

# Auscultation par émission acoustique d'ancrages de câbles multicouches

Laurent GAILLET  
Christian TESSIER  
Daniel BRUHAT  
Richard MICHEL

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

## RÉSUMÉ

L'auscultation non destructive des ponts suspendus ou à haubans a été étudiée. La technique d'émission acoustique (EA) a été utilisée pour la détection de fils rompus dans les ancrages de câbles monotorons multicouches. Par cette technique, il est possible de détecter la présence de fils rompus sous un culot. L'activité acoustique d'un câble sain sous excitation extérieure a été comparée à celle d'un câble présentant des défauts. La caractérisation du frottement entre fils rompus et intacts met en évidence la présence de ces défauts. Celle-ci est déterminée à l'aide de paramètres d'EA simples et reproductibles, bien que quelques précautions doivent être prises.

**DOMAINE :** Ouvrages d'art.

## ABSTRACT

*DIAGNOSTIC ASSESSMENT OF MULTI-LAYER CABLE ANCHORAGES BY MEANS OF ACOUSTIC EMISSIONS*

*The non-destructive diagnostic evaluation of suspended bridges or cable-stayed bridges is studied herein. The acoustic emission (AE) technique has been used for the purpose of detecting broken wires within single-strand, multi-layer cable anchorages. Thanks to this technique, it is now possible to detect the presence of ruptured wires underneath a socket base. The acoustic activity of an intact cable submitted to an external load is compared to that of a defective cable. Characterization of the friction between broken and unbroken wires highlights the presence of these particular flaws, which are determined using a series of simple and reproducible AE parameters, provided a number of precautions have been taken.*

**FIELD:** Structural engineering.

## INTRODUCTION

Les câbles sont des éléments structuraux fondamentaux des ouvrages de franchissement de longue portée, tels que les ponts en béton précontraint, les ponts suspendus et les ponts à haubans. Sur un total d'environ 100 000 ouvrages d'art en France, près de 23 000 relèvent de l'État. Parmi ceux-ci, 48 % (en superficie) sont des ouvrages en béton précontraint, des ponts à haubans ou des ponts suspendus [1]. Leur durabilité et leur sécurité structurelle dépendent non seulement du bon comportement des câbles, mais aussi de la capacité à détecter à temps les défauts qui les affectent [2]. Or, la détection de ces endommagements (ruptures de fils, développement de la corrosion) est rendue souvent difficile soit par leur propre protection (gaine, coulis, etc.), soit par leur disposition dans la structure (câbles noyés dans le béton ou traversant des entretoises massives, parties de câbles sous collier ou dispositif d'ancrage, etc.).

Les moyens actuellement disponibles permettent l'auscultation des câbles dans leurs parties accessibles (contrôle visuel, contrôle électromagnétique) et leur surveillance (surveillance acoustique fondée sur l'énergie libérée lors d'une rupture de fil tendu, développée au LCPC depuis les années 1970), mais il n'y a actuellement pas de méthode pleinement satisfaisante pour ausculter les câbles dans leurs parties non accessibles [3-5]. Parmi les voies possibles, l'émission acoustique paraît présenter de très fortes potentialités. Les possibilités offertes en matière d'auscultation par cette méthode ont été mises en évidence notamment en milieu industriel, mais nécessitent d'être étudiées et adaptées afin d'être intégrées au domaine du génie civil, encore peu bénéficiaire d'applications [6-8]. Pour les câbles de génie civil, il s'agit en tout premier lieu de repérer les défauts existants, tels que la corrosion ou le frottement d'un fil rompu sur ses voisins, même s'ils sont à l'origine d'une activité acoustique de niveau d'énergie beaucoup plus faible que celle libérée lors d'une rupture. Les travaux relatés ici concernent la détection de fils rompus dans les ancrages de câbles monotorons multicouches, et donc s'intéressent à l'auscultation des ponts suspendus ou à haubans utilisant cette technologie. Ils ne

constituent qu'une étape d'une démarche d'ensemble qui vise à détecter les différents défauts présents dans l'ensemble des configurations rencontrées.

