

**ACTENA, UN PROGRAMME DE RECHERCHE POUR LE  
DÉVELOPPEMENT DES MÉTHODES NON DESTRUCTIVES  
D'AUSCULTATION DES CÂBLES TENDUS NON ACCESSIBLES**  
*ACTENA, A RESEARCH PROGRAM FOR THE DEVELOPMENT OF  
NON DESTRUCTIVE EVALUATION OF NON ACCESSIBLE STRANDS  
IN TENSION IN CIVIL ENGINEERING*

J.-L. Chazelas, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, jean-louis.chazelas@lcpc.fr  
S. Fortier, EDF R&D, *stephane.fortier@edf.fr*

**Résumé**

Le programme national de recherche ACTENA (auscultation des câbles tendus non accessibles) vise à développer des méthodes d'auscultation de la précontrainte, des tirants et des ancrages de câble. La démarche consistant à engager plusieurs développements en parallèle sera justifiée par la problématique du diagnostic de la pérennité de la précontrainte. L'effort de recherche porte sur sept méthodes : l'acoustoélasticité du béton ou de l'acier pour évaluer respectivement l'état de contrainte actuel dans le béton ou dans le câble, la réflectométrie d'ondes mécaniques et la réflectométrie d'ondes électromagnétiques pour détecter les ruptures existantes dans le câble, la méthode impact-écho et la thermographie infra-rouge pour détecter les défauts d'injection des gaines, enfin l'émission acoustique pour détecter l'activité corrodante en des points non directement accessibles tels que les ancrages de précontrainte et les déviateurs. Selon l'état des connaissances, chacune de ces méthodes est abordée avec des ambitions adaptées. Le point sur leur avancement deux ans après le début du programme est présenté succinctement.

**Abstract**

*The national research program ACTENA (for evaluation of non accessible strands) aims at developing non destructive methods for the evaluation of the durability of strands in tension in civil works (prestressed concrete strands, retaining walls anchorage strands, anchorage zones of suspension cables). The parallel development of seven methods is justified by the analysis of the complexity of the global evaluation of the durability of the non accessible cables in tension : acoustoelasticity in the prestressed concrete in order to verify if the initially pre stress is still effective, the acoustoelasticity in the cable in order to evaluate the remaining tension, ultrasonic reflectometry and electromagnetic reflectometry in order to detect existing fractures and important corrosions, impact echo method and IR thermography for locating ungrouted sections of the duct, and acoustic emission in order to detect and evaluate the corrosion activity in special zones of the cables (pre stressing cable anchorage, deflectors). A short account of the different developments is done two years after the beginning of the program.*

## INTRODUCTION

L'un des enjeux du développement durable est le maintien en service du patrimoine des infrastructures économiques du pays le plus longtemps possible. Toutes les méthodes qui permettront d'ausculter les ouvrages afin d'en déceler les faiblesses – que ce soient les endommagements effectifs, leurs prémisses ou même les défauts de protection ou d'exécution qui créent un risque d'endommagement - doivent donc être mobilisées et développées à cet effet. Les ouvrages de génie civil qui reposent sur l'utilisation de câbles tendus, plus particulièrement le béton précontraint, posent un problème particulièrement ardu qui a conduit à l'organisation d'un projet national de recherche que nous proposons d'exposer ici.

Le béton précontraint a été inventé par l'ingénieur Français Eugène Freyssinet (1879 – 1962) selon le brevet déposé en 1928 : le béton est mis en compression permanente par l'intermédiaire de câbles noyés dans le béton, câbles eux-mêmes mis en traction avant ou après le coulage du béton selon que l'on pratique la pré-tension ou la post-tension. Le béton précontraint a permis d'alléger considérablement les structures et de franchir des brèches importantes en supprimant des appuis intermédiaires. Sur les 230 000 ponts en France près de 42 000 sont en béton précontraint, représentant 45% de la surface d'ouvrages. Dans les ouvrages nucléaires et hydrauliques sous la responsabilité d'EDF, le béton précontraint est largement utilisé (enceinte de confinement, barrages, canaux d'amenée d'eau, galeries, poutre de pont roulant, ...)

Les ouvrages en béton précontraints ne sont pas les seuls ouvrages comportant des câbles tendus : les ponts à haubans et les ponts suspendus et les murs de soutènement ancrés par tirants dans le massif de sol (près de 50 000 m<sup>2</sup> en France) constituent également un parc qui demande à être surveillé.

