoustique, qui avait été utilisée pendant la période de mise sous haute surveillance de l'ouvrage (1995 à 1998).

Dans le cadre de la démolition de l'ouvrage, il a été décidé d'autopsier un des éléments de poutre qui présentait le plus d'indices de rupture afin de valider la méthode de surveillance acoustique. En préalable à la démolition de la poutre, qui a eu lieu en décembre 2000, le réseau des laboratoires des Ponts et Chaussées (LPC) a conçu un programme d'expérimentation de méthodes d'évaluation non destructive (END) sur ce corps d'épreuve.

État de l'art des méthodes d'évaluation non destructives

Le développement des méthodes non destructives de contrôle et de reconnaissance de l'état des matériaux et des ouvrages est devenu un enjeu majeur à mettre à la disposition des experts en ouvrages d'art.

Diverses études ont été réalisées pour tester les méthodes d'END applicables aux ouvrages d'art. Celles-ci ont été réalisées soit à la demande d'un organisme gouvernemental ou d'un gestionnaire de patrimoine, soit dans le cadre de recherches plus académiques.

Les premiers demandeurs cherchent principalement à connaître les performances et les limites de ces méthodes dans le cadre de leur utilisation classique. Les informations recueillies sont synthétisées dans des tableaux. La plupart des techniques soniques, électromagnétiques et électriques ont ainsi été étudiées, en apportant notamment des précisions sur des notions importantes pour l'exploitation, telles que le coût, la rapidité d'acquisition, l'accessibilité et la précision. La communication de Kennedy Reid et *al.* (2001), pour le compte de Highways Agency du Royaume Uni, ainsi qu'un document de l'Agence de l'Énergie Nucléaire (OECD NEA, 1998) en sont deux bons exemples.

Ce type de présentation a pour intérêt de simplifier le potentiel de ces techniques dans un but pédagogique. Il peut cependant présenter le risque d'être beaucoup trop simpliste et d'induire de ce fait des avis excessifs néfastes aux techniques d'END comme aux ouvrages d'art (Federal Highway Administration, 2001). C'est pourquoi il est fortement conseillé de se documenter dans des ouvrages spécialisés (Malhotra et Carino, 1991; Bungey et Millard, 1996).

Dans le même esprit, l'Association française du génie civil (AFGC) et la Confédération française pour les essais non destructifs (COFREND) se sont associées dans un groupe de travail afin de proposer un ouvrage plus complet, dédié aux maîtres d'œuvre et aux experts en ouvrages d'art. Cet ouvrage, intitulé « Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton armé », devrait être disponible en 2003.

En parallèle, des équipes de recherche universitaires tentent d'améliorer :

- ces techniques classiques en étudiant des techniques plus sophistiquées, comme par exemple des techniques d'imagerie ;
- la connaissance des relations entre les phénomènes physiques mesurés et les caractéristiques du milieu ausculté (Pla-Rucki et Eberhard, 1995; Büyükoztürk, 1998).

Le but ultime de cette approche est d'avoir une meilleure connaissance des caractéristiques réelles des matériaux, par l'identification de leur composition, l'évaluation de leur état ou la surveillance de leur évolution dans le temps (Robert, 1998).

Néanmoins, que ce soit pour des problèmes de corrosion des armatures, de qualité des bétons ou de contrôle d'injection de gaines de précontrainte, la plupart des études publiées, comme celles citées plus haut, ne font qu'un état de l'art, incluant performances et limites, de méthodes d'END (Sekulić et *al.*, 2001; Scott et *al.*, 2001). Il est malheureusement trop peu fréquent de rencontrer des publications cherchant à dépasser ce stade pour tenter de répondre aux experts en ouvrages d'art, ou tout au moins tenter de parler leur langage (McCann et Forde, 2001).

Présentation de la poutre et des besoins de l'expert en ouvrages d'art

L'élément de poutre, recueilli pour réaliser une autopsie (fig. 1), a pour dimensions 2,10 m de hauteur et environ 9,50 m de long. L'épaisseur de l'âme est de 20 cm. Le ferrailage est peu dense, com-



Fig. 1 - Poutre test avant autopsie.

posé d'aciers longitudinaux, d'armatures verticales et de câbles de précontrainte (quatre câbles ancrés à l'about et sept câbles relevés).

Avant l'autopsie en décembre 2000, une série de campagnes de mesures non destructives (ND) a été organisée dans le but d'évaluer les performances des méthodes d'END au regard des besoins de l'expert en ouvrages d'art.

Dans un tel contexte (béton armé et/ou précontraint), ses besoins consistent généralement en :

- une localisation des câbles de précontrainte (tracé, épaisseur de béton de recouvrement) et des armatures passives (position, mais aussi épaisseur d'enrobage et diamètre) ;
- une appréciation de la qualité de la précontrainte : état de l'injection, état de corrosion des armatures, existence de ruptures ;
- éventuellement, une évaluation de la qualité du béton (pathologies physiques : présence de lacunes de bétonnage, d'hétérogénéités, de fissures, et pathologies chimiques : carbonatation, présence de chlorures et alcali-réaction).

Ainsi, quatre campagnes d'END ont été réalisées pendant l'année 2000.

Présentation des méthodes d'END testées

Ferroskan® (méthode électromagnétique)

Le matériel Ferroskan® fait partie de la famille des systèmes électromagnétiques à basses fréquences destinés à la détection d'armatures. Il reconstruit des images numériques de soixante centimètres de côté avec un positionnement précis de plus ou moins cinq millimètres (en plan) des gaines et des armatures passives, dans les neuf à dix premiers centimètres de béton. Il donne des mesures précises d'enrobage à plus ou moins cinq pour cent pour des configurations simples d'armatures peu profondes, hors des zones de recouvrements ou d'intersections.