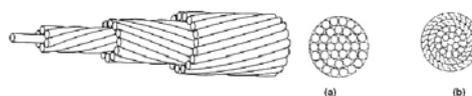
## CONFIGURATION DES CÂBLES

Quelques ouvrages parmi les plus anciens ont utilisé des câbles à fils parallèles ou des câbles torsadés (constitués de torons de faible diamètre – 7 à 19 fils – enroulés autour d'une âme centrale, métallique ou textile), mais la majorité est constituée de câbles monotorons multicouches, à fils clairs ou galvanisés, clos ou non [9]. Les fils de section circulaire (d'un diamètre de 4 à 5 mm) sont assemblés par toronnage de couches concentriques de fils hélicoïdaux. Le sens de l'hélice est inversé entre les couches successives pour éviter le déroulage du toron (câble à pas croisés). Les câbles les plus courants comportent 6 à 8 couches (127 à 217 fils). Dans certains cas, une ou deux couches externes sont constituées de fils profilés en trapèze ou en Z, assurant la fermeture du câble par emboîtement mutuel. Les câbles clos ne sont cependant pas d'une étanchéité absolue (Fig. 1). Les câbles les plus utilisés maintenant, notamment en cas de remplacement de câbles anciens, comportent des fils galvanisés.

Les principales parties cachées de ces câbles, qui font l'objet des recherches relatées ici, sont les culots d'ancrage (ponts suspendus ou à haubans) et les parties sous collier d'attache de suspentes (ponts suspendus).

Les câbles monotorons multicouches sont ancrés par des douilles en acier moulé ou en acier mécano-soudé permettant la réalisation d'un culot conique ou pyramidal. Cet ancrage est obtenu en détournant l'extrémité du monotoron, dont les fils ont été recourbés pour former un chignon, qui est ensuite noyé dans un alliage à bas point de fusion (alliages de zinc) ou une résine thermodurcissable (polyester, époxy, etc.). Cet ancrage mobilise les conditions d'adhérence des fils et les efforts de compression induits par la forme conique du culot lorsque le câble est tendu [10, 11]. Les premiers centimètres de câble, avant même leur sortie des douilles, peuvent présenter des ruptures de fils par corrosion ou par fatigue (Fig. 2).

■ Fig. 1  
Câble multicouche à pas croisés. Couches externes en fils ronds (a) ou fils Z (b).

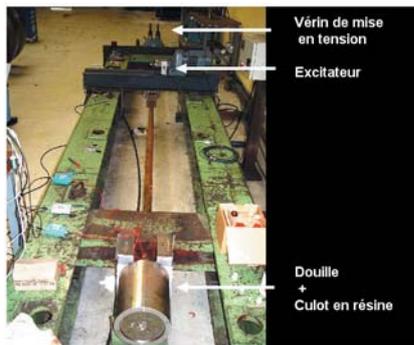


■ Fig. 2  
Photographie d'un ancrage.  
Ruptures de fils en sortie de douille.

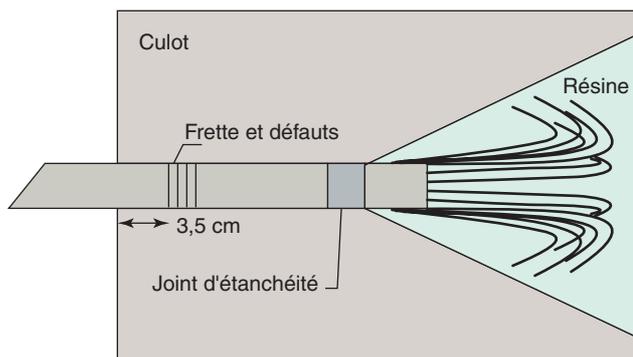


## DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX

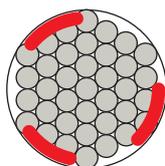
Les dispositifs expérimentaux mis en œuvre ont pour objectif de reproduire les conditions d'ancrage des câbles multicouches en provoquant lorsqu'on le souhaite des défauts maîtrisés (fils rompus) et en détectant les signaux d'émission acoustique lorsque ces câbles sont mis en vibration. Lors de ces essais, un banc de sollicitation spécifique aux câbles est utilisé (Fig. 3). Le câble d'une longueur libre de 7,10 m est mis en vibration en appliquant une force transversale avec un exciteur mu par un moteur électrique. Ce dernier a été optimisé par adjonction d'un variateur de vitesse permettant de faire vibrer le câble en place dans le sens vertical, avec des déplacements de 5 à 15 mm, pour une gamme de fréquences comprises entre 10 et 30 Hz adaptée aux présentes applications. Le câble a été mis en traction à une force de 200 kN et est isolé des plaques d'ancrage par un absorbant acoustique. Le câble utilisé est un multicouche (7 couches) de 56 mm de diamètre dont les deux couches extérieures sont composées de fils à profil en Z.



■ **Fig. 3**  
Photographie d'un câble mis en place sur le banc de sollicitation.



■ **Fig. 4**  
Schéma de principe de l'ancrage d'un câble dans une douille avec culot conique.