L'enjeu économique et sécuritaire de l'évaluation de la pérennité de la précontrainte et des technologies associant les câbles tendus est donc considérable. Cette technologie repose sur la pérennité de la force de traction dans les câbles qui soit créent une contrainte de compression permanente dans le béton – béton précontraint – soit supportent l'ouvrage – murs de soutènement et ponts suspendus et ponts à haubans. Cependant, parmi tous ces ouvrages, un sous ensemble pose des problèmes d'auscultation plus complexes que les autres : ceux pour lesquels l'accès au câble est très limité voire impossible sans détruire ou gravement perturber le fonctionnement de l'ouvrage. En effet dans le cas des haubans, câbles et suspentes traditionnelles de ponts, il est envisageable d'en faire le tour et de recourir aux méthodes magnétiques pour les ausculter. Dans le cas de la précontrainte, des tirants d'ancrage et de quelques sections particulières des suspentes et haubans (les zones d'ancrage), il n'est plus possible d'en faire le tour. En pratique, hors les gammagraphies ou les radiographies X haute énergie, il n'existe presque aucune méthode d'auscultation. De plus, les méthodes d'imagerie à hautes énergies ne sont pas toujours applicables compte tenu des difficultés d'accès, des épaisseurs d'ouvrage à traverser et des contraintes réglementaires de radioprotection.

Compte tenu de l'importance économique de ces technologies, EDF R&D et le LCPC, laboratoires au service des plus importants maîtres d'ouvrage concernés, se sont unis pour tenter de faire progresser les méthodes non destructives d'auscultation de ce type d'ouvrages. Pour ne pas disperser les efforts de recherche, seuls les câbles non accessibles ont été considérés. Après appel d'idées à l'ensemble des laboratoires français susceptibles d'apporter une contribution à cet objectif, une proposition de programme de recherche cohérent a été soumise pour financement à EDF et l'Agence Nationale de la Recherche lors de son premier appel à idées en juillet 2005 sous l'acronyme ACTENA pour Auscultation des

Câbles Tendus Non Accessibles. Nous proposons dans la présente communication de rappeler d'abord les difficultés scientifiques du problème posé, et tout d'abord en quoi le recours à des méthodes non destructives s'impose dans ce cas. Nous expliciterons ensuite les différentes pistes explorées. Le programme étant commencé depuis deux ans, quelques résultats sont déjà acquis : nous ne les présenterons que succinctement. Pour les plus avancés, les équipes concernées présentent des communications spécifiques plus précises au cours de ces journées de la COFREND .

## **UN ENJEU TECHNIQUE ET SCIENTIFIQUE POUR LES METHODES NON DESTRUCTIVES**

La stabilité des ouvrages à câbles tendus repose à la fois sur la présence des câbles et sur la force de compression appliquée au béton par ce câble en traction. Les câbles de précontrainte, câbles d'ancrage et câbles de suspension ou haubans sont soumis aux mêmes risques pathologiques : rupture par fatigue, rupture par surcharge, rupture par corrosion fissurante (attaque corrosive perpendiculairement à la surface), notamment lorsque le câble n'est plus passivé par la présence d'un coulis de ciment. Les ruptures interviennent généralement fil par fil. La précontrainte peut être pérennisée par le phénomène de ré-ancrage des fils : au droit d'une rupture éventuelle, lorsque le câble est bloqué dans un coulis de ciment, la force dans le câble se répartit sur les fils restants et le toronnage permet de re-répartir l'effort sur la totalité des fils à quelques dizaines de centimètres de la rupture. La technologie comporte donc deux niveaux de sécurité : la surabondance en section de câble et le ré-ancrage. Un câble peut présenter plusieurs ruptures réparties : la force appliquée sera toujours la même, grâce au ré-ancrage. On doit cependant se poser la question de la marge de sécurité résiduelle. La problématique de l'auscultation est donc double : quel est le niveau de la contrainte résiduelle dans le béton ou dans les câbles, quel est le niveau d'endommagement de chaque câble ?

Il faut ensuite prendre la mesure de la difficulté d'accès qui sont de plusieurs ordres.

Un câble de précontrainte intérieure est inséré dans une gaine – généralement un tube en feuillard métallique galvanisé – lui-même attaché à une cage d'armatures à béton dite armatures passives. Une fois le béton coulé et ayant atteint un niveau de résistance à compression suffisant, le câble est mis en tension par ses extrémités. Enfin la gaine est injectée, d'un coulis de ciment le plus souvent, quelquefois de graisse ou de cire (précontrainte extérieure). On peut donc tenter d'ausculter le câble depuis la paroi de la pièce de béton ou depuis l'extrémité, là où le câble est ancré au béton. Pour ausculter les câbles depuis la paroi de la pièce de béton il convient donc de traverser le béton, puis la gaine, puis le coulis. Aux extrémités, les câbles sont souvent accessibles mais d'autres sont cachetées dans une niche – par exemple quand le câble ressort en surface du tablier d'un pont. Entre l'extrémité accessible des câbles et la section courante, on trouve un ensemble de pièces métalliques de clavetage du câble à l'extrémité de la pièce de béton – tromplaque, cône, clavettes : entre la section accessible et la section courante à ausculter, on trouve donc un massif métallique important qui va gêner le passage des ondes notamment.