L'utilisation de ce matériel est cependant limitée par une faible profondeur d'investigation, avec une détermination peu précise, voire impossible, de l'enrobage dans les zones fortement ferrillées (recouvrements, intersections d'armatures). Enfin, dans les conditions particulières propres à ce type d'auscultation, on peut estimer que la détermination du diamètre des armatures, à moins de

60 mm de profondeur, est obtenue à plus ou moins deux gammes de diamètres près (sur les bases d'une étude interne au réseau des LPC menée par le LROP).

Les exemples de la figure 2 montrent le potentiel et les limites de cette technique d'auscultation. On obtient, directement sur le terrain, la position des armatures passives verticales ainsi que celle de la gaine inclinée à 30°, dans la zone 60 × 60 cm auscultée, avec la possibilité d'enregistrer numériquement ces données.

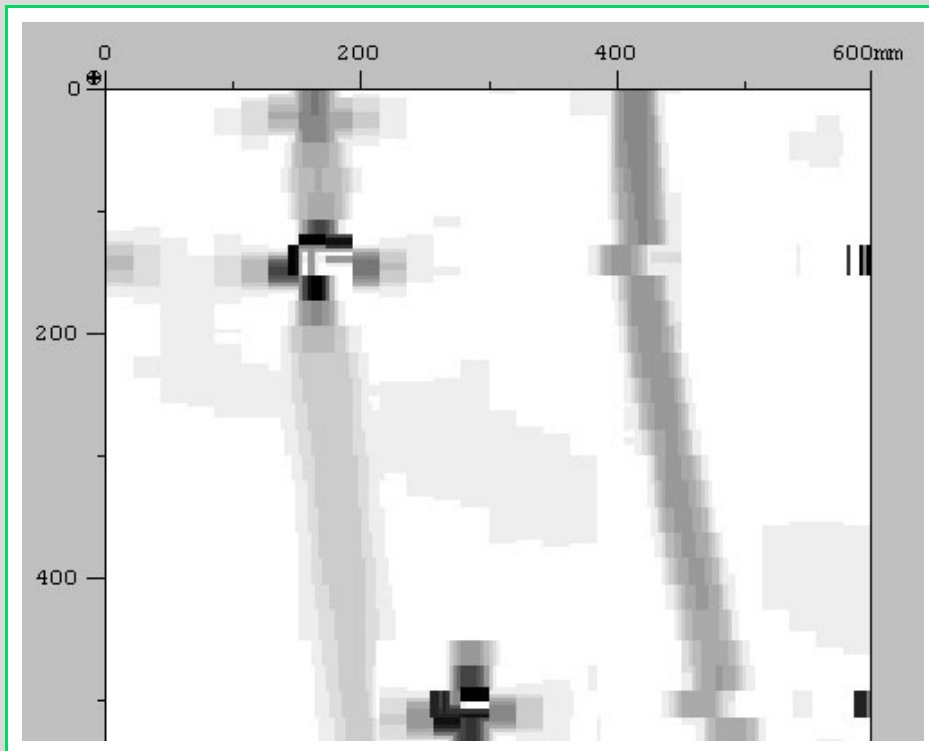
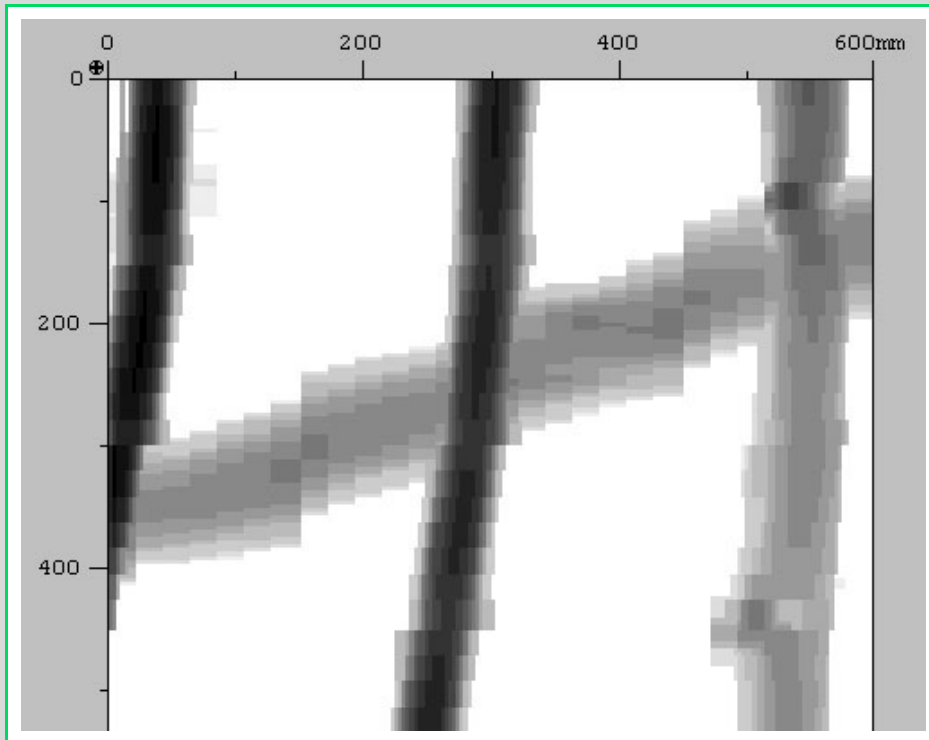


Fig. 2 - Cartographies issues du Ferroskan® et réalisées au même endroit des deux faces opposées de la poutre test.

