



**HAL**  
open science

# Monitoring des câbles de structures du génie civil par combinaison de techniques vibratoires et émission acoustique

Abdou Dia

► **To cite this version:**

Abdou Dia. Monitoring des câbles de structures du génie civil par combinaison de techniques vibratoires et émission acoustique. Génie civil. École centrale de Nantes, 2020. Français. NNT : 2020ECDN0046 . tel-03257889

**HAL Id: tel-03257889**

**<https://theses.hal.science/tel-03257889>**

Submitted on 11 Jun 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# THESE DE DOCTORAT DE

## L'ÉCOLE CENTRALE DE NANTES

ÉCOLE DOCTORALE N° 602

*Sciences Pour l'Ingénieur*

Spécialité : Génie Civil

*Par*

**Abdou DIA**

### **Monitoring des câbles de structures du génie civil par combinaison de techniques vibratoires et émission acoustique**

Thèse présentée et soutenue à **Université Gustave Eiffel - site de Nantes**, le 15/12/2020

Unité de recherche : Département MATériaux et STructures (**MAST**), Université Gustave Eiffel

#### **Rapporteurs avant soutenance :**

Zoubir Mehdi SBARTAÏ, Maître de conférences HDR, Université de Bordeaux  
Jean-Paul DRON, Professeur des universités, Université de Reims  
Champagne-Ardenne

#### **Composition du jury :**

**Président :** Jean-Jacques SINOÛ, Professeur des universités, École Centrale de Lyon  
**Examineurs :** Ouali AMIRI, Professeur des universités, Université de Nantes  
Marianne PERRIN, Maître de conférences, Université Toulouse III – IUT de Tarbes  
**Dir. de thèse :** Lamine DIENG, Directeur de recherche, Université Gustave Eiffel, Bouguenais  
**Co-Dir. de thèse :** Laurent GAILLET, Directeur de recherche, Université Gustave Eiffel, Bouguenais



*À ma très chère mère, Bouya SOW*  
*À mon cher père, Amadou*  
*À ma bien aimée épouse, Hawa SY*



Ce travail de thèse a été réalisé au sein du laboratoire Structures Métalliques et à Câbles (SMC) du département MAST (MATériaux et STructures) de l'IFSTTAR devenu entre temps Université Gustave Eiffel.

Je tiens à témoigner toute ma gratitude à Monsieur Lamine DIENG mon directeur thèse, adjoint du laboratoire et à Laurent GAILLET mon co-directeur de thèse et directeur du laboratoire. Je vous remercie pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire SMC et m'avoir accordé toute votre confiance durant ces cinq mois de stage PFE et puis de trois ans de thèse. Merci à vous pour votre apport aussi bien du point de vue personnel que professionnel.

J'aimerais également exprimer ma gratitude à Monsieur Mehdi SBARTAÏ, Maître de Conférence à l'Université de Bordeaux, ainsi qu'à Monsieur Jean-Paul DRON, professeur des universités à l'Université de Reims Champagne-Ardenne (URCA), pour avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail.

Je remercie également Monsieur Jean-Jacques SINOÛ, Professeur des Universités à l'École Centrale de Lyon, Monsieur Ouali AMIRI de l'Université de Nantes, ainsi que Madame Marianne PERRIN, Maître de conférence à l'Université Toulouse III -Paul Sabatier pour leur participation au jury de thèse.

À Roger SERRA, Jean-Marc CADOU et Marianne PERRIN, je dis merci pour avoir accepté d'être membres du comité de suivi de thèse.

Je remercie également tout le personnel de SMC! A chaque fois que le besoin s'est fait sentir, j'ai pu compter sur vous. Une mention spéciale à Jean François DAVID et à Richard MICHEL qui m'ont apporté toute leur aide durant l'ensemble des essais que j'ai eus à faire. De même je remercie aussi Patrick BOUJARD et Nicolas SEJOURNE pour leur bonne humeur/humour et leur aide durant les quelques essais sur le BFC. Je ne saurais également oublié Agnès GAUDICHEAU, toujours de bonne humeur, pour son efficacité pour chaque démarche administrative. A Yannick FALAISE aussi je dis merci pour sa gentillesse et d'avoir apporté son savoir-faire d'informaticien du laboratoire.

A l'ensemble des doctorants du laboratoire aussi je dis merci de m'avoir fait sentir moins seul dans cette aventure et pour les quelques parties de fléchettes! Mention spéciale à Cheikh SARR qui n'arrête de me suivre depuis l'ESP de DAKAR!

Pour conclure, je remercie mes parents à Sindia, qui, malgré la distance, le soutien n'a jamais faibli et ce depuis mes premiers pas à l'école.

À vous deux qui partagez ma vie et me donnez le courage d'aller toujours de l'avant, je vous dis MERCI! A vous deux, ma très chère épouse Hawa et à toi Mouhammad DIA, le nouveau venu en cette fin de thèse!

# Table des matières

<b>Table des matières</b> . . . . .	<b>iii</b>
<b>Liste des figures</b> . . . . .	<b>vi</b>
<b>Liste des tableaux</b> . . . . .	<b>x</b>
<b>Introduction générale</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>1 Bibliographie</b> . . . . .	<b>4</b>
1.1 Introduction . . . . .	6
1.2 Câbles et pathologies . . . . .	6
1.2.1 Les câbles dans le génie civil . . . . .	6
1.2.2 Les pathologies des câbles . . . . .	9
1.3 Méthodes dynamiques . . . . .	11
1.3.1 Définition et principes . . . . .	11
1.3.2 Analyse modale . . . . .	14
1.3.3 Analyse modale expérimentale . . . . .	17
1.3.4 Analyse modale opérationnelle . . . . .	22
1.3.5 Identification des modes . . . . .	24
1.3.6 Détection et localisation d'endommagements . . . . .	26
1.3.7 Conclusion . . . . .	29
1.4 Émission acoustique . . . . .	29
1.4.1 Définition . . . . .	30
1.4.2 Historique . . . . .	31
1.4.3 Applications . . . . .	32
1.4.4 L'analyse des données d'émission acoustique . . . . .	41
1.4.5 Conclusion . . . . .	44
1.5 Annexe . . . . .	45
<b>2 Analyse dynamique</b> . . . . .	<b>46</b>
2.1 Introduction . . . . .	48
2.2 Présentation des essais expérimentaux . . . . .	48
2.2.1 Configuration des essais sur le T15.7 et sur câble bi-couches . . . . .	48
2.2.2 Configurations des essais sur le câble EMR . . . . .	53
2.3 Analyse des données du T15.7 . . . . .	56
2.3.1 Positionnement des capteurs et des défauts . . . . .	56
2.3.2 Identification des paramètres modaux . . . . .	56
2.3.3 Détection des ruptures de fils du T15.7 : niveau 1 . . . . .	63

2.3.4	Localisation des ruptures de fils du T15.7 : niveau 2	64
2.3.5	Estimation empirique du degré d'endommagement : niveau 3	66
2.4	Modèle d'éléments finis du T15.7	67
2.4.1	Théorie de la poutre d'Euler-Bernoulli	68
2.5	Analyse des données sur monotorons bi-couches	73
2.5.1	Positionnement des capteurs et des défauts	74
2.5.2	Identification des paramètres modaux des bi-couches	74
2.5.3	Détection et localisation des défauts des bi-couches	79
2.5.4	Estimation empirique du degré d'endommagement des bi-couches : niveau 3	84
2.6	Analyse des données du câble EMR multicouches	86
2.6.1	Identification des paramètres modaux	87
2.6.2	Caractérisation des défauts	87
2.7	Conclusion à l'analyse dynamique	89
2.8	Annexes à l'analyse dynamique	90
<b>3</b>	<b>Analyse émission acoustique</b>	<b>94</b>
3.1	Introduction	96
3.2	Choix des paramètres d'essais à travers l'instrumentation du T15.7	96
3.2.1	Présentation de l'essai	96
3.2.2	Étude quantitative des données	98
3.2.3	Conclusion	100
3.3	Dispositif expérimental et sources d'EA sur câble bi-couches	101
3.4	Analyse de l'EA du câble sain	102
3.4.1	Analyse quantitative	102
3.4.2	Corrélation des paramètres d'EA	105
3.4.3	Séparation des sources à travers la distribution des paramètres	107
3.4.4	Séparation des sources à travers les outils de Machine Learning	112
3.5	Analyse de l'EA du câble avec ruptures de fils en partie courante	124
3.5.1	Présentation des essais	124
3.5.2	Analyse paramétrique	125
3.5.3	Séparation des sources d'EA sur câbles avec fils coupés par Machine Learning	126
3.6	Caractérisation de défauts dans l'ancrage	131
3.7	Conclusion sur l'analyse par émission acoustique	134
3.8	Annexe de l'analyse EA	136
<b>4</b>	<b>Méthode multi-techniques</b>	<b>137</b>
4.1	Introduction	138
4.2	Présentation des essais expérimentaux	138
4.3	Caractérisation des défauts dans l'ancrage	139
4.4	Caractérisation des défauts en partie courante	143
4.4.1	Détection des ruptures de fils	143
4.4.2	Localisation des ruptures de fils	144
4.4.3	Quantification de la sévérité de l'endommagement	146
4.5	Déploiement des deux méthodes	147
4.6	Conclusion	148

<b>Conclusion générale</b> . . . . .	<b>149</b>
<b>Bibliographie</b> . . . . .	<b>151</b>

# Liste des figures

1	Pont de Tancarville (dans les années 1970) . . . . .	1
1.1	Principe de tréfilage [16] . . . . .	7
1.2	Différents types de câbles utilisés dans le génie civil . . . . .	8
1.3	Différents types de ponts en génie civil [11] . . . . .	8
1.4	Corrosions généralisée et homogène [12] . . . . .	9
1.5	Le fretting-fatigue des câbles [20] . . . . .	10
1.6	Exemples de capteurs utilisés pour des mesures dynamiques : (a) : accéléromètres sur haubans (b) : jauges de déformations (c) : vélocimètres (d) : capteurs laser de déplacements . . . . .	13
1.7	Principe de la méthode du Peak-Picking . . . . .	19
1.8	Nyquist plot [40] . . . . .	19
1.9	Exemple d'indicateurs MMIF en (a) et CMIF en (b) [64] . . . . .	25
1.10	Exemple de diagramme de stabilité [65] . . . . .	26
1.11	Système d'acquisition d'émission acoustique . . . . .	31
1.12	Exemples d'application de la technique d'EA . . . . .	33
1.13	Sources d'émission acoustique lors de la corrosion [114] . . . . .	33
1.14	Détection de l'activité d'EA en corrosion . . . . .	34
1.15	Phase 1 : Initiation des piqûres [119] . . . . .	34
1.16	Phase 2 : Propagation des fissures [119] . . . . .	34
1.17	Phase 3 : Propagation avant rupture finale des fissures [119] . . . . .	35
1.18	Exemples de matériaux et de composants de précontraintes corrodés : (a) Corrosion d'un toron de tendon avec contamination par le sable. (b) Tendon externe endommagé. (c) Toron, cales et plaque de cale corrodés. (d) Corrosion de surface sur l'ancrage [121] . . . . .	36
1.19	Corrélation entre EA et méthodes électrochimiques . . . . .	37
1.20	Variation de l'amplitude du signal (dû aux ruptures de fils) avec la distance (des ruptures au capteur)–câble de diamètre 20mm [131] . . . . .	37
1.21	Principe de fonctionnement du système CASC [134] . . . . .	38
1.22	Relation entre l'énergie mécanique et l'énergie d'EA [140] . . . . .	40
1.23	Identification des phénomènes de frottements sur câbles du génie civil [144] . . . . .	40
1.24	Paramètres pour la caractérisation des signaux d'EA des frottements de câbles . . . . .	41
1.25	Principe d'une analyse non-supervisée [84] . . . . .	43
1.26	Principe d'une analyse supervisée [84] . . . . .	44
2.1	Câbles T15.7 et monotoron bi-couches . . . . .	48
2.2	Banc de sollicitation du monotoron T15,7 avec exciteur . . . . .	49
2.3	Ancrage du T15.7 par clavettes . . . . .	50

2.4	Ancrage par culot . . . . .	51
2.5	Impulsion par choc de marteau . . . . .	52
2.6	Ligatures du bi-couches sectionné . . . . .	53
2.7	BFC et Marteau non instrumenté d'excitation du câble EMR . . . . .	54
2.8	Configuration des essais sur BFC . . . . .	55
2.9	Positionnement des capteurs lasers sur T15.7 . . . . .	56
2.10	Exemples de diagrammes de FRFs et de cohérences pour le T15.7 sain . . . . .	57
2.11	Exemples de diagrammes de FRFs et de cohérences pour le T15.7 avec un fil coupé . . . . .	58
2.12	Déformées modales et coefficients MAC pour le T15.7 sain avec les méthodes Circle-fit et Line-Fit . . . . .	60
2.13	Fréquences naturelles du T15.7 et les coefficients de variation correspondants . . . . .	61
2.14	Déformées modales et MAC du câble avec <b>un fil coupé</b> . . . . .	62
2.15	Déformées modales et MAC du câble avec <b>deux fils coupés</b> . . . . .	62
2.16	Déformées modales et MAC du câble avec <b>trois fils coupés</b> . . . . .	63
2.17	Variation des fréquences naturelles du T15.7 . . . . .	63
2.18	Valeurs MCD pour le câble T15.7 avec trois niveaux de défauts (pour des excitations à L7) . . . . .	65
2.19	Valeurs CDF pour le câble T15.7 avec trois niveaux de défauts . . . . .	66
2.20	Estimation de DS en fonction de $C_i$ . . . . .	67
2.21	Élément $i$ de la poutre . . . . .	69
2.22	Estimation de DS avec les paramètres $C_i$ numériques . . . . .	73
2.23	Positionnement des capteurs et défauts sur les câbles bi-couches . . . . .	74
2.24	Fréquences naturelles des <b>bi-couches 1 et 2</b> . . . . .	76
2.25	Coefficients <b>MAC du bi-couches 1</b> . . . . .	78
2.26	Coefficients <b>MAC du bi-couches 1</b> avec 0, 1 et 2 fils coupés obtenus avec la FDD . . . . .	79
2.27	Paramètres $C_i$ du bi-couches 2 avec le bi-couches comme référence . . . . .	81
2.28	Valeurs <b>CDF pour le bi-couches 1</b> avec cinq niveaux de défauts . . . . .	82
2.29	Valeurs <b>CDF pour le bi-couches 1</b> avec cinq niveaux de défauts à partir des courbures modales données par la FDD . . . . .	83
2.30	Valeurs <b>SRMCD pour le bi-couches 1</b> avec cinq niveaux de défauts à partir des courbures modales données par la FDD . . . . .	85
2.31	Coefficients MAC du câble EMR sans et avec endommagement . . . . .	88
2.32	Paramètres SRMCD pour le câble EMR endommagé . . . . .	89
2.33	Coefficients <b>MAC du bi-couches 2</b> avec le Line-Fit . . . . .	91
2.34	Coefficients <b>MAC du bi-couches 1</b> avec 0, 1 et 2 fils coupés obtenus avec la FDD . . . . .	92
2.35	Valeurs <b>SRMCD pour le bi-couches 2</b> avec cinq niveaux de défauts à partir des courbures modales données par la FDD . . . . .	93
3.1	Mode opératoire du collage d'un capteur d'EA [14] . . . . .	96
3.2	Configuration 1 des capteurs sur T15.7 . . . . .	97
3.3	Configuration 2 des capteurs sur T15.7 . . . . .	97
3.4	Configuration 3 des capteurs sur T15.7 . . . . .	98
3.5	Nombre d'événements EA selon les différentes configurations des capteurs . . . . .	99
3.6	Nombre d'EA en fonction des capteurs AE204A et R15 . . . . .	100
3.7	Positionnement des capteurs sur le bi-couches 1 . . . . .	101
3.8	Nombre de signaux d'EA pour le bi-couches 1 sain . . . . .	103

3.9	Nombre de signaux cumulés sur la capteur C5 . . . . .	104
3.10	L'effet Kaiser [84] . . . . .	104
3.12	Distribution des données du capteur C1 de l'essai 2Hz15mm . . . . .	108
3.13	Distribution des données du capteur C2 de l'essai 2Hz15mm . . . . .	109
3.14	Distribution des données du capteur C5 de l'essai 2Hz15mm . . . . .	110
3.15	Distribution des données du capteur C3 de l'essai 2Hz15mm . . . . .	111
3.16	Distribution des données du capteur C4 de l'essai 2Hz15mm . . . . .	112
3.17	Nombre de signaux pour les essais à 15 mm et 20 mm d'amplitude d'excitation sur câble sain . . . . .	113
3.18	L'ACP pour les essais à 15 mm et 20 mm d'amplitude d'excitation . . . . .	114
3.19	Distribution des trois premières composantes principales des données sur bi-couches sain . . . . .	115
3.20	Choix du $k$ optimum pour les algorithmes de K-Means et de GMM . . . . .	115
3.21	Clustering avec GMM en faisant varier $k$ de 2 à 4 pour les données obtenues sur câble sain . . . . .	116
3.22	Principe de division des données pour entraîner les algorithmes de classification . . . . .	118
3.23	Précisions et Logloss obtenues avec les algorithmes LR, LDA, CART, kNN et GNB . . . . .	119
3.24	Nombre de signaux enregistrés sur les différents capteurs pour les amplitudes d'ex- citation de 5 mm et 10 mm . . . . .	119
3.25	Classification des signaux des essais à 5 mm et 10 mm avec l'algorithme Logistic Regression (LR) . . . . .	120
3.26	Classification des signaux des essais à 5 mm et 10 mm avec l'algorithme k-Nearest Neighbors (kNN) . . . . .	120
3.27	Classification des signaux des essais à 5 mm et 10 mm avec Gaussian Naive Bayes (GNB) . . . . .	121
3.28	Moyennes des paramètres des EA identifiées comme provenant de l'excentrique et des frottements entre fils sains avec le GMM pour $k = 4$ . . . . .	122
3.29	Clustering avec K-Means en faisant varier $k$ de 2 à 4 pour les données obtenues sur câble sain . . . . .	123
3.30	Positionnement des ruptures de fils sur le bi-couches 1 (bi-couches sans ruptures de fils dans les ancrages) . . . . .	124
3.31	Nombre de signaux enregistrés sur chacun des capteurs pour l'ensemble des es- sais et pour chaque état du câble (sain ou avec fils coupés) . . . . .	125
3.32	Comparaison des EA du câble avec un, deux et trois fils coupés avec celles du câble sain . . . . .	126
3.33	Distribution des trois premières composantes principales des données obtenues sur câble avec fils coupés . . . . .	127
3.34	Distribution des trois premières composantes principales des données filtrées ob- tenues sur câble avec fils coupés . . . . .	127
3.35	Choix du nombre de clusters pour les données du câble avec fils coupés avec les indexés CH et DB . . . . .	128
3.36	Clustering avec GMM en faisant varier $k$ de 3 à 4 pour les données obtenues sur câble avec fils coupés . . . . .	129
3.37	Nombre de signaux d'EA pour le bi-couches 1 avec quatre fils coupés . . . . .	130
3.38	Classification des signaux des essais à 5 mm et 10 mm du câble avec quatre fils coupés dans les clusters obtenus avec GMM pour $k = 3$ et $k = 4$ . . . . .	130

3.39	Évolution du pourcentage du nombre de signaux en fonction du nombre de fils coupés de l'EA totale et de l'EA du cluster 1 . . . . .	131
3.40	Positionnement des capteurs et des ruptures de fils dans l'ancrage sur le bi-couches 2 . . . . .	132
3.41	Nombre de signaux d'EA pour le bi-couches 2 avec trois fils coupés dans l'ancrage	132
3.42	Classification des signaux des essais à 5 mm et 10 mm d'amplitudes d'excitation du bi-couches 2 avec fils coupés dans l'ancrage . . . . .	133
3.43	Moyennes des paramètres d'EA des signaux identifiées aux frottements des fils coupés sur fils sains (FrotFC), aux frottements entre fils sains (FrotFS) et aux bruits de l'excentrique (Exc) . . . . .	134
3.44	Distribution des onze paramètres EA choisis . . . . .	136
4.1	Position des capteurs d'EA et lasers sur le câble bi-couches 3 . . . . .	138
4.2	Nombre de signaux d'EA enregistrés sur chaque capteur pour les essais réalisés sur le bi-couches 3 à l'état 0 . . . . .	140
4.3	Nombre de signaux identifiés à chaque source d'EA par classification des données enregistrées sur le câble bi-couches 3 avec fils coupés dans l'ancrage . . . . .	141
4.4	Nombre de signaux identifiés à chaque source d'EA par classification des données enregistrées sur le câble bi-couches 3 avec fils coupés dans l'ancrage . . . . .	142
4.5	Variation des fréquences naturelles du bi-couches3 . . . . .	143
4.6	Pourcentage de changement en fréquences naturelles ( $C_i$ ) du bi-couches 3 . . . . .	144
4.7	Localisation des défauts en partie courante sur le bi-couches 3 avec les paramètres SRMCD . . . . .	145
4.8	Localisation des ruptures de fils en partie courante et dans les ancrages par combinaison des paramètres SRMCD et les événements acoustiques . . . . .	146

# Liste des tableaux

1.1	Analyse chimique des principaux éléments d'un acier eutectoïde (éléments mineurs : Ni, Cr, Mo, Cu) . . . . .	7
1.2	Avantages et inconvénients des types de supports [36] . . . . .	14
1.3	Valeurs moyennes des signaux enregistrés durant les phases d'initiation et de propagation des fissures et de rupture de l'acier [117] . . . . .	35
2.1	Caractéristiques géométriques et mécaniques des câbles T15.7 et bi-couches . . . . .	49
2.2	Gammes de mesure des capteurs de déplacements lasers . . . . .	51
2.3	Fréquences naturelles du monotoron T15.7 sain avec les méthodes Circle-fit et Line-Fit . . . . .	59
2.4	Fréquences naturelles du T15.7 sain et avec défauts . . . . .	61
2.5	Variation des fréquences naturelles du T15.7 . . . . .	63
2.6	Fréquences naturelles du MEF du T15.7 sain . . . . .	70
2.7	Différences relatives entre fréquences naturelles expérimentales et numériques du T15.7 avec fils coupés . . . . .	72
2.8	Fréquences naturelles numériques du T15.7 avec 4 et 5 fils coupés . . . . .	72
2.9	Paramètres ( $C_i$ ) du MEF du T15.7 . . . . .	72
2.10	Fréquences naturelles du <b>bi-couches 1</b> avec le Line-Fit . . . . .	75
2.11	Fréquences naturelles du <b>bi-couches 2</b> avec le Line-Fit . . . . .	75
2.12	Fréquences naturelles du <b>bi-couches 1</b> avec la FDD . . . . .	77
2.13	Fréquences naturelles du <b>bi-couches 2</b> avec la FDD . . . . .	77
2.14	Variation des fréquences naturelles du <b>bi-couches 1</b> . . . . .	80
2.15	Variation des fréquences naturelles du <b>bi-couches 2</b> . . . . .	80
2.16	Paramètres $C_i$ des bi-couches 1 et 2 avec la FDD . . . . .	86
2.17	Calcul du nombre de fils rompus des bi-couches 1 et 2 avec les lois empiriques linéaire et de puissance . . . . .	86
2.18	Fréquences naturelles du câble EMR sans et avec défauts . . . . .	87
3.1	Capteurs d'EA utilisés . . . . .	97
3.2	Paramètres d'EA avec leurs unités . . . . .	105
3.3	Précisions et Logloss obtenues avec les algorithmes LR, LDA, CART, kNN et GNB . . . . .	118
3.4	Pourcentage des signaux EA des essais à 5 mm et 10 mm d'amplitude d'excitation qui ont été classés comme provenant de l'excentrique d'après le clustering avec GMM pour $k = 2$ et $k = 4$ . . . . .	120
3.5	Pourcentage des signaux EA des essais à 5 mm et 10 mm d'amplitude d'excitation qui ont été classés comme provenant de l'excentrique d'après le clustering avec K-Means pour $k = 2$ , $k = 3$ et $k = 4$ . . . . .	123

4.1	Fréquences naturelles du bi-couches 3 pour l'état 0 (avec seules ruptures de fils dans l'ancrage) et pour un (1FC), deux (2FC) et trois (3FC) fils coupés en partie courante . . . . .	143
4.2	Pourcentage de changement en fréquences naturelles ( $C_i$ ) du bi-couches 3 en fonction du nombre de fils coupés . . . . .	144
4.3	Détermination de la sévérité de l'endommagement en estimant le nombre de fils coupés ( $N_{fr}$ ) . . . . .	147

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

*« ... en admettant que tout son émis était  
entendu et que, sauf dans l'obscurité, tout  
mouvement était perçu »*

---

George Orwell



FIGURE 1 – Pont de Tancarville (dans les années 1970)

Tout au long de leur vie, les ouvrages du génie civil, de par leur environnement immédiat et leur destination, sont soumis à différentes formes de sollicitations (mécanique, chimique, thermique) qui engendrent leurs dégradations. Ces sollicitations cycliques donnent lieu à des endommagements consécutifs à des pathologies que sont principalement la corrosion et le fretting-fatigue [1]. Les câbles métalliques utilisés dans les ponts (à haubans, suspendus, en béton précontraint) n'échappent pas à ces phénomènes. Une étude, réalisée en 1988 par Watson et al. [2], impliquant près de 200 ponts à haubans à travers l'Amérique, l'Europe (dont la France

avec le pont de Saint-Nazaire) et l'Asie, avait rapporté avec pessimisme que la plupart d'entre eux étaient en danger principalement à cause de défauts dus à la corrosion dans les câbles. En outre une des causes de rupture du pont Morandi à Gênes en Italie, ayant causé 43 morts en Août 2018 avec son lot de conséquences économiques, est la rupture d'un hauban du fait d'une forte corrosion interne puis des travées [3]. De ce fait, le maintien en état des ouvrages d'art revêt d'une importance capitale pour la sécurité des usagers. Et leur disponibilité est cruciale pour le maintien en service des voies de communication et de l'activité économique [4]. Constatant qu'au moins 25 000 ponts sont en mauvais état structurel et posent des problèmes de sécurité et de disponibilité pour les usagers, le rapport d'information de 2019 fait au nom de la commission de l'aménagement du territoire et du développement durable de France (SÉNAT) 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**, et en investissant davantage dans les actions préventives à travers la mise en place d'une programmation pluriannuelle des travaux» [5].

Dès lors il devient important de mettre en place des outils et méthodologies permettant de suivre l'état de santé de ces structures. L'ensemble de ces outils et méthodologies rentrent dans le champ disciplinaire de ce qui est connu comme étant le contrôle de santé des structures, ou structural health monitoring (SHM). Ce monitoring nécessite l'intégration de dispositifs de détection et éventuellement d'actionnement pour permettre d'enregistrer, d'analyser, de localiser et de prévoir les conditions de chargement et d'endommagement d'une structure de manière à ce que les méthodes de contrôle non destructif deviennent une partie intégrante de la vie des structures [6]. Ainsi l'identification des défauts constitue la pierre angulaire du suivi de la santé des ouvrages [7, 8] et plus tôt ce concept est étudié et intégré à la gestion des ouvrages, le mieux c'est. Ceci justifie l'intérêt de recourir à des techniques de **contrôle non destructif (CND)**. En réponse à ces besoins, plusieurs méthodes comme les méthodes à ultrasons, les méthodes à champ électromagnétique, **l'émission acoustique**, les **méthodes dynamiques** examinant les changements des caractéristiques vibratoires de la structure, entre autres ont été développées pour l'inspection des câbles de structures du génie civil. Dans l'état actuel de leurs développements ces méthodes ne donnent que des résultats partiels sur la santé des câbles et ne permettent pas d'atteindre les quatre niveaux identifiés pour une caractérisation complète des endommagements que sont [9] :

- niveau 1 : la détection du(des) défaut(s), la structure est-elle endommagée ou pas ?
- niveau 2 : la localisation du(des) défaut(s), à quelle position se situe(nt) le(s) défaut(s) dans la structure ?
- niveau 3 : la quantification du(des) défaut(s), quelle est l'étendue de l'endommagement ?
- niveau 4 : la prédiction (la durée de vie résiduelle de la structure), pour combien de temps pourra encore tenir la structure ?

Et pour une évaluation plus complète, Liyana [10] identifie un cinquième niveau qui est la détermination et l'implémentation d'une réparation effective de l'endommagement.

C'est dans ce cadre que cette thèse a été initiée et a pour objectif de combiner des méthodes dynamiques et l'émission acoustique (EA) en une méthode multi-technique (MMT) pour une meilleure caractérisation de l'état d'endommagement des câbles et leur surveillance dans le temps.

Les méthodes dynamiques, appliquées à la caractérisation des défauts dans le câble, permettent d'avoir une réponse globale et de détecter l'endommagement en utilisant les changements des paramètres modaux (fréquences naturelles, déformées modales et amortissements). Cette possibilité a été vérifiée lors de travaux expérimentaux réalisés avec un monotoron de sept (7) fils par LE PETIT. Cependant, l'approche adoptée n'a pas permis de localiser les défauts dans ce monotoron même si le modèle numérique donnait de résultats satisfaisants [11]. Ainsi dans cette thèse, nous nous proposons de prolonger cette étude afin d'arriver au moins au niveau 2 (c-à-d jusqu'à la localisation) de caractérisation des défauts dans les câbles par les méthodes dynamiques. Concomitamment l'émission acoustique sera étudiée en appoint pour affiner la localisation, caractériser et suivre l'évolution des défauts surtout ceux situés dans les parties non accessibles des câbles tels que les ancrages. Les résultats obtenus en laboratoire pour la détection de défauts existants sur câbles endommagés dans les ancrages par la technique d'EA sont prometteuses mais nécessitent des études plus poussées pour la séparation des sources d'EA possibles lors de l'acquisition des données. La méthode doit aussi être évaluée quand ces défauts sont en partie courante. Du fait de l'atténuation des signaux d'EA, les capteurs doivent aussi être placés de manière à limiter les effets de ce phénomène.

Ainsi **la première partie** de cette étude est dédiée à l'étude bibliographique. En premier lieu, nous rappelons les différents types de câbles qui sont utilisés dans les ouvrages d'art du génie civil et les pathologies qui peuvent les affecter. Ensuite les principales approches permettant d'extraire les paramètres modaux des structures en vibration à travers l'analyse modale expérimentale ou opérationnelle sont rappelées. S'en suivent ensuite l'étude bibliographique des méthodes développées pour, à travers les paramètres modaux, détecter et/ou localiser les défauts dans les structures. La dernière partie de l'étude bibliographique est dédiée à l'émission acoustique en rappelant sa définition, son historique, ses principales applications et les techniques d'analyse des données d'EA.

**La deuxième partie** est réservée à l'analyse dynamique des câbles. À travers l'analyse modale expérimentale et opérationnelle, la détection et la localisation de défauts dans des monotorons monocouches à 7 fils, des monotorons multicouches (deux (2) couches) et des câbles d'ancrage de plateformes d'énergie marine renouvelable (câbles EMR) sont investiguées. Un modèle éléments finis est également proposé pour étudier la validité d'une approche empirique d'estimation de la sévérité de l'endommagement dans les câbles.

**La troisième partie** de ce manuscrit a pour objectif d'explorer l'analyse de l'EA recueillie à travers les essais expérimentaux réalisés sur les types de câbles cités ci-dessus (sauf les câbles EMR). Les défauts en partie courante et dans les ancrages sont étudiés avec l'analyse temporelle, de corrélation et statistique multivariable (apprentissage automatique par Machine Learning).

**La quatrième partie**, et la dernière, est consacrée à la combinaison de ces deux techniques de CND pour mieux caractériser des défauts de type fils rompus dans des câbles multicouches.

# CHAPITRE 1

## BIBLIOGRAPHIE

« Avant donc que d'écrire apprenez à penser. »

---

Nicolas Boileau

### Sommaire

---

1.1	Introduction . . . . .	6
1.2	Câbles et pathologies . . . . .	6
1.2.1	Les câbles dans le génie civil . . . . .	6
1.2.2	Les pathologies des câbles . . . . .	9
1.3	Méthodes dynamiques . . . . .	11
1.3.1	Définition et principes . . . . .	11
1.3.2	Analyse modale . . . . .	14
1.3.3	Analyse modale expérimentale . . . . .	17
1.3.3.1	Méthode de <i>Peak-Picking</i> . . . . .	18
1.3.3.2	Méthode de <i>Circle-Fit</i> . . . . .	19
1.3.3.3	Méthode RFP ( <i>Rational Fraction Polynomial</i> ) . . . . .	21
1.3.3.4	Méthode LSCE ( <i>Least Squares Complex Exponential</i> ) . . . . .	21
1.3.4	Analyse modale opérationnelle . . . . .	22
1.3.5	Identification des modes . . . . .	24
1.3.6	Détection et localisation d'endommagements . . . . .	26
1.3.6.1	Variation des fréquences naturelles . . . . .	26
1.3.6.2	Variation des déformées modales . . . . .	27
1.3.7	Conclusion . . . . .	29
1.4	Émission acoustique . . . . .	29
1.4.1	Définition . . . . .	30
1.4.2	Historique . . . . .	31
1.4.3	Applications . . . . .	32
1.4.3.1	Détection et suivi de corrosion . . . . .	32
1.4.3.2	Suivi de l'endommagement des câbles du génie civil . . . . .	35
1.4.4	L'analyse des données d'émission acoustique . . . . .	41

1.4.4.1	Analyse temporelle ou chronologique . . . . .	41
1.4.4.2	Analyse de corrélation . . . . .	42
1.4.4.3	Analyse statistique <i>basique</i> . . . . .	42
1.4.4.4	Analyse statistique multivariées . . . . .	42
1.4.5	Conclusion . . . . .	44
1.5	Annexe . . . . .	<b>45</b>

---

## 1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons faire le point sur l'état de l'art des câbles du génie civil et de leurs moyens d'auscultation à travers les méthodes dynamiques et la méthode émission acoustique. Pour ce faire, nous allons revenir sur la technologie de conception des câbles et les principales pathologies qui peuvent les affecter au cours de leur utilisation.

Ensuite les méthodes dynamiques de contrôle non destructif seront abordées. Ainsi l'analyse modale sera explicitée et les diverses approches disponibles pour la mettre en œuvre, dépendant de la disponibilité ou non de la force d'excitation. À travers l'analyse modale, les paramètres modaux sont déterminés et à partir de ces derniers, pourront être effectuées les comparaisons des différents états du câble. Les moyens développés dans la littérature pour aborder ce dernier point seront de ce fait rappelés.

Après les méthodes dynamiques, sera abordée l'émission acoustique (EA) en tant que méthode de contrôle non destructif. En premier lieu est explicitée la définition du phénomène d'émission acoustique. Ensuite est présenté de manière concise le développement de cette technologie à travers son historique. Développée pour le contrôle non intrusif des matériaux et des ouvrages, ses domaines d'application sont également décrits avec une insistance sur le cas des ouvrages d'art notamment la possibilité de suivi des endommagements des câbles dans le génie civil. Et enfin est abordée la question de l'analyse des signaux d'EA.

## 1.2 Câbles et pathologies

### 1.2.1 Les câbles dans le génie civil

Les câbles utilisés en génie civil sont essentiellement constitués de fils d'acier de natures et de formes variables même si l'élément de base reste un fil d'acier de 3 à 7 mm de diamètre [12]. Ces fils, obtenus à partir de fils machines, sont en acier non ou peu allié et de composition proche de l'eutectoïde (tableau 1.1). Après laminage à chaud (850-900 °C) suivi d'un refroidissement rapide par trempe, les fils machines subissent un patentage (traitement thermique vers 500 °C) et puis un tréfilage par passage à travers des filières de diamètres décroissants (figure 1.1). Ces traitements transforment la micro-structure initiale en une matrice perlitique et favorisent une augmentation de la résistance mécanique par écrouissage et orientation des grains [13]. En guise d'exemple, le tréfilage d'un fil machine d'acier inoxydable de diamètre 11 mm en un fil de 3 mm multiplie la résistance mécanique par plus de 2.5 [14]. En définitif après ces traitements, deux types de fils sont principalement obtenus que sont les fils ronds et les fils profilés (en Z, par exemple). Ces fils peuvent subir une galvanisation par trempe dans un bain de zinc permettant de les protéger contre des phénomènes de corrosion; cependant cette galvanisation s'accompagne d'une perte de propriétés mécaniques d'environ 10% [15].

À partir de ces fils élémentaires, selon les contraintes imposées par l'usage ou les performances mécaniques souhaitées, plusieurs combinaisons peuvent être utilisées (figure 1.2) qui

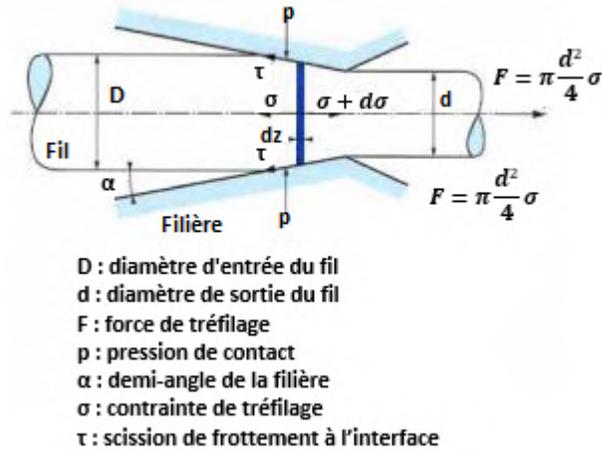


FIGURE 1.1 – Principe de tréfilage [16]

Élément	C	Mn	Si	P	S
Teneur(%)	0.6-0.9	0.5-0.7	0.2-0.3	<0.02	<0.025

TABEAU 1.1 – Analyse chimique des principaux éléments d'un acier eutectoïde (éléments mineurs : Ni, Cr, Mo, Cu)

donnent les principaux types de câbles rencontrés dans le domaine du génie civil. Ainsi il existe, suivant leur usage, différents types de câbles tels que les câbles à fils parallèles (1.2a), les câbles torsadés (1.2b) et les câbles toronnés (1.2c et 1.2d) [12, 17].

1. **Les câbles à fils parallèles** : les premiers à être utilisés sur les ponts suspendus français au début 19ième siècle, ils ont été progressivement remplacés par les câbles à torsion alternative vers la fin de ce siècle [18]. Cependant, profitant des avancées technologiques, ces câbles continuent à être utilisés dans les pays de l'Europe du Nord et aux États Unis. Le câble est constitué de câbles élémentaires à fils parallèles organisés selon une distribution hexagonale et ancrés individuellement sur les massifs d'ancrage. Lors de la mise en place de ces types de câbles sur site, une bobine serre les fils les constituant à l'aide d'une frette réalisée à intervalles réguliers. Ceci permet de solidariser les fils et la pression exercée favorise le ré-ancrage d'un fil en cas de rupture.
2. **Les câbles torsadés** : Inventés en milieu du 19ième siècle, ces câbles offrent une grande souplesse et ont été utilisés dans les ponts pour réaliser des suspentes et des haubans pour des tabliers légers. Ils consistent à enrouler des torons de faibles diamètres (7 ou 19 fils) autour d'une âme centrale métallique ou éventuellement constituée de fibres textiles.
3. **Les câbles toronnés** : Étant les plus utilisés en France, ils sont réalisés par enroulement en hélice des fils autour d'un fil central (l'âme). Ces fils sont disposés en couches de 6, 12, 18... fils avec un sens d'hélice inversé d'une couche à l'autre afin d'éviter tout détournage. Cette disposition des couches permet à un fil rompu de se ré-ancrer (à une certaine distance de la rupture) par frottements interfilaires et ainsi de continuer à participer à la résistance du câble. Les câbles les plus utilisés dans les ouvrages sont constitués de 6, 7 ou

8 couches soit un total de 127, 169 ou 217 fils.

Les câbles clos constituent une variante à ces types de câbles toronnés où les couches extérieures (une ou deux le plus souvent) sont réalisées avec des fils profilés (en Z ou en trapèze). Cette disposition permet d'étancher le câble pour retarder la corrosion par infiltration d'eau. Cependant une eau ayant pénétré au moyen de petits écartements locaux du câble (au niveau des selles d'appui par exemple) peut se retrouver piégée durablement à l'intérieur même si l'introduction de cire permet d'éviter la circulation de cette eau.

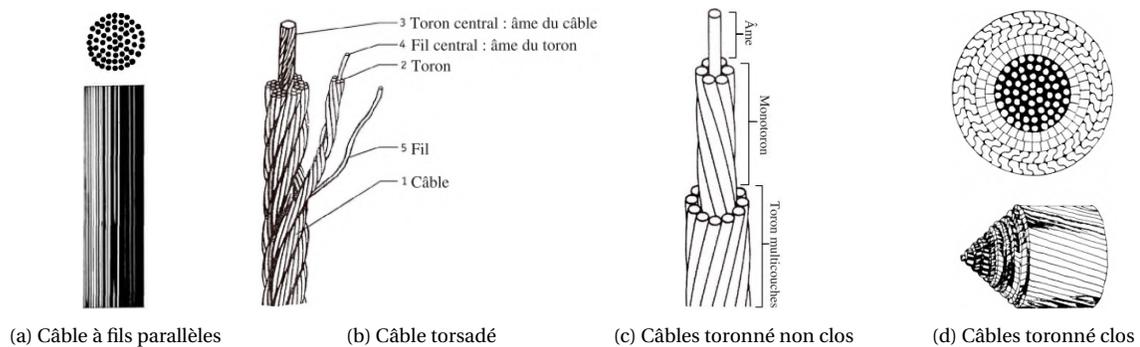


FIGURE 1.2 – Différents types de câbles utilisés dans le génie civil

Ces câbles sont employés dans les ouvrages du génie civil tels que les ponts suspendus (figure 1.3a), les ponts à haubans (figure 1.3b) ou encore en béton précontraint (figure 1.3c).



(a) Le Golden Gate Bridge (pont suspendu) (b) Pont Normandie (pont à haubans) (c) Pont de l'île de Ré (en béton précontraint)

FIGURE 1.3 – Différents types de ponts en génie civil [11]

En ce qui concerne les ponts suspendus, les câbles qui reprennent les charges du tablier via les suspentes sont déviés au droit des pylônes par des selles de déviation et sont ancrés dans des massifs par des culots d'ancrage. Ils peuvent être protégés contre les agents agressifs extérieurs par des brais de houille, de la peinture, de la graisse ou encore de la résine dans les culots d'ancrage.

Pour ce qui est des ponts à haubans, les câbles (haubans) sont disposés soit en nappe unique centrée sur l'axe du tablier soit en deux nappes parallèles ou convergentes en tête de pylône. Les câbles peuvent être protégés, en plus d'un produit de remplissage (graisse, cire, coulis de

ciment), par une gaine en PEHD.

Les câbles utilisés en précontrainte du béton sont le plus souvent utilisés en précontrainte par post-tension intérieure ou extérieure. Dans le cas de la post-tension par précontrainte intérieure, les câbles sont incorporés dans des conduits injectés de coulis de ciment, ce qui permet de garantir leur protection vis-à-vis des agents agressifs extérieurs. Quant aux câbles utilisés en post-tension extérieure, ils sont protégés par des gaines PEHD.

Malgré ces protections, les câbles sont sujets à des dégradations pouvant être causées par des conditions environnementales sévères, une mauvaise utilisation des matériaux de protection (type de coulis de ciment utilisé, défaut d'étanchéité, sensibilité des armatures à la corrosion, etc.) et/ou une défaillance d'exécution des travaux [19].

### 1.2.2 Les pathologies des câbles

Les principales causes de dégradation des câbles sont la corrosion et le fretting-fatigue qui est une fatigue combinée à des frottements en petits débattements locaux [19, 20].

La corrosion des câbles se produit suite à l'infiltration d'eau chargée en ions chlorures ou sulfates (sels de déverglaçage, en environnement marin ou industriel). Ces infiltrations sont le plus souvent notées au niveau des points fixes (culot d'ancrage, étrier, collier de suspente, selle de déviation) ou en partie courante quand les éléments de protection (peinture, mastic, graisse) sont dégradés [21]. Cette corrosion peut ainsi toucher une partie plus ou moins homogène du câble et entraîner une perte de résistance par réduction de la section, on parle de corrosion généralisée (figure 1.4a). Elle peut aussi agir de manière plus locale sous formes de cratères/piqûres, il s'agit de la corrosion localisée (figure 1.4b). En plus de la diminution de la charge à rupture, cette dernière entraîne une diminution de la déformation à la rupture. L'autre forme de corrosion à



(a) Dissolution homogène des fils d'un toron multicouche

(b) Corrosion localisée sur un fil

FIGURE 1.4 – Corrosions généralisée et homogène [12]

laquelle sont sensibles les câbles est la corrosion sous contrainte (CSC) qui peut entraîner des ruptures brutales sans déformations préalables [22]. Cette sensibilité est d'autant plus importante quand la contrainte est élevée. Et ce phénomène est noté lorsqu'un certain seuil, estimé à 50% de la résistance maximale à la rupture ( $R_m$ ), est franchi; ce qui est souvent le cas dans les câbles de précontrainte et plus rarement dans les haubans et suspentes.

L'autre cause de dégradation des câbles, le fretting-fatigue (figure 1.5), est identifiée comme



FIGURE 1.5 – Le fretting-fatigue des câbles [20]

étant la principale cause de rupture des fils soumis à la fatigue. Ce phénomène est noté au niveau des contacts entre fils du même câble, entre torons adjacents ou entre câble et les pièces fixes telles que les ancrages ou colliers de suspentes.

Il est à souligner que tous ces mécanismes peuvent agir en même temps et ont un effet combiné nocif; le seuil de non fissuration en CSC diminue en présence de sollicitations de fatigue et les forces de contact diminuent la limite d'endurance apparente des fils.

Au vu de ces dégradations pouvant affecter les câbles, et in fine la sécurité des usagers, il devient important de mettre en place des outils pour pouvoir détecter et suivre l'état de santé des câbles des ouvrages d'art. Les principales méthodes actuellement disponibles permettant d'appréhender l'état des câbles sont [18] :

- l'examen visuel qui reste le moyen privilégié d'inspection des câbles et permet de détecter des endommagements ayant lieu sur la couche extérieure des torons tels que les ruptures de fils et une corrosion. Cependant lorsque ces défauts sont situés sur des parties cachées tels que les ancrages ou les colliers ou encore dans les couches internes des torons élémentaires et des câbles internes (pour les faisceaux de câbles), cette inspection visuelle ne permet pas de les détecter.
- les méthodes électromagnétiques (gammagraphie, radiographie) peuvent permettre d'évaluer la corrosion et les ruptures de fils sur des torons élémentaires. Cependant avec ces méthodes toutes les ruptures ne sont pas localisables s'il n'y a pas détournage, les zones massives ne peuvent être radiographiées correctement et ce sont des techniques longues, coûteuses, très ponctuelles et réglementairement très contraignantes [23]
- les méthodes dynamiques qui sont basées sur la variation des paramètres modaux des câbles. Elles ne donnent pas entière satisfaction quant à la détection de défauts de câbles situés dans les ancrages [24].

Parmi les méthodes utilisées pour l'auscultation des câbles d'ouvrages d'art figurent les méthodes dynamiques et l'émission acoustique qui elles aussi prises individuellement admettent des limites qui font qu'elles ne donnent qu'une idée partielle de l'état qualitatif du câble ausculté; d'où l'idée de les combiner dans cette thèse.

## 1.3 Méthodes dynamiques

### 1.3.1 Définition et principes

Les méthodes dynamiques de contrôle non destructif sont des méthodes permettant d'extraire, à partir des mesures de vibrations, les paramètres modaux globaux d'un système mécanique ou d'une structure. En effet une modification des paramètres dynamiques (masse, rigidité, amortissement) entraîne a priori une modification de ces paramètres modaux globaux que sont les fréquences naturelles, les déformées modales et les coefficients d'amortissement. De ce fait les méthodes dynamiques de contrôle non destructif sont qualifiées de méthodes globales; même si un maillage plus fin d'une structure par un plus grand nombre de points de mesure peut, par endroit, permettre d'avoir des informations locales. Ainsi ces méthodes permettent de s'affranchir du caractère local de certaines méthodes (émission acoustique, ultrasons, méthodes électromagnétiques) en permettant d'avoir un état global d'une structure avec des points de mesure (nombre de capteurs) limités [25].

Les mesures de vibration effectuées sur un ouvrage le sont principalement pour quatre (4) raisons qui peuvent être résumées ainsi [26] :

1. faire des tests de vibrations pour évaluer la tenue d'une structure aux éventuels événements susceptibles de la solliciter au cours de son exploitation tels que des vents violents, des chocs, etc.
2. faire une analyse structurale pour un meilleur dimensionnement d'un ouvrage à travers un recalage de modèle numérique
3. réaliser des mesures de confort pour mesurer les niveaux de vibrations de la structure et les comparer à des seuils de confort établis
4. et/ou pour effectuer la surveillance et le diagnostic afin de révéler des défauts ayant lieu dans la structure.

La démarche adoptée dans le cadre de cette thèse s'inscrit dans ce dernier point.

Pour réaliser le diagnostic et la surveillance des ouvrages, ces méthodes ont été développées dès les années 1970s et 1980s dans l'industrie pétrolière pour la détection de défauts dans les plateformes offshore [27], les machines tournantes [28, 29], en aviation [30] et également dans le génie civil [31-33].

Cependant de nombreuses questions ou étapes essentielles au succès de l'utilisation des changements observés dans les caractéristiques modales d'une structure sont à élucider pour l'identification des dommages et la surveillance de la santé. Parmi ces questions principales, il y a les sources d'excitation, le type, le nombre et la localisation des capteurs, le choix des méthodes d'analyse des données recueillies lors des campagnes de mesures [34] :

- Les sources d'excitation pouvant être utilisées pour réaliser des essais dynamiques peuvent être séparées en excitation dites de choc ou d'impact et les excitations vibratoires. Les premiers consistent à appliquer des événements de types impulsionnels/transitoires de

courte durée (de la milliseconde à la minute). Et quant aux excitations de types vibratoires, elles impliquent d'appliquer des efforts répétés sur un nombre important de périodes naturelles de la structure [35]. Ces catégories d'excitations sont le plus souvent contrôlées et mesurées durant les expériences. En plus de ces excitation plus ou moins contrôlables, il y a les excitations de types ambiantes où les forces appliquées à la structure ne sont nullement contrôlables. L'avantage des excitations pouvant être qualifiées de contrôlables est la possibilité de connaître la force d'entrée (force d'excitation) et de reconstituer les fonctions de transfert du système (de l'ouvrage). Cependant elles peuvent nécessiter de fermer l'ouvrage à la circulation (pour le cas des ponts) afin de ne pas perturber les données recueillies par le trafic, ce qui n'est pas le cas avec des excitations ambiantes. Ces dernières permettent également de se passer des excitateurs mécaniques et de bénéficier d'une énergie excitation plus importante. Cependant les fonctions de transfert du système restent inconnues, ce qui peut constituer un désavantage plus tard pour le traitement des données. Il faut également être attentif à ce que la source d'excitation (contrôlée ou non) ne modifie pas le comportement structural de l'ouvrage. Ainsi, un excitateur trop lourd pour un élément structural conduira à identifier des caractéristiques modales erronées (influence de la masse). De même, l'interaction fluide-structure pour des ouvrages élancés conduira à identifier des amortissements perturbés par l'amortissement aérodynamique. Que les excitations soient contrôlées ou non, il existe différentes approches dans la littérature permettant d'extraire les paramètres modaux recherchés, cette question sera abordée dans la partie *Analyse modale 1.3.2* ci-dessous.

- En plus des sources d'excitation, il convient de s'intéresser aux capteurs utilisés pour recueillir les grandeurs à mesurer qui peuvent être les accélérations, les vitesses, les déplacements et/ou les déformations. Le choix du type de capteur à utiliser est conditionné par des facteurs environnementaux tels que la dimension (par exemple pour les câbles, veiller à ce que les capteurs ne soient pas assez *lourds* pour rajouter des masses additionnelles), la température, l'humidité, etc. Ce choix peut aussi être guidé par des contraintes économiques telles que le coût, la disponibilité, la facilité d'installation, les besoins associés en acquisition de données, etc. Parmi les types de dispositifs pouvant être utilisés pour ce faire, il y a les accéléromètres, les premiers développés dans les années 1950 et qui sont aujourd'hui les plus utilisés [36]. Comme type de capteurs, il existe aussi les capteurs laser de déplacements, les vélocimètres, les jauges de déformation (figure 1.6). Ces capteurs sont fixés sur l'ouvrage en étude soit par vissage, collage, usage de supports magnétiques ou mécaniques ou par simple pose. Les choix qui doivent guider le type de fixation sont principalement la nature du capteur, de l'ouvrage étudié, de l'environnement d'étude et du besoin de répétition ou non de l'étude menée. Les avantages et les inconvénients de chaque système de fixation sont répertoriés au tableau 1.2. Une fois le type de capteur choisi, leur nombre est déterminé par les objectifs finaux de l'essai. Un maillage fin conduira à des déformées modales plus propres. Cependant un maillage fin implique également la mise en place d'un grand nombre de capteurs et un système d'acquisition

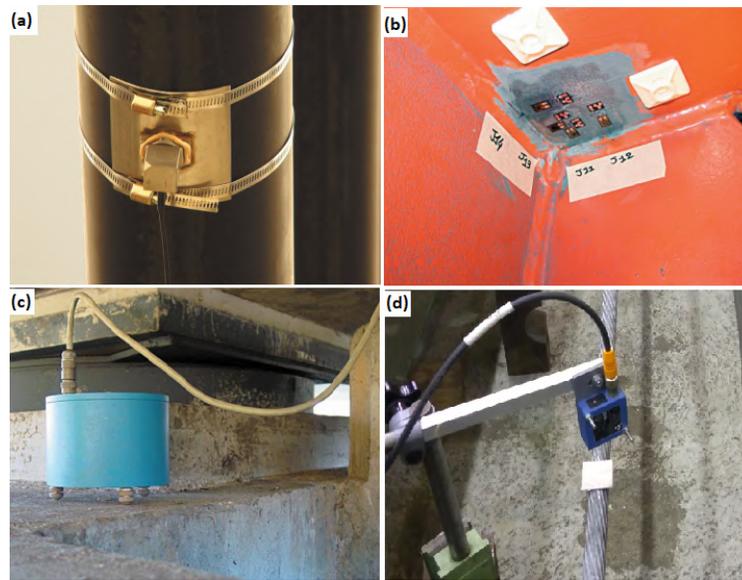


FIGURE 1.6 – Exemples de capteurs utilisés pour des mesures dynamiques : (a) : accéléromètres sur haubans (b) : jauges de déformations (c) : vélocimètres (d) : capteurs laser de déplacements

autorisant le transfert d'une grande quantité d'informations vers un système de stockage de grande capacité; la solution optimale est à trouver.

- Dans notre cas d'étude, les méthodes d'analyse des données se résument à celles permettant d'effectuer l'identification modale, c'est-à-dire la détermination des caractéristiques modales (fréquences propres, déformées propres et coefficients d'amortissement). Ces propriétés modales sont estimées expérimentalement à partir de signaux temporels recueillis. Ces signaux sont rarement utilisables tels quels et ce volume de données est compressé en un certain nombre de fréquences, de coefficients d'amortissement et de déformées propres. À titre d'exemple, un signal comportant 1024 valeurs, avec 10 points de mesure (capteurs) constituera 10240 éléments d'information concernant l'état actuel de la structure. Avec l'analyse modale, si 10 modes réels sont identifiés, ces 10240 valeurs mesurées peuvent se réduire à 120 éléments d'information (10 modes composés d'une (1) fréquence, d'un (1) coefficient d'amortissement et de 10 amplitudes modales, soit 120 valeurs). Après avoir identifié les paramètres modaux, la caractérisation des défauts peut ensuite être envisagé, d'où l'intérêt d'une bonne identification de ces paramètres modaux.

En ce qui concerne la réalisation des essais et de l'acquisition des données pour une future identification des paramètres modaux, quatre (4) configurations peuvent être notées. Ces différentes configurations d'essais sont largement fonction du nombre de canaux d'acquisition (capteurs) ou de sources d'excitation disponibles :

- SISO (*single input/single output*) : une entrée (un point d'excitation) et une sortie (un capteur)
- SIMO (*single input/multiple output*) : une entrée et plusieurs sorties
- MISO (*multiple input/single output*) : plusieurs entrées et une sortie

	Avantages	Inconvénients
<b>Fixation par vis</b>	- Pas de restriction d'utilisation - Répétabilité du positionnement	- Légère détérioration de la structure (perçage par exemple)
<b>Fixation par collage</b>	- Rapidité de mise en œuvre - Selon les colles, pas de détérioration de la structure... aspect réversible	- Pas de réglage possible - Paroi verticale ou horizontale
<b>Support magnétique</b>	- Rapidité de mise en œuvre	- Uniquement sur ouvrage métallique - Pas forcément compatible avec tous les capteurs
<b>Support mécanique</b>	- Possibilité de réglage fin	- Détérioration irréversible du support

TABLEAU 1.2 – Avantages et inconvénients des types de supports [36]

— MIMO (*multiple input/multiple output*) : plusieurs entrées et plusieurs sorties

À chacune de ces catégories, peut être appliquée une analyse modale différente.

### 1.3.2 Analyse modale

L'analyse modale, encore appelée identification modale est le processus de détermination des paramètres modaux (fréquences naturelles, coefficients d'amortissement et déformées modales) d'une structure sous excitation contrôlée ou ambiante. Elle a été appliquée pour la première fois vers 1940 dans la recherche d'une meilleure compréhension du comportement dynamique des avions. Jusqu'à la fin des années 1960, les développements étaient lents et les techniques expérimentales étaient basées sur l'utilisation d'analyseurs de spectre analogiques à bande étroite, coûteux et encombrants. L'ère moderne de l'analyse modale peut être considérée comme ayant commencé au début des années 1970, grâce à la disponibilité commerciale d'analyseurs de spectre à transformée de Fourier rapide (FFT - Fast Fourier Transform) dont l'algorithme est développé en 1965 par James W. Cooley et John W. Tukey [37]), d'analyseurs à fonction de transfert (TFA - Transfer Function Analyze), à la possibilité d'acquisition et d'analyse discrète de données. Cette avancée est aussi due au développement d'ordinateurs numériques de plus en plus petits, moins chers et plus puissants pour traiter les données [38].

L'analyse modale repose sur quatre hypothèses sur le système (structure) étudié [39] :

1. *La structure est linéaire*, c-à-d que la réponse de la structure à une combinaison de forces appliquées simultanément est la somme des réponses à chaque force prise individuellement. C'est cette linéarité qui implique l'existence de fonctions de transfert de la structure.
2. *L'invariance temporelle de la structure* ce qui signifie une invariance temporelle des paramètres physiques (paramètres modaux) pendant un temps d'essai. Autrement si la durée

d'un essai va de  $T_0$  à  $T_N$ , pour tout intervalle  $[T_i, T_j]$  pris entre  $T_0$  et  $T_N$ , les paramètres modaux calculés sur cet intervalle sont les mêmes (modulo les erreurs de mesure)

3. *La structure obéit à la réciprocité de Maxwell*, une force appliquée à un point  $p$  engendre une réponse à un point  $q$  qui est la même que la réponse engendrée à ce point  $p$  par une force appliquée au point  $q$  ( $R_{pq} = R_{qp}$ )
4. *La structure est observable*, ceci veut dire qu'une quantité suffisante d'informations est disponible durant l'identification en mesurant tous les degrés de libertés pertinents.

L'analyse modale est ainsi basée sur la théorie de vibration d'un système mécanique obéissant à ces hypothèses. Les propriétés dynamiques de ce système sont gouvernées par la masse, la rigidité et l'amortissement qui sont responsables respectivement de l'inertie, des forces élastiques et dissipatives. Ainsi l'équation dynamique pour un système discrétisé à plusieurs degrés de liberté (MDOF - *multiple degrees of freedom*), constituant le soubassement de l'ensemble des méthodes d'analyse modale, est définie par l'équation 1.1 :

$$[M] \{\ddot{x}(t)\} + [C] \{\dot{x}(t)\} + [K] \{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (1.1)$$

Où  $[M]$ ,  $[C]$  et  $[K]$  sont respectivement les matrices de masse, d'amortissement et de rigidité, de tailles  $N \times N$  où  $N$  est le nombre de degrés de liberté du système

$\{x(t)\}$ ,  $\{\dot{x}(t)\}$  et  $\{\ddot{x}(t)\}$  sont respectivement les vecteurs de déplacements, vitesses et accélérations dépendants du temps et de tailles  $N \times 1$

$\{f(t)\}$  est le vecteur de force extérieure appliquée variant dans le temps de taille  $N \times 1$

Au lieu de l'exprimer sous forme temporelle, l'équation de la dynamique peut également être exprimée sous forme fréquentielle. Il est possible de tirer sa forme fréquentielle en utilisant les transformées de Fourier. De même, de passer de la forme fréquentielle à la forme temporelle, la transformée de Fourier inverse peut être utilisée.

En posant

$$\{f(t)\} = \{F\} e^{i\omega t}$$

et

$$\{x(t)\} = \{X\} e^{i\omega t}$$

où  $\{X\}$  et  $\{F\}$  sont des vecteurs  $N \times 1$  indépendants du temps, nous pouvons écrire :

$$([K] + i\omega [C] - \omega^2 [M]) \{X\} e^{i\omega t} = \{F\} e^{i\omega t} \quad (1.2)$$

ce qui donne les réponses en fonction de la force d'entrée comme suit :

$$\{X\} = ([K] + i\omega [C] - \omega^2 [M])^{-1} \{F\} \quad (1.3)$$

Cette équation 1.3 peut être écrite sous la forme

$$\{X\} = [\alpha(\omega)] \{F\} \quad (1.4)$$

avec

$$\alpha_{jk}(\omega) = \left( \frac{X_j}{F_k} \right)$$

$[\alpha(\omega)]$  est la fonction de transfert ou fonction de réponse en fréquence (FRF - *Frequency Response Function*) de taille  $N \times N$  du système (dès fois notée par  $H(\omega)$ ). Ainsi nous avons :

$$[\alpha(\omega)] = ([K] + i\omega [C] - \omega^2 [M])^{-1} \quad (1.5)$$

La FRF étant le rapport entre la sortie et l'entrée d'un système, elle est appelée réceptance si l'entrée est le déplacement, mobilité si l'entrée est la vitesse et l'accélération si l'entrée est l'accélération. De l'une des formes de FRF (réceptance, mobilité ou accélération), il est possible de retrouver les autres puisque déplacement, vitesse et accélération sont liées par dérivées successives.

Soit  $\Psi$  la matrice des modes propres du système, elle est obtenue en résolvant le problème aux valeurs propres de l'équation de mouvement du système libre non amorti ( $F = 0, C = 0$ ) :

$$([K] - \Omega [M]) \Psi = 0 \quad (1.6)$$

avec  $\Omega = \text{diag}(\bar{\omega}_i^2)$  et  $\Psi = [\psi_1, \dots, \psi_n]$ . Ces modes propres possèdent la propriété d'orthogonalité avec les matrices de masse  $[M]$  et de rigidité  $[K]$ , ce qui veut dire que :

$$\{\Psi\}^T [M] \{\Psi\} = [m_r] \quad (1.7)$$

$$\{\Psi\}^T [K] \{\Psi\} = [k_r] \quad (1.8)$$

$[m_r]$  et  $[k_r]$  sont les matrices de masse et de raideur généralisées du mode  $r$  et sont liées par la relation :  $[m_r]^{-1} [k_r] = [\bar{\omega}_r]$ ,  $[\bar{\omega}_r]$  étant les pulsations propres du système non amorti.

Il existe une infinité de matrices de modes propres  $\Psi$  vérifiant l'équation 1.6, ainsi il est en général opté de les normaliser par rapport à  $[m_r]$  tel que :

$$[\Phi] = [\Psi] [m_r^{-1/2}] \quad (1.9)$$

Ces modes propres normalisés par rapport à la masse sont reliés aux matrices de masse et de rigidité par :

$$\{\Phi\}^T [M] \{\Phi\} = I \quad (1.10)$$

$$\{\Phi\}^T [K] \{\Phi\} = \Omega \quad (1.11)$$

$I$  est la matrice identité et  $\Omega$  la matrice diagonale des pulsations propres au carré.

En supposant un amortissement structural ( $\omega [C] = [D]$ ) et en considérant les équations 1.5, 1.10 et 1.11, il est possible de démontrer que les FRFs peuvent s'écrire sous la forme :

$$[\alpha(\omega)] = [\Phi] [(\lambda_r^2 - \omega^2)]^{-1} [\Phi]^T \quad (1.12)$$

les  $\lambda_r$  sont appelés les pôles du système et sont donnés par  $\lambda_r^2 = \bar{\omega}_r^2 (1 + i\eta_r)$ ,  $\eta_r$  étant le facteur d'amortissement structural.

Ainsi l'expression générale d'une FRF dont la sortie est  $X_j$  et l'entrée  $F_k$  peut être écrite :

$$\alpha_{jk}(\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{(\phi_{jr})(\phi_{kr})}{\bar{\omega}_r^2 - \omega^2 + i\eta_r \bar{\omega}_r^2} \quad (1.13)$$

ou

$$\alpha_{jk}(\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{{}_r A_{jk}}{\bar{\omega}_r^2 - \omega^2 + i\eta_r \bar{\omega}_r^2} \quad (1.14)$$

le paramètre  ${}_r A_{jk}$  est appelé constante modale ou résidue de la FRF et est directement lié aux déformées modales.

L'équivalent de la FRF dans le domaine temporelle est la fonction de réponse impulsionnelle ou IRF (*Impulse Response Function*). L'IRF peut être obtenu par la transformée de Fourier inverse de la FRF.

Pour un aperçu plus exhaustif de la théorie de l'analyse modale, le lecteur intéressé peut se tourner vers des ouvrages qui font référence dans ce domaine [40-42].

Dépendant du domaine (temporel ou fréquentiel) dans lequel les données sont traitées et de la disponibilité de la force d'entrée ou non (qui dans ce cas peut être simulée par un processus stochastique), une multitude de méthodes d'extraction des paramètres modaux ont été développées. Cependant quelle que soit la méthode utilisée pour organiser ou classer les différentes approches de génération de paramètres modaux à partir des données expérimentales, la théorie fondamentale sous-jacente est toujours la même : lissage (ou *fitting*) de l'expression théorique de la FRF (ou de l'IRF) aux données mesurées expérimentalement afin de trouver les pôles et résidues. Les techniques les plus couramment utilisées seront rappelées dans le développement qui suit en faisant une séparation entre celles appartenant à l'analyse modale expérimentale (AME) et celles de l'analyse modale opérationnelle (AMO).

### 1.3.3 Analyse modale expérimentale

L'analyse modale expérimentale fait référence à l'ensemble des méthodes d'analyse modale où les entrées et les sorties sont des données connues. Ces méthodes d'identification modale ont été les premières développées et ont connu un franc succès dans le domaine de l'automobile et de l'aéronautique depuis le milieu des années 1980 [43]. Les différentes approches d'AME peuvent être regroupées selon le domaine (fréquentiel ou temporel) dans lequel l'estimation des paramètres modaux est faite. Et considérant le nombre de modes à extraire en même temps, les méthodes d'extraction des paramètres modaux peuvent se subdiviser également en :

- méthodes dites un degré de liberté (méthodes SDOF) qui extraient les paramètres modaux liés à un mode à la fois, mode 1, puis mode 2, puis mode 3 et ainsi de suite
- méthodes dites à plusieurs degrés de liberté (méthodes MDOF) qui peuvent extraire les paramètres modaux liés à plusieurs modes en même temps

Les méthodes SDOF et MDOF sont basées sur l'hypothèse du nombre de modes déterminant la réponse structurelle dans une largeur de bande donnée. Si un seul mode est dominant, il est possible de supposer que la réponse structurelle dans cette gamme de fréquences ne dépend que de ce mode et que ses paramètres peuvent être déterminés séparément. Les méthodes SDOF sont basées sur cette hypothèse. Elles sont très rapides (si le nombre de données à étudier reste raisonnable) et caractérisées par une faible charge de calcul, mais l'hypothèse SDOF n'est une approximation raisonnable que si les modes de la structure sont bien séparés. En présence de modes étroitement espacés ou même coïncidents, les méthodes MDOF doivent être adoptées afin d'identifier correctement les différents modes contribuant à la réponse structurelle globale [44].

Comme pour les configurations d'essais, une autre classification est également possible selon le nombre d'entrée et de sortie utilisé pour extraire les paramètres modaux. Ainsi il y a les méthodes :

- SISO où l'extraction des paramètres modaux est faite sur la FRF/IRF produite par une entrée et une sortie
- SIMO où les paramètres modaux sont déterminés sur les FRFs/IRFs obtenues avec une entrée et plusieurs sorties. Ces méthodes sont appelées également méthodes globales.
- MIMO où l'identification des paramètres modaux est basée sur les FRFs/IRFs données par plusieurs entrées et plusieurs sorties. Ces méthodes sont aussi appelées méthodes polyréférence.

L'idée des méthodes SIMO et MIMO est que pour une structure linéaire et stationnaire, les paramètres modaux sont des propriétés globales et ne varie pas d'une FRF/IRF à l'autre [11].

