



الشعبية الديمقراطية الجزائرية الجمهورية
REPUBLIC ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
العلمي والبحث العالي التعليم وزارة
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de maintenance en Electromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie industriel

Spécialité : Maintenance-Fiabilité-Qualité

Thème

CONTRIBUTION A LA SURVEILLANCE DE LA SANTE DES STRUCTURES

Présenté et soutenu publiquement par:

- BRIDJA MOHAMED OUSSAMA
- GRELLOU Omar El Farouk

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mr: Bachir Bouiadja Bachir	MCB	IMSI/Univ-Oran2	Président
Mr:Charef Djilali	MCB	IMSI/Univ-Oran2	Examineur
Mr: TARFAYA Anis	MCB	IMSI/Univ-Oran2	Encadrant

Remerciement

En tout premier lieu, nous remercions le bon dieu, le tout puissant pour le courage, la force et la volonté qu'il nous a accordé pour achever ce mémoire.

*Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à notre directeur de mémoire **M. TARFAYA**, pour son aide si précieuse, ses encouragements, son soutien moral, sa patience et surtout ses orientations et l'intérêt qu'il nous a accordé tout au long de l'élaboration de ce travail qu'il trouve ici l'expression de nous reconnaissance et de nos profondes gratitudees.*

Nous remercions également aux membres du jury qui ont bien voulu nous honorer de leur présence afin d'évaluer ce travail.

Nos remerciements sincères vont également à toute personne contribuant de près ou de loin à l'élaboration de ce travail. Enfin, Nous souhaitons remercier nos familles, nos proches et toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de notre travail.

Dédicaces

Je dédie ce Travail à : Mes parents :

Mon père MOURAD, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices. L'homme, qui a sacrifié sa vie pour nous, rien au monde ne vaut les efforts que tu as fournis jour et nuit pour nous élever et nous procurer tout ce dont on avait besoin et bien plus. Aucune dédicace ne saura exprimer l'amour et l'estime que je te porte. Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien constant de votre part. Allah yerhmak.

Ma mère, qui a travaillé pour mon succès, par son amour, son soutien, tous les sacrifices faits et ses précieux conseils, pour tout son aide et sa présence dans ma vie, reçoit à travers ce travail aussi modeste que cela soit, expression de mes sentiments et ma gratitude éternelle.

A MA GRANDE MERE, Qui m'a accompagné par ses prières, sa douceur, puisse Dieu lui prêter longue vie et bcp de santé et de bonheur dans la vie.

Mes sœurs, Mes frères, Mes oncles, Mes tantes, cousins et cousines qui m'ont toujours entourée et m'ont motivé à devenir de mieux en mieux. Aucune dédicace ne saurait exprimer tout l'amour que j'ai pour Vous, Votre joie et votre gaieté me comblent de bonheur. Puisse Dieu vous garder, éclairer votre route et vous aider à réaliser à votre tour vos vœux les plus chers.

Enfin, à mon directeur de recherche : Mr TARFAYA pour leur disponibilité, patience et leur confiance en moi. Et à ceux qui m'ont aidé et soutenu pendant ces cinq années d'études.

BRIDJA MOHAMED OUSSAMA

Dédicaces

J'adresse mes sincères remerciements et ma gratitude à tous les professeurs qui m'ont enseigné dans cet institut, en particulier le professeur superviseur pour ses conseils et ses conseils. J'adresse également mes sincères remerciements et ma gratitude à ma famille, notamment à mon père Grelou Boualem et à ma mère sebai Halima, qui m'ont soutenu depuis le début de mon parcours académique.

GRELOU OMAR EL FAROUK

Abstract:

The field of structural health monitoring has undergone a significant transformation in recent years, marked by a concerted effort to replace traditional non-destructive evaluation techniques with innovative approaches based on smart materials. Among these, electromechanical impedance (EMI) stands out as one of the most promising techniques for developing advanced structural health monitoring (SHM) systems. EMI has emerged as a novel non-destructive evaluation method with substantial potential for real-time structural damage assessment. Its growing popularity is attributed to its ability to enhance structural safety and reliability while simultaneously reducing maintenance expenditures.

This study presents a comprehensive numerical investigation aimed at assessing the impact of various damage scenarios, combined with varying temperatures, on the electrical impedance of piezoelectric sensors used in EMI applications. The finite element method, implemented using ANSYS software, was employed to create three-dimensional (3D) simulations of an aluminum beam exposed to temperature variations. The proposed approach achieves real-time structural monitoring through harmonic measurements. The results unequivocally demonstrate by the EMI system, which remains robust for real-time monitoring across a spectrum of temperature conditions and the exceptional by the EMI system for damage detection sensitivity when co-exist with temperature in the same structure offered. This research underscores the potential of EMI as a valuable tool in the field of structural health monitoring, capable of ensuring the safety and integrity of structures while optimizing maintenance strategies.

Keywords:

Structural health monitoring (SHM), electro mechanical impedance (EMI), piezoelectric sensor, damage detection, temperature.

Résumé:

Le domaine de la surveillance de la santé des structures a connu une transformation significative ces dernières années, marquée par un effort concerté visant à remplacer les techniques traditionnelles d'évaluation non destructive par des approches innovantes basées sur les matériaux intelligents. Parmi celles-ci, l'impédance électromécanique (EMI) se distingue comme l'une des techniques les plus prometteuses pour le développement de systèmes avancés de surveillance de la santé des structures (SHM). L'EMI s'est imposée comme une nouvelle méthode d'évaluation non destructive offrant un potentiel considérable pour l'évaluation en temps réel des dommages structurels. Sa popularité croissante s'explique par sa capacité à améliorer la sécurité et la fiabilité des structures tout en réduisant simultanément les dépenses d'entretien.