Dans le cas des tirants d'ancrage des murs de soutènement, le câble est enfilé dans un forage percé à travers le mur sur une longueur d'environ 10 - 15 m : à l'aide d'un tube plongeur on vient injecter sous pression l'extrémité du câble et le sol environnant afin de former un bulbe d'ancrage puis le câble est mis en tension. Pour les câbles définitifs, la section entre le bulbe et le mur est quelquefois protégée. Le seul accès possible est l'extrémité, présentant la même configuration que dans les pièces en précontrainte intérieure.

La géométrie d'une pièce en béton précontrainte extérieurement – généralement des structures de caisson ou poutres triangulées - est conçue pour que le câble puisse être passé en dehors de la section de béton proprement dit. La plupart du temps les gaines sont en polyéthylène haute densité, ce qui rend possible l'utilisation des méthodes magnétiques en section courante puisqu'on peut faire le tour du câble. La connexion du câble à la pièce de béton se fait par des sections massives d'extrémité et des déviateurs, renforts locaux massifs qui permettent de faire suivre au câble un trajet en rapport avec la courbe de moments fléchissants. Ces zones d'ancrage et les déviateurs de point haut sont des pièces d'environ 2 à 3 mètres d'épaisseur au sein desquelles le câble inclus dans sa gaine suit souvent un trajet courbe accompagné par un tubage métallique de forte section glissé dans des cages d'armatures passives extrêmement serrées. Ces zones de déviateurs et d'ancrage sont des zones où les risques de défaut d'injection sont les plus grands et ce sont aussi les seules sections du câble qui sont totalement inaccessibles.

Comme dans le cas des câbles de précontrainte extérieure, les zones d'ancrage des câbles et suspentes sont généralement placées dans des massifs de béton extrêmement volumineux et armés d'armature passives très denses. L'accessibilité, même aux méthodes gamma et X est souvent difficilement envisageable.

Nous avons réuni dans le programme de recherche ACTENA tous ces cas similaires où les câbles sont non accessibles de par la géométrie des pièces et le plus souvent sous gaine métallique elle-même injectée d'un coulis de ciment. Rappelons que le caractère basique du coulis protège en principe le câble contre la corrosion mais la présence du coulis va limiter les possibilités d'auscultation.

Il faut encore signaler que pour nombre d'ouvrages, le recours aux méthodes d'auscultation non destructives est obligatoire : l'ensemble de la masse de béton est sous contrainte de compression tout le long du trajet du câble et il n'est pas possible de rompre l'équilibre structural sans détruire l'ouvrage. Dès l'instant où l'on détruit le béton pour atteindre et observer le câble directement, le champ de contrainte dans le béton est perturbé et le béton de colmatage après auscultation n'est plus en compression. Ceci est acceptable pour quelques fenêtres d'accès au câble percées localement dans les poutres d'un ouvrage d'art mais totalement exclu pour d'autres, voire impossible pour les tirants d'ancrage.

## **APPROCHES ENVISAGEABLES - APPROCHES RETENUES**

Il y a plusieurs manières d'approcher la réponse aux deux questions de base de l'évaluation de la pérennité de la précontrainte : évaluer l'état de contrainte dans le béton, déterminer l'état de contrainte ou la force résiduelle dans le câble, évaluer l'état des pathologies principales du câble (nombre de ruptures de fil, état de corrosion éventuelle), détecter les zones à risque. Aucune de ses approches n'est suffisante à elle seule. Aucune n'apparaît prioritaire et toutes sont particulièrement complexes à appliquer, comme nous le verrons plus bas. Il faut donc les faire progresser en parallèle.

Les équipes méthodes non destructives du LCPC et d'EDF R&D qui ont pris l'habitude de travailler ensemble sur des problématiques commune grâce à un accord cadre ont mené une double démarche : nous avons fait un appel à idées à l'ensemble des laboratoires susceptibles de contribuer à développer des méthodes d'auscultation nouvelles et nous avons examiné l'existant et les problèmes posées par chaque méthode physique envisageable.

Les méthodes d'auscultation de la précontraintes sont très peu nombreuses. On en trouvera une description rapide dans [1] ainsi que les principales références :

-la contrainte dans le béton peut être évaluée par la méthode de libération de contrainte qui consiste à réaliser une fente dans le béton et de rétablir le champ de déformation à l'aide d'un vérin plat. La pression dans le vérin donne une valeur approchée de la contrainte dans le béton. C'est évidemment une méthode locale et semi-destructive.