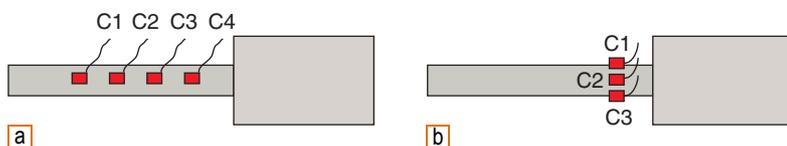


Trois zones endommagées figurées en rouge

Deux assemblages ont été réalisés, un assemblage de référence sans défauts, l'autre avec création de ruptures artificielles sur le câble avant sa mise en place dans le culot d'ancrage (Fig. 4). Trois zones de ruptures de fils sont créées sur le même câble et dans la même section, avec trois niveaux d'endommagements espacés de 120° : zone 1, 7 fils ; zone 2, 2 fils ; zone 3, 5 fils ; ces fils sont situés sur la couche extérieure. Comme le nombre total de fils du câble est de 169 et celui de la couche extérieure de 42, ces conditions correspondent à un endommagement important. La configuration choisie tient compte du retour d'expérience sur les endommagements réellement rencontrés, dans un souci de mieux représenter les modes de dégradation des câbles en service.

Le système d'émission acoustique (EA) mis en œuvre est une chaîne à quatre voies couplée à son propre système de traitement et de visualisation des données. Les signaux provenant du câble sont recueillis à l'aide de capteurs d'EA piézo-électriques résonants à 300 kHz qui sont collés sur ce dernier [12]. Ces signaux sont préamplifiés (gain de 40 dB) puis filtrés entre 20 et 1 200 kHz avant de parvenir à la chaîne d'EA proprement dite qui dispose d'un filtrage numérique actif entre 10 et 600 kHz.

Deux configurations ont été réalisées, en se fondant sur les configurations sur câble déjà expérimentées par d'autres auteurs [13-15], la première pour caractériser, aux différents capteurs, l'émission acoustique provenant des trois zones endommagées (Fig. 5b), la seconde pour étudier la propagation des signaux avec trois ou quatre capteurs placés dans le prolongement de la zone endommagée 2 située à l'intérieur du culot (Fig. 5a). Les références d'essai C82 à C90 concernent le câble avec défauts alors que celles numérotées C100 à C105 concernent le câble sain.



■ **Fig. 5**  
Configurations des capteurs lors des essais en émission acoustique.

### Mise au point des conditions d'acquisition

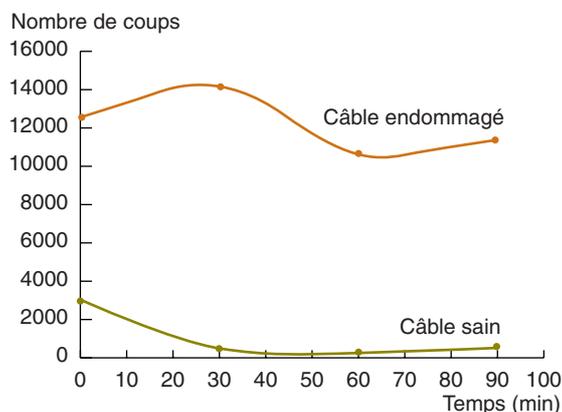
On vérifie tout d'abord l'influence du seuil de détection sur l'acquisition de l'activité acoustique en faisant varier le seuil de 30 à 40 dB pour les capteurs. On constate que les résultats sont cohérents avec une augmentation (pour une même configuration) de l'activité acoustique lorsque le seuil de détection est abaissé. Pratiquement, on choisit le seuil de détection de 35 dB pour éviter de saturer le système d'EA avec des bruits parasites et des réflexions multiples à 30 dB. Cela permet également d'acquérir des événements acoustiques bien liés au phénomène étudié (frottement des fils rompus sur leurs voisins) et de réaliser un traitement statistique des événements.