Cette étude présente une enquête numérique complète visant à évaluer l'impact de différents scénarios de dommages, combinés à des variations de température, sur l'impédance électrique des capteurs piézoélectriques utilisés dans les applications EMI. La méthode des éléments finis, mise en œuvre à l'aide du logiciel ANSYS, a été utilisée pour créer des simulations tridimensionnelles (3D) d'une poutre en aluminium exposée à des variations de température. L'approche proposée permet une surveillance structurelle en temps réel grâce à des mesures harmoniques. Les résultats démontrent de manière indiscutable la robustesse du système EMI pour la surveillance en temps réel dans un large éventail de conditions de température, ainsi que l'exceptionnelle sensibilité du système EMI à la détection de dommages lorsque la température coexiste dans la même structure. Cette recherche souligne

le potentiel de l'EMI en tant qu'outil précieux dans le domaine de la surveillance de la santé des structures, capable de garantir la sécurité et l'intégrité des structures tout en optimisant les stratégies d'entretien.

Mots clé :

Surveillance de l'état des structures (SHM), impédance électromécanique (EMI), capteur piézoélectrique, détection des dommages, température.

ملخص :

شهد مجال مراقبة الصحة الهيكلية تحولاً كبيراً في السنوات الأخيرة، تميز بجهود متضافرة لاستبدال تقنيات التقييم التقليدية غير المدمرة بأساليب مبتكرة تعتمد على مواد ذكية. ومن بين هذه التقنيات، تبرز المعاوقة الكهروميكانيكية (EMI) باعتبارها واحدة من أكثر التقنيات الواعدة لتطوير أنظمة مراقبة الصحة الهيكلية المتقدمة (SHM). لقد برزت EMI كطريقة تقييم جديدة غير مدمرة توفر إمكانات كبيرة لتقييم الأضرار الهيكلية في الوقت الفعلي. ترجع شعبيتها المتزايدة إلى قدرتها على تحسين سلامة وموثوقية الهياكل مع تقليل نفقات الصيانة في نفس الوقت.

تقدم هذه الدراسة بحثاً رقمياً شاملاً يهدف إلى تقييم تأثير سيناريوهات الضرر المختلفة، جنباً إلى جنب مع التغيرات في درجات الحرارة، على المعاوقة الكهربائية لأجهزة الاستشعار الكهروضغطية المستخدمة في تطبيقات EMI. تم استخدام طريقة العناصر المحدودة، التي تم تنفيذها باستخدام برنامج ANSYS، لإنشاء محاكاة ثلاثية الأبعاد (D3) لشعاع الألمنيوم المعرض لتغيرات درجات الحرارة. يتيح النهج المقترح المراقبة الهيكلية في الوقت الحقيقي من خلال القياسات التوافقية. تظهر النتائج بشكل لا يقبل الجدل قوة نظام EMI للمراقبة في الوقت الفعلي في نطاق واسع من ظروف درجة الحرارة، فضلاً عن الحساسية الاستثنائية لنظام EMI لاكتشاف الأضرار عندما تتواجد درجة الحرارة في نفس الهيكل. يسلط هذا البحث الضوء على إمكانات EMI كأداة قيمة في مجال مراقبة الصحة الهيكلية، قادرة على ضمان سلامة وسلامة الهياكل مع تحسين استراتيجيات الصيانة.

الكلمات الدلالية:

مراقبة الصحة الهيكلية، المعاوقة الكهروميكانيكية، مستشعر كهروضغطية، اكتشاف الأضرار، درجة الحرارة.

Table des matières

REMERCIEMENT	2
DÉDICACE.....	
RÉSUMÉ.....	
SOMMAIRE	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES.....	
CHAPITRE 01 : INTRODUCTION	2
1.1 INTRODUCTION GÉNÉRALE	2
1.2 SURVEILLANCE DE LA SANTÉ DES STRUCTURES.....	6
1.2.1 Le SHM, pour quoi faire ?	7
1.2.2 Avantages d'une surveillance des structures.....	7
1.3 TECHNIQUE DE L'IMPÉDANCE ÉLECTROMÉCANIQUE.....	7
1.4 SURVEILLANCE DE LA SANTÉ STRUCTURELLE BASÉE SUR L'IMPÉDANCE	13
1.5 MATÉRIAU PIÉZOÉLECTRIQUE	15
1.6 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE	18
CHAPITRE 02 : ETAT DE L'ART.....	21
2.1 INTRODUCTION :	21
2.2 BILAN DES TRAVAUX PRECEDENTS	21
2.2.1 Dommages (Fissure).....	22
2.2.2 Effet de la température.....	24
2.2.3 Indices sensibles aux dommages	27
2.3 CONCLUSION	29
CHAPITRE 03 : MODÉLISATION PAR ÉLÉMENTS FINIS	31
3.1 INTRODUCTION	31
3.2 ANALYSE PAR ÉLÉMENTS FINIS (AEF).....	31
3.2.1 Logiciel ANSYS	32
3.2.2 Modèle de matériau	33
3.3 CONCLUSION	35
CHAPITRE 04 : RÉSULTATS ET DISCUSSION.	37
4.1 INTRODUCTION	37
4.2 EFFET DE LA TEMPÉRATURE.....	37
4.3 DÉTECTION DES DOMMAGES.....	39
4.4 COMPENSATION DES EFFETS DE LA TEMPÉRATURE	42
4.5 CONCLUSION	47
5 CONCLUSION GENERALE.....	48
LES REFERENCE.....	49