En ce qui suit, il est rappelé quelques méthodes d'extraction de paramètres modaux.

### 1.3.3.1 Méthode de *Peak-Picking*

L'une des premières méthodes développées, la méthode du Peak-Picking (ou Peak-Amplitude) est la plus simple méthode d'extraction modale. Son application suit les étapes suivantes (figure 1.7) :

- Détection des pics d'amplitude sur la FRF ( $|\alpha_r(\omega)|_{max}$ ) et détermination de la pulsation correspondante ( $\omega_r$ )
- Détermination des pulsations,  $\omega_a$  et  $\omega_b$ , correspondantes à une amplitude de  $\frac{|\alpha_r(\omega)|_{max}}{\sqrt{2}}$
- Estimation du coefficient d'amortissement par la méthode dite de la demi-puissance (via les points correspondants à  $\omega_a$  et  $\omega_b$ ) :  $\eta_r = \frac{\omega_a^2 - \omega_b^2}{2\omega_r}$
- Détermination de la constante modale :  $A_r = |\alpha_r(\omega)|_{max} \omega_r^2 \eta_r$ . À partir de ces constantes modales, seront déterminées les déformées modales.

Cette méthode permet d'avoir une estimation raisonnable des paramètres modaux, mais seulement pour des structures où les modes sont bien séparés et avec un faible amortissement. Il est

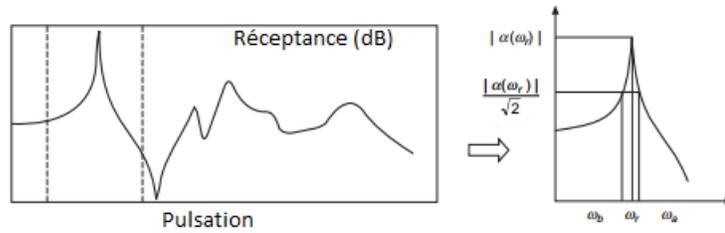


FIGURE 1.7 – Principe de la méthode du Peak-Picking

également évident que cette méthode ne dispose d'aucun mécanisme permettant de se soustraire du bruit éventuel dans les données.

### 1.3.3.2 Méthode de Circle-Fit

Cette méthode SDOF encore appelée méthode Kennedy-Pancu [45] est basée sur le fait que le diagramme de la partie imaginaire en fonction de la partie réelle d'une FRF au voisinage d'une zone de résonance (diagramme de Nyquist) est théoriquement circulaire (figure 1.8). En

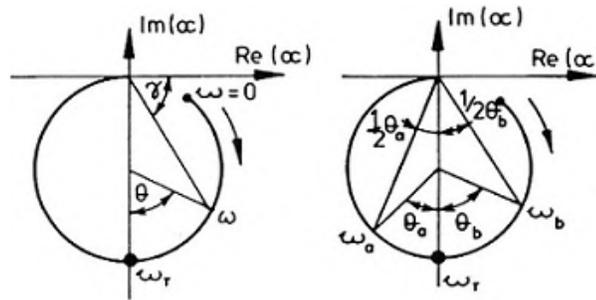


FIGURE 1.8 – Nyquist plot [40]

effet pour un mode  $r$  et en négligeant la contribution des autres modes (principe des méthodes SDOF) la FRF obtenue en équation 1.14 donne :

$$\alpha_{jk}(\omega)_{\omega \rightarrow \omega_r} \cong \frac{rA_{jk}}{\omega_r^2 - \omega^2 + i\eta_r\omega_r^2} \quad (1.15)$$

À partir de cette équation 1.15 et des propriétés du cercle obtenu par lissage (figure 1.8), la relation suivante est obtenue :

$$\omega^2 = \omega_r^2 (1 - \eta_r \tan(\theta/2))$$

De cette relation, nous pouvons tirer :

$$\frac{d\omega^2}{d\theta} = \frac{\omega_r^2 \eta_r \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_r}\right)^2\right)^2}{2\eta_r^2}$$

La pulsation propre ( $\omega_r$ ) est obtenue au maximum de la dérivée de  $\frac{d\omega^2}{d\theta}$ .

Le facteur d'amortissement est donné par :

$$\eta_r^2 = \frac{\omega_a^2 - \omega_b^2}{\omega_r^2 \left( \tan\left(\frac{\theta_a}{2}\right) + \tan\left(\frac{\theta_b}{2}\right) \right)}$$

Et le module de la constante modale est donnée par :

$$|{}_rA_{jk}| = {}_rD_{jk}\omega_r^2\eta_r$$

${}_rD_{jk}$  est le diamètre du cercle. La phase de la constante modale est l'angle d'orientation du diamètre principal par rapport à l'axe imaginaire négatif.

Les différentes étapes de la méthode peuvent se résumer ainsi :

1. sélectionner un mode de vibration à partir du pic de résonance de la FRF
2. sélectionner des points de la FRF sur le cercle de Nyquist
3. faire le lissage (*fitting*) du cercle en utilisant les points sélectionnés sur la FRF
4. localiser la pulsation propre du mode à partir du changement de taux d'arc maximum
5. estimer le facteur d'amortissement
6. déterminer le module et la phase de la constante modale

Une alternative à la méthode de Circle-Fit est la méthode Line-Fit (ou méthode Inverse) qui se base sur les propriétés de la linéarité de l'inverse de la FRF donnée à l'équation 1.15 :

$$\frac{1}{\alpha_{jk}(\omega)} \cong \frac{\omega_r^2 - \omega + i\eta_r\omega_r^2}{{}_rA_{jk}} = \frac{\omega_r^2 - \omega + i\eta_r\omega_r^2}{B_r + iC_r} \quad (1.16)$$

Ce qui donne :

$$\operatorname{Re}\left(\frac{1}{\alpha_{jk}(\omega)}\right) = S_R + T_R\omega^2 \quad \operatorname{Im}\left(\frac{1}{\alpha_{jk}(\omega)}\right) = S_I + T_I\omega^2 \quad (1.17)$$

où

$$S_R = \frac{(B_r + C_r\eta_r)\omega_r^2}{B_r^2 + C_r^2} \quad ; \quad T_R = -\frac{B_r}{B_r^2 + C_r^2}$$

et

$$S_I = \frac{(B_r\eta_r - C_r)\omega_r}{B_r^2 + C_r^2} \quad ; \quad T_I = \frac{C_r}{B_r^2 + C_r^2}$$

Le lissage des graphes des parties réelles et imaginaires de la FRF donne :

$$\omega_r = \sqrt{\frac{-S_RT_R - S_IT_I}{T_R^2 + T_I^2}} \quad ; \quad \eta_r = \frac{S_RT_I - S_IT_R}{-S_RT_R - S_IT_I}$$

$$|{}_rA_{jk}| = \frac{1}{\sqrt{T_R^2 + T_I^2}} \quad ; \quad \theta_{A_{jk}} = \tan\left(\frac{-T_I}{T_R}\right)$$

### 1.3.3.3 Méthode RFP (*Rational Fraction Polynomial*)

La méthode RFP, contrairement aux deux précédemment citées, est une méthode MDOF qui se base sur une reformulation de la FRF donnée en équation pour l'exprimer sous forme de fraction de polynômes :

$$\alpha(\omega) = \frac{\sum_{k=0}^{2N} a_k (i\omega)^k}{\sum_{k=0}^{2N} b_k (i\omega)^k} \quad (1.18)$$

Définir une fonction d'erreurs  $e_{jk}$  entre  $\alpha(\omega)$  et la FRF mesurée ( $\tilde{\alpha}(\omega)$ ) telle que  $e_{jk} = \alpha(\omega) - \tilde{\alpha}(\omega)$ , donne un système d'équation linéaire permettant de déterminer les coefficients  $a_k$  et  $b_k$  à partir desquels les pôles et les constantes modales seront déterminés.

Ces méthodes sus-mentionnées sont des méthodes dans le domaine fréquentiel. Et parmi les méthodes dans ce domaine nous pouvons citer la méthode GRFP (*Global FRP*) qui est une extension de la méthode FRP et qui, pour une entrée, analyse plusieurs FRFs en même temps (SIMO) alors que la RFP analyse une seule FRF à la fois (SISO). Ces méthodes ont même été étendues pour le cas de plusieurs entrées et plusieurs (MIMO) pour donner la méthode OP (*Orthogonal Polynomial*) [46, 47].

### 1.3.3.4 Méthode LSCE (*Least Squares Complex Exponential*)

La méthode LSCE fait partie des méthodes les plus utilisées dans le domaine temporel. Elle se base sur les IRFs qui sont obtenues par transformée de Fourier inverse. Ces IRFs peuvent être exprimées par une somme de termes de réponse exponentiels complexes :

$$h_{jk}(t) = \sum_{r=1}^{2N} r A_{jk} e^{\lambda_r t} \quad (1.19)$$

Chacun de ces termes complexes exponentiels représente une réponse modale transitoire décroissante qui est le produit d'une constante modale indépendante du temps ( $r A_{jk}$ ) et d'une fonction exponentielle complexe dépendant du temps ( $e^{\lambda_r t}$ ). L'influence des quantités locales peut être séparée de l'influence des quantités globales de sorte que les pôles du système ( $\lambda_r$ ) peuvent être calculés à partir des racines de l'équation polynomiale suivante (équation 1.20) :

$$\beta_0 + \beta_1 z_r + \beta_2 z_r^2 + \dots + \beta_{2N} z_r^{2N} = \sum_{n=0}^{2N} \beta_n z_r^n = 0 \quad (1.20)$$

avec  $z_r = e^{\lambda_r \Delta t}$  et  $t_n = n \Delta t$ .

Les coefficients polynomiaux  $\beta_n$  peuvent être déterminés à partir des IRFs selon :

$$\sum_{n=0}^{2N} \beta_n h_n = 0 \quad (1.21)$$

En posant  $\beta_{2N} = 1$ , l'équation 1.21 peut être réarrangée de sorte à avoir :

$$\sum_{n=0}^{2N-1} \beta_n h_n = -h_{2N} \quad (1.22)$$

En appliquant le même processus sur  $2N$  IRFs, le système d'équations suivante est obtenu :

$$\begin{bmatrix} h_0 & h_1 & h_2 & \cdots & h_{2N-1} \\ h_1 & h_2 & h_3 & \cdots & h_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{2N-1} & h_{2N} & h_{2N+1} & \cdots & h_{4N-2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_{2N-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{2N} \\ h_{2N+1} \\ \vdots \\ h_{4N-1} \end{bmatrix} \quad (1.23)$$

En utilisant la méthode des moindres carrés sur ce système surdéterminé, les coefficients  $\beta_n$  sont déterminés. En introduisant ces coefficients  $\beta_n$  dans l'équation 1.20, les  $z_r$ , à partir desquels les pôles seront trouvés, sont déterminés. Et pour avoir les constantes modales, les  $z_r$  trouvés sont introduits dans l'équation 1.19 sachant que  $e^{\lambda \Delta t} = z_r$ .

La méthode LSCE est numériquement rapide et stable, la principale difficulté étant l'estimation correcte du nombre de modes.

Cette méthode SIMO est une extension de la méthode CE (*Complex Exponential*) qui est de type SISO. Une extension de la méthode LSCE est la méthode PRCE (*polyreference Complex Exponential*) de type MIMO [48]. La méthode PRCE a été adaptée dans le domaine fréquentiel pour donner la méthode p-LSCF (*Polyreference Least-Squares Complex Frequency-domain*) encore appelée PolyMAX [49, 50]. Parmi les méthodes couramment utilisées dans le domaine temporel, il y a également la méthode dite méthode ITD (*Ibrahim Time Domain*) [51] et la méthode ERA (*Eigensystem realization algorithm*) [52].

### 1.3.4 Analyse modale opérationnelle

Contrairement à l'AME, l'analyse modale opérationnelle (AMO) fait référence aux méthodes où la force d'entrée n'est pas connue ou plutôt mesurable. Ces méthodes ont été développées à partir des années 1990 pour palier aux difficultés rencontrées dans le domaine de l'offshore et du génie civil d'appliquer des excitations contrôlées sur des structures de grandes dimensions en exploitation continue. L'idée de l'AMO est ainsi de remplacer les excitations artificielles utilisées jusqu'alors par des excitations naturelles telles que le vent, le trafic, les vagues, etc.

Ces techniques ont ainsi ouvert un nouvel horizon dans l'expérimentation dynamique des structures surtout dans le domaine du génie civil du fait de leur simplicité (de par les types d'excitations), de leur rentabilité et il n'y a pas besoin d'interrompre le trafic pour acquérir des données qui de surcroît sont représentatives des conditions normales d'exploitation. Cependant ces conditions opérationnelles requièrent des capteurs à faible bruit et une chaîne d'acquisition plus performante ; la force d'entrée non connue peut également être vue comme une limite à ces méthodes.

Au fil des années, l'AMO a évolué en tant que discipline autonome. Cependant, la plupart des méthodes de l'AMO ont été dérivées des procédures de l'AME. Elles partagent donc un fond théorique commun avec les procédures d'entrée-sortie (AME). La principale différence réside dans la formulation de l'entrée, qui est connue dans l'AME alors qu'elle est aléatoire et non mesurée dans l'AMO. Ainsi, alors que les procédures AME sont développées dans un cadre déterministe, les méthodes AMO peuvent être considérées comme leur contrepartie stochastique [44].

Comme pour l'AME, les données mesurées peuvent être traitées dans le domaine temporel ou dans le domaine fréquentiel. De ce fait pour l'AMO, au lieu des FRFs, des densités spectrales de puissance (DSP) seront utilisées et des fonctions de corrélation au lieu des IRFs. Pour un signal aléatoire donné  $f(t)$ , la fonction de corrélation (ou d'auto-corrélation)  $R_{ff}(\tau)$  est la corrélation croisée du signal par lui-même et est définie par :

$$R_{ff}(\tau) = E [f(t).f(t + \tau)] \quad (1.24)$$

Et la densité spectrale de puissance (ou densité auto-spectrale)  $S_{ff}(\omega)$  qui est la transformée de Fourier de la fonction d'auto-corrélation précédente est donnée par :

$$S_{ff}(\omega) = \left( \frac{1}{2\pi} \right) \int_{-\infty}^{+\infty} R_{ff}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (1.25)$$

À partir de cette DSP, l'une des premières méthodes OMA développée est la méthode appelée technique du peak-picking (PPT - *Peak Picking Technique*). Pour cette méthode les pulsations propres sont obtenues à partir des pics de la DSP et les déformées modales à partir des colonnes de la matrice de DSP correspondantes à ces pulsations propres [53, 54]. Les facteurs d'amortissement sont déterminés par la méthode de la demi-puissance. Cette méthode est adaptée à des structures aux modes bien séparés et à faible amortissement.

Sur le sillage de cette technique de Peak-Picking (PPT), a été développée la méthode dite FDD (*Frequency Domain Decomposition*) qui en garde la simplicité mais avec la possibilité de déterminer les modes proches [55]. Pour cette méthode, à la place de la DSP, il est utilisé sa décomposition en valeurs singulières (SVD-*Singular Values Decomposition*) :

$$[S_{ff}(\omega)] = [U] [\Sigma] [U]^H \quad (1.26)$$

avec :

- $[U] = [u_1, u_2, \dots, u_n]$  est la matrice des vecteurs singuliers
- $[\Sigma]$  est la matrice diagonale de valeurs singulières
- L'indice H correspond au transposé du conjugué complexe

La courbe des valeurs singulières résultantes de cette transformation est utilisée pour localiser les pulsations propres et les vecteurs singuliers correspondent aux déformées modales. Afin de permettre la détermination des coefficients d'amortissement, la FDD a été étendue en la mé-

thode EFDD (*Enhanced FDD*) [56]. Utilisant les DSP, il est également possible d'appliquer la méthode pLSCF ou PolyMAX à l'identification modale pour l'AMO.

Au début des années 1990, James et al. [57, 58] ont développé la méthode NExT (*Natural Excitation Technique*) pour l'identification des paramètres modaux à partir d'excitations naturelles où le signal d'entrée n'est pas connu. Ils y ont montré la similarité entre fonction de corrélation et IRF qui peuvent toutes deux être écrites comme la somme de sinusoides décroissants. Chaque sinusoides décroissant a une fréquence propre, un facteur d'amortissement et un coefficient de déformée modale. Remplaçant les IRFs par les fonctions de corrélation, les méthodes dans le domaine temporel pour l'AME tels que les méthodes ITD, PRCE, ERA, etc. peuvent être adoptée pour l'AMO. Parmi les méthodes utilisées dans le domaine temporel, nous pouvons aussi citer les méthodes stochastiques d'identification par sous-espaces ou SSI (*Stochastic SubSpace Identification*) que sont la méthode SSI-Cov (*correlation ou covariance-driven SSI*) qui est basée sur les matrices de corrélation des sorties  $R_{ff}(\tau)$  et la méthode SSI-Data (*Data-Driven SSI*) basée directement sur les sorties  $f(t)$  [59-61].

### 1.3.5 Identification des modes

L'estimation des paramètres modaux n'est pas toujours une tâche simple surtout quand le niveau bruit dans les données est élevé ou en cas de présence de modes très proches les uns des autres. Plusieurs outils existent pour faciliter l'identification des modes dans de tels cas. Les plus couramment utilisés sont la fonction multivariée indicatrice de mode ou MMIF (*multiple variable mode indicator function*) [62], la fonction complexe indicatrice de mode ou CMIF (*complex mode indicator function*) [63] et le diagramme de stabilité (ou de cohérence).

— **La MMIF** est donnée par :

$$\text{MMIF}_{jk} = \frac{\mathbf{F}\mathbf{H}_R^T\mathbf{H}_R\mathbf{F}}{\mathbf{F}(\mathbf{H}_R^T\mathbf{H}_R + \mathbf{H}_I^T\mathbf{H}_I)\mathbf{F}} \quad (1.27)$$

où  $\mathbf{H}_R$  et  $\mathbf{H}_I$  sont la partie réelle et imaginaire de la FRF  $H_{jk}$  et  $\mathbf{F}$  est la force d'entrée  $F_k$ . Les MMIFs tracées en fonction de  $\omega$  indique la position des fréquences naturelles au niveau des minima. Un exemple de la courbe obtenue est donné à la figure 1.9a. La MMIF peut donner des résultats précis pour indiquer l'existence de modes. Cependant si les mesures présentent une certaine distorsion ou s'il y a des informations de phase dans les mesures (associées à des modes normaux ou complexes non réels), alors la MMIF peut ne pas être en mesure d'identifier les modes avec précision.

— **La CMIF** est déterminée par la SVD (décomposition en valeurs singulières) de la matrice des FRFs. La CMIF est le tracé des valeurs singulières en fonction des fréquences dans une échelle semi-logarithmique. Les premières CMIFs auront un pic pour chaque mode du système, un exemple de CMIF est donné à la figure 1.9b. Les points où plus d'une courbe a un pic sont susceptibles d'être des fréquences naturelles répétées. Cependant la perfor-

mance de cette méthode décroît pour le cas des structures avec des modes très proches.

- **Le diagramme de stabilité** (ou de cohérence) est basée sur la détermination successive (itérative) de plusieurs paramètres modaux pour les mêmes données en faisant varier l'ordre du polynôme caractéristique de la FRF donnée à l'équation 1.18 ou de l'IRF correspondante. La construction du diagramme est faite par comparaison des paramètres modaux obtenus à l'ordre (itération)  $n + 1$  avec ceux obtenus à l'ordre  $n$  du polynôme. Seuls les modes remplissant un critère prédéfini de stabilisation sont considérés comme stables et correspondent aux modes physiques; les autres modes correspondants souvent à des modes *numériques*. Ces critères de stabilisation sont définis comme suit :

$$\begin{cases} \frac{|f(n+1)-f(n)|}{f(n)} < \epsilon_f \\ \frac{|\eta(n+1)-\eta(n)|}{\eta(n)} < \epsilon_\eta \\ [1 - \text{MAC}(\phi(n+1), \phi(n))] < \epsilon_\phi \end{cases} \quad (1.28)$$

où le MAC (*Modal Assurance Criterion*) est défini par :

$$\text{MAC}(\phi(n+1), \phi(n)) = \frac{|\phi(n+1)^T \phi(n)|^2}{(\phi(n+1)^T \phi(n+1)) (\phi(n)^T \phi(n))}$$

Les valeurs limites  $\epsilon_f$ ,  $\epsilon_\eta$  et  $\epsilon_\phi$  sont souvent fixés respectivement à 0.01, 0.05 et 0.02 [44]; cependant leurs définitions sont laissées à l'appréciation de l'analyste. Un exemple de diagramme de stabilité est donné à la figure 1.10.

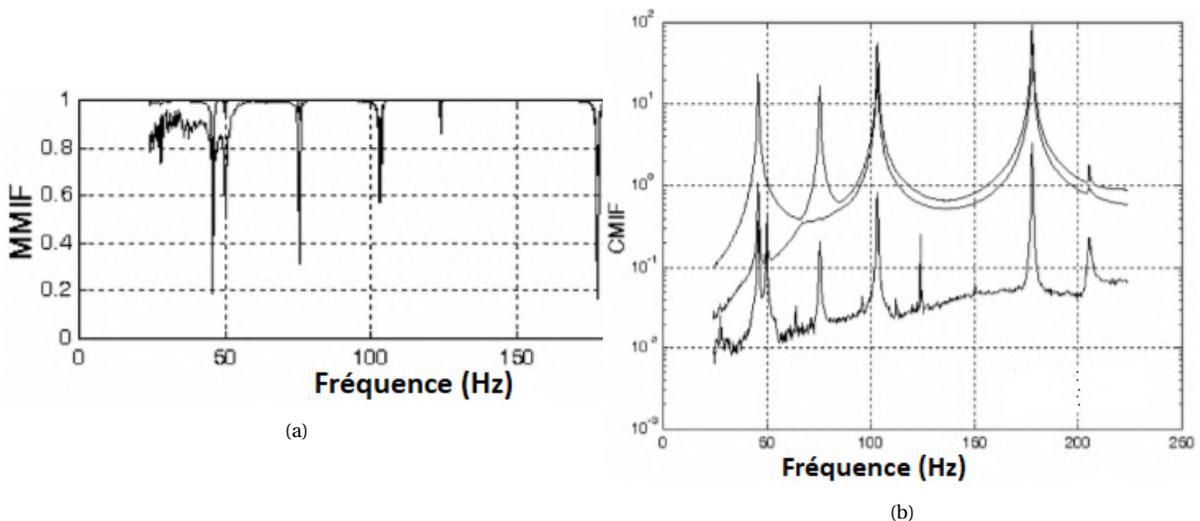


FIGURE 1.9 – Exemple d'indicateurs MMIF en (a) et CMIF en (b) [64]

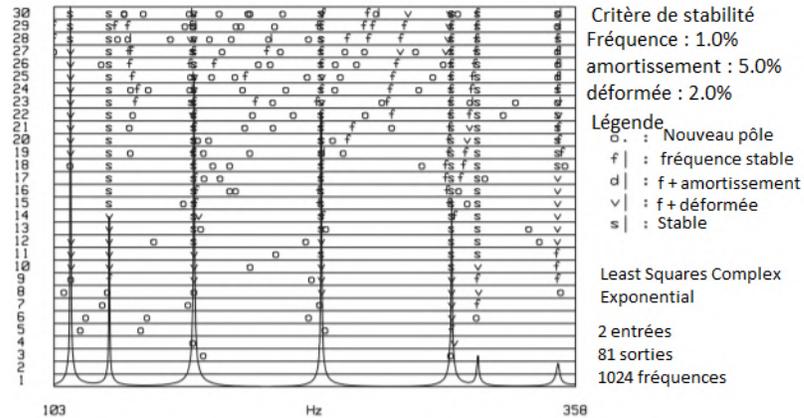


FIGURE 1.10 – Exemple de diagramme de stabilité [65]

### 1.3.6 Détection et localisation d'endommagements

L'identification des paramètres modaux, quoique cruciale, n'est qu'une étape préliminaire de l'analyse vibratoire dont l'objectif final est la caractérisation des défauts dans les structures. Une fois ces paramètres obtenus, diverses approches ont été proposées afin de procéder au diagnostic des défauts dans les structures. Ces différentes approches sont résumées dans diverses études ([34, 66-68]) faisant état de leur application dans les domaines du génie civil, de la mécanique et de l'offshore. À partir de ces paramètres modaux, les différentes méthodes proposées peuvent être classées naturellement dans trois catégories : les méthodes basées sur la variation des fréquences naturelles, celles basées sur la variation des déformées modales et celles basées sur le changement des amortissements entre structure saine et structure endommagée. Cependant des travaux [69, 70] ayant étudié les amortissements modaux soulignent l'instabilité de ces derniers, ce qui rend difficile leur utilisation pour la caractérisation de défauts. Ceci expliquerait le peu d'études faisant usage des amortissements pour la caractérisation de défauts. Ainsi dans ce qui suit, nous allons rappeler les principales méthodes basées sur les fréquences naturelles et les déformées modales.

#### 1.3.6.1 Variation des fréquences naturelles

Les fréquences naturelles sont, des trois paramètres modaux, les plus simples à déterminer. En effet dans de nombreux cas, elles peuvent être déterminées en utilisant qu'un capteur sur la structure étudiée. Elles sont également moins sensibles au niveau de bruit dans les données expérimentales [71]. Cependant la principale difficulté avec cette approche est la sensibilité des fréquences naturelles aux conditions environnementales telles que la température ou l'humidité. Des auteurs ont par exemple rapporté qu'une variation des températures de 15°C peut entraîner un changement de 4 à 5 % des fréquences naturelles [26]. Ainsi Creed [72] a souligné qu'un changement d'au moins 5 % dans les fréquences doit être noté pour qu'un tel changement puisse être attribué à un endommagement (en condition de service). Parmi les indicateurs

adoptés dans la littérature pour comparer les fréquences naturelles de l'état endommagée et de l'état sain d'une structure, il y a :

- **les FNNs** (fréquences naturelles normalisées) définies par :

$$\text{FNN}_i = \frac{f_i^d}{f_i^s} \quad (1.29)$$

$f_i^d$  et  $f_i^s$  renvoyant respectivement aux fréquences naturelles de la structure avec défaut et celle saine.

- **les pourcentages de changement en fréquences natures** ( $C_i(\%)$ ) [73, 74] définies par :

$$C_i(\%) = 100 \times \frac{f_i^s - f_i^d}{f_i^s} \quad (1.30)$$

- **le DLAC** (*Damage Location Assurance Criterion*) [75] qui est défini par :

$$\text{DLAC} = \frac{|\Delta f_A^T \Delta f_B(i)|^2}{(\Delta f_A^T \Delta f_A) (\Delta f_B^T(i) \Delta f_B(i))} \quad (1.31)$$

$\Delta f_A$  est le vecteur de changement de fréquences expérimentales et  $\Delta f_B$  le vecteur de changement théorique pour un défaut situé à la  $i^{\text{ième}}$  position. Ce paramètre varie de 0 à 1 et permet de localiser le défaut mais nécessite d'avoir un modèle théorique de la structure sous étude.

- Le Petit [11] a également proposé une méthode basée sur la variation relative des fréquences pour la caractérisation de défauts dans des câbles. Le paramètre est défini comme suit :

$$R_i^n = \frac{\Delta f_n^i}{f_n} - \frac{1}{2(1 + \gamma_n)} \frac{\Delta T^i}{T} \quad (1.32)$$

$$\gamma_n = \pi^2 n^2 \left( \sqrt{\frac{EI}{TL^2}} \right)^2$$

$f_n$  et  $T$  sont respectivement la  $n$ -ième fréquence et la tension dans la poutre de l'essai 1 qui est l'essai de référence.

$\Delta f_n^i = f_n^i - f_n$  et  $\Delta T^i = T^i - T$  avec  $f_n^i$  et  $T^i$  étant respectivement les fréquences naturelles et la tension du câble à l'essai  $i$ .

Cette méthode a permis de détecter les défauts dans les câbles mais n'a pas permis de les localiser.

### 1.3.6.2 Variation des déformées modales

À l'aide de coefficients de corrélation, les déformées modales sont proposées pour l'étude des endommagements dans les structures. Les changements de déformées modales englobent

à la fois la sévérité d'un endommagement et sa position étant donné qu'elles ont une dimension locale. Ainsi les déformées peuvent être utilisées pour la détection et la localisation de défauts. Les principaux paramètres pour la caractérisation de défauts avec les déformées modales sont : le MAC, le COMAC et leurs variantes et ceux basés sur les courbures modales.

Le **MAC (Modal Assurance Criterion)** [76] mesure le degré de corrélation entre deux déformées modales  $\phi^s$  et  $\phi^d$  d'une structure saine et avec défaut respectivement, il est défini par :

$$\text{MAC}(\phi^s, \phi^d) = \frac{|\{\phi^s\}^T \{\phi^d\}|^2}{(\{\phi^s\}^T \{\phi^s\}) (\{\phi^d\}^T \{\phi^d\})} \quad (1.33)$$

Il varie de 0 à 1 et 0 indique que les déformées sont totalement décorrélées (défaut probable).

Le **COMAC (COordinate Modal Assurance Criterion)** [77] ou coefficient de corrélation des points de mesure est donné par :

$$\text{COMAC}_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_m} |\phi_{i,j}^s \phi_{i,j}^d|^2}{\sum_{j=1}^{N_m} (\phi_{i,j}^s)^2 \sum_{j=1}^{N_m} (\phi_{i,j}^d)^2} \quad (1.34)$$

où  $\phi_{i,j}^s$  est la déformée à la position  $i$  du mode  $j$  de la structure saine;  $N_m$  est le nombre de modes considérés.

Des valeurs faibles de COMAC indiquent une faible corrélation entre les déformées et potentiellement un défaut.

Une variante aux MAC et COMAC ont également été étudiées telles que le PMAC (*Partial Modal Assurance Criterion*), le SMAC (*Scaled Modal Assurance Criterion*), le MACSR (*Modal Assurance Criterion Square Root*), le FRAC (*Frequency Response Assurance Criterion*), entre autres. Une étude de ces coefficients peut être trouvée dans [78].

Les études ont montré une plus importante sensibilité de ces coefficients basés sur les déformées modales pour la détection de défaut. Toutefois l'utilisation des déformées modales nécessite un maillage plus fin de la structure pour avoir des déformées propres. Parloo et al. [79], en utilisant ces deux coefficients, ont réussi à détecter des défauts sur le pont de l'autoroute I-40 au Nouveau-Mexique. Cependant ils ont mis en évidence que seuls les défauts les plus sévères ont pu l'être et que la présence de bruit affecte sévèrement les résultats.

En se basant sur les déformées modales, les **courbures modales** ont été étudiées pour la caractérisation de défauts avec les méthodes vibratoires. Les courbures modales sont définies comme les dérivées secondes des déformées modales et peuvent être obtenues par la méthode des différences centrées comme suit :

$$\phi''_{i,j} = \frac{\phi_{i,j-1} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i,j+1}}{d_m^2} \quad (1.35)$$

$d_m$  est la distance moyenne entre les points de mesure.

$\phi_{i,j}$  est la déformée modale du mode  $i$  à la position  $j$ .

Parmi les méthodes basées sur ces courbures modales pour la caractérisation de défauts, il y a le MSC (*Mode Shape Curvature*) encore appelé MCD (*Modal Curvature Differences*) qui est donné par :

$$\text{MCD}_{i,j} = |(\phi_{i,j}^s)'' - (\phi_{i,j}^d)''| \quad (1.36)$$

Des variantes à cette approche ont également été proposées telles que le MSS (*Mode Shape Slope*), le MSCS (*Mode Shape Curvature Square*), etc. [80]. Ho et Ewins ont montré que ces indicateurs basés sur la différence des courbures modales constituent de bons moyens pour détecter des défauts. Cependant de fausses détections peuvent être observées au niveau des extrémités des structures étudiées.

En étudiant les défauts sur des poutres en béton et sur le pont en béton Z24, Abdel Wahab et De Roeck [81] ont montré que les modes inférieurs sont plus précis pour la détection de défauts en utilisant les différences de courbures modales. Au lieu de considérer qu'un seul mode pour la caractérisation de défaut comme avec le MCD, ils ont proposé un paramètre moyen sur différents modes appelé CDF (*Curvature Damage Factor*) :

$$\text{CDF}_j = \frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} |(\phi_{i,j}^s)'' - (\phi_{i,j}^d)''| \quad (1.37)$$

$N_m$  est le nombre de modes considérés pour calculer le facteur CDF à la position  $j$ . Avec ce facteur, les auteurs ont souligné la possibilité de détecter des défauts multiples tout en insistant sur la nécessité d'avoir des déformées modales propres.

### 1.3.7 Conclusion

La revue bibliographique des méthodes vibratoires de contrôle non destructif a permis de voir que c'est une technique qui est utilisée depuis de longues années avec toute une série d'approches pour, et extraire les paramètres modaux et de leur utilisation pour caractériser des défauts. La pertinence de l'usage d'une méthode au détriment d'une autre est plus basée sur la complexité (problèmes de modes proches, de degré d'amortissement) de la structure étudiée et de la qualité des données recueillies lors de campagne expérimentales.

Ainsi dans le cadre de cette thèse, étant donné que pour les câbles, nous n'avons pas rencontré le problème des modes proches, les méthodes qui sont utilisées sont le Circle-Fit, le Line-Fit et la FDD. Une méthode a également été proposée pour la localisation de défauts dans les câbles dont l'étude par méthodes dynamiques dans la littérature est quasi absente.

## 1.4 Émission acoustique

### 1.4.1 Définition

L'émission acoustique (EA) est définie par la norme française [82] comme étant «des ondes élastiques transitoires engendrées par la libération d'énergie dans un matériau ou par un autre processus». Pour l'ASTM (American Society for Testing and Materials) [83], l'EA est «l'ensemble des phénomènes dans lesquels des ondes élastiques transitoires sont générées par dissipation d'énergie provenant de sources situées dans un matériau». Ces ondes en question sont situées dans un large spectre de fréquences allant de quelques kHz à plusieurs MHz [84, 85]. Le terme d'émission acoustique renvoie également à la méthode de contrôle non destructif développée pour caractériser et suivre des mécanismes d'endommagement d'un matériau ou d'une structure.

L'émission acoustique peut être générée par diverses sources. En guise d'exemples dans les matériaux composites, elle est principalement due aux ruptures de la résine, aux ruptures de fibres, aux délaminages. Et dans des matériaux métalliques, l'EA peut être due à la corrosion sous contrainte, à la propagation de fissures, au maclage, aux micro-clivages, etc. [24]. Pour le cas des câbles métalliques, l'EA peut être engendrée par des frottements entre fils, des ruptures de fils mais aussi par des ruptures de résine ou produit de remplissage dans les ancrages [86].

Le signal d'émission acoustique engendré par la libération d'énergie est enregistré au moyen de capteurs montés sur la structure étudiée. Cependant du foyer ou source de l'EA jusqu'au capteur, l'intensité de l'onde élastique émise est sujette à divers phénomènes comme l'atténuation, la dispersion, l'absorption, etc. Ainsi Ces phénomènes peuvent être dus à la nature hétérogène des matériaux utilisés, à la complexité de la structure étudiée, au couplage structure-capteur, à la distance source-capteur ou à la température ambiante [14, 87].

Pour l'acquisition des signaux d'EA, le premier maillon de la chaîne est constitué par le capteur. Différents types de capteurs existent :

- Les capteurs piézoélectriques, faciles à mettre en place, ont une grande sensibilité au déplacement, d'environ  $10^{-13} m$ . Le couplage avec la structure est souvent réalisé avec une colle, une fixation mécanique ou à l'aide d'un guide d'ondes interposé si la structure est dans une ambiance non supportable par le capteur [14, 84].
- Les capteurs à fibres optiques, flexibles, durables et immunisés contre les interférences électromagnétiques, sont directement insérés dans le matériau en étude [88, 89]. Cependant ces types de capteurs ont une bande de fréquences limitée et une faible sensibilité [90].
- Les capteurs capacitifs, moins résonants, ont une large bande de fréquence. Cependant ils ont également une sensibilité moins élevée comparés aux capteurs piézoélectriques [84].

Les capteurs piézoélectriques, du fait de leur sensibilité élevée et de leur facilité d'utilisation, sont ceux qui sont les plus utilisés même s'ils sont souvent résonants [91, 92]. Pour s'assurer d'un bon couplage entre le capteur et la structure, mesurer la vitesse de propagation des ondes émises et aussi vérifier la bonne localisation des sources d'EA lorsque plusieurs capteurs sont présents, des tests normalisés dits Hsu-Nielsen [93] sont réalisés. Ces derniers consistent à ef-

fectuer des séries de «cassés de mine (à diamètre et longueur normalisés)» à la surface de la structure.

Le niveau des signaux obtenu à la sortie des capteurs étant souvent très faibles, ils sont alors amplifiés avec des préamplificateurs. Après cette phase d'amplification, le signal d'EA peut être traité et analysé. Le système d'acquisition d'EA est ainsi schématisé à la figure 1.11. Cette dernière phase de l'acquisition permet de connaître le contenu des signaux et donc de déterminer et différencier les mécanismes sources. L'application d'un seuil de détection au signal permet tout d'abord de limiter l'acquisition des signaux parasites (bruits) mais aussi de discrétiser le signal. En effet, il existe classiquement deux types de signaux en EA [94]. Lorsque les salves peuvent être séparées les unes des autres, l'émission est appelée discrète. Il s'agit alors de signaux transitoires à caractère impulsionnel. A l'inverse, une émission où les salves ne peuvent pas être distinguées les unes des autres est dite continue. Il s'agit alors d'une superposition d'événements très fréquents dans le temps. Généralement, les EA utilisées pour suivre l'endommagement des structures sont de type discrètes. Une fois discrétisées, elles peuvent être caractérisées dans le domaine temporel et dans le domaine spectral. Une salve est caractérisée par de nombreux paramètres dont les principaux sont l'amplitude, la durée, l'énergie, le temps de montée, etc. (le détail de ces paramètres est donné à l'annexe 1.5).

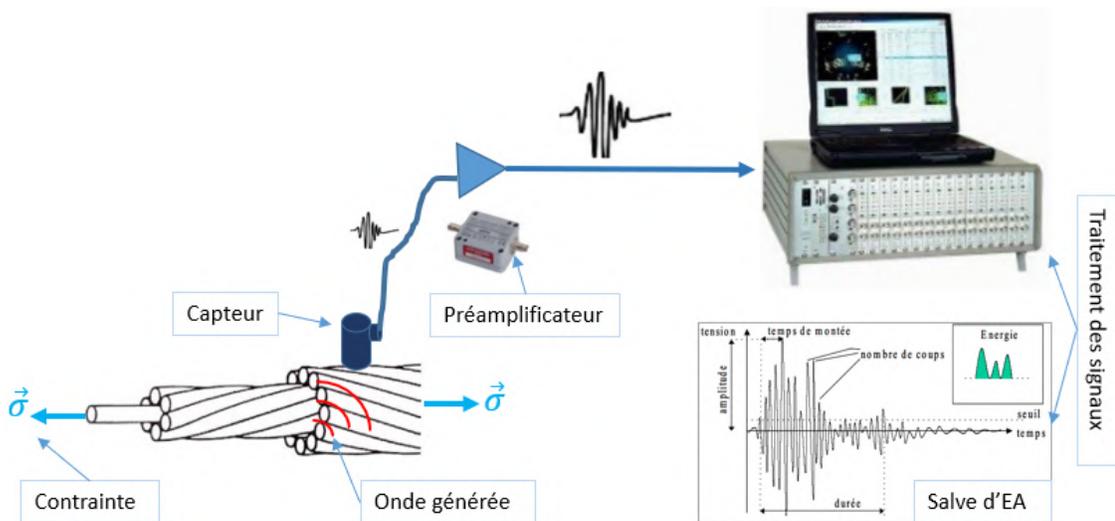


FIGURE 1.11 – Système d'acquisition d'émission acoustique

## 1.4.2 Historique

Le phénomène d'émission acoustique en tant que somme d'ondes ou «sons émis» par libération d'énergie d'un matériau soumis à une contrainte extérieure est connu depuis de longues décennies. En effet dans la littérature, l'historique de l'émission acoustique est souvent liée à des phénomènes audibles pour l'humain tels que le «cri» de l'étain qui est produit lors du macleage de l'étain pur durant la phase de déformation plastique [85, 95]. D'autres phénomènes se produisant à plus grandes échelles sont également assimilés à ce phénomène d'EA comme

les séismes, les éboulements de terrains, entre autres. En effet le premier rapport scientifique sur une expérimentation de l'émission acoustique a été présenté par le professeur Fuyuhiko Kishinouye en Novembre 1933 [85, 96] en amplifiant et en enregistrant la rupture de poutre en bois pour simuler la rupture de la croûte terrestre comme cause de tremblement de terre [97]. Cependant la technologie d'EA va réellement prendre de l'ampleur après les travaux de Josef Kaiser en 1950 [98]. Ce dernier a réalisé des essais de traction sur des matériaux métalliques polycristallins pour déterminer les bruits générés à l'intérieur de l'échantillon, les phénomènes acoustiques impliqués, les niveaux de fréquence recueillis et la relation entre la courbe contrainte-déformation et les fréquences notées pour les différentes contraintes auxquelles les échantillons ont été soumis. Il découvre ainsi l'irréversibilité des phénomènes provoquant des émissions acoustiques, aujourd'hui connue sous le nom *effet Kaiser*.

Le développement de la technologie d'EA va s'accélérer à la fin des années 1960 avec la création de groupes de travaux tels que l'AEWG (*Acoustic Emission Working Group*) au printemps de 1967 aux Etats-Unis, le JCAE (*Japanese Committee on Acoustic Emission*) créé en 1969, l'EWGAE (*European Working Group on Acoustic Emission*) créée en 1972 en Angleterre, etc. [97, 99, 100]. De ces initiatives, naîtra le JAE (*Journal of Acoustic Emission*), journal exclusivement dédié aux publications de plus en plus nombreuses sur l'EA et dont le premier numéro a été publié en 1982.

Sous l'impulsion de ces groupes de travail, la technique d'EA connaît une progression constante profitant des avancées technologiques notamment avec le développement de l'électronique, du traitement du signal et de l'informatique. Ses domaines d'application se diversifient également.

### 1.4.3 Applications

Appliquée dès 1964 pour vérifier l'intégrité structurale de la fusée Polaris de l'US Navy [101], l'EA s'étend rapidement dans divers domaines tels que (figure 1.12) :

- le contrôle des équipements sous pression [102]
- le contrôle des structures industrielles comme les fuites d'air ou de liquides, la surveillance des réacteurs nucléaires [103, 104]
- le contrôle et l'évaluation des matériaux (composites, bétons, bois, etc.) [84, 105-108]
- la surveillance des procédés de fabrication des matériaux (usinage) [109]
- l'évaluation d'endommagements sur ouvrages d'art [110-112]

En ce qui concerne l'auscultation des ouvrages d'art par l'émission acoustique, elle est faite dans le but de détecter des phénomènes tels que la corrosion, la fissuration ou les ruptures de fils des câbles de ponts.

#### 1.4.3.1 Détection et suivi de corrosion

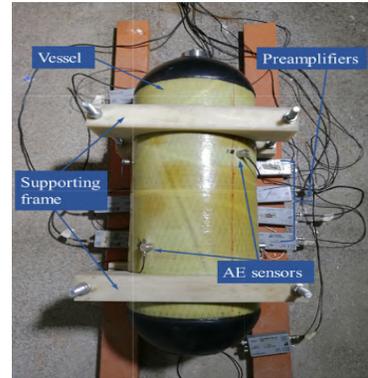
Comme signalé plus haut, les phénomènes de corrosion constituent l'une des principales sources de dégradation des ouvrages du génie civil (acier de précontrainte, structures métal-



(a) Évaluation des piles d'un pont ferroviaire en béton [102]



(b) Détection et évaluation d'une fuite valve [102]



(c) caractérisation d'un vaisseau d'hydrogène en composite sous pression [113]

FIGURE 1.12 – Exemples d'application de la technique d'EA

liques et câbles de ponts). Lors de cette corrosion, plusieurs sources d'EA peuvent être en jeu, dépendant du type de corrosion. Ces divers mécanismes sont entre autres la dissolution du métal, les ruptures des fins films d'oxyde (supérieurs au micromètre), les ruptures et/ou décohésions de phases, la déformation par glissement, l'initiation de fissures et propagation induite par fissuration sous contrainte et la fragilisation par l'hydrogène (voir figure 1.13) [14]. Cepen-

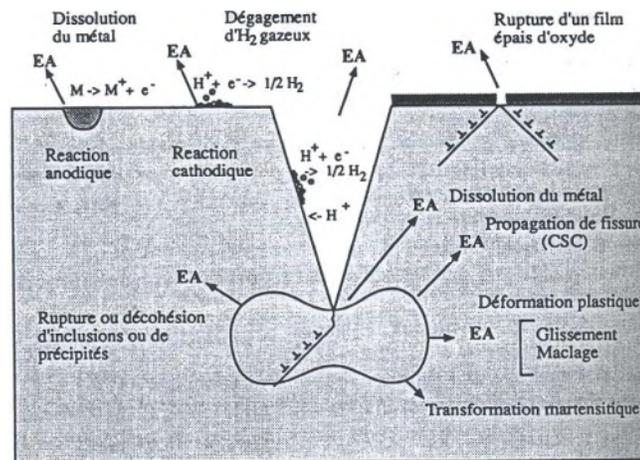


FIGURE 1.13 – Sources d'émission acoustique lors de la corrosion [114]

tant ces sources d'EA ne sont détectables que si le niveau d'énergie du signal émis atteignant le capteur est assez élevé et bien sûr en utilisant un matériel (capteurs, couplant) adapté. Ainsi lors de l'amorçage de piqûres sur des alliages d'acier et d'aluminium, une faible activité d'EA a été notée par Mazille et Fregonese et al. [115, 116]. Et le nombre d'événements augmente avec la propagation des piqûres (figure 1.14a). Ramadan [117] est arrivé à la même conclusion en étudiant la CSC d'un acier de précontrainte dans un milieu chloruré (figure 1.14b). L'augmentation de l'activité d'EA pendant la propagation des piqûres, marquant le début de l'endommagement, est liée à une augmentation de la formation des bulles d'hydrogène. Ainsi dans le cas d'une corrosion sous contrainte liée à une corrosion par piqûres, trois phases peuvent être identifiées

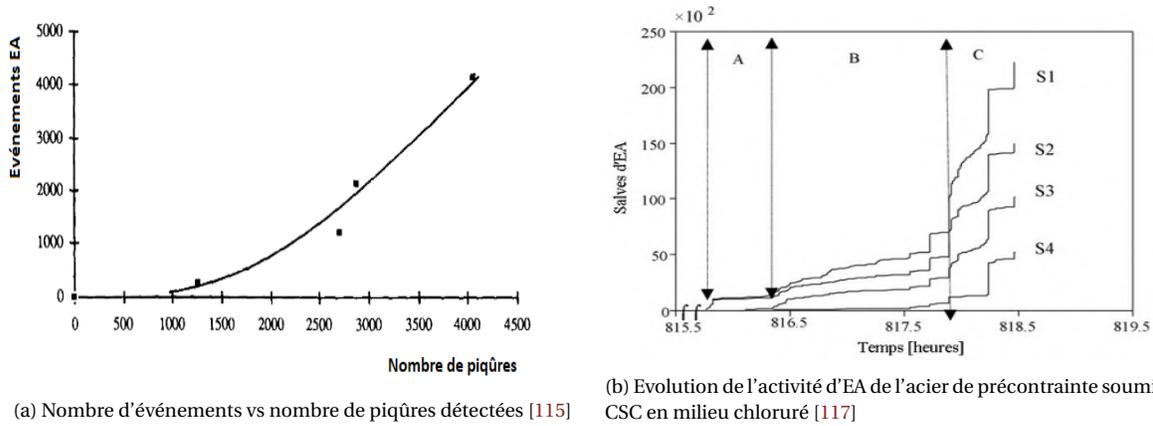


FIGURE 1.14 – Détection de l'activité d'EA en corrosion

[118, 119] :

- **Phase 1** : la propagation de piqûres en relation avec l'amorçage de micro-fissures qui est peu émissive (1.15)



FIGURE 1.15 – Phase 1 : Initiation des piqûres [119]

- **Phase 2** : la propagation des micro-fissures puis leur coalescence en fissures qui est un peu plus émissive que la première phase (1.16)



FIGURE 1.16 – Phase 2 : Propagation des fissures [119]

- **Phase 3** : la propagation rapide des fissures avant la rupture finale (1.17)

L'analyse des salves d'EA recueillies à chacune de ces phases permet de donner les paramètres caractéristiques de chacune d'elles et de les dissocier. Ainsi en se basant sur les paramètres des salves tels que l'amplitude, la durée, le temps de montée, le nombre de coups et le nombre de signaux, Ramadan [117] donne les valeurs moyennes de ces paramètres pour les trois différentes phases (pour le capteur ayant enregistré le plus de signaux) (tableau 1.3). Shaikh et al. [120] se sont également principalement basé sur les paramètres de l'amplitude, de l'énergie, du nombre

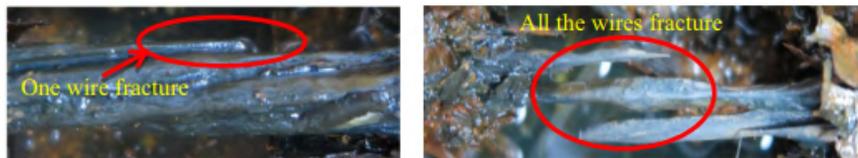


FIGURE 1.17 – Phase 3 : Propagation avant rupture finale des fissures [119]

de coups et du temps de montée pour distinguer ces différents mécanismes pour un acier inoxydable dans une solution de chlorure de magnésium ( $MgCl_2$ ).

	Phase 1	Phase 2	Phase 3
<b>Amplitude</b> (dB)	$\leq 30$	$\leq 40$	$\leq 55$
<b>Durée</b> ( $\mu s$ )	$\leq 300$	$\leq 500$	$\leq 900$
<b>Temps de montée</b> ( $\mu s$ )	$\leq 120$	$\leq 300$	$\leq 450$
<b>Nombre de coups</b>	$\leq 70$	$\leq 300$	$\leq 300$
<b>Nombre de signaux</b>	$\sim 10$	$\sim 40$	$\sim 200$

TABLEAU 1.3 – Valeurs moyennes des signaux enregistrés durant les phases d'initiation et de propagation des fissures et de rupture de l'acier [117]

L'EA peut également être utilisée pour le suivi de la corrosion du béton armé et du béton précontraint qui sont également sujets aux phénomènes de fragilisation par l'hydrogène et de corrosion sous contrainte (figure 1.18) [121]. Ainsi des études ont montré une bonne corrélation entre l'EA et les méthodes «traditionnellement» utilisées pour le suivi de la corrosion dans du béton précontraint/armé que sont les méthodes électrochimiques ou encore visuelles [122, 123]. A la figure 1.19a, l'évolution du nombre d'événements d'EA et du courant en fonction du temps montre la possibilité de détecter des micro-fissures associées à la corrosion. De surcroît, il est noté une augmentation de l'activité d'EA bien avant celle du courant galvanique; ce qui montre la capacité de l'EA à détecter les endommagements liés à la corrosion avant les méthodes électrochimiques. Des résultats similaires ont été obtenus par Idrissi et al. [124, 125] avec des éprouvettes de béton armé plongées dans une solution de chlorure de sodium (NaCl) (figure 1.19b).

#### 1.4.3.2 Suivi de l'endommagement des câbles du génie civil

En ce qui concerne les câbles utilisés au niveau des ponts, nous avons comme sources d'émission acoustique les frottements interfilaires, la corrosion et les ruptures de fils. Près des ancrages cette émission acoustique peut également provenir des matériaux de remplissage utilisés tels que la résine ou les alliages à bas point de fusion. En ces zones, ces matériaux de remplissage constituent les principales sources de bruit de fond [126] (pour certainement des conditions d'essais en laboratoire car sur site le bruit de fond peut provenir aussi du trafic par exemple). Les ruptures de fils provoquent des ondes acoustiques qui se propagent dans les câbles avec un niveau d'énergie important détectable sur une certaine distance par des capteurs placés le long

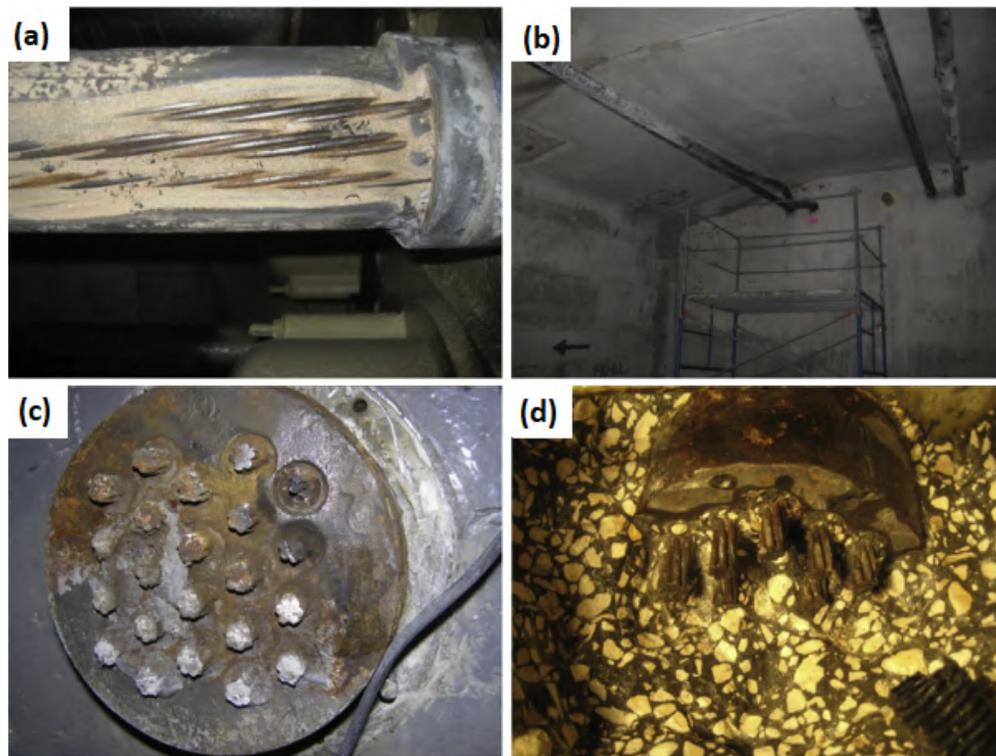


FIGURE 1.18 – Exemples de matériaux et de composants de précontraintes corrodés : (a) Corrosion d'un toron de tendon avec contamination par le sable. (b) Tendon externe endommagé. (c) Toron, cales et plaque de cale corrodés. (d) Corrosion de surface sur l'ancrage [121]

des câbles. La première application connue de la méthode d'EA pour la détection de fils rompus dans des câbles de génie civil est de Laura et al. dès 1969 [127, 128]. En utilisant cette technique sur des câbles de diamètres et de longueurs différents testés en traction/fatigue, ils ont pu détecter des ruptures de fils à 95 % de la charge maximale ( $R_m$ ) durant les cycles de chargement. Ils ont constaté que les signaux enregistrés avant ruptures ont des amplitudes supérieures à ceux du bruit de fond de l'ordre de 15 à 30 dB. En 1974, Harris et Dunegan [129] ont également montré que l'EA permet de détecter des ruptures de câbles métalliques en réalisant des essais de traction et de fatigue.

Hanzawa et al. [130], en menant des essais de fatigue sur câbles d'amarrage et de suspension, ont développé un système de détection et de localisation des ruptures de fils. Ils ont ainsi obtenu des taux de détection (nombre de ruptures détectées sur nombre réel de ruptures) de 30 à 100 % et on constaté que plus le nombre de ruptures est important, plus le taux de détection est faible.

Les travaux de Casey et al. et ceux de Holford [131] ont confirmé ces résultats et étudié les atténuations des signaux sur des câbles à grandes longueurs. Ils ont montré que les ruptures dans des câbles métalliques pouvaient être détectées et séparées du bruit de fond. En outre, concernant l'atténuation des signaux d'EA, ils ont conclu qu'ils étaient détectables jusqu'à une distance d'environ 30m pour Cassey et al. et 46m pour Holford (figure 1.20) en se basant sur les amplitudes pics. Les techniques de localisation linéaires des sources leur a également permis

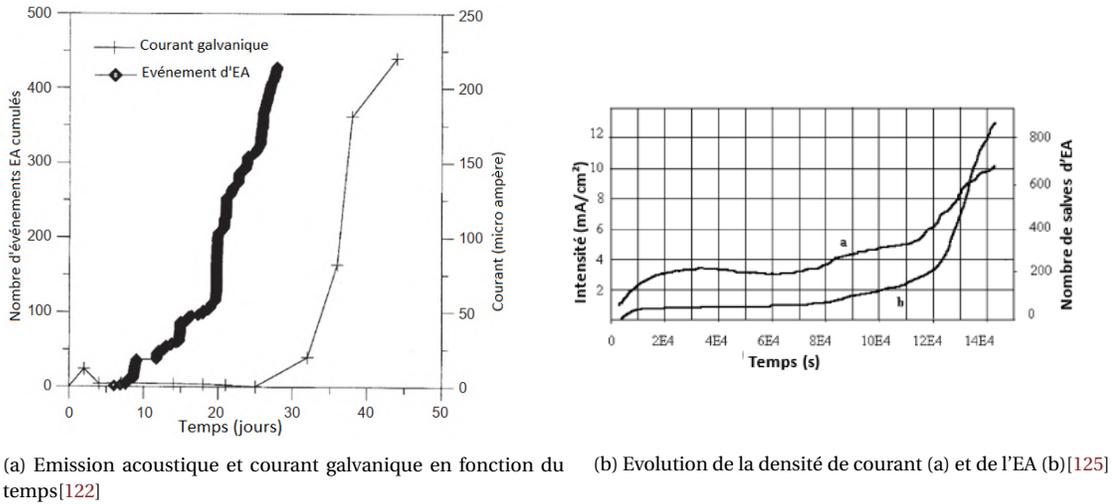


FIGURE 1.19 – Corrélation entre EA et méthodes électrochimiques

d’avoir une localisation plus ou moins précise des ruptures de fils à environ 1m. De surcroît les ondes de cisaillement et de compression notées près des ruptures de fils se convertissent en ondes de surface en s’ éloignant du foyer.

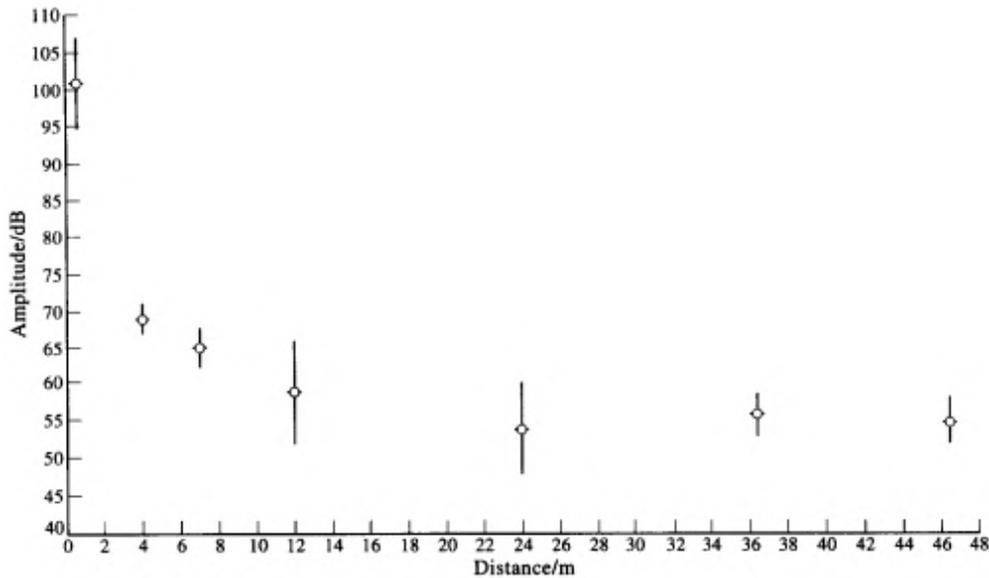


FIGURE 1.20 – Variation de l’amplitude du signal (dû aux ruptures de fils) avec la distance (des ruptures au capteur)–câble de diamètre 20mm [131]

Ces travaux de recherche vont aboutir à des systèmes dédiés à l’inspection des câbles métalliques utilisés dans les ouvrages du génie civil. Parmi ceux-ci, il y a le «wire-break detector» [132] développé et testé en laboratoire puis sur sites industriels par Casey et al. au milieu des années 1980. Les premières ruptures de fils en couches internes et celles des couches externes ont pu être détectées. La détection devient moins bonne au fur et à mesure que le nombre de ruptures augmente.

Pendant cette même période, au LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), au début

des années 1970, une méthode de surveillance des câbles voit le jour. Cette méthode, baptisée CASC (Contrôle Acoustique et Surveillance des Câbles), a été développée en réponse aux besoins de surveillance du pont de Tancarville [133]. Depuis, cette méthode a connu de nombreuses évolutions et permet aujourd'hui une haute surveillance des ouvrages par télésurveillance. Des capteurs de types accéléromètres piézo-électriques régulièrement disposés sur le câble permettent de recueillir les ondes de choc générées par rupture(s) *fragile(s)* de fil(s). Le passage de l'onde de choc au droit des accéléromètres est détecté par une augmentation du signal par rapport à une valeur seuil, fixée expérimentalement après une période d'apprentissage, en prenant en compte le bruit de fond. Dans le cas d'un câble isolé, la réception d'une information par au moins trois capteurs permet à la fois de calculer la vitesse de propagation et de localiser le lieu de la rupture. La localisation à partir de la réception d'une information par deux capteurs peut être estimée en faisant une hypothèse sur la vitesse de propagation [134]. Le principe de fonctionnement de cette méthode est donné à la figure 1.21. Ce système peut être utilisé pour la

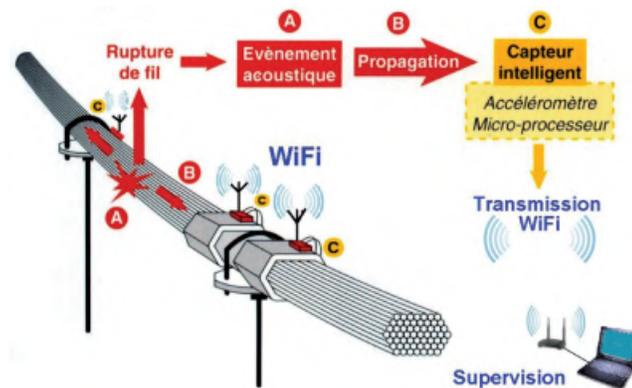


FIGURE 1.21 – Principe de fonctionnement du système CASC [134]

détection et la localisation de ruptures de fils dans les :

- câbles et suspentes de ponts suspendus
- câbles de ponts à haubans
- câbles de précontrainte extérieure
- câbles de précontrainte intérieure (accéléromètres placés sur le parement de béton le long du tracé du câble).

Suite à l'expertise complète de plusieurs ponts surveillés, il a été constaté une bonne corrélation entre le nombre de fils/ câbles rompus réellement dans l'ouvrage et le nombre de ruptures détectées par ce système durant sa surveillance [135]. Cependant ce système admet quelques limites :

- l'installation peut être lourde et onéreuse (plusieurs centaines de capteurs pour des opérations importantes)

- elle ne permet pas de caractériser l'état réel du câble, elle ne donne que le rythme de l'évolution des ruptures. En effet elle ne permet pas de connaître le nombre de ruptures qui se sont éventuellement produites avant le début l'instrumentation.
- elle ne permet de détecter que les ruptures brutales produisant des ondes de choc dont la propagation n'est pas limitée par des éléments mécaniques. Ainsi les ruptures qui libèrent peu d'énergie acoustique ne sont probablement pas détectées. Il en est de même au niveau des endroits où la propagation de l'onde de choc est limitée par des parements de béton à épaisseurs importantes et aussi au niveau des colliers ou des ancrages.

Parmi les systèmes les plus connus développés pour la surveillance des câbles d'ouvrages d'art, il y a également le système SoundPrint développé par Pure Technologies [136] et le système Dai-sAE développé par le groupe MISTRAS [137]. Fonctionnant sur le même principe que le système CASC avec les mêmes limites, ceux-ci ne seront pas détaillés.

Cependant dès 1977 Egan [138] souligne que, parmi les exigences de l'inspection d'un câble métallique, figure la **découverte** (quelque chose de déjà existant avant même qu'elle ne soit trouvée) et la mesure de la dégradation. Pour répondre à ce besoin et pallier aux limites de ces systèmes (impossibilité de caractériser les défauts antérieurs et ceux dans les parties cachées) pour l'auscultation des câbles, l'investigation des frottements interfilaires est entreprise en tablant sur la différence de signatures acoustiques d'un câble avec fils rompus et d'un câble sain (sans fils rompus). Il s'agit en tout premier lieu de repérer les défauts existants en étudiant les frottements de fils rompus sur leurs 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.

La possibilité d'auscultation des matériaux par le suivi des frottements a été mise en évidence dans le milieu industriel en étudiant les phénomènes d'usures rencontrés dans l'utilisation des aciers à haute résistance (HSS) ou des alliages légers. Les travaux de Skare et al. [139, 140], de Baranov et al. [141, 142] et de Löhr et al. [143] par exemples ont montré que l'EA produite lors des mécanismes de frottements et de processus d'usures dépendent des combinaisons de matériaux, de l'état de surface (rugosité, présence ou non de lubrifiant, revêtement), de la pression et de la vitesse relative entre les surfaces en contact (figure 1.22). Ils montrent que l'importance du glissement par frottements est régie par le phénomène de glissement-frottement qui dépend de la déformation élastique des matériaux et que les paramètres d'EA les plus importants pour le diagnostic des frottements sont le nombre de coups, l'amplitude et l'énergie. Cependant les études adoptant cette approche par les mécanismes de frottements pour diagnostiquer les câbles du génie civil sont très rares. Les seules rencontrées sont celles initiées au LCPC au début des années 2000 par Gaillet et al. sur des câbles monotorons multicouches avec des défauts effectués dans les ancrages [144]. Ces câbles sont mis en vibration en appliquant une force transversale avec un exciteur mu par un moteur électrique afin de provoquer des EA. Les frottements des fils rompus sur les fils sains restants provoquent des EA différentes de celles produites par un câble sans fils rompus notamment en terme de nombre de coups, de salves et d'amplitudes (1.23a). En outre ils ont montré que ce frottement interfilaire dans un câble endommagé dépend fortement de la sévérité de l'endommagement (1.23b).