Néanmoins, il faut rester prudent sur l'interprétation de ces cartes. En effet, bien que les gaines normalement centrées se situent à une profondeur correspondant à une couverture de huit centimètres environ, dans un cas le système n'a pas détecté la présence de gaine sur le terrain. En effet, l'échelle de fausses couleurs, proposée en niveaux de gris, rend malheureusement les cartographies difficilement lisibles sur le terrain, selon la luminosité, et peut conduire à une non-détection de la gaine; la figure 2b en est un bon exemple. C'est pourquoi il est dangereux de se contenter des images sur le terrain sans attendre leur traitement et leur interprétation en laboratoire avec le logiciel associé.

Technique radar

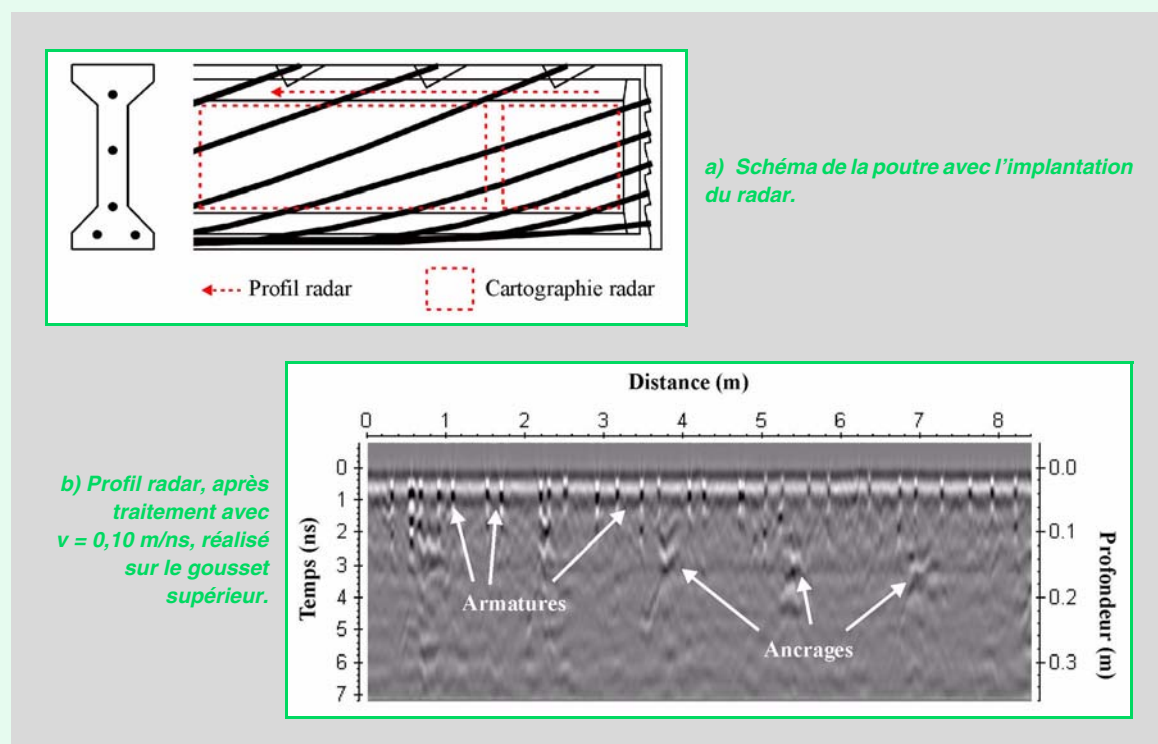
La technique d'auscultation radar permet la détection des armatures et des gaines de précontrainte sur des épaisseurs beaucoup plus importantes. Le principe repose sur l'émission d'impulsions électromagnétiques à très hautes fréquences, transmises à la structure auscultée par l'intermédiaire d'une antenne émettrice de fréquence centrale 1,5 GHz.

Son principal avantage réside dans la possibilité d'auscultation de structures sur de grands linéaires, depuis une seule face, et de localisation de différentes nappes d'armatures sur des profondeurs pouvant dépasser trente centimètres. On peut ainsi ausculter des pièces d'épaisseurs ou de formes particulières (telles que goussets ou talons de poutre) au prix, il est vrai, d'une interprétation complexe (fig. 3).

En revanche, l'utilisation d'ondes électromagnétiques à ces fréquences ne permet pas de remonter aux diamètres des armatures (Rhim et Büyüköztürk, 2000), et surtout il est physiquement impossible d'ausculter l'intérieur des gaines de précontrainte métalliques. Enfin, le principe d'acquisition de profils radars, correspondant à des « coupe-temps » (déplacement de l'antenne en abscisse et temps d'écoute en ordonnée), peut entraîner des difficultés pour détecter des géométries particulières d'armatures comme certains ancrages ou recouvrements.

Bien que l'exploitation ultérieure des résultats par un spécialiste soit assez lourde, il est possible de traiter puis de visualiser les données sous forme de cartographies pour des tranches données de matériaux (Dérobert et Coffec, 2001). On peut ainsi présenter des images ciblées sur les armatures passives supérieures ou focaliser l'information sur le positionnement des gaines de précontrainte (fig. 4).