TABLEAU DE FIGURES

FIGURE 1.1 : METHODES DE MESURE DE L'IMPEDANCE ELECTROMECHANIQUE : (A)-FONCTION DE REPOSE EN FREQUENCE PONCTUELLE, (B)- FONCTION DE REPOSE EN FREQUENCE DE TRANSFERT	10
FIGURE 1.2 : SYSTEME D'IMPEDANCE ELECTROMECHANIQUE [38]	14
FIGURE 1.3 : MODELE D'INTERACTION POUR UN PATCH PZT ET UN STRUCTURE HOTE [39]	14
FIGURE 1.4 : ORGANIGRAMME DE LA METHODOLOGIE DE RECHERCHE	19
FIGURE 3.1: MODELE EF POUR PATCH CARRE SUR POUTRE SAINES	33
FIGURE 4.1 : COMPARAISON ENTRE SIMULATION ET RESULTAT EXPERIMENTAL POUR UNE POUTRE EN ALUMINIUM (25 °C).	37
FIGURE 4.2: PARTIE REELLE DES IMPEDANCES ELECTROMECHANIQUES RESULTANT DES CHANGEMENTS DE TEMPERATURE.....	38
FIGURE 4.3 : MODELE ELEMENTS FINIS D'UNE POUTRE EN ALUMINIUM AVEC DOMMAGES.	39
FIGURE 4.4 : IMPEDANCE REELLE DE LA PIECE POUR DIFFERENTES TAILLES DE DOMMAGES.....	40
FIGURE 4.5: HISTOGRAMME DU (A) RMSD ET (B) CCDM DES DOMMAGES	42
FIGURE 4.6 : PARTIE REELLE DES SIGNATURES D'IMPEDANCE AVEC LA METHODE DE COMPENSATION PROPOSEE POUR LES EFFETS DE TEMPERATURE	44
FIGURE 4.7 : PARTIE REELLE DES SIGNATURES D'IMPEDANCE ET DES INDICES CCDM OBTENUS POUR LA POUTRE (A) ENDOMMAGEANT LA STRUCTURE A 35°C SANS COMPENSATION ET (B) AVEC LA METHODE DE COMPENSATION PROPOSEE POUR LES EFFETS DE TEMPERATURE. ...	46

TABLEAUX

TABLE 3.1 : PROPRIETES MATERIELLES DE LA POUTRE EN ALUMINIUM (ALLIAGE 2024).	34
TABLE 3.2 : PROPRIETES MATERIELLES DU PATCH PZT PSI-5H4E.....	34

LISTE DES ABRÉVIATIONS

CCDM	Métrique d'écart du coefficient de corrélation
DCSS	Système de stockage de fonte sèche
EFS	Changement de fréquence effectif
EMI	Impédance électromécanique
EOCs	des Conditions environnementales et opérationnelles
AEF	Analyse par éléments finis
FEM	Méthode des éléments finis
GUW	Onde ultrasonique guidée
ISHM	Surveillance de la santé structurelle basée sur l'impédance
MFC	Macro composite à fibres
NDE	Évaluation non destructive
NDT	Contrôle non destructif
PSC	Force de précontrainte dans le béton précontraint
PWAS	Capteur actif de plaquette piézoélectrique
PZT	Piézoélectrique (Zirconate Titanate de Plomb)
RMSE	Dérivée quadratique moyenne
SEM	La microscopie électronique à balayage
SHM	Surveillance de la santé des structures

LISTE DES SYMBOLES

Y	Admission électrique
Z_s	Impédance électrique de la structure
Z_a	Impédance électrique du piézoélectrique
Y_{xx}^E	Module de Young complexe du PZT
d_{3x}	Constante de couplage piézoélectrique
ε_{33}^T	Constante diélectrique à contrainte nulle
δ	Tangente de perte diélectrique
κ_{31}	Coefficient de couplage croisé électromécanique du transducteur PZT
E	Module de Young
Z	Impédance
f	Fréquence
ω	Fréquence radiale

CHAPITRE 01 :

INTRODUCTION

1 CHAPITRE 01 : INTRODUCTION

1.1 INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les impératifs de sécurité et de réduction des coûts ont une influence considérable sur les stratégies de la maintenance des structures, en particulier dans le domaine du transport aérien. A moyen terme, les compagnies aériennes s'orientent vers la mise en œuvre d'une stratégie de maintenance prédictive conditionnelle, qui d'un point de vue économique mais aussi vis-à-vis de la disponibilité des appareils, est plus intéressante qu'une maintenance systématique programmée. Ceci est rendu possible par l'intégration de capteurs au sein des structures afin de disposer de systèmes d'évaluation non destructive intégrés qui accompagneront la structure durant la totalité de sa vie. Il s'agit des systèmes intégrés de contrôle de la santé in situ des structures appelés encore les systèmes SHM (en anglais Structural Health Monitoring). Reposant, généralement, sur des réseaux de capteurs et adossés à des routines de traitement avancé des signaux, les systèmes SHM permettent de surveiller en continu ou à intervalles réguliers l'intégrité des structures en délivrant un diagnostic sur leur santé et leur durée de vie résiduelle, permettant ainsi la programmation des interventions de maintenance nécessaires. Le SHM s'inscrit donc dans une stratégie à la fois économique et sécuritaire pour les industriels.

La plupart des technologies SHM reposent sur les technologies de Contrôle Non Destructif (CND). En effet, celles-ci permettent d'évaluer les altérations d'une structure à un instant précis, sans l'endommager ou la détruire. Les principaux apports du SHM par rapport au CND sont l'intégration et l'automatisation du contrôle dans une stratégie globale de contrôle et de maintenance des structures. Le SHM permet notamment d'améliorer la connaissance des structures par un meilleur suivi et d'optimiser les interventions de maintenance. Plusieurs facteurs ont contribué au développement de l'approche SHM ces

dernières années : les capacités et les algorithmes de simulation numérique ; la réduction de la consommation des capteurs et leur capacité de communication sans fil.

La mise en œuvre de surveillance de la santé structurelle (SHM) est essentielle dans les infrastructures mécaniques ou civiles afin de détecter les anomalies et garantir leur performance optimale. Plusieurs méthodes de SHM sont couramment utilisées pour évaluer l'intégrité et le niveau de sécurité des structures en service. Parmi ces méthodes, on peut citer la propagation des ondes [1,2], l'émission acoustique [3], la surveillance comparative sous vide [4] et l'impédance électromécanique (EMI) [5]. L'approche EMI, qui se base sur les propriétés de couplage électromécanique des capteurs piézoélectriques (PZT), est considérée comme l'une des plus prometteuses.