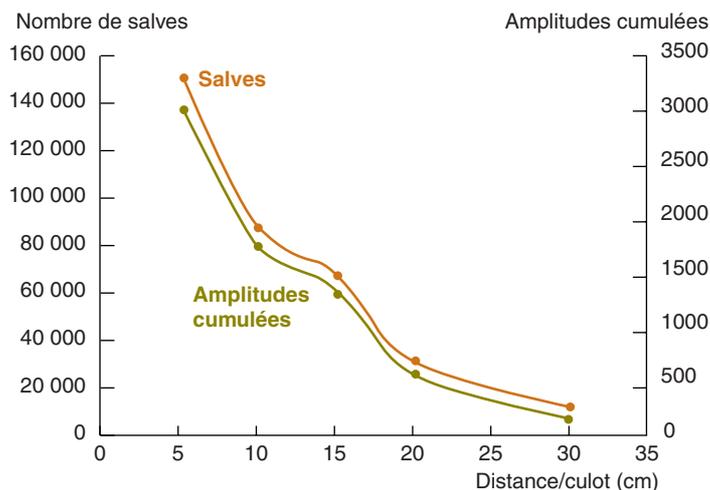
Une autre préoccupation consiste à caractériser le bruit de fond rencontré dans les deux configurations. Pour cela, les capteurs ont été répartis le long du câble pour détecter l'éventuel bruit de fond provenant de l'excitateur ou de la résine d'enrobage au niveau du culot. Les capteurs sont positionnés dans le prolongement des fils rompus et à ces mêmes positions pour le câble sain. Le seuil de détection est fixé à 35 dB. Un essai d'acquisition d'EA a tout d'abord permis de démontrer qu'il n'y a pas d'activité acoustique quand le câble n'est pas sollicité. Le moteur est toujours en marche lors de l'acquisition, car il n'y a pas de bruit de fond ; le mouvement vibratoire du câble décroît avec le temps lorsque le moteur est à l'arrêt et il faut maîtriser les caractéristiques de la vibration pendant l'auscultation.

Lorsque que le câble est mis en vibration suivant des amplitudes croissantes à partir de 5 mm, on remarque une activité acoustique ne provenant pas de l'ensemble excitateur, mais du culot. En effet, pour une même salve détectée, les capteurs fixés près du culot sont mis en vibration en premier puis vient le tour du capteur positionné près de l'excitateur. Le nombre de coups pour un capteur placé à 100 mm de la douille durant l'acquisition passe de 300 pour un câble sans défauts à 10 000 pour un câble endommagé. De plus, l'activité acoustique détectée sur câble sain diminue après plusieurs essais et a été attribuée à un phénomène de dégradation de la résine (Fig. 6). Cette fissuration progressive de la résine induit des caractéristiques en EA bien différentes des signaux provenant des défauts. Ce phénomène a déjà été identifié par d'autres auteurs sur des câbles multicouches sollicités en traction [14, 16]. On en déduit que la forte activité acoustique enregistrée sur le câble avec des fils rompus provient majoritairement de ces défauts avec une très faible part attribuée à la dégradation de la résine. Ce bruit de fond est originaire des terminaisons du câble [17].

Un paramètre important à prendre en compte est l'atténuation, bien que les distances explorées soient faibles. Le capteur le plus proche de la source détecte évidemment le plus grand nombre d'événements, mais présente également une répartition plus homogène des données acquises. La tentative de mesure de l'atténuation dans le câble a conduit à un résultat surprenant (Fig. 7). Pour expliquer le fait que la décroissance n'est pas strictement exponentielle, on peut avancer comme hypothèse que les ondes acoustiques se propagent entre 5 et 15 cm dans une zone où les fils présentent un meilleur contact entre eux car ils sont liés au système douille-câble, ce qui engendre une plus faible dispersion de l'énergie acoustique aux interfaces lors de la propagation de l'onde [18]. Les valeurs reportées sur le graphique sont des moyennes de quinze essais et on retrouve cette allure pour quasiment tous les essais.

**Fig. 6**  
Activités acoustiques d'un câble sain et d'un câble endommagé durant les premières dizaines de minutes. Nombre de coups cumulés par essai. Amplitude de 5 mm.

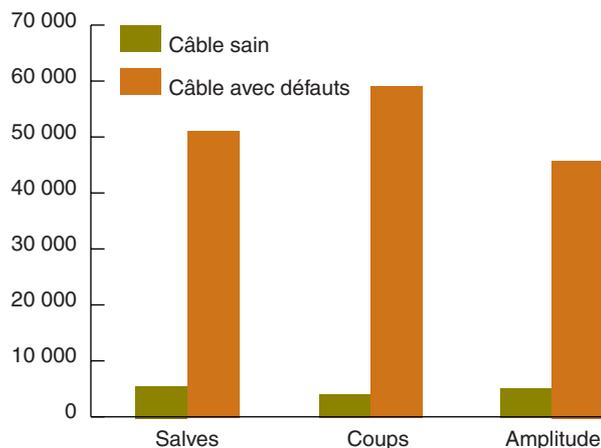




■ **Fig. 7**  
Diminution de l'activité EA détectée en fonction de la distance des capteurs par rapport au culot.

## Comparaison câble sain/câble avec défauts

La comparaison en terme d'activité acoustique entre les deux configurations (câble sain ou avec défauts) est réalisée avec comme paramètres cumulés d'EA le nombre de salves, le nombre de coups et l'amplitude. Ce sont des paramètres globaux mais, dans un souci de transfert de cette technique aux applications sur site, le traitement des données doit être simple. La distinction est relativement facile entre les deux câbles en comparant les paramètres d'EA, cela étant vérifié pour les trois principaux paramètres (Fig. 8).