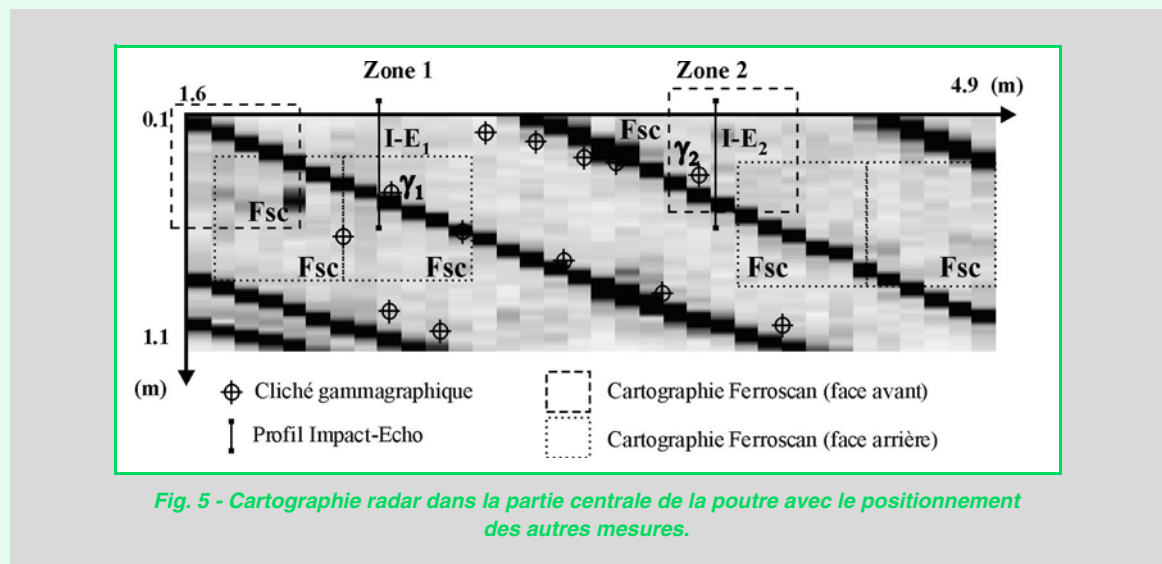
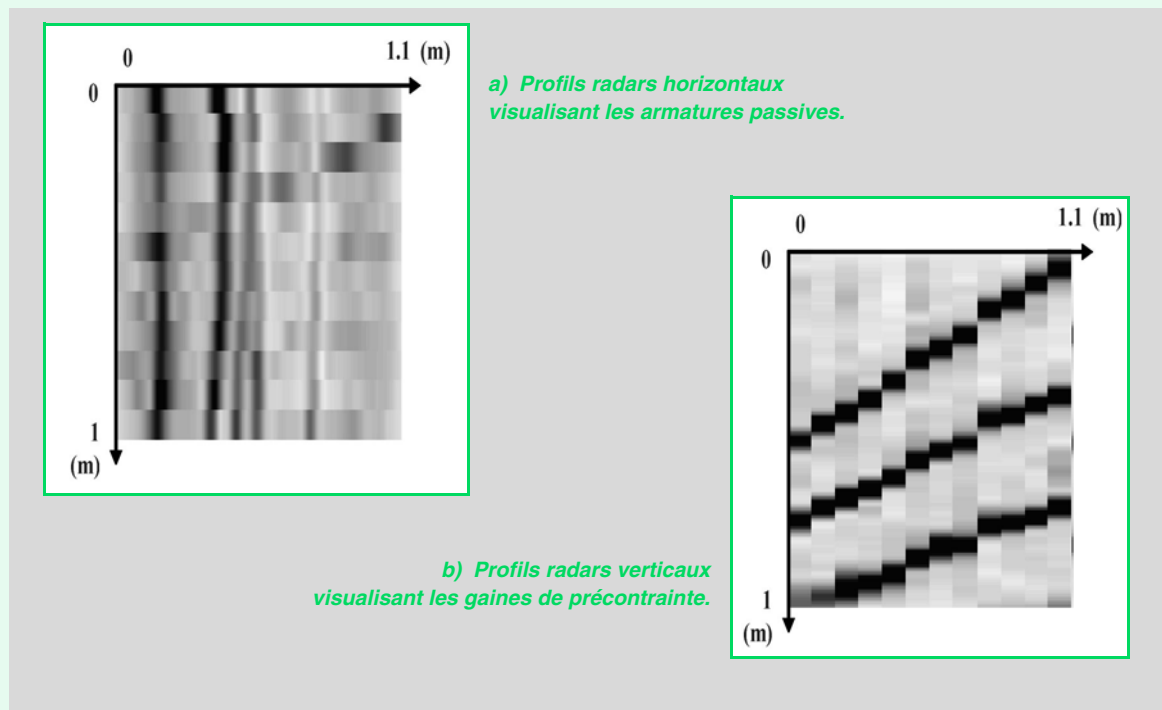
Fig. 3 - Exemple de profil radar.



Suivant le sens des profils radars, le champ électrique émis est orienté selon une direction privilégiée (perpendiculaire au profil) et l'antenne de réception ne peut détecter que les aciers parallèles à cette orientation. C'est pourquoi la cartographie présentée sur la figure 4a révèle la position des armatures passives verticales. On détecte toutefois la gaine supérieure, dans la partie droite, parce qu'elle présente un pendage suffisant pour réfléchir de l'énergie électromagnétique vers l'antenne réceptrice. Sur la cartographie présentée sur la figure 4b, les profils verticaux repositionnent parfaitement les gaines de précontrainte sans perturbation par la nappe d'armatures en surface.

Une troisième cartographie radar a été réalisée dans la partie centrale de la poutre test, dans une zone où ont été réalisés divers clichés gammagraphiques ainsi que des mesures par la technique de l'Impact-Écho (fig. 5). Deux zones ont été retenues tout particulièrement pour certaines mesures, d'anciens clichés radiographiques (clichés γ_1 et γ_2), réalisés pendant la période de haute surveillance de l'ouvrage, ayant révélé une injection correcte de la gaine principale de la zone 2 et une absence complète d'injection dans la gaine principale de la zone 1.