L'approche EMI permet d'identifier les anomalies structurelles en exploitant les caractéristiques électromécaniques des capteurs PZT. Ces capteurs sont légers et de petite taille, ce qui facilite leur installation sur les structures à surveiller [6]. Grâce à l'EMI, il est possible de détecter précocement les dommages émergents et de les localiser avec précision. Cette méthode offre donc une solution efficace pour assurer la surveillance en temps réel des infrastructures, améliorant ainsi leur sécurité et leur durabilité. Ces capteurs sont fixés sur la structure surveillée pour détecter tout comportement anormal lors des conditions opérationnelles et garantir son intégrité. Pour repérer la présence d'une fissure, l'approche EMI mesure l'impédance mécanique de la structure en utilisant les propriétés de couplage électromécanique des capteurs piézoélectriques. En effet, l'impédance électrique des capteurs piézoélectriques est directement liée à l'impédance mécanique de l'échantillon surveillé. Dans la prochaine étape, l'impédance mesurée est comparée à une mesure d'impédance de référence pour évaluer l'étendue des dommages [7-9]. Afin d'obtenir des résultats d'inspection précis, il est nécessaire d'estimer l'impédance électrique à des fréquences plus élevées.

La méthode EMI a suscité l'intérêt de nombreux chercheurs pour améliorer son efficacité, et de nombreuses études de recherche [10, 11] ont montré qu'il est possible de mettre en œuvre la méthode EMI non seulement en laboratoire, mais aussi dans des configurations complexes. Liang et al. [12] ont travaillé sur l'extension théorique de l'approche EMI et son application dans le SHM. Yang et al. [13, 14] ont analysé l'impact de l'épaisseur de la liaison des capteurs sur la signature d'impédance électrique en effectuant une analyse numérique du contact entre la structure surveillée et le capteur PZT collé. Seyed et al. [15] ont réalisé une modélisation par éléments finis (MEF) d'un cylindre creux pour étudier l'effet de l'emplacement et du type de fissure sur le spectre EMI. Cependant, l'exigence d'une petite taille d'élément dans la MEF, en particulier dans une plage de hautes fréquences, a entravé l'efficacité de leur travail dans les applications pratiques en raison du coût élevé. Park et al. [16] ont proposé une méthode d'éléments spectraux (MES) pour caractériser les propriétés efficaces d'un patch PZT couplé à une structure en poutre. Pour construire les matrices de rigidité et de masse des éléments, la MES utilise des fonctions de forme dépendantes de la fréquence. Par conséquent, elle présente des caractéristiques dynamiques précises d'un spécimen surveillé et permet d'obtenir des interprétations précises même dans la plage de hautes fréquences [17].

Il est vrai que la méthode basée sur l'impédance est qualifiée pour être mise en œuvre dans des infrastructures complexes afin d'identifier les dommages naissants, mais certains facteurs particuliers ont entravé l'intégrité de l'EMI dans les applications réelles. Dans la plupart des cas, le composant examiné est continuellement exposé à plusieurs conditions environnementales et de fonctionnement (EOC) variables, et malheureusement, cela est considéré comme normal dans les inspections régulières. Les paramètres environnementaux qui affectent le système d'inspection EMI incluent les variations des conditions de charge appliquées, de l'humidité, de la température. Ces variations peuvent entraver le processus

d'inspection et conduire à une mauvaise interprétation pour quantifier l'indice de dommage. La température est considérée comme un facteur environnemental majeur influençant la procédure d'inspection EMI. De nombreuses approches ont été proposées pour la compensation des variations de température dans le SHM. Bhalla et al. [18] ont examiné l'impact de la température ambiante sur les signatures d'impédance. Une méthode de compensation de température basée sur la corrélation croisée a été développée par Sun et al. [19] pour optimiser le décalage horizontal dans la signature d'impédance électrique. Park et al. [20] Ils ont introduit les décalages appropriés dans les directions verticale et horizontale et ont présenté une approche de SHM basée sur l'impédance sous des conditions de température opérationnelle variable en tenant compte des écarts quadratiques moyens des signatures acquises. De plus, Koo et al. [21] ont examiné l'approche présentée par Park et al. [22] et ont proposé une technique efficace appelée décalage de fréquence effective (EFS) pour compenser l'impact de la température environnementale. Cependant, toutes ces approches mentionnées ci-dessus présentent certaines limitations. Par exemple, dans le cas de la large plage de fréquences, il a été reconnu que la valeur élevée du coefficient de corrélation entre les deux signatures d'impédance entraîne une inexactitude dans les indices métriques. De plus, il est suggéré de prendre une valeur de pas de fréquence plus petite par rapport aux décalages de fréquence causés par les dommages structurels et les variations de température environnementale. L'identification de ces dommages structurels et l'évaluation de l'impact de la température environnementale sur la signature d'impédance de la structure examinée dans la bande passante de fréquences étendue sont les motivations du travail de recherche actuel. Il est connu que la température et les contraintes sont deux charges environnementales importantes dans les domaines de l'ingénierie pratique, et des recherches EMI corrélées à la température et aux contraintes ont également été rapportées [23-25]. Dans ce travail, nous étudions expérimentalement et numériquement l'impact des températures variables sur les

signatures d'impédance des capteurs. Il est à noter que la plupart des travaux existants ont abordé ce problème dans le cadre d'une configuration expérimentale ou d'un modèle mathématique, mais aucun n'a pris en compte l'effet de la température sur les différentes fissures présentes sur la poutre. Nous examinerons cela à la fois de manière expérimentale et numérique. De plus, différentes techniques de compensation pour les effets de la variation de température peuvent être mises en œuvre. Par conséquent, les résultats présentés ici revêtent une importance et une originalité particulières.

1.2 SURVEILLANCE DE LA SANTÉ DES STRUCTURES

Apparue à la fin des années 1980, la surveillance de la santé des structures (SHM) est l'une des méthodes permettant de détecter et de surveiller les infrastructures afin d'éviter la propagation des dommages. En d'autres termes, la SHM consiste à intégrer des dispositifs de détection, et éventuellement des dispositifs d'actionnement, pour enregistrer, analyser, localiser et prédire les conditions de chargement et de dommages d'une structure, de manière à ce que les contrôles non destructifs (CND) deviennent une partie intégrante de la structure et de son matériau [26].