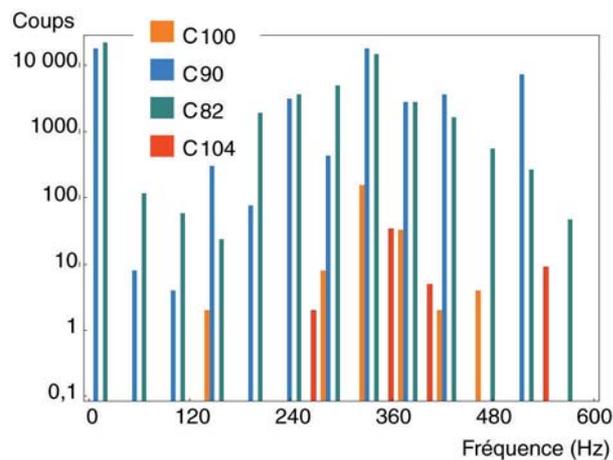
■ **Fig. 8**  
Comparaison du nombre de coups, de salves et de l'amplitude suivant la présence ou non de défauts sur les câbles. Moyenne d'essais. Paramètres d'EA cumulés.

On peut affiner cette première analyse en utilisant des paramètres d'EA complémentaires. Cette seconde analyse confirme bien la première, plus globale. Ainsi, la distribution en amplitude des signaux obtenus dans le cas d'un câble sain est différente de celle en présence de défauts. Dans le premier cas, elle ne dépasse pas 40 dB ; dans le second, elle s'étend jusqu'à 65 dB (Fig. 9) [19]. Cela peut être rapproché du calcul du paramètre  $b$ , défini comme l'exposant de la courbe de distribution sous la forme  $(A/V_0)^{-b}$  des amplitudes, approche classique pour les utilisateurs de l'EA [20].

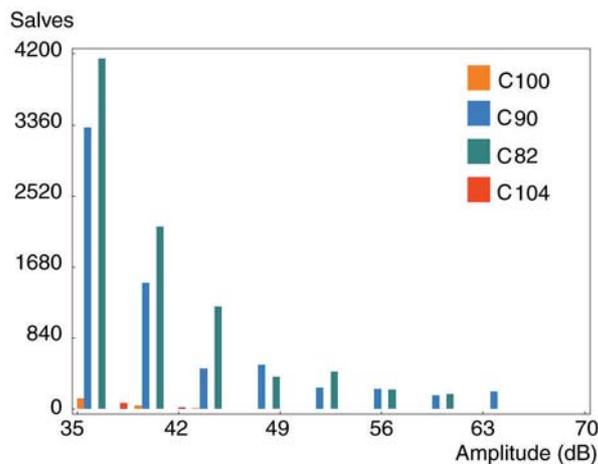
De même, la répartition fréquentielle est très dispersée sur un câble endommagé par rapport à un câble sans défauts. Cette dernière présente une distribution fréquentielle centrée autour de 350 kHz attribuée à la fissuration de la résine [14, 16] (Fig. 10). En effet, cette valeur de 350 kHz est proche de la fréquence de résonance du capteur employé et comme cette fissuration est une faible source d'énergie, elle est seulement détectable à cette fréquence.

De la même manière, une analyse en terme d'énergie permet de constater que de nouvelles populations plus hautes en énergie apparaissent en présence de défauts. Ces populations sont plus hautes en énergie et en nombre de coups et caractérisent certainement le frottement interfilaire provenant des fils rompus sollicités (Fig. 11).

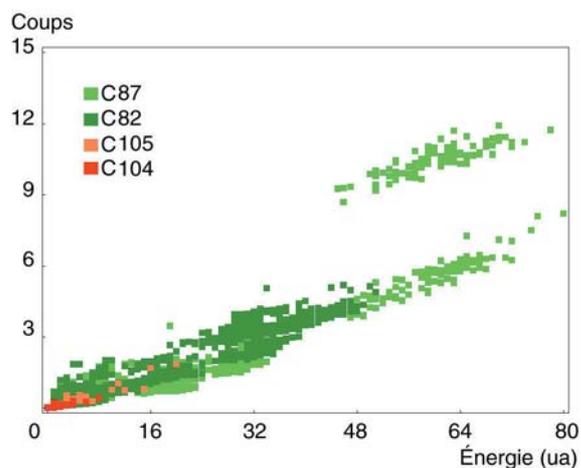
**Fig. 9**  
Répartition fréquentielle (FFT à 30 %) des signaux acoustiques acquis en présence (C82-90) ou en absence de défauts (C100-104).