-la force dans le câble peut aussi être évaluée par la reprise de traction sur le culot d'ancrage. Cette méthode très lourde est pratiquée mais ne donne réellement d'information que sur la zone proche de l'ancrage en raison de l'interaction câble – coulis. Il existe aussi une méthode d'évaluation de la force dans le câble – méthode de l'arbalète – qui évalue la force de traction à partir de l'effort transversal à exercer sur la câble pour obtenir une déformation transversale donnée. Cette méthode est également locale puisqu'elle demande le dégagement d'une fenêtre sur le câble.

-en matière de corrosion on peut signaler deux méthodes de potentiel, l'une qui permet d'approcher le taux de corrosion entre deux points – donc deux fenêtres d'accès – et l'autre qui fournit une indication de la vitesse de corrosion. Ces deux méthodes qui nécessitent des fenêtres d'accès aux câbles sont également dans la catégorie semi-destructive.

-la seule méthode qui permette de visualiser les ruptures dans les câbles est la gammagraphie ou la radiographie X haute énergie. Outre que ces méthodes sont lourdes sur le plan de la sécurité, les matériels disponibles ne permettent pas d'explorer des épaisseurs de béton supérieures à 70 cm. De plus les temps d'exposition sont très longs ce qui en fait des méthodes locales. Enfin les ruptures de fils ne se voient que si les fils se détachent, ce qui suppose également un manque de coulis. Dans la majorité des cas cette méthode ne permet que de détecter les manques de coulis dans les gaines – et c'est la seule méthode disponible.

-enfin il convient de mentionner la méthode impact écho et la méthode d'imagerie par thermographie infrarouge. Ces deux méthodes visent à repérer les défauts de coulis dans les gaines de précontrainte intérieure. Elles en sont toutes les deux au stade du développement tant au niveau des méthodes de sollicitation que des procédés de traitement de l'information.

Les difficultés techniques qui limitent le choix des méthodes physiques applicables sont nombreuses et méritent d'être développées ici.

La première famille de méthodes repose sur les propriétés de la propagation d'ondes le long du câble en l'attaquant par son extrémité une fois dégagée des organes de protection en temps normal. La première difficulté réside dans le fait que la propagation est de type guidée donc dispersive, dans un solide constitué de fils tendus toronnés et dans un milieu à perte – le coulis. Il n'existe pas de modèle numérique de propagation satisfaisant dans un milieu aussi complexe : ce que l'on sait cependant [2] c'est que seules quelques fréquences bien choisies présentent suffisamment peu de perte pour se propager à quelques mètres. S'il s'agit d'en déduire les propriétés d'état de contrainte, cela est suffisant, encore faut-il trouver un réflecteur pour qu'une information revienne vers le capteur. S'il s'agit de détecter des ruptures par réflectométrie, les travaux déjà effectués sur la propagation en ondes guidées en milieu à perte ont montré la difficulté de choisir la fréquence du signal qui permet d'ausculter les câbles au-delà de quelques mètres à partir de l'ancrage, ce qui correspond heureusement à la zone la plus sujette à ruptures. Enfin, à la difficulté de propager le long de la section courante du câble, il convient d'ajouter le problème de la transition entre la partie accessible et la partie courante qui se fait par des pièces massives en acier qui constituent évidemment un point d'impédance très marquée. Ces méthodes reposant sur une propagation

longitudinale d'ondes sont cependant les seules méthodes actuellement envisageables dans le cas des tirants

La deuxième famille de méthodes repose sur les propriétés de propagation d'ondes depuis la face de la pièce de béton. Les méthodes électromagnétiques type radar sont limitées par le gainage métallique des câbles et du coulis. Les méthodes gamma graphiques et rayon X fonctionnent avec les limites citées plus haut. La thermographie infrarouge fonctionne en tant que méthode de cartographie de température traduisant les variations locales de flux (flux d'énergie traversant la pièce de béton ou en transfert depuis le câble vers la surface ou en transfert de la surface vers l'intérieur). La multiplicité des interfaces et la diffusivité des milieux traversés rend cette technique délicate à appliquer. Quand aux méthodes d'ondes mécaniques, il convient d'abord de vérifier en basse fréquence que les aciers passifs ne sont pas gênants. Il convient de ne pas monter non plus trop haut en fréquence car alors le béton devient un matériau hétérogène en raison de la taille des granulats. Enfin – et c'est une des difficultés déjà identifiées de la méthode impact – écho - s'il y a décollement local de la gaine et du béton (défaut de coulage local, retrait interne du coulis), on peut facilement confondre défaut de coulis et décollement gaine coulis.