De plus, la SHM est en train de devenir un outil essentiel permettant aux ingénieurs d'améliorer la sécurité, la fiabilité et la maintenabilité des structures critiques. La SHM combine différentes technologies de détection à un contrôleur de mesure intégré pour capturer, enregistrer et analyser des données en temps réel. Les systèmes de SHM sont conçus pour surveiller et tester de manière fiable la santé et les performances des structures. La figure 1.2 illustre la vue schématique du principe et de l'organisation d'un système de SHM.

1.2.1 Le SHM, pour quoi faire ?

Le Structural health monitoring (SHM) est utilisé pour **surveiller ou suivre le comportement d'une structure, ainsi que son évolution dans son ensemble.**

Mais les objectifs recherchés peuvent être différents, par exemple :

- Augmenter la durée de vie de la structure.
- Faciliter la maintenance en sachant où intervenir.
- Mieux gérer et planifier la maintenance (maintenance prédictive).
- Améliorer les connaissances sur une structure et son comportement, par exemple pour la modéliser.

1.2.2 Avantages d'une surveillance des structures

- Augmenter la sécurité et la durée de vie des structures.
- Observer en permanence l'état des structures.
- Automatiser la maintenance.
- Détecter très tôt des dommages pour permettre une réponse proactive.
- Prolonger le cycle de révision.
- Économiser des coûts et gagner du temps.

1.3 Technique de l'impédance électromécanique

Ces dernières années, la technique de l'impédance électromécanique est apparue comme une méthode prometteuse de surveillance de la santé des structures (SHM). Elle a été appliquée avec succès dans différents domaines de l'ingénierie, tels que l'aérospatiale, les structures d'aéronefs et les structures civiles [27-28].

Cette technique de surveillance de l'état des structures repose sur les mesures de l'impédance électromécanique. Il utilise des transducteurs piézoélectriques, principalement

constitués de céramique piézoélectrique, comme actionneurs et capteurs. En raison de la présence du couplage électromécanique dans le transducteur piézoélectrique, son impédance électrique est directement liée aux propriétés mécaniques de la structure hôte et est appelée impédance électromécanique [29,30,31]. Les variations des paramètres dynamiques de la structure, c'est-à-dire à la suite de dommages, influencent les tracés d'impédance mesurés, qui à leur tour peuvent être utilisés pour l'évaluation des dommages.

Les premières recherches ont démontré que cette méthode était capable de détecter les dommages dans une variété de structures, notamment des sections de treillis et de ponts, des empennages d'avions, des murs en béton, des joints soudés et des pipelines [32]. Plus récemment, la méthode d'impédance a été utilisée pour détecter la corrosion [33] ainsi que les dommages aux systèmes de protection thermique et aux voies ferrées. Elle a également permis de détecter les dommages dans les matériaux composites.

Pour mettre en œuvre cette technique, il est nécessaire de fixer une plaque piézoélectrique sur la structure hôte à l'aide d'un adhésif époxy conducteur et résistant. Une vibration harmonique est ensuite appliquée électriquement à l'aide d'un analyseur d'impédance. Le signal de tension harmonique est transmis à la plaque, ce qui entraîne la déformation de la plaque piézoélectrique ainsi que de la surface de la structure hôte. La réponse mécanique induite par la surface de la structure hôte est accumulée et convertie par la plaque piézoélectrique en une réponse électrique sous forme de charge. L'analyseur d'impédance mesure alors l'admittance électromécanique de la plaque piézoélectrique collée, où le signal est interprété en termes de conductance et de susceptance, correspondant respectivement aux parties réelle et imaginaire de l'admittance.

En utilisant l'analyseur d'impédance, il est possible de mesurer une large gamme de fréquences, pouvant atteindre jusqu'à 400 kHz, tandis que les dispositifs classiques sont limités à une plage de fréquences d'environ 100 kHz. Puisque l'impédance est inversement

proportionnelle à l'admittance, le signal d'impédance peut être obtenu en calculant l'inverse de la valeur d'admittance.

Ensuite, le signal d'impédance est tracé sur une plage de fréquences donnée afin d'obtenir une signature distincte de la structure hôte. Cette signature est ensuite comparée à la signature de référence de la structure initiale et non endommagée. Toute variation de la courbe du signal résultant de la comparaison des réponses d'impédance indiquera la présence de dommages ou de fissures sur la structure hôte. Ainsi, les changements dans la forme ou l'amplitude du signal d'impédance peuvent être utilisés comme indicateurs de la présence de défauts ou de dégradations dans la structure surveillée.

Le concept de base de la technique EMI est associé au changement de l'impédance électrique des patchs PZT selon l'équation suivante :

$$Z(\omega) = \left[i\omega C \left(1 - k_{31}^2 \frac{Z_{str}(\omega)}{Z_{PZT}(\omega) + Z_{str}(\omega)} \right) \right]^{-1} \quad (1-1)$$

où $Z(\omega)$ est l'admittance électromécanique équivalente, telle qu'elle est observée aux bornes du transducteur PZT, C est la capacité à vide du transducteur PZT, k_{31} est le coefficient de couplage électromécanique du transducteur PZT, $k_{31} = d_{31}/S_{11} * \epsilon_{33}$, d_{31} est la constante piézoélectrique, S_{11} est la compliance, ϵ_{33} est la permittivité diélectrique, Z_{str} est l'impédance mécanique de la structure, et Z_{PZT} est l'impédance mécanique du transducteur PZT [34].

