

# Monitoring des câbles de structures du Génie Civil par combinaison de techniques vibratoires et émission acoustique

DIA Abdou, DIENG Lamine, GAILLET Laurent

## RESUME

En étudiant la présence de  **fils coupés dans des câbles**  de structures du Génie Civil, des  **méthodes dynamiques**  de contrôle non destructif (CND) ont été proposées afin de  **détecter, de localiser et de quantifier**  ces endommagements. Cependant lorsque les fils rompus sont situés près ou dans les ancrages, la localisation devient impossible avec ces méthodes dynamiques.  **L'émission acoustique (EA)**  vient ainsi en  **complément**  pour  **affiner la localisation**  par un positionnement des capteurs d'EA autour de la zone de rupture identifiée par méthodes dynamiques. Pour  **identifier et séparer les signaux d'EA**  dus aux frottements des fils coupés des autres signaux enregistrés, des  **analyses paramétriques et statistiques par Machine Learning**  sont réalisées. La  **combinaison des deux méthodes**  donne une méthode multitechnique permettant de détecter, localiser et estimer la sévérité d'un endommagement de type ruptures de fils d'un câble, qu'il soit en partie courante ou dans les ancrages.

**Mots-clefs :** méthodes dynamiques, émission acoustique, câbles du Génie Civil, Machine Learning

## I. INTRODUCTION

Constatant qu'au moins 25 000 ponts sont en mauvais état structurel, le rapport d'information de 2019 fait au nom de la commission de l'aménagement du territoire et du développement durable de France soulignait qu'il est indispensable de « sortir d'une culture de l'urgence au profit d'une  **gestion patrimoniale des ponts en créant des outils pour améliorer la connaissance et le suivi des ponts**  » (MAUREY et al., 2019). Pour apporter  **une**  réponse à ces besoins de suivi de santé des structures, les méthodes dynamiques examinant les changements des caractéristiques vibratoires d'une structure et les méthodes d'émission acoustique (EA), deux méthodes de CND, ont été utilisées afin de  **détecter, localiser et estimer**  des ruptures de fils dans des câbles du Génie Civil. En effet, pour une caractérisation complète d'un défaut, quatre niveaux d'informations à atteindre sont identifiés (Rytter, 1993) : la détection, la localisation, la quantification et l'estimation de la durée de vie résiduelle de la structure. En se basant sur les  **méthodes dynamiques**  avec la variation des paramètres modaux (fréquences naturelles, déformées modales, amortissements), des outils ont été développés permettant  **d'atteindre les deux premiers niveaux**  (la détection et la localisation) (Doebling et al., 1998; Le Petit, 2014) mais rarement au-delà. En outre lorsque le défaut est situé dans les ancrages, la détection devient impossible. Quant à la méthode d'émission acoustique (EA),

elle est reconnue comme étant une méthode efficace et sensible pour la détection de signaux acoustiques dus à différents types de défauts (Gholizadeh, 2016; Perrin et al., 2010). Cependant pour identifier les signaux engendrés par un défaut dans une structures, au-delà des **problématiques de traitements des signaux** pour les séparer et ne s'intéresser qu'à ceux dus au défaut, il est nécessaire d'être à proximité de ce dernier pour pouvoir le détecter (Zejli et al., 2006). Ainsi pour minimiser cette atténuation des signaux acoustiques, il est nécessaire de positionner les capteurs d'EA autour des zones de défauts. Pour ce faire, nous nous sommes basés sur les zones de localisation obtenues avec les méthodes dynamiques pour une meilleure détection des signaux et affiner la localisation.

## II. MOYENS ET PARAMETRES D'ESSAIS EXPERIMENTAUX :

Les essais ont d'abord été menés sur des T15.7, puis sur câbles bicouches et en fin sur un câble d'énergie marine renouvelable (câble EMR) de neuf couches. Le T15.7 est un câble à sept fils : un fil central et six fils hélicoïdaux enroulés autour du fil central (Figure 1). Quant au câble monotoron bicouches, il est constitué d'un fil central et de deux couches de fils hélicoïdaux (Figure 2Figure 2).