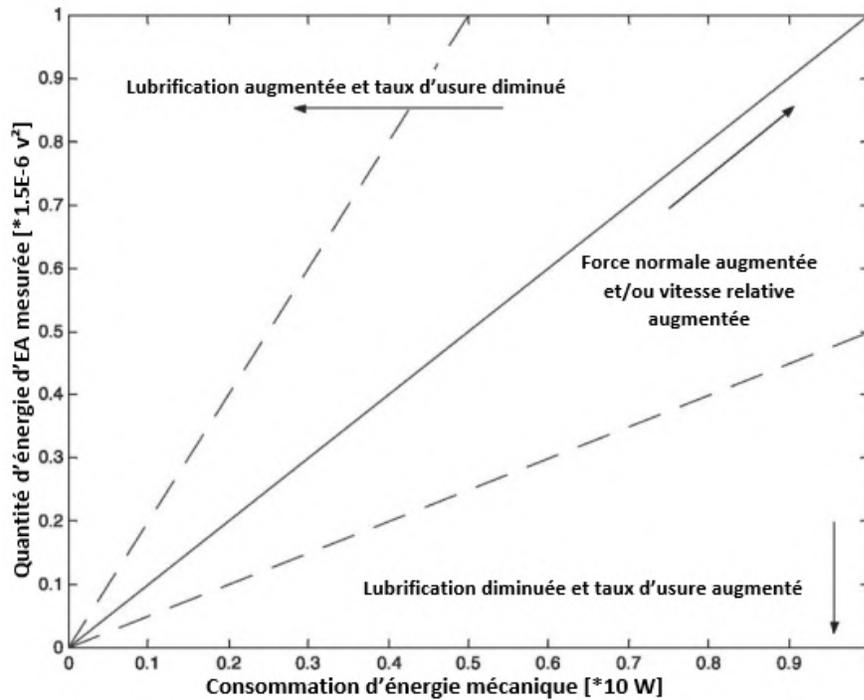
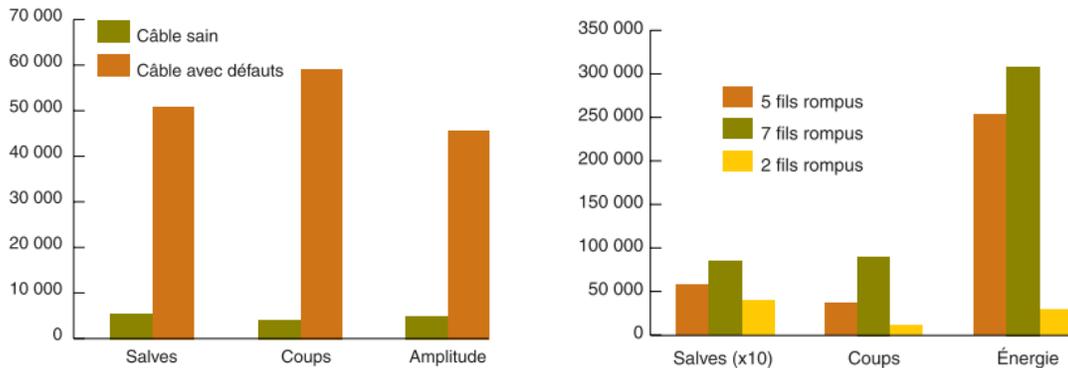


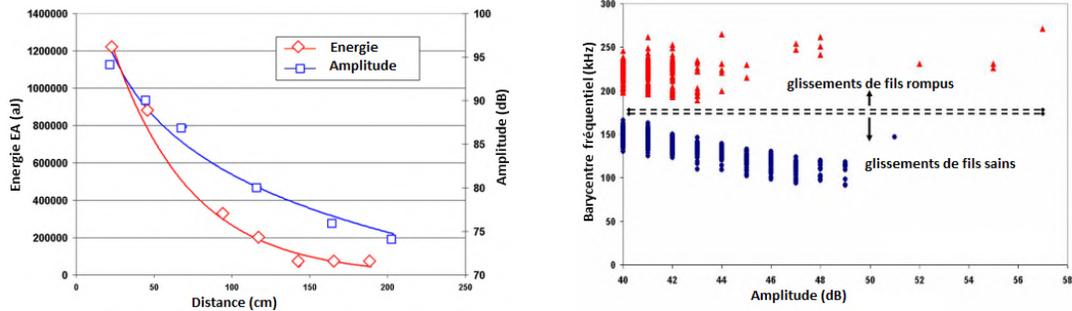
FIGURE 1.22 – Relation entre l'énergie mécanique et l'énergie d'EA [140]



(a) Comparaison du nombre de coups, de salves et de l'amplitude suivant la présence ou non de défauts sur les câbles (b) Activité acoustique en fonction du nombre de fils rompus sur le câble à l'intérieur du culot d'ancrage

FIGURE 1.23 – Identification des phénomènes de frottements sur câbles du génie civil [144]

Cette étude a été poursuivie par Zejli [24, 87, 145] afin de mieux appréhender les mécanismes de frottement des fils rompus sur les fils sains. Les frottements dépendent du matériau, de la rugosité et de la lubrification. Différents paramètres ont été modifiés comme la présence ou non d'huile entre les fils ou encore la présence de corrosion. En étudiant les conditions de propagation des ondes d'EA, il a été noté une forte atténuation des valeurs des paramètres tels que l'amplitude et l'énergie des signaux (figure 1.24a). Les paramètres fréquentiels, fréquence moyenne et barycentre fréquentiel, se sont révélés être les plus stables. Et ce dernier (barycentre fréquentiel) a permis de distinguer deux populations d'EA attribuées aux frottements des fils rompus sur fils sains et aux frottements inter fils sains (figure 1.24b).



(a) Évolution des paramètres d'amplitude et d'énergie en fonction de la distance de propagation à partir de l'extrémité de l'ancrage [145] (b) Distinction câbles sains et câbles endommagés avec l'analyse des paramètres d'EA[86]

FIGURE 1.24 – Paramètres pour la caractérisation des signaux d'EA des frottements de câbles

Cependant pour que cette approche puisse être utilisée sur des ouvrages en service où il existe plusieurs sources en même temps, il reste à affiner ces outils de manière à pouvoir isoler les sources d'EA ayant lieu pendant le recueil de données. Pour cela, en plus de l'analyse de corrélation entre paramètres d'EA, il serait intéressant de tester des algorithmes d'apprentissage automatique (Machine Learning) afin d'y parvenir. En outre, l'identification des défauts en partie courante par l'EA reste à explorer.

#### 1.4.4 L'analyse des données d'émission acoustique

Après avoir fixé un seuil pour lequel l'activité EA est très faible ou nulle avant le début de l'essai et effectué l'acquisition des données, il existe plusieurs approches permettant de réaliser l'analyse de l'EA acquise. Cette analyse des salves de l'EA est faite à partir de descripteurs temporels (temps de montée, durée, nombre de coups, fréquence moyenne) et/ou fréquentiels (barycentre fréquentiel, fréquence de pic). Les différents types d'analyse sont l'analyse temporelle ou chronologique, l'analyse statistique *basique*, l'analyse de corrélation et l'analyse statistique multivariable ou apprentissage automatique [84].

##### 1.4.4.1 Analyse temporelle ou chronologique

Cette approche consiste à étudier l'évolution des paramètres de l'EA en fonction du temps de l'essai. Avec cette analyse, il est de commun usage de représenter également l'évolution du cumul de valeurs de chaque paramètre en fonction du temps. Elle permet de voir la dynamique de l'activité d'émission acoustique et connaître à quel moment de l'essai des changements singuliers apparaissent dans la structure. Ces singularités ou changements brusques dans l'évolution de l'activité peuvent correspondre à une activation d'une nouvelle source d'EA ou l'accélération de l'activité d'une source déjà existante.

#### 1.4.4.2 Analyse de corrélation

L'analyse temporelle est souvent combinée avec une analyse de corrélation. Cette dernière consiste à regarder l'évolution des paramètres EA les uns en fonction des autres. Elle permet de distinguer différents groupes de signaux distincts «spatialement» renvoyant probablement à des mécanismes différents.

#### 1.4.4.3 Analyse statistique *basique*

À côté de ces deux précédentes approches classiques, il y a l'analyse statistique de base. Cette dernière consiste à tracer par exemple les histogrammes ou densités de distribution des événements d'EA en fonction des paramètres tels que l'amplitude. À l'image de l'analyse de corrélation elle peut permettre de déceler différents mécanismes à l'origine de l'EA. Tout comme l'analyse de corrélation, elle peut identifier les valeurs potentiellement aberrantes dans les données recueillies.

En face de conditions environnementales difficiles ou en présence de plusieurs mécanismes d'endommagement simultanés, ces types d'analyse susmentionnés peuvent s'avérer insuffisants. De ce fait, il peut devenir nécessaire de les combiner avec des outils plus puissants basés sur le concept de l'apprentissage automatique.

#### 1.4.4.4 Analyse statistique multivariées

Pour arriver à identifier les différences ou similitudes entre les données recueillies, il est souvent nécessaire de regarder non pas deux ou trois paramètres mais plusieurs paramètres en même temps afin de connaître leurs degrés de corrélation et ceux qui, le mieux, caractérisent ces données. Des outils mathématiques permettent de faire cela à partir d'une analyse statistique en prenant en compte plusieurs paramètres simultanément et ayant pour but, dans le cas de l'analyse de l'EA, de faire ressortir les différents groupes ou clusters de mécanismes impliqués dans la génération de cette EA. Ces méthodes se subdivisent en deux catégories à savoir l'analyse supervisée et l'analyse non-supervisée.

**L'analyse non-supervisée** fait référence à l'ensemble des techniques statistiques permettant de modéliser un jeu de données et de les organiser en clusters (groupes) sans pour autant connaître a priori les labels (mécanismes) auxquels chaque groupe appartient, c'est le principe du «laisser les données parler d'elles-mêmes». Par exemple lors d'un essai sur câble endommagé où les sources d'EA peuvent être les frottements de fils rompus sur fils sains, les frottements inter fils sains, les craquements de résine et un bruit mécanique, les algorithmes d'analyse non-supervisée vont identifier *idéalement* quatre (4) clusters. Il restera au *data analyste* d'identifier à quel mécanisme parmi les quatre renvoie chaque cluster en se basant par exemple sur son expérience, la localisation des événements, des analyses préliminaires (corrélation, statistique, temporelle), etc. Ces algorithmes d'analyse non-supervisée incluent le clustering mais aussi la réduction de dimensions pour une représentation plus succincte des données [146]. Le prin-

cipe de l'analyse non-supervisée est donnée à la figure 1.25. Parmi les algorithmes d'analyse

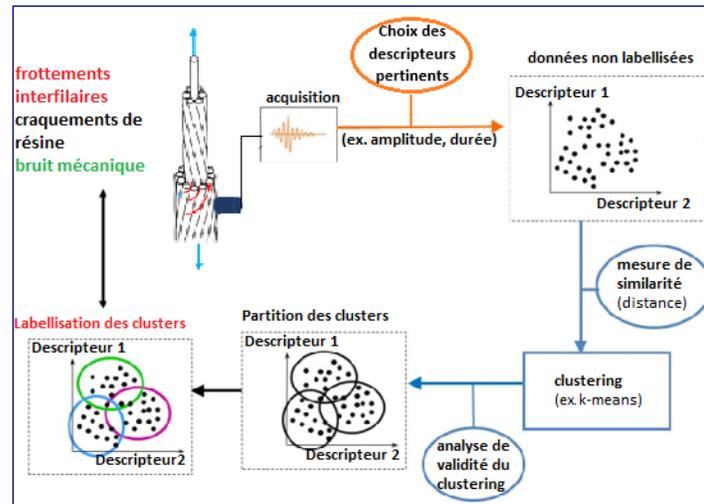


FIGURE 1.25 – Principe d'une analyse non-supervisée [84]

non-supervisée, il y a l'ACP (Analyse en Composantes Principales), le k-Means, le modèle de mélange de gaussiens (GMM - Gaussian Mixture Model), le clustering hiérarchique, etc. [147, 148].

Quant à l'**analyse supervisée**, elle nécessite d'avoir un jeu de données (une sorte de librairie) déjà labellisées (les labels n'étant rien d'autre que les mécanismes eux-mêmes) qui caractérisent les mécanismes à identifier sur lesquelles les algorithmes de classification<sup>1</sup> vont se baser pour effectuer la classification de ces nouvelles données par comparaison à l'aide de métriques ou méthodes de mesures. Chaque algorithme a ses propres métriques (tels que la distance euclidienne) permettant de comparer les données à classifier et ceux labellisés (figure 1.26). Parmi les méthodes utilisées, il y a la méthode des k-plus proches voisins (kNNs - k Nearest Neighbors), les arbres de décision (CART - Classification And Regression Trees), les SVMs (Support Vector Machines), les bayésiens naïfs, entre autres [146, 149, 150].

Quelle que soit l'approche adoptée (supervisée ou non-supervisée), la méthodologie à suivre pour l'analyse des données peut se résumer ainsi [84] :

1. sélection et définition des paramètres pertinents permettant de caractériser l'ensemble des mécanismes en jeu sans perdre trop d'information
2. sélection et optimisation des algorithmes de clustering ou de classification
3. choix des méthodes de mesure (métriques) de la similarité entre les données à traiter
4. validation des résultats : Les similitudes observées entre les signaux d'une même classe correspondent-elles au même phénomène physique ou, à l'inverse, les différences enregistrées entre les clusters correspondent-elles à des mécanismes différents?

1. Le terme *classification* sera utilisé pour parler de l'identification des groupes (mécanismes) auxquels appartiennent de nouvelles données en analyse supervisée. Et pour parler du regroupement des données en clusters en analyse non-supervisée, le terme *clustering* sera préféré.

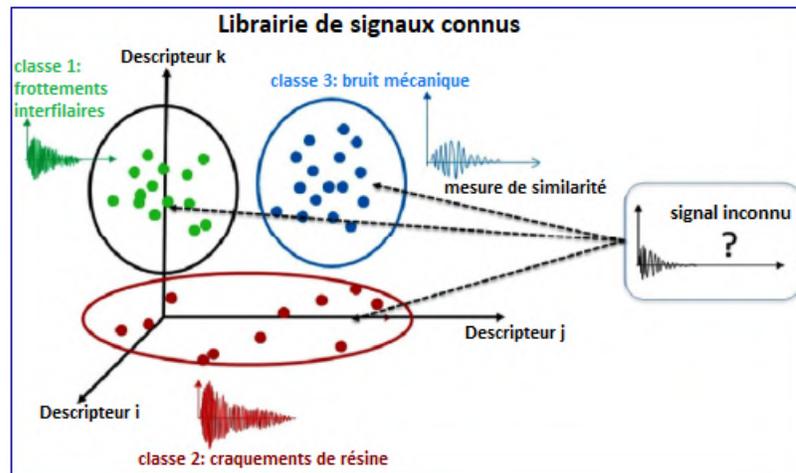


FIGURE 1.26 – Principe d'une analyse supervisée [84]

Les algorithmes utilisés pour effectuer le traitement des données seront détaillés au chapitre 3 concernant l'analyse d'EA.

### 1.4.5 Conclusion

L'EA acoustique est utilisée depuis longtemps pour détecter des phénomènes de dégradation dans les structures tels que les fuites, la corrosion, les fissures ou les ruptures. Pour ce qui est de la surveillance des câbles par cette méthode, des avancées notoires ont pu être réalisées en terme de détection et de localisation de ruptures se produisant durant la surveillance (systèmes opérationnels). Cependant pour la détection de ruptures déjà existantes dans les câbles, des investigations plus poussées devraient permettre d'affiner les premiers outils en vue d'un déploiement sur ouvrages réels.

Ainsi dans cette thèse, en combinant cette méthode avec la méthode dynamique, les phénomènes qui seront étudiés sont les ruptures de fils dans des câbles en partie courante et en partie cachée (dans les ancrages). L'analyse des données d'EA se fera aussi bien en analyse paramétrique «simple» (temporelle, corrélation, distribution) qu'en analyse statistique multivariable avec des algorithmes d'apprentissage automatique.

## 1.5 Annexe

### principaux paramètres de l'EA

**Time of test** : temps d'arrivée en jour/heure/minute/seconde, par rapport au début du test

**Amplitude** : amplitude maximale du signal en dB pendant toute la durée de la salve.

**Energy** : énergie (enveloppe) en volt par seconde

**Counts** (nombre de coups) : c'est le nombre de fois où l'amplitude du signal dépasse le seuil d'acquisition

**Duration** (durée en  $\mu$ s) : la durée entre le premier et le dernier dépassement de seuil

**Rise time** (temps de montée) en  $\mu$ s : c'est l'intervalle de temps qui sépare le premier dépassement de seuil de la salve et le maximum d'amplitude

**Counts to peak** (nombre de coups jusqu'au pic) : c'est le nombre de franchissement de seuil à partir du premier coup jusqu'au pic maximal

**Average frequency** : fréquence moyenne en kHz, rapport entre le nombre d'alternances et la durée de la salve

**Reverberation frequency** : fréquence de la décroissance de la salve en kHz, rapport entre le nombre d'alternances de la décroissance et sa durée

**Initiation frequency** : fréquence d'initiation en kHz, rapport entre le nombre d'alternances de la phase d'initiation et sa durée

**Signal strength** : c'est l'intensité du signal en picovolt-s

**Absolute energy** : énergie absolue en Joules, intégrale du signal au carré sur la durée de la salve

**Threshold** : seuil de détection en dB

**ASL** : tension efficace en dB

**RMS** : tension efficace en volt

**Frequency centroid** : barycentre du spectre fréquentiel (kHz)

**Peak frequency** : fréquence au maximum du pic de la transformée de Fourier de la salve en kHz

**Partial Powers** (puissance partielle) en kHz : répartition d'énergie par bande de fréquence

# CHAPITRE 2

## ANALYSE DYNAMIQUE

*« Si vous voulez trouver les secrets de l'univers, pensez en termes d'énergie, de fréquence, d'information et de vibration »*

Nikola Tesla

### Sommaire

---

2.1	Introduction . . . . .	48
2.2	Présentation des essais expérimentaux . . . . .	48
2.2.1	Configuration des essais sur le T15.7 et sur câble bi-couches . . . . .	48
2.2.1.1	Les câbles . . . . .	48
2.2.1.2	Le banc d'essais . . . . .	49
2.2.1.3	Systèmes d'ancrage . . . . .	49
2.2.1.4	Instrumentation et acquisition des données . . . . .	50
2.2.1.5	Procédure des essais . . . . .	52
2.2.2	Configurations des essais sur le câble EMR . . . . .	53
2.2.2.1	Banc de fatigue des câbles . . . . .	54
2.2.2.2	Excitation du câble . . . . .	54
2.2.2.3	Instrumentation et acquisition des données . . . . .	55
2.2.2.4	Procédure d'essais . . . . .	55
2.3	Analyse des données du T15.7 . . . . .	56
2.3.1	Positionnement des capteurs et des défauts . . . . .	56
2.3.2	Identification des paramètres modaux . . . . .	56
2.3.2.1	Calcul des FRFs . . . . .	56
2.3.2.2	Paramètres modaux et choix de la méthode d'analyse . . . . .	58
2.3.2.3	Variation des fréquences naturelles avec les défauts . . . . .	61
2.3.2.4	Les déformées modales du monotoron T15.7 sain et avec défauts . . . . .	61
2.3.3	Détection des ruptures de fils du T15.7 : niveau 1 . . . . .	63
2.3.4	Localisation des ruptures de fils du T15.7 : niveau 2 . . . . .	64
2.3.5	Estimation empirique du degré d'endommagement : niveau 3 . . . . .	66
2.4	Modèle d'éléments finis du T15.7 . . . . .	67

2.4.1	Théorie de la poutre d'Euler-Bernoulli . . . . .	68
2.4.1.1	Modèle éléments finis du câble sain . . . . .	70
2.4.1.2	Modèle éléments finis du câble endommagé . . . . .	70
2.4.1.3	Estimation de la sévérité de l'endommagement par éléments finis . . . . .	72
2.5	Analyse des données sur monotorons bi-couches . . . . .	<b>73</b>
2.5.1	Positionnement des capteurs et des défauts . . . . .	74
2.5.2	Identification des paramètres modaux des bi-couches . . . . .	74
2.5.2.1	Fréquences naturelles avec le Line-Fit . . . . .	75
2.5.2.2	Fréquences naturelles avec le FDD . . . . .	76
2.5.2.3	Déformées modales avec le Line-Fit et la FDD . . . . .	77
2.5.3	Détection et localisation des défauts des bi-couches . . . . .	79
2.5.3.1	Détection à partir des fréquences naturelles : niveau 1 . . . . .	79
2.5.3.2	Localisation à partir des courbures modales obtenues avec le Line-Fit : niveau 2 . . . . .	81
2.5.3.3	Localisation à partir des courbures modales obtenues avec la FDD : niveau 2 . . . . .	83
2.5.4	Estimation empirique du degré d'endommagement des bi-couches : niveau 3 . . . . .	84
2.6	Analyse des données du câble EMR multicouches . . . . .	<b>86</b>
2.6.1	Identification des paramètres modaux . . . . .	87
2.6.1.1	Fréquences naturelles . . . . .	87
2.6.1.2	Les déformées modales . . . . .	87
2.6.2	Caractérisation des défauts . . . . .	87
2.6.2.1	Variation des fréquences naturelles . . . . .	87
2.6.2.2	Localisation des ruptures de fils avec les paramètres SRMCD . . . . .	88
2.7	Conclusion à l'analyse dynamique . . . . .	<b>89</b>
2.8	Annexes à l'analyse dynamique . . . . .	<b>90</b>

---

## 2.1 Introduction

Après l'étude bibliographique précédemment réalisée, la deuxième partie de cette thèse concernant le contrôle non destructif des câbles par méthodes dynamiques est abordée. Dans cette partie, nous allons présenter l'analyse des données obtenues lors des essais de vibration sur différents types de câbles : monotoron monocouche appelé T15.7, monotoron bi-couches et câble d'ancrage de plateformes offshore d'énergie marine renouvelable (EMR) qui sera appelé câble EMR. Pour ce faire, nous allons d'abord présenter les essais réalisés avec les différentes configurations d'essais adoptées et ensuite présenter les résultats obtenus pour chaque type de câble. L'objectif de cette partie est de montrer la possibilité de détecter, localiser et même d'estimer la sévérité de l'endommagement d'un câble par ruptures de fils. Cette caractérisation par l'étude de la variation des paramètres modaux préalablement déterminés par analyse modale expérimentale ou opérationnelle.

## 2.2 Présentation des essais expérimentaux

### 2.2.1 Configuration des essais sur le T15.7 et sur câble bi-couches

#### 2.2.1.1 Les câbles

Dans une démarche de mise en place d'un protocole expérimental, il a été jugé nécessaire de commencer d'abord avec le cas le plus «simple» possible et y appliquer les méthodes choisies pour ensuite aller vers un cas plus complexe et plus proche d'un cas réel d'utilisation des câbles. De ce fait les premiers essais ont été faits sur un T15.7 et ensuite sur un câble bi-couches. Le T15.7 est un câble à sept fils dont un fil central et six fils hélicoïdaux enroulés autour de ce fil central (voir figure 2.1a). Quant au câble monotoron bi-couches, il peut être défini comme un T15.7 avec une couche supplémentaire (voir figure 2.1b). Les caractéristiques géométriques et

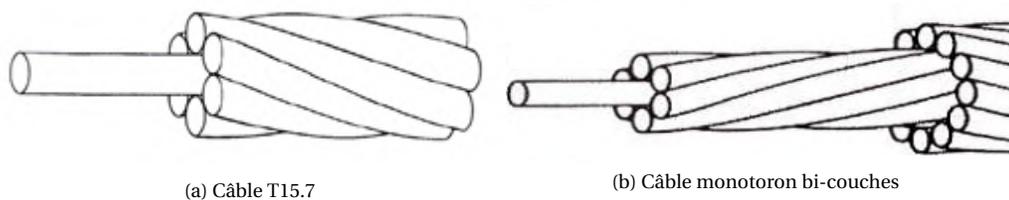


FIGURE 2.1 – Câbles T15.7 et monotoron bi-couches

mécaniques de ces deux câbles sont données dans le tableau 2.1.

- $h_1$  et  $h_2$  sont les pas de toronnage de la première et de la deuxième couches respectivement
- $d_0$ ,  $d_1$  et  $d_2$  sont respectivement le diamètre du fil central, le diamètre des fils de la première couche et le diamètre des fils de la deuxième couche

Type de câble	h1 (mm)	h2 (mm)	d0 (mm)	d1 (mm)	d2 (mm)	Longueur (mm)	E (MPa)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	F <sub>R</sub> (kN)
<b>T15.7</b>	220	-	5.4	5.2	-	6980	200	7.8	265
<b>Bi-couches</b>	130	230	3 × 2	4.7	4.7	6230	200	7.8	513

TABLEAU 2.1 – Caractéristiques géométriques et mécaniques des câbles T15.7 et bi-couches

- E et  $\rho$  sont respectivement le module d'élasticité et la masse volumique
- F<sub>R</sub> est la force de rupture

### 2.2.1.2 Le banc d'essais

Pour réaliser les essais sur ces câbles, un banc de sollicitation de longueur totale 10 m et de capacité en traction de 300 kN est utilisé (figure 2.2a). Ce banc est muni d'un bloc amovible permettant de l'utiliser sur une distance inférieure à 10 m et permet de maintenir le câble en traction pour pouvoir appliquer une excitation donnée. La tension du câble est effectuée à l'aide d'un vérin hydraulique muni d'un peson pour mesurer la valeur de cette tension appliquée. L'usage de ce vérin hydraulique fait que le câble est inaccessible sur une distance de 1.22 m. 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



(a) Banc de sollicitation



(b) Excitateur

FIGURE 2.2 – Banc de sollicitation du monotoron T15,7 avec excitateur

(arbre à came excentré, voir figure 2.2b) relié à un moteur électrique. Cet excitateur a une vitesse de rotation maximale de 1500 tours/minute. Il permet d'appliquer des excitations de types harmoniques avec une fréquence et une amplitude données. Les amplitudes peuvent varier de 5 mm à 30 mm avec un pas de 5 mm. Quant aux fréquences elles peuvent varier de 1 Hz à 8 Hz.

### 2.2.1.3 Systèmes d'ancrage

Pour le câble monotoron T15.7, des clavettes d'ancrage sont utilisées pour fixer le câble sur le banc d'essai. Ce système d'ancrage très simple consiste à fixer le câble dans une plaque par

coincement de clavettes dans un trou tronconique de 10 cm (voir figure 2.3).

En ce qui concerne le câble monotoron bi-couches, du fait de son diamètre, ce câble ne peut

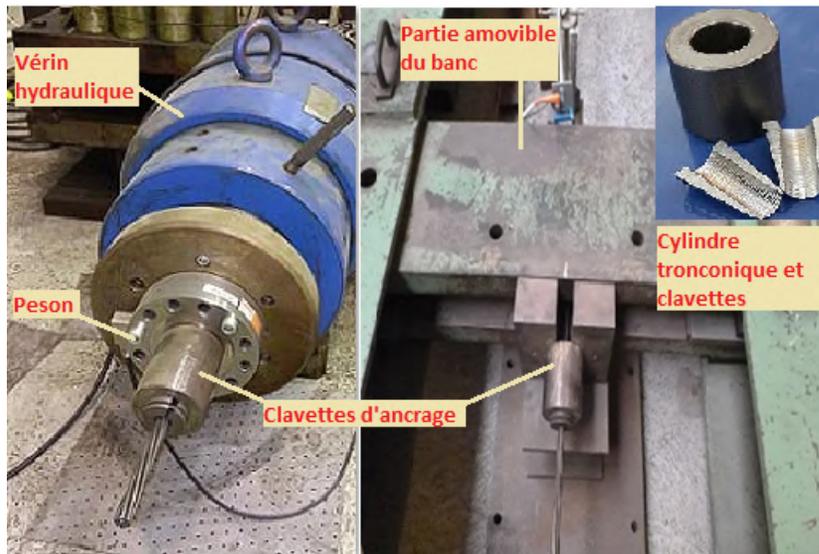


FIGURE 2.3 – Ancrage du T15.7 par clavettes

être inséré dans les clavettes précédemment utilisées. De ce fait un culot d'ancrage a été utilisé (voir figure 2.4) pour le fixer sur le banc de sollicitation. Cependant, la principale raison du choix de ce type d'ancrage est que ce système est plus proche des conditions réelles d'utilisation des câbles multicouches et permet de créer des défauts dans les ancrages par ruptures de fils et ainsi simuler un type de défaut souvent rencontré dans les ouvrages. Le culottage du câble se déroule en plusieurs étapes :

- Réalisation de ligatures pour serrer le câble au bas du culot
- Mettre les extrémités du câble en «chignon» (détoronner la partie du câble située au dessus des ligatures). Cette opération consiste à mettre les fils en gerbe régulière et en retournant l'extrémité de chaque fil vers l'intérieur du chignon
- Enfoncement du chignon dans son logement par traction à l'aide du vérin
- Remplissage du culot par une résine avec maintien en température pour accélérer la polymérisation

#### 2.2.1.4 Instrumentation et acquisition des données

Pour acquérir les données, le câble est équipé de capteurs et de systèmes d'acquisition permettant d'enregistrer ces données. Ainsi les différents équipements utilisés pour réaliser les essais sont :

- Les capteurs : Des capteurs de déplacements laser sans contact sont utilisés. Ce choix de capteurs laser sans contact permet de ne pas avoir à poser les capteurs directement sur le câble et ainsi éviter de rajouter des masses additionnelles, quoique minimales, sur le câble.

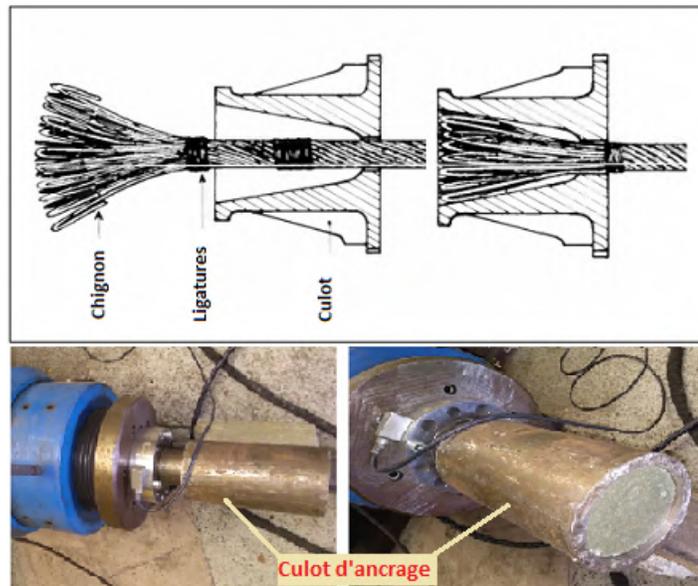


FIGURE 2.4 – Ancre par culot

Pour niveler le point de mesure et avoir les déplacements verticaux, les cibles des lasers sur le câble sont des pastilles en aluminium (de taille 2cm\*2cm) de poids négligeables collées sur le câble à hauteur de chaque laser. La nomenclature adoptée pour les lasers ainsi que leurs gammes de mesure sont données dans le tableau 2.2. Nous avons également

<b>Lasers</b>	ES Las 05	ES Las 14	ES Las 12	ES Las TL	ES Las 15	ES Las 09	ES Las 08	ES Las 07
<b>Noms</b>	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8
<b>Gammes de mesure (mm)</b>	20	50	300	300	50	20	20	20

TABLEAU 2.2 – Gammes de mesure des capteurs de déplacements lasers

utilisé une sonde de température (nommée PT100) permettant de suivre la température ambiante au cours des essais. Les températures étant presque constantes dans le lieu de réalisation des essais, les données de ce capteur ne seront pas exploitées. Pour l'acquisition des signaux de l'émission acoustique, des capteurs de types piézoélectriques ont été utilisés et montés en même temps que les lasers. Ces capteurs seront présentés dans la partie de l'analyse de l'EA.

- Impulsion par choc de marteau : À l'aide d'un marteau instrumenté (figure 2.5a), une force impulsionnelle (figure 2.5b) est appliquée au câble. Ce marteau instrumenté permet d'avoir la force d'excitation appliquée au câble, ce qui sera utile plus tard pour le calcul des fonctions de transfert (FRFs) sur lesquelles se base l'analyse modale expérimentale qui sera effectuée.

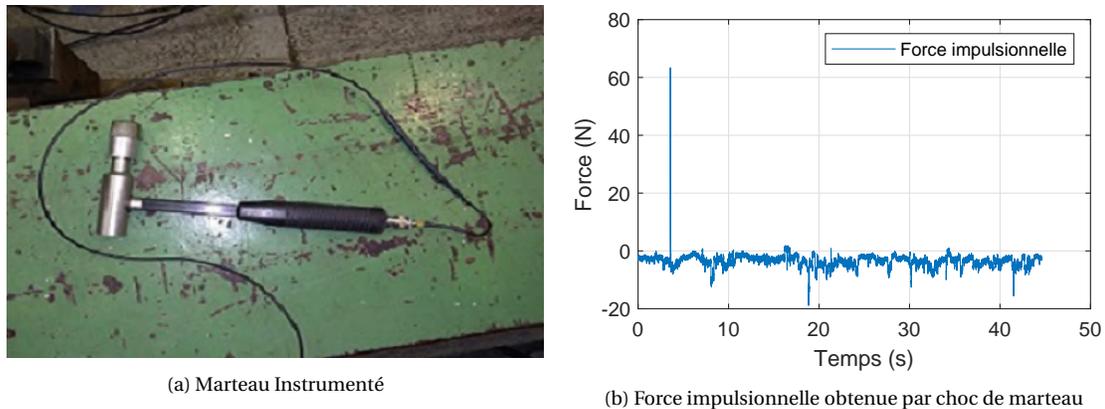


FIGURE 2.5 – Impulsion par choc de marteau

- Système d'acquisition des données : Les déplacements obtenus via les capteurs lasers sont enregistrés avec les chaînes d'acquisition de données Quantum MX 1615B et 1601 et le logiciel CATMAN (pour la visualisation de ces données) développés par la société HBM.

### 2.2.1.5 Procédure des essais

Pour pouvoir caractériser les défauts dans le câble, ce dernier a été testé avec des états de santé différents. Tout d'abord le câble a été testé à l'état sain (sans défaut) considéré comme état de référence et ensuite des défauts par coupures de fils ont été réalisés progressivement. La procédure des différents essais peut se résumer ainsi :

- 1 Montage et mise en traction du câble sain à 30 % de sa force de rupture
- 2 Montage des différents capteurs (lasers, capteurs EA et capteur de température) et du matériel associé (systèmes d'acquisition). Les capteurs, bien qu'ayant des gammes de mesures différentes (voir tableau 2.2), sont placés de telle sorte que ceux avec les plus faibles gammes de mesure sont situés près des ancrages où les déplacements transversaux sont les plus faibles. Le positionnement des capteurs, variant d'un type de câble à l'autre (T15.7 ou bi-couches), vu que les longueurs sont différentes, sera donné à la partie analyse des données de chaque type de câble
- 3 Vérification du bon fonctionnement des capteurs en réalisant quelques essais préliminaires.
- 4 Excitation du câble au marteau instrumenté et enregistrement des déplacements. La fréquence d'échantillonnage est fixée à 300 Hz et le temps d'enregistrement à 45 s, le temps nécessaire à l'amortissement du câble. Un coup de marteau donné près d'un capteur permet d'extraire les paramètres modaux voulus. Cependant pour voir la répétabilité des données, quatre coups sont donnés près de chaque capteur. Ainsi pour huit capteurs positionnés,  $4 \times 8 \times 8 = 256$  FRFs sont obtenues
- 5 Introduction des défauts par coupures de fils. Pour éviter le détournement du câble après avoir coupé un fil, des ligatures sont effectuées de part et d'autre de la position de rup-

tures des fils (voir figure 2.6). L'emplacement des défauts sera également donné à la partie analyse des données de chaque type de câble. Pour chaque fil coupé, les mêmes essais que pour le cas sain sont répétés.



FIGURE 2.6 – Ligatures du bi-couches sectionné

### 2.2.2 Configurations des essais sur le câble EMR

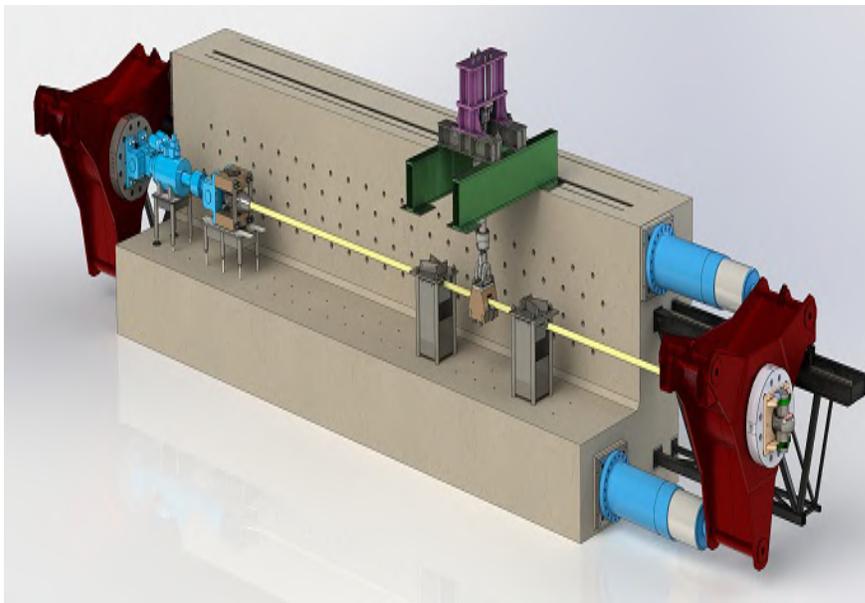
Dans le cadre d'un projet OCEAGEN, des essais sont effectués sur un câble grandeur nature destiné à l'amarrage des éoliennes marines flottantes. Le câble est soumis à des essais de fatigue par combinaison de sollicitations de traction et de flexion pour simuler les effets des courants marins. Ainsi nous avons effectué nos essais (propres à cette thèse et différents de ceux du projet) à l'état sain (avant sa sollicitation en fatigue) et après arrêt, conditionné par ruptures de fils dans le câble, de l'essai OCEAGEN. Les ruptures de fils dans le câble durant l'essai OCEAGEN sont détectées par le système CASC présenté dans la bibliographie et sont confirmées ou infirmées ensuite par l'auscultation destructive directe (dégainage du câble à la recherche des défauts réels).

Les essais sont réalisés sur le banc de fatigue des câbles (BFC) et les mêmes types de capteurs que ceux utilisés sur les câbles précédents sont utilisés. Le câble utilisé a les caractéristiques suivantes :

- Câble de type multicouches
- Diamètre externe : 85 *mm* et 105 *mm* avec gaine
- Diamètre unitaire des fils : 5 *mm*
- Nombre de couches : 9
- Poids : 29.27 *kg/m*
- Résistance maximale à la rupture : 7300 *kN*
- Rigidité à la flexion : 379 *kN.m*
- Section efficace : 4089.6 *mm<sup>2</sup>*
- Module de Young : 163.54 *kN/mm<sup>2</sup>*

### 2.2.2.1 Banc de fatigue des câbles

Du fait de sa taille, ce câble multicouches (câble EMR) a été testé sur le BFC. Le banc de fatigue des câbles (BFC) (voir figure 2.7a) permet de tester en capacité réelle des câbles de génie civil ou des systèmes techniques de géométrie tubulaire. Le câble et ses ancrages sont placés sous tension statique puis soumis à une variation cyclique de charges. Les câbles sont souvent soumis à des forces pouvant aller jusqu'à 80% de la force de rupture. Les dernières évolutions apportées à ce banc permettent d'effectuer des essais de fatigue complexes en combinant des efforts de traction et de flexion. En chargement statique, trois vérins hydrauliques permettent de soumettre le BFC à des charges qui peuvent monter jusqu'à 24000 kN. Tandis qu'en sollicitation de flexion, un vérin hydraulique avec une course de 100 mm permet de solliciter le câble jusqu'à 250 kN.



(a) Banc de fatigue des câbles (BFC)



(b) Marteau non instrumenté

FIGURE 2.7 – BFC et Marteau non instrumenté d'excitation du câble EMR

### 2.2.2.2 Excitation du câble

Pour mettre le câble en vibration, vu sa raideur très importante, nous n'avons pas pu utiliser le marteau instrumenté pour l'exciter. Ainsi un marteau non instrumenté avec une masse plus importante (voir figure 2.7b) a été utilisé pour appliquer une impulsion au câble. De ce fait la force d'entrée ne sera pas obtenue et des méthodes basées sur l'analyse modale opérationnelle doivent être utilisées pour extraire les paramètres modaux.

### 2.2.2.3 Instrumentation et acquisition des données

Pour l'acquisition des données de déplacements transversaux du câble, des capteurs lasers ont également été utilisés. La disposition de ces derniers sur le câble est présentée sur la figure 2.8. Ainsi le câble tendu sur 15.93 m est équipé de :

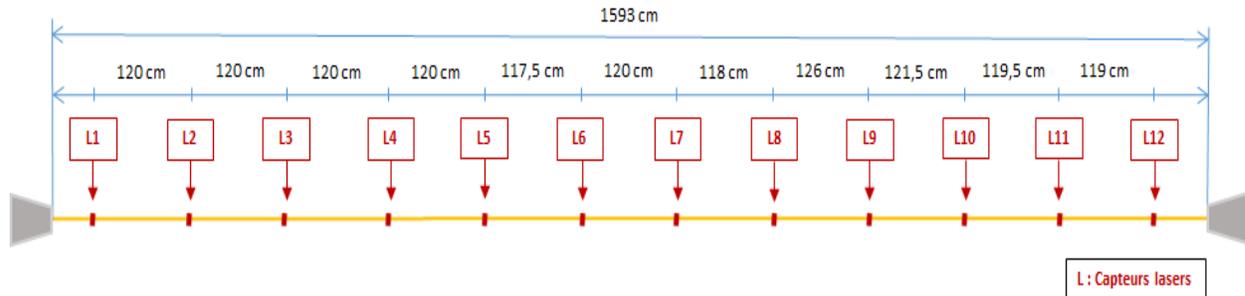


FIGURE 2.8 – Configuration des essais sur BFC

- Capteurs de déplacements lasers : Vu la longueur du câble, pour mieux *mailler* le câble, douze (12) capteurs lasers ont été installés pour avoir les déplacements du câble. Ces lasers sont de mêmes types que ceux utilisés pour les monotorons avec les mêmes gammes de mesure.
- Sonde de températures (PT100)
- Systèmes d'acquisition des données : Les mêmes systèmes que ceux pour les essais sur les monotorons, Quantum MX 1615B et 1601B et le logiciel CATMAN, sont utilisés pour l'enregistrement des déplacements du câble.

### 2.2.2.4 Procédure d'essais

Les essais sont effectués sur deux états différents du câble : un état sain de référence et un état endommagé où il y a ruptures de fils dans le câble. Il est à noter que contrairement aux cas précédents avec les monotorons, ici les défauts ne sont pas contrôlés. En effet ces défauts ont lieu suite à l'essai de fatigue réalisé sur le câble EMR lors des essais du projet OCEAGEN. Ainsi les différentes étapes pour mettre en place nos essais sont :

- ① Montage du câble et traction jusqu'à 1752 kN
- ② Montage du matériel d'enregistrement des données (capteurs et systèmes d'acquisition)
- ③ Vérification du bon fonctionnement de ce matériel
- ④ Excitation et enregistrement des déplacements du câble. La fréquence d'échantillonnage est fixée à 300 Hz et le temps d'enregistrement à 45 s. Le coup donné à côté de chaque laser est répété trois fois
- ⑤ Démontage du matériel et réalisation des essais de fatigue du projet OCEAGEN qui se terminent par des ruptures de fils dans le câble

- 6 Répétition des étapes 2 à 4 sur le câble avec fils coupés. Il est à noter que, du fait de la configuration des essais OCEAGEN, le câble est à la même tension initiale que pour le câble sans défauts; ce qui n'était pas le cas pour les essais sur monotorons où, à chaque rupture de fil, il y a une baisse de tension.

## 2.3 Analyse des données du T15.7

### 2.3.1 Positionnement des capteurs et des défauts

Le positionnement des huit capteurs laser ainsi que celui des ruptures de fils pour les essais sur le T15.7 est donné sur la figure 2.9. En dehors des parties non accessibles du câble du fait du banc d'essai, les capteurs sont positionnés sur une distance de 5.36 m. L'introduction de plusieurs ruptures de fils à des endroits différents permettra de voir la possibilité de caractérisation de défauts multiples sur un câble.

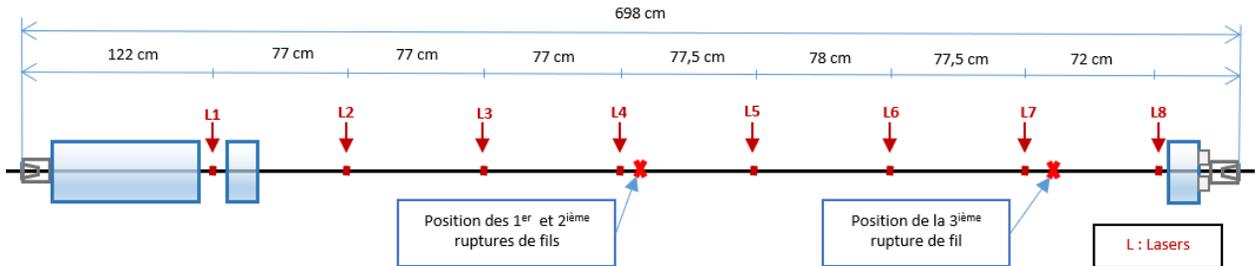


FIGURE 2.9 – Positionnement des capteurs lasers sur T15.7

### 2.3.2 Identification des paramètres modaux

Pour l'identification des paramètres modaux, comme signalé dans la partie bibliographique 1.3.7, sont utilisés les deux algorithmes d'analyse modale expérimentale (AME) : le Circle-Fit et le Line-fit. Ces algorithmes ont été implantés sur Matlab.

#### 2.3.2.1 Calcul des FRFs

Disposant du signal d'entrée, la force d'excitation, donné par le marteau instrumenté, la première étape est le calcul des fonctions de transfert (ou fonctions de réponse en fréquence - FRFs). Ces fonctions de transfert  $\alpha(\omega)$  ou  $H(\omega)$  sont définis par :

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} \quad (2.1)$$

Ces fonctions de transfert peuvent être écrites sous la forme :

$$H(\omega) = \frac{G_{FX}(\omega)}{G_{FF}(\omega)} = H_1(\omega) \quad (2.2)$$

ou

$$H(\omega) = \frac{G_{XX}(\omega)}{G_{XF}(\omega)} = H_2(\omega) \quad (2.3)$$

où  $G_{XX}$ ,  $G_{FF}$  sont les auto-spectres (ou densités auto-spectrales) des signaux déplacement et de force et  $G_{XF}$  est l'inter-spectre (ou densité inter-spectrale) entre ces deux signaux.

Les fonctions de transfert  $H_1(\omega)$  et  $H_2(\omega)$  sont théoriquement égales (pour des signaux sans aucun bruit). Cependant il peut y avoir des différences dues au bruit de mesures. Pour évaluer ce niveau de bruit dans les mesures, la fonction de cohérence ( $\gamma$ ) entre l'entrée X et la sortie F est calculée et est donnée par :

$$\gamma^2 = \frac{H_1(\omega)}{H_2(\omega)} \quad , \quad 0 \leq \gamma^2 \leq 1 \quad (2.4)$$

La cohérence est comprise entre 0 et 1 ; plus elle est élevée plus le niveau de bruit est faible.

Sur cette base nous avons tracé sur la figure 2.10 les diagrammes des amplitudes de FRFs et de la cohérence en fonction de la fréquence pour une excitation  $F_k$  appliquée à côté du capteur  $k$  et les réponses  $X_{j=1,8}$  correspondantes. Sur ces diagrammes nous pouvons remarquer que les

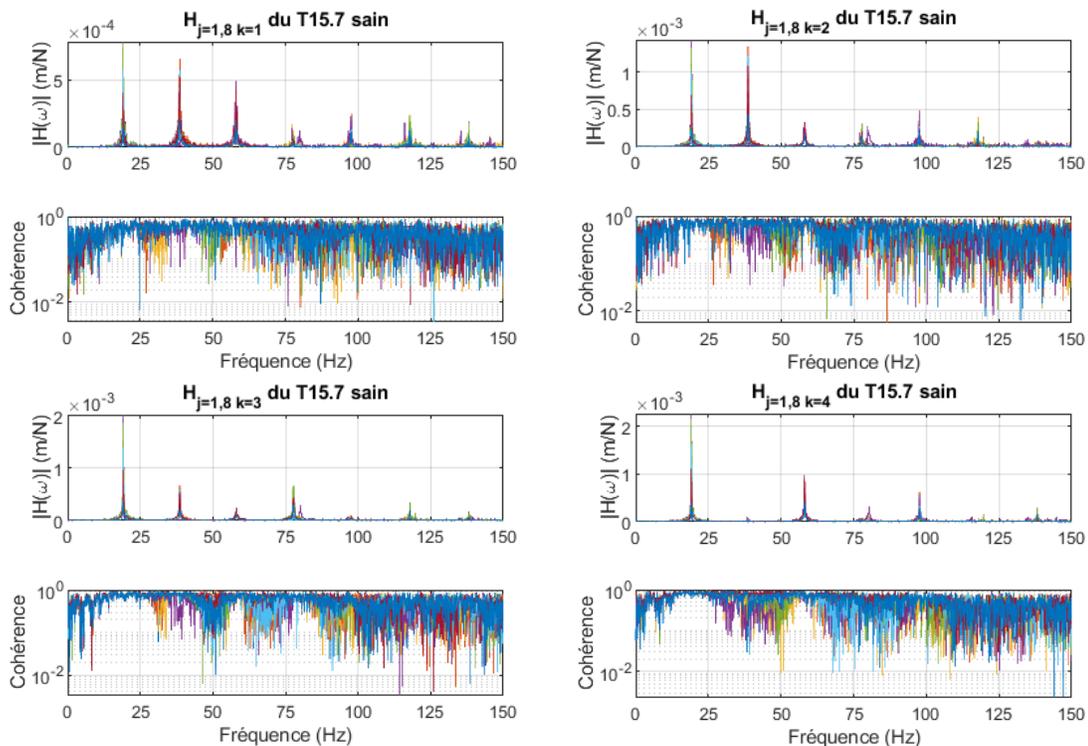


FIGURE 2.10 – Exemples de diagrammes de FRFs et de cohérences pour le T15.7 sain

pics des amplitudes des FRFs sont bien distincts les uns des autres. Ceci justifie ainsi le fait que le phénomène de modes proches n'est pas rencontré pour les câbles que nous avons à étudier et la possibilité d'extraire les paramètres modaux par des méthodes d'analyse modale de types SDOF (*Single Degree Of Freedom*). Ces méthodes se basent sur l'hypothèse qu'autour d'une zone de résonance, les contributions des autres modes sont négligeables par rapport au mode prin-

cial de cette zone de résonance. En outre, les cohérences montrent que le niveau de bruit est faible aux niveaux des fréquences de résonance même si ailleurs il est plus élevé. Il est à remarquer que le niveau de bruit devient plus élevé pour les hautes fréquences. De ce fait nous allons nous limiter à la détermination des paramètres modaux pour les quatre premiers modes.

Ces conclusions pour les données du T15.7 sain restent valables pour ce câble avec des fils rompus. Un exemple des diagrammes des FRFs et des cohérences obtenus avec le T15.7 avec 1 fil coupé est donné sur la figure 2.11. La principale différence avec les diagrammes obtenus pour le T15.7 sain est que les pics de résonance ont lieu à des fréquences plus basses. Ce qui témoignerait de la présence de défauts dans le câble? Cette question sera élucidée avec la détermination des paramètres modaux et leur comparaison.

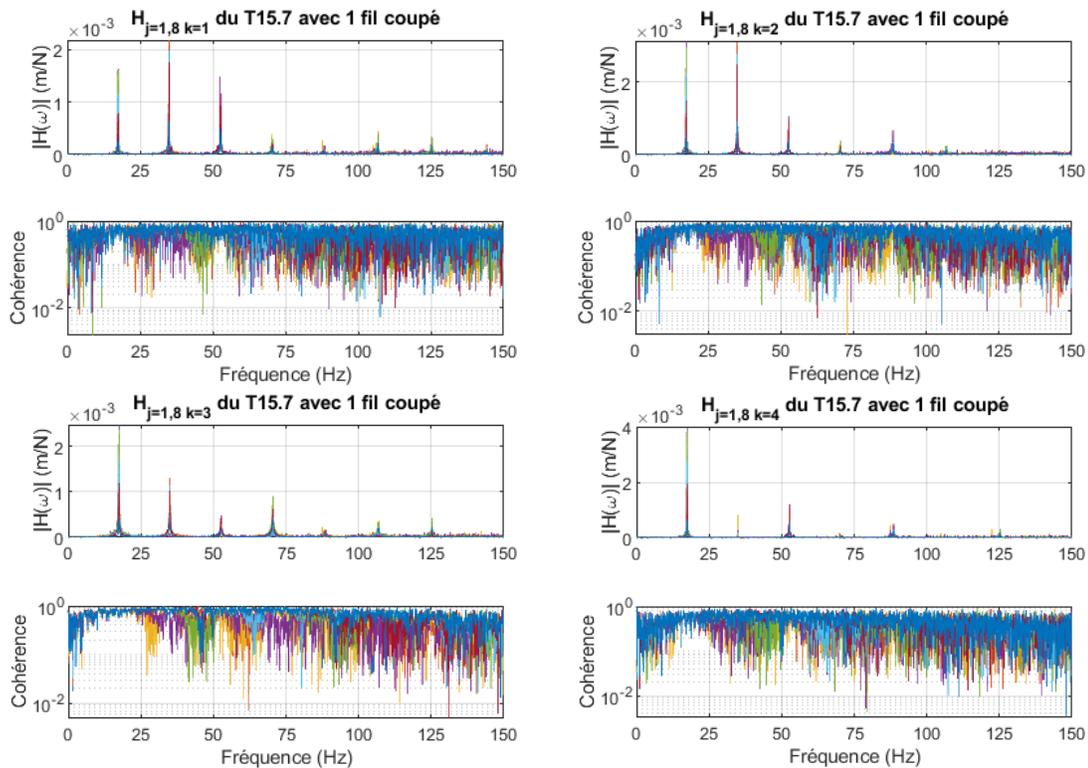


FIGURE 2.11 – Exemples de diagrammes de FRFs et de cohérences pour le T15.7 avec un fil coupé

### 2.3.2.2 Paramètres modaux et choix de la méthode d’analyse

À partir de ces FRFs, les paramètres modaux seront calculés. Cependant seules les fréquences naturelles et les déformées modales sont considérées, comme signalé dans les conclusions de la bibliographie de l’analyse modale.

En utilisant les méthodes de Circle-Fit et de Line-Fit présentées à la partie 1.3.3 de la bibliographie, les paramètres modaux sont calculés. Nous allons d’abord étudier les paramètres modaux obtenus avec ces deux méthodes pour le câble monotoron T15.7 sain. La méthode donnant les meilleurs résultats parmi ces deux pour l’extraction des paramètres modaux sera choisie pour

la suite de l'AME (analyse modale expérimentale).

Les fréquences naturelles obtenues pour le monotoron T15.7 à l'état sain sont données dans le tableau 2.3. Ces fréquences naturelles sont les valeurs moyennes obtenues avec 64 FRFs. Leur répétabilité est donnée par le coefficient de variation qui est donné par :

$$C_v = 100 \times \frac{\sigma_f}{\mu_f} \quad (2.5)$$

où  $\sigma_f$  est l'écart-type des fréquences  $f$  et  $\mu_f$  est la fréquence moyenne.

Nous pouvons noter que les fréquences naturelles sont très stables (peu de variations) avec des

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

TABLEAU 2.3 – Fréquences naturelles du monotoron T15.7 sain avec les méthodes Circle-fit et Line-Fit

coefficients de variation inférieurs à 1,2 %. Cependant les fréquences naturelles du mode 4 ont les coefficients de variation les plus élevés pour les deux méthodes. Ceci se justifie par le niveau de bruit plus élevé pour les hautes fréquences comme noté avec les cohérences. Tout compte fait, ces deux méthodes, le Circle-Fit et le Line-Fit, sont quasi-égales pour l'identification des fréquences naturelles avec une différence maximale entre les valeurs identifiées qui est inférieure à 0,5 %.

En plus des fréquences naturelles, les déformées modales sont aussi identifiées et comparées. Après avoir calculé les déformées modales, elles sont comparées en utilisant le MAC (*Modal Assurance Criterion*) qui varie de 0 à 1 et mesure le degré de corrélation entre deux déformées modales. Il est donné par :

$$\text{MAC}(\phi_A^n, \phi_B^n) = \frac{|\{\phi_A^n\}^T \{\phi_B^n\}|^2}{(\{\phi_A^n\}^T \{\phi_A^n\})(\{\phi_B^n\}^T \{\phi_B^n\})} \quad (2.6)$$

Ici  $\phi_A^n$  et  $\phi_B^n$  renvoient aux déformées du même câble (sain) et pour le même mode  $n$  mais pour deux excitations A et B différentes. Les résultats obtenus pour les déformées modales sont ainsi donnés sur la figure 2.12.

Les figures 2.12a et 2.12c représentent des exemples des quatre premières déformées modales obtenues respectivement avec le Circle-Fit et le Line-Fit pour une excitation près du capteur L7. Sur ces figures, nous pouvons remarquer que les déformées modales obtenues avec le Line-Fit sont plus «propres» que celles avec le Circle-Fit. Cette remarque a été notée avec toutes les déformées modales obtenues pour les autres points d'excitation. Pour comparer les déformées

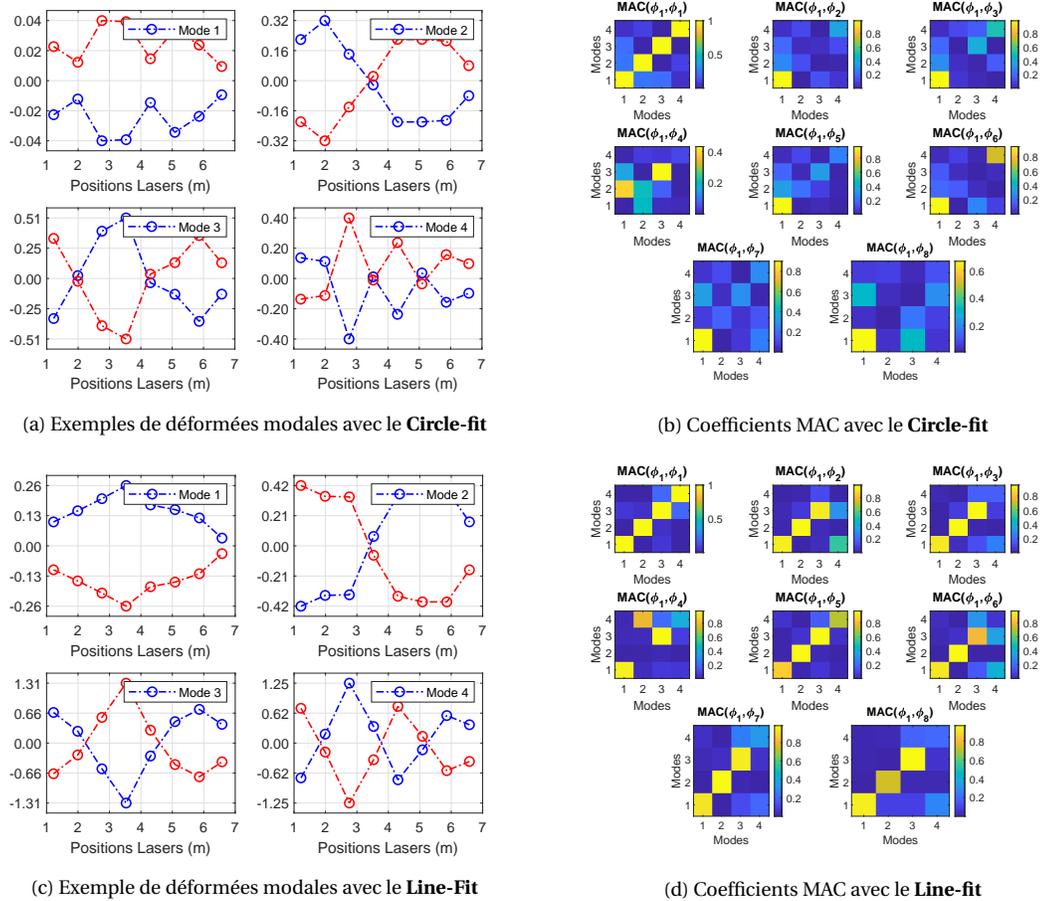


FIGURE 2.12 – Déformées modales et coefficients MAC pour le T15.7 sain avec les méthodes Circle-fit et Line-Fit

modales obtenues pour tous les points d'excitations, nous utilisons ainsi les coefficients MAC qui sont donnés sur la figure 2.12b pour les résultats avec le Circle-Fit et sur la figure 2.12d pour le Line-Fit. Sur ces figures, les déformées modales des quatre premiers modes obtenues pour une excitation au point L1 ( $\phi_1$ ) sont comparées avec celles obtenues au niveau des autres points d'excitation (L2 à L8 donnant les déformées  $\phi_2$  à  $\phi_8$ ). Les meilleurs résultats devraient être à l'image des coefficients d'auto-corrélations de  $\phi_1$  obtenus avec  $MAC(\phi_1, \phi_1)$  : des valeurs qui tendent vers l'unité au niveau des diagonales et vers zéro en dehors des diagonales. Sur cette base, nous remarquons de manière évidente que les déformées modales obtenues avec le Line-Fit sont de meilleure qualité que celles obtenues avec le Circle-Fit. Les coefficients MAC au niveau des diagonales obtenus avec le Line-Fit sont supérieures à 0.7 sauf pour le mode 4 et en dehors des diagonales ces valeurs tendent vers zéro. La mauvaise performance de la méthode du Circle-Fit pour l'identification des déformées modales peut être due au fait que cette méthode est très sensible en ce qui concerne la détermination de la phase des constantes modales à partir desquelles les déformées modales sont dérivées [151].

Étant donné que les deux méthodes sont presque égales pour la détermination des fréquences et que le Line-Fit donne de meilleurs résultats pour l'identification des déformées modales, cette

dernière sera utilisée par la suite pour l'extraction des paramètres modaux.

### 2.3.2.3 Variation des fréquences naturelles avec les défauts

Les fréquences naturelles du monotoron T15.7 avec un, deux et trois fils coupés obtenus avec le Line-Fit sont données dans le tableau 2.4 et les figures correspondantes à 2.13.

# Modes	Sain		1 fil coupé		2 fils coupés		3 fils coupés	
	$f_n$ (Hz)	$C_{vs}$ (%)	$f_n$ (Hz)	$C_{v1fc}$ (%)	$f_n$ (Hz)	$C_{v2fc}$ (%)	$f_n$ (Hz)	$C_{v3fc}$ (%)
<b>1</b>	19.24	0.81	17.46	0.58	14.48	0.78	11.41	0.79
<b>2</b>	38.64	0.57	34.93	0.38	29.08	0.43	22.88	0.58
<b>3</b>	58.12	0.22	52.65	0.15	43.85	0.31	34.46	0.53
<b>4</b>	78.16	1.12	70.43	0.45	58.65	0.29	46.20	0.34

TABLEAU 2.4 – Fréquences naturelles du T15.7 sain et avec défauts

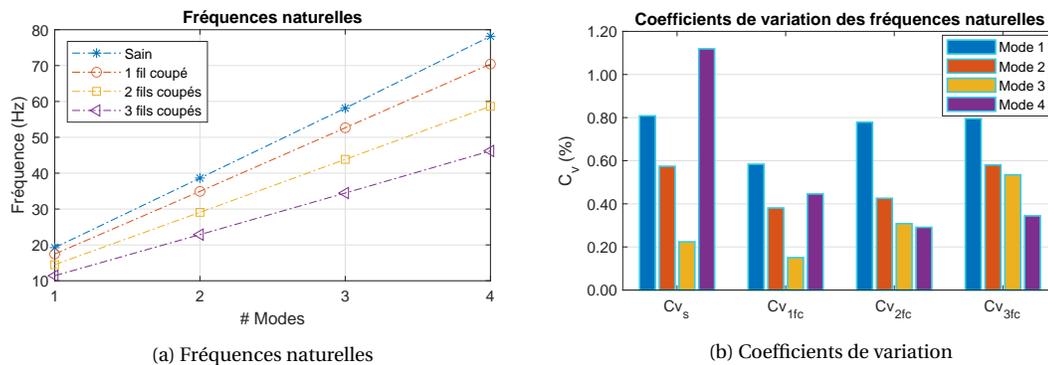


FIGURE 2.13 – Fréquences naturelles du T15.7 et les coefficients de variation correspondants

Sur la figure 2.13a des fréquences naturelles, nous notons que les fréquences naturelles du câble T15.7 diminuent quand le nombre de fils rompus augmente. Pour tous les états du câble (sain et avec défauts), les fréquences naturelles sont déterminées avec une bonne constance avec des coefficients de variation (figure 2.13b) inférieurs à 0.9 % sauf pour celles du mode 4 du câble sain qui reste également faible (1.12 %).

### 2.3.2.4 Les déformées modales du monotoron T15.7 sain et avec défauts

Outre les valeurs des coefficients MAC et les graphes des déformées modales du câble T15.7 sain donnés aux figures 2.12d et 2.12c, ceux du câble avec un, deux et trois fils coupés sont donnés aux figures 2.14, 2.15 et 2.16. Avec ces figures, nous pouvons constater que les déformées modales sont déterminées avec une précision très acceptable avec des valeurs MAC au niveau des diagonales proches de l'unité, sauf pour quelques valeurs sporadiques, et celles qui se trouvent en haut et en bas des diagonales sont proches de zéro. En outre, nous pouvons

constater que, mis à part les coefficients MAC diagonaux des déformées modales du mode 1, les valeurs diagonales des coefficients MAC des déformées modales des modes 2 à 4 ne sont pas toujours proches de l'unité. Nous pouvons juger ainsi de la nécessité de considérer des déformées modales des modes différents pour appréhender les différences entre un état sain et un état endommagé en vue d'une caractérisation de défauts.

— Câble avec un fil coupé

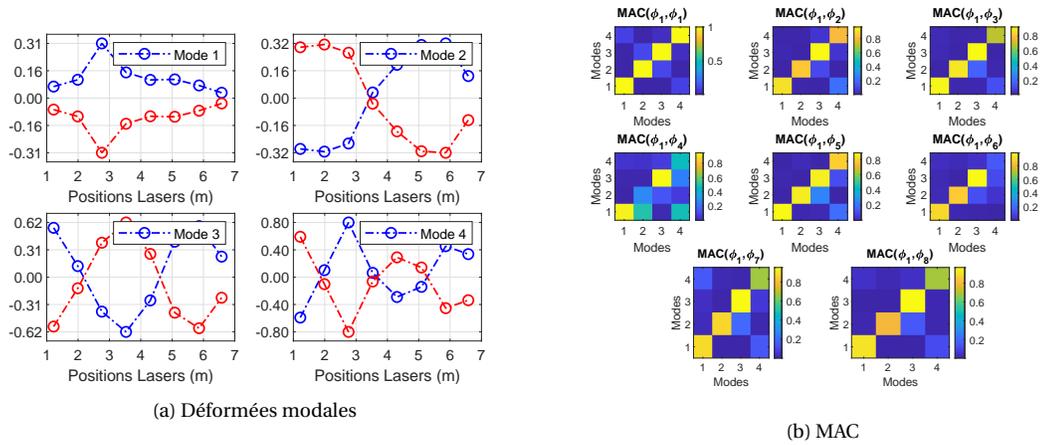


FIGURE 2.14 – Déformées modales et MAC du câble avec **un fil coupé**

— Câble avec deux fils coupés

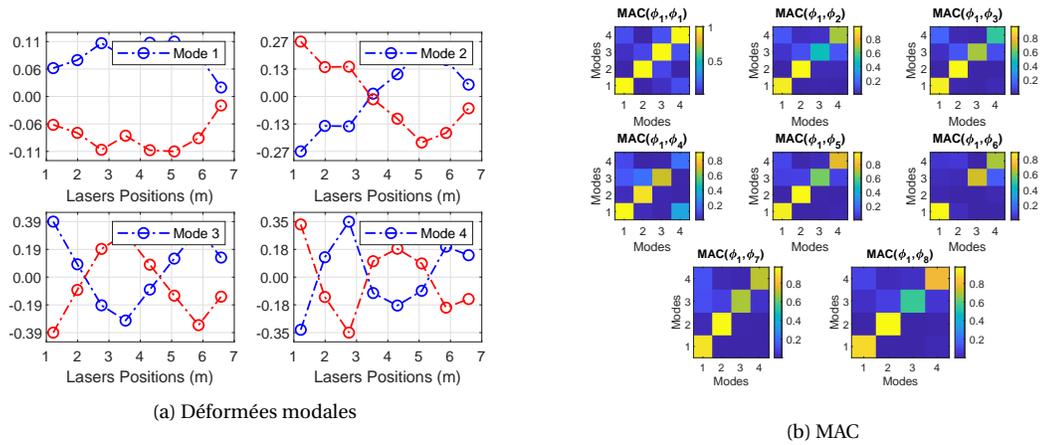


FIGURE 2.15 – Déformées modales et MAC du câble avec **deux fils coupés**

— Câble avec trois fils coupés

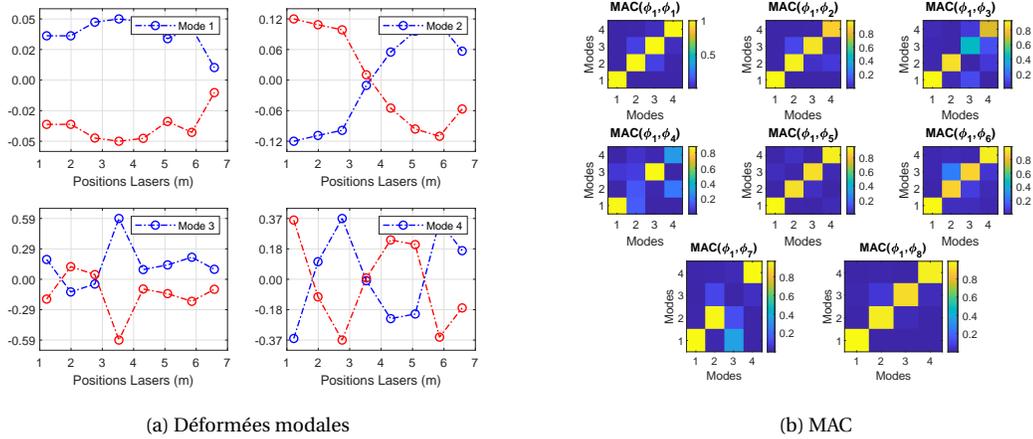


FIGURE 2.16 – Déformées modales et MAC du câble avec **trois fils coupés**

### 2.3.3 Détection des ruptures de fils du T15.7 : niveau 1

Pour la détection des défauts de ruptures de fils du monotoron T15.7 dont les positions sont données sur la figure 2.9, nous allons utiliser les fréquences naturelles. L'intérêt de l'usage des fréquences naturelles est qu'elles peuvent être facilement déterminées et sont moins affectées par les erreurs expérimentales comme constaté plus haut avec des coefficients de variation assez faibles. En utilisant ces paramètres modaux, les pourcentages de changement en fréquences naturelles ( $C_i$ ) sont calculés. La formule pour ce paramètre  $C_i$  est donnée par :

$$C_i^{s-1d} (\%) = 100 \times \frac{f_n^s - f_n^{1d}}{f_n^s} \quad (2.7)$$

où  $f_n^s$  représente la  $n^{ième}$  fréquence naturelle du câble sain et  $f_n^{1d}$  est celle du câble avec un fil rompu.