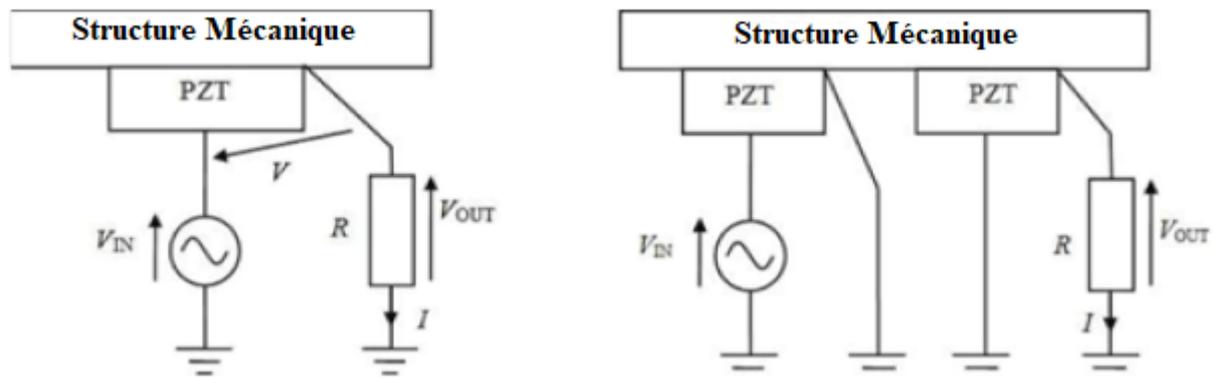


Figure 1.1 : Méthodes de mesure de l'impédance électromécanique : (a)-fonction de réponse en fréquence ponctuelle, (b)- fonction de réponse en fréquence de transfert

La méthode EMI est utilisée pour détecter les dommages structurels par les transducteurs PZT. Des recherches récentes ont démontré que le transducteur PZT peut être utilisé à la fois comme actionneur et comme capteur en raison de ses effets piézoélectriques directs et inverses. Le système de couplage à structure PZT à impédance électromécanique unidimensionnelle est illustré à la figure 1.1. Dans ce système, lorsqu'un courant alternatif est appliqué sur le transducteur PZT, il crée des vibrations harmoniques à hautes fréquences, entraînant les vibrations de la structure hôte au en même temps. Ensuite, la réponse électrique est collectée et analysée sous forme d'impédance électromécanique. Lorsque des dommages se produisent dans la structure, les propriétés structurales modifiées, telles que la réduction de la rigidité et de la masse, affecteront l'impédance électromécanique du transducteur PZT. Par conséquent, en collectant et en analysant la différence des signaux d'impédance électromécanique avant et après les dommages structurels, l'état des dommages dans la structure peut être détecté dans des cas spécifiques.

Les capteurs-actionneurs piézoélectriques sont étroitement fixés à la structure, et leur variation d'EMI est mesurée sur un large spectre de fréquences situé dans la bande des hautes fréquences. La réponse en fréquence, la phase et l'amplitude du transducteur, la réponse d'impédance (parties réelle et imaginaire) ainsi que d'autres paramètres physiques significatifs servent d'indicateurs potentiels de dommages à la structure et reflètent son niveau d'intégrité

structurelle. L'approche du transducteur s'est avérée particulièrement efficace dans la plage ultrasonique de fréquences, où les changements dans la dynamique locale dus à l'apparition de dommages au sein de la structure sont capturés. Ces changements à un stade précoce sont très petits et ont un impact minime sur la dynamique globale de la structure, ce qui les rend difficiles à détecter avec les techniques traditionnelles de vibration à basse fréquence [35].

L'approche EMI présente plusieurs avantages significatifs par rapport aux autres techniques de surveillance structurelle. Voici les principaux avantages :

- ❖ L'un des principaux avantages de l'approche EMI est qu'elle ne repose sur aucun modèle mathématique spécifique, ce qui permet de l'appliquer facilement aux structures complexes. Contrairement à certaines techniques qui nécessitent des modèles mathématiques complexes pour interpréter les données, l'EMI se focalise sur les variations mesurables des paramètres d'impédance. Cela rend cette approche plus flexible et adaptable. On peut ainsi mettre en œuvre l'EMI sur une variété de structures sans avoir à élaborer des modèles mathématiques spécifiques pour chaque cas. Par conséquent, l'approche EMI offre une solution pratique et polyvalente pour la surveillance des structures complexes.
- ❖ La technique EMI est l'utilisation de capteurs de petite taille et non intrusifs pour surveiller des emplacements autrement inaccessibles. Les capteurs EMI peuvent être fixés sur la surface externe d'une structure sans nécessiter de modifications majeures ou de démontage. Cette méthode permet de surveiller des zones difficiles d'accès, telles que l'intérieur de structures creuses, les espaces restreints ou les composants enfouis. Les capteurs EMI sont généralement compacts et peuvent être intégrés de manière discrète, ce qui les rend idéaux pour la surveillance continue de structures sans perturber leur fonctionnement normal. Cela offre une solution pratique pour la

détection précoce des dommages et la surveillance à long terme de l'intégrité structurelle.

- ❖ Le capteur PZT présente d'excellentes caractéristiques dans des conditions de fonctionnement normales, notamment une grande plage de linéarité, une réponse rapide, un poids léger, une haute efficacité de conversion et une stabilité à long terme. Le capteur PZT est basé sur la technologie des matériaux piézoélectriques, qui offre une sensibilité élevée aux contraintes mécaniques et aux variations de charge. Il peut convertir rapidement les signaux mécaniques en signaux électriques, permettant ainsi une détection précise et en temps réel des variations de l'impédance électrique. De plus, grâce à sa légèreté et à sa petite taille, le capteur PZT peut être facilement intégré dans différentes structures sans perturber leur fonctionnement. Enfin, sa stabilité à long terme garantit des mesures fiables et précises sur une période prolongée, ce qui en fait un choix idéal pour la surveillance de l'intégrité structurelle.
- ❖ La technique, en raison de sa haute fréquence, est très sensible aux légères variations locales. Cela signifie qu'elle est capable de détecter et de réagir aux moindres changements survenant au niveau local dans une structure. Cette sensibilité élevée permet de détecter des dommages ou des changements subtils qui pourraient être négligés par d'autres méthodes de surveillance. Grâce à cette sensibilité, la technique EMI est particulièrement adaptée à la détection précoce de dommages naissants ou de dégradations localisées, ce qui permet d'entreprendre des actions correctives avant que les problèmes ne s'aggravent et n'affectent l'intégrité globale de la structure.
- ❖ Les données mesurées peuvent être facilement interprétées. Une fois que les mesures d'impédance ont été effectuées, les données obtenues peuvent être analysées et interprétées de manière relativement simple. Les variations dans les signatures

d'impédance peuvent être observées et comparées aux valeurs de référence pour déterminer l'état de santé de la structure.