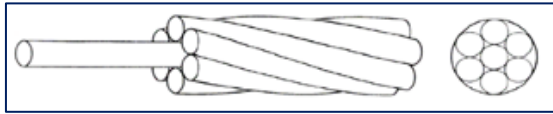


Figure 1 : câble T15.7



Figure 2 : câble monotoron bicouches

Les câbles sont montés sur un banc de sollicitation de longueur totale 10 m et de capacité en traction de 300 kN. Ce banc est muni d'un bloc amovible permettant de l'utiliser sur moins de 10 m. La tension du câble est assurée par un vérin hydraulique muni d'un peson afin de mesurer la tension appliquée. En se basant sur les valeurs usuelles de tension des câbles en Génie Civil, les câbles que nous avons utilisés sont tendus à 30% de leurs forces de rupture. Ce banc est muni d'un excentrique relié à un moteur électrique et permet d'appliquer des excitations de types harmoniques avec un couple fréquence-amplitude donné. Les amplitudes varient de 5 mm à 30 mm avec un pas de 5 mm et les fréquences de 1 Hz à 8 Hz. Avec un couple fréquence-amplitude donné, le câble est excité durant 10 minutes ; un essai avec une fréquence de 2Hz et 10 mm d'amplitude sera dénommé essai 2Hz10mm. En plus de l'excentrique principalement utilisé pour l'EA, un marteau instrumenté a été utilisé. Les déplacements obtenus avec le marteau sont enregistrés durant 45 secondes pour une fréquence d'échantillonnage de 300 Hz. Le câble T15.7 est fixé sur le banc d'essai avec des clavettes d'ancrage de 10 cm. Pour des conditions d'appui plus proche du réel et pour créer des défauts dans les ancrages, des culots d'ancrage ont été utilisés pour les câbles bicouches. Les déplacements verticaux des câbles sont enregistrés par des capteurs laser sans contact. Ces capteurs sans contact permettent de ne pas rajouter des masses additionnelles sur le câble. Les capteurs laser sont combinés avec les chaînes d'acquisition Quantum MX 1615B et 1601 et CATMAN de HBM. Quant aux signaux d'émission acoustique, ils sont enregistrés au moyen de capteurs piézoélectriques combinés à une chaîne DISP à huit voies de mesure munie du logiciel AEWIn. Pour le couplage des capteurs aux câbles, une colle X60 fournie par HBM est utilisée. Avant le couplage capteur-câble, une plaque en laiton est collée sur la céramique du capteur avec une colle cyanolite. Pour s'assurer du bon fonctionnement des capteurs posés sur le câble, des tests de « cassés de mine », dits tests Hsu Nielsen, sont réalisés. Des essais préliminaires sur un T15.7 avec trois fils coupés ont permis

de choisir les capteurs EA AE204A (fréquence de résonance 375 kHz, 18 mm x 17 mm de dimensions). Le seuil de détection de l'EA est fixé à 32 dB, 2 dB au-dessus du bruit de fond. Les paramètres temporels PDT (*Peak Definition Time*), HDT (*Hit Definition Time*) et HLT (*Hit Lockout Time*) sont respectivement fixés à 300  $\mu$ s, 600  $\mu$ s et 1000  $\mu$ s. Avec l'excentrique, les fréquences d'excitation utilisées pour les essais sont 2Hz, 3Hz et 4Hz et les amplitudes sont variées de 5 mm à 20 mm. Pour l'ensemble des essais, les câbles sont d'abord testés en état sain sans défaut ensuite les ruptures de fils sont introduites. Après chaque rupture les mêmes essais sont reconduits afin de comparer l'évolution des paramètres dynamiques et acoustiques après défaut.

### III. RESULTATS DE L'ANALYSE DYNAMIQUE

#### A. Identification des paramètres modaux

En instrumentant le T15.7 avec huit capteurs laser (Figure 3), les données recueillies sont traitées par analyse modale afin de déterminer **les fréquences naturelles, les déformées** modales et les amortissements ; ces derniers n'ont pas été utilisés pour caractériser les défauts.