Fig. 4 - Cartographies radars.



Gammagraphie

Dans la vie de l'ouvrage, celui-ci a fait l'objet de plusieurs campagnes de gammagraphie par le réseau des LPC (LRPC de Blois en 1993 et 1997, LRPC de Lyon en 1998) ainsi que lors des essais comparés à l'aide du système DPS film numérique.

Les principaux avantages de la technique radiographique classique reposent sur le positionnement précis de la gaine, des câbles et des armatures passives. Employée depuis plusieurs décennies, elle propose un diagnostic fiable de la qualité de l'injection du produit de protection du câble, avec détection des vides, l'interprétation étant confiée à un spécialiste. On peut, dans certains cas, détecter des défauts tels que des courbures anormales, des ruptures de fils ou de torons, ou des distensions de fils.

En revanche, cette technique opère en transmission, avec nécessité d'un accès aux deux faces opposées, qui doivent être écartées de moins de soixante centimètres (âme d'une poutre de VIPP par exemple). Les examens sont localisés (radiogrammes de 0,30 m × 0,40 m) et nécessitent un temps d'exposition important lié à l'épaisseur de la structure auscultée.

La gammagraphie présente quelques défauts notables en imposant des contraintes très strictes de radioprotection, tant pour les opérateurs que pour l'environnement. Enfin, elle est d'un coût important pour un linéaire de câble ausculté relativement limité.

Avant la campagne d'END, le LRPC de Toulouse a procédé au traçage des câbles sur les deux faces de l'âme de la poutre, au moyen du Ferroskan®, de façon à optimiser les mesures.

Lors de cette campagne, le LRPC de Lyon a testé un système de radiographie numérique baptisé DPS, qui procure de meilleures conditions de radioprotection en permettant d'utiliser, à qualité d'image identique, une source de plus faible radioactivité ou bien de réduire le temps d'exposition. En effet, la sensibilité des images numérisées à l'aide d'un scanner permet d'avoir à sa disposition les résultats en temps quasi réel, avec la possibilité de les traiter et de les archiver.

En revanche, le format numérique proposé n'est pas standard, et seule une conversion de moins bonne qualité était disponible pour ces essais. Enfin, le prix de location du système reste assez élevé à ce jour.

Les exemples présentés sur la figure 6 montrent une absence totale de coulis dans la gaine centrale de la zone 1 (fig. 6a) et un remplissage correct dans la gaine centrale de la zone 2 (fig. 6b). Ce sont les deux zones qui ont servi de test pour l'évaluation de la technique d'Impact-Écho décrite ci-après.

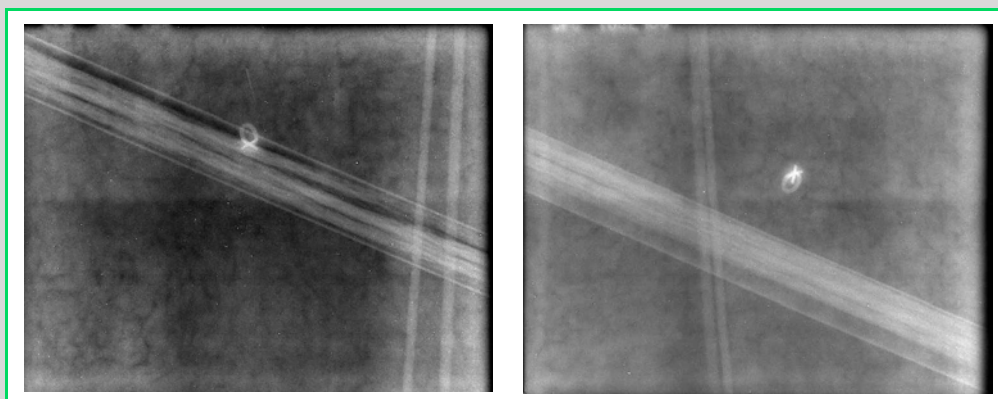


Fig. 6 - Clichés gammagraphiques de la zone 1 (a) et de la zone 2 (b) (source LRPC de Lyon).

Technique d'Impact-Écho

Cette méthode d'auscultation du béton par technique sonore permet la mesure d'épaisseurs, la détection des vides pourvus d'un toit quasi plan parallèle à la surface (délamination) ou, de façon générale, la recherche d'interfaces entre des matériaux d'impédances mécaniques différentes. Elle est aussi censée permettre la détection de vides dans des gaines de précontrainte. Elle est fondée sur une analyse

fréquentielle de la réponse, dans le domaine temporel, d'une structure soumise à un simple choc mécanique. Bien que le matériel soit commercialisé entre autres pour l'évaluation de la qualité de l'injection des gaines de précontrainte, cette méthode est encore à l'étude, au sein du réseau technique, pour mieux définir ses performances et ses limites dans le cas de cette application particulière.

Le principe classique repose sur le fait que l'impulsion sismique se réfléchissant sur une gaine vide entraîne, par analyse fréquentielle, une résonance, centrée sur des hautes fréquences, différente de celle correspondant aux réflexions sur une gaine pleine. De plus, si la gaine est vide, la fréquence caractéristique de l'épaisseur totale de la dalle diminuera alors qu'au droit d'une gaine pleine elle restera pratiquement inchangée. C'est ce deuxième point qui est illustré plus bas.

Les avantages de cette technique résident dans sa simplicité de mise en œuvre depuis une seule face avec du matériel léger et relativement peu onéreux. Elle peut ainsi se présenter comme une alternative intéressante à la gammagraphie dans des cas sensibles où les problèmes de radioprotection ou d'accessibilité empêchent l'utilisation de cette dernière.