- ❖ La technique peut être mise en œuvre pour la surveillance en ligne de l'état de santé des structures. Cela signifie que les mesures d'impédance peuvent être effectuées en temps réel, permettant une surveillance continue de la structure.
- ❖ La technique peut être mise en œuvre pour la surveillance de la santé en ligne.

1.4 Surveillance de la santé structurelle basée sur l'impédance

La technique de surveillance de la santé des structures basée sur l'impédance utilise l'effet de couplage (propriété électromécanique) entre la plaque PZT et la structure hôte. Cet effet de couplage peut être expliqué de manière conceptuelle à l'aide d'un système électromécanique idéalisé à une dimension, comme illustré dans les figures 1.2 et 1.3.

L'aspect électrique de la plaque PZT est caractérisé par son impédance en court-circuit, tandis que la structure hôte est représentée par son impédance mécanique au point d'excitation, qui prend en compte les effets de masse, de rigidité, d'amortissement et des conditions aux limites.

Les transducteurs piézoélectriques sont devenus des matériaux intelligents efficaces capables d'interagir avec la structure hôte pour produire une signature de santé unique lorsqu'ils sont soumis à des excitations structurales haute fréquence en présence d'un champ électrique [36]. La méthode permettant d'obtenir de telles signatures, en tant que fonction inverse de l'impédance structurale, est appelée technique d'impédance électromécanique [37]. L'interaction électromécanique entre la structure et le matériau piézoélectrique peut être comprise grâce à l'équation d'admittance électrique $Y(\omega)$ développée par [38]. L'admittance électrique est l'inverse de l'impédance électrique combinée de la plaque piézoélectrique $Z_a(\omega)$ et de l'impédance de la structure $Z_s(\omega)$.

$$Y(\omega) = i\omega a \left(\varepsilon_{33}^T (1 - i\delta) \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 Y_{xx}^E \right) \quad (1-2)$$

Où Y est l'admittance électrique, Z_s et Z_a sont les impédances électriques de la structure et de la plaquette piézoélectrique respectivement, Y_{xx}^E est le module d'Young complexe du PZT avec un champ électrique nul, d_{3x} est la constante de couplage piézoélectrique dans une direction X arbitraire à contrainte nulle, ε_{33}^T est la constante diélectrique à contrainte nulle, δ est la tangente de perte diélectrique du PZT, et a est une constante géométrique du PZT. Dans cette formule, en cas de dommage, tous les paramètres restent constants à l'exception de Z_s , qui est liée à la rigidité de la structure hôte. Par conséquent, tout changement dans l'admittance électrique est dû à des modifications de l'intégrité structurale.

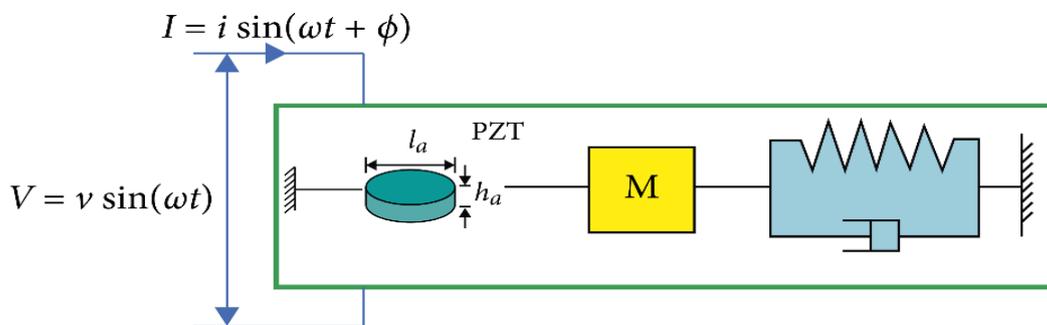


Figure 1.2 : Système d'impédance électromécanique [38]

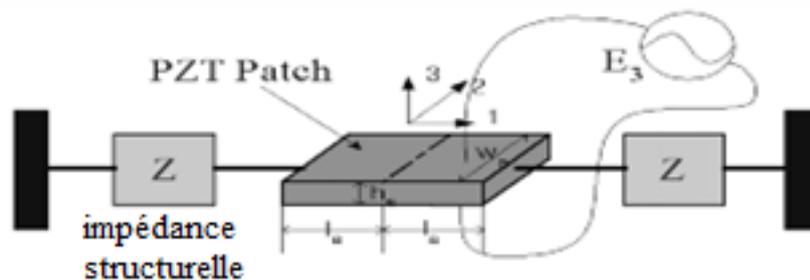


Figure 1.3 : Modèle d'interaction pour un Patch PZT et un Structure hôte [39]

1.5 Matériau piézoélectrique

Le matériau piézoélectrique est capable de générer de l'électricité lorsqu'il est soumis à une contrainte mécanique. Il fonctionne également en sens inverse, générant une déformation sous l'effet d'un champ électrique appliqué. Ce phénomène a été découvert pour la première fois en 1880 lorsque Pierre et Jacques Curie ont démontré que certains cristaux spécialement préparés (comme le quartz, la topaze et le sel de Rochelle) pouvaient produire une charge électrique à leur surface lorsqu'ils étaient soumis à une contrainte mécanique. Un an plus tard, Gabriel Lippmann a déduit, d'après les principes de la thermodynamique, que ces mêmes cristaux pouvaient également subir une déformation en réponse à un champ électrique appliqué. Les Curies ont ensuite confirmé expérimentalement cet effet et ont apporté la preuve que la piézoélectricité était un phénomène linéaire et réversible.