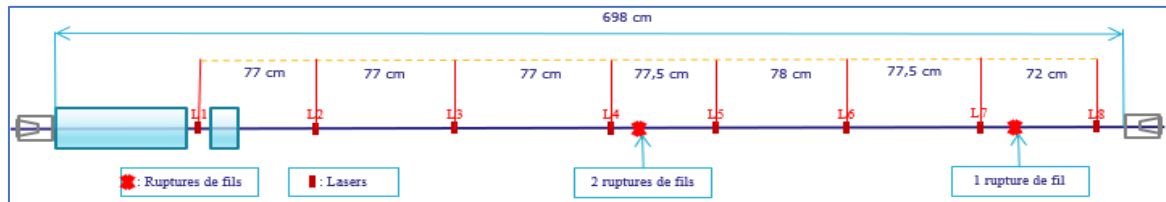


Figure 3 : Instrumentation du câble T15.7 avec trois fils coupés

Pour l'identification des paramètres modaux, les méthodes d'analyse modale appelées Circle-Fit et Méthode Inverse (ou Line-Fit) (Ewins, 2000) sont utilisées car le problème de modes proches n'est pas rencontré. Les quatre premiers modes sont étudiés, au-delà le niveau de bruit étant trop élevé. Ainsi les fréquences naturelles du T15.7 sain (sans défauts) sont données dans le Tableau 1. Les fréquences naturelles obtenues avec ces deux méthodes sont quasi-égales avec une différence maximale inférieure à 0,5%. Nous remarquons que les valeurs des fréquences sont très stables avec des coefficients de variations inférieurs à 1,2 %. Ces coefficients de variation sont donnés par :

$$C_v(\%) = 100 \times \frac{\sigma_f}{\mu_f} \quad (1)$$

Avec  $\sigma_f$  et  $\mu_f$  étant respectivement l'écart-type et la moyenne des fréquences.

Tableau 1 : Fréquences naturelles du T5.7 sain avec Circle-Fit et Line-Fit

Modes	Circle-Fit		Line-Fit		Différence (%) $100 \cdot (f_n^{CF} - f_n^{LF}) / f_n^{CF}$
	$f_n^{CF}$ (Hz)	$C_v^{CF}$ (%)	$f_n^{LF}$ (Hz)	$C_v^{LF}$ (%)	
1	19.16	0.40	19.24	0.81	0.43
2	39.65	0.24	38.64	0.57	0.04
3	58.08	0.22	58.12	0.22	0.07
4	78.06	1.03	78.16	1.12	0.12

Cependant après avoir calculé les coefficients MAC (*Modal Assurance Criterion*) (Allemang, 2003) des déformées modales, la méthode Line-Fit a donné de meilleurs résultats et est alors considéré pour l'extraction des paramètres modaux **si la force d'entrée est connue**.

*B. Détection, localisation et quantification des défauts*

En utilisant les paramètres modaux ainsi obtenus, nous avons d'abord effectué la détection et la localisation des ruptures de fils pour le T15.7 (trois fils coupés) et pour les câbles bicouches (cinq fils coupés en partie courante et trois fils coupés en ancrage). La détection est basée sur la variation des fréquences naturelles entre l'état sain ( $f_n^s$ ) et l'état endommagé ( $f_n^d$ ) du câble. Pour ce faire, les pourcentages de changement en fréquences naturelles ( $C_i$ ) sont calculés :

$$C_i^{s-1d} = 100 \times \frac{f_n^s - f_n^{1d}}{f_n^s} \tag{2}$$

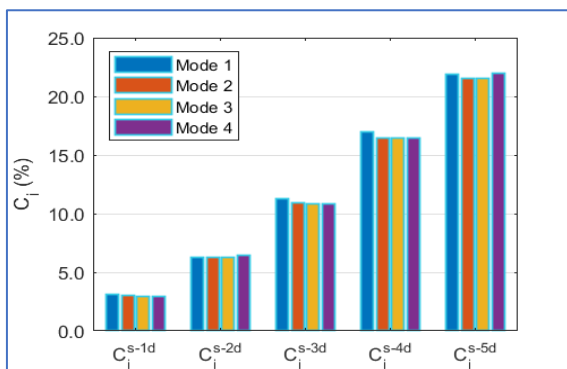
$C_i^{s-1d}$  donne la variation de fréquences entre le câble sain (s) et le câble avec un fil coupé (1d).

