RÉFLECTOMÉTRIE ULTRASONORE PAR ONDES GUIDÉES

PRINCIPE ET DESCRIPTION SOMMAIRE

OBJECTIF

Détection de ruptures de fils de précontrainte à proximité des ancrages de câbles de précontrainte (extérieure) ou de haubans. Ces ruptures sont généralement dues à un état de corrosion avancée des torons de précontrainte au niveau de la zone d'ancrage des câbles ou haubans.

La méthode décrite dans la présente fiche est basée sur une méthode qui fait l'objet d'un brevet déposé par l'IFSTTAR et Solétanche-Freyssinet, et est exploitée par Sixense sous la marque Uscan®. Elle ne préjuge pas du développement éventuel d'autres méthodes fondées sur l'utilisation des ondes US guidées.

PRINCIPE

La technique des ondes ultrasonores guidées est fondée sur la propagation d'ondes mécaniques dans une direction privilégiée et dont l'énergie reste principalement confinée dans une région bornée dans les directions orthogonales à la direction de propagation. Ces ondes sont qualifiées d'ultrasonores quand la fréquence minimale de la gamme de fréquences utilisée est supérieure à 20 kHz.

Une onde de volume est générée dans un fil de précontrainte qui appartient le plus souvent à un toron, lui-même intégré à un câble. L'onde de volume interagit ensuite avec les parois du fil pour donner lieu à une onde guidée se propageant dans la direction longitudinale. Lorsque le toron est en contact avec du coulis, une partie de l'énergie des ondes est susceptible de rayonner dans le coulis, ce qui provoque une atténuation du signal au cours de sa propagation.

La profondeur d'investigation dépend de la puissance d'émission. L'utilisation de fréquences et bandes de fréquences appropriées permet également d'optimiser cette profondeur d'investigation. L'ordre de grandeur des profondeurs d'investigation est de 2 m à partir de la tête d'ancrage pour les câbles de précontrainte extérieure.

La technologie fonctionne sur le principe qu'une rupture d'un fil (c'est-à-dire un retrait de longueur variable pouvant aller jusqu'à quelques millimètres dans la zone de rupture) produit une discontinuité dans le milieu pour la propagation de l'onde mécanique. Cette discontinuité réfléchit l'onde émise produisant un écho mesurable. Cet écho correspond à un pic graphiquement identifiable et catégorisé.

La technologie permet d'identifier la première anomalie marquée située dans la zone d'investigation depuis l'extrémité du fil. L'onde propagée interagit avec tout défaut ou altération du fil (piquage, corrosion, réduction de section, etc.), rencontré en premier lieu, ce qui affecte la visualisation des défauts situés en aval de celui-ci et influence la distance d'observation maximale. À titre d'exemple, une rupture située après une zone fortement perturbée par de la corrosion peut difficilement être vue.

Cette méthode d'auscultation permet une classification qui est donnée à titre d'exemple pour la précontrainte extérieure :

– Fil sain : l'amplitude du signal décroît sans présenter de pics ;
– Fil probablement rompu : le fil cassé présente un signal fort (figure 1) ;
– Fil indéterminé : le signal réfléchi contient une information à considérer, mais qui reste difficile à interpréter : des pics répétés sur le signal, des pics présents mais faibles, des zones de bruit important, etc.