**Fig. 10**  
Distribution en amplitude des salves d'EA sur câbles sain (C100-104) et endommagé (C82-90).



**Fig. 11**  
Répartition énergétique des événements acoustiques détectés (sans défauts : C104-105 ; avec défauts : C82-87).



## Caractérisation du frottement interfilaire

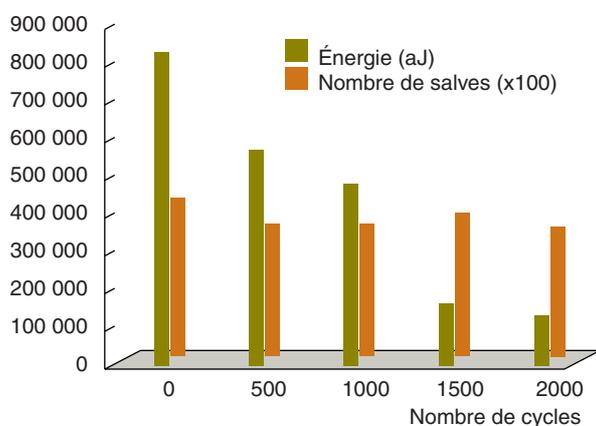
La présence des défauts artificiellement créés (fils rompus) induit un frottement entre ces derniers et les fils intacts lorsque le câble est mis en vibration, ce qui est à l'origine de l'activité acoustique enregistrée durant l'acquisition. D'autres sources sont détectées comme le craquement de la résine ou encore le frottement des fils externes du câble sur le culot, mais elles sont négligeables en terme d'EA par rapport au frottement interfilaire.

Ce déplacement relatif (fretting fatigue) entre ces deux types de fils est un phénomène qui ne présente pas d'effet Kaiser comme le mécanisme lié aux ruptures répétées de fils [13, 15], mais il apparaît une évolution des conditions de contact en fonction du nombre de sollicitations effectuées et plu-

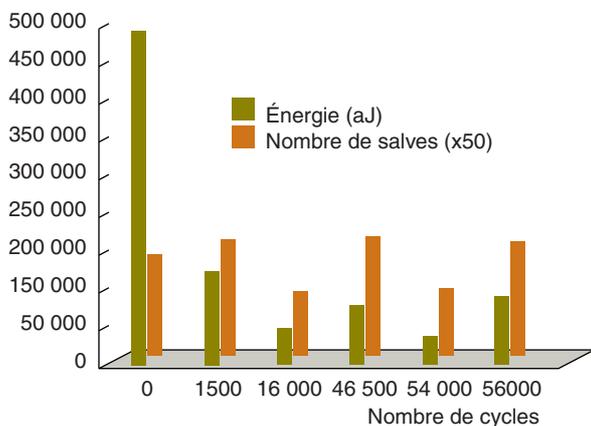
sieurs auteurs retrouvent cette évolution en EA [21, 22]. Toutefois, en analysant les données acoustiques pour un temps d'acquisition de deux minutes, on remarque que cette activité acoustique est relativement constante pour les principaux paramètres EA que sont le nombre de salves, le nombre de coups et l'énergie. Il n'y aurait pas d'évolution majeure du fretting fatigue durant ce faible temps d'acquisition.

Par contre, il a été constaté que les résultats de l'EA acquise variaient entre des essais espacés de plusieurs centaines de cycles et qu'une évolution des phénomènes sources devait intervenir, liée probablement aux conditions de contact entre les fils. Quantifier cette évolution dans le temps en prenant en compte les paramètres d'EA classiques à partir d'essais enregistrés sur une période couvrant quinze jours a été tenté. La comparaison entre des essais rapprochés (faible nombre de cycles entre eux) permet de remarquer que l'énergie décroît pour atteindre rapidement un palier alors que le nombre de salves détectées est relativement constant (Fig. 12). Lorsque l'on étudie ces mêmes paramètres sur une durée relativement importante de sollicitations, les paramètres acoustiques sont bien conservés avec des valeurs constantes sur le nombre de salves et l'énergie (Fig. 13). Le fait de solliciter le câble pendant une durée de quelques minutes avant d'acquérir les signaux doit donc permettre de stabiliser les paramètres d'EA, notamment l'énergie. Un pseudo-équilibre du système câble et ancrage est donc obtenu au bout de quelques minutes de mise en vibration, correspondant à environ 200 cycles. Ce caractère partiellement transitoire du frottement donne une première estimation des durées d'acquisition à prévoir sur site pour obtenir un essai représentatif en terme d'activité acoustique.