Quant à la localisation, nous avons en premier lieu testé deux méthodes définies dans la littérature et basées sur la variation des déformées modales : le MCD (*Modal Curvature Differences*) et le CDF (*Curvature Damage Factor*) (Abdel Wahab and De Roeck, 1999). Appliqués aux données du T15.7, le CDF a donné de meilleurs résultats. Cependant lorsque nous appliquons cette méthode CDF sur les données des câbles bicouches, les ruptures de fils n'ont pas pu être bien localisées. Ainsi nous avons défini le paramètre SRMCD (*Sum of Relative Modal Curvature Differences*) :

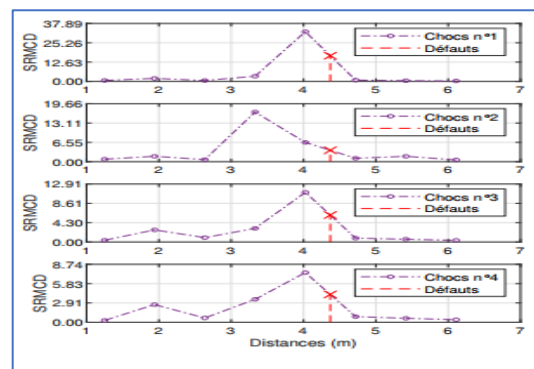
$$SRMCD_j = \frac{1}{N_m \times N_p} \sum_{k=1}^{N_p} \left( \sum_{i=1}^{N_m} \frac{|\left(\Phi_{i,j}^d\right)^n - \left(\Phi_{i,j}^s\right)^n|}{\left(\Phi_{i,j}^d\right)^n} \right)_k \tag{3}$$

Où  $N_m$  est le nombre de modes considéré pour calculer les paramètres SRMCD à la position  $j$  et  $N_p$  le nombre de points où les excitations sont effectuées (ici  $N_p$  correspond aux huit lasers). Le paramètre SRMCD est sensé être maximal à la position des défauts.

Sur la [Figure 4](#), les valeurs des paramètres ( $C_i$ ) du bicouches avec cinq fils rompus augmentent avec le nombre de fils coupés. Étant donné la faible variabilité des fréquences naturelles constatée avec les coefficients de variation ( $C_v < 1\%$ ), nous pouvons conclure que ces paramètres ( $C_i$ ), de l'ordre de 3% pour un fil coupé et supérieurs à 6% pour deux fils coupés ou plus, permettent de détecter la présence de défauts. Sur la [Figure 5](#), nous remarquons que les SRMCD maximales sont localisées à 20 cm de la position réelle du défaut (matérialisée par la croix en rouge).



**Figure 4 :** Valeurs de Ci pour cinq fils coupés dans un câble bicouches



**Figure 5 :** Localisation avec le SRMCD pour quatre fils coupés dans un bicouche

La possibilité de localiser des fils coupés pour des câbles de plus gros diamètres avec la méthode SRMCD a été testé avec le câble EMR. La détermination des paramètres modaux du câbles EMR a été faite avec la méthode FDD (*Frequency Domain Decomposition*) qui est une méthode qui ne nécessite pas de connaître la force d'entrée qui est simulée par un bruit blanc (Brincker and Ventura, 2015). En effet pour le câble EMR, un marteau non instrumenté a été utilisé, celui instrumenté étant très petit pour l'exciter suffisamment. Les résultats concluants obtenus pour la localisation sont donnés sur la Figure 6.

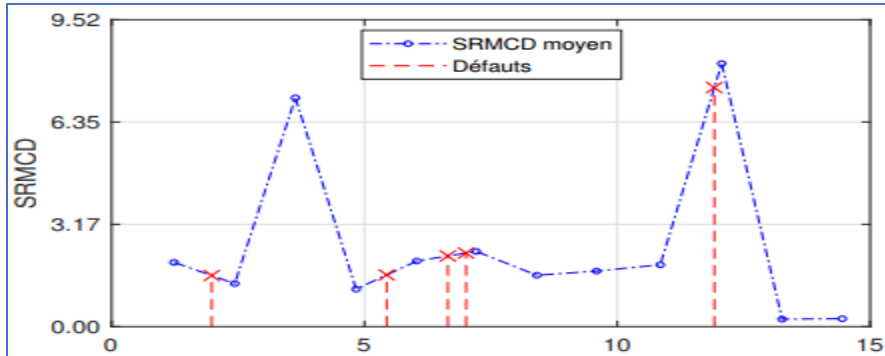


Figure 6 : Localisation de ruptures de fils sur un câble EMR constitués de neuf couches

Sur cette Figure 6, nous remarquons que les valeurs maximales du paramètre SRMCD correspondent aux positions réelles des défauts, sauf pour le défaut à l'extrémité gauche.