En conséquence, fort de cette pré-analyse, le programme de recherche ACTENA comporte les axes de travail suivants :

–la réflectométrie d'ondes mécaniques pour la détection et la localisation des ruptures et des corrosions graves : les travaux préliminaires ont montré qu'il convenait d'abord d'améliorer la pertinence des modèles numériques pour optimiser le choix de la fréquence de travail des ondes à faire propager, pour comprendre la déformation des signaux au cours de leur aller-retour jusqu'au défaut par dispersion et pour envisager la résolution du problème inverse d'identification du défaut. En raison de l'importance reconnue de la génération d'un signal parfaitement adapté aux possibilités étroites de choix de la fréquence et du mode de propagation, nous avons accepté avec intérêt la proposition du CEA – LIST d'étudier l'application des capteurs multi-éléments. Les partenaires sur ce sujet de réflectométrie ultrasonore sont donc: le Laboratoire Central des Ponts de Chaussées, le Laboratoire d'Intégration des Systèmes et des Technologies (LIST) CEA, le Laboratoire de Mécanique Physique (LMP) – UMR 5469 CNRS - Université de Bordeaux 1,

–la réflectométrie d'ondes électromagnétiques dans le même objectif que la réflectométrie d'ondes mécaniques : *a priori* le câble, le coulis et la gaine devraient former une ligne co-axiale susceptible de propager une onde électromagnétique. Cependant, comme pour les ondes mécaniques, le milieu de propagation est à perte et la gaine touche le câble à l'entrée (organes de clavetage) et dans les courbures. La méthode RIMT (Réflectométric Impulse Measurement Technique) développée notamment en Suisse a suscité beaucoup d'espoir et de déception dans les années 90. Nous avons voulu reprendre la physique des phénomènes à la base pour voir dans quelle mesure il y aurait un domaine d'emploi même restreint. Les partenaires sur ce sujet sont : le Laboratoire Central des Ponts de Chaussées et le Laboratoire Télécommunications, Interférences et Compatibilité Electromagnétique (TELICE/IEM) Université des Sciences et Technologies de Lille,

–Les propriétés acousto-élastiques du béton – pour tenter de déterminer l'état de contrainte dans le béton – ou les propriétés acousto-élastiques dans l'acier – pour tenter d'évaluer la force résiduelle dans les câbles. Compte tenu de l'hétérogénéité du béton et des conditions d'accès au câble, nous savons *a priori* que ces méthodes seront difficilement applicables. Nous avons cependant voulu explorer les possibilités de ces techniques dans deux études de faisabilité de manière à mieux asseoir leurs perspectives d'emploi. Les deux équipes chargées de ces sujets sont respectivement le Laboratoire de Caractérisation Non Destructive (LCND) – IUT Aix – Université de la Méditerranée – Marseille et le Département

Mécanique et Comportement des Matériaux - Ecole des Mines de Douai (ARMINES),

-la méthode impact écho et la méthode d'imagerie infrarouge pour localiser depuis la surface les défauts d'injection dans les gaines de précontrainte intérieure. Ces deux méthodes dont des études de faisabilité [3] [4] [5] ont montré la pertinence, en sont à des phases de développement. Pour la méthode impact écho, il convient de développer la prise de l'information ponctuelle et l'intégration de méthodes rapides de traitement du signal à grand rendement de manière à passer de sondages ponctuels à un traitement par profils (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Laboratoire Analyse des Matériaux et Identification (LAMI) – Unité Mixte LCPC – ENPC, Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Lyon). Dans le cas de la thermographie infrarouge, il convient de travailler sur les méthodes de chauffe et sur le traitement de l'image corrélative pour minimiser la consommation d'énergie, éviter l'échauffement excessif des câbles et affiner la précision de repérage. C'est le Laboratoire d'Artois de Mécanique Thermique et Instrumentation (LAMTI) - Université de d'Artois – Béthune qui développe cet axe.

-l'émission acoustique liée à l'activité corrodante sur le câble. Il ne s'agit pas d'enregistrer les ruptures de fil – ce qui est déjà opérationnel et relève de la surveillance mais d'écouter ponctuellement l'activité émissive de la corrosion – dans un domaine énergétique très différent des ruptures – pour diagnostiquer l'intensité et le stade de l'activité corrodante. Le niveau énergétique ne permet d'ailleurs d'envisager une utilisation qu'en des points très spécifiques tels que les ancrages de câbles et dans la zone des déviateurs de précontrainte extérieure, à condition de créer une fenêtre dans la gaine plastique – ce qui est acceptable. Ce sujet très complexe tant au niveau du recueil de l'information que de l'analyse des mécanismes et de l'identification des signaux regroupe un nombre important d'équipes : le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, le Laboratoire de Physico-Chimie Industrielle – (LPCI) - INSA de Lyon, l'entreprise Europhysical Acoustics, le Laboratoire Roberval - Université Technologique de Compiègne, le Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) - INSA – Université Paul Sabatier de Toulouse.