En revanche, cette technique est très ponctuelle avec une méthodologie, à confirmer, qui devrait proposer des enregistrements linéaires et, de préférence, perpendiculaires à la gaine auscultée. De plus, il reste à développer un logiciel de traitement des données adapté au chantier pour visualiser et exploiter les mesures sur le terrain.

Les résultats des essais réalisés sur la poutre du pont de Foix dans les zones 1 et 2 sont présentés sur la figure 7. Leur implantation est visible sur la cartographie radar de la figure 5. Les profils Impact-Écho traversent des zones déjà auscultées par techniques radiographique et Ferrosan® de façon à pouvoir porter un jugement sur l'intérêt respectif de chacune des techniques.

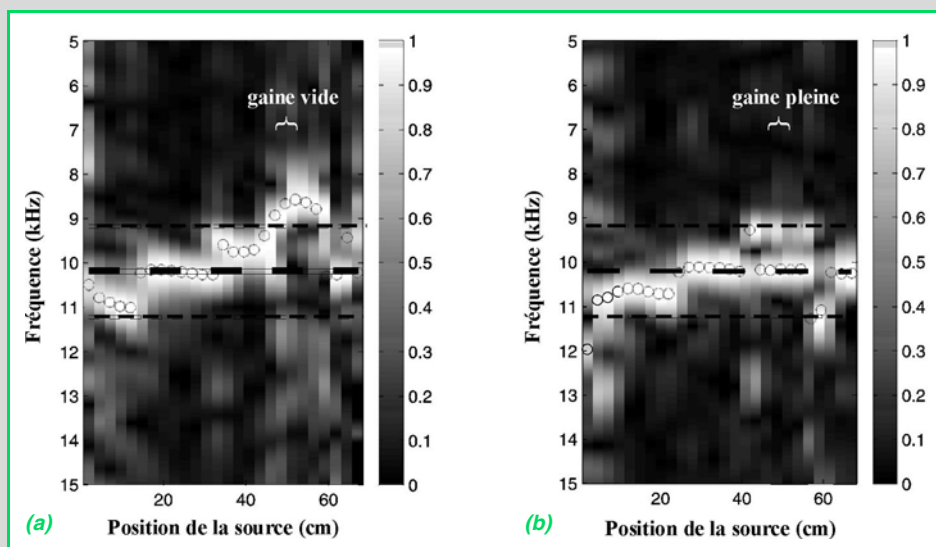


Fig. 7 - Profils fréquentiels IE normalisés de la zone 1 (a) et de la zone 2 (b). La source est positionnée par rapport à la base du gousset supérieur (source O. Abraham, LCPC). Les o indiquent la position des maxima des spectres normalisés.

La fréquence caractéristique de l'épaisseur totale de la dalle sans gaine est de 10,1 kHz. Il n'a pas été possible de mettre en évidence une résonance haute fréquence liée à des allers et retours entre la surface de la dalle et la gaine. Les résultats obtenus au droit de la gaine vide montrent toutefois une diminution nette de la fréquence caractéristique de l'épaisseur totale de la dalle de 10,1 kHz vers 8,5 kHz. Ce n'est pas le cas pour la gaine pleine. Les maxima des spectres restent localisés vers 10,1 kHz.

Ces constats ont incité le réseau des LPC à engager une étude comportant deux approches, l'une expérimentale sur des corps d'épreuve, l'autre numérique, qui s'intéresse plus particulièrement à l'influence du taux de remplissage de la gaine, dans le but d'évaluer les performances et les limites de cette méthode prometteuse (Abraham *et al.*, 2000, Abraham et Côte, 2002).

Résultats de l'autopsie

À la suite de ces campagnes de mesures, la poutre a été détruite par hydro-démolition. Au regard des dimensions importantes de la poutre, il a été décidé de se limiter à la destruction du béton au voisinage des gaines de précontrainte, de façon à les dégager, ainsi que les ancrages, sans risquer d'endommager les câbles.

Ainsi, il était prévu d'examiner onze ancrages et environ soixante-dix-sept mètres de câbles « CO2 » (7 torons de 7 fils de 3,6 mm de diamètre). L'intervention du LRPC de Toulouse a consisté à repérer le tracé des câbles (fig. 8), à ouvrir chaque gaine métallique au moyen d'une double découpe, enlever le coulis d'injection présent, démonter chaque câble, chaque toron puis chaque fil élémentaire dans le but de rechercher la présence de corrosion et les ruptures de fils.



Fig. 8 - Armatures de la poutre test après hydro-démolition.

Les conclusions de l'autopsie peuvent être résumées de la façon suivante. Un linéaire important de gaine non injecté a été observé (fig. 9). Les câbles avaient été graissés manuellement, ce qui a entraîné une protection correcte contre la corrosion, au regard de l'âge de l'ouvrage. Une légère corrosion classique par dissolution est notée sur chaque toron. À quelques endroits ponctuels, une absence de graissage a conduit à d'importantes corrosions sous tension avec rupture de fils, et dans deux cas à des ruptures de torons. Enfin, on constate que la localisation des ruptures qui ont été constatées sur cette poutre test correspond de façon précise aux événements enregistrés et localisés par la surveillance acoustique, lors de la mise sous haute surveillance de l'ouvrage, ce qui valide cette technique.



Fig. 9 - Exemple d'absence totale d'injection dans une gaine.