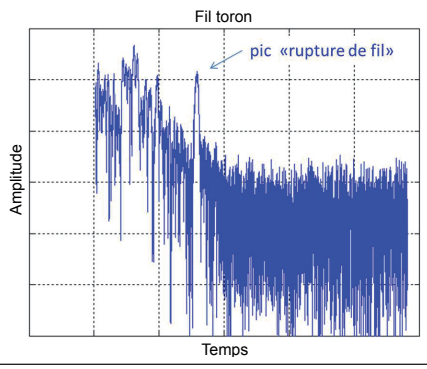


Figure 1 : pic significatif d'une rupture de fil

PRINCIPE	Cette méthode d'auscultation peut être employée selon deux approches : – une approche de diagnostic en cas de doute sur l'intégrité des têtes d'ancrage et des câbles de précontrainte ; il peut s'agir par exemple de classer l'état de conservation des câbles à l'échelle d'un ouvrage de façon à prioriser le remplacement de plusieurs câbles ; – une approche de surveillance avec réalisation d'un point zéro (référentiel de suivi) et contrôle de l'évolution du processus de rupture dans le temps.
CARACTÈRE DESTRUCTIF DE LA MÉTHODE	Très faiblement destructif, notamment pour l'accès aux extrémités des torons. (voir sujetions pratiques d'intervention).
MATURITÉ	L'application des ondes ultrasonores guidées pour la détection de défauts dans des câbles de précontrainte est très récente et fait l'objet de travaux de recherche. De nombreuses mesures sont réalisées sur de grands ouvrages depuis le milieu des années 2010 sur les haubans. et depuis 2018 sur les câbles de précontrainte extérieure.
MATÉRIEL SPÉCIFIQUE EMPLOYÉ	Le matériel spécifique employé est le suivant : – Transducteur ultrasonore ; – Couplant (gel assurant un bon couplage entre le transducteur et l'extrémité du fil ; – Baie de mesures ; – Dispositif pour tronçonner l'extrémité du toron perpendiculairement à son axe longitudinal et meuleuse pour obtenir une surface lisse des fils du toron.

MODALITÉS D'APPLICATIONS

DOMAINE D'APPLICATION	Structures haubanées ou structure comportant des câbles de précontrainte extérieure dont l'extrémité des torons est accessible (ou rendue accessible par les sujétions d'intervention préconisées ci-dessous), et ceci quel que soit le produit utilisé en injection.
SUJÉTIONS PRATIQUES D'INTERVENTION	La première phase d'intervention consiste à retirer le capot qui protège l'ancrage ainsi que le matériau de protection corrosion (cire pétrolière ou coulis de ciment). Dans les rares cas où il n'y a pas de capot d'ancrage et où la tête d'ancrage est protégée par une couche de peinture, cette dernière devra être enlevée sur les extrémités des torons pour mettre l'acier à nu (afin d'éviter l'encrassement prématuré du disque lors de la phase ultérieure de meulage). La deuxième phase se rapporte au tronçonnage/meulage des torons. Le tronçonnage a pour but de couper les fils présentant une sur-longueur et ainsi d'homogénéiser les longueurs des fils d'un toron avant de réaliser le surfaçage des extrémités de torons. La bonne préparation de l'extrémité du toron est essentielle pour une mise en œuvre de la technique la plus efficace possible. Un meulage est donc nécessaire. Le surfaçage des extrémités de toron doit rendre la surface lisse à l'endroit où sera apposé le transducteur. Toute rugosité parasite l'émission d'ultrason dans le câble et doit donc être éliminée. L'objectif est l'obtention d'une surface lisse « au toucher » permettant le bon contact du capteur et un plan de coupe perpendiculaire à l'axe longitudinal du toron.



Opération de meulage en cours (Photo Sixense)



Mesure en cours sur un fil de toron. (France Télévisions)

Les mesures sont ensuite réalisées fil par fil (en prenant bien soin de repérer les fils). Le transducteur, élément sensible capable de générer et recevoir des ondes ultrasonores, est directement relié à la baie qui génère les excitations appropriées enregistre les signaux réfléchis, les prétraite et permet leur visualisation. Le transducteur est appliqué fil à fil au moyen d'un couplant transmettant les ondes mécaniques.

Dans le laps de temps nécessaire à la remise en place du capot ou de la protection définitive des torons, il convient de protéger provisoirement les extrémités des torons pour éviter leur corrosion. Une solution consiste à appliquer une graisse non corrosive ou une galvanisation sous forme d'aérosol.