## PREMIERS RESULTATS

Nous ne présenterons ici qu'un bilan partiel et succinct des résultats provisoires du programme ACTENA qui est parvenu à la fin de sa deuxième année et nous indiquerons les perspectives dans chacun des axes. On trouvera des informations plus précises dans des communication spécifiques qu'ont souhaité présenter certaines équipes.

La **réflectométrie d'ondes mécaniques** a progressé essentiellement sur la modélisation numérique et la propagation longitudinale des ondes excitées au point d'accès au câble, son extrémité. Les deux équipes se sont dotées des moyens de modélisation numériques – le LMP et le LCPC avec une approche analytique, le CEA par une méthode d'éléments finis semi-analytiques – de manière à mieux cerner ces conditions de propagation, choisir les modes les moins atténués et, à terme, envisager l'interaction entre l'onde et le défaut réflecteur de manière à prendre en compte l'interaction avec le défaut et la dispersion dans le trajet aller – retour de l'onde. Ces modélisations validées expérimentalement sur barre sont cependant très conservatrices puisqu'elles étudient des barres et non des éléments multi fils toronnés. Les bandes passantes sont différentes pour le fil central et les fils périphériques en contact avec le coulis. L'atténuation linéaire apparaît plus faible sur les torons expérimentaux que sur les barres du modèle numérique – de l'ordre de 5 dB/m sur le fil central et tellement élevée sur les fils périphériques qu'elle n'a pas été encore évaluée de manière précise. Le CEA a commencé par tester numériquement l'intérêt des capteurs multi-éléments pour accroître l'adaptation des capteurs à l'émission et à la réception. Le modèle

semble démontrer que le recours à cette technologie très sophistiquée et donc onéreuse est peu rentable sur le plan énergétique. Reste à le vérifier expérimentalement au moins sur le fil central d'un toron. Parallèlement à ces vérifications expérimentales, la modélisation numérique se poursuit, notamment en passant le modèle analytique de propagation de 2 D en 3D pour aider à la compréhension des problèmes inverses d'identification des défauts à partir de leur signature acoustique [6]. L'année finale 2008 conduira par ailleurs à expérimenter sur câbles tendus grâce à des bancs d'essais construits dans le cadre de ce programme de recherche et à recueillir des signatures d'interaction onde-défaut.

Compte tenu du contexte particulier des méthodes de **réflectométrie électromagnétiques** évoqués plus haut, le Laboratoire TELICE a entrepris une étude phénoménologique systématique en examinant successivement la réponse de lignes parallèles avec et sans coulis d'enrobage représenté par un sable humide, en s'attachant particulièrement à l'effet de la liaison à l'infini et à l'effet du système d'ancrage. Il est maintenant démontré que la présence des contacts et de la masse du système d'ancrage constitue un réflecteur qui rend invisible toute propagation et toute réflexion éventuelle au delà de l'ancrage : les informations qui avaient été interprétées comme des ruptures et des corrosions sont probablement que des artefacts. Le Laboratoire TELICE aborde donc maintenant l'analyse phénoménologique de la réponse d'un système de précontrainte dans lequel on aurait associé au câble tendu un câble conducteur isolé parallèle qui pourrait constituer une solution future plus auscultable.

Dans le domaine de la **thermographie infrarouge**, le problème est de créer un flux de chaleur en face vue par la caméra et que ce flux soit perturbé localement par la présence des hétérogénéités à visualiser – ici un défaut de coulis dans une gaine. Le LAMTI a testé plusieurs méthodes de chauffe : par couverture chauffante, par chauffage ohmique du câble de précontrainte et par méthode électromagnétique. Le procédé le plus pertinent est un chauffage par induction magnétique qui avait été développé au LCPC dans les années 90 : les temps de chauffe sont de quelques minutes et l'échauffement du câble est de 30 à 40°C pour obtenir une première image lisible. Parallèlement le LAMTI s'est doté d'un modèle numérique qui va lui permettre de travailler sur l'optimisation des méthodes de chauffage et de traitement d'image.

Pour le développement de la méthode **impact écho**, un banc forain de mesures par interférométrie laser pouvant balayer automatiquement des surfaces de 2 m x 2 m a été construit par l'équipe d'instrumentation du LCPC. Il est désormais opérationnel au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Lyon. Une campagne d'acquisition systématique de données sur un grand mur test comportant de nombreuses configurations de défauts d'injections des gaines est en cours. L'exploitation des données repose sur le pointé de fréquences sur le spectre de la vitesse particulière due à l'impact en surface du béton. Les outils de traitement par analyse en ondelettes préparés par l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées sont en phase d'optimisation. Cependant, des travaux récents [7] ont modifié sensiblement la compréhension physique de cet essai – passage d'une interprétation en réflexions multiples d'ondes de compressions à une analyse en ondes de Lamb – ce qui fait que le pointé des fréquences doit être reconsidéré : il ya plus de fréquences à pointer, certaines sont porteuses d'information, mais d'autres peuvent être des artefacts liés à la source de l'impact, ce qui peut augmenter le taux de fausses alarmes de la méthode. C'est l'essentiel du travail des prochains mois.