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 2.5 et sur la figure 2.17. Avec la figure 2.17, il est

# Modes	$C_i$ en fonction du nombre de fils coupés		
	$C_i^{s-1d} (\%)$	$C_i^{s-2d} (\%)$	$C_i^{s-3d} (\%)$
<b>1</b>	9.29	24.76	40.72
<b>2</b>	9.60	24.73	40.79
<b>3</b>	9.40	24.55	40.71
<b>4</b>	9.89	24.96	40.89
<b>Moyenne</b>	$9.55 \pm 0.26$	$24.75 \pm 0.17$	$40.78 \pm 0.08$

TABLEAU 2.5 – Variation des fréquences naturelles du T15.7

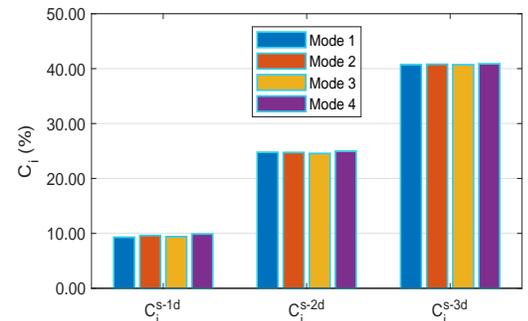


FIGURE 2.17 – Variation des fréquences naturelles du T15.7

à noter que les paramètres  $C_i$  augmentent avec le niveau d'endommagement dans le câble. Pour un et deux fils coupés, les paramètres  $C_i$  valent  $9.55 \pm 0.26\%$  et  $24.75 \pm 0.17\%$  respectivement ; ils

augmentent à  $40.78 \pm 0.08\%$  pour trois fils coupés. De plus, il a été constaté dans le tableau 2.4 que les fréquences naturelles sont assez constantes (coefficients de variation  $C_v < 1.12\%$ ). De ce fait, nous pouvons affirmer avec certitude que les variations des fréquences naturelles d'un état du câble à un autre sont dues aux ruptures de fils. En outre les valeurs du paramètre  $C_i$  obtenues sont largement supérieures à la valeur seuil de 5 % définie dans la littérature au-delà de laquelle les changements en fréquences naturelles peuvent être attribués à une présence de défaut. Ainsi les paramètres  $C_i$  auront permis de détecter la présence de défauts dans le câble T15.7.

### 2.3.4 Localisation des ruptures de fils du T15.7 : niveau 2

Avec cette approche par paramètres  $C_i$ , il est impossible de savoir la position des défauts dans le câble. De ce fait nous allons utiliser les déformées modales, qui sont des paramètres avec des informations locales, pour la localisation des défauts.

Pour ce faire, nous avons utilisé en premier lieu le paramètre MCD (*Modal Curvatures Differences*) [80] qui est donnée par :

$$\text{MCD}_{i,j}^{s-1d} = \left| \left( \phi_{i,j}^s \right)'' - \left( \phi_{i,j}^{1d} \right)'' \right| \quad (2.8)$$

où  $\left( \phi_{i,j}^s \right)''$  et  $\left( \phi_{i,j}^{1d} \right)''$  sont les courbures modales du mode  $i$  à la position  $j$  pour respectivement le câble sain et le câble avec un fil coupé. Ces courbures modales sont obtenues par dérivées secondes des déformées modales :

$$\phi_{i,j}'' = \frac{\phi_{i,j-1} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i,j+1}}{d_m^2} \quad (2.9)$$

avec  $d_m$  la distance moyenne entre capteurs.

Les valeurs MCD sont censées être maximales à l'emplacement des dommages. En considérant l'équation 2.8, nous avons calculé ces paramètres pour les quatre premiers modes.

En prenant en exemples les données obtenues pour une excitation à la position L7, les résultats de la localisation pour les trois ruptures de fils sont donnés sur la figure 2.18. La figure 2.18a donne les résultats pour un fil coupé, la figure 2.18b pour deux fils coupés et la figure 2.18c pour trois fils coupés. Les deux premières ruptures sont situées au même endroit entre les capteurs L4 et L5 à 3.76 m de l'extrémité gauche (voir figure 2.9) et la troisième rupture près des ancrages à 6.16 m entre les capteurs L7 et L8. La position réelle des ruptures sur les figures 2.18a, 2.18b et 2.18c est matérialisée par l'astérisque.

En analysant ces figures, pour les différents modes, nous pouvons constater que pour les deux premières ruptures (situées en partie centrale), les maximums des MCD correspondent pour la plupart (9/12) soit au capteur L4 soit au capteur L5. La localisation est toutefois meilleure pour le mode 3 où tous les maximums correspondent au laser L4 (soit à  $-24$  cm de la rupture) et pour le mode 4 où tous les maximums correspondent à L5 (soit à  $+54$  cm de la rupture). Cependant le troisième défaut situé près des ancrages n'a pas pu être localisé. En tout état de cause, il a

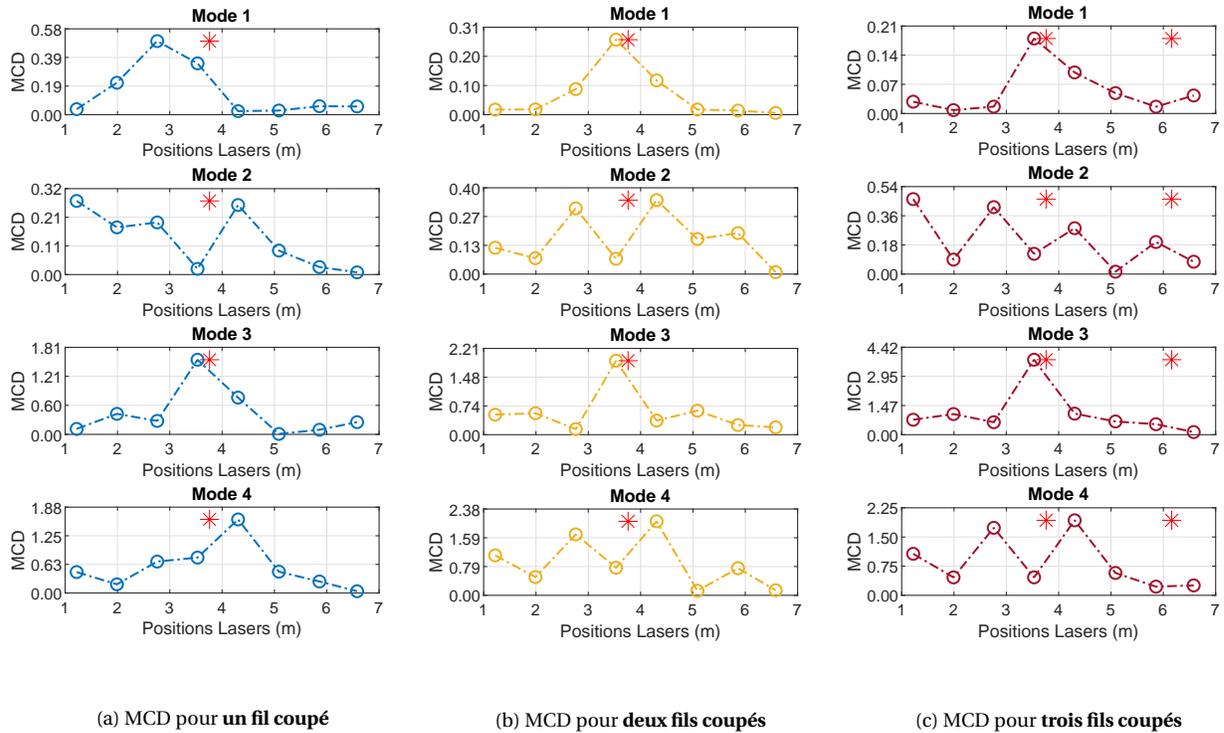


FIGURE 2.18 – Valeurs MCD pour le câble T15.7 avec trois niveaux de défauts (pour des excitations à L7)

été noté une certaine variabilité de la localisation suivant le mode considéré. Cette conclusion a également été tirée pour les résultats où les excitations ont été réalisées au niveau des autres points.

Ainsi nous avons utilisé, en plus de ces paramètres MCD, les paramètres CDF (*Curvature Damage Factor*) [81] qui sont définis par :

$$CDF_j = \frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} \left| (\phi_{i,j}^s)'' - (\phi_{i,j}^d)'' \right| \quad (2.10)$$

où  $N_m$  est le nombre de modes considérés pour calculer le facteur CDF à la position  $j$ . Ce paramètre n'est rien d'autre qu'une moyenne des paramètres MCD sur les différents modes.

En utilisant ces paramètres CDF les résultats obtenus pour les trois niveaux de ruptures de fils sont donnés aux figures 2.19a, 2.19b et 2.19c.

Sur la figure 2.19a qui donne les CDF pour un fil coupé, nous constatons que tous les maximums correspondent à la position du laser 4 soit à  $-24 \text{ cm}$  de la rupture. Pour la deuxième rupture, le même résultat est obtenu sauf pour les données où les excitations sont effectuées près des lasers L1 et L3. Et quand une troisième rupture est effectuée près de l'ancrage, les ruptures au milieu du câble sont localisées avec la même précision que pour le cas précédent. Cependant la troisième rupture n'a pas pu être localisée.

Ainsi nous pouvons conclure par dire que ces paramètres CDF permettent d'obtenir une locali-

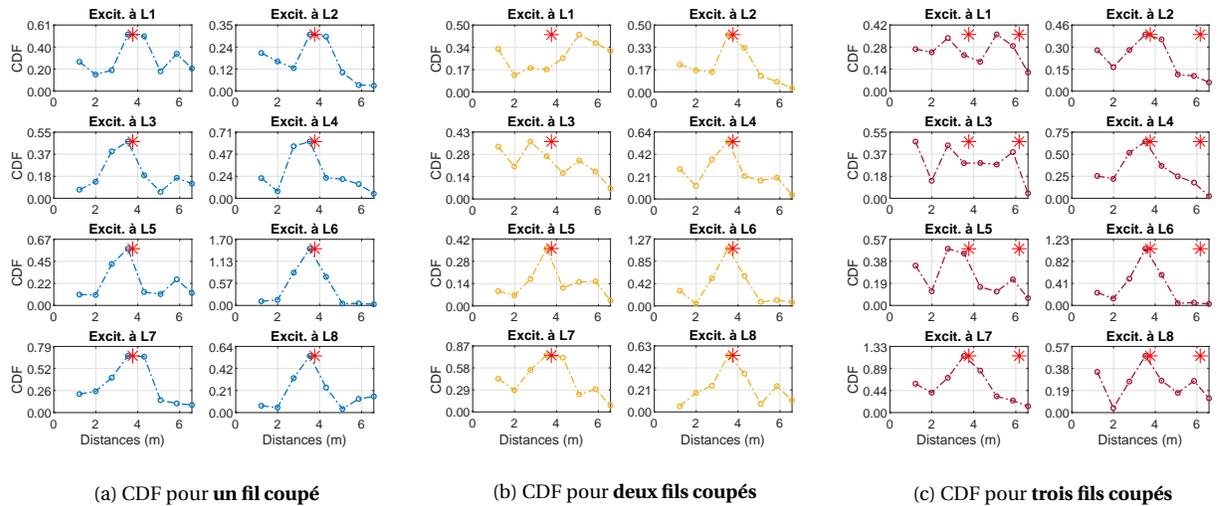


FIGURE 2.19 – Valeurs CDF pour le câble T15.7 avec trois niveaux de défauts

sation satisfaisante de ruptures de fils pour un câble de type T15.7. Cependant ils ne permettent pas de localiser des défauts multiples surtout quand ces défauts sont situés près des extrémités. Cette incapacité à localiser les défauts situés près des extrémités peut s’expliquer par la manière dont les courbures modales sont calculés à ces points en considérant l’équation 2.9. En effet pour cette équation, le premier et le dernier terme du numérateur ne sont pas connus pour les points extrêmes et sont de ce fait considérés comme nuls; ce qui introduit quelques imprécisions lorsque la déformée modale qui correspondrait au point  $j - 1$  (pour le premier terme du numérateur) ou au point  $j + 1$  (pour le dernier terme du numérateur) du point  $j$  à l’extrémité n’est pas en réalité nulle.

### 2.3.5 Estimation empirique du degré d’endommagement : niveau 3

En utilisant la variation des paramètres modaux d’une structure, il est souvent possible d’arriver à détecter et à localiser des défauts de cette structure comme nous venons de le montrer pour un câble T15.7. Cependant quantifier cet endommagement de la structure s’avère plus complexe, ce qui explique que les méthodes proposées ne permettent d’arriver qu’à un niveau 2 de caractérisation des défauts. Pour tenter de résoudre ce problème, ici nous allons proposer une approche empirique pour l’estimation du degré d’endommagement dans le câble T15.7 en partant des fréquences naturelles.

La sévérité d’endommagement (DS) d’un câble peut s’exprimer comme suit :

$$DS (\%) = 100 \times \frac{N_{fr}}{N_{ft}} \tag{2.11}$$

où  $N_{fr}$  et  $N_{ft}$  sont respectivement le nombre de fils rompus et le nombre total de fils dans le câble sain.

Ainsi pour le T15.7 avec trois fils rompus, les valeurs DS (%) valent 14.29, 28.57 et 42.86 pour respectivement un, deux et trois fils coupés. En outre, nous avons noté au niveau de la figure 2.17 que les pourcentages de changement en fréquences naturelles, les paramètres  $C_i$  (%), augmentent avec le niveau d'endommagement, comme ces valeurs de DS (%). L'idée est ainsi d'exprimer la sévérité de l'endommagement (DS (%)) en fonction du pourcentage de changement en fréquences naturelles ( $C_i$  (%)). Le résultat obtenu est donné sur la figure 2.20 à partir de laquelle l'équation 2.12 suivante est obtenue :

$$DS(\%) = 0.91C_i + 5.68 \quad (2.12)$$

Les valeurs moyennes de  $C_i$  sur les quatre modes ont été considérées pour l'estimation de DS. Cette relation permet de ce fait d'estimer rapidement la gravité des dommages subis par le

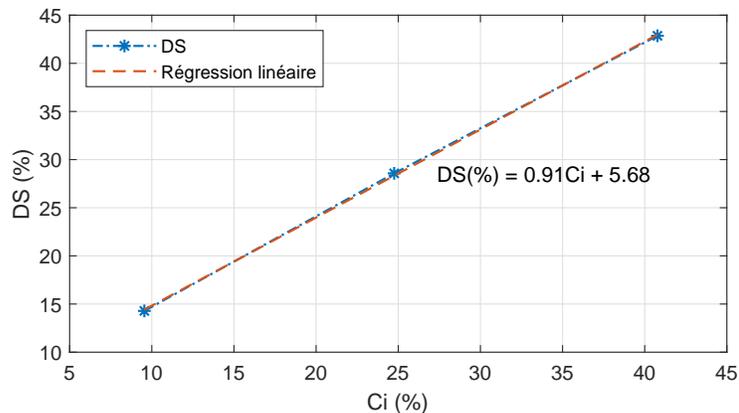


FIGURE 2.20 – Estimation de DS en fonction de  $C_i$

câble en connaissant les fréquences naturelles de l'état de référence (ou sain) et de l'état endommagé. Cette relation définit également un seuil de 5,68 % en pourcentage de changement des fréquences naturelles ( $C_i$ ) afin de pouvoir estimer la gravité des dommages.

Cependant, cette relation n'a été déterminée qu'avec trois fils coupés dans le câble. Afin de simuler davantage de dommages dans le câble et de valider numériquement ce résultat, nous avons utilisé un modèle d'éléments finis (MEF) basé sur la théorie de la poutre d'Euler-Bernoulli.

## 2.4 Modèle d'éléments finis du T15.7

Comme indiqué précédemment, l'objectif principal de cette partie est de valider la méthode empirique proposée pour estimer la sévérité des dommages subis par le câble T15.7. Ainsi, utilisant le logiciel MATLAB, nous avons simulé le toron à sept fils. Le modèle est basé sur la théorie de la poutre Euler-Bernoulli. Après un bref rappel de la théorie de la poutre d'Euler-Bernoulli, nous passons à la validation du modèle avant l'estimation de la sévérité des dommages. La validation du modèle sera faite en comparant les résultats expérimentaux des câbles sain et endommagé avec les résultats du modèle d'éléments finis.

### 2.4.1 Théorie de la poutre d'Euler-Bernoulli

La théorie de la poutre d'Euler-Bernoulli est largement développée dans la littérature pour simuler différents types d'éléments structures : poutres en béton, en bois, câbles [11, 152-154]. Dans cette étude, nous ne ferons donc que souligner les principales hypothèses de la théorie de la poutre de Bernoulli discrétisée en éléments finis et donner les matrices de rigidité et de masse élémentaires qui seront utilisées.

La théorie de la poutre d'Euler-Bernoulli repose sur les hypothèses suivantes [155, 156] :

- la poutre est isotrope et homogène : module d'élasticité (E), module d'inertie (I) et section transversale (A) sont constants.
- les déformations de cisaillement et de rotation sont négligées
- les sections planes non déformées restent planes sous déformation

Soit un élément  $i$  de la poutre donné sur la figure 2.21. Les déformations aux limites sont  $\bar{u}_1, \bar{u}_2, \bar{u}_4$  et  $\bar{u}_5$  pour les déplacements et  $\bar{u}_3$  et  $\bar{u}_6$  pour les rotations. Dans un contexte dynamique, les déplacements aux conditions varient avec le temps et peuvent s'écrire comme suit :

$$u_x(x, t) = \sum_{n=1}^6 \psi_{xn}(x) \bar{u}_n(t) \quad (2.13)$$

$$u_y(x, t) = \sum_{n=1}^6 \psi_{yn}(x) \bar{u}_n(t) \quad (2.14)$$

où  $\psi_{xn}$  et  $\psi_{yn}$  sont les fonctions de forme et satisfont les conditions aux limites et les hypothèse de la poutre d'Euler-Bernoulli. Ainsi ces fonctions de forme sont données par :

- pour les déplacements longitudinaux :

$$\begin{cases} \psi_{x1}(\xi) = 1 - \xi \\ \psi_{x4}(\xi) = \xi \\ \psi_{x2}(\xi) = \psi_{x3}(\xi) = \psi_{x5}(\xi) = \psi_{x6}(\xi) = 0 \end{cases} \quad (2.15)$$

avec  $\xi = \frac{x}{L}$

- pour les déplacements transversaux :

$$\begin{cases} \psi_{y2}(\xi) = 1 - 3\xi^2 + 2\xi^3 \\ \psi_{y3}(\xi) = (\xi - 2\xi^2 + \xi^3)L \\ \psi_{y5}(\xi) = 3\xi^2 - 2\xi^3 \\ \psi_{y6}(\xi) = (-\xi^2 + \xi^3)L \\ \psi_{y1}(\xi) = \psi_{y4}(\xi) = 0 \end{cases} \quad (2.16)$$

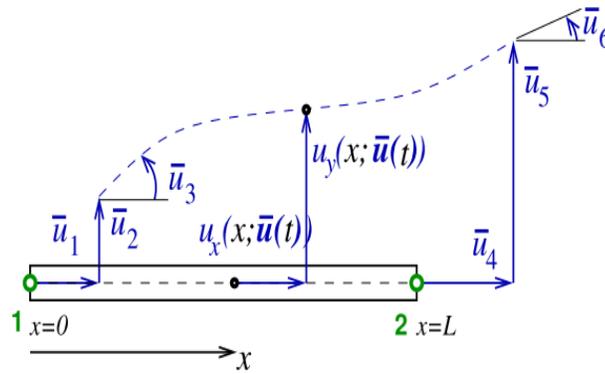


FIGURE 2.21 – Élément  $i$  de la poutre

En utilisant l'énergie de déformation élastique  $E_p$  qui peut s'écrire comme suit :

$$E_p = \frac{1}{2} \int_{\xi=0}^1 EA \left( \sum_{n=1}^6 \psi'_{xn}(x) \bar{u}_n \right)^2 dx,$$

les matrices de rigidité ( $K_e$ ) et de masse ( $M_e$ ) élémentaires peuvent être déterminées :

$$[K_e] = \frac{EI}{L} \begin{bmatrix} \frac{A}{I} & 0 & 0 & -\frac{A}{I} & 0 & 0 \\ & \frac{12}{L^2} & \frac{6}{L} & 0 & -\frac{12}{L^2} & \frac{6}{L} \\ & & 4 & 0 & -\frac{6}{L} & 2 \\ & \text{SYM} & & \frac{A}{I} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{12}{L^2} & -\frac{6}{L} \\ & & & & & 4 \end{bmatrix} + \frac{T}{30L} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 36 & 3L & 0 & -36 & 3L \\ & & 4L^2 & 0 & -3L & -L^2 \\ & \text{SYM} & & 0 & 0 & 0 \\ & & & & 36 & -3L \\ & & & & & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$M_e = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} [1.5]140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ & 156 & 22L & 0 & 54 & -13L \\ & & 4L^2 & 0 & 13L & -3L^2 \\ & \text{SYM} & & 140 & 0 & 0 \\ & & & & 156 & -22L \\ & & & & & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

où  $E$ ,  $A$ ,  $I$ ,  $T$  et  $\rho$  sont respectivement le module d'élasticité, la section transversale, le module d'inertie, la tension et la masse volumique.

À partir de ces matrices élémentaires et en considérant et les conditions limites, les matrices de masse et de rigidité du système (poutre) assemblé peuvent être obtenues. Et en résolvant le problème aux valeurs propres de l'équation de mouvement du système, les paramètres modaux sont obtenus.

### 2.4.1.1 Modèle éléments finis du câble sain

Les caractéristiques mécaniques et géométriques nécessaires à la modélisation du T15.7 sont données dans le tableau 2.1. Le modèle du câble T15.7 a été discrétisé en 200 éléments et deux conditions aux limites seront testées : bi-encasté (EE) et bi-appuyé (AA). Les fréquences naturelles obtenues après simulation sont donnés dans le tableau 2.6. Pour chaque type de conditions aux limites (EE ou AA), les fréquences naturelles numériques obtenues sont comparées aux fréquences naturelles expérimentales en calculant la différence relative  $\epsilon$  qui est donnée par :

$$\epsilon(\%) = 100 * \frac{|f_n^{Exp} - f_n^{MEF}|}{f_n^{Exp}} \quad (2.19)$$

Modes	Expérimentales $f_n^{Exp}$ (Hz)	MEF			
		CL = EE		CL = AA	
		$f_n^{MEF}$ (Hz)	$\epsilon$	$f_n^{MEF}$ (Hz)	$\epsilon$
<b>1</b>	19.24	19.45	1.05	19.15	0.50
<b>2</b>	38.64	38.93	0.75	38.33	0.79
<b>3</b>	58.12	58.48	0.62	57.58	0.93
<b>4</b>	78.16	78.13	0.04	76.93	1.57

TABLEAU 2.6 – Fréquences naturelles du MEF du T15.7 sain

À travers ce tableau, il est à noter que les fréquences naturelles données par le modèle des éléments finis sont très proches des résultats expérimentaux. En effet les différences relatives pour les quatre premiers modes sont inférieures à 1,1 % pour le cas bi-encasté et inférieures à 1,6 % pour le cas bi-appuyé. Nous pouvons constater que les valeurs expérimentales se situent entre celles du MEF du câble bi-appuyé et celles du câble bi-encasté. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'en réalité (en conditions expérimentales), l'encastrement du câble avec les clavettes n'est pas parfait. Cependant nous pouvons voir que les fréquences naturelles du modèle bi-encasté sont plus proches de celles expérimentales.

### 2.4.1.2 Modèle éléments finis du câble endommagé

Pour le câble avec fil(s) rompu(s), la principale difficulté réside en la modélisation correcte du défaut. En effet lorsqu'il y a rupture de fil, plusieurs paramètres se retrouvent modifiés en même temps : un changement global (une baisse de tension) et des changements locaux avec une variation de la masse linéique ( $\mu$ ) locale et la rigidité de flexion locale (EI). L'étendue de ces changements locaux pour un fil rompu est gouvernée par la longueur de réancrage ( $L_r$ ). En effet lorsqu'un fil est coupé, les deux extrémités coupées «reculent», ce qui crée une ouverture dans cette zone de rupture et chacun des deux bouts du fil rompu se «désolidarisent» des autres fils

jusqu'à une certaine distance appelée longueur de réancrage. À partir de cette longueur de réancrage, le fil contribue de nouveau à la résistance du câble. Cette longueur de réancrage varie en fonction des contraintes radiales, du coefficient de frottement entre les fils et du pas de toronnage des fils hélicoïdaux [157] et sa détermination reste approximative. En se basant sur des méthodes numériques, analytiques et expérimentales, cette longueur de réancrage est estimée entre 1 et 2.5 fois le pas de toronnage [158-161].

Par conséquent pour modéliser le câble avec fil(s) rompu(s), une section transversale ( $A_d$ ), une rigidité de flexion ( $EI_d$ ) et une masse linéique ( $\mu_d$ ) sont considérées sur une longueur de réancrage ( $L_r$ ). Pour calculer ces paramètres, les expressions suivantes sont données :

- la longueur de réancrage :

$$L_r = \alpha \delta L \quad \text{avec} \quad \alpha \in [1 \ 2.5]$$

$\delta L$  est le pas de toronnage et est égale à 22 cm pour le T15.7 utilisé.  $\alpha$  est pris égal à 1.

- la section transversale :

$$A_d = \pi \left( \left( \frac{d_0}{2} \right)^2 + (6 - N_{fc}) \left( \frac{d_1}{2} \right)^2 \right)$$

$N_{fc}$  est le nombre de fils coupés,  $d_0$  et  $d_1$  correspondent respectivement aux diamètres du fil central et des fils hélicoïdaux

- À partir de la section transversale  $A_d$ , sont déduites la masse linéique ( $\mu_d$ ) et la rigidité de flexion ( $EI_d$ ) :

$$\begin{aligned} \mu_d &= \rho A_d \\ EI_d &= \frac{2}{3} \times \frac{\pi}{64} \left( \sqrt{\frac{4A_d}{\pi}} \right)^4 \times E \end{aligned}$$

- Quant aux tensions du câble après chaque rupture de fil, elles ont été déterminées expérimentalement.

Au total cinq ruptures de fils ont été simulées dans le modèle éléments finis. Les trois premières ruptures sont introduites aux mêmes positions que celles des ruptures lors des essais expérimentaux (les deux premières au milieu du câble et la troisième près de l'extrémité, figure 2.9). Les deux dernières sont introduites à la même position que les deux premières. Ce faisant, les résultats des différences relatives entre les fréquences naturelles expérimentales et numériques (voir équation 2.19) pour les trois premières ruptures sont donnés dans le tableau 2.7.

De l'analyse de ce tableau, il est à noter que les différences relatives obtenues sont plus élevées que celles obtenues pour le modèle du T15.7 sans défaut. Ceci peut s'expliquer par le fait que la modélisation des ruptures de fils ne reproduit pas fidèlement leurs effets réels et reste approximative. Cependant le modèle avec des conditions aux limites bi-appuyé donnent de meilleurs résultats que le modèle modèle bi-encasté. La différence relative maximale du premier (AA) est d'environ 2.5 % et pour le deuxième (EE), elle frôle les 5 %. De ce fait, le modèle bi-appuyé est considéré pour le calcul des fréquences naturelles du câble avec quatre et cinq

Modes	1 fil coupé		2 fils coupés		3 fils coupés	
	$\epsilon_{CL=EE}(\%)$	$\epsilon_{CL=AA}(\%)$	$\epsilon_{CL=EE}(\%)$	$\epsilon_{CL=AA}(\%)$	$\epsilon_{CL=EE}(\%)$	$\epsilon_{CL=AA}(\%)$
<b>1</b>	2.22	0.48	4.26	2.12	4.80	2.08
<b>2</b>	2.20	0.48	2.20	0.13	3.23	0.61
<b>3</b>	1.90	0.17	3.43	1.31	4.98	2.30
<b>4</b>	1.18	0.53	2.28	0.18	4.08	1.38

TABEAU 2.7 – Différences relatives entre fréquences naturelles expérimentales et numériques du T15.7 avec fils coupés

fils coupés. Les fréquences naturelles obtenues pour ces deux derniers cas de figure sont donnés dans le tableau 2.8.

Modes	$f_n(\text{Hz})$	
	4 fils coupés	5 fils coupés
<b>1</b>	9.98	9.18
<b>2</b>	19.58	17.87
<b>3</b>	30.25	27.85
<b>4</b>	40.06	36.73

TABEAU 2.8 – Fréquences naturelles numériques du T15.7 avec 4 et 5 fils coupés

Les fréquences naturelles ainsi déterminées avec les conditions aux limites bi-appuyé sont utilisées pour estimer le degré de sévérité de l'endommagement.

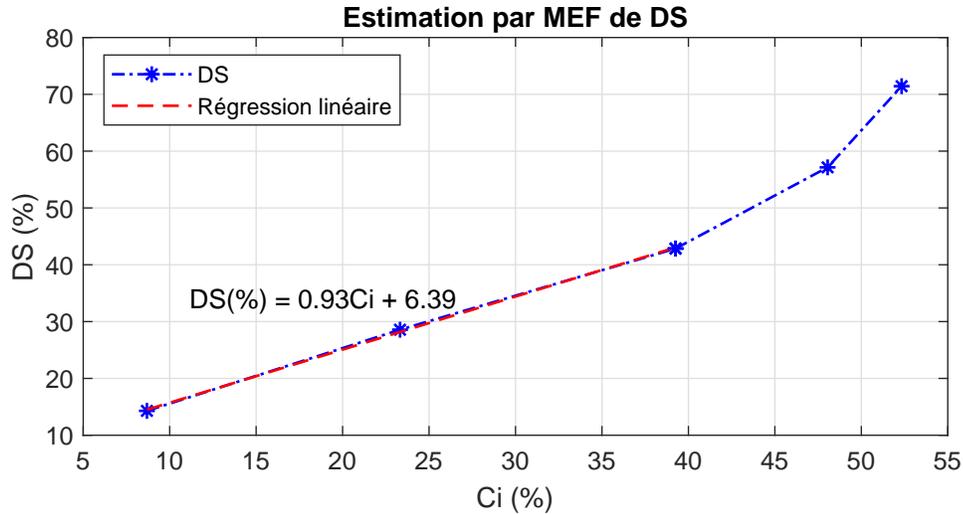
### 2.4.1.3 Estimation de la sévérité de l'endommagement par éléments finis

En utilisant les fréquences naturelles obtenues avec le MEF pour le câble T15.7 sain et avec défauts, les pourcentages de changement en fréquences naturelles ( $C_i$ ) sont donnés dans le tableau 2.9. En prenant les valeurs moyennes de ces paramètres  $C_i$  et les valeurs de DS

Modes	Paramètres $C_i(\%)$				
	$C_i^{s-1d}(\%)$	$C_i^{s-2d}(\%)$	$C_i^{s-3d}(\%)$	$C_i^{s-4d}(\%)$	$C_i^{s-5d}(\%)$
<b>1</b>	8.34	22.79	39.19	47.88	52.05
<b>2</b>	9.09	24.03	39.95	48.93	53.38
<b>3</b>	8.41	22.84	38.77	47.47	51.64
<b>4</b>	8.90	23.62	39.11	47.93	52.25
<b>Moyenne</b>	$8.68 \pm 0.37$	$23.32 \pm 0.61$	$39.26 \pm 0.50$	$48.05 \pm 0.62$	$52.33 \pm 0.75$

TABEAU 2.9 – Paramètres ( $C_i$ ) du MEF du T15.7

( $100 \times [1/7, 2/7, 3/7, 4/7, 5/7]$ ), la relation obtenue est donnée sur la figure 2.22. Jusqu'à 40% de


 FIGURE 2.22 – Estimation de DS avec les paramètres  $C_i$  numériques

changement en fréquences naturelles, correspondant ici pour le T15.7 à trois fils coupés, la même relation linéaire qu’avec les données expérimentales entre DS et  $C_i$  est notée. Au-delà de ces 40% de changement en fréquences naturelles, une accélération de l’évolution de la sévérité de l’endommagement est notée, rompant ainsi la relation linéaire entre DS et  $C_i$ . Conséquemment, nous pouvons conclure par dire que la relation linéaire donnée à l’équation 2.12 pourrait être utilisée pour estimer la sévérité d’endommagement de ce type de câble lorsque les ruptures de fils n’atteignent pas un certain seuil (ici 40%) ; sachant qu’en réalité une réparation ou un démontage est nécessaire avant d’atteindre un tel niveau d’endommagement.

Partant de cette relation non linéaire entre DS et  $C_i$  et en s’inspirant de la loi de Paris  $\left(\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m\right)$  de l’évolution d’une rupture, nous avons exprimé DS sous la forme d’une loi de puissance :

$$DS (\%) = \alpha (C_i)^\beta \quad (2.20)$$

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 sur nombre total de fils) et le DS estimé avec ce couple. Pour notre cas d’étude, la relation ainsi obtenue donnant le paramètre DS est :

$$DS = 1.45 (C_i)^{0.95} \quad (2.21)$$

Avec cette relation, le seuil minimal de changement de fréquences naturelles pour pouvoir estimer la sévérité de l’endommagement est de 1.45 % ; pour la relation linéaire définie avec les données expérimentales, ce seuil était de 5.68 %. Ces relations seront testées sur les câbles bi-couches qui sont testés après le monotoron T15.7.

## 2.5 Analyse des données sur monotorons bi-couches

### 2.5.1 Positionnement des capteurs et des défauts

Pour les essais réalisés sur câbles monotorons bi-couches, des ruptures de fils ont été effectuées au niveau de la partie du câble située dans le culot d’ancrage et en partie centrale. Les propriétés mécaniques et géométriques de ces câbles bi-couches composés de 19 fils au total ont été données dans le tableau 2.1. Il est à noter qu’après avoir monté le culot d’ancrage, il devient impossible de réaliser des ruptures dans les ancrages. Ainsi pour ces essais, deux câbles bi-couches identiques (mêmes caractéristiques mécaniques et géométriques, mêmes positionnement des capteurs) ont été utilisés. Après avoir réalisé des essais sur un premier bi-couches que nous appellerons bi-couches 1 sans ruptures de fils au niveau de l’ancrage, un deuxième bi-couches avec fils coupés dans l’ancrage (bi-couches 2) est monté. La procédure adoptée pour les essais sur ces bi-couches peut se résumer ainsi :

- ① Essais sur le bi-couches 1 sans défaut
- ② Réalisation de cinq ruptures de fils successivement en partie centrale de ce bi-couches 1. La position des cinq ruptures de fils est donnée sur la figure 2.23.
- ③ Démontage de ce bi-couches 1
- ④ Montage et essais sur le bi-couches 2 dont trois ruptures de fils ont été effectuées (figure 2.23) dans les ancrages avant le montage des culots d’ancrage. Pour éviter de recouper les mêmes fils en partie centrale, ces fils coupés dans l’ancrage se situent sur la première couche (celle à 6 fils). Il est à noter que le bi-couches 2 avec trois fils coupés dans les ancrages est initialement tendu à la même tension initiale appliquée sur le bi-couches 1 sans ruptures de fils, c’est-à-dire à 30% de la force de rupture du câble sain.
- ⑤ Réalisations de cinq ruptures de fils successives en partie centrale sur le bi-couches 2 à la même position que sur le bi-couches 1.

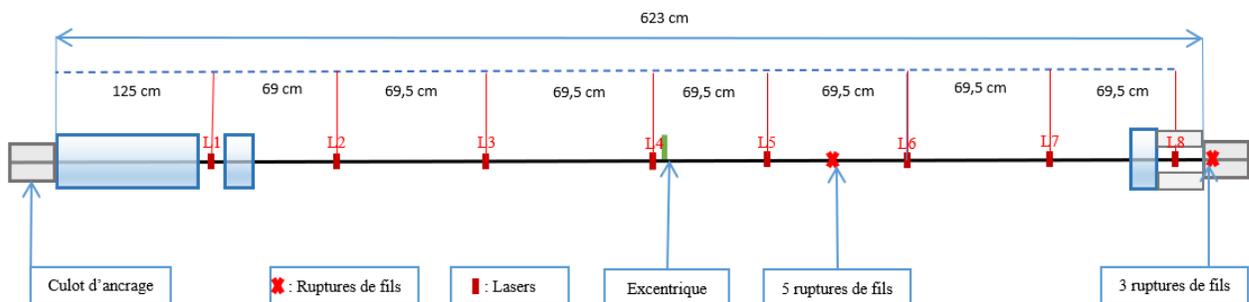


FIGURE 2.23 – Positionnement des capteurs et défauts sur les câbles bi-couches

### 2.5.2 Identification des paramètres modaux des bi-couches

Après la réalisation des essais sur ces bi-couches avec les différentes configurations, les données ont été traitées. L’identification des paramètres modaux, après avoir calculé les FRFs, a été initialement faite avec la méthode du Line-Fit. Ensuite nous avons également appliqué la méthode FDD (*Frequency Domain Decomposition*) pour l’identification de ces paramètres modaux.

Pour ce faire seuls les déplacements ont été pris en compte, comme pour une analyse modale opérationnelle.

### 2.5.2.1 Fréquences naturelles avec le Line-Fit

Les fréquences naturelles moyennes et les coefficients de variation obtenus avec le Line-Fit sont donnés dans le tableau 2.10 pour le bi-couches 1 et dans le tableau 2.11 pour le bi-couches 2.

État du câble		Modes			
		1	2	3	4
<b>État 0</b>	$f_n$ (Hz)	20.23	40.49	61.00	82.05
	$C_v$ (%)	0.14	0.20	0.56	0.82
<b>1 FC</b>	$f_n$ (Hz)	19.61	39.28	59.20	79.63
	$C_v$ (%)	0.29	0.23	0.47	0.82
<b>2 FC</b>	$f_n$ (Hz)	18.95	37.93	57.19	76.79
	$C_v$ (%)	0.82	0.37	0.42	0.84
<b>3 FC</b>	$f_n$ (Hz)	17.94	36.06	54.36	73.16
	$C_v$ (%)	0.63	0.23	0.30	0.82
<b>4 FC</b>	$f_n$ (Hz)	16.79	33.82	50.99	68.56
	$C_v$ (%)	0.39	0.23	0.31	0.96
<b>5 FC</b>	$f_n$ (Hz)	15.81	31.79	47.85	64.00
	$C_v$ (%)	0.43	0.29	0.88	0.90

TABLEAU 2.10 – Fréquences naturelles du **bi-couches 1** avec le Line-Fit

État du câble		Modes			
		1	2	3	4
<b>État 0</b>	$f_n$ (Hz)	20.49	41.16	62.03	83.23
	$C_v$ (%)	0.43	0.24	0.28	0.54
<b>1 FC</b>	$f_n$ (Hz)	19.89	39.86	60.11	80.66
	$C_v$ (%)	0.51	0.46	0.31	0.45
<b>2 FC</b>	$f_n$ (Hz)	19.10	38.32	57.79	77.54
	$C_v$ (%)	0.48	0.29	0.29	0.56
<b>3 FC</b>	$f_n$ (Hz)	18.11	36.39	54.77	73.51
	$C_v$ (%)	0.36	0.41	0.32	0.69
<b>4 FC</b>	$f_n$ (Hz)	17.00	34.19	51.46	69.04
	$C_v$ (%)	0.51	0.32	0.38	0.80
<b>5 FC</b>	$f_n$ (Hz)	15.97	32.13	48.38	64.71
	$C_v$ (%)	0.26	0.27	0.23	0.64

TABLEAU 2.11 – Fréquences naturelles du **bi-couches 2** avec le Line-Fit

- L'état 0 du bi-couches 1 correspond à l'état initial de ce câble sans aucune rupture de fils.
- L'état 0 du bi-couches 2 correspond à l'état initial de ce câble quand seules trois ruptures sont effectuées dans l'ancrage.
- 1 FC renvoie au câble avec 1 fil coupé (FC) en partie centrale.

L'analyse de ces deux tableaux montre que les fréquences naturelles des bi-couches 1 et 2 obtenues avec la méthode de Line-Fit sont très stables avec des coefficients de variation inférieurs à 1 %. En considérant un bi-couches (1 ou 2), nous pouvons également constater que les fréquences naturelles baissent de manière constante quand le nombre de fils coupés augmente, ceci est visible sur les figures 2.24a et 2.24b. Cependant en comparant les deux bi-couches, nous notons que les fréquences naturelles du deuxième bi-couches avec la présence de fils coupés dans l'ancrage sont légèrement supérieures à celles du premier de l'ordre de 1 % pour tout mode et tout état (sans et avec fils coupés) des câbles. Cette observation qui va à l'encontre de ce qui est attendu, une baisse des fréquences quand des fils sont coupés, peut être due par le fait que le

bi-couches 2 avec les trois fils coupés dans l'ancrage a été tendu à la même tension initiale appliquée sur le bi-couches 1 sans fil coupé. Cette augmentation peut également s'expliquer soit par des erreurs expérimentales (hypothèse peu probable dans ce cas vu que cette augmentation est notée pour toutes les valeurs sans aucune exception) soit par une légère différence géométrique entre les deux câbles. D'après la théorie de la corde vibrante avec tension, les fréquences naturelles du câble peuvent s'exprimer comme suit :

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \left[ 1 + 2\sqrt{\frac{EI}{TL^2}} + \left( 4 + \frac{n\pi^2}{2} \right) \frac{EI}{TL^2} \right] \quad (2.22)$$

Ainsi avec cette équation 2.22, en négligeant la rigidité (EI), nous pouvons voir qu'une légère baisse de la longueur du deuxième bi-couches peut être à l'origine de cette augmentation des fréquences malgré les fils coupés ; ce qui expliquerait que les fréquences naturelles du bi-couches 2 soient plus élevées que celles du bi-couches 1 malgré les trois fils coupés dans les ancrages.

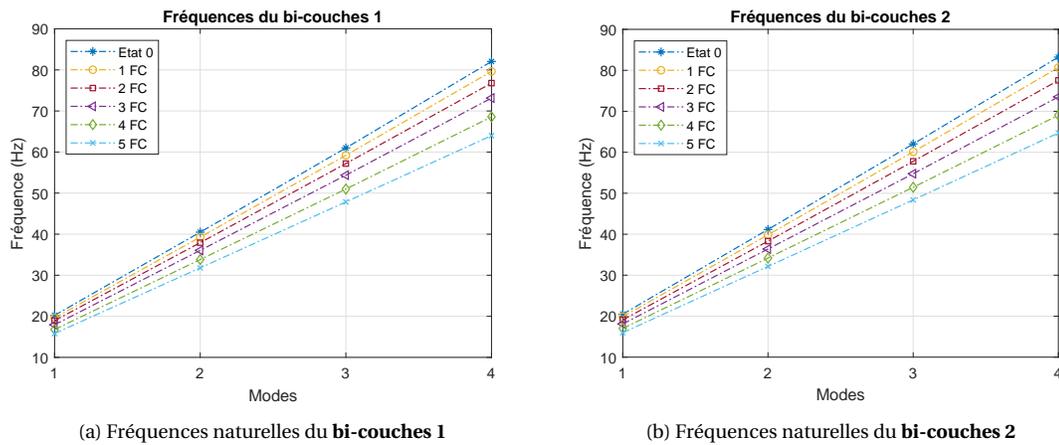


FIGURE 2.24 – Fréquences naturelles des **bi-couches 1 et 2**

### 2.5.2.2 Fréquences naturelles avec le FDD

Les fréquences naturelles obtenues avec la méthode FDD pour les deux bi-couches sont données aux tableaux 2.12 et 2.13. Ici également, nous remarquons que les fréquences naturelles sont très stables avec des coefficients de variation inférieurs à 0.5 % pour les modes 1, 2 et 3 et inférieurs à 1 % pour le mode 4. En comparant ces fréquences naturelles avec celles obtenues avec le Line-Fit, une différence relative inférieure à 0.5 % est obtenue pour toutes les fréquences sauf trois. Cette différence relative est calculée comme suit :

$$\epsilon_{f_n} = 100 \times \frac{|f_n^{LF} - f_n^{FDD}|}{f_n^{LF}}$$

État du câble	Modes				
	1	2	3	4	
<b>État 0</b>	$f_n$ (Hz)	20.23	40.60	60.80	82.12
	$C_v$ (%)	0.00	0.12	0.39	0.90
	$\epsilon_{f_n}$ (%)	0.03	0.27	0.32	0.08
<b>1 FC</b>	$f_n$ (Hz)	19.65	39.35	58.99	79.82
	$C_v$ (%)	0.00	0.12	0.38	0.83
	$\epsilon_{f_n}$ (%)	0.22	0.18	0.37	0.24
<b>2 FC</b>	$f_n$ (Hz)	19.00	37.99	57.07	77.18
	$C_v$ (%)	0.14	0.14	0.43	0.64
	$\epsilon_{f_n}$ (%)	0.26	0.16	0.20	0.51
<b>3 FC</b>	$f_n$ (Hz)	17.74	36.15	54.35	73.51
	$C_v$ (%)	0.64	0.12	0.39	0.67
	$\epsilon_{f_n}$ (%)	1.13	0.25	0.03	0.48
<b>4 FC</b>	$f_n$ (Hz)	16.79	33.89	51.12	68.86
	$C_v$ (%)	0.00	0.12	0.31	0.86
	$\epsilon_{f_n}$ (%)	0.00	0.20	0.26	0.43
<b>5 FC</b>	$f_n$ (Hz)	15.84	31.85	47.97	64.40
	$C_v$ (%)	0.00	0.23	0.49	0.83
	$\epsilon_{f_n}$ (%)	0.17	0.19	0.25	0.63

TABLEAU 2.12 – Fréquences naturelles du **bi-couches 1** avec la FDD

État du câble	Modes				
	1	2	3	4	
<b>État 0</b>	$f_n$ (Hz)	20.55	41.21	61.91	83.39
	$C_v$ (%)	0.17	0.06	0.31	0.64
	$\epsilon_{f_n}$ (%)	0.29	0.11	0.19	0.20
<b>1 FC</b>	$f_n$ (Hz)	19.94	39.89	60.17	80.83
	$C_v$ (%)	0.00	0.05	0.29	0.62
	$\epsilon_{f_n}$ (%)	0.28	0.08	0.09	0.20
<b>2 FC</b>	$f_n$ (Hz)	19.28	38.42	57.87	77.77
	$C_v$ (%)	0.00	0.00	0.33	0.63
	$\epsilon_{f_n}$ (%)	0.97	0.26	0.13	0.29
<b>3 FC</b>	$f_n$ (Hz)	18.04	36.44	54.88	73.73
	$C_v$ (%)	0.00	0.00	0.35	0.71
	$\epsilon_{f_n}$ (%)	0.40	0.13	0.20	0.29
<b>4 FC</b>	$f_n$ (Hz)	17.01	34.23	51.50	69.29
	$C_v$ (%)	0.00	0.07	0.41	0.83
	$\epsilon_{f_n}$ (%)	0.06	0.12	0.08	0.37
<b>5 FC</b>	$f_n$ (Hz)	15.98	32.18	48.51	64.90
	$C_v$ (%)	0.00	0.18	0.28	0.66
	$\epsilon_{f_n}$ (%)	0.09	0.13	0.27	0.30

TABLEAU 2.13 – Fréquences naturelles du **bi-couches 2** avec la FDD

Ces observations montrent d'une part la qualité des fréquences naturelles déterminées et d'autre part la presque équivalence des deux méthodes pour l'identification des fréquences naturelles même si celles déterminées avec la FDD sont plus stables.

### 2.5.2.3 Déformées modales avec le Line-Fit et la FDD

Après les fréquences naturelles, les coefficients MAC des déformées modales du bi-couches 1 pour les différents états des câbles obtenus avec le Line-Fit et la FDD sont donnés respectivement aux figures 2.25 et 2.26. Les coefficients MAC pour le bi-couches 2 sont donnés en annexe 2.8.

— Coefficients MAC du bi-couches 1 avec le Line-Fit

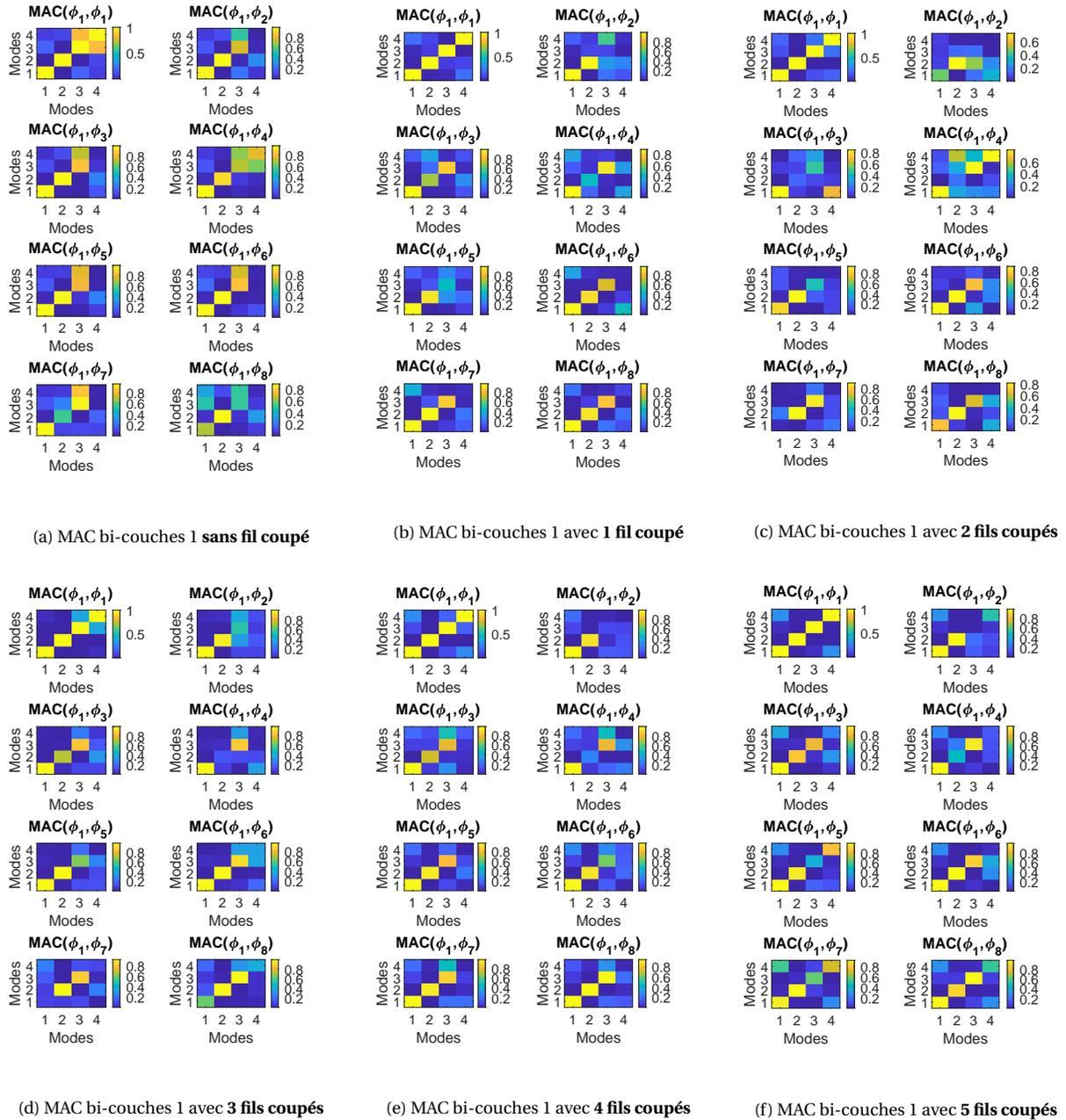


FIGURE 2.25 – Coefficients MAC du bi-couches 1

En analysant ces figures obtenues avec le Line-Fit pour le bi-couches 1, nous constatons que pour les modes 1 et 2 nous avons le plus souvent de bonnes corrélations entre les déformées modales avec des coefficients MAC proches de 1 au niveau des diagonales et presque nuls ailleurs. Cependant pour les modes 3 et 4, les coefficients MAC ne sont pas de bonne qualité. Ceci s'explique par le fait que les modes plus élevés sont plus sensibles au niveau de bruit dans les données et une certaine sensibilité de la méthode de Line-Fit à ce niveau de bruit.

— Coefficients MAC du bi-couches 1 avec le FDD

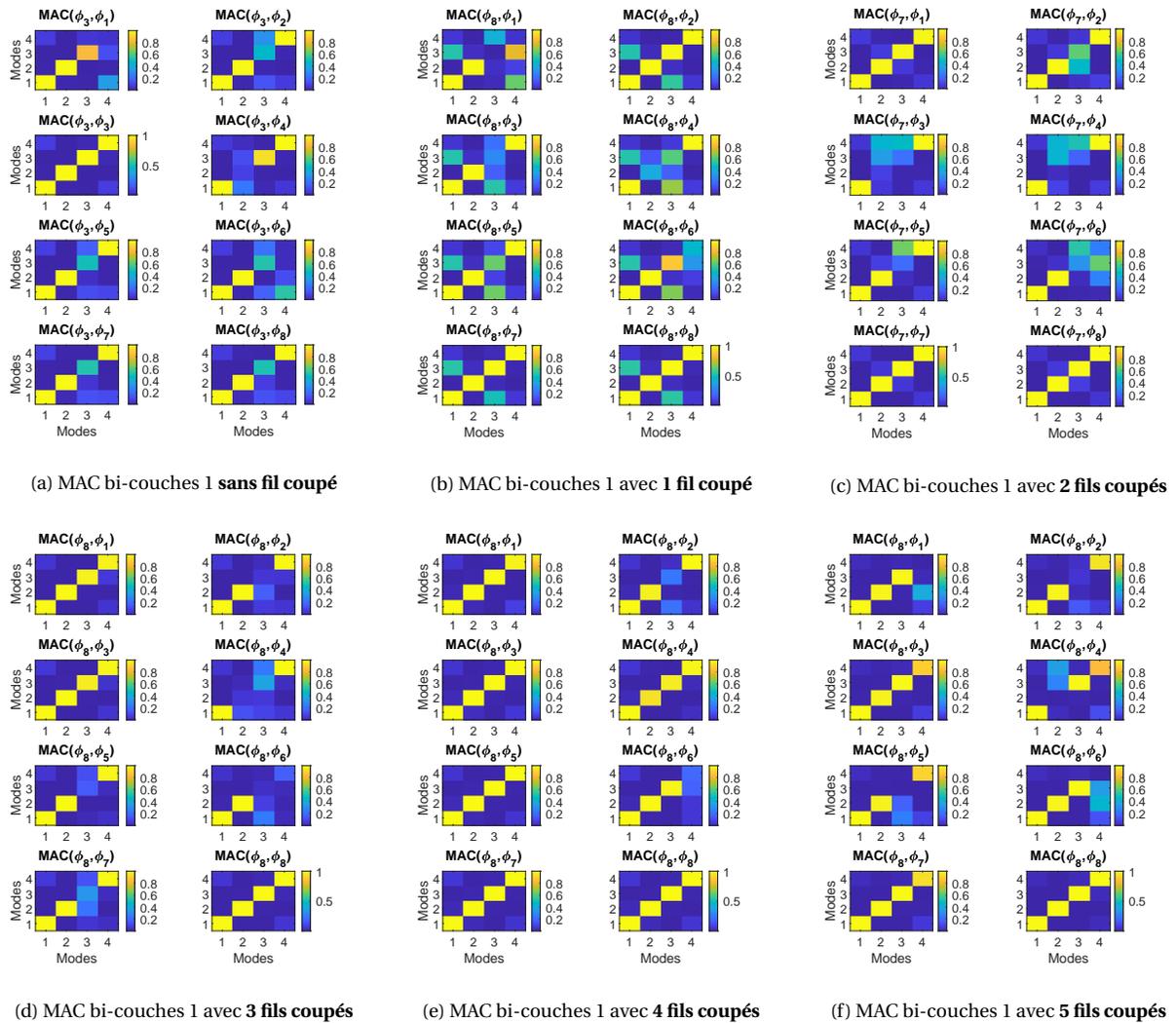


FIGURE 2.26 – Coefficients MAC du bi-couches 1 avec 0, 1 et 2 fils coupés obtenus avec la FDD

Avec la méthode FDD, nous constatons que les coefficients MAC sont de meilleure qualité que ceux obtenus avec le Line-Fit.

## 2.5.3 Détection et localisation des défauts des bi-couches

### 2.5.3.1 Détection à partir des fréquences naturelles : niveau 1

Les fréquences naturelles obtenues avec le Line-Fit et celles obtenues avec la FDD étant presque égales, nous n'utiliserons que celles basées sur le Line-Fit pour calculer les paramètres  $C_i$  (%) de changement en fréquences naturelles pour les deux bi-couches. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 2.14 pour le bi-couches 1 et dans le tableau 2.15 pour le bi-couches 2.

Avec ces tableaux, nous pouvons voir que les paramètres  $C_i$ , comme pour le T15.7, augmentent quand le nombre de fils coupés augmente. Étant donné la faible variabilité des fré-

Modes	$C_i$ (%)				
	1 FC	2 FC	3 FC	4 FC	5 FC
<b>1</b>	3.08	6.31	11.31	17.00	21.85
<b>2</b>	2.98	6.31	10.94	16.48	21.49
<b>3</b>	2.94	6.24	10.87	16.41	21.55
<b>4</b>	2.95	6.41	10.84	16.44	22.01
<b>Moyenne</b>	$2.99 \pm 0.06$	$6.32 \pm 0.06$	$10.99 \pm 0.19$	$16.58 \pm 0.24$	$21.72 \pm 0.21$

TABLEAU 2.14 – Variation des fréquences naturelles du **bi-couches 1**

Modes	$C_i$ (%)				
	1 FC	2 FC	3 FC	4 FC	5 FC
<b>1</b>	2.97	6.81	11.64	17.05	22.08
<b>2</b>	3.17	6.91	11.59	16.94	21.93
<b>3</b>	3.09	6.83	11.70	17.04	22.01
<b>4</b>	3.08	6.83	11.67	17.05	22.25
<b>Moyenne</b>	$3.08 \pm 0.07$	$6.84 \pm 0.04$	$11.65 \pm 0.04$	$17.02 \pm 0.05$	$22.07 \pm 0.12$

TABLEAU 2.15 – Variation des fréquences naturelles du **bi-couches 2**

quences naturelles constatées avec les coefficients de variation donnés aux tableaux 2.10 et 2.11 ( $C_v < 1\%$ ), nous pouvons conclure que ces paramètres  $C_i$ , de l'ordre de 3 % pour un fil coupé en partie centrale et supérieurs à 6% pour deux fils coupés ou plus, permettent de détecter la présence de fils coupés en partie centrale.

Cependant, il est à noter que si la valeur seuil de 5 % au-delà de laquelle les changements en fréquences naturelles peuvent être attribués à une présence de défaut est considérée, le premier fil coupé, dont le paramètre  $C_i$  est de l'ordre de 3 %, n'est pas détecté. Ainsi nous en déduisons que la définition d'une valeur seuil pour la détection de ruptures de fils ne peut être fixée de manière définitive à une valeur fixe. Elle doit plutôt dépendre de la maîtrise des données expérimentales et des conditions environnementales. Dépendant des erreurs expérimentales et des variations des conditions environnementales telles que la température et leurs influences sur le comportement des câbles, cette valeur seuil peut diminuer ou augmenter. Pour notre cas, vu que les effets environnementaux ne sont pas considérés, elle ne peut dépendre que des erreurs expérimentales, ici matérialisées par les coefficients de variation.

En prenant le bi-couches 1 sans aucun fil coupé comme référence, nous avons calculé les paramètres  $C_i$  en comparant les fréquences naturelles du bi-couches 2 pour tous les états avec celles du bi-couches 1 sans fil coupé. Les résultats sont donnés sur la figure 2.27. Pour l'état 0 du bi-couches 2 (uniquement trois fils coupés dans l'ancrage), nous obtenons des paramètres  $C_i$  négatifs vu que les fréquences naturelles du bi-couches 2 sont plus élevées comme noté précédemment. Ainsi nous concluons que pour ce cas les fréquences naturelles ne permettent de détecter les fils rompus dans les ancrages du fait des possibles erreurs que nous avons souli-

gnées plus haut (erreurs expérimentales et/ou géométriques).

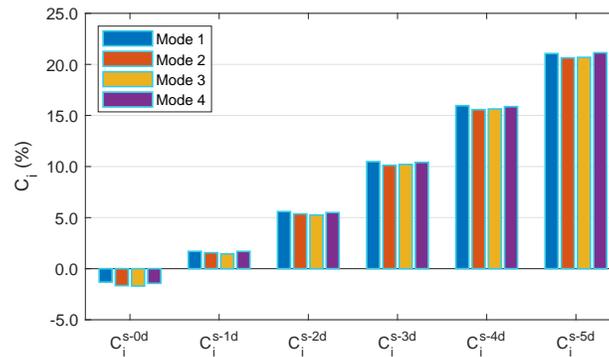


FIGURE 2.27 – Paramètres  $C_i$  du bi-couches 2 avec le bi-couches comme référence

### 2.5.3.2 Localisation à partir des courbures modales obtenues avec le Line-Fit : niveau 2

Avec l'analyse des données du T15.7, nous avons vu que les paramètres CDF (*Curvature Damage Factor*) basés sur les courbures modales ont permis de localiser les défauts situés en partie centrale. Ainsi nous allons utiliser ces paramètres pour effectuer la localisation des cinq fils coupés en partie courante des deux bi-couches. Les résultats des localisations avec les paramètres CDF calculés à partir des déformées modales obtenues avec le Line-Fit pour le bi-couches 1 sont donnés sur la figure 2.28.

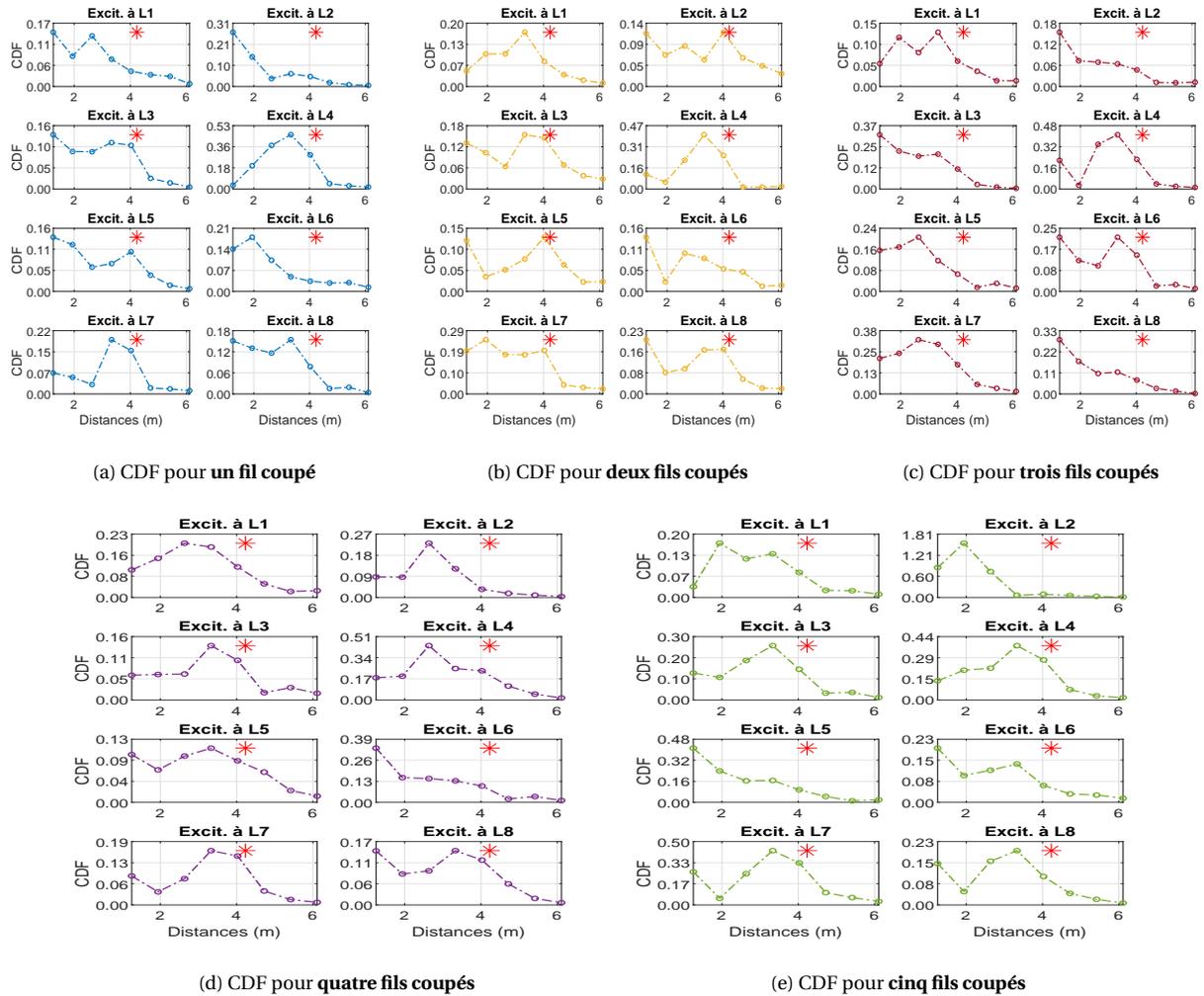


FIGURE 2.28 – Valeurs CDF pour le bi-couches 1 avec cinq niveaux de défauts

La position réelle des coupures de fils sur ces figures 2.28 est matérialisée par l’astérisque et est située à 4.23 m, entre les lasers L5 et L6. Ainsi nous considérons que le défaut est localisé si le maximum correspond au laser L5 ou au laser L6 (vu que le maximum ne peut être ailleurs que sur la position d’un capteur) soit respectivement à 4.03 m ou à 4.72 m.

Pour chacun des cinq niveaux de ruptures de fils, nous remarquons que les maximums des paramètres CDF ne correspondent à la position des ruptures de fils que pour quelques cas. La même remarque est valable pour le bi-couches 2. Cette imprécision de la localisation peut être due à une imprécision des déformées modales comme constaté avec les coefficients MAC donnés aux figures 2.25 et/ou à la méthode CDF de localisation de défauts dans les câbles. Ainsi nous avons utilisé les déformées modales obtenues avec la méthode FDD pour voir l’influence de la qualité des déformées modales sur la localisation des défauts à partir des paramètres CDF.

2.5.3.3 Localisation à partir des courbures modales obtenues avec la FDD : niveau 2

En utilisant les courbures modales obtenues avec la FDD, les paramètres CDF sont calculés pour les deux bi-couches. Les résultats de ce calcul sont donnés sur la figure 2.29 pour le bi-couches 1.

Ici également, nous n'arrivons pas à bien localiser les ruptures pour les cinq niveaux de ruptures de fils malgré que les MAC obtenus précédemment avec la FDD soient de meilleure qualité. Comme pour les localisations obtenues avec le Line-Fit, les maximums correspondent le plus souvent à la position du laser L4 situé à 90 cm du défaut.