Après la détection et la localisation des ruptures de fils, nous nous sommes intéressés à la quantification des défauts. Le câble T15.7 a alors été modélisé par la méthode des éléments finis partant du modèle de poutre Euler-Bernoulli. Après validation du modèle en comparant les fréquences naturelles expérimentales et simulées, un paramètre DS (*Damage Severity*) est défini :

$$DS(\%) = \alpha(C_i)^\beta = 1.45(C_i)^{0.95} \quad (4)$$

Les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  ont été identifiés numériquement en cherchant le couple  $(\alpha, \beta)$  qui minimise la différence entre le DS réel (rapport de nombre de fils coupés ( $N_{fc}$ ) sur nombre total de fils ( $N_{ft}$ )) et le DS estimé avec l'équation 4. De cette équation, le nombre de fils coupés ( $N_{fc}$ ) est calculé :

$$DS = 100 \times \frac{N_{fc}}{N_{ft}} \rightarrow N_{fc} = \frac{DS}{100} \times N_{ft} \times (C_i)^{0.95} \quad (5)$$

Cette formule empirique de calcul du nombre de fils coupés est utilisée sur le câble bicouches, les résultats obtenus sont donnés au Tableau 2. Ce tableau montre une parfaite correspondance entre le nombre de fils réellement coupés (n FC) et le nombre de fils coupés calculé. Ainsi nous arrivons à un niveau 3 de caractérisation des défauts (la quantification).

Tableau 2 : Calcul du nombre de fils rompus d'un câble bicouches

Etat du câble bicouches	1 FC	2 FC	3 FC	4 FC	5 FC
$C_i(\%)$	2.94	6.17	11.10	16.41	21.49
$N_{fr}$	1	2	3	4	5

Cependant lorsque les ruptures de fils sont situées près des ancrages pour le T15.7, nous n'avons pas pu les localiser. De même la détection d'une rupture de fils est impossible si le câble est retendu

à sa tension initiale (câbles EMR et bicouches avec fils coupés dans l’ancrage) après rupture de fils. Pour pallier ces limites, la méthode EA est utilisée.

#### IV. L’EMISSION ACOUSTIQUE POUR COMPLETER LES METHODES DYNAMIQUES

##### A. Identification et séparation des sources d’émission acoustique

Lors des essais d’émission acoustique, les principales sources d’émission acoustique que nous avons notées sont : le frottement entre fils sains (notées FrotFS), le frottement entre fils sains et fils coupés (FrotFC), les microfissurations de la résine dans l’ancrage, le bruit de l’excentrique (Exc) et des événements parasites. Pour séparer les signaux de chacune de ces sources, nous avons d’abord effectué une analyse paramétrique qui consiste à analyser la distribution des paramètres d’EA un à un ou combinés deux à deux. Après une étude d’intercorrélation entre les treize paramètres qui définissent les signaux d’EA et une revue bibliographique (Zejli et al., 2012), les quatre paramètres choisis pour faire cette étude paramétrique sont : **l’amplitude (Amp), le temps de montée (Rise), la fréquence de pic (PFrq) et la fréquence centroïde (CFrq)**.

En considérant un câble bicouches sans rupture de fils et après avoir filtré les signaux dus aux microfissurations de la résine car n’apparaissant qu’au début des premiers essais par l’effet Kaiser (Kaiser, 1950), l’étude des signaux d’EA avec ces quatre paramètres a permis de déceler trois clusters (groupes de signaux) (voir Figure 7). Sur cette figure nous avons comparé les signaux enregistrés par le capteur C2 de l’essai 4Hz10mm où ne sont notés que les bruits de l’excentrique (Exc) et les signaux enregistrés par ce même capteur lors de l’essai 2Hz15mm où tous les capteurs ont enregistré de l’EA. Nous en déduisons que le cluster 1 noté pour les deux essais correspond aux signaux de l’excentrique avec une fréquence de pic (PFrq) comprise entre 20 et 50 kHz. Le cluster 3 avec des fréquences très élevées (> 300 kHz) n’est noté que pour cet essai 2Hz15mm et nulle part ailleurs, nous en déduisons que ce cluster correspond aux signaux parasites. Le cluster 2, correspond alors aux frottements entre fils sains avec des fréquences de pic allant de 130 à 180 kHz. Cependant lorsque des signaux sont enregistrés en grand nombre sur tous les capteurs, les intervalles de fréquences de pic, paramètre ayant le mieux permis à séparer les sources, se retrouvent imbriqués. Pour avoir une meilleure séparation des signaux, nous avons alors utilisé les outils de Machine Learning en faisant des analyses supervisées et non supervisées.