L'**acousto-élasticité du béton** a fait l'objet d'une étude de faisabilité par le Laboratoire de Caractérisation Non Destructive (LCND) de l'IUT d'Aix qui est présentée en détail dans une autre communication [8]. Le LCND a élaboré un dispositif d'essai sur éprouvettes en compression permettant d'analyser cet effet tant en propagation longitudinale qu'en propagation transversale par rapport à la contrainte. Retenons ici qu'il est clairement



démonstré par ces essais l'existence et la possibilité de mesure du phénomène d'acousto-élasticité du béton. Les travaux du présent programme ainsi que ceux effectués dans le cadre d'un autre programme en cours et présenté par ailleurs - le programme SENSO – ont montré l'influence de très nombreux facteurs notamment environnementaux qui rendent très difficile l'emploi direct de la mesure des différences de vitesse d'ondes P et S. Cette voie de recherche est close pour le présent programme mais devrait conduire à des approches connexes mais plus prometteuses telles que l'analyse de propagation en élasticité non linéaire.

L'exploitation de l'**acousto-élasticité dans les aciers** pour la détermination de la force de tension dans les câbles est apparue plus directement prometteuse. L'équipe de l'École des Mines de Douai présente son travail en détail dans une autre communication [9]. Retenons qu'il est démontré que l'effet acousto-élastique dans les câbles de précontrainte est mesurable avec une incertitude acceptable, que des méthodes de mesure et de traitement en transmission sont établies. Cette approche de l'état de contrainte dans les aciers avait déjà été développée pour la détermination de la force de traction dans des boulons d'ancrage mais posait des problèmes de connaissance des qualités d'acier. Les câbles de précontrainte ont des spécifications plus serrées et sont mieux contrôlés; la méthode semble donc envisageable. Nous rencontrons cependant un problème technologique d'accès puisqu'il faut disposer soit d'un réflecteur – ce qui signifierait la présence d'une rupture - soit travailler en transmission. Dans ce cas, il faudrait au moins une fenêtre d'accès au câble au-delà de l'ancrage ou travailler en transmission entre deux fenêtres. Ceci est envisageable mais la méthode deviendrait semi-destructive et serait à comparer avec la méthode de l'arbalète. Cet aspect du programme est considéré comme achevé mais pourrait se poursuivre une fois solutionné ce problème d'accès.

En utilisant les **émissions acoustiques de l'activité corrodante**, le but est de vérifier le niveau d'attaque par corrosion et l'état d'avancement du phénomène. Il a donc fallu d'abord progresser dans la connaissance des phénomènes mis en jeu au cours de la corrosion sous tension et déterminer les méthodes d'accélération de ces phénomènes. Toutes les équipes sauf celle de l'UTC se sont dotées d'un même ensemble d'équipements et de logiciels d'analyse de chez Europhysical Acoustics associée au programme ce qui permet à la fois une intercomparaison des résultats et d'explorer les différences de résultats avec d'autres matériels. Sur des bancs de mise en tension de sections de câble d'environ 2 m, des cellules contenant un liquide corrosif – soit des solutions chlorurées soit des solutions acides contenant des ions hydrogène - permettent d'obtenir une attaque accélérée. Les émissions sont enregistrées sur des capteurs piézo-électriques résonnants placés soit sur les fils du toron à proximité des cellules soit au-delà de l'équipement de mise en tension, comme cela pourrait être fait à l'ancrage. Les différents paramètres d'influence de ces expérimentations ont été étudiés : type de solution corrodante, choix des capteurs, fixation sur les câbles et position lorsqu'ils sont au-delà de l'ancrage. Le choix de la solution corrodante reste en discussion et conduira sans doute à un mélange des deux types d'attaque pour se rapprocher de ce qui est connu sur les prélèvements in situ.