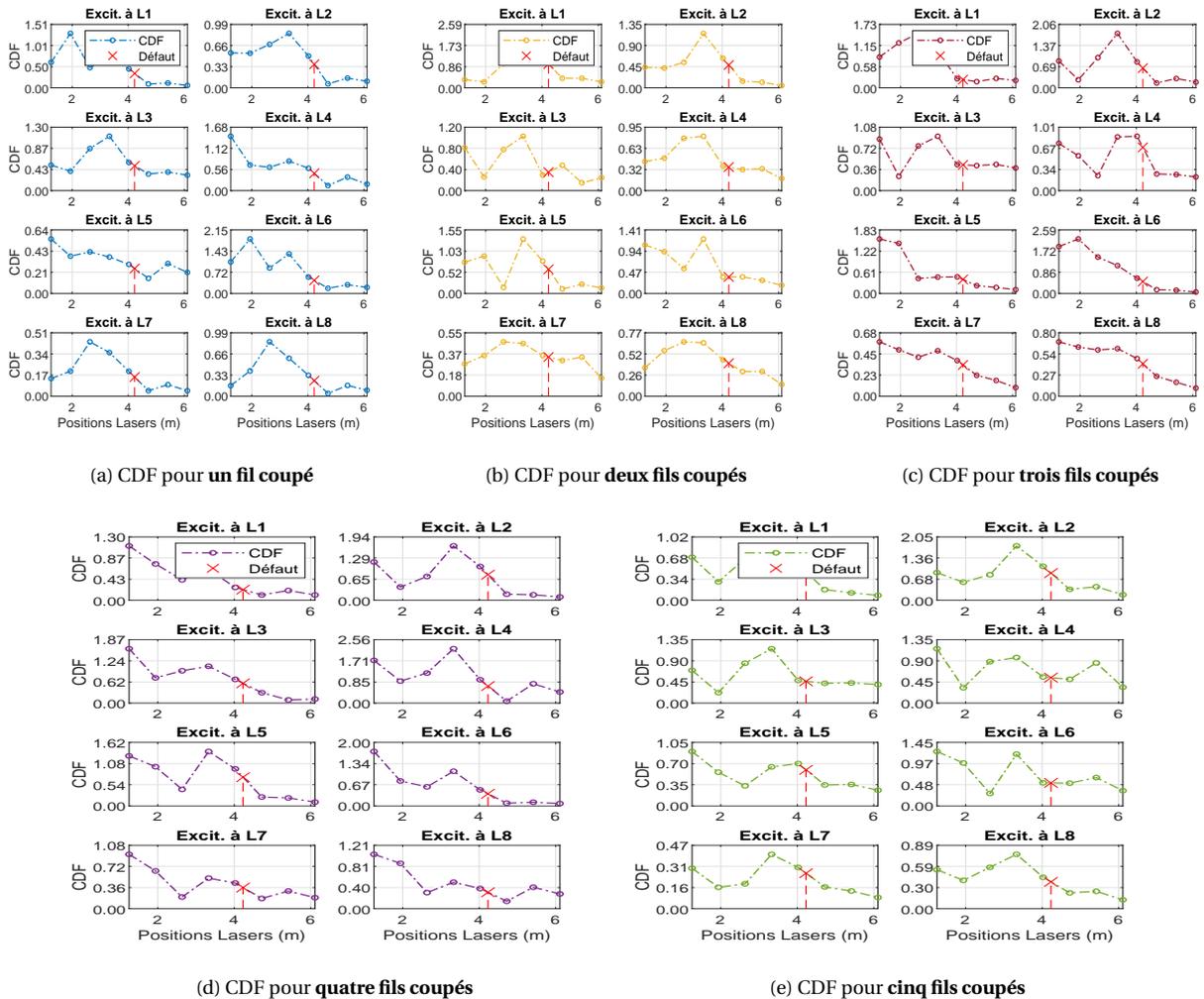


FIGURE 2.29 – Valeurs CDF pour le bi-couches 1 avec cinq niveaux de défauts à partir des courbures modales données par la FDD

Pour avoir une meilleure localisation du défaut, nous avons ainsi défini un nouveau paramètre basé sur la somme relative des courbure modales. Ce paramètre que nous avons appelé

**SRMCD** (*Sum of Relative Modal Curvatures Differences*) est défini par :

$$\text{SRMCD}_j = \frac{1}{N_m \times N_p} \sum_{k=1}^{N_p} \left( \sum_{i=1}^{N_m} \left| \frac{(\phi_{i,j}^d)'' - (\phi_{i,j}^s)''}{(\phi_{i,j}^d)''} \right| \right)_k \quad (2.23)$$

- $N_m$  est le nombre de modes considéré pour calculer les paramètres **SRMCD** à la position  $j$ .
- $N_p$  est le nombre de points où les excitations sont effectuées (pour nos essais  $N_p$  correspond ainsi aux huit lasers).

En utilisant ce paramètres et les courbures modales données par la FDD, les résultats de la localisation de défauts du bi-couches 1 sont donnés aux figures 2.30. Les résultats obtenus avec le bi-couches 2 sont donnés en annexe 2.8. Pendant les essais, comme signalé plus haut, les chocs près de chaque capteur sont répétés quatre fois. Ainsi une sous-figure n°i donnée pour chaque état du câble sur la figure 2.30 correspond aux données obtenues pour les chocs n°i près de chaque capteur.

Avec ces figures, nous avons des résultats meilleurs que ceux obtenus avec les paramètres CDF. Ainsi, avec trois, quatre et cinq fils coupés, nous avons les maximums des paramètres SRMCD qui coïncident soit au laser L5 ou au laser L6 sauf deux cas pour cinq fils coupés et un cas pour trois fils coupés où les maximums sont notés au laser L2. Pour un fil coupé, une bonne localisation est obtenue pour un cas sur quatre. Cependant pour ce cas avec un fil coupé, il est à noter que même les cas où les maximums des SRMCD ne correspondent pas à la position du défaut, nous avons un maximum local au niveau de la rupture. Cette observation est également valable pour les autres niveaux de d'endommagement (deux à cinq fils coupés). En ce qui concerne le câble avec deux fils coupés, à part les maximums locaux notés au niveau du défaut, la localisation n'est pas satisfaisante. Cette non localisation peut s'expliquer par une faible qualité des déformées modales pour ce cas comme nous pouvons le voir avec les coefficients MAC donnés sur la figure 2.26. En regardant les coefficients donnés à cette figure 2.26, il est constaté que les meilleurs coefficients correspondent également aux cas où il y a trois, quatre et cinq ruptures de fils dans le bi-couches 1. Cette observation justifie ainsi, au-delà de la pertinence de la méthode SRMCD et d'un niveau d'endommagement plus élevé, pourquoi la localisation pour trois, quatre et cinq fils coupés est meilleure que celle pour un et deux fils coupés.

Après la détection et la localisation des ruptures de fils dans les bi-couches, nous allons à présent étudier la possibilité d'estimer le degré d'endommagement.

### 2.5.4 Estimation empirique du degré d'endommagement des bi-couches : niveau 3

Pour estimer le degré d'endommagement des bi-couches 1 et 2, nous allons utiliser les formules empiriques proposées lors de l'analyse des défauts dans le câble T15.7 (équations 2.11 et

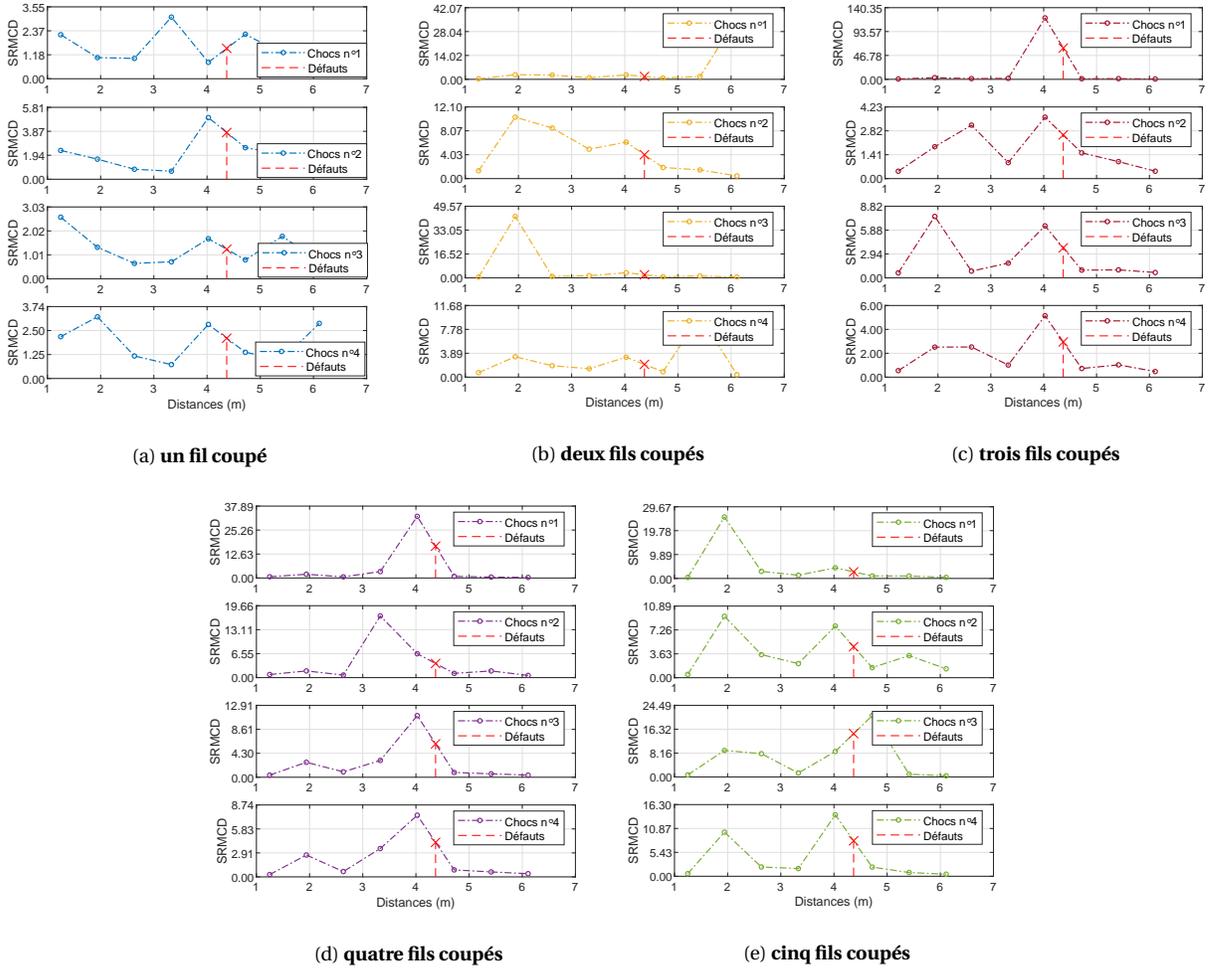


FIGURE 2.30 – Valeurs **SRMCD** pour le **bi-couches 1** avec cinq niveaux de défauts à partir des courbures modales données par la FDD

2.21). Les deux lois proposées sont :

- une loi linéaire donnée :  $DS = 0.91C_i + 5.68$  qui donne le nombre de fils rompus  $N_{fr}$  comme suit :

$$N_{fr}^{LL} = \frac{N_{ft}}{100} \times (0.91C_i + 5.68) \quad (2.24)$$

- et une loi de puissance :  $DS = 1.45 (C_i)^{0.95}$ . Le nombre de fils rompus est donné alors par :

$$N_{fr}^{LP} = \frac{N_{ft}}{100} \times (1.45 (C_i)^{0.95}) \quad (2.25)$$

Les fréquences naturelles (donnant les paramètres  $C_i$ ) étant aussi bien déterminées avec le Line-Fit qu’avec la FDD, nous allons utiliser celles données par la FDD pour estimer la sévérité de l’endommagement. Les paramètres  $C_i$  moyens sur les quatre modes obtenus avec la FDD pour les bi-couches 1 et 2 sont donnés dans le tableau 2.16. Avec ces valeurs de  $C_i$ , nous allons estimer le nombre de fils coupés en utilisant la relations données aux équations 2.24 et 2.25.

Câble	$C_i$ (%)				
	1 FC	2 FC	3 FC	4 FC	5 FC
<b>bi-couches 1</b>	2.94	6.17	11.10	16.41	21.49
<b>bi-couches 2</b>	3.02	6.56	11.69	16.97	21.99

 TABLEAU 2.16 – Paramètres  $C_i$  des bi-couches 1 et 2 avec la FDD

Câble		1 FC	2 FC	3 FC	4 FC	5 FC
		<b>bi-couches 1</b>	$N_{fr}^{LL}$	2	2	3
	$N_{fr}^{LP}$	1	2	3	4	5
<b>bi-couches 2</b>	$N_{fr}^{LL}$	2	2	3	4	5
	$N_{fr}^{LP}$	1	2	3	4	5

TABLEAU 2.17 – Calcul du nombre de fils rompus des bi-couches 1 et 2 avec les lois empiriques linéaire et de puissance

Ces équations ne donnant pas nécessairement un entier naturel, l'entier le plus proche du réel trouvé sera choisi (*fonction «round» de MATLAB*). Pour le bi-couches 1, l'état de référence considéré est le câble sans aucun fil coupé. Et pour le bi-couches 2, l'état de référence est le câble avec trois fils coupés au niveau de l'ancrage. Les résultats sont donnés dans le tableau 2.17.

Avec ce tableau 2.17, le nombre exact de fils rompus a été trouvé pour tous les niveaux d'endommagement (un à cinq fils coupés) en utilisant la loi de puissance ( $N_{fr}^{LP}$ ). Par contre avec la loi linéaire ( $N_{fr}^{LL}$ ), pour un fil coupé, le nombre exact n'a pas été trouvé. Ceci s'explique par le fait qu'avec la loi linéaire, un seuil  $C_i$  de 5.68 % doit être atteint pour pouvoir estimer le nombre de fils rompus alors qu'avec la loi de puissance ce seuil n'est que de 1.45 %. Pour les bi-couches 1 et 2 les valeurs  $C_i$  pour un fil coupé sont respectivement 2.94 % et 3.02 %; ce qui explique le fait que le nombre exact de fils rompus ait été trouvé avec la loi de puissance et pas avec la loi linéaire.

## 2.6 Analyse des données du câble EMR multicouches

Suite à l'étude des données des essais sur un câble monocouche (T15.7) et sur câbles bi-couches faite ci-dessus, celle des données des essais sur câble multicouches (neuf couches) est abordée. Après avoir effectué les essais du projet OCEAGEN, les positions réelles des défauts ayant eu lieu au cours de ces essais ont été trouvés par dépouillement du câble : le câble est dégainé et les fils coupés sur différentes couches sont localisées directement par observation. Ainsi sur le câble que nous avons réalisé les essais, les ruptures de fils sont localisés à 1.98 m, 5.44 m, 6.64 m, 7.01 m et 11.92 m.

Pour la caractérisation des défauts, la même démarche que sur les bi-couches est adoptée. Les

paramètres modaux (fréquences naturelles et déformées modales) sont déterminées avec la méthode et la caractérisation des défauts est faite en utilisant les paramètres  $C_i$  et SRMCD.

## 2.6.1 Identification des paramètres modaux

### 2.6.1.1 Fréquences naturelles

En utilisant la FDD, les fréquences naturelles obtenues avec le coefficients de variation correspondants pour le câble sain (sans fils coupés) et le câble endommagé sont donnés dans le tableau 2.18. Avec ce tableau, nous voyons que les fréquences naturelles sont très stables avec des coefficients de variation nuls (même à une précision de  $10^{-3}$ ).

Modes	Sain		Endommagé	
	$f_n$ (Hz)	$C_v$ (%)	$f_n$ (Hz)	$C_v$ (%)
<b>1</b>	7.04	0.00	7.04	0.00
<b>2</b>	14.15	0.00	14.15	0.00
<b>3</b>	21.48	0.00	21.55	0.00
<b>4</b>	29.25	0.00	29.40	0.00

TABLEAU 2.18 – Fréquences naturelles du câble EMR sans et avec défauts

### 2.6.1.2 Les déformées modales

Avec les déformées modales obtenues avec la FDD, les coefficients pour les deux états du câble sont donnés sur la figure 2.31a pour le câble EMR sain et sur la figure 2.31b pour le câble endommagé. Sur ces figures nous pouvons voir que les coefficients MAC sont de très bonne qualité avec des valeurs proches de l'unité sur les diagonales et presque nulles ailleurs. Cette observation montre la possibilité de déterminer des paramètres de qualité satisfaisante même pour des câbles à diamètre important.

En utilisant ces paramètres modaux, la caractérisation des défauts dans le câble est effectuée.

## 2.6.2 Caractérisation des défauts

### 2.6.2.1 Variation des fréquences naturelles

En calculant les paramètres  $C_i$  pour les quatre modes du câble endommagé à partir des fréquences naturelles données dans le tableau 2.18, des valeurs nulles sont trouvées pour les deux premiers modes. Et pour les modes 3 et 4, les valeurs  $C_i$  trouvées sont respectivement  $-0.34\%$  et  $-0.50\%$ ; nous avons une augmentation des fréquences naturelles malgré la présence de défauts dans le câble. Ce même résultat a été trouvé en comparant les fréquences naturelles du bi-couches 1 sans fils coupés avec le bi-couches 2 avec trois fils coupés dans l'ancrage, tous deux tendus à la même tension. Ainsi en tendant le câble EMR à la même tension initiale après

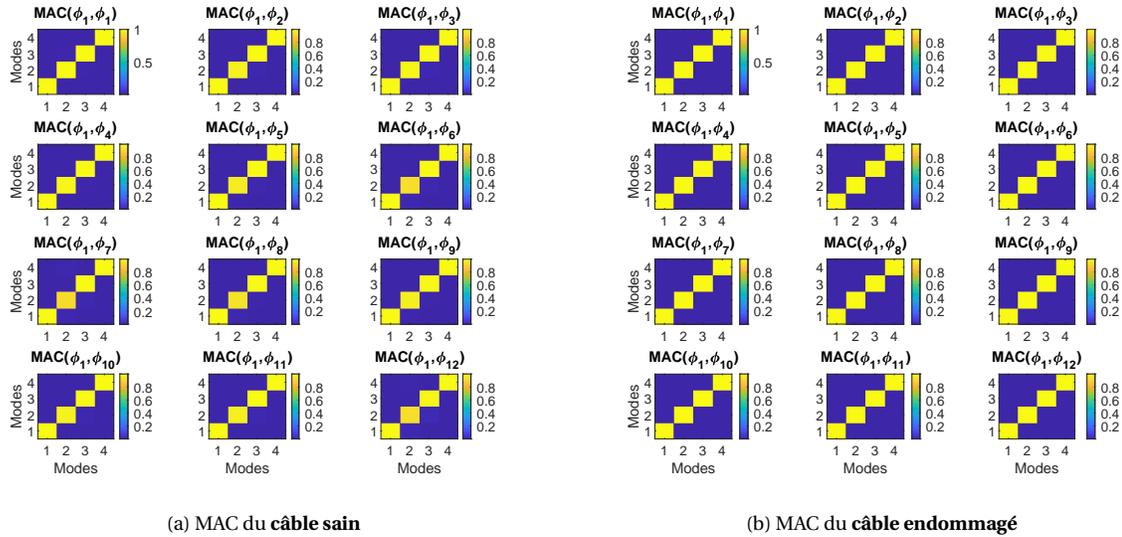


FIGURE 2.31 – Coefficients MAC du câble EMR sans et avec endommagement

apparition des ruptures de fils a pour effet d'annuler les baisses de fréquences qui devraient apparaître.

### 2.6.2.2 Localisation des ruptures de fils avec les paramètres SRMCD

En utilisant les courbures modales obtenues à partir des déformées modales données par la FDD, les paramètres SRMCD proposés dans le cadre de cette thèse et définis à l'équation 2.23 sont calculés. Les résultats des localisations sont donnés sur la figure 2.32.

Sur la figure 2.32a nous remarquons que tous les maximums locaux correspondent à des zones de ruptures de fils, sauf le maximum correspondant au laser L3 à 3.635 m et au laser L8 pour les données obtenues avec le premier choc près de chaque capteur. En considérant les SRMCD moyens (figure 2.32b), il est à noter que seul le maximum situé à la position du laser L3 ne correspondant pas à un défaut. Autrement, les maximums représentent de manière satisfaisante la position des ruptures de fils sur cette figure 2.32b. Ainsi dans le cas de figure où la position des ruptures de fils n'est pas connu d'avance, l'investigation des zones correspondantes aux maximums (situées entre les lasers  $i - 1$  et  $i + 1$  du laser  $i$  où un maximum est noté) permettraient dans ce cas d'identifier toutes les ruptures sauf la première et une fausse alerte notée (donnée par le laser L3).

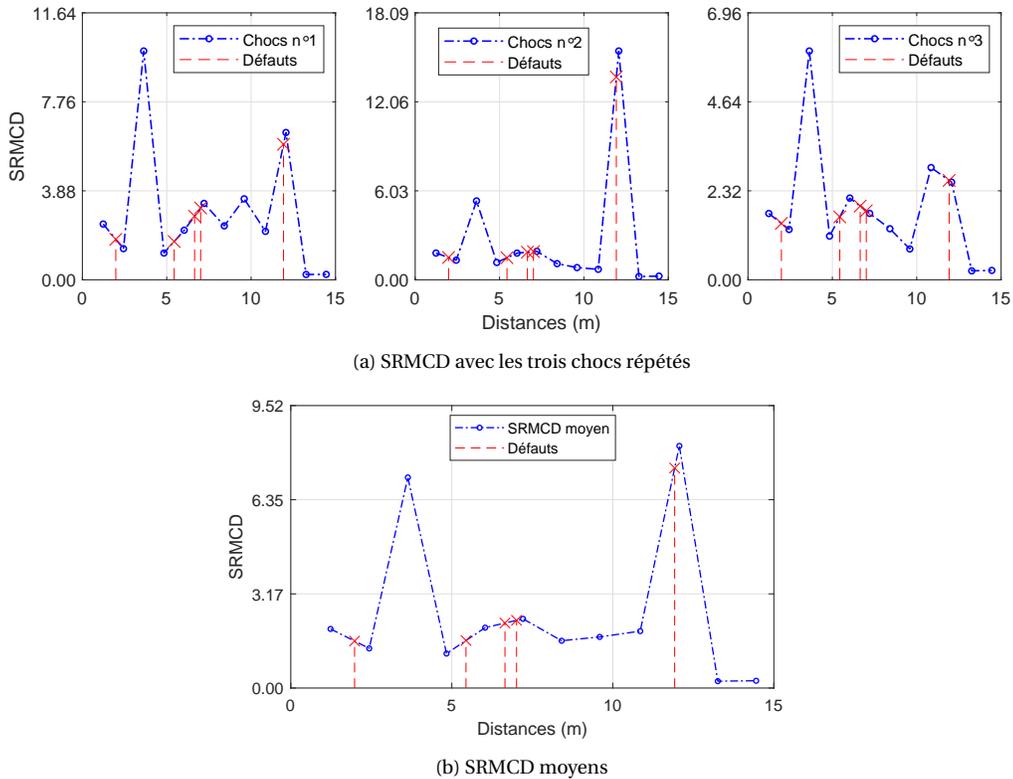


FIGURE 2.32 – Paramètres SRMCD pour le câble EMR endommagé

## 2.7 Conclusion à l'analyse dynamique

En appliquant les méthodes d'identification modales du Circle-Fit, du Line-Fit et de la FDD, les fréquences naturelles et les déformées modales d'un monotoron monocouche (T15.7), de monotorons multicouches (les bi-couches) et d'un câble EMR à neuf couches ont pu être identifiées. Ces trois méthodes ont des performances presque égales quant à la détermination des fréquences naturelles. Cependant pour la détermination des déformées modales, il est apparu, à travers les coefficients MAC (*Modal Assurance Criterion*), que la FDD donne de meilleurs résultats contrairement au Circle-Fit dont les résultats sont moins satisfaisants.

En utilisant les fréquences naturelles et les paramètres  $C_i$ , nous avons réussi à détecter des fils coupés dans les câbles précités (niveau 1 de caractérisation de défauts). En ce qui concerne la localisation, nous avons vu que les paramètres CDF (*Curvature Damage Factor*) ont permis de localiser de manière satisfaisante des ruptures en partie courante (en dehors des extrémités) du T15.7. Cependant en utilisant ces paramètres sur les données des bi-couches, il a été impossible de localiser les ruptures de fils en partie courante. Ainsi un nouveau paramètre, nommé SRMCD (*Sum of Relative Modal Curvatures Differences*), a été proposé dans le cadre de cette thèse. En utilisant ces paramètres SRMCD, il a été possible de localiser les ruptures de fils dans les bi-couches et dans le câble EMR multicouches (niveau 2).

En se basant sur le paramètres  $C_i$ , une formule empirique de détermination de la sévérité de l'endommagement est proposée. Déterminée avec les données expérimentales et numériques

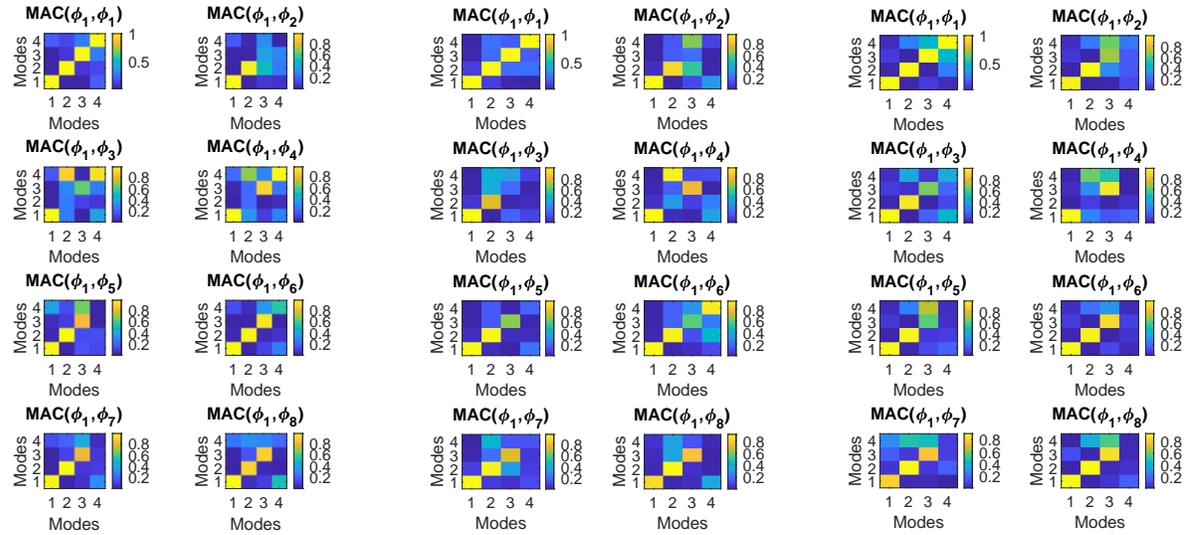
du câble monotoron T15.7, la formule sous forme de loi de puissance (équation 2.21) a permis de déterminer exactement le nombre de fils rompus dans les câbles bi-couches testés (niveau 3 de caractérisation de défauts atteint).

Cependant lorsqu'après ruptures de fils, le câble est retendu à la tension d'avant rupture, la détection devient impossible, mieux les fréquences ont même tendance à augmenter dans ce cas de figure. Ainsi des ruptures dans les ancrages des bi-couches n'ont pas pu être détectées ; du fait de cette retension. En outre avec les méthodes CDF et SRMCD, des maximums sont quelques fois notés en dehors des zones de ruptures ; ce qui pourrait créer de fausses alertes en condition d'utilisation.

Pour pallier ces limites identifiées pour les méthodes dynamiques (incapacité de détecter des défauts dans les ancrages et les fausses localisations), nous allons utiliser la méthode d'émission acoustique.

## 2.8 Annexes à l'analyse dynamique

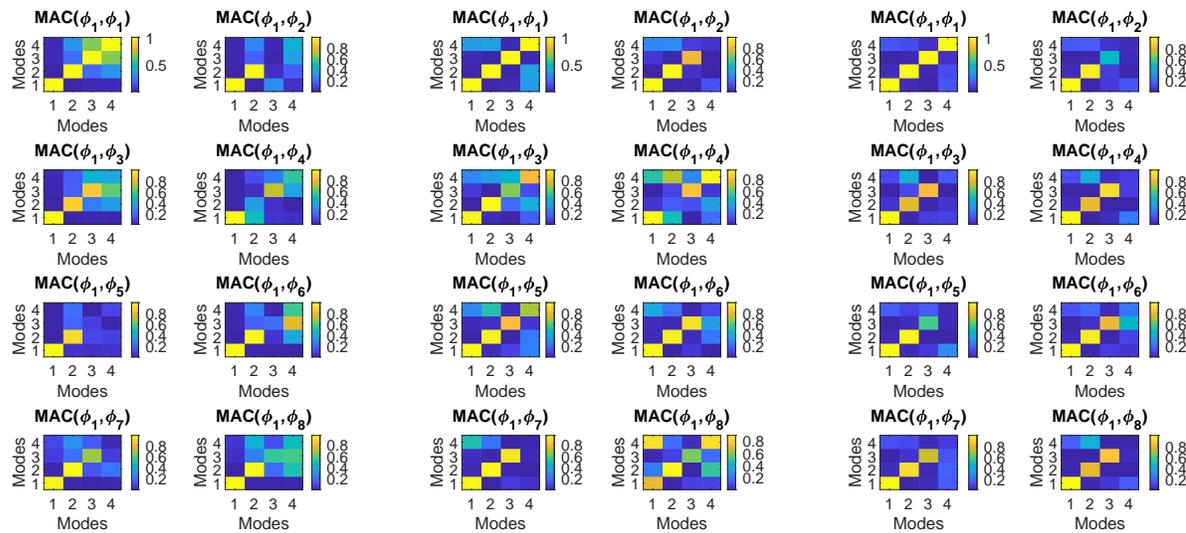
- Coefficients MAC du bi-couches 2 obtenus avec le Line-Fit



(a) MAC bi-couches 2 à l'état 0

(b) MAC bi-couches 2 avec 1 fil coupé

(c) MAC bi-couches 2 avec 2 fils coupés



(d) MAC bi-couches 2 avec 3 fils coupés

(e) MAC bi-couches 2 avec 4 fils coupés

(f) MAC bi-couches 2 avec 5 fils coupés

FIGURE 2.33 – Coefficients MAC du bi-couches 2 avec le Line-Fit

— Coefficients MAC du bi-couches 2 obtenus avec le FDD

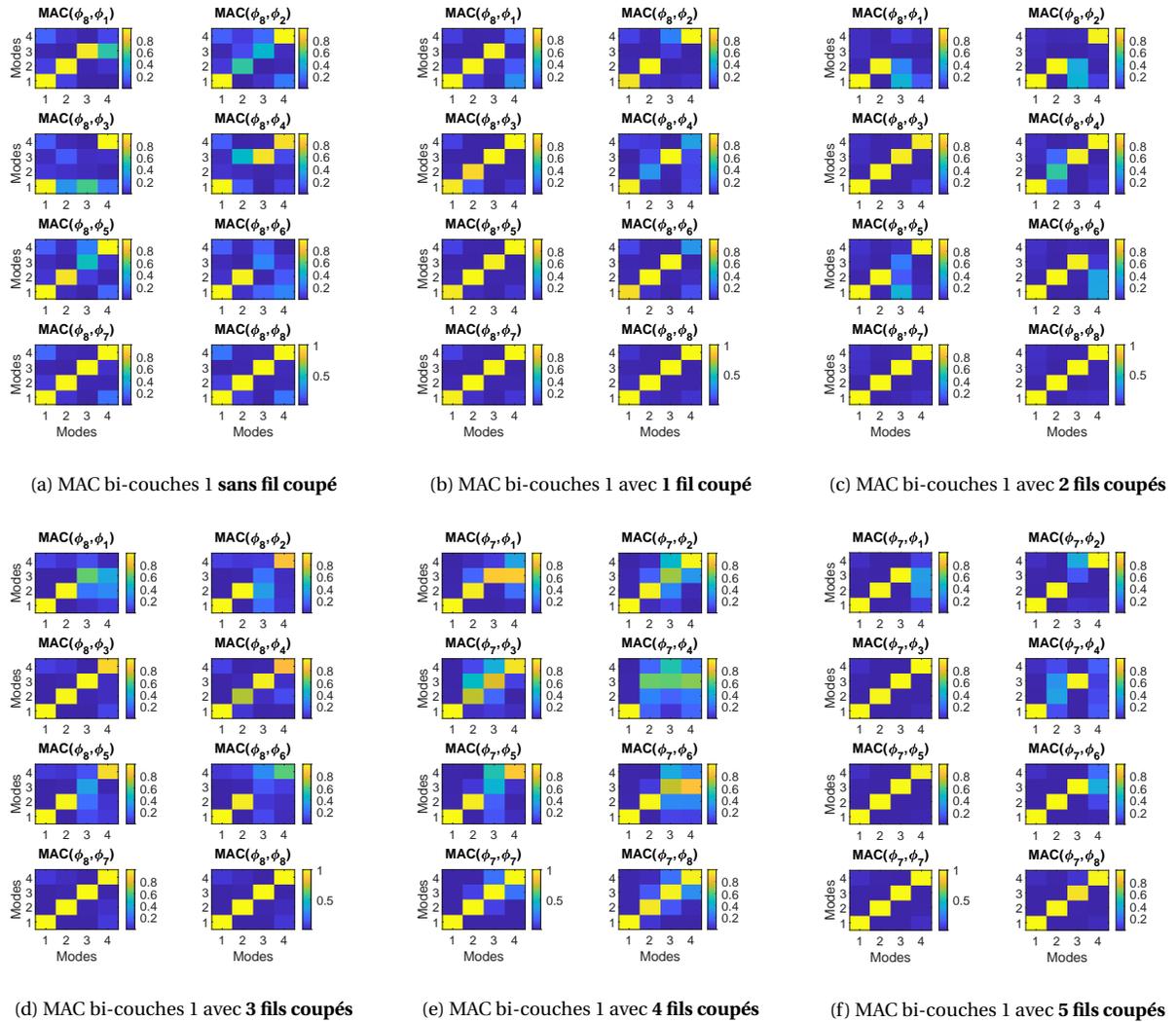


FIGURE 2.34 – Coefficients MAC du bi-couches 1 avec 0, 1 et 2 fils coupés obtenus avec la FDD

— Localisation de défauts dans le bi-couches 2 avec les paramètres SRMCD obtenus avec la FDD

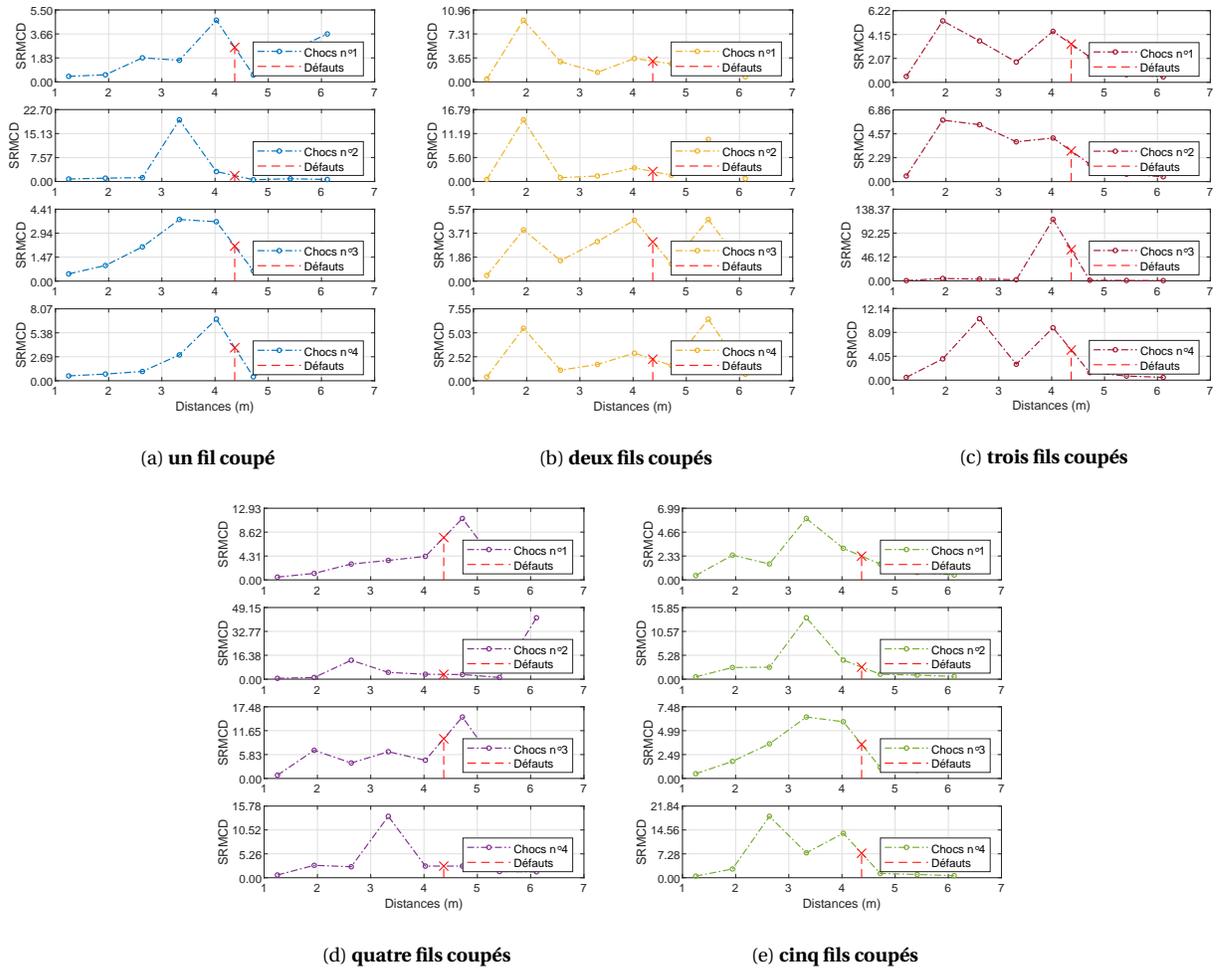


FIGURE 2.35 – Valeurs **SRMCD** pour le bi-couches 2 avec cinq niveaux de défauts à partir des courbures modales données par la FDD

## CHAPITRE 3

# ANALYSE ÉMISSION ACOUSTIQUE

*« Il peut également y avoir une possibilité de découvrir les mouvements et actions internes des corps par le son qu'ils produisent. »*

Robert Hooke

### Sommaire

3.1	Introduction . . . . .	96
3.2	Choix des paramètres d'essais à travers l'instrumentation du T15.7 . . . . .	96
3.2.1	Présentation de l'essai . . . . .	96
3.2.2	Étude quantitative des données . . . . .	98
3.2.2.1	Influence du type de capteur . . . . .	98
3.2.2.2	Influence de la position des capteurs . . . . .	99
3.2.2.3	Influence de la fréquence et de l'amplitude d'excitation . . . . .	100
3.2.3	Conclusion . . . . .	100
3.3	Dispositif expérimental et sources d'EA sur câble bi-couches . . . . .	101
3.4	Analyse de l'EA du câble sain . . . . .	102
3.4.1	Analyse quantitative . . . . .	102
3.4.2	Corrélation des paramètres d'EA . . . . .	105
3.4.3	Séparation des sources à travers la distribution des paramètres . . . . .	107
3.4.4	Séparation des sources à travers les outils de Machine Learning . . . . .	112
3.4.4.1	L'analyse en composantes principales (ACP) : . . . . .	113
3.4.4.2	Choix du nombre de clusters $k$ : . . . . .	115
3.4.4.3	Clustering avec l'algorithme GMM : . . . . .	116
3.4.4.4	Clustering avec l'algorithme K-Means : . . . . .	122
3.5	Analyse de l'EA du câble avec ruptures de fils en partie courante . . . . .	124
3.5.1	Présentation des essais . . . . .	124
3.5.2	Analyse paramétrique . . . . .	125
3.5.3	Séparation des sources d'EA sur câbles avec fils coupés par Machine Learning . . . . .	126

3.5.3.1	L'ACP : . . . . .	126
3.5.3.2	Choix du nombre de clusters $k$ : . . . . .	128
3.5.3.3	Clustering avec l'algorithme GMM : . . . . .	128
3.6	Caractérisation de défauts dans l'ancrage . . . . .	<b>131</b>
3.7	Conclusion sur l'analyse par émission acoustique . . . . .	<b>134</b>
3.8	Annexe de l'analyse EA . . . . .	<b>136</b>

---

## 3.1 Introduction

Cette partie aborde l'analyse des données d'émission acoustique (EA) acquises lors des essais réalisés sur différents types de câbles : monotoron T15.7 et câbles bi-couches. Ces câbles sont les mêmes que ceux présentés lors de l'analyse dynamique avec une instrumentation spécifique à l'émission acoustique. Ainsi après avoir présenté les matériels et configurations choisis pour l'acquisition des données d'EA, nous aborderons la problématique de la caractérisation de défauts dans les bi-couches à travers l'analyse des signaux obtenus. Cette analyse aura pour objectif de distinguer les différentes sources d'EA présentes dans les données recueillies et de caractériser des défauts situés en partie courante et dans les ancrages.

## 3.2 Choix des paramètres d'essais à travers l'instrumentation du T15.7

### 3.2.1 Présentation de l'essai

En utilisant le monotoron T15.7 (câble à six hélicoïdaux et un fil central présenté dans la partie dynamique) présentant trois ruptures de fils monté sur le banc de sollicitation mécanique, une instrumentation acoustique y a été déployée. L'objet de cette campagne d'essais a été de tester plusieurs configurations afin de connaître la détectabilité d'émission acoustique sur le monotoron et quels paramètres sont les plus à même de favoriser cette détection. Ces essais sont réalisés en utilisant une chaîne DISP à huit voies de mesure munie du logiciel AEWin commercialisé par Physical Acoustics. Pour le couplage des capteurs au câble, une colle X60 fournie par HBM est utilisée. Avant le couplage capteur-câble, le capteur a été muni d'une plaque en laiton collée sur la céramique du capteur avec une colle cyanolite (figure 3.1). Pour s'assurer



FIGURE 3.1 – Mode opératoire du collage d'un capteur d'EA [14]

du bon fonctionnement des capteurs ainsi collés sur le câble, des tests de «cassés de mine», dits tests Hsu Nielsen, sont réalisés. Les excitations du câble sont faites à l'aide de l'excentrique du banc de sollicitation en appliquant des sollicitations de type harmoniques avec différents couples amplitude-fréquence.

Ainsi lors de ces essais plusieurs paramètres ont été évalués : le type de capteur utilisé, la distance capteur-défaut, le seuil de détection d'EA, les couples amplitude-fréquence d'excitation et les paramètres temporels PDT (*Peak Definition Time*), HDT (*Hit Definition Time*) et HLT (*Hit Lockout Time*).

• **Le type de capteur :**

Lors des essais deux types de capteurs d’EA piézoélectriques ont été testés. Les caractéristiques de ces capteurs sont données dans le tableau 3.1. Pour chacun des types de capteurs testés, deux exemplaires sont utilisés en variant leur positionnement par rapport au défaut.

Capteurs	Fréquence de résonance (kHz)	Bande passante (kHz)	Diamètre (mm)	Hauteur (mm)
R15	150	50 - 200	18	17
AE204A	375	170 - 700	8	18

TABLEAU 3.1 – Capteurs d’EA utilisés

• **La distance capteur-rupture :**

Pour le positionnement des capteurs autour des ruptures de fils sur le T15.7, trois configurations sont envisagées :

- 1 Les deux capteurs (C1 et C2 de même type) sont placés chacun à 25 cm du défaut caractérisé par deux fils rompus en partie centrale du T15.7 (figure 3.2).

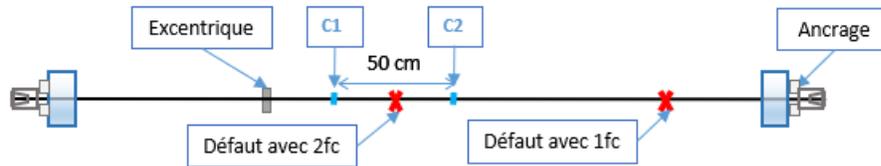


FIGURE 3.2 – Configuration 1 des capteurs sur T15.7

- 2 Les deux capteurs sont placés chacun à 75 cm du défaut caractérisé par deux fils rompus en partie centrale (figure 3.3). Ici l’excentrique se trouve dans la zone encadrée par les deux capteurs. Cet excentrique émet beaucoup de bruit lors des essais, bruit dont il faut tenir compte lors de l’analyse des données d’EA. C’est en partie pour limiter l’effet du bruit de l’excentrique que la configuration 3 suivante a été adoptée, configuration où les capteurs ont été placés près du défaut avec un fil rompu qui est plus éloigné de l’excentrique.

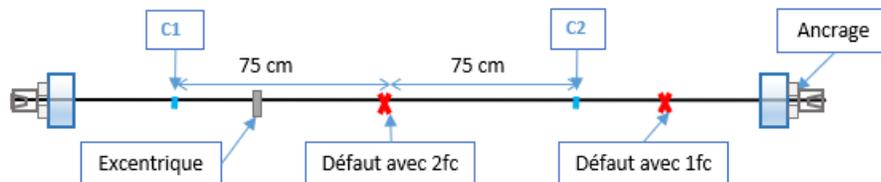


FIGURE 3.3 – Configuration 2 des capteurs sur T15.7

- 3 Les deux capteurs sont placés chacun à 25 cm du défaut caractérisé par un fil rompu situé près de l'ancrage (figure 3.4). Ici nous ne pouvions aller plus loin (en termes de distance capteur-rupture), étant limité par l'ancrage.

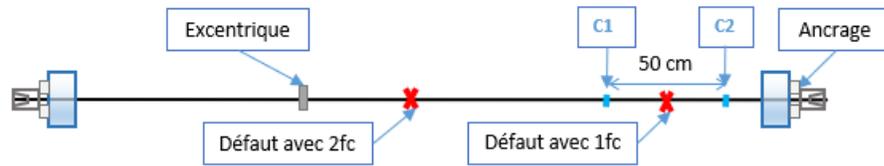


FIGURE 3.4 – Configuration 3 des capteurs sur T15.7

• **Le seuil de détection d'EA :**

Ce seuil définit la valeur d'amplitude au-dessous de laquelle aucun signal d'EA n'est enregistré. En ayant fixé initialement ce seuil à 40 dB, peu d'EA a été enregistrée. Pour cette présente campagne d'essais, le seuil a d'abord été baissé à 35 dB, puis à 31 dB. Avec le seuil de 35 dB, il a été constaté que très peu d'EA est également enregistré. En baissant le seuil à 30 dB, de l'EA (bruit environnant) est enregistré sans même exciter le monotoron. Cette activité acoustique n'est plus enregistrée en augmentant le seuil à 31 dB. Ainsi pour les essais suivants, le seuil a été fixé à 31 dB.

• **Les amplitudes d'excitation :**

En utilisant l'excentrique, les amplitudes de déviation suivantes sont testées : 10 mm, 15 mm, 20 mm et 25 mm.

• **Les fréquences d'excitation :**

Chacune des amplitudes données ci-dessus est combinée à une fréquence d'excitation. Les différentes fréquences d'excitations testées pour ces essais sont 2 Hz, 3 Hz, 4 Hz, 5 Hz et 6 Hz.

• **Les paramètres temporels PDT, HDT et HLT :**

Les valeurs auxquelles ces paramètres sont fixés dépendent du matériau composant la structure testée. Le PDT permet de déterminer le nombre d'alternances maximal d'une salve. Le HDT permet de déterminer la fin d'une salve. Quant au HLT, il correspond à un temps d'arrêt de l'acquisition permettant d'inhiber les échos secondaires [14, 162]. Ils sont ainsi fixés respectivement à 300  $\mu$ s, 600  $\mu$ s et 1000  $\mu$ s, les valeurs recommandées pour des structures métalliques.

## 3.2.2 Étude quantitative des données

### 3.2.2.1 Influence du type de capteur

Pour la simplification de l'écriture, les nomenclatures suivantes sont adoptées :

- Les essais où les capteurs sont situés à 25 cm de part et d'autre du défaut à 2 fils coupés (figure 3.2) sont référencés par : 25cm2Fc

- Les essais où les capteurs sont situés à 75 cm de part et d'autre du défaut à 2 fils coupés (figure 3.3) sont référencés par : 75cm2Fc
- Les essais où les capteurs sont situés à 25 cm de part et d'autre du défaut à 1 fil coupé (figure 3.4) sont référencés par : 25cm1Fc

Pour chacune de ces configurations, les résultats en termes de nombre d'événements par type de capteur sont donnés sur les figures 3.5. Sur la figure 3.5d, nous pouvons constater que le plus

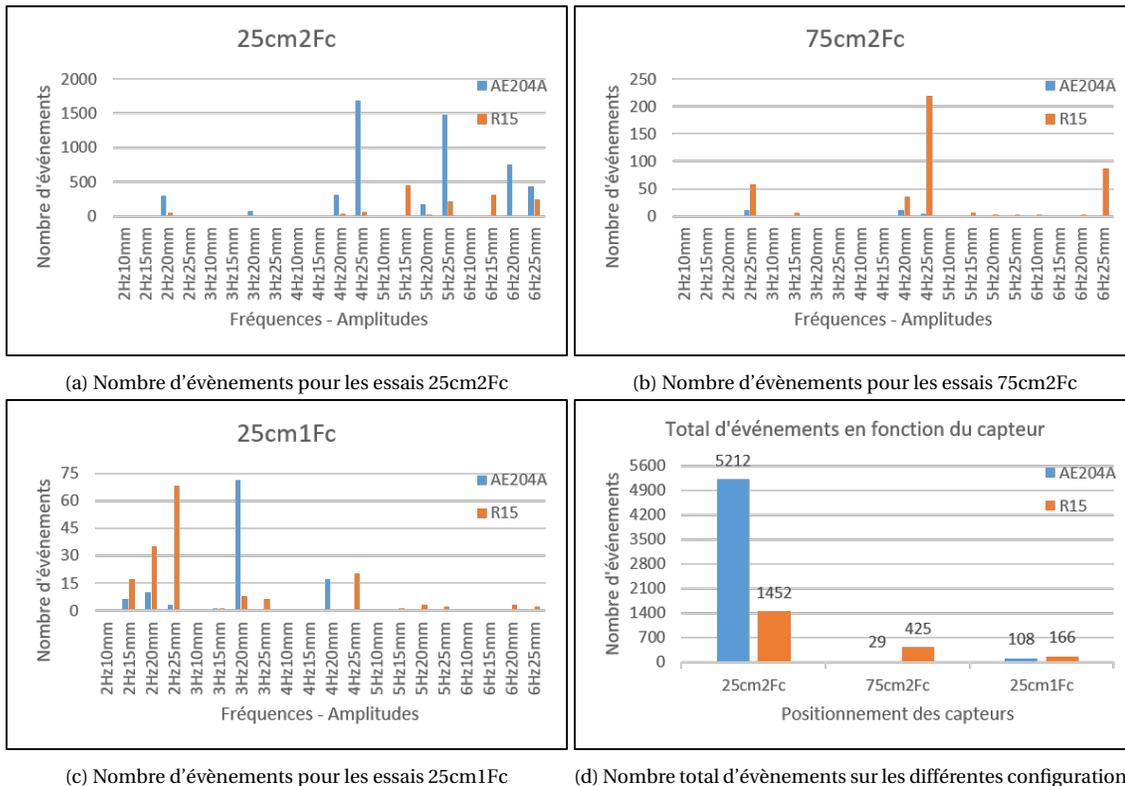


FIGURE 3.5 – Nombre d'événements EA selon les différentes configurations des capteurs

grand nombre d'évènements acoustiques a été enregistré avec le capteur de type AE204A pour les essais 25cm2Fc. La figure 3.5a montre que ce grand nombre d'évènements acoustiques a été enregistrés pour les essais 4Hz25mm (4 Hz de fréquence et 25 mm d'amplitude d'excitation), 5Hz25mm et 6Hz20mm.

Pour les essais 75cm2Fc (figure 3.5b ) et 25cm1Fc (figure 3.5c), le capteur R15 donne un plus grand nombre d'évènements acoustiques, 425 contre 29 et 166 contre 108 respectivement. Sur la base de ces observations, nous pouvons conclure que ces deux types de capteurs permettent d'enregistrer de l'EA sur le monotoron T15.7 même si la nature (ou l'origine) et la pertinence de cette EA ne sont pas connues.

### 3.2.2.2 Influence de la position des capteurs

Pour ce point, la logique voudrait que si l'EA est due aux défauts dans le câble, plus les capteurs sont proches de la source (du défaut), plus le nombre d'évènements acoustiques enregistré

est important, si du fait de l'atténuation des signaux, ces derniers n'atteignent pas les capteurs les plus éloignés. De même, un défaut plus sévère (plus de fils rompus) devrait engendrer plus d'EA.

En analysant la figure 3.5d ci-dessus, cette logique est respectée. En effet aussi bien pour le capteur R15 que pour le capteur AE204A, pour deux fils coupés, nous constatons que plus d'EA est enregistré lorsque les capteurs sont placés à 25 cm du défaut que lorsqu'ils sont à 75 cm. Et lorsque les capteurs sont à distance égale des deux défauts (25cm2Fc et 25cm1FC), l'EA enregistrée près du défaut avec deux fils coupés est plus importante.

### 3.2.2.3 Influence de la fréquence et de l'amplitude d'excitation

En analysant le nombre d'événements en fonction de l'amplitude et de la fréquence d'excitation (figures 3.6), nous pouvons constater que plus d'événements acoustiques sont enregistrés pour les amplitudes d'excitation supérieures à 10 mm. Pour ces amplitudes d'excitation (15 mm, 20 mm et 25 mm), des signaux sont détectés à partir de 2Hz de fréquence mais les fréquences les plus élevées (4Hz, 5Hz et 6 Hz) engendrent plus de données. Étant donné que les fréquences de 2 Hz à 4 Hz permettent déjà d'obtenir des signaux acoustiques et que des fréquences supérieures risquent d'être difficiles à appliquer pour un ouvrage réel, les essais qui seront réalisés ultérieurement le seront avec des fréquences variant de 2 Hz à 4 Hz.

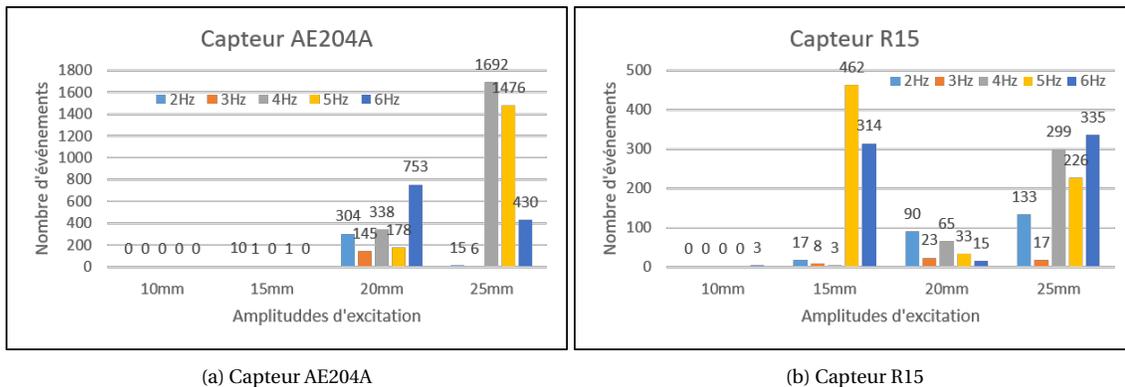


FIGURE 3.6 – Nombre d'évènements en fonction de l'amplitude et de la fréquence d'excitation pour les capteurs AE204A et R15

### 3.2.3 Conclusion

En résumé de cette analyse quantitative, en mettant de côté l'incertitude sur la nature réelle de l'EA, nous pouvons dire que les deux types de capteurs utilisés sont capables de détecter l'EA générée pour cette configuration et ce type de câble. En outre à partir de 15 mm d'amplitude d'excitation et de 2Hz de fréquence, assez d'activité acoustique est enregistrée pour pouvoir effectuer une analyse statistique. Cette émission est observable jusqu'à la distance capteur-défaut de 75 mm (avec 2 fils rompus).

Ainsi les capteurs AE204A sont choisis pour la réalisation des essais sur les câbles bi-couches. Le seuil de détection, de 31 dB lors des essais précédents, sera fixé à 32 dB, 2 dB au-dessus du bruit de fond. Les paramètres PDT, HDT et HLT sont respectivement fixés à 300  $\mu$ s, 600  $\mu$ s et 1000  $\mu$ s. Quant aux fréquences d'excitation, elles sont fixées à 2Hz, 3Hz et 4Hz. En ce qui concerne les amplitudes d'excitation, faisant des essais sur un câble bi-couches où l'activité acoustique est a priori plus importante comparée à un monoton pour les mêmes excitations, elles vont varier de 5 mm à 20 mm avec un pas de 5 mm.

### 3.3 Dispositif expérimental et sources d'EA sur câble bi-couches

Pour la caractérisation de défauts de ruptures de fils en partie courante d'un câble, le bi-couches 1 présenté dans la partie analyse dynamique est considéré. Les essais d'émission acoustique ont été faits en premier lieu sur le câble sans défaut. Ensuite après chaque fil coupé en partie courante, jusqu'à cinq fils coupés, les mêmes essais que sur le câble sain sont répétés. La même chaîne d'acquisition que pour les essais EA sur T15.7 a été utilisée. Pour chaque couple fréquence-amplitude d'excitation, les données sont enregistrées pendant 10 minutes pour pouvoir récupérer une activité acoustique importante avec laquelle une analyse statistique peut être menée. Comme signalé plus haut, les capteurs utilisés sont de type AE204A. La position des capteurs d'émission est donnée sur la figure 3.7.

Cette disposition des capteurs aidera ainsi à la séparation des sources susceptibles de générer

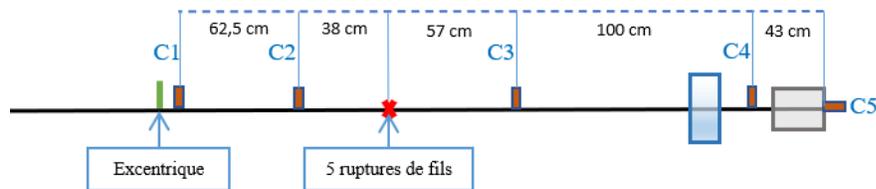


FIGURE 3.7 – Positionnement des capteurs sur le bi-couches 1

de l'EA lors des essais. En effet les signaux d'EA pouvant être attribués au bruit de l'excentrique seront en majorité détectés par le capteur C1 placé à 10 cm de la liaison câble-excentrique. Quant aux signaux d'EA dus aux craquements de la résine de l'ancrage du fait de l'excitation, ils seront en majorité enregistrés par les capteurs C5 et C4 positionnés respectivement à l'extérieur de l'ancrage sur la résine et à 20 cm de la sortie d'ancrage. En présence de ruptures de fils, nous pouvons nous attendre à ce que les signaux dus aux frottements de fils coupés sur des fils sains soient principalement enregistrés par les capteurs C2 et C3 positionnés respectivement à 38 cm et à 57 cm de part et d'autre de la zone de ruptures.

Ainsi les différentes sources d'EA susceptibles d'être observées durant un essai sont : le frottement interfilaire qui peut se scinder en frottements entre fils sains et frottements entre fils sains et fils coupés, les craquements de la résine, le bruit de l'excentrique et éventuellement des événements parasites. L'objectif de l'analyse d'EA est par conséquent de séparer ces diverses

sources, les caractériser et suivre leur évolution avec le niveau d'endommagement (le nombre de fils coupés).

## 3.4 Analyse de l'EA du câble sain

L'objectif de l'analyse des données recueillies sur le câble sans fils coupés est d'arriver à caractériser la signature des signaux acoustiques dus aux frottements entre fils sains. Cette caractérisation passe nécessairement par la séparation de cette source d'EA avec les autres sources en jeu que sont les craquements de la résine, le bruit de l'excentrique et les éventuels signaux parasites. Une fois ceci fait, nous pourrions suivre l'évolution des frottements interfilaires avec le nombre de fils coupés.

L'analyse des données a été effectuée avec l'application *JupyterLab* en utilisant le langage de programmation *Python*. Ce sont des outils *open source* et sont très utilisés pour l'analyse de données (*data science*).

### 3.4.1 Analyse quantitative

Avec les essais réalisés sur le câble bi-couches 1 sain (sans aucun fil rompu), le nombre de signaux d'EA obtenus sur chaque capteur et pour tous les couples fréquence-amplitude est présenté sur la figure 3.8. À noter que pour l'essai 4Hz20mm, la totalité des signaux n'a pas pu être récupérée du fait de la saturation du DISP (la chaîne d'acquisition). Ceci explique le fait que moins d'EA est obtenue pour 4Hz20mm par rapport 4Hz15mm. Sur cette figure 3.8, nous pouvons voir que le nombre de signaux enregistrés varient en fonction de la fréquence et de l'amplitude d'excitation. Cependant cette variation est plus marquée en fonction de l'amplitude d'excitation. En effet pour une amplitude d'excitation de 5 mm, nous constatons que le capteur 1 situé près de l'excentrique enregistre 93.78 %, 99.81 % et 99.79 % des signaux pour respectivement les essais 2Hz5mm, 3Hz5mm et 4Hz5mm. Cette même observation peut être faite avec une amplitude d'excitation de 10 mm sauf pour l'essai 4Hz10mm où le capteur C2 enregistre quelques signaux, 244 signaux soit 5.32 % du total. Ainsi nous pouvons dire que ces signaux enregistrés sur les capteurs C1 et C2 pour les essais sur câble sain avec des amplitudes de 5 mm et 10 mm sont dus à l'excentrique. De même nous en déduisons que l'EA due à l'excentrique n'est pas enregistrée à partir du capteur C3 situé à 167.5 cm de l'excentrique.

Cependant à partir 15 mm d'amplitude d'excitation, tous les capteurs enregistrent un nombre significatif d'émission acoustique. Les capteurs C2, C3, C4 et C5 qui n'ont pas ou presque pas enregistré d'EA pour les amplitudes 5 mm et 10 mm reçoivent un nombre important de signaux. Cette augmentation brusque du nombre de signaux montre que l'amplitude d'excitation de 15 mm constitue le seuil du début de glissement avec frottements entre fils sains **pour ce câble sain**.

En outre à partir de 15 mm d'amplitude d'excitation, le capteur C4 positionné à 20 cm de la sortie d'ancrage enregistre le plus d'EA après le capteur C1 placé à côté de l'excentrique. Ceci s'ex-

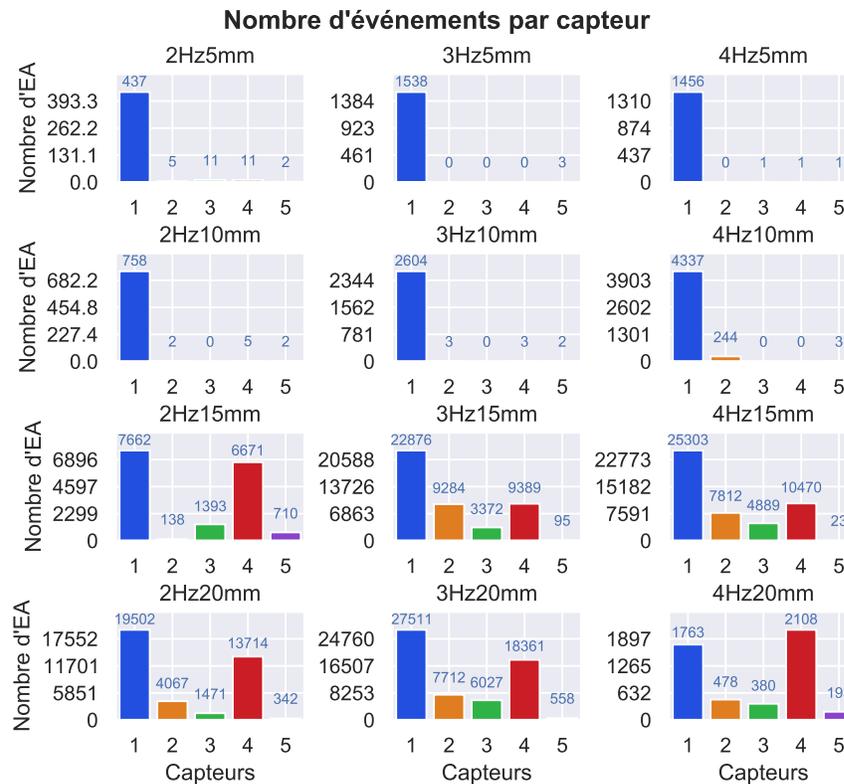


FIGURE 3.8 – Nombre de signaux d’EA enregistrés sur le bi-couches 1 sain. Chaque ligne de cette figure correspond à une amplitude fixe et chaque colonne correspond à une fréquence fixe.

plique par les frottements des fils sains qui sont plus importants à cet endroit. En effet, près des ancrages, le câble étant encastré, nous avons les flexions maximales. Il a été montré dans la littérature [87] que les frottements interfilaires sont maximaux à ces endroits de flexion maximale. À partir de 15 mm d’amplitude d’excitation, le capteur C5, positionné à l’extérieur de l’ancrage sur la résine, enregistre également un nombre important de signaux d’EA. Cette activité acoustique témoignant ainsi des craquements de la résine apparaissant à partir de cette amplitude d’excitation. Pour une force d’excitation donnée, cette activité acoustique notée sur le capteur C5 a la particularité de diminuer avec le temps d’essais. Ceci est notable avec les essais à 15 mm d’amplitude d’excitation (voir figure 3.9). Après avoir initié ces signaux avec 2Hz15mm, un plateau est atteint vers la fin de cet essai. Du fait de l’augmentation de la fréquence à 3Hz, l’activité acoustique reprend pour l’essai 3Hz15mm mais un plateau est atteint dès la quatrième minute d’essai.

Avec une amplitude de 20 mm, du fait d’une force plus importante, une reprise de l’activité acoustique sur le capteur C5 est notée. Pour cette amplitude d’excitation, l’activité acoustique ne diminue pas même si elle reste faible comparée aux nombre de signaux notés sur le capteur C4 par exemple. Cependant en analysant l’activité acoustique observée sur ce capteur C5 avec les essais suivants, nous avons remarqué que même à 20 mm d’amplitude, elle n’est que très faiblement enregistrée et finit par disparaître au bout des essais sur le câble avec cinq ruptures

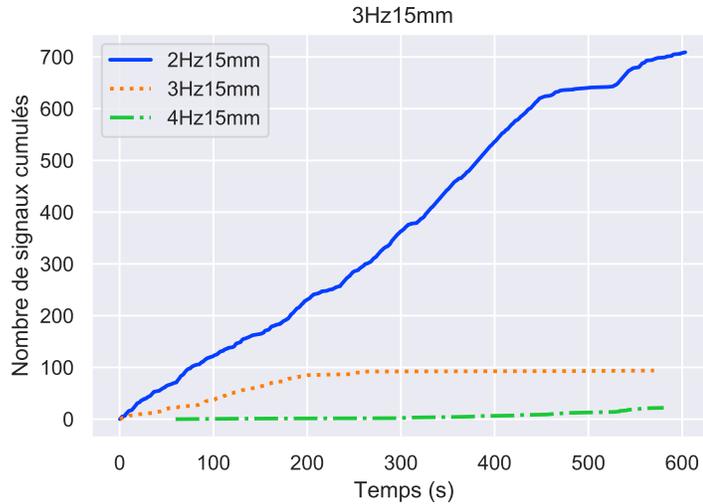


FIGURE 3.9 – Nombre de signaux cumulés sur la capteur C5

de fils. Cette activité acoustique obéit ainsi à l'effet Kaiser [98]. Cet effet Kaiser veut dire qu'un matériau soumis à une charge quelconque émet des signaux acoustiques lorsqu'il entre dans son domaine plastique et pour un second chargement, de l'EA apparaît uniquement lorsque la force appliquée est supérieure ou égale à la force maximale précédemment atteinte (voir figure 3.10). Cette analyse montre ainsi que l'activité acoustique enregistrée sur le capteur C5 est due

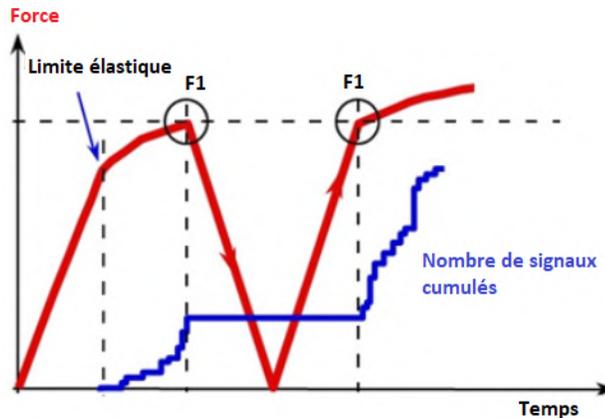


FIGURE 3.10 – L'effet Kaiser [84]

aux craquements de la résine.

Après cette analyse quantitative, nous allons effectuer l'analyse paramétrique. Par analyse paramétrique nous entendons à la fois l'analyse temporelle, de corrélation et par densité de distribution des différents paramètres. Ainsi nous allons voir comment les paramètres de l'émission acoustique enregistrée pour les essais sur le câble bi-couches 1 sain évoluent dans le temps et leurs corrélations. Cette analyse permettra de voir potentiellement les différents clusters présents dans les données et de connaître leurs caractéristiques en termes de valeurs prises par les différents paramètres pour chaque groupe (cluster) de données. Avec l'analyse quantitative

effectuée ci-dessus, il a été constaté qu'à partir de 2 Hz de fréquence et de 15 mm d'amplitude d'excitation, toutes les sources susceptibles d'engendrer de l'EA sont notées. Ainsi l'EA enregistrée lors de chacun de ces essais est assez représentative des signaux engendrés par les différentes sources. De ce fait, pour cette analyse paramétrique, les données obtenues lors de l'essai 2Hz15mm sont considérées.