De plus, ce frottement interfilaire dépend fortement de la sévérité de l'endommagement. Ainsi, l'activité acoustique globale est proportionnelle au nombre de fils rompus artificiellement sur le câble endommagé qui modifient les conditions de contact interfilaire [22, 23] (Fig. 14). Le paramètre d'EA le plus pertinent est le nombre de coups acquis durant l'essai, qui devrait permettre de donner un premier diagnostic semi-quantitatif de l'état de dégradation d'un câble lors d'une auscultation.



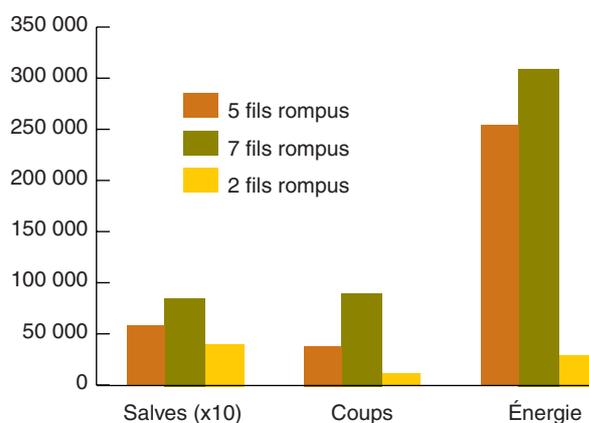
**Fig. 12**  
Évolution de l'énergie acoustique (aJ) et du nombre de salves en fonction du nombre de cycles effectués par le câble. Faible nombre de cycles.



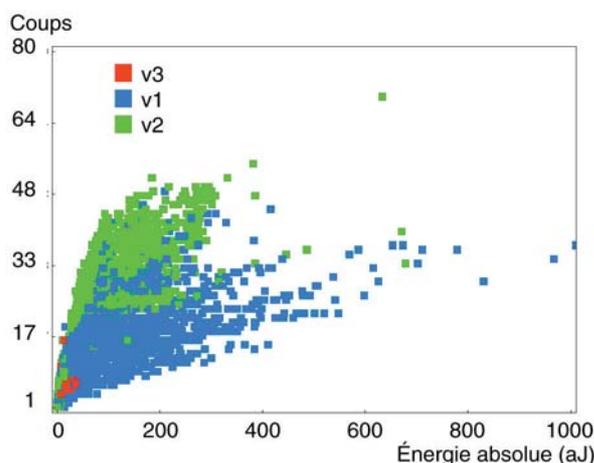
**Fig. 13**  
Évolution de l'énergie acoustique (aJ) et du nombre de salves en fonction du nombre de cycles effectué par le câble. Nombre de cycles important.

L'analyse en termes d'énergie acoustique, qui augmente avec l'énergie dissipée par le phénomène de frottement entre fils, conduit aux mêmes résultats que précédemment, avec une distinction nette suivant le niveau de dégradation du câble [22]. Trois populations se distinguent en termes d'énergie et de nombre de coups suivant l'ordre croissant de l'endommagement (Fig. 15).

**Fig. 14**  
 Activité acoustique en fonction  
 du nombre de fils rompus sur le câble  
 à l'intérieur du culot d'ancrage.



**Fig. 15**  
 Distribution du nombre de coups en fonction  
 de leur énergie. v1 : 7 fils rompus ;  
 v2 : 5 fils rompus ; v3 : 2 fils rompus.



## CONCLUSION

L'objectif de ces essais d'émission acoustique était de répondre à trois grandes questions concernant la caractérisation du frottement interfilaire dans un câble présentant des fils rompus sous culot. La première était de savoir si ce type de mécanisme pouvait être détecté par cette technique de contrôle par émission acoustique. La réponse est positive bien que l'atténuation ne permette pour l'instant que des mesures à quelques dizaines de centimètres des ruptures, mais ce positionnement est compatible avec celui des défauts rencontrés sur ouvrage réel. La deuxième question était de savoir si l'on pouvait déterminer des paramètres d'EA simples et fiables pour caractériser ces défauts. On peut dire que certains paramètres d'EA sont reproductibles pour ces essais : il s'agit de l'amplitude, du nombre de salves et de coups, mais des précautions doivent être prises. Il est nécessaire de prévoir des durées d'acquisition de plusieurs minutes et d'atteindre un pseudo-équilibre en sollicitation avant l'acquisition afin d'obtenir une reproductibilité optimale. La troisième question était de savoir si on pouvait distinguer l'activité acoustique d'un câble sain par rapport à celle d'un câble présentant des défauts. La réponse est encore positive car le câble sans défauts ne génère qu'une très faible activité acoustique.