Des acquisitions systématiques ont pu alors être entreprises sur des durées d'environ 150 – 200 heures. Les premiers résultats obtenus notamment par l'INSA de Toulouse semblent montrer que la répétabilité de l'évolution temporelle du nombre des émissions acoustiques jusqu'à la rupture n'est pas très bonne. Les très nombreux paramètres de ces enregistrements sont aujourd'hui à l'étude : d'une part les évolutions temporelles du nombre de coups ou de l'énergie des coups en essayant d'identifier les phases d'amorçage, de propagation de la fissure puis de rupture, d'autre part l'identification, sur le spectre de chaque coup enregistré, des nombreux paramètres pouvant être reliés aux différentes phases de l'attaque corrosive. Des analyses en composantes principales ont permis de cerner les principaux paramètres descriptifs significatifs. Le travail de mise en relation des

différentes phases de la corrosion, des paramètres des émissions enregistrées et de l'évolution temporelle de ces émissions sont en cours. Deux présentations de l'INSA de Lyon et du LCPC [10] [11] permettent de mieux apprécier les détails de l'avancement et des questions posées par ce développement de méthode.

## **CONCLUSION**

Nous avons voulu présenter devant les spécialistes des méthodes non destructives une problématique particulièrement complexe dans le contexte du génie civil : un ensemble de technologies reposant sur des câbles tendus non accessibles dont la fonction est fondamentale pour la tenue mécanique de très nombreux grands ouvrages. Le recours aux méthodes non destructives est souvent indispensable car ces technologies ne supportent pas le démontage et dans de nombreux cas les approches semi-destructives. La double problématique de la force résiduelle et du coefficient de sécurité résiduel nous ont conduit à proposer le développement de quatre approches diagnostiques abordées par sept méthodes qui ont chacune leurs limites. Ce programme a surtout permis de progresser dans la maîtrise phénoménologique de ces différentes méthodes, par leur modélisation numérique pour certaines par des approches plus expérimentales pour d'autres mais en s'appuyant toujours sur une contribution académique. A la fin de ce programme limité à trois ans, nous n'aurons pas de méthode opérationnelle universelle, nous l'avons annoncé, mais nous aurons des informations claires sur les possibilités et les voies du passage à ces méthodes opérationnelles pour un certain nombre d'applications précises.

## **REMERCIEMENTS**

Nous voudrions d'abord remercier toutes les équipes qui nous ont rejoints pour constituer le consortium de recherche ACTENA : il convient de dire que le principal financement de ce programme vient des contributions en temps de chacun de ces laboratoires et de ces entreprises. Nous remercions également EDF Recherche et Développement ainsi que l'Agence Nationale de la Recherche sans le support financier desquelles la volonté des partenaires de s'investir sur ces sujets n'aurait pas été suffisante.

## **REFERENCES**

- [1] Breysse, Denys, Abraham, Odile, *Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 2005, 555 p.
- [2] Laguerre, L., Deschamp, M., Beam propagation in cylinder solid waveguide, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 121, No. 4, April 2007
- [3] Abraham O., Côte Ph., Impact-echo thickness frequency profile for the detection of voids in tendon duct, ACI Structural Journal, 99(3), pp239-247, 2002
- [4] Roenelle P., Valade M., Abraham, O., Impact echo B-Scan for the detection of void in tendon duct: an experimental parametric study on a real size test site, International Symposium NDT-CE, Saint-Louis, USA, pp415-422, 2006
- [5] Ostrowski, C., Auscultation des ouvrages en béton par thermographie infrarouge active et passive, Thèse de l'Université d'Artois, 2005,
- [6] Yaacoubi, S., Laguerre, L., Ducasse, E., Deschamps, M., Etude numérique et expérimentale de la propagation ultrasonore guidée en vue de l'évaluation nondestructive

des cables de precontrainte, *Journées de la COFREND*, Toulouse, 20 – 22 mai 2008.

[7] Gibson, A., Popovics, J. S. A Lamb wave basis for Analysis Impact-Echo. *Journal of Engineering Mechanical*, Volume 131, Number 4, 2005

[8] Chaix, J.-F., Lillamand, I., Ploix, M.-A., Garnier, V., Corneloup, G., Etude de l'évaluation ultrasonore des contraintes dans les bétons, *Journées COFREND, Toulouse, 20 – 22 mai 2008*

[9] Chaki Salim, Bourse, Gérard, Evaluation des contraintes par ultrasons: application au controle du serrage des assemblages boulonnées et des cables de precontrainte des ouvrages d'arts, *Journées de la COFREND*, Toulouse, 20 – 22 mai 2008.

[10] Ramadan, S., Perrin, M., Gaillet, L., Tessier, C., Idrissi, H., Contribution de la technique d'émission acoustique à la détection et à la surveillance temps réel de la corrodante des câble de béton précontraint en milieu chloruré. *Journées COFREND*, Toulouse, 20 – 22 mai 2008

[11] Perrin, M., Ramadan, S., Gaillet, L., Tessier Ch., Idrissi, H., Détection et suivi par émission acoustique de la fragilisation par l'hydrogène lors de la corrosion sous contrainte des armatures d'ouvrage d'art, *Journées COFREND*, Toulouse, 20-22 mai 2008.