Évaluation des méthodes d'END

À l'issue de ces campagnes de mesures non destructives, nous avons pu mettre en évidence les avantages et les limites de chacune des techniques employées. En reprenant les trois applications correspondant aux besoins des experts en ouvrages d'art, on peut relever les points suivants :

Localisation des câbles de précontrainte et des armatures passives

Pour les faibles profondeurs, le Ferroskan® est bien adapté pour localiser des armatures ou donner des épaisseurs de béton d'enrobage. Toutefois, à partir d'une certaine profondeur (de l'ordre de 10 cm), il est nécessaire d'utiliser du matériel plus coûteux comme le radar de structure.

En ce qui concerne l'estimation des diamètres, le Ferroskan® donne des informations à deux gammes près (avec le matériel et le logiciel associé de la version 2000). Sur ce point, il y a toujours un réel besoin d'une meilleure précision de la part des experts en ouvrages d'art. Il est donc toujours indispensable de réaliser quelques sondages pour confirmation.

Appréciation de la qualité de l'injection et des câbles

La connaissance de l'état de l'injection est un paramètre fondamental puisqu'il est la source majeure des pathologies de précontrainte. La gammagraphie est une technique éprouvée, répondant parfaitement à la question sous certaines conditions: dans les zones de structures à double accessibilité (sur chacune des deux faces) où les mesures de radioprotection peuvent être mises en place. Toutefois, en cas de doute sur la qualité de l'injection ou sur l'existence d'une rupture, un sondage est nécessaire pour confirmer ce diagnostic.

La technique d'Impact-Écho est une alternative intéressante. Utilisée ponctuellement depuis une seule face de la structure, elle est à l'étude actuellement au sein du réseau des LPC et doit faire ses preuves.

En ce qui concerne l'état de corrosion des câbles, il n'y a aucune méthode pouvant répondre à ce problème et, sur ce point, il y a également un réel besoin de la part des experts en ouvrages d'art. Enfin, la détection de ruptures de fils ou de torons peut être effectuée par gammagraphie sous certaines conditions.

Évaluation de la qualité du béton

Ce troisième point n'a pas été étudié dans le cadre de ces campagnes de mesure. Néanmoins, des études sur les techniques soniques et radars sont en cours pour tenter d'y répondre.

Complémentarité des méthodes d'END

En se concentrant sur l'étude de telle ou telle pathologie, on constate la plupart du temps que les méthodes d'END ne répondent que de manière partielle. On peut alors être amené à employer une autre technique pour compléter la réponse, et ainsi conforter un diagnostic.

La démarche la plus logique consiste à trouver un compromis entre le niveau d'exigence demandé par le maître d'œuvre et le coût économique acceptable pour l'application. On peut alors proposer la démarche suivante :

1. établissement du niveau d'importance du problème posé, en incluant des notions de coûts de maintenance technique ou de réparation-confortement, de gêne auprès des usagers ou des collectivités locales (liée à l'économie locale ou régionale) ;
2. estimation du niveau de coût acceptable pour des investigations non destructives, dans le cadre de l'établissement d'un diagnostic ;
3. combinaison de techniques ND complémentaires suivant un ordre précis dont le schéma d'utilisation repose sur trois possibilités :
 - lever une ambiguïté pour une deuxième technique ND,
 - localiser des zones douteuses à partir de mesures ND à grand rendement,
 - répondre à un problème dans sa globalité vis-à-vis d'une structure présentant des zones de géométries ou d'accessibilités différentes ;
4. réalisation de quelques sondages, positionnés par les méthodes ND, pour confirmer les hypothèses de diagnostic.

Dans tous les cas, l'apport d'une deuxième technique doit nécessairement correspondre à une valorisation du diagnostic, soit par de nouvelles informations, soit en fiabilisant les premières mesures.

Cette approche a déjà été présentée, soit dans des réflexions globales (Maierhofer et *al.*, 1998), soit en combinant deux techniques pour lever une ambiguïté (Flohner et Poepel, 1996). Néanmoins, elle reste trop peu développée du point de vue de l'expert en ouvrages d'art.

Au vu des résultats de cette campagne de mesures ND, il paraît prometteur de combiner certaines techniques pour des expertises particulières. Ainsi, concernant l'application prioritaire liée à cette poutre, il apparaît judicieux de pouvoir positionner rapidement les armatures et les gaines de précontrainte afin d'optimiser les mesures ponctuelles de contrôle d'injection. Le surcoût de la première technique liée au positionnement des gaines est contrebalancé par une diminution du nombre de mesures ponctuelles de la deuxième technique, pour un temps d'intervention sur le chantier équivalent.

Donc, suivant les équipements disponibles au sein des équipes d'auscultation, on ne peut que souhaiter rencontrer, lors d'interventions futures, des combinaisons de techniques ND telles que radar/Ferroskan® et gammagraphie/Impact-Écho, sachant que, parmi celles-ci, trois d'entre elles (gammagraphie, radar et Impact-Écho) nécessitent un haut niveau de technicité tant pour l'acquisition que pour l'interprétation.

Il reste à préciser que la technique radar devrait se vulgariser rapidement dans le cadre de ce type de prestations. En effet, avec des avantages tels que rapidité d'action et grandes profondeurs d'investigation (34 cm), les nouvelles générations de matériels proposent en outre des prix plus accessibles ainsi qu'une utilisation plus simple et plus précise.

De même, la technique d'Impact-Écho, pour des raisons similaires de simplicité de mise en œuvre et de faible coût de matériel, devrait s'employer couramment dans le futur après validation de sa méthodologie.

Conclusions et perspectives

Cette étude a porté sur l'évaluation de méthodes d'auscultation non destructives appliquées à une poutre précontrainte devant être autopsiée. Les techniques radar, Ferroskan®, gammagraphique et Impact-Écho ont été décrites et les résultats des mesures commentés.