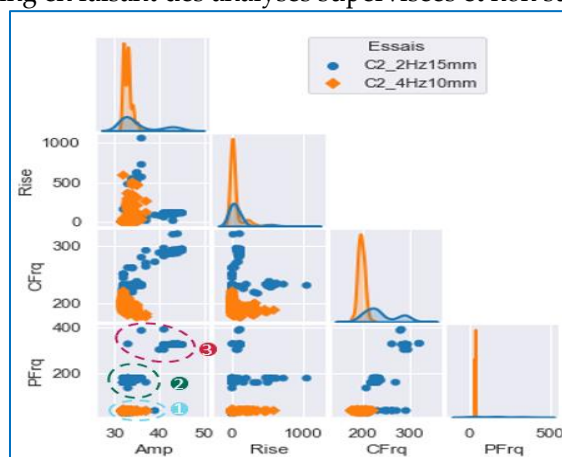


Figure 7 : Diagrammes de distribution des paramètres Amp, Rise, CFrq et PFrq pour les données du capteur C2 de l’essai 2Hz15mm

L'analyse non-supervisée est l'ensemble des techniques statistiques permettant de modéliser un jeu de données et de les organiser en clusters sans pour autant connaître a priori les mécanismes engendrant chaque cluster. Nous avons alors utilisé l'ACP (Analyse en Composantes Principales) pour réduire la taille des données et les algorithmes k-Means et GMM (*Gaussian Mixture Models*) pour le clustering. L'ACP a permis de réduire la dimension des paramètres de treize à neuf et après analyse des résultats obtenus avec le k-Means et le GMM, ce dernier a donné de meilleurs résultats. Quant à l'analyse supervisée, elle nécessite d'avoir une base de données déjà labellisées (les labels correspondent aux mécanismes ou sources d'EA) sur lesquelles les algorithmes de classification vont se baser pour affecter chaque nouvelle donnée au mécanisme l'ayant engendré. Les algorithmes testés sont le kNN (*k-Nearest Neighbors*), le CART (*Classification And Regression Trees*), le LR (*Logistic Regression*), le LDA (*Linear Discriminant Analysis*) et le GNB (*Gaussian Naive Bayesian*) (Madhavan, 2015; VanderPlas, 2016). Avec ces algorithmes, en utilisant les données labellisées avec le GMM, nous avons effectué la classification des données uniquement engendrées par l'excentrique. L'algorithme GNB a permis de les identifier à 81.75 % comme effectivement appartenant aux signaux dus à l'excentrique (voir Figure 8).

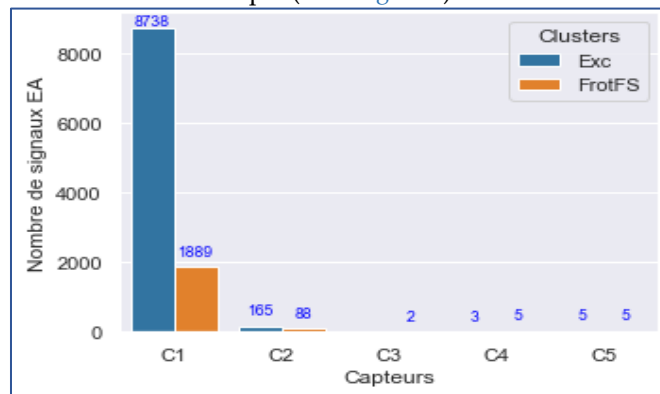


Figure 8 : Classification de signaux d'EA du câble bicouches sain dus à l'excentrique avec le GNB

### B. Détecter des ruptures de fils dans les ancrages et affiner la localisation en partie courante

Avec les analyses supervisées et non supervisées, une base de données labellisées contenant les caractéristiques des signaux susceptibles d'être enregistrés sur un câble bicouches a été constituée. En utilisant cette base de données, nous avons pu identifier la présence de fils coupés dans l'ancrage d'un câble bicouches représenté à la Figure 9. Sur la Figure 10, nous remarquons que l'essentiel des signaux (86.30%) enregistrés sur le capteur C5 placé à la sortie d'ancrage sont identifiés comme frottements des fils coupés sur fils sains (FrotFC). Ainsi les ruptures de fils dans l'ancrage sont détectées. Le nombre important (440) de signaux de frottements entre fils (FrotFS) notés sur ce capteur C5 s'explique par le fait c'est l'endroit où le moment de flexion est maximal.