### 3.4.2 Corrélation des paramètres d'EA

Cette analyse permettra de connaître le degré de corrélation entre les différents paramètres. Ce degré de corrélation entre les paramètres est calculé par la méthode dite de Pearson. Cette méthode calcule les coefficients de corrélations entre deux variables X, Y ( $\rho_{X,Y}$ ) en divisant leur covariance ( $cov(X, Y)$ ) par le produit de leurs écart-types ( $\sigma_X$  et  $\sigma_Y$ ) :

$$\rho_{X,Y} = \frac{cov(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (3.1)$$

Ces coefficients varient de -1 à +1. Les valeurs positives indiquent une corrélation positive entre les deux variables, c'est-à-dire quand une variable augmente l'autre augmente et pareillement quand l'une diminue l'autre diminue. Une corrélation négative signifie que quand l'une augmente l'autre diminue ou vice-versa. Les valeurs proches de +1 ou de -1 indiquent une forte corrélation ( $|\rho_{X,Y}| \geq 0.80$ ) entre deux paramètres et que l'un peut s'exprimer en fonction de l'autre. Ainsi pour éviter une redondance de l'information et diminuer la dimension des données, nous pouvons retenir un des deux paramètres à forte corrélation.

Les différents paramètres des signaux d'EA ainsi que leurs unités sont données dans le tableau 3.2. Pour simplifier l'écriture et la manipulation des paramètres qui seront choisis lors de l'analyse des données, pour chaque paramètre EA un alias (ou nom diminutif) est donné.

<b>Paramètres</b>	Rise	Count	Energy	Duration	Amplitude	A-Frequency	PCNTS
<b>Alias</b>	Rise	Coun	Ener	Dura	Amp	AFrq	PCNT
<b>Unités</b>	µs	count	µV-s/count	µs	dB	kHz	count

<b>Paramètres</b>	R-Frequency	I-Frequency	S-Strength	A-Energy	C-Frequency	P-Frequency
<b>Alias</b>	RFrq	IFrq	SigS	AbsE	CFrq	PFrq
<b>Unités</b>	kHz	kHz	picovolt-s	Joules	kHz	kHz

TABLEAU 3.2 – Paramètres d'EA et les noms simplifiés utilisés avec leurs unités. Les alias correspondent aux noms simplifiés des paramètres pour faciliter leur manipulation lors du traitement des données

En calculant les coefficients de corrélation pour ces différents paramètres, la matrice de corrélation obtenue est donnée sur la figure 3.11. Cette matrice indique la corrélation des paramètres deux à deux. D'après cette matrice de corrélation des paramètres, nous voyons que certains paramètres ont une corrélation très élevée (supérieure ou égale à 0.80). Ainsi nous notons que l'intensité du signal (*SigS*) a un coefficient de corrélation très élevé avec le nombre de coups

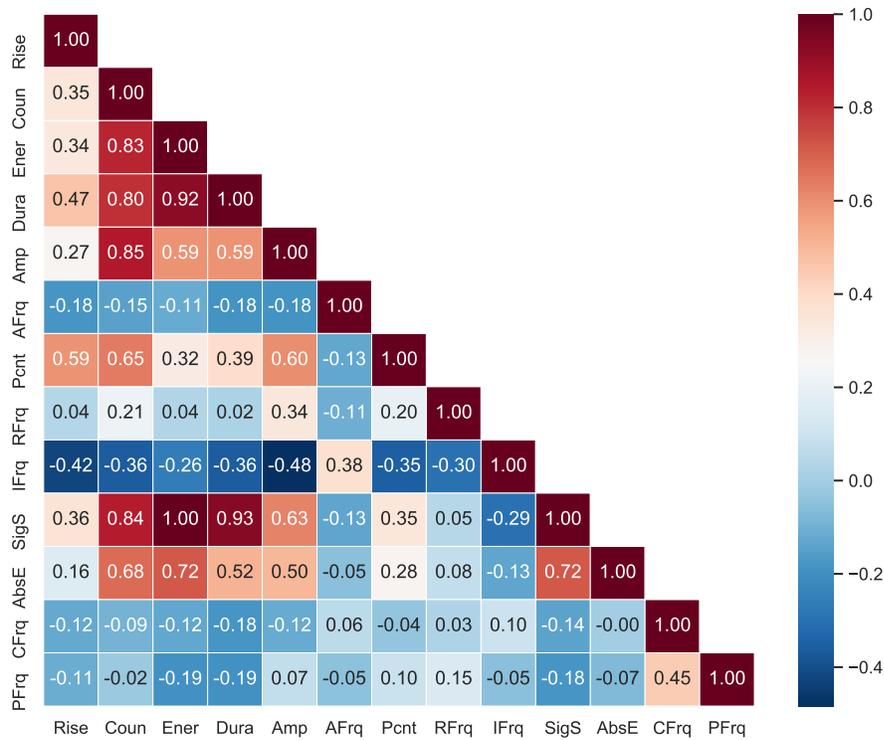


FIGURE 3.11 – Coefficients de corrélation des paramètres d’EA pour le bi-couches 1 sain

(*Coun*), l’énergie (*Ener*) et la durée (*Dura*) soit des coefficients valant respectivement 0.84, 1.00 et 0.93. Nous pouvons voir également que ces trois derniers paramètres (*Coun*, *Ener* et *Dura*) sont très corrélés entre eux; 0.92 entre les paramètres *Dura* et *Ener*, 0.83 entre *Ener* et *Coun* et 0.80 entre *Dura* et *Coun*. Ainsi le paramètre *SigS* peut être utilisé à la place des paramètres *Coun*, *Dura* et *Ener*. L’amplitude (*Amp*) des signaux a également une corrélation supérieure à 0.80 avec le nombre de coups. Et comme ce dernier est déjà substitué par le *SigS*, nous allons garder l’amplitude.

Avec cette approche, sur les treize paramètres donnés dans le tableau 3.2, dix peuvent ainsi être gardés pour faire l’analyse paramétrique des données d’EA. Cependant l’analyse paramétrique est une opération se faisant en analysant la distribution des paramètres un à un ou combinés deux à deux. Et analyser par exemple les diagrammes de distribution des dix paramètres retenus combinés deux à deux, ce qui ferait 45 diagrammes ( $C_{10}^2 = \frac{10!}{2! \times (10-2)!} = 45$ ), est long et risque d’être «indigeste». Un exemple de diagrammes de distribution de ces dix paramètres combinés deux à deux sous forme matricielle pour les données recueillies au niveau du capteur C1 de l’essai 2Hz15mm est donné en annexe 3.8 de ce chapitre sur la figure 3.44. Ainsi en se basant sur ces dix paramètres et sur les études menées dans la littérature [87], les quatre paramètres suivants sont retenus : l’amplitude (*Amp*), le temps de montée (*Rise*), la fréquence de pic (*PFrq*) et la fréquence centroïde (*CFrq*), ce qui fait deux paramètres temporels choisis (*Amp* et *Rise*) et deux paramètres fréquentiels.

### 3.4.3 Séparation des sources à travers la distribution des paramètres

Les diagrammes de distribution de ces quatre paramètres combinés deux à deux pour les données recueillies au niveau de chaque capteur sont ainsi analysés. Les diagrammes de distribution sont donnés sous forme matricielle et sur la diagonale, nous avons la densité de distribution de chacun de ces quatre paramètres.

- Le capteur C1 :** En ce qui concerne les données obtenues sur le capteur C1 de cet essai 2Hz15mm, en considérant les diagrammes de distribution des paramètres *Amp*, *Rise* et *CFrq* en fonction du paramètre *PFRq* (voir figure 3.12, légende C1\_2Hz15mm), deux clusters principaux sont notés : un premier cluster avec des valeurs de fréquence de pic comprises entre 0 et 180 kHz et un deuxième cluster avec des valeurs de *PFRq* allant de **300 kHz à 430 kHz**. La densité de distribution du paramètre fréquence de pic (*PFRq*) montre que le premier cluster avec des valeurs *PFRq* inférieures à 180 kHz peut se subdiviser en au moins deux sous-clusters : celui dont les valeurs de fréquence de pic (*PFRq*) sont comprises entre **0 et 110 kHz** et celui avec des valeurs de *PFRq* comprises entre **110 kHz et 180 kHz**. La comparaison de ces données avec celles obtenues sur le capteur C1 de l'essai 4Hz10mm où seuls les bruits de l'excentrique sont obtenus est effectuée (figure 3.12, légende C1\_4Hz10mm). Cette comparaison montre que plus de 98 % des signaux du capteur C1 de l'essai 4Hz10mm (le bruit de l'excentrique) correspondent au sous-cluster avec des fréquences de pic comprises entre 0 et 110 kHz. Nous pouvons en déduire que ce cluster représente les bruits de l'excentrique. Quant au cluster avec des fréquences de pic supérieures à 300 kHz, il ne correspond à aucun des signaux enregistrés sur le capteur C1 de l'essai 4Hz10mm. En regardant les diagrammes des données recueillies sur les autres capteurs (C2, C3, C4 et C5), nous avons constaté que le cluster avec des fréquences de pic supérieures à 300 kHz n'est noté que sur les capteurs C1 et C2. En outre, en analysant les données obtenues avec les autres essais réalisés sur ce câble sain, nous nous sommes également rendus compte que ce cluster n'est noté que pour cet essai 2Hz15mm. Ainsi nous en concluons que ces signaux peuvent être classés comme un cluster parasite. Le seul cluster restant alors à identifier est celui avec des fréquences de pic comprises entre **110 et 180 kHz**; ce cluster correspondrait de ce fait aux frottements entre fils sains.
- Le capteur C2 :** Pour les données obtenues sur le capteur C2 (figure 3.13, légende C2\_2Hz15mm), nous pouvons aussi distinguer trois clusters surtout avec les diagrammes de distribution des paramètres *Amp*, *Rise* et *CFrq* en fonction de la fréquence de pic (*PFRq*). Comme avec les données obtenues sur le capteur C1 ci-dessus, les clusters en fonction du paramètre *PFRq* se distinguent comme suit : un cluster avec des fréquences de pic compris entre **25 kHz et 45 kHz**, un cluster avec des fréquences de pic (*PFRq*) variant de **130 kHz à 180 kHz** et un troisième cluster avec des valeurs de fréquence de pic allant de **300 kHz à 400 kHz**. Les deux premiers clusters ont des valeurs d'amplitude inférieures à 40 dB alors que les amplitudes du troisième cluster (celui avec des valeurs de *PFRq* supérieures à 300 kHz) sont supérieures à 40 dB. Comme montré avec l'analyse des données

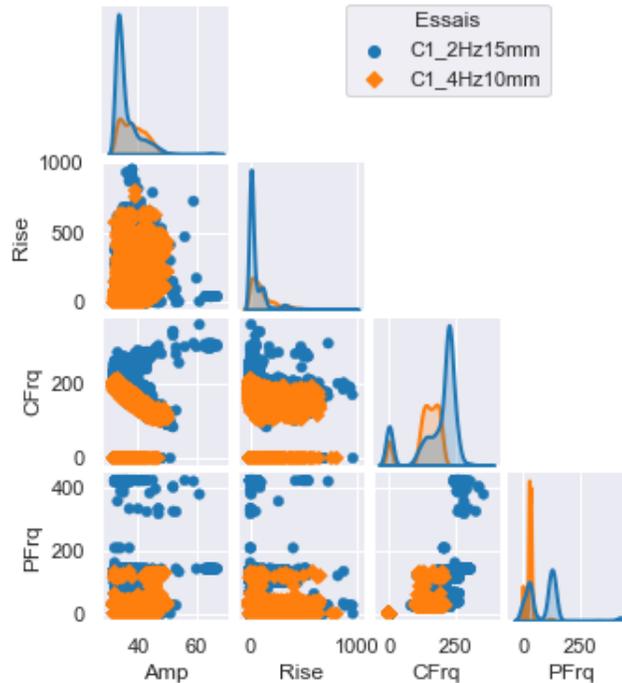


FIGURE 3.12 – Diagrammes de distribution des paramètres Amp, Rise, CFrq et PFrq pour les données du capteur C1 de l'essai 2Hz15mm et comparaison avec les données du capteur C1 de l'essai 4Hz10mm où seuls les signaux de l'excentrique sont notés

recueillies sur le capteur C1, ces signaux avec des fréquences de pic supérieures à 300 kHz constituent un cluster parasite. Sur la figure 3.13 les valeurs obtenues sur le capteur C2 de cet essai 2Hz15mm sont comparées avec celles obtenues sur le capteur C2 de l'essai 4Hz10mm (C2\_4Hz10mm) où seuls les signaux de l'excentrique sont obtenus. Sur cette figure nous pouvons voir que les signaux du cluster avec des valeurs de fréquences de pic comprises entre **25 kHz et 45 kHz** correspondent exactement aux signaux de l'excentrique enregistrés sur le capteur C2 avec l'essai 4Hz10mm. Ainsi nous pouvons en déduire que ce cluster correspond aux signaux de l'excentrique et que le cluster restant (hormis le cluster parasite) avec des valeurs de PFrq comprises entre **130 kHz et 180 kHz** correspond aux frottements entre fils sains.

L'analyse des données des capteurs C1 et C2 montre que le paramètre fréquence de pic paraît comme un moyen efficace pour séparer les signaux provenant de l'excentrique et ceux dûs aux frottements entre fils sains. L'analyse quantitative des données a montré que si les bruits de l'excentrique sont notés sur les capteurs C1 et C2, du fait de l'atténuation des signaux, ils ne le sont pas sur les capteurs restants (C3, C4 et C5). Et sur ces derniers capteurs, les sources possibles d'EA ne sont alors plus que les craquements de résine, les frottements entre fils sains et d'éventuels bruits parasites. Cependant étant donné que le capteur C5 est posé sur la résine, ce capteur ne recevra **principalement** que les craquements de la résine. Ainsi nous allons comparer les fréquences de pic notés sur ce capteur

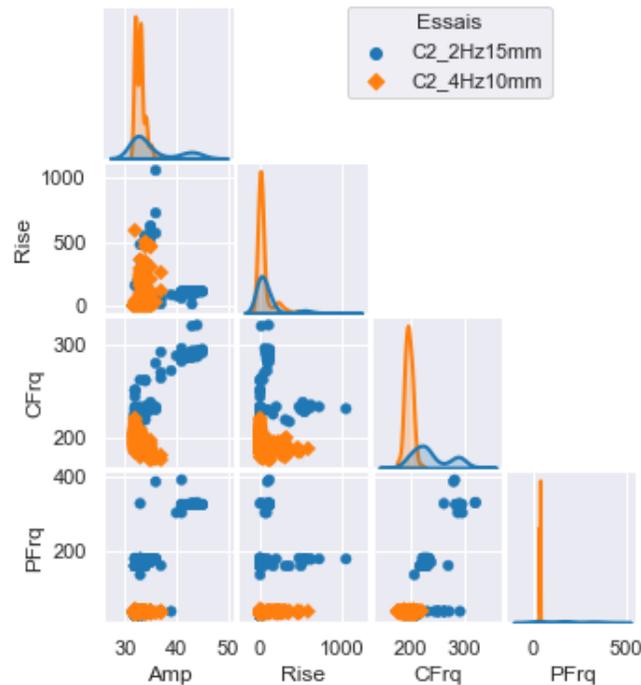
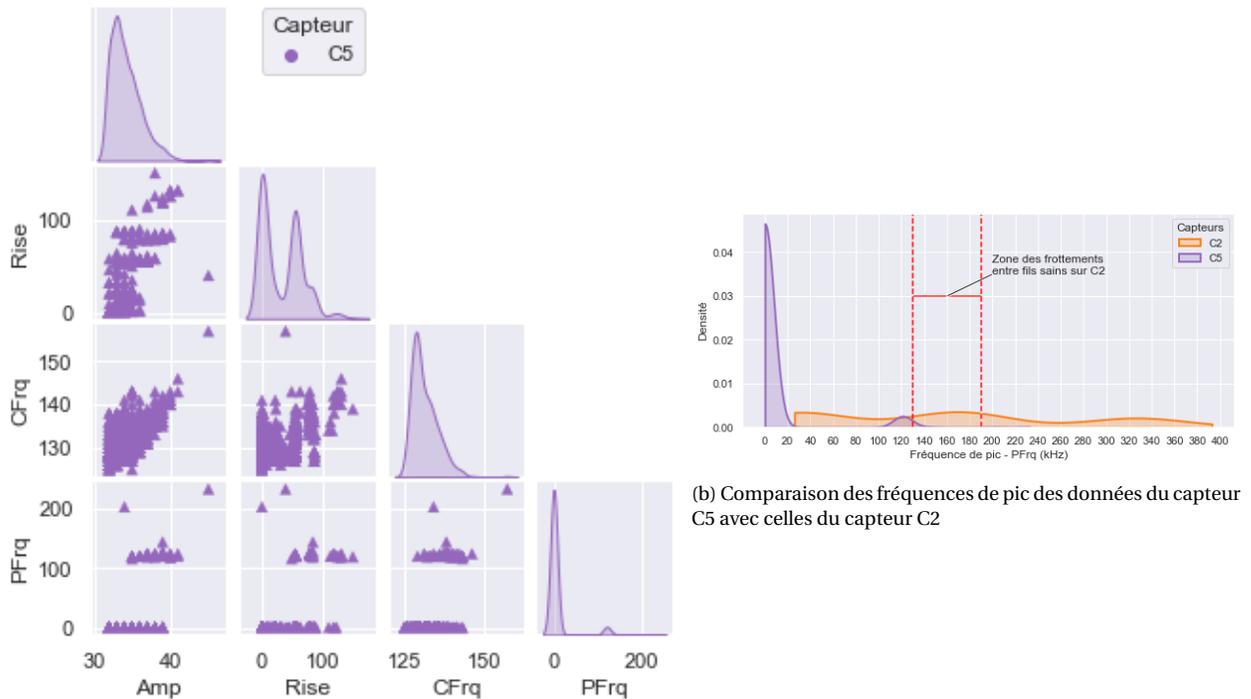


FIGURE 3.13 – Diagrammes de distribution des paramètres Amp, Rise, CFrq et PFrq pour les données du capteur C2 de l'essai 2Hz15mm et comparaison avec les données du capteur C2 de l'essai 4Hz10mm où seuls les signaux de l'excentrique sont notés

C5 et ceux notés sur le capteur C2.

- Le capteur C5 :** Les diagrammes de distribution des paramètres Amp, Rise, CFrq et PFrq des données enregistrées sur le capteur C5 sont donnés sur la figure 3.14a et la comparaison des fréquences de pic notés sur les capteurs C2 et C5 sur la figure 3.14b. L'analyse des diagrammes de distribution de ces quatre paramètres montrent que les données obtenues sur le capteur C5 peuvent être regroupées en deux clusters (en négligeant les deux signaux avec des PFrq supérieurs à 200 kHz), ceci en considérant les paramètres Rise et PFrq. Le cluster dont les signaux ont des fréquences de pic (PFrq) de **0 KHz** représente 94.23 % des données et serait ainsi les craquements de la résine. Le cluster restant représente 5.49 % des données enregistrées sur ce capteur C5 et a des fréquences de pic allant de **100 kHz à 145 kHz**, des fréquences proches de celles obtenues pour les frottements entre fils sains (130 à 180 kHz) notés avec le capteur C2. Il peut donc s'agir des frottements entre fils sains ou des événements extrêmes (les plus énergétiques) engendrés par les craquements de la résine.
- Le capteur C3 :** L'analyse des données obtenues sur le capteur C3 (figure 3.15a) montre aussi que ces signaux peuvent être classés en deux clusters principaux : un cluster dont les valeurs de PFrq sont comprises entre **95 kHz et 100 kHz** et un cluster avec des valeurs de fréquence de pic allant de **140 kHz à 190 kHz** et qui représentent 90.23 % des signaux enregistrés sur ce capteur. La comparaison de ces valeurs de PFrq avec celles notées sur

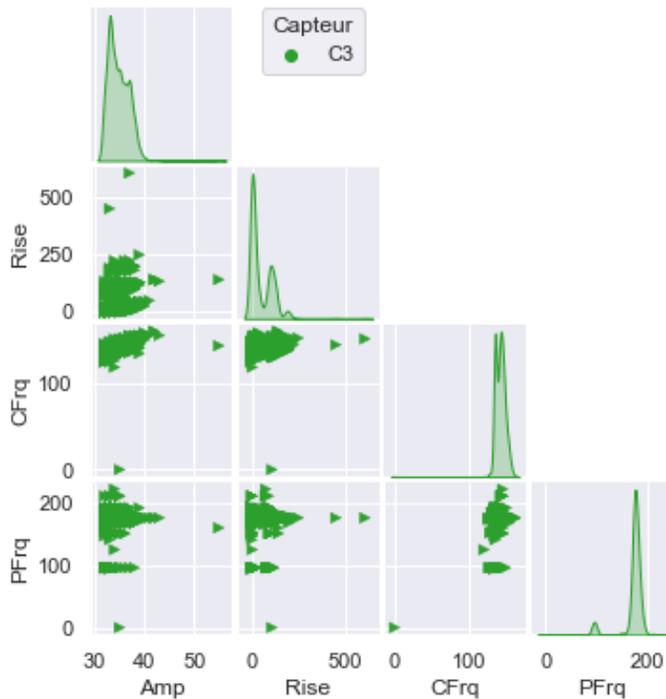


(a) Distribution des paramètres Amp, Rise, CFrq et PFrq pour les données du capteur C5 de l'essai 2Hz15mm

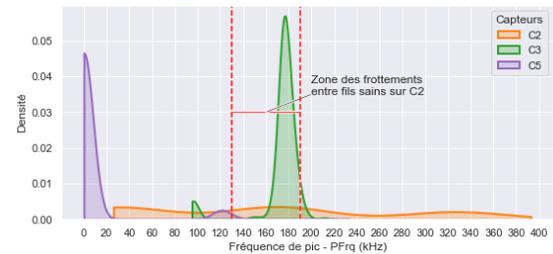
FIGURE 3.14 – Distributions des paramètres Amp, AFrq, IFrq, CFrq et PFrq des données du capteur C5 et comparaison des densités de distribution du paramètre PFrq avec celles du capteur C2

les capteurs C2 et C5 (figure 3.15b) montrent que les signaux de ce dernier cluster (dont  $140 \text{ kHz} < \text{PFrq} < 190 \text{ kHz}$ ) correspondent plus aux signaux attribués aux frottements entre fils sains du capteur C2 ( $130 \text{ kHz} < \text{PFR} < 180 \text{ kHz}$ ) qu'aux signaux notés sur le capteur C5 correspondant en majorité (à plus de 94.23 %) aux craquements de la résine et dont les fréquences de pic sont quasiment égales à 0 kHz. Le deuxième cluster notés sur le capteur C3 a des valeurs de PFrq correspondantes à celles du cluster des données enregistrées sur le capteur C5 et qui sont attribuées soit aux frottements entre fils sains ou aux événements extrêmes (les plus énergétiques) dûs aux craquements de la résine. Pour ce capteur C3, ce cluster a des valeurs de PFrq variant de **90 kHz à 100 kHz**.

- **Le capteur C4 :** L'analyse des données du capteur C4 placé à 20 cm de la sortie d'ancrage montre que les données peuvent être regroupées principalement en trois clusters (figure 3.16a). Comme avec les autres capteurs, le paramètre PFrq est le plus à même de différencier les clusters notés avec les diagrammes de distribution de ce paramètre en fonction des paramètres Amp, Rise et CFrq. Ainsi en fonction du paramètre PFrq représenté en fonction du temps (figure 3.16b), ces clusters se distinguent comme suit :
  - un cluster avec des fréquences de pic quasiment égales à **0 kHz**. Ce cluster représente 26.14 % des données du capteur C4. La comparaison des fréquences de pic de ce cluster avec celles des données notées sur le capteur C5 (figure 3.16c) montre qu'il



(a) Distribution des paramètres Amp, Rise, CFrq et PFrq pour les données du capteur C3 de l'essai 2Hz15mm



(b) Comparaison des fréquences de pic des données du capteur C3 avec celles des capteurs C2 et C5

FIGURE 3.15 – Distributions des paramètres Amp, Rise, CFrq et PFrq des données du capteur C3 et comparaison des densités de distribution du paramètre PFrq avec celles des capteurs C2 et C5

s'agit des craquements de la résine

- un cluster avec des fréquences de pic allant de **90 kHz à 150 kHz** et qui représente 65.87 % des données de ce capteur C4. Vu leur nombre et les valeurs prises par le paramètre PFrq en comparaison de celles du capteur C5, nous pouvons dire que ce cluster correspond aux frottements entre fils sains. En effet, comme noté dans l'analyse quantitative, du fait de la flexion maximale en sortie d'ancrage, les frottements entre fils sains sont plus importants en cet endroit du câble.
- un cluster avec des valeurs de fréquence de pic variant de **170 kHz à 250 kHz** représentant 7.99 % des données du capteur C4. Étant donné que les frottements entre fils sains sont plus importants en cet endroit, il pourrait ainsi en résulter des événements plus énergétiques en cet endroit et qui engendrerait ces émissions acoustiques dont les fréquences de pic sont plus importantes. Ainsi ce cluster correspondrait à des signaux acoustiques dus aux frottements entre fils sains.

À travers cette étude des données reçues sur les différents capteurs, nous avons pu séparer les différentes sources d'EA en se basant notamment sur le paramètre PFrq. Ainsi nous avons constaté que les frottements entre fils sains ont des valeurs de PFrq variant de 130 kHz à 250 kHz. Cependant avec les données enregistrées sur les capteurs C1 et C4 où le nombre de signaux est important, les intervalles de fréquences de pic des EA provenant de l'excentrique et celles

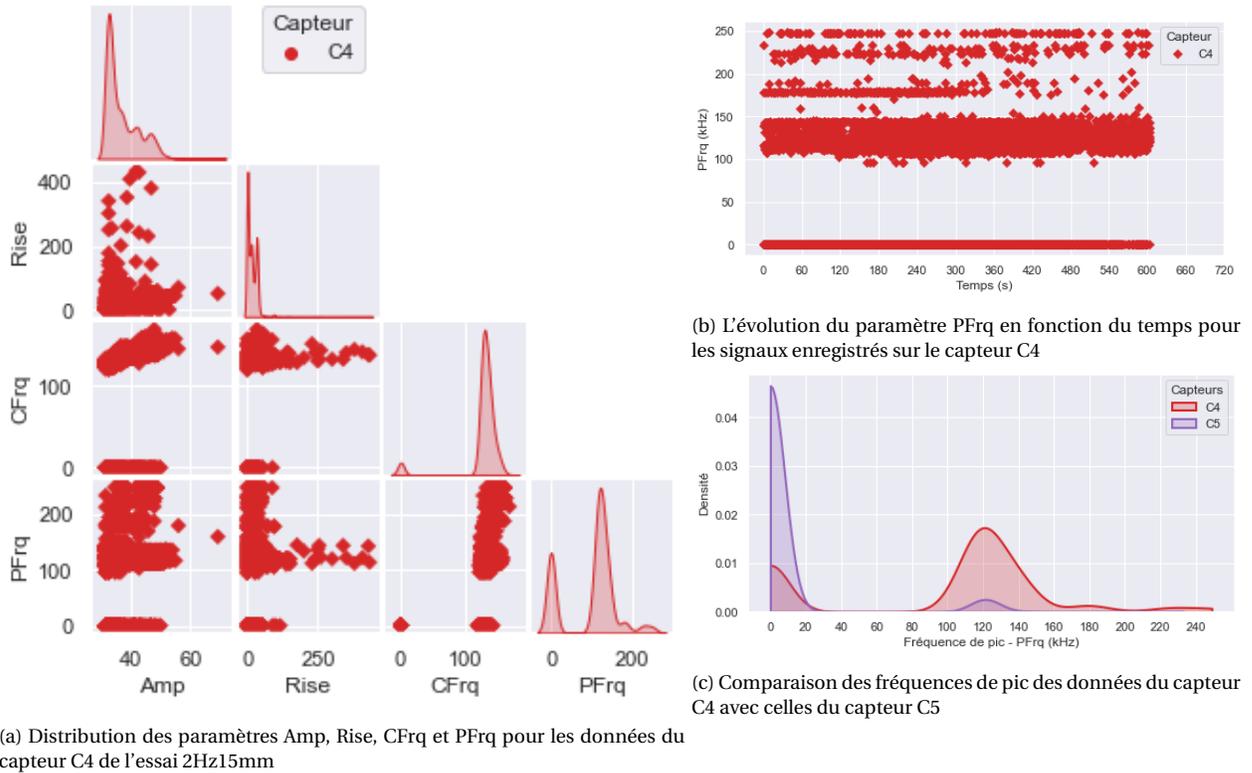


FIGURE 3.16 – Distributions des paramètres Amp, Rise, CFrq et PFrq des données du capteur C4 et comparaison des densités de distribution du paramètre PFrq avec celles des capteurs C2, C3 et C5

provenant des frottements entre fils sains se retrouvent imbriqués. Pour avoir une meilleure séparation de ces signaux, il faudrait alors voir comment évoluent les signaux de ces sources en fonction de différents paramètres en même temps. Une telle démarche s'avère complexe et fastidieuse et nécessitera alors d'utiliser des outils statistiques plus poussés. Pour ce faire une analyse statistique multivariée en utilisant les outils de Machine Learning peut être faite.

### 3.4.4 Séparation des sources à travers les outils de Machine Learning

L'objectif de cette partie est de trouver différents clusters dans nos données en utilisant les outils de Machine Learning. Avec ces outils il est possible de combiner plusieurs paramètres en même temps afin de mieux caractériser les événements ayant lieu lors des essais. Pour cela nous allons procéder en trois temps. D'abord il sera effectué une réduction de la dimension des données avec l'ACP (analyse en composantes principales). Ensuite nous allons effectuer l'analyse non supervisée et enfin l'analyse supervisée.

Pour avoir des données plus représentatives des différents phénomènes engendrant une activité acoustique, nous allons considérer l'ensemble des essais réalisés avec une amplitude de déviation de l'excentrique de 15 mm et de 20 mm excepté l'essai 4Hz20mm où nous n'avons pas pu récupérer toutes les données. Nous avons également choisi de ne pas inclure les don-

nées provenant d'un bruit de fond parasite notées avec l'essai 2Hz15mm dont les fréquences de pic sont supérieures à 300 kHz (ces données ne représentent que 0.13 % des données des essais à 15mm et 20mm sans l'essai 4hz20mm). Nous avons également constaté avec l'analyse quantitative effectuée ci-dessus que les micro-fissurations de la résine disparaissent au bout d'un certain temps d'essais. Il a également été noté que ces micro-fissurations de la résine ont une fréquence de pic quasiment égale à 0 kHz. Du fait de ce caractère éphémère de ces signaux de micro-fissurations, ils seront également filtrés lors de cette analyse statistique par Machine Learning. Ainsi après filtrage de l'ensemble de ces signaux indiqués, le nombre total de signaux sur chaque capteur pour ces essais à 15 mm et 20 mm d'amplitude d'excitation est indiqué sur la figure 3.17.

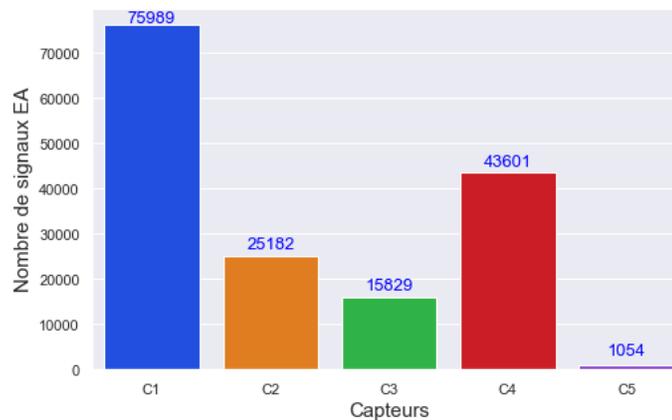


FIGURE 3.17 – Nombre de signaux regroupés par capteur pour les essais réalisés avec une amplitude de déviation de l'excentrique de 15mm et de 20 mmm sur le câble bi-couches 1 sain

#### 3.4.4.1 L'analyse en composantes principales (ACP) :

Étant donné que certains paramètres ont des corrélations très élevées, comme nous avons pu le voir avec l'analyse paramétrique et afin d'éviter une redondance de l'information traitée et optimiser le temps de calcul, il sera d'abord effectué une réduction de la dimension des données. L'ACP est ainsi un algorithme permettant de définir de nouvelles variables (ou paramètres) décorréliées les unes des autres. Ces nouvelles variables appelées composantes principales sont des combinaisons linéaires des paramètres de départ. Ainsi pour compresser ou réduire les  $N$  paramètres de départ en  $p$  paramètres conservant le mieux l'information et les caractéristiques des données, les  $p$  premières composantes principales représentent le meilleur choix. Cette réduction de dimensions est ainsi faite de manière automatique, contrairement à la procédure adoptée ci-dessus où il fallait choisir, entre deux paramètres corrélés, lequel éliminer de l'étude.

Après avoir regroupé les données et normalisé entre 0 et 1 les valeurs des treize paramètres de l'EA donnés dans le tableau 3.2, l'ACP est réalisée. Cette normalisation est faite dans le but de ne pas fausser l'analyse vu que les paramètres n'ont pas les mêmes unités et les mêmes ordres de grandeur. Le résultat de cette ACP est indiqué sur la figure 3.18. Sur cette figure sont don-

nées la variance expliquée par chaque composante principale et les variances cumulées que nous avons notées  $\lambda$ . Ainsi nous constatons que les deux premières composantes principales expliquent **61.59 %** des données. En un langage plus familier cela veut dire qu'en considérant ces deux premières composantes principales, nous conservons 61.59 % des caractéristiques intrinsèques aux treize paramètres de départ de l'EA. Pour réduire la dimension des données initiales, il est souvent pris un nombre de composantes ( $N_{cp}$ ) de tel sorte que 80 à 90 % de la variance totale soit expliquée. Une autre approche pour choisir le nombre de composantes principales à conserver est d'utiliser **la méthode dite du coude**. Cette méthode consiste à prendre un nombre de composantes principales au-delà duquel l'augmentation de la variance expliquée est faible. Ici nous constatons que le coude correspond à environ 10 composantes principales soit une variance expliquée cumulée de 99.61 %. Cependant pour fixer ce point correspondant au *coude* de manière plus rigoureuse, le nombre de composantes principales ( $N_{cp}$ ) sera fixé comme suit :  $N_{cp} = N$  si  $\lambda_N - \lambda_{N-1} < 1\%$ . En choisissant cette approche **9 composante principales** sont alors retenues avec une variance expliquée cumulée de **98.91 %**. Avec cette technique de réduction de dimensions, nous passons d'un espace à treize dimensions à un espace à neuf dimensions tout en conservant 98.91 % des caractéristiques des données.

L'ACP peut être également utilisée pour représenter les données en 2D ou 3D afin de distinguer

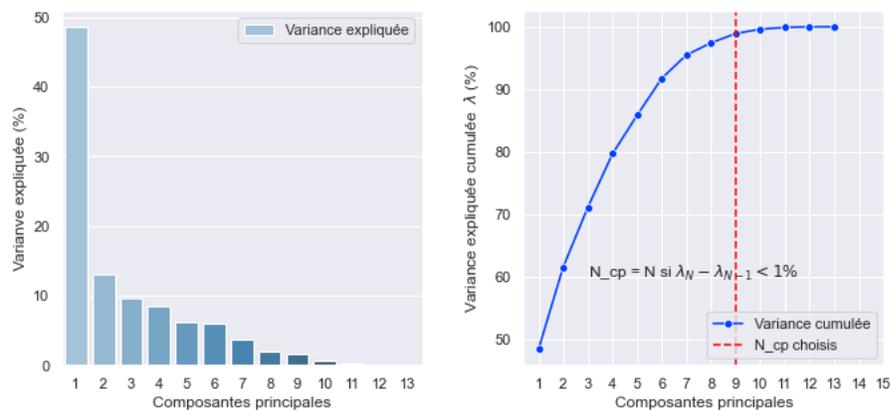


FIGURE 3.18 – L’analyse en composantes principales (ACP) des données obtenues avec les essais à 15 mm et 20 mm d’amplitude d’excitation sur le bi-couches 1 sain

les clusters dans les données. En ce faisant dans ce cas, la distribution des données en fonction des trois premières composantes principales, qui représentent 71.14 % des données à elles trois, est donnée sur la figure 3.19. Nous pouvons alors constater que les données enregistrées sur le capteur C5 ont en général des valeurs de CP1 (première composante principale) plus faibles que celles des données enregistrées sur les autres capteurs. Mais force est de constater que ceci ne suffit pas à séparer les clusters. C’est pour ainsi dire que lorsque les données ont des caractéristiques assez proches ou si la variance totale expliquée par les trois premières composantes principales est faible comparée à la variance totale nécessaire pour une représentativité satisfaisante des données (correspondant à  $N_{cp}$ ), l’ACP n’est pas toujours adaptée pour distinguer les clusters présents dans les données. À partir de ces neuf (9) composantes principales retenues,

l'analyse non supervisée sera effectuée.

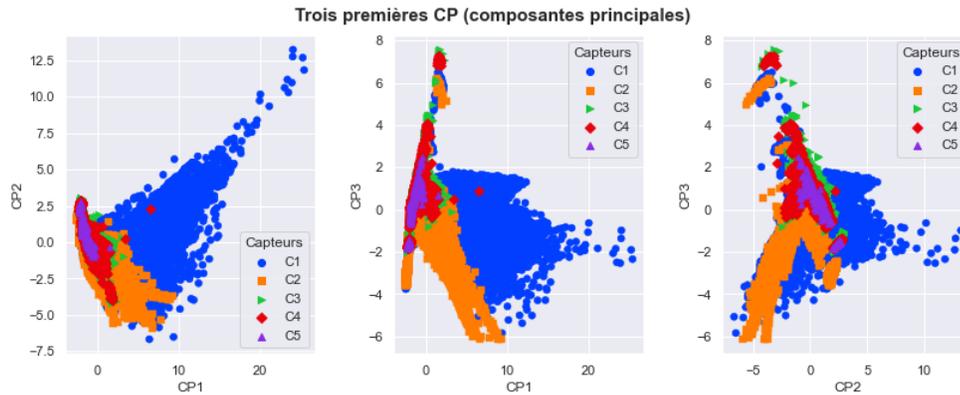


FIGURE 3.19 – Distribution des trois premières composantes principales des données obtenues avec les essais à 15 mm et 20 mm d’amplitude d’excitation sur le bi-couches 1 sain

### 3.4.4.2 Choix du nombre de clusters $k$ :

Pour identifier et séparer les clusters, nous allons utiliser l’algorithme de K-Means et celui de Modèles de Mélange de Gaussiens ou GMM (*Gaussian Mixture Models*).

La première étape pour effectuer le clustering en utilisant ces algorithmes est de définir le nombre de clusters présents dans les données. Pour déterminer ce paramètre noté  $k$ , nous allons utiliser deux outils : l’index de Davies et Bouldin (DB) [163] et l’index de Calinski-Harabasz (CH) [164]. Pour chaque algorithme (K-Means ou GMM), en faisant varier le  $k$  de 2 à  $n$ , l’index DB ou CH est calculé à chaque itération. Pour l’index DB, Le  $k$  optimum correspond au minimum des index obtenus alors que pour l’index CH, le  $k$  optimum correspond au maximum des index. Les valeurs obtenues pour ces index en faisant varier  $k$  de 2 à 10 pour chacun des deux algorithmes sont données sur la figure 3.20.

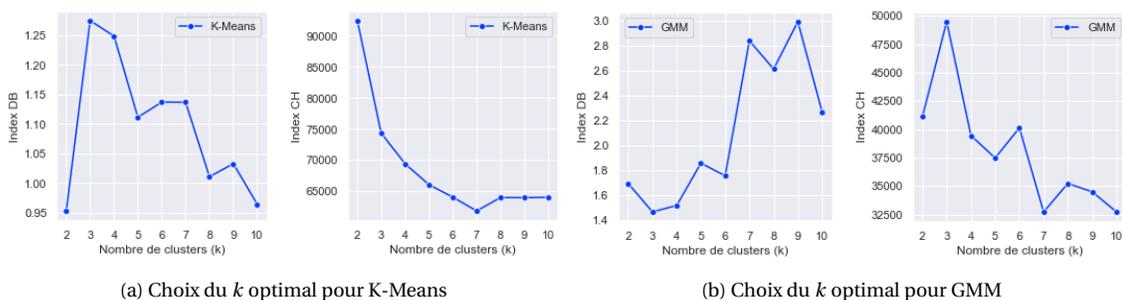


FIGURE 3.20 – Choix du  $k$  optimum pour les algorithmes de K-Means et de GMM

Pour l’algorithme K-Means, un nombre optimal de  $k = 2$  clusters est trouvé aussi bien avec l’index DB ( $DB_{minimal}$  correspond à  $k = 2$ ) qu’avec l’index de CH ( $CH_{maximal}$  correspond à  $k = 3$ ). Ce nombre optimal de clusters à  $k = 2$  est en accord avec le nombre de sources possibles de signaux acoustiques (bruits de l’excentrique et frottements entre fils sains) pour les données

que nous étudions étant donné que les micro-fissurations de la résine ont été filtrées. Quant à l'algorithme GMM, aussi bien l'index DB que l'index CH indiquent un nombre optimal de clusters  $k = 3$ . Ce nombre optimal de clusters à  $k = 3$  pourrait signifier l'existence d'un cluster particulier que l'analyse paramétrique effectuée ci-dessus n'a pas permis de détecter ou alors une imprécision de ces index avec l'algorithme GMM. Il pourrait également signifier une certaine variabilité des signaux générés par l'excentrique du fait de la variation de son régime de rotation (couples fréquence-amplitude). Ainsi, en se basant sur ces valeurs de DB et de CH, le clustering avec les algorithmes K-Means et GMM sera effectué en faisant varier le  $k$  entre 2 et 4.

### 3.4.4.3 Clustering avec l'algorithme GMM :

Les résultats du clustering avec cet algorithme en variant  $k$ , le nombre de clusters, de 2 à 4 sont donnés sur la figure 3.21. Pour assigner chaque cluster identifié par cet algorithme à une

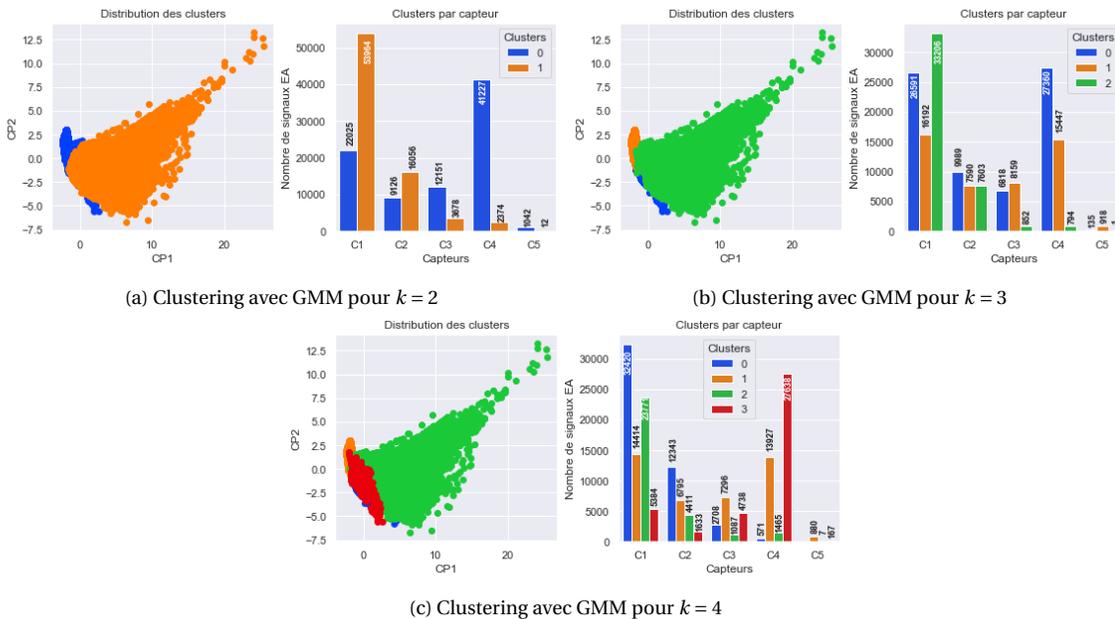


FIGURE 3.21 – Clustering avec GMM en faisant varier  $k$  de 2 à 4 pour les données obtenues avec les essais à 15 mm et 20 mm d’amplitude d’excitation sur le bi-couches 1 sain : distribution des clusters en fonction des deux premières composantes principales et histogrammes du nombre d’événements de chaque cluster par capteur

source donnée d’EA, nous nous baserons en premier lieu sur les histogrammes du nombre de signaux EA par capteur. Ce choix est justifié par le fait que les EA de l’excentrique sont uniquement enregistrées par les capteurs C1 et C2 et les frottements entre fils sains sont a priori enregistrés par tous les capteurs et majoritairement sur le capteur C4 comme nous l’avons remarqué avec l’analyse quantitative.

- En utilisant cette logique, pour le clustering avec  $k = 2$ , le cluster 1 correspond aux bruits de l’excentrique puisqu’ils sont majoritairement notés sur les capteurs C1 et C2 ; il représente 71.02 % et 63.76 % des signaux enregistrés respectivement sur ces deux capteurs.

Le cluster 0 correspond ainsi aux frottements entre fils sains. Ce cluster 0 est majoritairement enregistré sur les capteurs C3, C4 et C5 soit respectivement 76.76%, 94.56 % et 98.86 % des signaux reçus par ces capteurs. Le fait que des signaux des capteurs C3, C4 et C5 soient assignés au cluster 1 associé aux bruits de l'excentrique est dû à une imperfection du clustering qui reste tout de même satisfaisant.

- Pour le clustering avec  $k = 3$ , selon la même logique, les cluster 0 et 1 correspondent aux frottements entre fils sains et représentent 98.18 % des signaux enregistrés sur le capteur C4. Le cluster 2 correspond aux EA de l'excentrique puisqu'il n'est enregistré en majorité que sur les capteurs C1 et C2. Ce cluster ne représente que 43.70 % des signaux enregistrés sur le capteur C1. Étant donné que le capteur C1 reçoit en majorité les signaux dus à l'excentrique, nous pouvons déduire de ce pourcentage que le clustering avec  $k = 3$  n'est pas satisfaisant.
- Et pour  $k = 4$ , les clusters 1 et 3 correspondent aux frottements entre fils sains et représentent 95.33 % des signaux du capteur C4. Les clusters 0 et 2, principalement notés pour les signaux enregistrés par les capteurs C1 et C2, correspondent aux bruits de l'excentrique. Ces clusters représentent 73.95 % des signaux du capteur C1.

En comparant le clustering pour  $k = 2$  et  $k = 4$ , nous remarquons que le pourcentage de signaux associés aux bruits de l'excentrique sur le capteur C1, est sensiblement le même : 71.02 % pour  $k = 2$  et 73.95 % pour  $k = 4$ . Il en est de même pour les signaux associés aux frottements entre fils sains sur le capteur C4 : 94.56 % pour  $k = 2$  et 95.33 % pour  $k = 4$ . Ceci montre que le clustering avec  $k = 4$  est légèrement plus optimal car a priori sur le capteur C4, seuls les frottements entre fils sains devraient être notés.

Pour valider ce clustering, les données de chaque cluster sont comparées aux données des essais à 5 mm et 10 mm d'amplitude d'excitation où seuls les EA de l'excentrique sont notées. En faisant cette comparaison les données de ces essais devraient correspondre, dans un cadre idéal, uniquement aux clusters identifiés comme EA de l'excentrique : au cluster 1 pour  $k = 2$  et aux clusters 0 et 2 pour  $k = 4$ . Le cas  $k = 3$  n'est ici pas considéré vu l'analyse faite ci-dessus.

Pour effectuer cette comparaison, nous allons utiliser les algorithmes de l'analyse supervisée. Cette approche consiste à classer de nouvelles données sur un ensemble de clusters pré-existants. Ainsi chaque signal acoustique des EA notées lors des essais à 5 mm ou 10 mm d'amplitude d'excitation sera classé dans un cluster donné identifié avec l'algorithme GMM en fonction de la proximité de cet événement ou de la ressemblance de ses caractéristiques avec celles des données de ce cluster.

Pour effectuer l'analyse supervisée nous allons tester différents algorithmes de classification et voir celui/ceux donnant les meilleurs résultats. Ensuite ceux donnant les meilleurs résultats sont utilisés pour identifier à quel(s) cluster(s) appartiennent les données enregistrées lors des essais à 5 mm et 10 mm d'amplitude d'excitation. Les algorithmes qui seront testés sont le kNN ou *k-Nearest Neighbors*, le CART ou *Classification And Regression Trees*, le LR ou *Logistic Regression*, le LDA ou *Linear Discriminant Analysis* et le GNB ou *Gaussian Naive Bayesian*. Ces algo-

rithmes de classification sont testés sur les données déjà labellisées (avec des clusters connus) avec le GMM pour le cas  $k = 4$ . Ces données labellisées sont divisées en deux parties : une partie *train* sur laquelle les algorithmes de classification seront entraînés pour reconnaître les caractéristiques de chaque cluster et une partie *test* qui sert à évaluer l’algorithme (voir figure 3.22). Après avoir entraîné les algorithmes avec les données *train*, une classification des données *test*

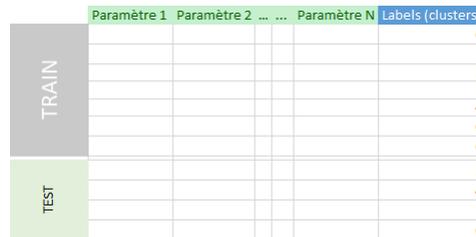


FIGURE 3.22 – Principe de division des données pour entraîner les algorithmes de classification

sans leurs labels initiaux (les clusters auxquels ces signaux appartiennent) est effectuée. Si nous appelons par *labels-test-initiaux* les vrais labels des données *test* et *labels-test-nouveaux* les labels des données *test* obtenus avec l’algorithme de classification, le degré de correspondance entre les labels-test-initiaux et les labels-test-nouveaux permettra de juger de la qualité de l’algorithme. La taille des données train est souvent prise égale 80 % de la taille initiale des données et les données test, les 20 % restants. Cependant en faisant une seule subdivision des données (80/20), les événements d’un cluster (disons par exemple le cluster 0) pourraient se retrouver majoritairement sur les données *test* et dans ce cas l’algorithme entraîné sur les données *train* ne capturerait pas toutes les caractéristiques de ce cluster et aura une faible performance en test. Pour minimiser cet effet, les données sont subdivisées en N paquets et chaque paquet sera considéré à tour de rôle comme la partie *test* et les N – 1 restants comme la partie *train*. Le N a été choisi égal à 10.

Pour choisir les meilleurs algorithmes, nous avons utilisé les paramètre appelés **précision** ou *accuracy* et le logarithmic loss ou *logloss* [165]. Le paramètre *précision* varie de 0 à 100 %, 0 signifiant qu’aucun événement des données *test* n’a été identifié à son cluster initial après la classification. Le *logloss* est une mesure de performance permettant d’évaluer les probabilités d’appartenance d’une réalisation (ici un signal EA) à une classe donnée, le meilleur résultat étant un *logloss* plus faible. Les précisions et les logloss obtenues avec les algorithmes testés sont données dans le tableau 3.3. Ce tableau montre que les algorithmes kNN et LR ont les pré-

	LR	LDA	CART	kNN	GNB
<b>Précision (%)</b>	95.54 ±0.73	90.22 ±2.75	96.57 ±2.10	97.38 ±0.97	88.89 ±1.58
<b>Logloss</b>	0.13 ±0.02	0.56 ±0.13	1.20 ±0.74	0.21 ±0.09	0.44 ±0.05

TABLEAU 3.3 – Précisions et Logloss obtenues avec les algorithmes LR, LDA, CART, kNN et GNB

cisions les plus élevées avec respectivement 97.38 % ±0.97 et 95.54 % ±0.73 et les logloss les plus faibles, respectivement 0.21 ±0.09 et 0.13 ±0.02. Le troisième algorithme avec les précisions les

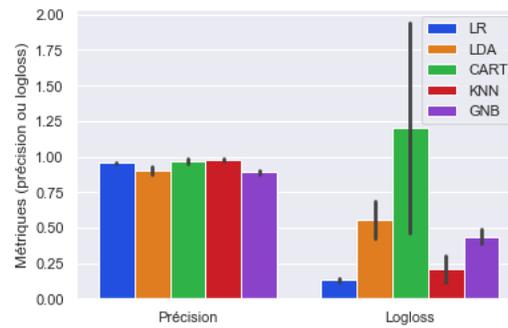


FIGURE 3.23 – Précisions et Logloss obtenues avec les algorithmes LR, LDA, CART, kNN et GNB

plus élevées est le CART (96.57 %  $\pm$ 2.10) ; cependant il a aussi le logloss le plus élevé (1.20  $\pm$ 0.74). L’algorithme ayant le logloss le plus faible après le kNN et le LR est le GNB (0.44  $\pm$ 0.05).

Sur la figure 3.23, nous pouvons voir que les différences de valeurs de logloss données par les différents algorithmes de classification sont plus marquées que celles des précisions. Ainsi avec les algorithmes kNN et LR, l’algorithme GNB sera considéré au lieu de CART. Ces trois algorithmes sont par la suite utilisés pour effectuer la classification des données des essais à 5 mm et 10 mm d’amplitude d’excitation.

Pour ces essais, seules les EA provenant de l’excentrique sont notées. Les données regroupées de ces essais à 5 mm et 10 mm d’amplitude d’excitation sont présentées sur la figure 3.24. La

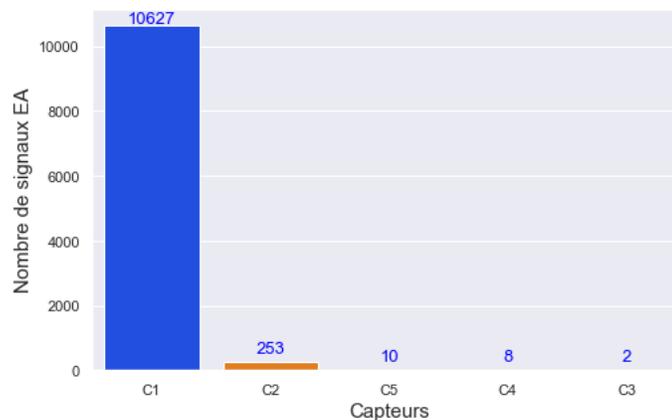


FIGURE 3.24 – Nombre de signaux enregistrés sur les différents capteurs pour les amplitudes d’excitation de 5 mm et 10 mm

classification de ces données parmi les clusters identifiés avec  $k = 2$  et  $k = 4$  en utilisant les algorithmes de classification kNN, LR et GNB est ainsi effectuée. Les pourcentages des signaux de ces essais à 5 mm et 10 mm d’amplitude d’excitation associés aux clusters identifiés comme bruits de l’excentrique sont donnés dans le tableau 3.4.

- Avec l’algorithme de classification LR, un faible pourcentage (inférieur à 50 %) des signaux des essais à 5 mm et 10 mm d’amplitude d’excitation est identifié comme bruits de l’excentrique aussi bien pour les données labellisés (avec des clusters) avec  $k = 2$  que pour

	LR	kNN	GNB
<b>k = 2</b>	46.52	71.11	52.76
<b>k = 4</b>	46.48	68.55	81.75

TABLEAU 3.4 – Pourcentage des signaux EA des essais à 5 mm et 10 mm d’amplitude d’excitation qui ont été classés comme provenant de l’excentrique d’après le clustering avec GMM pour  $k = 2$  et  $k = 4$

les données labellisées avec  $k = 4$ . En analysant la classification des données de chaque capteur (figure 3.25), nous remarquons que la classe associée aux frottements entre fils sains (*FrotFS*) y est majoritaire sur la classe associée aux bruits de l’excentrique (*Exc*).

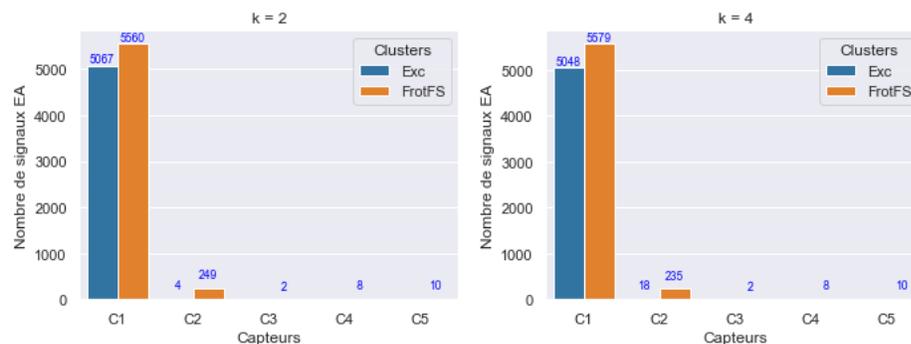


FIGURE 3.25 – Classification des signaux des essais à 5 mm et 10 mm avec l’algorithme Logistic Regression (LR)

- Avec l’algorithme kNN, de meilleurs pourcentages sont obtenus : 71.11 % pour  $k = 2$  et 68.55 % pour  $k = 4$ . La classification des données de chaque capteur est donnée sur la figure 3.26. Sur cette figure, nous pouvons remarquer, pour  $k = 2$  et pour  $k = 4$ , que les données du capteur C1 sont majoritairement classées comme bruits de l’excentrique. Cependant les signaux enregistrés par le capteur C2 sont identifiés comme frottements de entre fils sains.

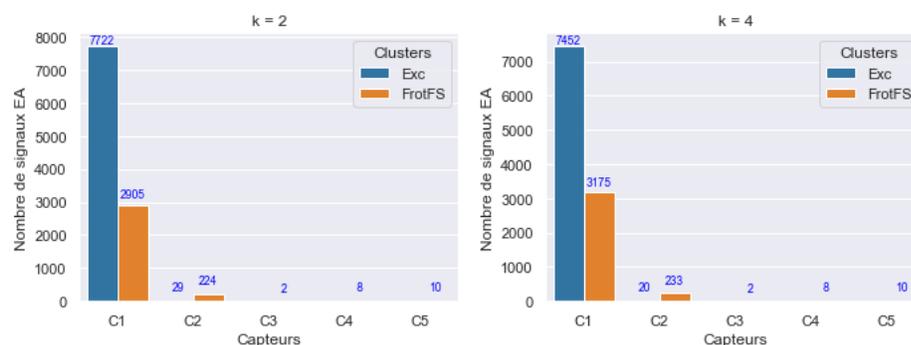


FIGURE 3.26 – Classification des signaux des essais à 5 mm et 10 mm avec l’algorithme k-Nearest Neighbors (kNN)

- Avec l’algorithme GNB, les pourcentages obtenus sur l’ensemble des données des essais à 5 mm et 10 mm d’amplitude d’excitation sont de 52.76 % pour  $k = 2$  et de 81.75 % pour

$k = 4$ . Sur la figure 3.27, nous notons que pour  $k = 2$ , un nombre important (46.13 %) des signaux enregistrés par le capteur C1 sont identifiés comme des frottements entre fils sains. De même la quasi totalité des données du capteur C2 sont associés aux frottements entre fils sains (227/253 signaux). Cependant pour  $k = 4$ , les données du capteur C1 sont associées à 82.22 % aux bruits de l'excentrique et les données du capteur C2 à 65.22 % à cette source d'EA.

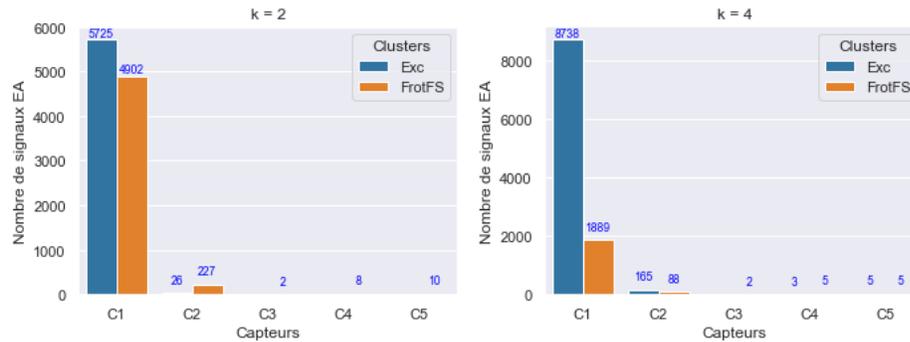


FIGURE 3.27 – Classification des signaux des essais à 5 mm et 10 mm avec Gaussian Naive Bayes (GNB)

Cette analyse montre que les meilleurs résultats de classification des signaux des essais à 5 mm et 10 mm d'amplitude d'excitation sont obtenus avec l'algorithme kNN lorsque  $k = 2$  et avec l'algorithme GNB pour  $k = 4$ . Parmi ces deux cas, l'algorithme GNB donne un meilleur résultat avec un pourcentage d'identification des signaux des essais à 5 mm et 10 mm d'excitation de 81.75 % alors que l'algorithme kNN donne 71.11 %. Ainsi, à titre indicatif, en considérant le clustering avec l'algorithme GMM pour un  $k = 4$ , les valeurs moyennes de neuf paramètres de l'émission acoustique pour chaque source (bruits de l'excentrique et frottements entre fils sains) sont représentées sur la figure 3.28. Les barres au-dessus de chaque histogramme représente l'intervalle de confiance à 95 % de la valeur moyenne qui est donné par :

$$I_c = \left[ \bar{X} - 2 \frac{\sigma(X)}{\sqrt{N}} ; \bar{X} + 2 \frac{\sigma(X)}{\sqrt{N}} \right]$$

où  $\bar{X}$ ,  $\sigma(X)$  représentent respectivement la moyenne et l'écart-type du paramètre X. N est le nombre de signaux.

Sur tous les paramètres temporels, nous remarquons que les valeurs moyennes des signaux dus à l'excentrique sont plus élevées. Ceci se justifie par le fait que les bruits de l'excentrique sont plus *énergétiques*.

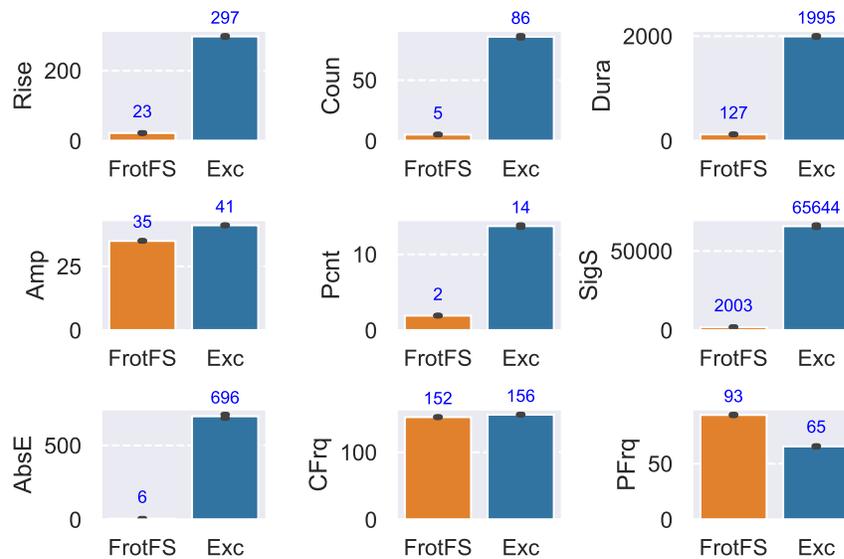


FIGURE 3.28 – Moyennes des paramètres des EA identifiées comme provenant de l'excentrique et des frottements entre fils sains avec le GMM pour  $k = 4$

Après cette classification basée sur le clustering effectué avec l'algorithme GMM, nous allons à présent effectuer le clustering avec l'algorithme K-Means et comparer les résultats obtenus.

#### 3.4.4.4 Clustering avec l'algorithme K-Means :

Les résultats du clustering en utilisant l'algorithme K-Means en faisant varier le  $k$  de 2 à 4 sont donnés sur la figure 3.29. En se basant sur le même principe que précédemment, à savoir que les EA provenant de l'excentrique sont majoritaires sur les signaux enregistrés par le capteur C1 et uniquement enregistrées par les capteurs C1 et C2 et que les frottements entre fils sains sont enregistrés par tous les capteurs et majoritairement sur le capteur C4, chaque cluster identifié peut être assigné à l'une de ces deux source d'EA.

- Selon ce principe, pour le clustering avec  $k = 2$ , le cluster 1 étant uniquement noté sur les capteurs C1 et C2 correspondrait aux bruits de l'excentrique. Toutefois nous pouvons voir que le cluster 0, pouvant être associé aux frottements entre fils sains est présent avec un nombre important de signaux (75 %) enregistrés sur le capteur C1. Ainsi même si cet algorithme K-Means avait indiqué un nombre optimal de clusters  $k = 2$  avec les index DB et CH, force est de constater que les deux clusters séparés ne correspondent pas aux deux sources d'EA évoquées (excentrique et frottements interfilaires).
- De même pour le clustering avec  $k = 3$ , selon la même logique, le cluster 1 correspondrait aux signaux générés par l'excentrique et les cluster 0 et 2 aux frottements entre fils sains. Cependant nous notons que ces deux clusters associés aux frottements entre fils sains sont majoritaires sur le capteur C1 (77.70 % des signaux).

- Et enfin pour  $k = 4$ , les clusters 1 et 3 correspondraient aux signaux de l'excentrique et les clusters 0 et 2 aux frottements entre fils sains. Comme pour  $k = 2$  et  $k = 3$ , ici également les clusters associés aux frottements entre fils sains sont majoritaires sur le capteur C1 avec 69.51 % des signaux enregistrés par ce capteur.

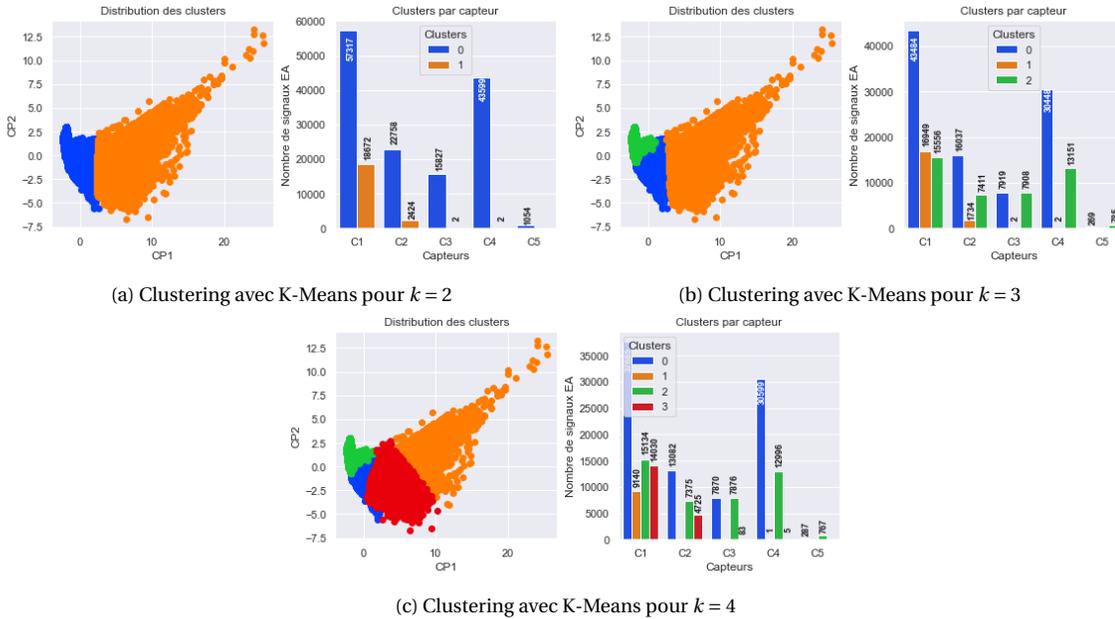


FIGURE 3.29 – Clustering avec K-Means en faisant varier  $k$  de 2 à 4 pour les données obtenues avec les essais à 15 mm et 20 mm d’amplitude d’excitation sur le bi-couches 1 sain : distribution des clusters en fonction des deux premières composantes principales et histogrammes du nombre d’événements de chaque cluster par capteur

Sur la base de cette analyse, comparé à l’algorithme GMM, l’algorithme K-Means a ainsi fourni un clustering moins satisfaisant.

Néanmoins en considérant ce clustering pour  $k = 2$ ,  $k = 3$  et  $k = 4$ , la classification des données des essais à 5 mm et 10 mm d’amplitude d’excitation est effectuée. Les pourcentages des signaux de ces essais à 5 mm et 10 mm d’amplitude d’excitation associés aux clusters identifiés comme bruits de l’excentrique (cluster 1 pour  $k = 2$  et  $k = 3$  et clusters 1 et 3 pour  $k = 4$ ) sont donnés dans le tableau 3.5.

	LR	kNN	GNB
<b>k = 2</b>	19.47	18.11	19.70
<b>k = 3</b>	19.17	15.62	24.93
<b>k = 4</b>	19.52	25.99	29.70

TABEAU 3.5 – Pourcentage des signaux EA des essais à 5 mm et 10 mm d’amplitude d’excitation qui ont été classés comme provenant de l’excentrique d’après le clustering avec K-Means pour  $k = 2$ ,  $k = 3$  et  $k = 4$

Les pourcentages des signaux des essais à 5 mm et 10 mm d’amplitude d’excitation classés comme bruits de l’excentrique donnés dans le tableau 3.5 confirment que le clustering effectué

par le K-Means ne correspond pas aux sources d'EA. Le pourcentage le plus élevé, comme pour le clustering avec le GMM, est obtenu pour  $k = 4$  avec l'algorithme GNB mais ici il n'est que de 29.70 %; pour le clustering avec GMM, il équivaut à 81.75 %!