La prochaine étape sera de préciser ces premiers résultats, notamment pour savoir quel niveau de précision on peut atteindre par la technique d'EA. Une analyse plus élaborée (formes des salves recueillies, corrélation des paramètres EA, etc.) devrait permettre d'améliorer la connaissance du phénomène de frottement interfilaire et d'élaborer un outil fiable d'auscultation des câbles métalliques. Le bruit de fond naturel de l'ouvrage est également un paramètre à prendre en compte car il sera présent lors des auscultations sur ouvrages d'art.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] SETRA-LCPC-LROP, *Campagne d'évaluation 2000*, Dossier national IQOA, **2000**, 250 pages.
- [2] WATSON S.C., STAFFORD D., Cables in Trouble, *Civil Engineering*, **23**, **1988**, pp. 38-41.
- [3] WEISCHEDEL H.R., The inspection of wire ropes in service : a critical review, *Mat. Eval.*, **43**, **1985**, pp. 1592-1605.
- [4] BREVET P., ROBERT J.-L., AUBAGNAC C., *Acoustic monitoring of bridge câbles : application to a prestressed concrete bridge*, DEStech Publications Inc., First European Workshop on Structural Health Monitoring, Paris, July **2002**, pp. 10-12.
- [5] ROBERT J.-L., BRUHAT D., GERVAIS J.-P., LALOUX R., RUMIANO N., DESMAS M., Surveillance acoustique des câbles, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **169**, septembre-octobre **1990**, pp. 71-78.
- [6] COLOMBO S., MAIN I.G., FORDE M.C., Assessing damage of reinforced concrete beam using « b-value » analysis of acoustic emission signals, *J. Materials in Civil Engineering*, **15**, **2003**, pp. 280-286.
- [7] SISON M., DUKE J.C. JR., LOZEV M.G., CLEMENA G.G., Analysis of acoustic emissions from a steel bridge hanger, *Nondestructive Evaluation*, **10**, **1998**, pp. 123-145.
- [8] LI Z., LI F., ZDUNCK A., LANDIS E., SHAH S.P., Application of Acoustic Emission Technique to Detection of Reinforcing Steel Corrosion in Concrete, *Aci materials journal*, **1**, 95, janvier-février **1998**, pp. 68-77.
- [9] WALTON J.M., Developments in steel cables, *J. Construct. Steel Res.*, **39**, **1996**, pp. 3-29.
- [10] BREVET P., SIEGERT D., fretting fatigue of seven wire strands axially loaded in free bending fatigue tests, *OIPEEC bulletin*, **71**, **1996**, pp. 23-48.
- [11] SIERGERT D., *Mécanismes de fatigue de contact dans les câbles de haubannage du génie civil*, Thèse de doctorat, Université de Nantes, Nantes, **1997**, 252 pages.
- [12] WILLIAMS R.V., *Acoustic Emission*, Adam Hilger Ltd, **1980**, 116 pages.
- [13] CASEY N.F., *The nondestructive testing of wire ropes by acoustic emission and other techniques*, Ph.D. thesis, University College Cardiff, Cardiff, **1984**, 354 pages.
- [14] HANZAWA M., YOKOTA H., TODA Y., YOKOYAMA K., Fatigue behaviour of large diameter wire ropes, *Society of Petroleum Engineers J.*, **45**, **1982**, pp. 421-428.
- [15] HARRIS D.O., DUNEGAN H.L., A.E. testing of wire ropes, *Mater. Eval.*, **8**, **1974**, pp. 6-17.
- [16] HOLFORD K.M., *The non-destructive testing of wire ropes by acoustic emission*, PhD thesis, University College Cardiff, Cardiff, **1987**, 315 pages.
- [17] CASEY N.F., TAYLOR J.L., The acoustic emission of steel wire ropes, *Wire Industry*, **601**, **1984**, pp. 79-282.
- [18] SCRUBY C.B., Quantitative emission techniques, *Research Tech. In NDT*, **8**, **1986**, pp. 141-210.
- [19] ONO K., Amplitude distribution analysis of A.E. signals, *Mater. Eval.*, **901**, **1976**, pp. 177-184.
- [20] POLLOCK A.A., Acoustic emission amplitude distribution, *Inter. Advances in Nondestruct. Testing*, **7**, **1981**, pp. 215-239.
- [21] ZHANG D.K., GE S. R., QIANG Y. H., Research on the fatigue and fracture behavior due to the fretting wear of steel wire in hoisting rope, *Wear*, **255**, **2003**, pp. 1233-1237.
- [22] SKÅRE T., KRANTZ F., Wear and frictional behaviour of high strength steel in stamping monitored by acoustic emission technique, *Wear*, **255**, **2003**, pp. 1471-1479.
- [23] SHI Z., JARZYNSKI J., JACOBS L., Quantitative acoustic emission from localized sources in material fatigue processes, *AIP Conference Proceedings*, **509**, **2000**, pp. 367-374.