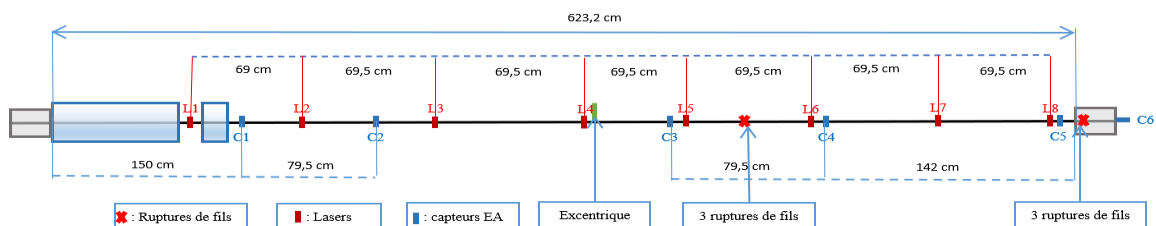


Figure 9 : Position des capteurs d'EA et lasers sur un câble bicouches

En disposant huit capteurs laser sur ce câble bicouches, les localisations obtenues avec la méthode dynamique combinées à celles de l'EA sont données à la Figure 11. L'influence du positionnement des capteurs EA sur la localisation est étudiée en positionnant deux capteurs sur une zone sans rupture de fils, deux capteurs entourant les trois fils coupés en partie courante et deux capteurs entourant les trois fils coupés dans l'ancrage.

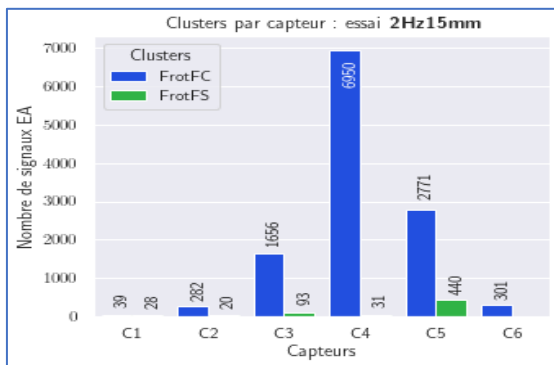


Figure 10 : Classification des signaux du câble bicouches avec fils coupés dans l'ancrage

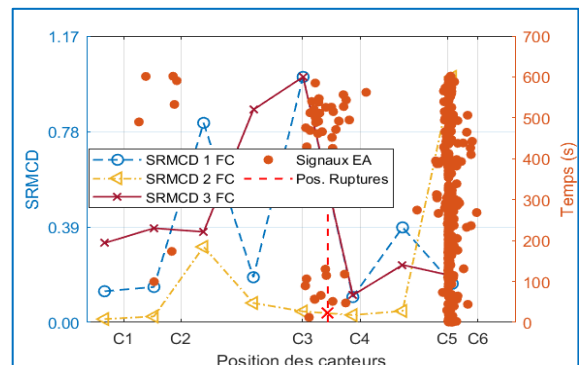


Figure 11 : Localisation de ruptures de fils dans un bicouches avec SRMCD + EA

Sur la Figure 11, nous pouvons voir que pour un et trois fils coupés (1 FC et 3 FC), le maximum des paramètres SRMCD est noté au niveau du capteur laser sans contact L5, situé à 34.75 cm de la position réelle des ruptures de fils. Cependant pour deux fils coupés (2 FC), la rupture en partie courante n'a pas pu être localisée par les SRMCD, ce qui peut s'expliquer par un niveau important de bruit dans les données pour ce cas. Le positionnement des capteurs EA montre que seuls ceux qui sont autour des zones de ruptures (C3-C4 et C5-C6) localisent des signaux EA. Les capteurs C1 et C2, placés dans une zone sans rupture de fils, localisent très peu d'événements (huit). En prenant la moyenne des localisations entre les capteurs C3 et C4, nous obtenons une localisation à 4.32 m, soit à 5 cm de la position réelle des ruptures de fils. La valeur moyenne se justifie par le fait que lorsqu'il y a rupture de fil, les frottements de ce fil rompu avec les fils intacts se produisent de part et d'autre du point de rupture avec les deux bouts du fil rompu.