Nous pouvons ainsi conclure de cette analyse statistique par Machine Learning que l'algorithme GMM est plus adapté, comparé au K-Means, pour effectuer le clustering. Pour la classification, l'algorithme GNB donne de meilleurs résultats.

Après avoir identifié les sources de l'EA pour le câble sain (sans ruptures de fils), nous allons à présent étudier le câble avec des fils rompus en partie centrale sur la couche extérieure.

## 3.5 Analyse de l'EA du câble avec ruptures de fils en partie courante

### 3.5.1 Présentation des essais

Après avoir effectué les essais sur le câble sain étudié ci-dessus, des ruptures de fils sont effectués en partie courante. La position de ces ruptures est rappelée sur la figure 3.30 suivante. Au total cinq ruptures de fils ont été créées. Après chaque rupture de fil, les mêmes essais que pour le câble sain sont effectués. Pour chacun des états du câble (0 fil coupé à 5 fils coupés),

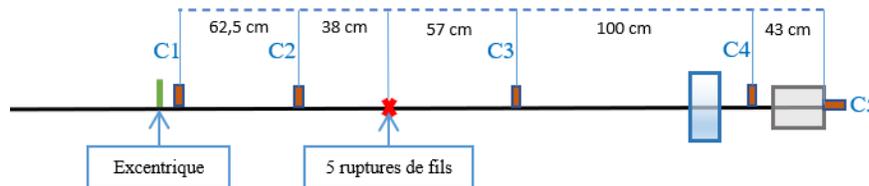


FIGURE 3.30 – Positionnement des ruptures de fils sur le bi-couches 1 (bi-couches sans ruptures de fils dans les ancrages)

le nombre de signaux enregistrés sur les cinq capteurs pour l'ensemble des essais (2Hz5mm à 4Hz20mm) est donné sur la figure 3.31. En regardant cette figure nous pouvons remarquer d'une manière générale que le **nombre total** de signaux enregistrés évolue d'une manière plutôt aléatoire en fonction du nombre de fils. Cependant avec le capteur C2 qui est le plus proche de la zone de ruptures de fils (à 38 cm), le nombre de signaux acoustiques enregistrés augmente à partir de deux fils coupés, passant de 10557 signaux à 23550 signaux. Pour les signaux enregistrés sur le capteur C1, leurs nombres varient très légèrement à partir de deux fils coupés. Ceci peut s'expliquer par le fait que sur ce capteur ce sont les bruits de l'excentrique qui sont enregistrés en plus grand nombre et «masquent» de ce fait l'évolution des EA des sources restantes pouvant engendrées de l'EA sur le capteur C1, frottements entre fils sains ou frottements des fils coupés. Nous pouvons également noter que le capteur C3, situé à 57 cm de la position des ruptures, enregistre le plus grand nombre de signaux contrairement aux données obtenues sur câble sain où ce capteur, après le capteur C5, enregistrerait le plus faible nombre de signaux. Ainsi

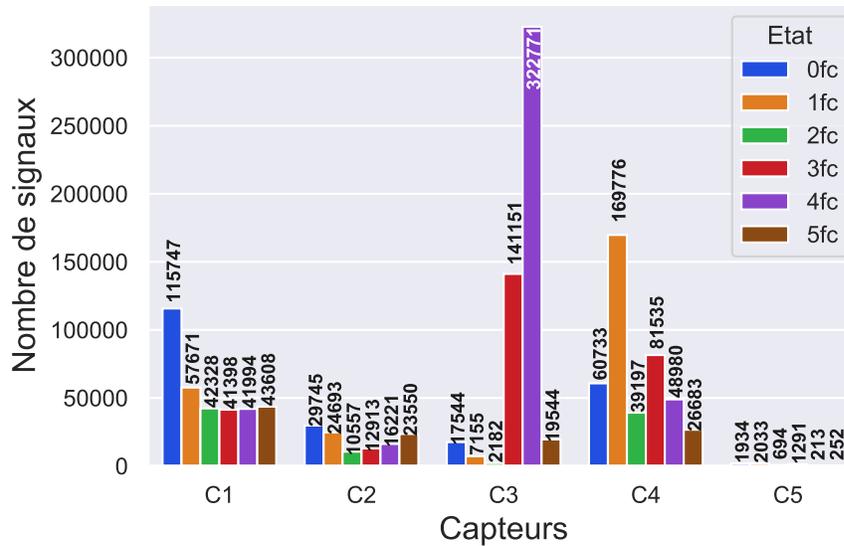


FIGURE 3.31 – Nombre de signaux enregistrés sur chacun des capteurs pour l'ensemble des essais et pour chaque état du câble (sain ou avec fils coupés)

nous pouvons dire que ce capteur C3 enregistre en majorité les frottements des fils coupés sur les fils sains.

Pour séparer les différentes sources d'EA sur le câble avec fils coupés, nous allons effectuer l'analyse paramétrique et l'analyse statistique par Machine Learning.

### 3.5.2 Analyse paramétrique

En adoptant la même démarche que pour le câble sain, les signaux enregistrés au niveau du capteur C2 pour le câble avec un, deux et trois fils coupés sont comparés à ceux enregistrés sur ce même capteur pour le câble sain étudié plus haut. L'objectif est ainsi de détecter un nouveau cluster de données du câble avec fils coupés qui se démarquerait des EA du câble sain. Les résultats de cette comparaison, en prenant les mêmes paramètres d'émission acoustique considérés pour l'étude paramétrique du câble sain, sont donnés sur la figure 3.32. Avec cette figure 3.32, nous pouvons voir que les EA se présentent sous forme de deux à quatre clusters. Nous notons aussi un cluster avec des fréquences de pic maximales supérieures à 300 kHz pour l'ensemble des états du câble. En analysant les données enregistrées sur les autres capteurs, il apparaît que ce cluster n'est noté que sur les capteurs C1 et C2. Nous en déduisons que ce cluster est dû à l'excentrique. Cependant force est de constater que cette analyse paramétrique ne permet pas de distinguer de manière évidente les EA enregistrées sur le câble sain avec celles enregistrées sur le câble avec des fils coupés afin d'en extraire un cluster dû aux frottements de fils rompus sur les fils sains.

Pour arriver à séparer les sources présentes dans les données enregistrées sur câbles avec défaut(s), nous allons alors utiliser les outils de l'apprentissage automatisé ou Machine Learning en faisant une analyse non supervisée (clustering) puis une analyse supervisée (classification).

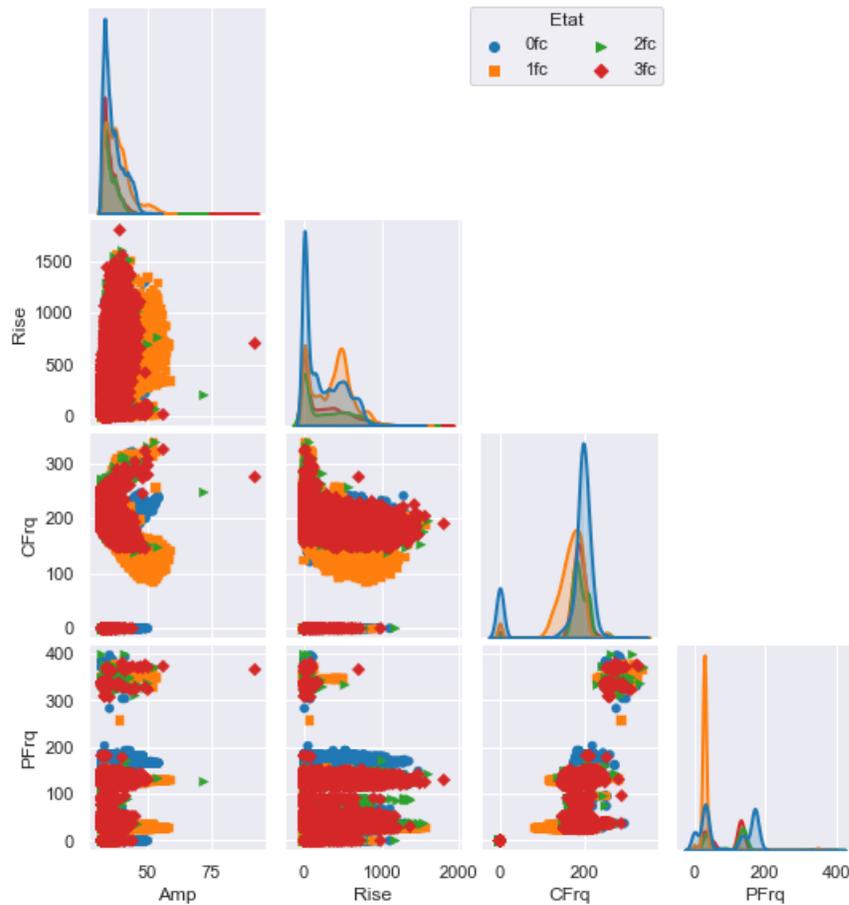


FIGURE 3.32 – Comparaison des EA enregistrés sur le capteur C2 pour un, deux et trois fils coupés avec ceux enregistrés sur ce même capteur pour le câble sain

### 3.5.3 Séparation des sources d'EA sur câbles avec fils coupés par Machine Learning

Nous avons montré lors de l'étude du câble sain que l'algorithme GMM (*Gaussian Mixture Model*) est plus adapté, comparé au K-Means, pour séparer les sources d'EA. Ainsi cet algorithme sera utilisé pour séparer les clusters des données enregistrées sur le câble avec fils coupés.

#### 3.5.3.1 LACP :

En faisant l'analyse en composantes principales avec les données brutes du câble avec fils coupés (un à cinq fils coupés), 11 composantes principales sont obtenues en premier lieu en adoptant la même procédure que pour le câble sain ( $N_{cp} = N$  si  $\lambda_N - \lambda_{N-1} < 1\%$ ). Avec la distribution des données en fonction des trois premières composantes principales (figure 3.33), nous remarquons l'existence d'un bruit de fond parasite enregistré pour le câble avec trois fils coupés (3fc). Ce cluster ne représente que 2 signaux soit 0.00022 % des données. Pour ne pas biaiser

le clustering qui sera fait, les signaux correspondants à ce cluster sont filtrés. L'ACP apparaît ainsi comme un moyen de filtrer certains signaux parasites pouvant être présents dans les données. Après avoir filtré les signaux parasites, l'ACP est refaite. La nouvelle distribution des don-

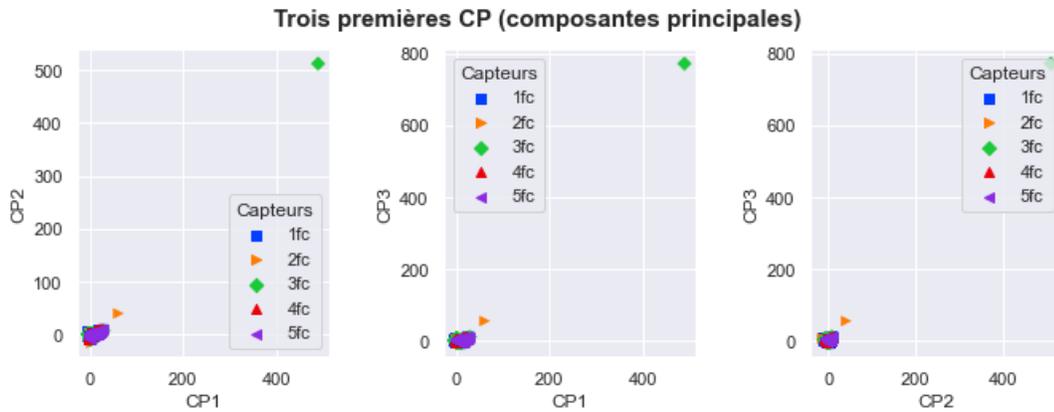


FIGURE 3.33 – Distribution des trois premières composantes principales des données obtenues sur câble avec fils coupés

nées en fonction des trois premières composantes principales est donnée sur la figure 3.34. Avec cette ACP, dix (10) composantes principales peuvent être retenues et représentent 99.16 % des caractéristiques des signaux (variances expliquées cumulées). Cependant étant donné qu'avec l'analyse des données du câble sain, neuf (9) composantes principales ont été retenues, ici également nous allons choisir neuf (9) composantes principales pour faire l'analyse des signaux du câble avec fils rompus. Ces neuf (9) composantes principales retenues représentent 97.81 % des variances expliquées cumulées.

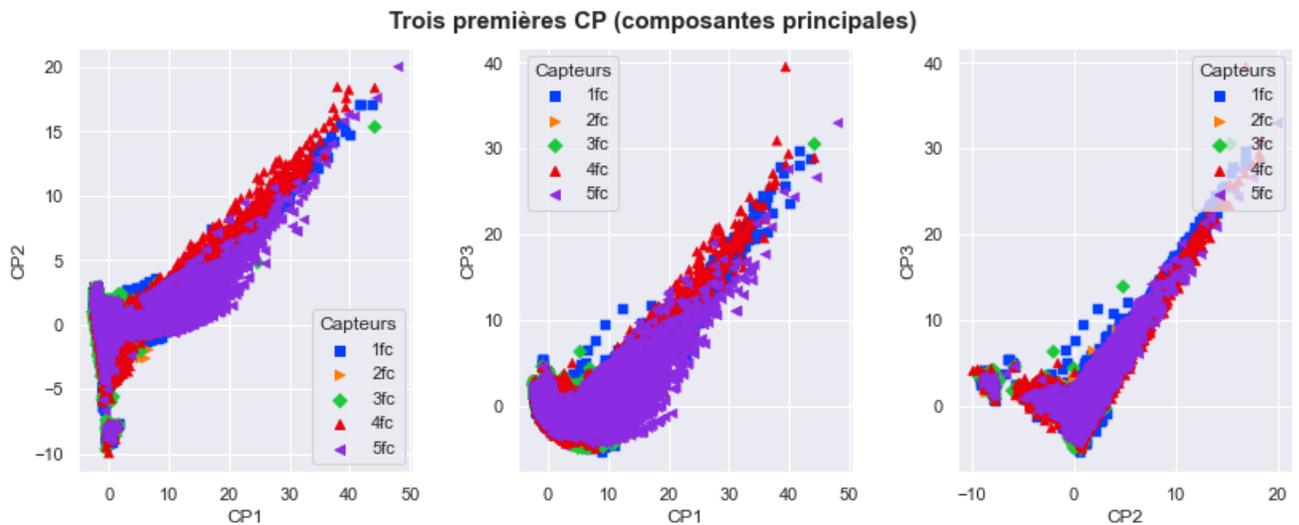


FIGURE 3.34 – Distribution des trois premières composantes principales des données filtrées obtenues sur câble avec fils coupés

### 3.5.3.2 Choix du nombre de clusters $k$ :

Le choix du nombre de clusters par les index de Davies et Bouldin (DB) et de Calinski-Harabasz (CH) (figure 3.35), indique un nombre optimal de clusters à  $k = 3$  pour les deux index; ce qui correspond au nombre de sources d'EA pouvant générer des signaux durant les essais sur le câble avec fils rompus (bruits de l'excentrique, frottements entre fils sains et frottements des fils coupés sur fils sains). Au lieu de prendre uniquement le cas  $k = 3$  où le nombre optimal de clusters est obtenu sur la figure 3.35, nous allons aussi tester le clustering avec  $k = 4$ . Les signaux dus aux bruits de l'excentrique sont notés *Exc*, ceux dus aux frottements entre fils sains par *FrotFS* et ceux dus aux frottements des fils coupés sur fils sains par *FrotFC*.

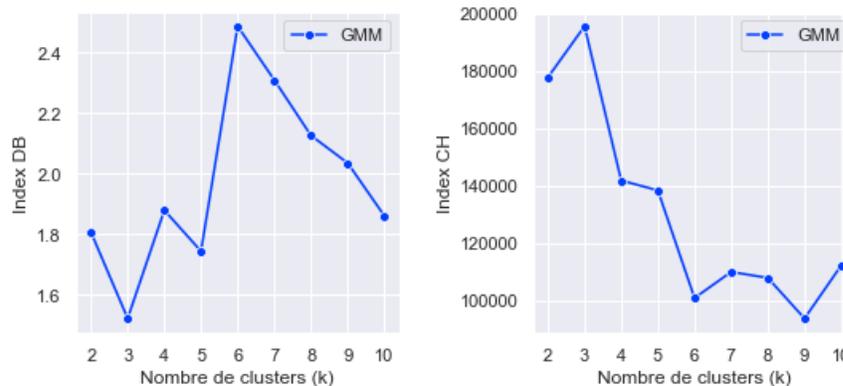


FIGURE 3.35 – Choix du nombre de clusters pour les données du câble avec fils coupés avec les indexes CH et DB

### 3.5.3.3 Clustering avec l'algorithme GMM :

En faisant le clustering avec l'algorithme GMM pour  $k = 3$  et  $k = 4$ , la distribution des clusters en fonction des deux premières composantes principales, les clusters notés sur chaque capteur et les clusters en fonction du nombre de fils coupés sont donnés sur la figure 3.36.

Pour associer chaque cluster à une source d'EA, nous nous baserons sur les histogrammes du nombre de signaux EA par capteur. En effet comme pour le cas du câble sain, les bruits de l'excentrique (*Exc*) sont essentiellement enregistrés par les capteurs C1 puis C2. Pour ce qui est des frottements des fils coupés sur les fils sains (*FrotFC*), nous avons remarqué dans l'analyse quantitative faite ci-dessus à la partie présentation des essais 3.5.1, avec la figure 3.31, qu'ils sont majoritaires sur le capteur C3. Et enfin les frottements entre fils sains (*FrotFS*) sont a priori notés au niveau de tous les capteurs. En adoptant cette logique, l'analyse suivante peut être faite.

- Pour le clustering avec  $k = 3$ , le cluster 2, majoritaire sur le capteur C1 (68.32 % des signaux), correspond aux bruits de l'excentrique. Nous pouvons également voir que l'évolution des signaux de ce cluster avec le nombre de fils coupés est assez stable. Le cluster 1 correspond aux frottements des fils coupés sur les fils sains. Ce cluster 1 représente 63.04

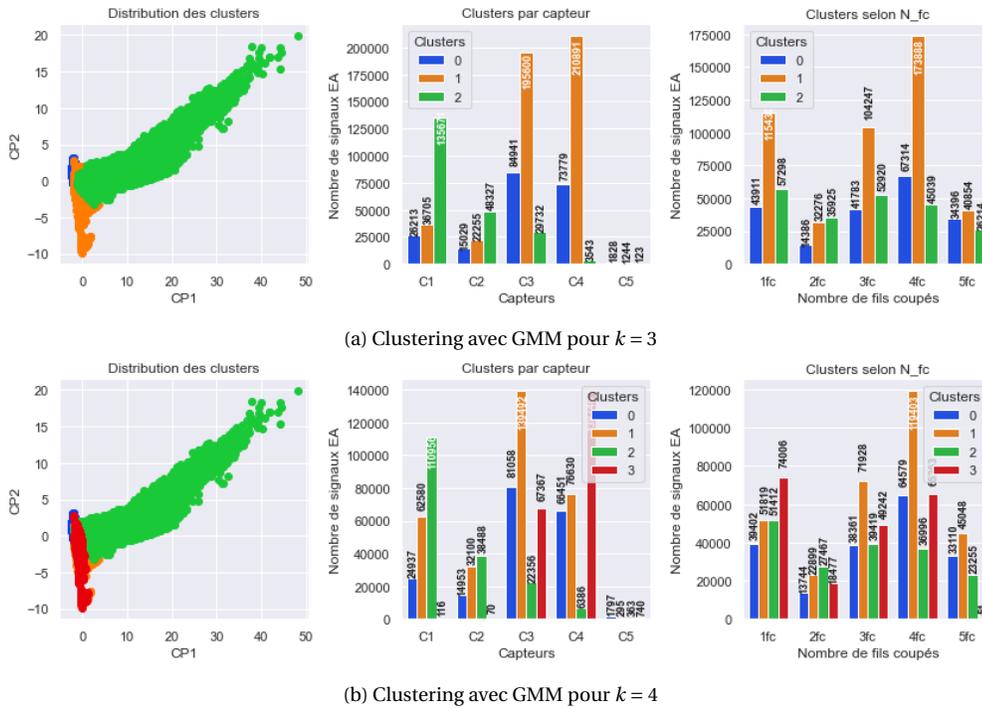


FIGURE 3.36 – Clustering avec GMM en faisant varier  $k$  de 3 à 4 pour les données obtenues sur le bi-couches 1 avec fils coupés : distribution des clusters en fonction des deux premières composantes principales, nombre de signaux de chaque cluster par capteur et nombre de signaux de chaque cluster en fonction du nombre de fils coupés

% des signaux du capteur C3. Et enfin le cluster 0 correspond aux frottements entre fils sains.

- Et pour  $k = 4$ , le cluster 2 représente les bruits de l'excentrique, les clusters 1 et 3 peuvent être associés aux frottements des fils coupés sur les fils sains et le cluster 0 aux frottements entre fils sains.

Pour valider ce clustering, nous allons effectuer la classification des données enregistrées lors des essais sur le câble avec quatre fils coupés en partie courante et pour des amplitudes d'excitation de 5 mm et 10 mm. Le nombre de signaux reçus par chaque capteur lors de ces essais est donné sur la figure 3.37.

Pour ces essais, nous pouvons voir avec cette figure 3.37 que le capteur C3 qui n'a presque pas reçu de signaux lors des essais sur le câble sain enregistre la plupart des signaux. Ces signaux proviennent, comme nous l'avons signalé ci-dessus, des frottements des fils coupés sur les fils sains. En faisant la classification de ces signaux, ceux enregistrés au niveau du capteur C3 devraient être classés essentiellement dans les cluster 1 pour  $k = 3$  et dans les clusters 1 et 3 pour  $k = 4$ .

Après avoir considéré les neuf premières composantes principales des données regroupées et filtrées de ces essais à 5 mm et 10 mm sur câble avec quatre fils coupés, la classification est effectuée avec l'algorithme GNB. Les résultats de cette classification sont donnés sur la figure 3.38. Pour  $k = 3$ , les clusters 0, 1 et 2 sont respectivement remplacés par *FrotFS*, *FrotFC* et *Exc*. Et

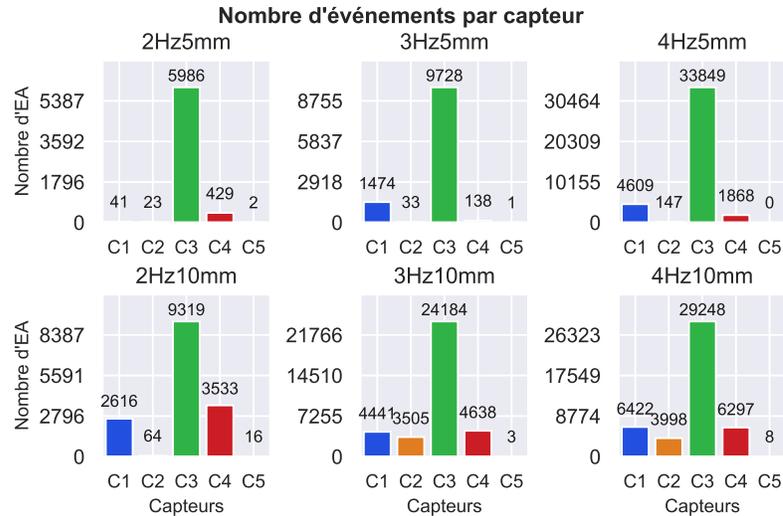
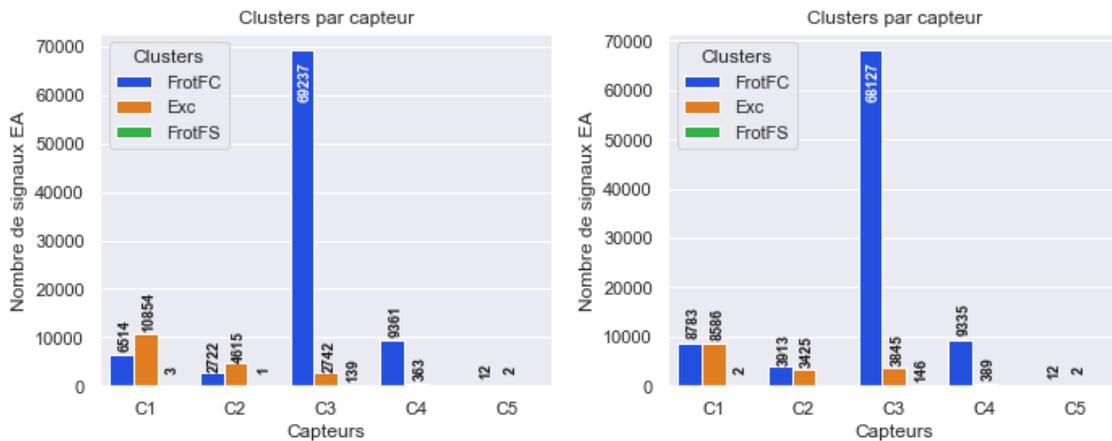


FIGURE 3.37 – Nombre de signaux d’EA enregistrés sur le bi-couches 1 avec quatre fils coupés et pour les amplitudes de déviation de 5 mm et 10 mm.

pour  $k = 4$ , les clusters 1 et 3 sont remplacés par *FrotFC*, le cluster 0 par *FrotFS* et le cluster 2 par *Exc*. L’analyse de la figure 3.38a montre que les signaux enregistrés sur les capteurs C3, C4 et C5



(a) Avec les clusters obtenus avec GMM pour  $k = 3$

(b) Avec les clusters obtenus avec GMM pour  $k = 4$

FIGURE 3.38 – Classification des signaux des essais à 5 mm et 10 mm du câble avec quatre fils coupés dans les clusters obtenus avec GMM pour  $k = 3$  et  $k = 4$

qui n’avaient presque pas enregistré de signaux lors des essais sur le câble sain (pour 5 et 10 mm d’amplitude, voir figure 3.8) sont essentiellement classés comme frottements des fils coupés sur fils sains : 96.01 % des signaux sur C3, 96.27 % des signaux sur C4 et 85.71 % signaux sur C5. Quant aux signaux sur le capteur C1 et C2, ils sont majoritairement identifiés comme bruits de l’excentrique : 62.48 % des signaux sur C1 et 62.89 % des signaux sur C2. Concernant les frottements entre fils sains, très peu de signaux sont classés comme tels. Ceci est en adéquation avec les analyses faites avec les données enregistrés lors des essais sur le câble sain où nous avons remarqué que les frottements entre fils sains apparaissent avec une amplitude d’excitation d’au

moins 15 mm. Les résultats ainsi obtenus sont très satisfaisants.

La figure 3.38b pour les clusters obtenus avec  $k = 4$  donne à peu près les mêmes résultats que pour la classification dans les clusters obtenus avec  $k = 3$ . Cependant, sur les capteurs C1 et C2, les signaux identifiés aux bruits de l'excentrique sont légèrement plus faibles que ceux identifiés aux frottements entre fils coupés. Nous en déduisons alors que le clustering avec  $k = 3$  donne une meilleure séparation des sources d'EA pour les essais sur câble avec fils rompus.

Conséquemment à cette analyse, nous avons déterminé l'évolution de l'émission acoustique du cluster 1 (FrotFC) pour  $k = 3$  en fonction du nombre de fils coupés et le résultat est présenté sur la figure 3.39. Nous remarquons qu'elle épouse la même forme que l'évolution de l'EA totale enregistrée en fonction du nombre de fils coupés. La baisse du nombre de signaux enregistrés pour cinq fils coupés (5fc) peut être expliquée par une diminution de l'énergie des frottements à partir de 5 fils coupés ou à une propagation plus difficile sur les fils restants.

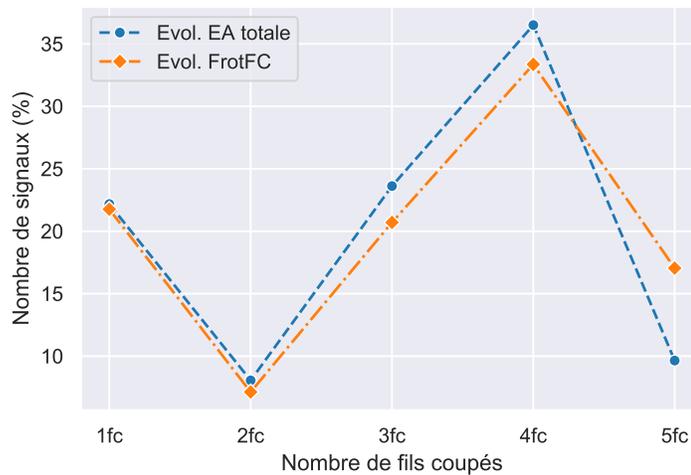


FIGURE 3.39 – Évolution du pourcentage du nombre de signaux en fonction du nombre de fils coupés de l'EA totale et de l'EA du cluster 1

Cette analyse nous a ainsi permis de distinguer les EA engendrées par des ruptures de fils dans le câble. De ce fait, il serait possible à partir de ces clusters, de distinguer des fils coupés dans un câble donné en effectuant une classification (analyse supervisée) de ces EA en fonction des clusters obtenus. En adoptant cette démarche, nous chercherons par la suite à détecter des ruptures de fils dans les ancrages, chose qui a été impossible via l'analyse dynamique.

### 3.6 Caractérisation de défauts dans l'ancrage

Après avoir effectué ces essais sur le bi-couches 1 avec des ruptures de fils en partie courante sur des fils externes, un câble de même type (deux couches et mêmes caractéristiques mécaniques et géométriques) a été testé. Sur ce deuxième câble que nous avons appelé bi-couches 2, des ruptures de fils, au nombre de trois, ont été effectuées dans l'ancrage avant de monter le câble sur le banc d'essais. Ces ruptures de fils ont été faites sur la couche interne à 1.5 cm de la

sortie d'ancrage. Pour effectuer ces ruptures, la couche externe est d'abord détournée en son extrémité jusqu'à atteindre la couche interne pour pouvoir y effectuer les ruptures de fils. Le câble est ensuite re-toronné.

Après avoir monté le matériel nécessaire qui est le même que celui utilisé lors des essais sur le bi-couches 1, les mêmes essais ont été réalisés sur ce deuxième bi-couches avec les mêmes paramètres d'essais (seuil, fréquences et amplitudes d'excitation, temps d'acquisition, paramètres temporels PDT, HDT et HLT). Les capteurs EA sont placés aux mêmes positions que lors des essais sur le bi-couches 1 (voir figure 3.40).

Le nombre de signaux d'EA reçus sur chacun des capteurs pour l'ensemble des essais réalisés

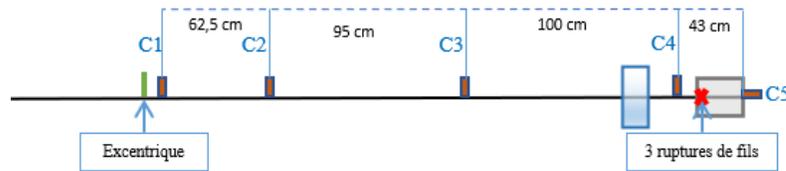


FIGURE 3.40 – Positionnement des capteurs et des ruptures de fils dans l'ancrage sur le bi-couches 2

est reporté sur la figure 3.41. Lors des essais sur le bi-couches 1 **sain**, aucun signal n'a presque

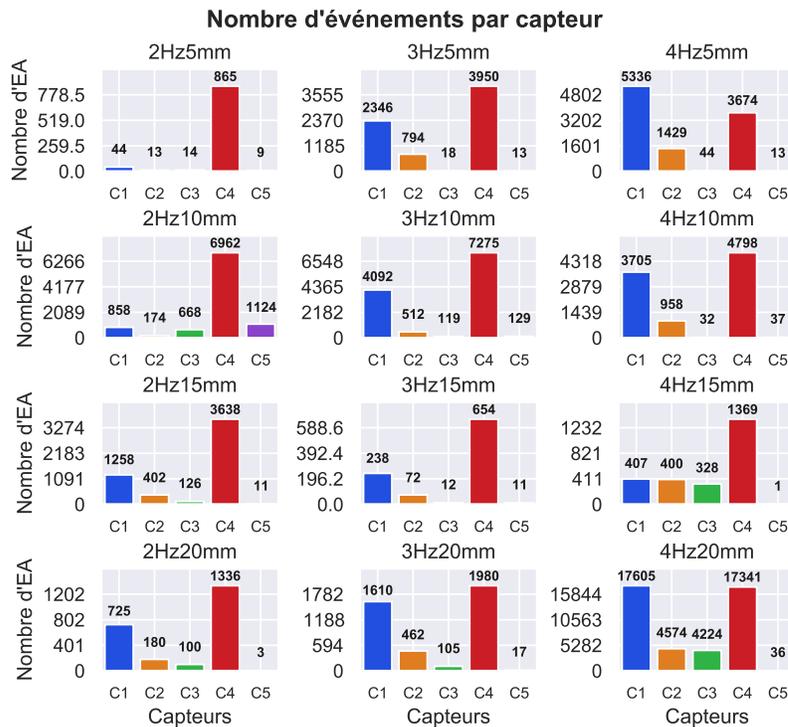


FIGURE 3.41 – Nombre de signaux d'EA enregistrés sur le bi-couches 2 avec trois fils coupés dans l'ancrage sur la couche interne

été enregistré au niveau des capteurs C3, C4 et C5 pour des amplitudes d'excitation de 5 mm et de 10 mm (voir figure 3.8 donnée plus haut). Contrairement à ces précédents essais, ici sur la figure 3.41 nous remarquons qu'une activité EA est enregistrée par les capteurs C3, C4 et C5

pour les amplitudes d'excitation de 5 mm et 10 mm. Cette émission acoustique peut ainsi être attribuée aux frottements des fils coupés en couche interne dans l'ancrage.

Pour identifier l'origine de cette EA, nous avons effectué une analyse supervisée de l'EA enregistrée lors de ces essais et pour des amplitudes d'excitation de 5 mm et 10 mm. Cette classification est effectuée en se basant sur les clusters identifiés avec les données du câble bi-couches 1 avec fils coupés en partie courante en utilisant l'algorithme GMM pour  $k = 3$ . En effectuant cette classification, nous supposons que les signatures des frottements entre fils sains et des frottements des fils rompus sur fils sains sont quasi identiques pour un câble avec fil coupé en partie et un câble avec fil coupé dans l'ancrage. Les résultats de cette classification sont donnés sur la figure 3.42.

Les résultats de la figure 3.42 montrent que les données enregistrées sur le capteur C4 sont

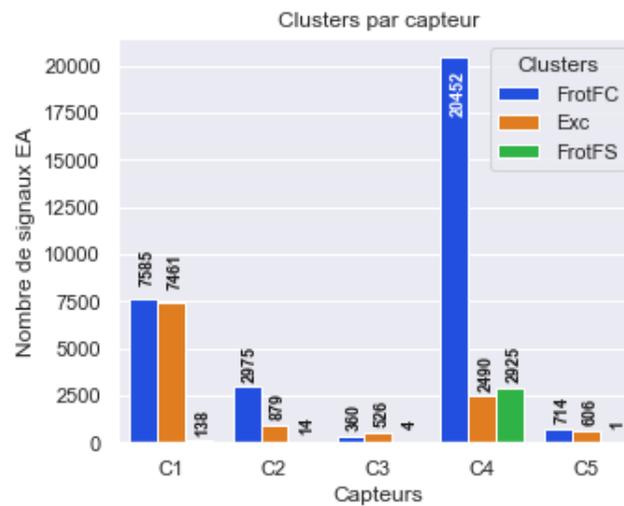


FIGURE 3.42 – Classification des signaux des essais à 5 mm et 10 mm d'amplitudes d'excitation du bi-couches 2 avec fils coupés dans l'ancrage

identifiés en grande majorité (79.07 %) aux frottements de fils coupés sur les fils sains (FrotFC). Les 9.63 % des signaux de ce capteur C4 et ceux notés au niveau des capteurs C3 et C5 classés comme bruits de l'excentrique (Exc) peuvent être attribués aux erreurs combinées du clustering et de la classification et/ou à une certaine ressemblance de la signature acoustique des signaux de frottements des fils rompus dans l'ancrage aux bruits de l'excentrique. Nous notons également que 11.31 % des signaux du capteur C4 sont classés comme frottements entre fils sains (FrotFS). À cette extrémité du câble, pour effectuer les ruptures de fils sur la couche interne, les fils ont été dé-toronnés puis re-toronnés. Ceci peut expliquer ces 11.31 % notés sur le capteur C4 pour des amplitudes d'excitation de 5 mm et 10 mm du fait d'un retournage imparfait qui engendre alors un glissement plus important des fils sains. En tout état de cause, cette classification effectuée montre que, du fait des ruptures de fils dans l'ancrage, les signaux dus aux frottements de fils coupés sur fils sains ont pu être détectés et isolés.

Après avoir réussi à séparer les différentes sources d'EA lors des essais sur câble sain et sur câbles avec fils coupés, les paramètres moyens associés aux signaux générés par chaque source sont

représentés sur la figure 3.43. Nous pouvons alors constater que les valeurs moyennes des paramètres des signaux dus aux frottements des fils rompus sur fils sains sont comprises entre celles des signaux générés par les frottements entre fils sains et celles des EA dues aux bruits de l'excentrique, exceptées les valeurs des paramètres fréquentiels (fréquence de pic maximale (PFrq) et fréquence centroïde (CFrq)).

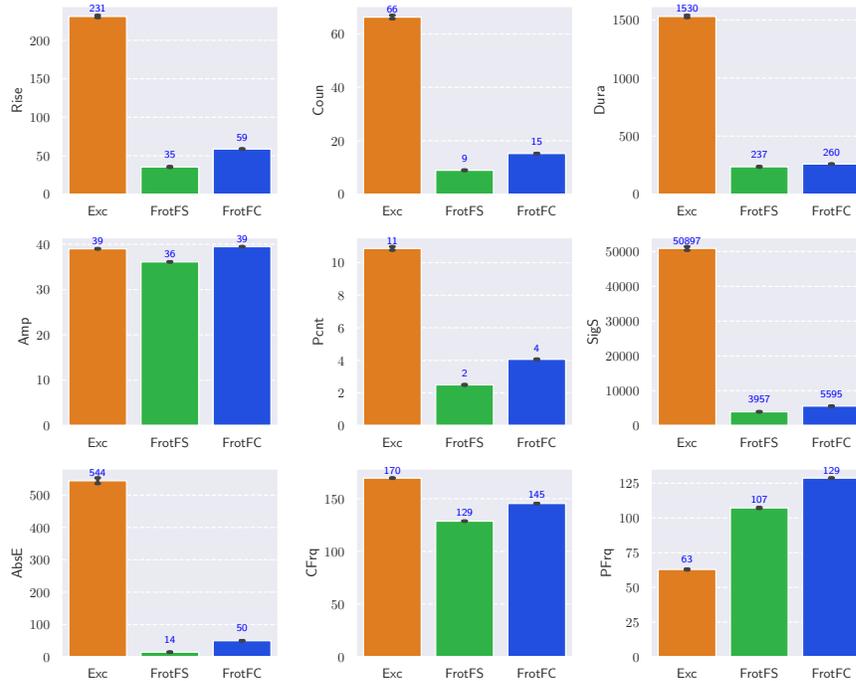


FIGURE 3.43 – Moyennes des paramètres d'EA des signaux identifiés aux frottements des fils coupés sur fils sains (FrotFC), aux frottements entre fils sains (FrotFS) et aux bruits de l'excentrique (Exc)

### 3.7 Conclusion sur l'analyse par émission acoustique

L'analyse de l'émission acoustique a été réalisée en faisant deux campagnes d'essais sur deux câbles bi-couches. Après avoir effectué des essais sur le premier câble (que nous avons appelé bi-couches 1) à l'état sain, des ruptures de fils y ont été introduites en partie courante sur la couche externe. Après cette première campagne, une deuxième campagne d'essais a été menée sur un câble bi-couches (appelé bi-couches 2) avec les mêmes caractéristiques mécaniques et géométriques que le premier câble. Les excitations des câbles pour déclencher une activité acoustique ont été réalisées à l'aide de l'excentrique en appliquant différents couples fréquence-amplitude.

Afin de distinguer les signaux générés par chacun des mécanismes en jeu, bruits émis par l'excentrique, micro-fissurations de résine, frottements entre fils sains, frottements des fils coupés sur fils sains et éventuels autres signaux de bruit parasite, une analyse paramétrique a été menée en premier lieu. L'analyse paramétrique a été effectuée après avoir sélectionné un nombre

restreint de paramètres par une analyse de corrélation. Cette analyse paramétrique basée sur les paramètres choisis aura permis de distinguer un cluster parasite avec des fréquences de pic (maximum du spectre fréquentiel) supérieures à 300 kHz. Ce paramètre est également apparu, en analyse paramétrique, comme le meilleur moyen pour séparer différents clusters de données d'EA. Ainsi les frottements entre fils sains ont des fréquences de pic variant de 100 à 200 kHz. Du fait de cet intervalle assez large, certains signaux attribués aux autres mécanismes (micro-fissurations de résine et bruits de l'excentrique) apparaissent également dans cet intervalle de fréquences de pic. Cependant cette analyse paramétrique apparaît comme un préliminaire pour sonder l'allure générale des données et une première étape avant l'analyse par apprentissage automatisé (Machine Learning).

Pour une meilleure séparation des sources d'EA, une analyse non supervisée ou clustering et une analyse supervisée ou classification ont été conduites. Ces analyses sont effectuées à partir des composantes principales des données obtenues par l'ACP. Le nombre de composantes principales retenues est basée sur la variance expliquée cumulée, une approche qui a permis de réduire la dimension des paramètres de treize à neuf.

Le clustering par l'algorithme de GMM (*Gaussian Mixture Model*) a donné de meilleurs résultats comparé à celui de K-Means et le GNB ou *Gaussian Naive Bayesian* a donné de meilleurs résultats pour la classification. Pour fixer a priori le nombre de clusters  $k$ , nous nous sommes basé sur les index DB et CH. Ces analyses par Machine Learning ont permis de déterminer les paramètres moyens des mécanismes de frottements entre fils sains, de frottements de fils rompus sur fils sains et de bruits générés par un phénomène externe au câble, ici l'excentrique.

En se basant sur cette approche d'apprentissage automatisé, il sera possible, en enregistrant de nouveaux signaux d'EA sur un câble du même type, de connaître s'il s'agit ou non de frottements de fils rompus et ainsi suivre leur évolution dans le temps, que ces ruptures soient situées en partie courante ou dans les parties cachées comme les ancrages. Cette approche peut également permettre de reconnaître des signaux de ruptures de fils dans un câble ayant eu lieu avant d'avoir effectué un état de référence de ce câble. L'analyse par émission acoustique apparaît ainsi comme complémentaire de l'analyse dynamique pour identifier des ruptures de fils dans les ancrages.

### 3.8 Annexe de l'analyse EA

- Diagrammes de distribution des onze paramètres d'EA choisis

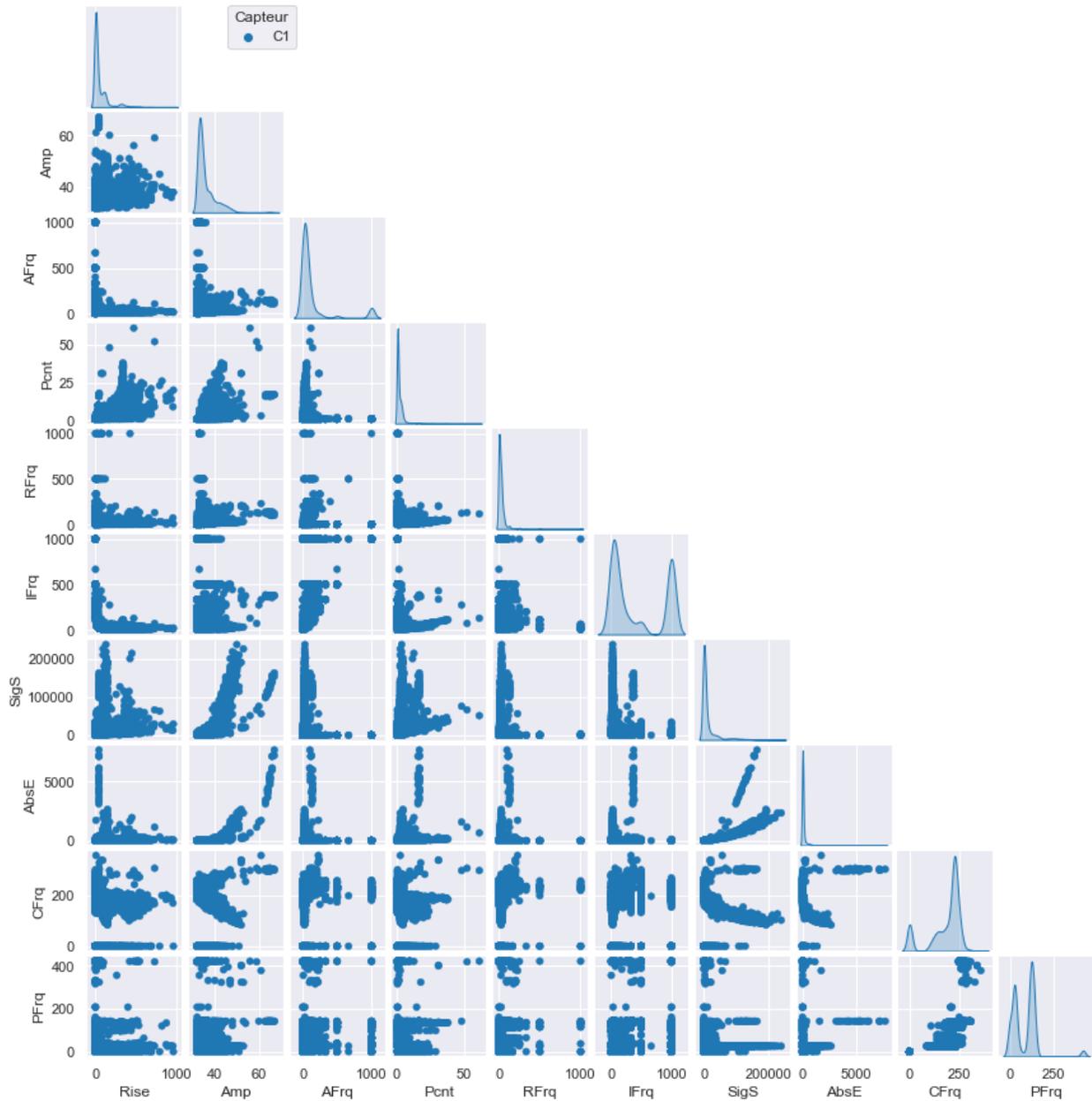


FIGURE 3.44 – Distribution des onze paramètres EA choisis pour les données recueillies aux niveaux de tous les capteurs

# CHAPITRE 4

## MÉTHODE MULTI-TECHNIQUES

*« L'observation recueille les faits; la réflexion les combine; l'expérience vérifie le résultat de la combinaison. »*

---

Denis Diderot

### Sommaire

---

4.1	Introduction	138
4.2	Présentation des essais expérimentaux	138
4.3	Caractérisation des défauts dans l'ancrage	139
4.4	Caractérisation des défauts en partie courante	143
4.4.1	Détection des ruptures de fils	143
4.4.2	Localisation des ruptures de fils	144
4.4.3	Quantification de la sévérité de l'endommagement	146
4.5	Déploiement des deux méthodes	147
4.6	Conclusion	148

---

## 4.1 Introduction

L'analyse dynamique réalisée a permis de caractériser (détecter, localiser et estimer la sévérité de l'endommagement) des défauts situés en partie courante d'un câble de type bi-couches ou monocouche (T15.7). Cependant lorsque ces défauts (ruptures de fils) sont situés dans les ancrages, cette approche dynamique ne permet pas de les caractériser.

Et quant à la méthode émission acoustique, il a été possible de distinguer les signaux dus aux ruptures de fils de ceux engendrés par d'autres mécanismes tels que les micro-fissurations de la résine, le bruit émis par l'excentrique et le frottement entre fils sains. Cette approche permet de ce fait d'identifier des ruptures de fils quelles que soient leurs positions sur le câble, à condition que les capteurs soient positionnés suffisamment près des zones de ruptures pour pouvoir détecter les signaux.

Dans un souci de valider cette complémentarité entre ces deux approches, des essais ont été menés sur un câble de type bi-couches.

## 4.2 Présentation des essais expérimentaux

Les essais sont menés sur un câble de type bi-couches ayant les mêmes caractéristiques mécaniques et géométriques que ceux utilisés précédemment ; ce câble sera nommé bi-couches 3. Ces essais ont été réalisés sur le banc de sollicitation mécanique utilisé pour les essais précédents avec les mêmes chaînes d'acquisition : la chaîne DISP à huit voies pour l'EA, le Quantum MX1615B/1601 et le logiciel CATMAN pour les vibrations du câble. Huit capteurs sans contact de type laser ont également été montés sur le câble de 6230 mm de longueur et sont combinés avec six capteurs d'EA AE204A, les mêmes qui ont été utilisés pour les essais EA précédents. La position des capteurs EA et lasers est donnée sur la figure 4.1. Les capteurs C3 et C4 sont positionnés respectivement à 5 cm avant le capteur laser L5 et à 5 cm après le capteur laser L6. Ces capteurs entourent ainsi la zone où les ruptures de fils en partie courante seront effectuées. Pour connaître l'influence de la proximité des capteurs avec les ruptures de fils sur l'EA détectée

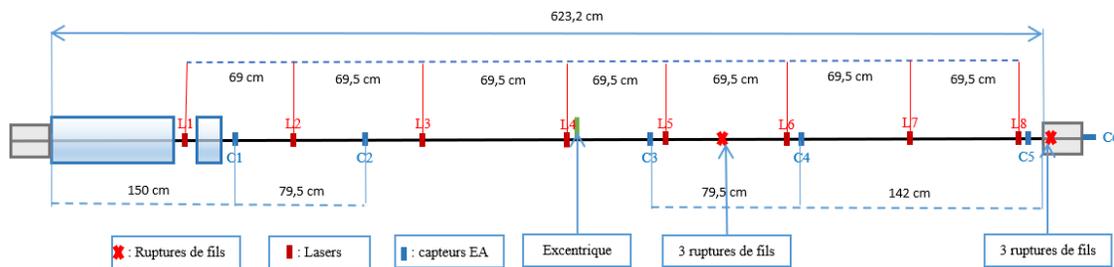


FIGURE 4.1 – Position des capteurs d'EA et lasers sur le câble bi-couches 3

les capteurs C1 et C2 sont positionnés près des capteurs L1 et L2 de telle sorte que les distances C1-C2 et C3-C4 soient égales. Les capteurs C5 et C6 permettront de voir l'EA générée par les ruptures de fils dans l'ancrage. Ce faisant la procédure adoptée pour ces essais est la suivante :

- Avant de monter le culot d’ancrage, trois ruptures de fils sont effectuées sur la couche interne du câble à l’intérieur du culot. Cet état du câble avec seulement des ruptures de fils dans l’ancrage sera considéré comme l’état 0 du câble ou l’état de référence
- Tension du câble avec trois ruptures de fils dans l’ancrage à 30 % de sa force limite, soit à 153.9 kN
- Montage des huit capteurs sans contact laser qui enregistrent les déplacements transversaux du câble, des capteurs d’EA AE204A
- Excitation avec un marteau instrumenté à raison de 4 coups près de chaque capteur laser. Les déplacements sont recueillis, comme pour les essais précédents, pendant 45 secondes.
- Pour les besoins de l’EA, excitation avec l’excentrique en faisant varier les couples fréquences-amplitude de déviation. L’analyse quantitative des essais EA précédents a montré que le nombre de signaux enregistrés est plus influencé par l’amplitude d’excitation que la fréquence. Ainsi pour ces essais la fréquence d’excitation qui est utilisée est fixée à 2Hz et les amplitudes de déviation de l’excentrique sont successivement fixées à 5 mm, 10 mm et 15 mm. L’excitation avec un couple fréquence/amplitude donné est appliquée pendant 10 minutes, correspondant au temps durant lequel les signaux d’EA sont enregistrés.
- Création d’une première rupture de fil, jusqu’à 3 fils coupés, en partie courante. La position des ruptures est indiquée sur la figure 4.1, elle est à mi-distance entre les capteurs lasers L5 et L6 et des capteurs d’EA C3 et C4. Après chaque rupture de fil les mêmes essais que sur le câble avec des ruptures de fils dans l’ancrage (état 0) sont répétés.

### 4.3 Caractérisation des défauts dans l’ancrage

Nous avons montré dans la partie dynamique qu’il est impossible de détecter encore moins de localiser des ruptures de fils dans l’ancrage. En effet la détection aurait pu être possible si les ruptures de fils dans l’ancrage avaient eu lieu après avoir obtenu les paramètres modaux, notamment les fréquences ou déformées modales, du câble sain et que les ruptures seraient intervenues sans avoir retendu le câble à sa tension initiale. Les ruptures de fils, dans un tel cas, s’accompagneraient d’une variation de ces paramètres modaux qui permettrait de détecter les ruptures. Ceci étant, nous allons effectuer la caractérisation de ces ruptures de fils dans l’ancrage par la méthode d’émission acoustique uniquement.

Le nombre de signaux enregistrés sur chaque capteur pour les essais 2Hz5mm, 2Hz10mm et 2Hz15mm sur le câble à l’état de référence (avec uniquement des ruptures de fils dans l’ancrage) est présenté sur la figure 4.2. Lors de ces essais sur le câble à l’état de référence, les sources d’EA possibles sont le bruit de l’excentrique, les micro-fissurations de la résine, les frottements entre fils sains, les frottements des fils coupés dans la couche interne située dans l’ancrage et d’éventuelles sources acoustiques parasites. Avec la figure 4.2, nous remarquons que le nombre

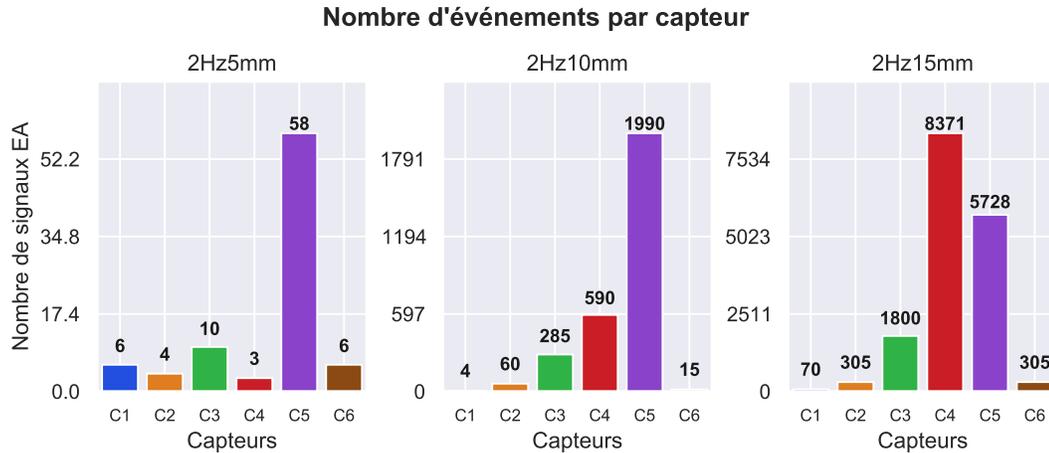


FIGURE 4.2 – Nombre de signaux d'EA enregistrés sur chaque capteur pour les essais réalisés sur le bi-couches 3 à l'état 0

de signaux enregistrés augmente avec l'amplitude d'excitation. Ce nombre passe de 58 signaux pour 5 mm sur le capteur C5 à 1990 signaux sur ce même capteur pour 10 mm et à 5728 signaux pour une amplitude 15 mm. Nous voyons également que la plus grande activité EA est obtenue avec les capteurs les plus proches de l'ancrage (C3, C4 et C5) dans lequel les ruptures de fils sont situées. Avec 15 mm d'amplitude d'excitation, le capteur C1 placé à 150 cm de la sortie d'ancrage sans ruptures de fils n'enregistre que 70 signaux alors que le capteur C4 placé à 142 cm de la sortie d'ancrage avec ruptures de fils enregistre 8371 signaux. Cette augmentation des signaux en fonction de la proximité de la zone de rupture de fils montre bien que ces signaux sont engendrés par les frottements des fils rompus sur leurs voisins intacts dans l'ancrage. Le capteur C6 placé sur la résine ne reçoit que très peu de signaux pour les différentes amplitudes d'excitation. Ceci est dû au fait que ce capteur reçoit principalement les micro-fissurations de la résine qui sont peu émissives et le milieu résine n'est pas un bon propagateur des ondes émises par les frottements des fils coupés. Sur ce capteur C6, plus de signaux sont enregistrés pour une amplitude 15 mm d'excitation, ce qui peut s'expliquer par le fait que, à cause d'une force d'excitation plus importante, plus de micro-fissurations sont générées.

Cette détection des ruptures de fils a également été réalisée par analyse supervisée des données enregistrées lors de ces essais.

L'analyse supervisée s'est basée sur les données labellisées des essais précédents sur le bi-couches 1 avec fils coupés où les signaux de chaque source sont identifiés. Les paramètres de ces signaux sont les  $N_{cp} = 9$  composantes principales qui ont été utilisées pour effectuer le clustering.

Après avoir filtré et réalisé l'ACP des données de ces présents essais sur le bi-couches 3 avec fils coupés dans l'ancrage, la classification a été effectuée avec l'algorithme GNB. Les résultats obtenus sont donnés sur la figure 4.3.

- Pour l'essai 2Hz5mm du bi-couches 3 (figure 4.3a), nous remarquons que l'essentiel des signaux (89.09 %) enregistrés sur le capteur C5 sont identifiés comme frottements des fils coupés sur fils sains (FrotFC). Ceci montre ainsi que les ruptures de fils dans l'ancrage sont

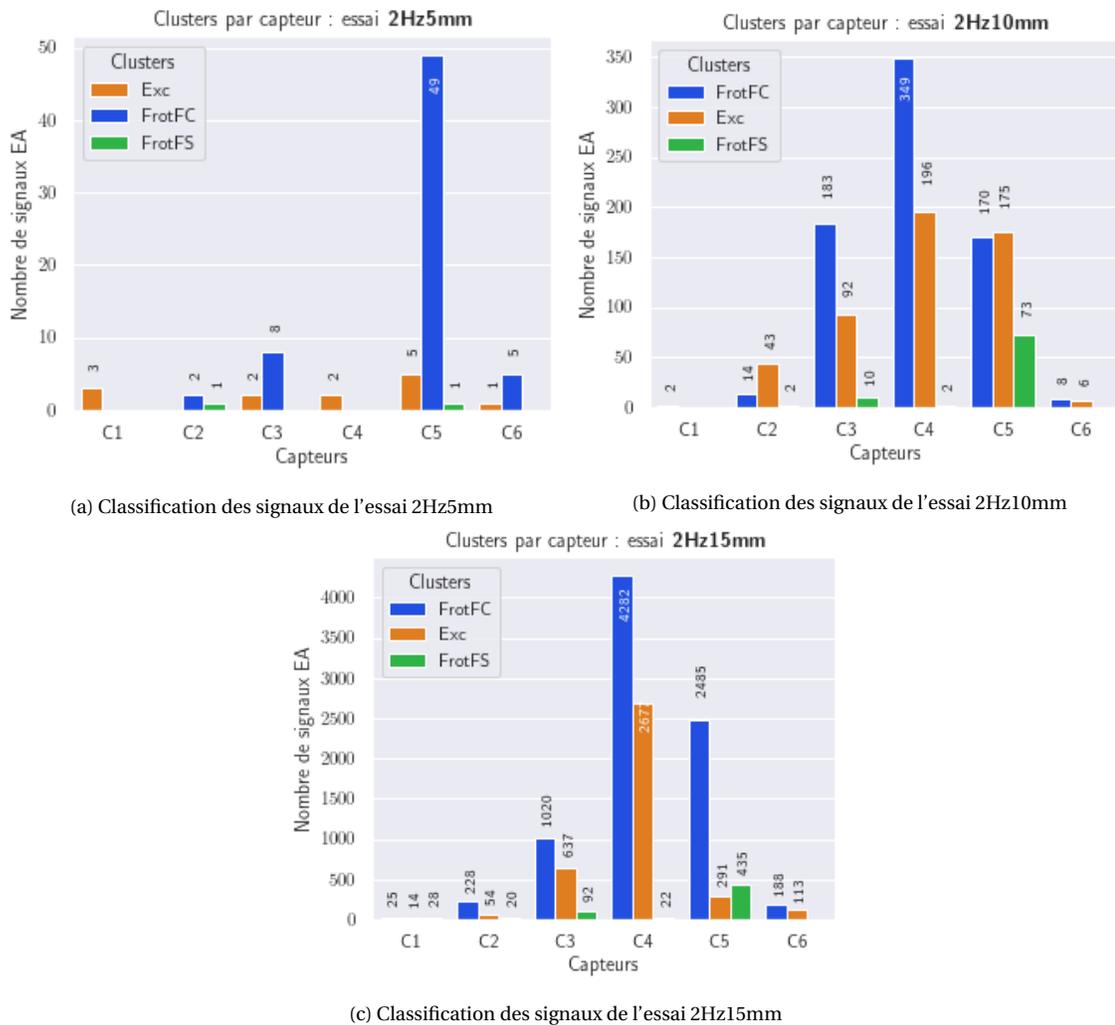


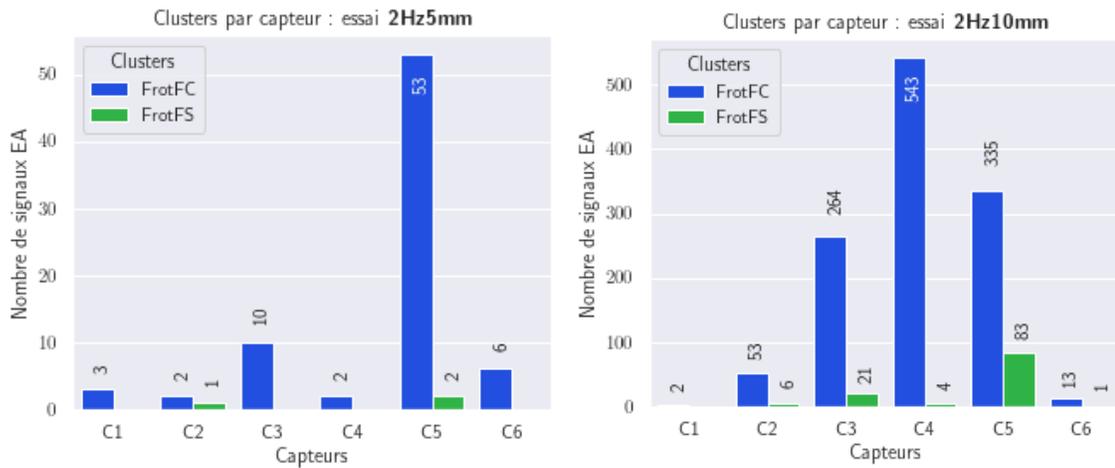
FIGURE 4.3 – Nombre de signaux identifiés à chaque source d'EA par classification des données enregistrées sur le câble bi-couches 3 avec fils coupés dans l'ancrage

détectées et identifiées avec cet essai. Les autres signaux sont identifiés principalement au bruit de l'excentrique mais leur nombre est négligeable (9.09 % sur le capteur C5).

- Avec l'essai 2Hz10mm, nous constatons également que l'essentiel des signaux sont identifiés aux frottements des fils coupés, principalement sur le capteur C4 où les signaux sont associés à 63.80 % à la classe FrotFC. Cependant nous notons aussi avec cet essai que sur le capteur C5 placé à la sortie d'ancrage, le nombre de signaux identifiés comme bruit de l'excentrique (41.87 %) est quasi égal au nombre de signaux identifiés comme frottements de fils coupés sur fils sains (40.67 %). Ceci peut s'expliquer par les erreurs de clustering et de classification ou par des signaux parasites qui ont été enregistrés durant cet essai.
- Avec l'essai 2Hz15mm, nous remarquons également que les signaux des différents capteurs sont essentiellement identifiés comme frottements des fils coupés sur fil sains. En outre sur le capteur C5 placé à la sortie d'ancrage, 77.39 % des signaux sont classés comme frottements de fils coupés sur fils sains.

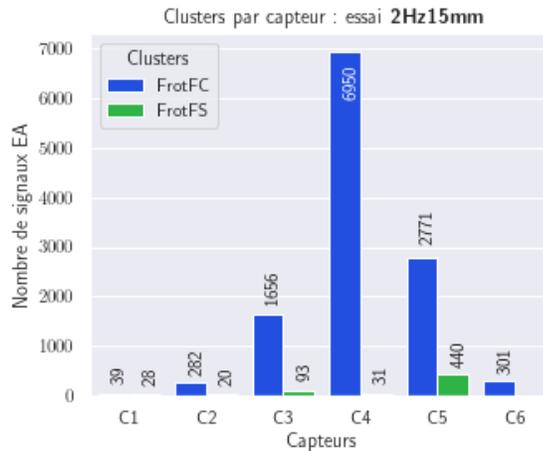
Cette classification a montré qu'un nombre significatif de signaux est parfois identifié comme bruit de l'excentrique (par exemple 41.87 % des signaux du capteur C5 pour l'essai 2Hz10mm). Cependant vu le positionnement des capteurs lors de ces essais sur le bi-couches 3 et les résultats obtenus lors de l'analyse des signaux des bi-couches 1 et 2 où seuls les capteurs C1 et C2 placés respectivement à 10 cm et 75.5 cm enregistreraient les signaux dus à l'excentrique, ces derniers (signaux dus à l'excentrique) peuvent être négligés. Ainsi pour ne pas biaiser la classification, elle est refaite en n'utilisant que les données labellisées avec les frottements des fils rompus sur fils sains (FrotFC) et les frottements entre fils sains (FrotFS). Les résultats de cette nouvelle classification sont donnés sur la figure 4.4.

Nous remarquons alors que les signaux des essais 2Hz5mm, 2Hz10mm et 2Hz15mm sont essen-



(a) Classification des signaux de l'essai 2Hz5mm

(b) Classification des signaux de l'essai 2Hz10mm



(c) Classification des signaux de l'essai 2Hz15mm

FIGURE 4.4 – Nombre de signaux identifiés à chaque source d'EA par classification des données enregistrées sur le câble bi-couches 3 avec fils coupés dans l'ancrage

tiellement identifiés comme frottements de fils coupés sur fils sains (FrotFC). Les frottements entre fils sains sont principalement notés sur le capteur C5 avec 19.86 % des signaux de ce capteur pour l'essai 2Hz10mm et 13.70 % pour l'essai 2Hz15mm. Le fait que les frottements entre

fil sains sont notés à cet endroit se justifie par le fait que les flexions y sont plus importantes comme remarqué plus haut.

Avec cette classification des signaux enregistrés lors des essais sur le bi-couches 3, nous avons ainsi réussi à détecter la présence de fils rompus dans l’ancrage.

Après les ruptures de fils dans l’ancrage, nous allons effectuer la caractérisation des fils rompus en partie courante.

## 4.4 Caractérisation des défauts en partie courante

Après avoir effectué ces essais sur le bi-couches 3 avec des fils rompus dans l’ancrage, des ruptures de fils, au nombre de trois, ont été successivement créées en partie courante. La position de ces ruptures de fils est indiquée sur la figure 4.1 donnée plus haut.

### 4.4.1 Détection des ruptures de fils

Pour la détection des ruptures de fils en partie courante, nous avons montré dans la partie dynamique qu’elle est faisable en utilisant la variation des fréquences naturelles avec les paramètres de pourcentage de changement en fréquences naturelles notés  $C_i$  (%). Ainsi après avoir calculé les paramètres modaux pour ce bi-couches 3 par la méthode FDD (*Frequency Domain Decomposition*), les fréquences naturelles obtenues pour chaque état du câble (état 0 et avec fils coupés en partie courante) sont reportées dans le tableau 4.1 et sur la figure 4.5. Les résultats

État du câble		Modes			
		1	2	3	4
État 0	$f_n$ (Hz)	20.60	41.27	62.20	83.61
	$C_v$ (%)	0.00	0.12	0.36	0.67
1 FC	$f_n$ (Hz)	20.02	39.97	60.41	81.11
	$C_v$ (%)	0.00	0.06	0.44	0.70
2 FC	$f_n$ (Hz)	19.30	38.41	57.99	77.88
	$C_v$ (%)	0.16	0.05	0.48	0.79
3 FC	$f_n$ (Hz)	18.11	36.51	55.03	74.01
	$C_v$ (%)	0.00	0.04	0.40	0.87

TABLEAU 4.1 – Fréquences naturelles du bi-couches 3 pour l’état 0 (avec seules ruptures de fils dans l’ancrage) et pour un (1FC), deux (2FC) et trois (3FC) fils coupés en partie courante

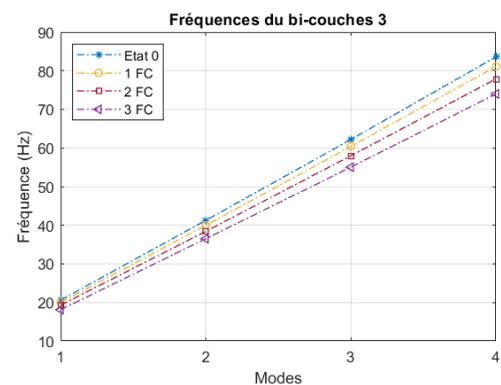


FIGURE 4.5 – Variation des fréquences naturelles du bi-couches3

tats obtenus montrent que les fréquences naturelles diminuent quand le nombre de fils coupés augmente. Nous notons également que les coefficients de variation des fréquences sont assez faibles (inférieurs à 1%) montrant ainsi leur stabilité.