LIMITES D'UTILISATION	Dans certaines configurations, le fil ou le toron peut être absent ou la surface impossible à préparer à cause d'une sur-longueur insuffisante (la sur-longueur minimum doit être de l'ordre du cm). Parfois, l'ancrage est trop encastré à l'intérieur du béton et l'accessibilité du fil ou du toron est limitée, rendant alors la préparation impossible. La corrosion, en modifiant l'état de surface des fils, modifie les conditions de propagation des ondes ultrasonores et engendre une atténuation de l'énergie propagée le long des fils. L'orientation de la surface de réflexion due à une fissure ou une rupture par rapport au faisceau ultrasonore incident, a également une influence; ainsi une rupture de type fragile perpendiculaire à l'axe du fil produire un signal de plus forte intensité, conduisant à une détection facilitée.
PRÉCISION ET/OU SENSIBILITÉ	La sensibilité dépend de la préparation de l'extrémité des fils (angle de coupe), et du choix des paramètres d'observation retenus (capteurs, fréquences, etc.). Localisation précise (inférieure au cm) des défauts lorsque ceux-ci sont détectés.
PERSONNEL ET COMPÉTENCES	2 à 3 opérateurs sur site incluant un chargé d'investigations. Analyse du signal à *posteriori* par un analyste sous le contrôle d'un chargé d'études.
CARACTÉRISTIQUES OPÉRATOIRES	
ACCÈS À 1 OU 2 FACES	1 face
COUPURES OU RESTRICTIONS DE CIRCULATION NÉCESSAIRES	Non
RENDEMENT ET/OU ÉCHANTILLONNAGE	Temps de préparation pour un câble de type 19T15 comportant 133 fils est d'environ 1 journée, avec une équipe de 3 intervenants.
DÉLAIS DE DISPONIBILITÉ DES RÉSULTATS	Si les résultats bruts de mesure sont rapides à obtenir, l'interprétation des signaux peut demander quelques jours.
PERTURBATIONS DU TRAFIC SUR LES MESURES	Non
PERTURBATIONS DE L'ENVIRONNEMENT SUR LES MESURES	Dans le cas où l'opérateur est protégé des intempéries, l'environnement n'a pas d'influence sur le mode opératoire et la qualité des mesures réalisées.
RISQUES POUR LES UTILISATEURS OU LE PUBLIC	La découpe des torons produit des projections d'étincelles et des résidus de découpe. Il convient de porter les EPI standards avec une visière intégrale et des gants épais, et de ne pas porter de matières synthétiques ou facilement inflammables. Dans le cadre de câbles de précontrainte extérieure, et selon les résultats d'une analyse de risques, il peut être nécessaire de sécuriser le site par sanglage des câbles entre eux afin de limiter l'impact en ras de rupture d'un câble, et de prendre des dispositions (robotisation ou automatisation de certaines taches) pour réduire le temps d'accès derrière la tête investiguée.
ENCOMBREMENT – POIDS	Faible encombrement
AVANTAGES – INCONVÉNIENTS	
AVANTAGES	Un atout indéniable dans l'inspection de zones non-accessibles de câbles au-delà des ancrages. En effet, il s'agit actuellement, de la seule méthode capable de détecter des ruptures de fils sur une longueur de 2 m après les ancrages de câbles de précontrainte (extérieure) injectés au coulis de ciment.
INCONVÉNIENTS	Détection non systématique de ruptures selon la configuration des désordres dans le câble.
DISPONIBILITÉ – COÛT	
DISPONIBILITÉ	Rare
COÛT	Moyen à élevé

RÉFÉRENCES

NORMES – MODES OPÉRATOIRES – ARTICLES	Laguerre L., O. Durand, R. Colin, European Patent EP3274702, "Method for detecting a defect in a metal wire of a set of metal wire in particular for an anchoring area of a civil engineering structure" Applicants : Soletanche-Freyssinet and Ifsttar, 2018 Laguerre L., F. Treyssède, "Non-destructive evaluation of seven-wire strands using ultrasonic guided waves", European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2011, Vol. 15, n°4, pp 487-500 Treyssède F., L. Laguerre, "Investigation of elastic modes propagating in helical multi-wire waveguides", Journal of Sound and Vibration, 2010, Vol. 329, n°10, pp 1702-1716 Laguerre L., A. Grimault, M. Deschamps, "Ultrasonic transient bounded beam propagation in a solid cylinder waveguide embedded in a solid medium", Journal of the Acoustical Society of America, 2007, Vol. 121, n°4, pp 1924-1934