## V. CONCLUSION

En étudiant les ruptures de fils dans des câbles allant du monocouche (T15.7) aux multicouches (câbles EMR) en passant par les bicouches, nous avons pu détecter, localiser et estimer le nombre de fils rompus dans ces câbles à travers des essais expérimentaux réalisés en laboratoire. Une méthode basée sur la variation des déformées modales (SRMCD) a été proposée pour une meilleure localisation des ruptures de fils. Pour l'estimation de la sévérité de l'endommagement, partant de l'analyse par éléments finis, une formule empirique pour calculer le nombre de fils coupés est proposée. L'analyse en émission acoustique vient en complément de ces méthodes pour affiner la localisation et détecter des ruptures de fils en partie cachée (dans les ancrages). Ainsi nous sommes passés d'une zone de rupture de 20 - 35 cm à 5 cm de la position réelle de la rupture. Pour y arriver nous avons effectué une analyse paramétrique combinée à une analyse par Machine Learning ; donnant des résultats très satisfaisants pour la séparation des sources d'EA. L'étude de l'influence des conditions environnementales sur les méthodes proposées serait une perspective intéressante.



**REFERENCES**

- Abdel Wahab, M.M., De Roeck, G., 1999. Damage detection in bridges using modal curvatures: Application to a real damage scenario. *J. Sound Vib.* 226, 217–235.  
<https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2295>
- Allemang, R.J., 2003. The modal assurance criterion - Twenty years of use and abuse. *Sound Vib.* 37, 14–21.
- Brincker, R., Ventura, C.E., 2015. Introduction to Operational Modal Analysis, Introduction to Operational Modal Analysis. Wiley Blackwell, Chichester, UK.  
<https://doi.org/10.1002/9781118535141>
- Doebling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B., 1998. A summary review of vibration-based damage identification methods. *Shock Vib. Dig.* 30, 91–105.  
<https://doi.org/10.1177/058310249803000201>
- Ewins, D.J., 2000. Modal testing : theory, practice, and application, 2nd ed. Research Studies Press.
- Gholizadeh, S., 2016. A review of non-destructive testing methods of composite materials.
- Kaiser, J., 1950. A study of acoustic phenomena in tensile test. Technische Hochschule München.
- Le Petit, T.T.H., 2014. Contribution à la détection, à la localisation d'endommagements par des méthodes d'analyse dynamique des modifications structurales d'une poutre avec tension : application au suivi des câbles du génie civil. Université Paris-Est.
- Madhavan, S., 2015. Uncovering Machine Learning, in: Cheema, S.M. (Ed.), Mastering Python for Data Science. Packt Publishing, Birmingham, UK, pp. 107–120.
- MAUREY, H., CHAIZE, P., DAGBERT, M., 2019. SÉCURITÉ DES PONTS : ÉVITER UN DRAME.
- Perrin, M., Gaillet, L., Tessier, C., Idrissi, H., 2010. Hydrogen embrittlement of prestressing cables. *Corros. Sci.* 52, 1915–1926. <https://doi.org/10.1016/J.CORSCI.2010.02.041>
- Rytter, A., 1993. Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures. Dept. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University.
- VanderPlas, J., 2016. Machine Learning, in: Schanafelt, D. (Ed.), Python Data Science Handbook, Essential Tools for Working with Data. O'Reilly Media, USA, pp. 331–515.
- Zejli, H., Gaillet, L., Laksimi, A., Benmedakhene, S., 2012. Detection of the Presence of Broken Wires in Cables by Acoustic Emission Inspection. *J. Bridg. Eng.*  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000404](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000404)
- Zejli, H., Laksimi, A., Tessier, C., Gaillet, L., Benmedakhene, S., 2006. Detection of the broken wires in the cables' hidden parts (anchorings) by acoustic emission, in: *Advanced Materials Research*. pp. 345–350.