Les résultats montrent tout l'intérêt de combiner de telles méthodes d'END pour lever certaines ambiguïtés, localiser des zones douteuses à partir de mesures à grand rendement ou répondre à un problème global à partir de méthodes complémentaires.

Pour ce qui concerne l'évaluation de la qualité d'injection des gaines de précontrainte, la meilleure combinaison de techniques de mesures actuelle semble être l'utilisation du radar en préalable de la gammagraphie. Des études en cours laissent à penser que la combinaison radar et Impact-Écho, une fois que la méthodologie de cette dernière aura été validée, pourrait devenir une pratique courante en parallèle ou en complément des inspections gammagraphiques.

Néanmoins, malgré des tentatives faites pour améliorer les réponses à apporter aux experts en ouvrages d'art à partir de méthodes non destructives, il reste un certain nombre de points importants non résolus. Pour progresser, des communications régulières entre les spécialistes de l'auscultation et les gestionnaires d'ouvrages doivent être recherchées. Il nous faut montrer continuellement les avancées des recherches, des études, en termes de meilleure compréhension des matériaux et des structures, en termes d'imageries plus précises, tout en gardant une approche pratique du terrain.

Le deuxième point à résoudre concerne des applications telles que l'estimation exacte des diamètres des armatures passives, l'état de la corrosion dans les câbles de précontrainte ou l'existence de rupture de fils ou de torons. Ces demandes très précises montrent tout le travail qu'il nous reste à faire pour y répondre ; c'est pourquoi des sondages destructifs sont toujours nécessaires.

Remerciements. Les auteurs tiennent à remercier l'équipe radar du LRPC d'Autun ainsi que le groupe Ouvrages d'art du LRPC de Lyon pour la mise à disposition de leurs données expérimentales respectives.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABRAHAM O., LÉONARD C., CÔTE Ph., PIWAKOWSKI B, Time frequency analysis of impact-echo signals : numerical modeling and experimental validation, *ACI Materials Journal*, vol. 97, **6**, **2000**, pp. 645-657.

ABRAHAM O., CÔTE Ph., Thickness frequency profile for the detection of voids in tendon duct, *ACI Structural Journal*, 99, **3**, **2002**, pp. 239-247.

AUBAGNAC C., Les expertises réalisées – Auscultation des OA: Application au pont de Foix – Paris – 29 juin 1999, *bulletin annuel AFGC*, **2**, janvier **2000**, pp. 119-121.

BUNGEY J.H., Millard S.G., *Testing of concrete in structures*, Blackie Acad. & Prof., 3^e éd., **1996**, 286 pages.

BÜYÜKÖZTÜRK O., Imaging of concrete structures, *NDT&E International*, **31**, **1998**, pp. 233-243.

DÉROBERT X., COFFEC O., Investigation radar de structure – Performances envisageables pour des applications sur ouvrages d'art, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **230**, **2001**, pp. 57-66.

Federal Highway Administration, Performance of concrete segmental and cable-stayed bridges in Europe, *Int. Techn. Exch. Prog.*, may **2001**, pp. 57-60.

FLOHRER C., POEPEL M., Combination of a covermeter with a GPR system – A tool for detecting Prestressed bars in concrete structures, *Actes 5^e Cong. Int. GPR*, Sendai (JP), **1996**, pp. 273-278.

KENNEDY REID I.L., Vincent N., Halliday J. (2001), NDT techniques for bridges, *Actes Cong. Struct. Faults and Repairs*, **2001**, 9 pages.

- McCANN D.M., FORDE M.C., Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures, *NDT&E International*, vol. 34, **2001**, pp. 71-84.
- MAIERHOFER C., KRAUSE M., Wiggenhauser H., Non-destructive investigation of sluices using radar and ultrasonic impulse echo, *NDT&E International*, vol. 31, **6**, **1998**, pp. 421-427.
- MALHOTRA V.M., CARINO N.J. éd., *Handbook on nondestructive testing of concrete*, CRC Press, **1991**, 341 pages.
- OECD Nuclear Energy Agency, Development priorities for Non-Destructive Examination of concrete structures in nuclear plant, Nuclear Safety, *NEA/CSNI/R(98)6*, octobre **1998**, pp. 25-39.
- PLA-RUCKI G.F., EBERHARD M.O., Imaging of reinforced concrete : state-of-art review, *Journ. of Infrastr. Syst.*, juin **1995**, pp. 134-141.
- RHIM H.C., BÜYÜKÖZTÜRK O., Wideband microwave imaging of concrete for nondestructive testing, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 126, **12**, décembre **2000**, pp. 1451-1457.
- ROBERT A., Dielectric permittivity of concrete between 50 Mhz and 1 Ghz and GPR measurements for building materials evaluation, *J. appl. geophys.*, vol. 40, **1-3**, **1998**, pp. 89-94.
- ROBERT J.-L., BREVET P., BRUHAT D., GERVAIS J.-P., La surveillance acoustique – Auscultation des OA: Application au pont de Foix – Paris – 29 juin 1999, *bulletin annuel AFGC*, **2**, janvier **2000**, pp. 113-118.
- SCOTT M., REZAIZADEH A., DELAHAZA A., MOORE M., GRAYBEAL B., WASHER G., A comparison of nondestructive evaluation methods for bridge deck assessment, *actes Cong. Struct. Faults and Repairs*, **2001**, 13 pages.
- SÉKULIĆ D., BJEGOVIĆ D., MIKULIĆ D., Non-destructive methods for monitoring of reinforcing steel in concrete, *actes Cong. Struct. Faults and Repairs*, **2001**, 13 pages.