Après avoir calculé les fréquences naturelles, les paramètres de pourcentages de changement en fréquences naturelles ( $C_i$  (%)) sont calculés et présentés dans le tableau 4.2 et sur la figure 4.6. Pour rappel, ces pourcentages de changement en fréquences naturelles pour chaque fil coupé sont calculés par rapport aux fréquences naturelles de l'état de référence :

$$C_i (\%) = 100 \times \frac{f_n^0 - f_n^d}{f_n^0}$$

où  $f_n^0$  et  $f_n^d$  sont respectivement les fréquences naturelles du câble à l'état 0 de référence et celles du câble endommagé (ici par rupture(s) de fil(s)).

Pour un état donné du câble (un fil coupé en partie courante - 1 FC, 2 FC ou 3 FC), la valeur

# Modes	$C_i$ (%)		
	1 FC	2 FC	3 FC
<b>1</b>	2.85	6.33	12.01
<b>2</b>	3.15	6.91	11.53
<b>3</b>	2.88	6.77	11.53
<b>4</b>	2.99	6.85	11.48
<b>Moyenne</b>	$2.97 \pm 0.12$	$6.72 \pm 0.23$	$11.66 \pm 0.25$

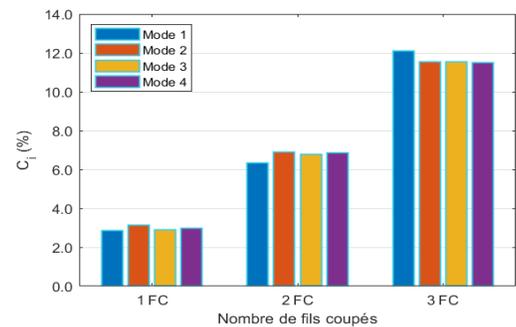


TABLEAU 4.2 – Pourcentage de changement en fréquences naturelles ( $C_i$ ) du bi-couches 3 en fonction du nombre de fils coupés

FIGURE 4.6 – Pourcentage de changement en fréquences naturelles ( $C_i$ ) du bi-couches 3

de  $C_i$  est quasi constante quel que soit le mode considéré et augmente avec le nombre de fils coupés. Pour un fil coupé, la valeur moyenne sur les quatre premiers modes du paramètre  $C_i$  est de 2.97 % avec un écart-type de 0.12. Pour deux et trois fils coupés, il est respectivement de 6.72 % ( $\pm 0.23$ ) et de 11.66 % ( $\pm 0.25$ ). Ces valeurs du paramètres  $C_i$  combinées aux faibles valeurs des coefficients de variation des fréquences naturelles montrent ainsi l'existence de défauts dans le câble bi-couches 3.

#### 4.4.2 Localisation des ruptures de fils

Pour la localisation des ruptures de fils en partie courante sur le bi-couches 3, nous allons utiliser en premier lieu la méthode dynamique à travers le paramètre SRMCD (*Sum of Relative Modal Curvatures Differences*) que nous avons proposé dans la partie dynamique.

Après avoir déterminé les déformées modales du câble, les paramètres SRMCD sont alors calculés. La localisation d'un défaut est ainsi obtenue au niveau de la valeur maximale du paramètre SRMCD. Les résultats obtenus pour les trois ruptures de fils en partie courante du bi-couches 3 sont présentés sur la figure 4.7. Sur cette figure, nous pouvons voir que pour un et trois fils coupés, le maximum des valeurs prises par le paramètre SRMCD est noté au niveau du capteur laser sans contact L5, situé à 34.75 cm de la position réelle des ruptures de fils. Ainsi nous pouvons dire que pour ces deux cas, la localisation est plutôt satisfaisante. Cependant pour deux fils

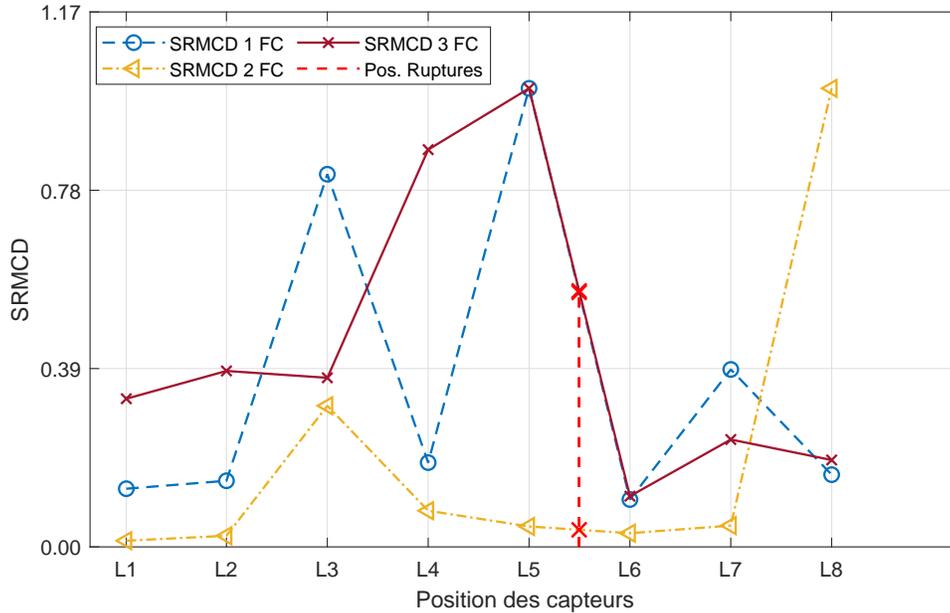


FIGURE 4.7 – Localisation des défauts en partie courante sur le bi-couches 3 avec les paramètres SRMCD

coupés, le maximum du paramètre SRMCD est obtenu au niveau du laser L8 et la rupture de fils en partie courante n’a pas pu être localisée. Cette non localisation des ruptures en partie courante pour deux fils coupés peut s’expliquer par un niveau de bruit important dans les données recueillies lors de ces essais.

Pour affiner la localisation, les résultats ci-dessus vont être combinés avec les données d’émission acoustique. Nous allons également voir l’influence de la position des capteurs EA sur la localisation. Nous allons ainsi étudier la différence entre les localisations obtenues en plaçant les capteurs C3 et C4 autour de la zone de ruptures de fils en partie courante et celles réalisées par les capteurs C1 et C2 sur une zone où il n’y a pas de ruptures de fils. De même, nous verrons également les localisations obtenues avec les capteurs C5 et C6 qui entourent les ruptures de fils dans l’ancrage, des ruptures non localisées par la méthode dynamique.

La localisation des signaux est obtenue en temps réel lors de la réalisation des essais. Cette localisation est effectuée avec le logiciel AEWIn par la méthode linéaire à partir de la vitesse de propagation des ondes ( $C_0$ ) dans le câble selon la formule suivante [84]

$$X = \frac{1}{2}C_0\Delta T = \frac{1}{2}C_0(T_2 - T_1)$$

$\Delta T$  est la différence des temps d’arrivée  $T_1$  et  $T_2$  respectivement sur deux capteurs 1 et 2.

$C_0$  a été déterminée expérimentalement en faisant quelques essais de «cassés de mine».

Ainsi en ajoutant les localisations des événements acoustiques sur la figure 4.7 des paramètres SRMCD donnée ci-dessus, les résultats obtenus sont illustrés sur la figure 4.8.

Avec cette figure nous pouvons voir que les localisations des événements EA sont situées entre les capteurs C3 et C4 encadrant la zone de rupture en partie courante et aussi au niveau du cap-

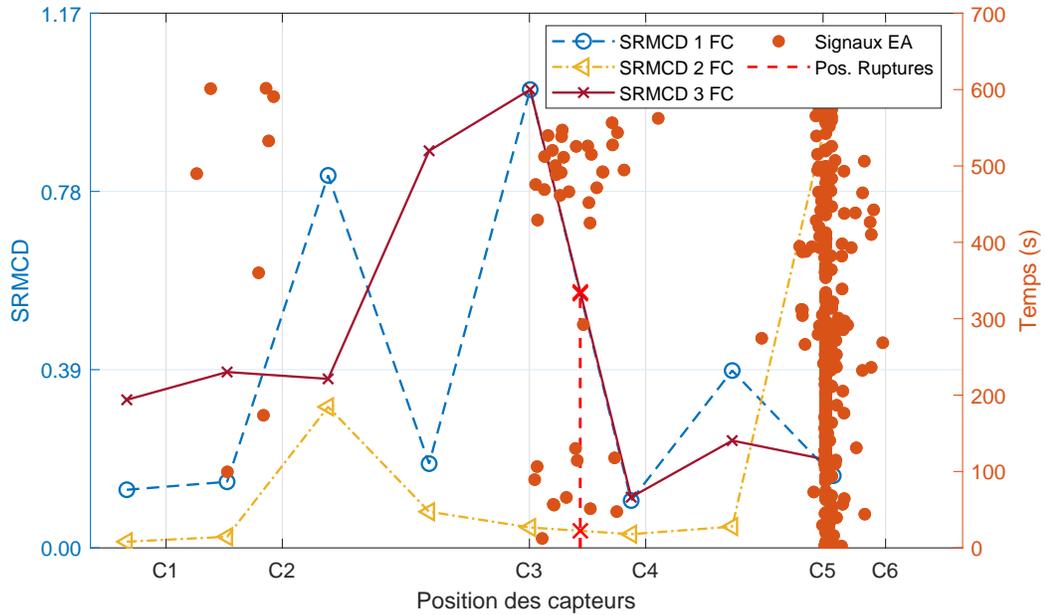


FIGURE 4.8 – Localisation des ruptures de fils en partie courante et dans les ancrages par combinaison des paramètres SRMCD et les événements acoustiques

teur C5 en sortie d’ancrage où se situent les ruptures de fils. Quant aux capteurs C1 et C2 placés dans une zone où il n’y a pas de ruptures de fils, très peu d’événements (huit) sont localisés. 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 ne se produisent pas exactement à la position de la rupture mais de part et d’autre (dans la zone de réancrage) du point de rupture avec les deux bouts du fil rompu. En utilisant la localisation par EA, nous passons ainsi d’une zone de rupture donnée par les paramètres dynamiques SRMCD à un point de rupture, plus précis.

#### 4.4.3 Quantification de la sévérité de l’endommagement

Après avoir effectué la détection et la localisation des ruptures de fils, nous allons à présent estimer la sévérité de l’endommagement en recherchant le nombre de fils rompus. Pour ce faire, la méthode empirique donnée dans la partie dynamique est utilisée. Pour rappel cette méthode estime le nombre de fils rompus ( $N_{fr}$ ) par une loi puissance à partir des paramètres de pourcentages de changement en fréquences naturelles ( $C_i$ ). Cette relation empirique est :

$$N_{fr} = \frac{1.45 \times N_{ft}}{100} \times (C_i)^{0.95}$$

où  $N_{ft}$  est le nombre total de fils constituant le câble.

Cette approche permet d’estimer uniquement les ruptures de fils apparues après l’état de ré-

férence, pour notre étude après ruptures de fils dans l'ancrage. En utilisant cette relation, le nombre de fils rompus déterminés par cette méthode est donné dans le tableau 4.3. Ce tableau

Etat du câble	$C_i$ (%)	$N_{fr}$
1 FC	2.97	1
2 FC	6.72	2
3 FC	11.66	3

TABLEAU 4.3 – Détermination de la sévérité de l'endommagement en estimant le nombre de fils coupés ( $N_{fr}$ )

4.3 montre que pour le câble avec un, deux et trois fils coupés en partie courante, le nombre exact de fils rompus est donné par cette approche empirique.

## 4.5 Déploiement des deux méthodes

Telle qu'elle est abordée, l'analyse faite ci-dessus permet de définir une certaine démarche opérationnelle afin d'ausculter des câbles donnés. Ainsi en se basant sur la complémentarité des deux techniques de CND, au lieu de les utiliser en même temps, ce qui est faisable, un phasage de l'inspection non destructive peut être élaboré.

- **Phase 1 :** Cette première phase consiste à utiliser la méthode dynamique afin de détecter des variations des paramètres modaux résultant d'endommagements qui se sont produits dans le câble. Pour cette phase, une installation *légère* peut suffire à détecter des changements de paramètres modaux. En effet, étant donné que la détection d'endommagements a uniquement été réalisée avec les variations des fréquences naturelles, un seul capteur peut permettre d'identifier ces fréquences naturelles. De surcroît en utilisant l'analyse modale opérationnelle, nul besoin d'un excitateur mécanique pour mettre le câble en vibration, un marteau non instrumenté ou une excitation ambiante pourrait suffire.
- **Phase 2 :** Après avoir détecté les changements des paramètres modaux, il est alors possible d'estimer la sévérité de l'endommagement via la formulation empirique proposée. Ainsi en fonction d'un seuil défini de sévérité d'endommagement, il peut être décidé de mener plus loin l'auscultation afin de localiser les défauts.
- **Phase 3 :** Pour effectuer la localisation des endommagements, il sera alors nécessaire d'effectuer un maillage du câble par l'utilisation de plusieurs capteurs pour obtenir les paramètres modaux, notamment les déformées modales. Ceci permettra de déterminer les potentielles zones de ruptures en partie courante par le calcul des paramètres SRMCD.
- **Phase 4 :** À partir de ces potentielles zones de ruptures, des capteurs d'EA seront placés au niveau de ces zones et permettront de préciser la localisation et confirmer si les signaux détectés proviennent bien de frottements de fils rompus ou d'une autre source. Si la localisation avec l'EA va de soi quand les conditions de propagation des signaux sont bonnes

(distance capteur-source, niveau énergétique des signaux), l'identification de la source est d'autant plus aisée que l'on possède déjà une base de données labellisées des différentes signatures EA possibles.

Ce phasage a pour intérêt de présenter une méthodologie progressive et donc moins onéreuse pour les gestionnaires/sociétés de diagnostic en utilisant que les outils nécessaires à chaque phase. Cependant ceci n'empêche pas de pouvoir utiliser les deux méthodes en même temps pour plus de fiabilité dans la phase de détection.

### 4.6 Conclusion

En effectuant l'analyse des données recueillies sur ce bi-couches, nous avons montré qu'il est possible, en utilisant notamment des données déjà labellisées, de détecter des fils rompus sur un câble. Cette approche est d'autant plus pertinente lorsque ces ruptures de fils sont situées dans les ancrages du câble où les méthodes dynamique ne permettent pas de les détecter. Elle permet également de pouvoir détecter des défauts qui se sont produits avant un état de référence, à condition que les capteurs EA soient placés suffisamment près des zones de ruptures pour pouvoir enregistrer les signaux d'EA dus aux frottements des fils rompus. Pour optimiser ce placement des capteurs, l'analyse dynamique permet d'identifier les zones de ruptures via les paramètres SRMCD. Ainsi nous avons montré qu'en plaçant les capteurs EA au niveau d'une zone de rupture identifiée par la méthode dynamique, la localisation est précise à 5 cm près de la position réelle des fils rompus. En outre, en se basant sur les fréquences naturelles et leurs variations avec le nombre de fils coupés (les paramètres  $C_i$ ), la méthode empirique proposée dans la partie dynamique a ici également permis d'obtenir le nombre exact de fils coupés (après l'état de référence).

Ainsi en adoptant une démarche appropriée, il est possible de combiner ces deux méthodes non destructives en une **méthode multi-technique** capable de **caractériser des fils rompus dans des câbles** indépendamment de leur localisation et de leur période d'apparition (avant ou après un état de référence).

# CONCLUSION GÉNÉRALE

Les travaux de recherche issus de la littérature ont démontré que les dégradations pouvant affecter les câbles des ouvrages du Génie Civil sont essentiellement la corrosion et les ruptures de fils. Vu l'importance de ces câbles dans la tenue structurale de ces ouvrages, il est important de mettre en place des outils et méthodologies permettant de suivre leurs états de santé (monitoring). Pour ce faire, dans cette thèse, du fait de leur complémentarité, deux méthodes de contrôle non destructif sont combinées : les méthodes dynamiques et l'émission acoustique. Ces deux méthodes sont ainsi utilisées pour la caractérisation de défauts de type fils rompus dans les câbles. Pour un suivi complet de défauts dans une structure, quatre principaux niveaux sont définis :

- Niveau 1 : la détection du défaut
- Niveau 2 : la localisation du défaut
- Niveau 3 : la quantification du défaut
- Niveau 4 : l'estimation de la durée de vie résiduelle

À travers la variation des paramètres modaux (fréquences naturelles, déformées modales, amortissements) déterminés par analyse modale expérimentale ou opérationnelle, les méthodes dynamiques permettent généralement d'atteindre les deux premiers niveaux de caractérisation de défauts définis ci-dessus.

En étudiant les ruptures de fils dans différents types de câbles allant du monocouche (T15.7) aux multicouches (câbles EMR) en passant par les bi-couches, nous avons pu, durant cette thèse, détecter, localiser et estimer le nombre de fils rompus dans ces câbles (niveau 3) à travers des essais expérimentaux réalisés en laboratoire. En testant en premier lieu les outils de la littérature pour la localisation des de fils rompus, une méthode (SRMCD – *Sum of Relative Modal Curvatures Differences*) a été proposée pour une meilleure localisation de ces défauts en partie courante. Pour l'estimation de la sévérité de l'endommagement, partant de l'analyse par éléments finis, nous avons également mis au point une approche empirique permettant, à travers la variation des fréquences naturelles, d'estimer le nombre de fils rompus dans un câble. La formule sous forme de loi puissance, définie à travers les données d'un T15.7, a permis de déterminer avec exactitude le nombre de fils rompus sur bi-couches. Cependant lorsque les ruptures de fils sont situées près ou dans les ancrages, la localisation devient impossible avec les méthodes dynamiques. De même, ces méthodes dynamiques ne permettent pas de caractériser des défauts pré-existants, ayant eu lieu avant une première campagne d'essais sur ouvrage pouvant

être prise comme état de référence.

L'émission acoustique vient ainsi en complément de ces méthodes dynamiques pour permettre la caractérisation des fils rompus quelles que soient leurs localisations dans le câble à travers les signaux émis par les frottements interfilaires. Pour mieux connaître les caractéristiques des différents signaux enregistrés lors des campagnes d'essais sur les câbles, une analyse de corrélation et temporelle des paramètres décrivant ces signaux a d'abord été faite. Cette analyse a permis de conclure que certains paramètres des signaux d'EA telle que la fréquence maximale du spectre fréquentiel peut permettre de distinguer certains clusters de données d'EA. Cependant en présence de plusieurs sources EA différentes, cette analyse paramétrique est insuffisante. Ainsi cette première analyse est enrichie grâce à une analyse statistique par Machine Learning (ou apprentissage automatisé) permettant de mieux séparer les sources d'EA (frottements interfilaires, bruit de fond mécanique, microfissuration de résine) par clustering. Comparé au très connu K-Means, l'algorithme GMM (*Gaussian Mixture Models*) a donné de meilleurs résultats. Après avoir identifié ces clusters et les caractéristiques inhérentes à chaque cluster, il a été possible d'identifier facilement les différents sources EA présentes par une analyse supervisée. Il est alors possible de détecter des défauts pré-existants sur un câble.

Pour détecter des signaux exploitables, une proximité avec la source qui nous intéresse, ici frottements interfilaires des fils rompus, est nécessaire. Ainsi les méthodes dynamiques peuvent être utilisées pour déterminer une zone de ruptures de fils en partie courante ce qui permet de positionner au mieux les capteurs EA qui peuvent alors à leur tour d'affiner cette localisation. Cette approche multi-technique permet alors de pouvoir détecter et suivre l'évolution d'une dégradation de type fils rompus quelles que soient leurs positions dans le câble (en partie courante ou en partie cachée comme dans les ancrages) et quels que soient leurs moments d'apparition, avant ou après la réalisation d'un état de référence. Cette identification des signaux caractéristiques de fils rompus est nettement améliorée par la création au préalable d'une base de données labellisée contenant les caractéristiques des signaux susceptibles d'être enregistrés sur un câble.

Pour valider ces approches, les outils proposés doivent être testés sur des ouvrages réels en analysant l'influence des conditions environnementales (notamment les températures pour les paramètres dynamiques et les bruits de trafic routier pour l'émission acoustique) sur leur efficacité.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Laurent GAILLET. *Les câbles dans le génie civil : De l'importance de comprendre et connaître leurs états de dégradation, de les protéger*. Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées. IFSTTAR, 2013, 97p. DOI : [10.3829/erlpc.oa72-fr](https://doi.org/10.3829/erlpc.oa72-fr). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00851050>.
- [2] Stewart C WATSON et David STAFFORD. « Cables in trouble ». In : *Civil Engineering* 58.4 (1988), p. 38.
- [3] COMMISSION D'INSPECTION MINISTÉRIELLE. *Commune de Gênes Autoroute A10 - effondrement du viaduc de Polcevera*. Rapp. tech. Ministère des infrastructures et des transports, août 2018. URL : <https://bit.ly/30Rz2Ad>.
- [4] Delphine ALBOUY et al. *Surveillance et entretien courant des ouvrages d'art routiers*. Rapp. tech. SETRA, 2011. URL : <http://dtrf.setra.fr/pdf/pj/Dtrf/0005/Dtrf-0005966/DT5966.pdf>.
- [5] Hervé MAUREY, Patrick CHAIZE et Michel DAGBERT. *Sécurité des ponts : Éviter un drame*. Rapp. tech. commission de l'aménagement du territoire et du développement durable, juin 2019. URL : <http://www.senat.fr/rap/r18-609/r18-6091.pdf>.
- [6] Christian BOLLER. « Structural Health Monitoring-An Introduction and Definitions ». In : *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. T. 1. Chichester, UK : John Wiley & Sons, Ltd, jan. 2008, p. 1-23. DOI : [10.1002/9780470061626.shm204](https://doi.org/10.1002/9780470061626.shm204). URL : <http://doi.wiley.com/10.1002/9780470061626.shm204>.
- [7] Wei-Hua HU. « Operational modal analysis and continuous dynamic monitoring of foot-bridges ». Thèse de doct. University of Porto, 2012.
- [8] Francesco Lanza di SCALEA et al. « Multiwire Strands ». In : *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. T. 1. Chichester, UK : John Wiley & Sons, Ltd, jan. 2008. DOI : [10.1002/9780470061626.shm119](https://doi.org/10.1002/9780470061626.shm119). URL : <http://doi.wiley.com/10.1002/9780470061626.shm119>.
- [9] Anders RYTTER. « Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures ». Thèse de doct. Dept. of Building Technology et Structural Engineering, Aalborg University, 1993. URL : <http://www.forskningsdatabasen.dk/en/catalog/2389379256>.
- [10] Yashodhya S. S. D. LIYANA KANKANAMGE. « Application of Wavelet Transform in Structural Health Monitoring ». Master's Thesis. Western Michigan University, 2016.
- [11] Thi Thu Ha LE PETIT. « 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 ». Thèse de doct. Université Paris-Est, 2014. URL : <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01127429>.

- [12] Lamine DIENG et al. « Mécanismes de dégradation et moyens de protection des câbles du génie civil ». In : *Mécanique & Industries* 10.1 (2009), p. 33-42. ISSN : 1296-2139. DOI : [10.1051/meca/2009030](https://doi.org/10.1051/meca/2009030).
- [13] Pierre BREVET et al. « Microstructure et propriétés mécaniques des aciers pour câbles : Synthèse des travaux du LCPC (1970-2000) : I. Plasticité et endommagement ». In : *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées* (249 2004), p. 35-48.
- [14] Perrin MARIANNE. « Étude et caractérisation par émission acoustique et mesures électrochimiques de la fragilisation par l'hydrogène des câbles de précontrainte. Application aux ouvrages d'art ». Thèse de doct. INSA de LYON, 2009, p. XVI-140. URL : <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2009ISAL0103/these.pdf>.
- [15] LCPC-SETRA. *Les ponts suspendus en France*. Service publications LCPC, 1989.
- [16] Guy SIMONNET. « Tréfilage de l'acier ». In : *Les techniques de l'ingénieur* M-645.V2 (1996).
- [17] John M. WALTON. « Developments in steel cables ». In : *J. Construct. Steel Res* 39.1 (1996), p. 3-29.
- [18] Patrick LOSSET. *Câbles et suspensions des ponts*. Rapp. tech. SETRA, 2009, p. 15-31.
- [19] Bruno GODART. « Status of durability of post-tensioned tendons in France ». In : *Durability of post-tensioning tendons - technical report - proceedings of a workshop held at Ghent University on 15-16 November 2001* (2001), p. 25-42. ISSN : 2-88394-055- X. URL : <https://trid.trb.org/view/723547>.
- [20] Pierre BREVET. « Pathologie des haubans et câbles : fatigue-Corrosion ». In : *Laboatoire Central des Ponts et Chaussées* (2005).
- [21] Thierry KRETZ et al. « Haute surveillance et évaluation de l'aptitude au service du pont suspendu d'Aquitaine ». In : *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées* (2006), p. 13-32.
- [22] M BRACHET. « Bilan de quelques années d'observation des phénomènes de corrosion sous tension des aciers à haute résistance ». In : *Bull. Liaison Labo. Routiers P. et Ch.* 267.45 (1970), p. 783.
- [23] Jean Louis CHAZELAS et al. *ACTENA - Auscultation des câbles tendus non accessibles*. Rapp. tech. ARN, EDF, LCPC, 2009, p. 172.
- [24] Hasnae ZEJLI. « Détection et localisation par émission acoustique de fils rompus dans les ancrages des câbles d'ouvrage d'art ». Thèse de doct. UTC, 2007.
- [25] Charles R. FARRAR et Scott W. DOEBLING. « Damage Detection and Evaluation II ». In : *Modal Analysis and Testing*. Springer Netherlands, 1999, p. 345-378. DOI : [10.1007/978-94-011-4503-9\\_17](https://doi.org/10.1007/978-94-011-4503-9_17).
- [26] Christian CREMONA. « Qu'est-ce qu'une évaluation dynamique ? » In : *Revue européenne de génie civil* 9.1-2 (2005), p. 11-42. DOI : [10.1080/17747120.2005.9692745](https://doi.org/10.1080/17747120.2005.9692745). URL : <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/17747120.2005.9692745?needAccess=true>.
- [27] John Kim VANDIVER. *Detection of Structural Failure on Fixed Platforms By Measurement of Dynamic Response*. Houston, Texas, 1975. DOI : [10.4043/2267-MS](https://doi.org/10.4043/2267-MS).

- [28] David J. EWINS. « Modal Analysis for Rotating Machinery ». In : *Modal Analysis and Testing*. Sous la dir. de Júlio M. M. SILVA et Nuno M. M. MAIA. Dordrecht : Springer Netherlands, 1999, p. 549-568. ISBN : 978-94-011-4503-9. DOI : [10.1007/978-94-011-4503-9\\_26](https://doi.org/10.1007/978-94-011-4503-9_26). URL : [https://doi.org/10.1007/978-94-011-4503-9\\_26](https://doi.org/10.1007/978-94-011-4503-9_26).
- [29] Julio GÓMEZ-MANCILLA et al. « The influence of crack-imbalance orientation and orbital evolution for an extended cracked Jeffcott rotor ». In : *Comptes Rendus Mécanique* 332.12 (déc. 2004), p. 955-962. ISSN : 1631-0721. DOI : [10.1016/J.CRME.2004.09.007](https://doi.org/10.1016/J.CRME.2004.09.007). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631072104002177>.
- [30] Semyon L. TSYFANSKY et Vitaly I. BERESNEVICH. « Non-linear vibratio method for detection of fatigue cracks in aircraft wings ». In : *Journal of Sound and Vibration* 236.1 (sept. 2000), p. 49-60. ISSN : 0022-460X. DOI : [10.1006/JSVI.2000.2981](https://doi.org/10.1006/JSVI.2000.2981). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X0092981X>.
- [31] Charles R FARRAR et David JAUREGUI. *Damage detection algorithms applied to experimental and numerical modal data from the I-40 bridge*. Los Alamos National Laboratory, 1996.
- [32] Roger E. HOBBS et Mohammed RAOOF. « Behaviour of cables under dynamic or repeated loading ». In : *Journal of Constructional Steel Research* (1996). ISSN : 0143974X. DOI : [10.1016/0143-974X\(96\)00028-4](https://doi.org/10.1016/0143-974X(96)00028-4).
- [33] Gabriele COMANDUCCI et al. « On vibration-based damage detection by multivariate statistical techniques: Application to a long-span arch bridge ». In : *Structural Health Monitoring* (2016). ISSN : 17413168. DOI : [10.1177/1475921716650630](https://doi.org/10.1177/1475921716650630).
- [34] Scott W. DOEBLING, Charles R FARRAR et Michael B PRIME. « A summary review of vibration-based damage identification methods ». In : *Shock and Vibration Digest* 30.2 (1998), p. 91-105. ISSN : 05831024. DOI : [10.1177/058310249803000201](https://doi.org/10.1177/058310249803000201).
- [35] Christian CREMONA, Flávio DE SOUZA BARBOSA et Alireza ALVANDI. « Identification modale sous excitation ambiante: Application à la surveillance des ponts ». In : *Mecanique et Industries* 4.3 (mai 2003), p. 259-271. ISSN : 12962139. DOI : [10.1016/S1296-2139\(03\)00043-5](https://doi.org/10.1016/S1296-2139(03)00043-5).
- [36] Christian CRÉMONA, Yves GAUTIER et Renaud LÉCONTE. *Investigation et évaluation dynamique des ponts*. Rapp. tech. Paris : Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées, 2009, p. 35-64. DOI : [10.3829/gt-gtinpont-fr](https://doi.org/10.3829/gt-gtinpont-fr).
- [37] James W. COOLY et John W. TUCKY. « An algorithm for the machine computation of Fourier series ». In : *Mathematics of Computation* 19 (jan. 1965), p. 297-301.
- [38] Julio M. M. e SILVA. « An Overview of the Fundamentals of Modal Analysis ». In : *Modal Analysis and Testing*. Sous la dir. de Júlio M. M. SILVA et Nuno M. M. MAIA. Dordrecht : Springer Netherlands, 1999, p. 1-34. ISBN : 978-94-011-4503-9. DOI : [10.1007/978-94-011-4503-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-94-011-4503-9_1). URL : [https://doi.org/10.1007/978-94-011-4503-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-94-011-4503-9_1).
- [39] Randall J. ALLEMANG et David L. BROWN. « Experimental modal analysis ». In : *Harris' Shock and Vibration Handbook*. Sous la dir. d'Allan G. PERSOL et Thomas L. PAEZ. 5<sup>e</sup> éd. New York : McGraw-Hill, 2002. Chap. 21, p. 21.1-21.72. ISBN : 9780071508193.

- [40] David J. EWINS. *Modal testing : theory, practice, and application*. Sous la dir. de Research Studies PRESS. 2<sup>e</sup> éd. Research Studies Press, 2000, p. 562. ISBN : 9780863802188. URL : <https://www.wiley.com/en-fr/Modal+Testing:+Theory,+Practice+and+Application,+2nd+Edition-p-9780863802188>.
- [41] Jimin HE et Zhi-Fang FU. *Modal Analysis*. 1<sup>re</sup> éd. Elsevier, 2001, p. 1-304. ISBN : 978-0-7506-5079-3. DOI : [10.1016/b978-0-7506-5079-3.x5000-1](https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-5079-3.x5000-1).
- [42] JULIO M.M. SILVA et Nuno M.M. MAIA. *Modal Analysis and Testing*. Springer Netherlands, 1999. DOI : [10.1007/978-94-011-4503-9](https://doi.org/10.1007/978-94-011-4503-9).
- [43] Lingmi ZHANG. « From traditional experimental modal analysis (EMA) to operational modal analysis (OMA), an overview ». In : *International Operational Modal Analysis Conference*. Guimarães, 2013.
- [44] Carlo RAINIERI et Giovanni FABBROCINO. « Output-only Modal Identification ». In : *Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures: An Introduction and Guide for Applications*. Springer New York, 2014, p. 103-210. DOI : [10.1007/978-1-4939-0767-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0767-0_1).
- [45] Charles C. KENNEDY et C D P PANCU. « Use of Vectors in Vibration Measurement and Analysis ». In : *Journal of the Aeronautical Sciences* 14.11 (nov. 1947), p. 603-625. DOI : [10.2514/8.1474](https://doi.org/10.2514/8.1474). URL : <http://arc.aiaa.org/doi/10.2514/8.1474>.
- [46] C. Y. SHIH et al. « A frequency domain global parameter estimation method for multiple reference frequency response measurements ». In : *Mechanical Systems and Signal Processing* 2.4 (oct. 1988), p. 349-365. ISSN : 10961216. DOI : [10.1016/0888-3270\(88\)90059-3](https://doi.org/10.1016/0888-3270(88)90059-3).
- [47] Havard VOLD. « Orthogonal polynomials in the polyreference method ». In : *Proceedings of the International Seminar on Modal Analysis, Katholieke University of Leuven, Belgium*. 1986.
- [48] Havard VOLD et al. « A Multi-Input Modal Estimation Algorithm for Mini-Computers ». In : *SAE Transactions* 91 (1982), p. 815-821. ISSN : 0096736X, 25771531. URL : <http://www.jstor.org/stable/44631984>.
- [49] Van der AUWERAER, P. GUILLAUME et S. VANLANDUIT. « Application of a fast-stabilizing frequency domain parameter estimation method ». In : *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME* 123.4 (déc. 2001), p. 651-658. ISSN : 15289028. DOI : [10.1115/1.1410369](https://doi.org/10.1115/1.1410369).
- [50] Bart PEETERS et al. *The PolyMAX frequency-domain method: a new standard for modal parameter estimation?* Rapp. tech. 2004, p. 395-409.
- [51] Samir R. IBRAHIM. « A method for the direct identification of vibration parameter from the free responses ». In : *Shock and Vibration Bulletin* 47.4 (1977).
- [52] Jer-Nan JUANG et Richard S. PAPPA. « An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction ». In : *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 8.5 (sept. 1985), p. 620-627. ISSN : 0731-5090. DOI : [10.2514/3.20031](https://doi.org/10.2514/3.20031). URL : <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/3.20031>.
- [53] Andreas Johann FELBER. « Development of a hybrid bridge evaluation system ». Thèse de doct. University of British Columbia, 1994.

- [54] Julius S BENDAT et Allan G PERSOL. *Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis*. 2<sup>e</sup> éd. John Wiley & Sons, 1993. ISBN : 9780471570554.
- [55] Rune BRINCKER, Lingmi ZHANG et Palle ANDERSEN. *Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition*. Rapp. tech. 2000, p. 625-630. URL : <https://vbn.aau.dk/en/publications/modal-identification-from-ambient-responses-using-frequency-domai-2>.
- [56] Rune BRINCKER, Carlos E VENTURA et Palle ANDERSEN. « Damping estimation by frequency domain decomposition ». In : *Proceedings of the International Modal Analysis Conference - IMAC*. T. 1. 2001, p. 698-703.
- [57] George JAMES et al. « Modal testing using natural excitation ». In : *Proceedings of the 10th International Modal Analysis Conference 2* (jan. 1992).
- [58] George JAMES, Thomas CARNE et J. LAUFER. « The natural excitation technique (NExT) for modal parameter extraction from operating structures ». In : *Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis* 10 (jan. 1995).
- [59] Peter VAN OVERSCHEE et Bart DE MOOR. *Subspace Identification for Linear Systems: Theory-Implementations-Applications*. Dordrecht, Netherlands : Kluwer Academic Publishers, 1996. DOI : [10.1007/978-1-4613-0465-4](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0465-4).
- [60] Bart PEETERS et Guido De ROECK. « Stochastic system identification for operational modal analysis: A Review ». In : *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME* 123.4 (déc. 2001), p. 659-667. ISSN : 15289028. DOI : [10.1115/1.1410370](https://doi.org/10.1115/1.1410370).
- [61] Shashank CHAUHAN. « Subspace algorithms in modal parameter estimation for operational modal analysis: Perspectives and practices ». In : *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. T. 8. Springer New York LLC, 2016, p. 295-301. ISBN : 9783319300832. DOI : [10.1007/978-3-319-30084-9\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-319-30084-9_27).
- [62] Roger WILLIAMS, John CROWLEY et Havard VOLD. « The multivariate mode indicator function in modal analysis ». In : *International Modal Analysis Conference*. 1985, p. 66-70.
- [63] C. Y. SHIH et al. « Complex mode indication function and its applications to spatial domain parameter estimation ». In : *Mechanical Systems and Signal Processing* 2.4 (oct. 1988), p. 367-377. ISSN : 10961216. DOI : [10.1016/0888-3270\(88\)90060-X](https://doi.org/10.1016/0888-3270(88)90060-X).
- [64] Miranda RADEŞ. « Performance of various mode indicator functions ». In : *Shock and Vibration*. T. 17. 4-5. IOS Press, 2010, p. 473-482. DOI : [10.3233/SAV-2010-0541](https://doi.org/10.3233/SAV-2010-0541).
- [65] Peter AVITABILE. *Modal Testing: A Practitioner's Guide*. Chichester, UK : John Wiley & Sons Ltd, nov. 2017. ISBN : 9781119222989. DOI : [10.1002/9781119222989](https://doi.org/10.1002/9781119222989). URL : <http://doi.wiley.com/10.1002/9781119222989>.
- [66] Swagato DAS, P. SAHA et S. K. PATRO. « Vibration-based damage detection techniques used for health monitoring of structures: a review ». In : *Journal of Civil Structural Health Monitoring* 6.3 (juil. 2016), p. 477-507. DOI : [10.1007/s13349-016-0168-5](https://doi.org/10.1007/s13349-016-0168-5). URL : <http://link.springer.com/10.1007/s13349-016-0168-5>.
- [67] Jean-Jacques SINOÛ. « A Review of Damage Detection and Health Monitoring of Mechanical Systems from Changes in the Measurement of Linear and Non-linear Vibrations ». In : jan. 2009, p. 643-702. ISBN : 978-1-60692-037-4.

- [68] Scott W. DOEBLING et al. *Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review*. Rapp. tech. Los Alamos, NM : Los Alamos National Laboratory (LANL), mai 1996. DOI : [10.2172/249299](https://doi.org/10.2172/249299). URL : <http://www.osti.gov/servlets/purl/249299-n4r7Vr/webviewable/>.
- [69] François LÉONARD et al. « Free-vibration behaviour of a cracked cantilever beam and crack detection ». In : *Mechanical Systems and Signal Processing* 15.3 (2001), p. 529-548. ISSN : 0888-3270. DOI : <https://doi.org/10.1006/mssp.2000.1337>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327000913372>.
- [70] H. J. SALANE et J. W. BALDWIN. « Identification of Modal Properties of Bridges ». In : *Journal of Structural Engineering* 116.7 (1990), p. 2008-2021. DOI : [10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1990\)116:7\(2008\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1990)116:7(2008)).
- [71] Antonino MORASSI. « Damage detection and generalized Fourier coefficients ». In : *Journal of Sound and Vibration* 302.1-2 (2007), p. 229-259. ISSN : 10958568. DOI : [10.1016/j.jsv.2006.11.015](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.11.015).
- [72] Creed S. G. « Assessment of large engineering structures using data collected during in-service loading ». In : *Structural Assessment (edited by F. K. Garas, J. L. Clarke and G. S. T. Armer)*, Butterworths, 1987, p. 55-62. ISBN : 0408003561. URL : <https://trid.trb.org/view/285001>.
- [73] Jean-Jacques SINOÛ et Arthur W. LEES. « The influence of cracks in rotating shafts ». In : *Journal of Sound and Vibration* 285.4-5 (2005), p. 1015-1037. DOI : [10.1016/J.JSV.2004.09.008](https://doi.org/10.1016/J.JSV.2004.09.008). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X04007497>.
- [74] Young Shin LEE et Myung Jee CHUNG. « Study on crack detection using eigenfrequency test data ». In : *Computers and Structures* 77.3 (2000), p. 327-342. ISSN : 00457949. DOI : [10.1016/S0045-7949\(99\)00194-7](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(99)00194-7). URL : [www.elsevier.com/locate/compstruc](http://www.elsevier.com/locate/compstruc).
- [75] T. CONTURSI, Arcangelo MESSINA et Edward J. WILLIAMS. « A Multiple-Damage Location Assurance Criterion Based on Natural Frequency Changes ». In : *Journal of Vibration and Control* 4.5 (1998), p. 619-633. DOI : [10.1177/107754639800400505](https://doi.org/10.1177/107754639800400505). URL : <https://doi.org/10.1177/107754639800400505>.
- [76] Randall J. ALLEMANG et D L BROWN. « A correlation coefficient for modal vector analysis ». In : *1st International Modal Analysis Conference*. 1983, p. 110-116.
- [77] N A J LIEVEN et David J. EWINS. « Spatial correlation of mode shapes, the coordinate modal assurance criterion (COMAC) ». In : *6th International Modal Analysis Conference*. T. 1. Kissimmee Florida, USA. 1988, p. 690-695.
- [78] Randall J. ALLEMANG. « The modal assurance criterion - Twenty years of use and abuse ». In : *Sound and Vibration* 37.8 (2003), p. 14-21. ISSN : 15410161.
- [79] E. PARLOO, P. GUILLAUME et M. VAN OVERMEIRE. « Damage assessment using mode shape sensitivities ». In : *Mechanical Systems and Signal Processing* 17.3 (mai 2003), p. 499-518. ISSN : 08883270. DOI : [10.1006/mssp.2001.1429](https://doi.org/10.1006/mssp.2001.1429).

- [80] Y K HO et David J. EWINS. « On the structural damage identification with mode shapes ». In : *European COST F3 conference on system identification and structural health monitoring*. T. 1. 2000.
- [81] Magd M. ABDEL WAHAB et Guido DE ROECK. « Damage detection in bridges using modal curvatures: application to a real damage scenario ». In : *Journal of Sound and Vibration* 226.2 (1999), p. 217 -235. ISSN : 0022-460X. DOI : <https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2295>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X99922952>.
- [82] AFNOR. *NF EN 1330-9 (A09-020-9) : Essais non destructifs. terminologies. partie 9 : Termes utilisé en contrôle par émission acoustique*. Rapp. tech. AFNOR, juil. 2017.
- [83] ASTM E1316 - 17A. *Standard Terminology for Nondestructive Examinations*. Rapp. tech. West Conshohocken, PA : ASTM International, 2017. URL : <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?E1316>.
- [84] Nathalie GODIN, Pascal REYNAUD et Gilbert FANTOZZI. « Acoustic Emission: Definition and Overview ». In : *Acoustic Emission and Durability of Composite Materials*. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Inc., fév. 2018, p. 1-57. DOI : [10.1002/9781119426660.ch1](https://doi.org/10.1002/9781119426660.ch1). URL : <http://doi.wiley.com/10.1002/9781119426660.ch1>.
- [85] Masayasu OHTSU. « History and fundamentals ». In : *Acoustic Emission Testing: Basics for Research-Applications in Civil Engineering*. Springer Berlin Heidelberg, 2008, p. 11-18. ISBN : 9783540698951. DOI : [10.1007/978-3-540-69972-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-540-69972-9_2).
- [86] Laurent GAILLET et al. « Detection by acoustic emission of damage in cable anchorage ». In : *Non-Destructive Testing in Civil Engineering* (2009). URL : <https://www.ndt.net/article/ndtce2009/papers/15.pdf>.
- [87] Hasnae ZEJLI et al. « Detection of the Presence of Broken Wires in Cables by Acoustic Emission Inspection ». In : *Journal of Bridge Engineering* (2012). ISSN : 1084-0702. DOI : [10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000404](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000404).
- [88] Tao FU et al. « Fiber optic acoustic emission sensor and its applications in the structural health monitoring of CFRP materials ». In : *Optics and Lasers in Engineering* 47.10 (oct. 2009), p. 1056-1062. ISSN : 01438166. DOI : [10.1016/j.optlaseng.2009.03.011](https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.03.011).
- [89] Tongzhi ZHANG et al. « A fiber-optic sensor for acoustic emission detection in a high voltage cable system ». In : *Sensors (Switzerland)* 16.12 (déc. 2016). ISSN : 14248220. DOI : [10.3390/s16122026](https://doi.org/10.3390/s16122026).
- [90] Feng ming YU et al. « A novel method of identifying damage types in carbon fiber-reinforced plastic cross-ply laminates based on acoustic emission detection using a fiber-optic sensor ». In : *Composites Science and Technology* 135 (oct. 2016), p. 116-122. ISSN : 02663538. DOI : [10.1016/j.compscitech.2016.09.017](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.09.017).
- [91] Seydou DIA et al. « Primary calibration of Acoustic Emission sensors by the method of Reciprocity : theoretical and experimental considerations ». In : *30th European Conference on Acoustic Emission Testing and 7th International Conference on Acoustic Emission*. Grenade, Spain, sept. 2012, 1-8, [http://www.ndt.net/article/ewgae2012/content/papers/2\\_Dia\\_Rev1.pdf](http://www.ndt.net/article/ewgae2012/content/papers/2_Dia_Rev1.pdf). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01026559>.

- [92] Kanji ONO. « Critical examination of ultrasonic transducer characteristics and calibration methods ». In : *Research in Nondestructive Evaluation* 30.1 (jan. 2019), p. 19-64. ISSN : 14322110. DOI : [10.1080/09349847.2017.1375585](https://doi.org/10.1080/09349847.2017.1375585). URL : <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09349847.2017.1375585>.
- [93] Nielson N. HSU et F. R. BRECKENRIDGE. « Characterization and calibration of acoustic emission sensors ». In : *Materials Evaluation* 39 (1981), p. 60-68.
- [94] James ROGET. *L'émission acoustique: essais non destructifs: mise en oeuvre et applications*. AFNOR, CETIM, 1988.
- [95] Richard F MILLER. « Creep and Twinning in Zinc Single Crystals ». In : *Trans. AIME* 122 (1936), p. 176.
- [96] Fuyuhiko KISHINOUE. « An experiment on the progression of fracture ». In : *Journal of acoustic emission* 9.3 (1990), p. 177-180.
- [97] Thomas F. DROUILLARD. « A History of Acoustic Emission ». In : *Journal of Acoustic Emission* 14.1 (1996), p. 1-34. arXiv : [96/S5.00/14001-034](https://arxiv.org/abs/96/S5.00/14001-034) [0730-0050].
- [98] J. KAISER. « A study of acoustic phenomena in tensile test ». Thèse de doct. Technische Hochschule München, 1950.
- [99] Thomas F. DROUILLARD. « Introduction to acoustic emission technology, Part 1: History of Acoustic Emission Research ». In : *Nondestructive testing handbook* 5 (1987), p. 2-3.
- [100] Thomas F. DROUILLARD. *Acoustic emission: A bibliography with abstracts*. New York, 1979.
- [101] Allen T. GREEN, Charles S. LOCKMAN et Richard K. STEELE. « Acoustic verification of structural integrity of polaris chambers ». In : *Modern Plastics* 41.11 (1964), p. 137-139.
- [102] Shigenori YUYAMA et al. « Field Application Examples of AE Testing ». In : *Practical Acoustic Emission Testing*. Tokyo : Springer Japan, 2016, p. 101-119. ISBN : 978-4-431-55072-3. DOI : [10.1007/978-4-431-55072-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-4-431-55072-3_6). URL : [https://doi.org/10.1007/978-4-431-55072-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-4-431-55072-3_6).
- [103] C. B. SCRUBY et H. N.G. WADLEY. « An assessment of acoustic emission for nuclear pressure vessel monitoring ». In : *Progress in Nuclear Energy* 11.3 (jan. 1983), p. 275-297. ISSN : 01491970. DOI : [10.1016/0149-1970\(83\)90014-8](https://doi.org/10.1016/0149-1970(83)90014-8).
- [104] P. RUNOW. « The use of acoustic emission methods as aids to the structural integrity assessment of nuclear power plants ». In : *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 21.3 (jan. 1985), p. 157-207. ISSN : 03080161. DOI : [10.1016/0308-0161\(85\)90001-8](https://doi.org/10.1016/0308-0161(85)90001-8).
- [105] Abdou DIA et al. « Damage detection of a hybrid composite laminate aluminum/glass under quasi-static and fatigue loadings by acoustic emission technique ». In : *Heliyon* 5.3 (mar. 2019), e01414. ISSN : 2405-8440. DOI : [10.1016/J.HELIYON.2019.E01414](https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2019.E01414). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844019300659>.
- [106] S. YUYAMA et al. « Detection and evaluation of failures in high-strength tendon of prestressed concrete bridges by acoustic emission ». In : *Construction and Building Materials* (2007). ISSN : 09500618. DOI : [10.1016/j.conbuildmat.2006.04.010](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.04.010).

- [107] Christian U. GROSSE et Masayasu OHTSU. *Acoustic emission testing: Basics for Research-Applications in Civil Engineering*. Springer Berlin Heidelberg, 2008, p. 1-404. DOI : [10.1007/978-3-540-69972-9](https://doi.org/10.1007/978-3-540-69972-9).
- [108] Sumire KAWAMOTO et R Sam WILLIAMS. *Acoustic Emission and Acousto-Ultrasonic Techniques for Wood and Wood-Based Composites—A Review*. Rapp. tech. UCFPL, 2002.
- [109] Tomaž KEK et Janez GRUM. « Monitoring laser cut quality using acoustic emission ». In : *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 49.1 (jan. 2009), p. 8-12. ISSN : 08906955. DOI : [10.1016/j.ijmachtools.2008.08.006](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.08.006).
- [110] O. YAPAR et al. « Structural health monitoring of bridges with piezoelectric AE sensors ». In : *Engineering Failure Analysis* 56 (2015), p. 150-169. ISSN : 13506307. DOI : [10.1016/j.engfailanal.2015.03.009](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.03.009).
- [111] Paul H. ZIEHL. « Applications of acoustic emission evaluation for civil infrastructure ». In : *Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security 2008*. Sous la dir. de Peter J. SHULL et al. T. 6934. International Society for Optics et Photonics. SPIE, 2008, p. 162 -169. DOI : [10.1117/12.779069](https://doi.org/10.1117/12.779069). URL : <https://doi.org/10.1117/12.779069>.
- [112] Paul ZIEHL et Adrian POLLOCK. « Acoustic Emission for Civil Structures ». In : *Acoustic Emission*. InTech, mar. 2012. DOI : [10.5772/32652](https://doi.org/10.5772/32652).
- [113] B. B. LIAO et al. « Acoustic emission-based damage characterization of 70 MPa type IV hydrogen composite pressure vessels during hydraulic tests ». In : *International Journal of Hydrogen Energy* 44.40 (août 2019), p. 22494-22506. ISSN : 03603199. DOI : [10.1016/j.ijhydene.2019.02.217](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.217).
- [114] Shigenori YUYAMA et T KISHI. « AE analysis during corrosion, stress corrosion cracking and corrosion fatigue processes ». In : *Journal of Acoustic Emission* 2 (jan. 1983), p. 71-93.
- [115] H. MAZILLE, R. ROTHEA et C. TRONEL. « An acoustic emission technique for monitoring pitting corrosion of austenitic stainless steels ». In : *Corrosion Science* 37.9 (sept. 1995), p. 1365-1375. ISSN : 0010938X. DOI : [10.1016/0010-938X\(95\)00036-J](https://doi.org/10.1016/0010-938X(95)00036-J).
- [116] M. FREGONESE et al. « Initiation and propagation steps in pitting corrosion of austenitic stainless steels: Monitoring by acoustic emission ». In : *Corrosion Science* 43.4 (avr. 2001), p. 627-641. ISSN : 0010938X. DOI : [10.1016/S0010-938X\(00\)00099-8](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(00)00099-8).
- [117] S. RAMADAN et al. « Detection of stress corrosion cracking of high-strength steel used in prestressed concrete structures by acoustic emission technique ». In : *Applied Surface Science* 254.8 (fév. 2008), p. 2255-2261. ISSN : 01694332. DOI : [10.1016/j.apsusc.2007.09.011](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.09.011).
- [118] Key Yong SUNG, In Sup KIM et Young Ku YOON. « Characteristics of acoustic emission during stress corrosion cracking of inconel 600 alloy ». In : *Scripta Materialia* 37.8 (oct. 1997), p. 1255-1262. ISSN : 13596462. DOI : [10.1016/S1359-6462\(97\)00222-4](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(97)00222-4).
- [119] Dongsheng LI, Wei YANG et Wenyao ZHANG. « Cluster analysis of stress corrosion mechanisms for steel wires used in bridge cables through acoustic emission particle swarm optimization ». In : *Ultrasonics* (2017). ISSN : 0041624X. DOI : [10.1016/j.ultras.2017.01.012](https://doi.org/10.1016/j.ultras.2017.01.012).

- [120] H. SHAIKH et al. « Evaluation of stress corrosion cracking phenomenon in an AISI type 316LN stainless steel using acoustic emission technique ». In : *Corrosion Science* 49.2 (fév. 2007), p. 740-765. ISSN : 0010938X. DOI : [10.1016/j.corsci.2006.06.007](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2006.06.007).
- [121] K. LAU et I. LASA. « Corrosion of prestress and post-tension reinforced-concrete bridges ». In : *Corrosion of Steel in Concrete Structures*. Elsevier Inc., mar. 2016, p. 37-57. ISBN : 9781782424024. DOI : [10.1016/B978-1-78242-381-2.00003-1](https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-381-2.00003-1).
- [122] Zongjin LI et al. « Application of acoustic emission technique to detection of reinforcing steel corrosion in concrete ». In : *ACI Materials Journal* 95.1 (jan. 1998), p. 68-76. ISSN : 0889325X. URL : <https://www.scholars.northwestern.edu/en/publications/application-of-acoustic-emission-technique-to-detection-of-reinfo>.
- [123] P. ZIEHL et M. ELBATANOUNY. « Acoustic emission monitoring for corrosion damage detection and classification ». In : *Corrosion of Steel in Concrete Structures*. Elsevier Inc., mar. 2016, p. 193-209. ISBN : 9781782424024. DOI : [10.1016/B978-1-78242-381-2.00010-9](https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-381-2.00010-9).
- [124] B. ASSOULI et al. « Detection and identification of concrete cracking during corrosion of reinforced concrete by acoustic emission coupled to the electrochemical techniques ». In : *NDT and E International* 38.8 (déc. 2005), p. 682-689. ISSN : 09638695. DOI : [10.1016/j.ndteint.2005.04.007](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2005.04.007).
- [125] H. IDRISSEI et A. LIMAM. « Study and characterization by acoustic emission and electrochemical measurements of concrete deterioration caused by reinforcement steel corrosion ». In : *NDT and E International* 36.8 (déc. 2003), p. 563-569. ISSN : 09638695. DOI : [10.1016/S0963-8695\(03\)00064-1](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(03)00064-1).
- [126] N. F. CASEY et P. A.A. LAURA. *A review of the acoustic-emission monitoring of wire rope*. Nov. 1997. DOI : [10.1016/S0029-8018\(96\)00052-2](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(96)00052-2).
- [127] P. A. A. LAURA. « Acoustic detection of structural failure of mechanical cables ». In : *Journal of the Acoustics Society of America* 45 (1969), p. 791-793.
- [128] P. A. A. LAURA. « Mechanical behaviour of stranded wire rope and feasibility of detection of cable failure ». In : *Marine Technology Society Journal* 4 (1970), p. 19-32.
- [129] D. O. HARRIS et R. L. DUNEGAN. « Acoustic emission testing of wire rope ». In : *Materials evaluation* 15 (1974), p. 1-6.
- [130] M. HANZAWA et al. « Fatigue behavior of large-diameter wire ropes. » In : *Society of Petroleum Engineers journal* 22.3 (juin 1982), p. 420-428. ISSN : 01977520. DOI : [10.2118/10905-PA](https://doi.org/10.2118/10905-PA).
- [131] K. M. HOLFORD. « The non-destructive testing of wire rope by acoustic emission ». Thèse de doct. University College Cardiff, 1987.
- [132] N.F. CASEY, K. M. HOLFORD et J.L. TAYLOR. « Wire break detection during the tensile fatigue testing of 40 mm diameter wire rope ». In : *British Journal of Non-destructive Testing* 30 (1988), p. 338-341.
- [133] J ROBERT et al. « Surveillance acoustique des câbles : Approche théorique - Appareillage ». In : *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées* 169 (sept. 1990), p. 71-78.
- [134] Les collections de L'IFSTTAR. *Surveillance acoustique des câbles*. Rapp. tech. IFSTTAR, oct. 2015. DOI : [FicheB5-3](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2006.06.007).

- [135] Pierre BREVET, J. L. ROBERT et Laurent GAILLET. « Acoustic monitoring of pre-stressed concrete bridges and other civil structures with cables ». In : *Proceedings of the EWGAE 2002 European Working Group on Acoustic Emission, Prague, Czech Republic*. Sept. 2002.
- [136] D. W. CULLINGTON et al. « Continuous acoustic monitoring of grouted post-tensioned concrete bridges ». In : *NDT and E International* (2001). ISSN : 09638695. DOI : [10.1016/S0963-8695\(00\)00034-7](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(00)00034-7).
- [137] Edward LOWENHAR et Jason DONG. « Power Over Ethernet Daisy Chained Acoustic Emission System for Structure Health Monitoring ». In : *Springer Proceedings in Physics*. T. 218. Springer Science et Business Media, LLC, oct. 2019, p. 57-64. ISBN : 9783030121105. DOI : [10.1007/978-3-030-12111-2\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-12111-2_6).
- [138] R. A. EGAN. « Non-destructive testing of wire ropes ». In : *Ninth Annual Offshore Technology Conference*. Houston, TX, OTC 2926, 1977, p. 375-381.
- [139] Thomas SKÅRE, Per THILDERKVIST et Jan Eric STÅHL. « Monitoring of friction processes by the means of acoustic emission measurements - Deep drawing of sheet metal ». In : *Journal of Materials Processing Technology* 80-81 (août 1998), p. 263-272. ISSN : 09240136. DOI : [10.1016/S0924-0136\(98\)00130-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00130-7).
- [140] T. SKÅRE et F. KRANTZ. « Wear and frictional behaviour of high strength steel in stamping monitored by acoustic emission technique ». In : *Wear* 255.7-12 (août 2003), p. 1471-1479. ISSN : 00431648. DOI : [10.1016/S0043-1648\(03\)00197-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00197-2).
- [141] Victor M. BARANOV, Evgeny M. KUDRYAVTSEV et Gennadii A. SARYCHEV. « Modelling of the parameters of acoustic emission under sliding friction of solids ». In : *Wear* 202.2 (jan. 1997), p. 125-133. ISSN : 00431648. DOI : [10.1016/S0043-1648\(96\)06969-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(96)06969-4).
- [142] V.M. BARANOV, E.M. KUDRYAVTSEV et G.A. SARYCHEV. « On interrelation between the amplitude distribution of acoustic emission signals and the statistical parameters of rubbing surface ». In : *Journal of Friction and Wear* 20.2 (mar. 1999), p. 70-73.
- [143] M. LÖHR et al. « In situ Acoustic Emission for wear life detection of DLC coatings during slip-rolling friction ». In : *Wear* 260.4-5 (fév. 2006), p. 469-478. ISSN : 00431648. DOI : [10.1016/j.wear.2005.03.009](https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.03.009).
- [144] Laurent GAILLET et al. « Auscultation par émission acoustique d'ancrages de câbles multicouches ». In : *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées* 4514.250-251 (mai 2004), p. 55-63.
- [145] Hasnae ZEJLI et al. « Detection of the broken wires in the cables' hidden parts (anchoring) by acoustic emission ». In : *Advanced Materials Research*. T. 13. Trans Tech Publ. 2006, p. 345-350.
- [146] Jake VANDERPLAS. « Machine Learning ». In : *Python Data Science Handbook, Essential Tools for Working with Data*. Sous la dir. de Dawn SCHANAFELT. 1<sup>re</sup> éd. USA : O'Reilly Media, déc. 2016, p. 331-515. ISBN : 978-1-491-91205-8.
- [147] Aristidis LIKAS, Nikos VLASSIS et Jakob J. VERBEEK. « The global k-means clustering algorithm ». In : *Pattern Recognition* 36.2 (fév. 2003), p. 451-461. ISSN : 00313203. DOI : [10.1016/S0031-3203\(02\)00060-2](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(02)00060-2).

- [148] S. MOMON et al. « Unsupervised and supervised classification of AE data collected during fatigue test on CMC at high temperature ». In : *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 43.2 (fév. 2012), p. 254-260. ISSN : 1359-835X. DOI : [10.1016/J.COMPOSITESA.2011.10.016](https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2011.10.016). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X11003551>.
- [149] Kazuo HATTORI et Masahito TAKAHASHI. « A new edited k-nearest neighbor rule in the pattern classification problem ». In : *Pattern Recognition* 33.3 (mar. 2000), p. 521-528. ISSN : 00313203. DOI : [10.1016/S0031-3203\(99\)00068-0](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(99)00068-0).
- [150] Samir MADHAVAN. « Uncovering Machine Learning ». In : *Mastering Python for Data Science*. Sous la dir. de Sonia Michelle CHEEMA. 1<sup>re</sup> éd. Birmingham, UK : Packt Publishing, août 2015, p. 107-120. ISBN : 978-1-78439-015-0.
- [151] Nuno Manuel Mendes MAIA. « Extraction of valid modal properties from measured data in structural vibrations ». thesis. Imperial College, 1988, p. 386.
- [152] Dinh Kien NGUYEN. « Large displacement behaviour of tapered cantilever Euler-Bernoulli beams made of functionally graded material ». In : *Applied Mathematics and Computation* (2014). ISSN : 00963003. DOI : [10.1016/j.amc.2014.03.104](https://doi.org/10.1016/j.amc.2014.03.104).
- [153] Bingen YANG. « Dynamics and Control of Euler-Bernoulli Beams ». In : *Stress, Strain, and Structural Dynamics*. Elsevier, 2005, p. 521-615. DOI : [10.1016/b978-012787767-9/50013-1](https://doi.org/10.1016/b978-012787767-9/50013-1).
- [154] Antonio J.M. FERREIRA. « Bernoulli beams ». In : *MATLAB Codes for Finite Element Analysis*. Springer Netherlands, 2008, p. 79-87. DOI : [10.1007/978-1-4020-9200-8\\_6](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9200-8_6).
- [155] Maurice PETYT. *Introduction to finite element vibration analysis, 2nd edition*. T. 9780521191. Cambridge University Press, 2010, p. 1-500. DOI : [10.1017/CB09780511761195](https://doi.org/10.1017/CB09780511761195).
- [156] Henri P GAVIN. *Structural Element Stiffness, Mass, and Damping Matrices*. Rapp. tech. Durham : Duke University, 2018, p. 12-17.
- [157] Christian CRÉMONA et Olivier RASSON. « Approche probabiliste de la résistance résiduelle des câbles de structures ». In : *Revue Française de Génie Civil* 6.3 (2002), p. 397-407. DOI : [10.1080/12795119.2002.9692375](https://doi.org/10.1080/12795119.2002.9692375). eprint : <https://doi.org/10.1080/12795119.2002.9692375>. URL : <https://doi.org/10.1080/12795119.2002.9692375>.
- [158] Chi Hui CHIEN et George A. COSTELLO. « Effective length of a fractured wire in wire rope ». In : *Journal of Engineering Mechanics* 111.7 (1985), p. 952-961. ISSN : 07339399. DOI : [10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1985\)111:7\(952\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1985)111:7(952)).
- [159] Mohammed RAOOF. « Wire recovery length in a helical strand under axial-fatigue loading ». In : *International Journal of Fatigue* 13.2 (1991), p. 127-132. ISSN : 01421123. DOI : [10.1016/0142-1123\(91\)90004-I](https://doi.org/10.1016/0142-1123(91)90004-I).
- [160] Mohammed RAOOF et Ivana KRAINCANIC. « Determination of wire recovery length in steel cables and its practical applications ». In : *Computers and Structures* 68.5 (1998), p. 445-459. ISSN : 00457949. DOI : [10.1016/S0045-7949\(98\)00088-1](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(98)00088-1).
- [161] Hongya QU, Tiantian LI et Genda CHEN. « Influence Length of Wire Fracture and Wire-to-Wire Interaction in Helically Wired Strands under Axial Loads ». In : *Journal of Bridge Engineering* 23.1 (2018). ISSN : 10840702. DOI : [10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001162](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001162).

- [162] PHYSICAL ACOUSTIC CORPORATION. *PCI-2 based AE system user's manual*. Rapp. tech. Princeton Junction, New Jersey, USA : MISTRAS GROUP INC., 2007. URL : <https://material.karlov.mff.cuni.cz/people/mathis/Navody/PCI2.pdf>.
- [163] D. L. DAVIES et D. W. BOULDIN. « A Cluster Separation Measure ». In : *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* PAMI-1.2 (1979), p. 224-227.
- [164] T. CALIŃSKI et J. HARABASZ. « A Dendrite Method For Cluster Analysis ». In : *Communications in Statistics* 3.1 (1974), p. 1-27. ISSN : 00903272. DOI : [10.1080/03610927408827101](https://doi.org/10.1080/03610927408827101).
- [165] Jason BROWNLEE. *Machine learning mastery with python*. Jason Brownlee, 2016, p. 1-170.

**Titre :** Monitoring des câbles de structures du génie civil par combinaison de techniques vibratoires et émission acoustique

**Mots clés :** méthodes dynamiques, émission acoustique, câbles, CND, méthode multi-technique

**Résumé :** L'objectif de cette thèse est de caractériser des endommagements par ruptures de fils dans des câbles par combinaison de deux méthodes de CND : les méthodes dynamiques et l'émission acoustique (EA). A travers la variation des paramètres modaux globaux déterminés par analyse modale, les méthodes dynamiques permettent classiquement de détecter et de localiser des défauts dans les structures du Génie Civil mais ne permettent pas, dans la plupart des cas, de les quantifier ou d'estimer la durée de vie résiduelle. En étudiant la présence de fils rompus dans des câbles de différentes dimensions, des méthodes ont été proposées afin de détecter, de localiser et de quantifier l'endommagement de câbles métalliques multicouches. Cependant lorsque les fils rompus sont situés près ou dans les ancrages, la localisation devient impossible avec les méthodes dynamiques. De même, ces méthodes dynamiques ne permettent pas de caractériser des défauts pré-existants. L'émission acoustique

vient ainsi en complément de ces méthodes dynamiques pour affiner la localisation par un positionnement des capteurs EA autour de la zone de rupture identifiée par méthode dynamique. Pour identifier les caractéristiques des signaux des différentes sources d'EA (frottements des fils rompus ou sains, microfissurations de résine, bruits de l'excentrique) enregistrés lors des essais, une analyse paramétrique et statistique par Machine Learning sont réalisées. Ces analyses ont alors permis de dissocier les signaux provenant de chaque source afin de caractériser le frottement interfilaire des fils rompus qu'ils soient en partie courante ou dans l'ancrage. La combinaison des deux méthodes donne ainsi une méthode multi-technique permettant de détecter, localiser et estimer la sévérité d'un endommagement de type ruptures de fils d'un câble. Une perspective à cette thèse consiste à tester les approches proposées sur des ouvrages réels pour voir l'influence des conditions environnementales sur leur efficacité.

**Title :** Monitoring of Civil Engineering structures cables by combining vibration based techniques and acoustic emission

**Key words :** vibration-based techniques, acoustic emission, cables, NDT, multi-technique method

**Abstract :** The objective of this thesis is to characterize wires breaks damages in cables by combining two NDT methods: dynamic methods and acoustic emission (AE). Through the variation of the modal parameters determined by modal analysis, the dynamic methods generally allow to detect and locate defects in civil engineering structures but do not allow, in most cases, to quantify them or to estimate the residual lifetime. By studying broken wires in cables of different dimensions, methods have been proposed to detect, locate and quantify the damage of multi-layered cables. However, when broken wires are located near or in anchors, localization becomes impossible with dynamic methods. Similarly, these dynamic methods do not allow the characterization of pre-existing defects. The acoustic emission technique thus completes these dynamic methods to refine the localization by positioning the EA sensors

around the rupture area identified by the vibration-based methods. In order to recognize the characteristics of the signals from the different sources of AE (interwire friction of broken or sound wires, resin microcracking, eccentric noise) recorded during the tests, a parametric analysis and statistic one by Machine Learning are performed. These analyses then made it possible to dissociate the signals coming from each source in order to characterize the interwire friction of broken wires, whether they are in the visible parts or in the anchors. The combination of the two methods thus gives a multi-technique method for detecting, locating and estimating the severity of broken wires type damage in a cable. One perspective to this thesis is to test the proposed approaches on real structures to see the influence of environmental conditions on their effectiveness.