La détection des sous-marins par le son ultrasonore pendant la Première Guerre mondiale fut l'une des premières applications de la piézoélectricité. Le transducteur, résonnant à 50 MHz, était composé de deux plaques d'acier entre lesquelles étaient collés des cristaux de quartz fins disposés en mosaïque. Le dispositif fonctionnait en émettant une impulsion acoustique de haute fréquence lorsqu'il était immergé sous l'eau et qu'une tension était appliquée. La fréquence émise permettait de calculer la profondeur en utilisant l'écho renvoyé. Ce mécanisme a ensuite servi de base au sonar, et son évolution progressive a motivé l'utilisation de dispositifs piézoélectriques dans d'autres domaines d'application. Ces domaines comprenaient des dispositifs pour les filtres de signaux résonants et non résonants, les microphones et les transducteurs ultrasonores. Bien que leurs applications associées aient évolué à l'époque, certains de ces dispositifs présentaient des inconvénients en raison de leurs performances matérielles limitées et de leur faisabilité commerciale restreinte.

Dans leur étude, Meitzler et al.[39] ont analysé les propriétés des matériaux piézoélectriques et ont présenté la relation entre ces propriétés pour une petite pièce de la manière suivante :

$$D_i = e_{ij}^\sigma E_j + d_{im}^d \sigma_m \quad (1-3)$$

$$\varepsilon_k = d_{jk}^c E_j + s_{km}^E \sigma_m \quad (1-4)$$

Ce qui, exprimé sous forme de matrice, sera :

$$\begin{bmatrix} D \\ \varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^\sigma & d^d \\ d^c & s^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ \sigma \end{bmatrix} \quad (1-5)$$

La matrice $\{D\}$ de taille (3×1) représente le déplacement électrique (Coulomb/m²), ε est le vecteur de déformation de taille (6×1) (sans dimension), E est le vecteur de champ électrique appliqué de taille (3×1) (Volt/m), et σ_m est le vecteur de contrainte de taille (6×1) (N/m²). Les constantes piézoélectriques comprennent la permittivité diélectrique e_{ij}^σ de taille (3×3) (Farad/m), les coefficients piézoélectriques d_{im}^d (3×6) et d_{jk}^c (6×3) (Coulomb/N ou m/Volt), ainsi que la compliance élastique s_{km}^E de taille (6×6) (m²/N). Le coefficient piézoélectrique d_{jk}^c (m/Volt) définit la déformation par unité de champ électrique à contrainte constante, et d_{im}^d (Coulomb/N) définit le déplacement électrique par unité de contrainte à champ électrique constant. Les exposants c et d ont été ajoutés pour différencier les effets piézoélectriques directs et inverses, bien que ces coefficients soient généralement équivalents en pratique. Les exposants σ et E indiquent que la quantité est mesurée à contrainte constante et à champ électrique constant, respectivement. L'équation 1-3 représente l'équation du capteur, tandis que l'équation 1-4 représente l'équation d'activation [40].

Pour une feuille de matériau piézoélectrique, la direction de polarisation, qui est généralement le long de l'épaisseur, est désignée comme l'axe 3, tandis que les axes 1 et 2 se trouvent dans le plan de la feuille. Ainsi, la matrice d_{jk}^c peut être exprimée de la manière suivante :

$$d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{32} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{24} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1-6)$$

Les coefficients d_{31}, d_{32} , relient respectivement les déformations normales dans les directions 1, 2 et 3 à un champ le long de la direction de polarisation, E_3 . Les coefficients d_{15} et d_{24} relient respectivement les déformations de cisaillement dans le plan 1-3 au champ E_1 et les déformations de cisaillement dans le plan 2-3 au champ E_2 . La matrice de permittivité pour un matériau piézoélectrique est la suivante :

$$[\varepsilon_p^T] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{33}^T & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{11}^T \end{bmatrix} 10^{-8} F/m \quad (1-7)$$

ε_{11}^T Représente la permittivité pour le déplacement diélectrique et le champ électrique dans la direction 1 (perpendiculaire à la direction de polarisation de l'élément céramique), sous contrainte constante.

ε_{33}^T Représente la permittivité pour le déplacement diélectrique et le champ électrique dans la direction 3 (parallèle à la direction de polarisation de l'élément céramique), sous contrainte constante. L'unité de ε_p^T est le farad par mètre. La permittivité est également connue sous le nom de constante diélectrique, qui fait référence au déplacement diélectrique par unité de champ électrique.

Un logiciel commercial de méthode des éléments finis est utilisé pour calculer avec précision l'impédance électromécanique. Quatre propriétés matérielles sont nécessaires : la rigidité (compliance sous forme inverse), la matrice piézoélectrique, la permittivité électrique et la densité.

1.6 Méthodologie de recherche

Pour atteindre les objectifs globaux de la recherche, il est essentiel d'adopter une approche méthodique dans la mise en œuvre du cadre de recherche. Par conséquent, la présente recherche adopte l'approche suivante :

- i. État de l'art : La compréhension et l'évaluation de l'état actuel de la recherche constituent l'une des étapes les plus fondamentales et importantes de toute activité de recherche. Cela est réalisé en examinant les travaux et les résultats publiés par d'autres chercheurs dans des livres, des revues, des bases de données en ligne, etc. Effectuer cette étape permet au chercheur de déterminer les différents aspects, l'importance, les contributions potentielles et les méthodes utilisées pour mener à bien la recherche.
- ii. Simulation de la technique d'impédance électromécanique : Des simulations de la liaison d'une pièce à des structures mécaniques ont été effectuées en utilisant une analyse couplée des champs dans le logiciel ANSYS 14.5, basé sur la méthode des éléments finis (multi physique).
- iii. Développement d'algorithmes : différents algorithmes ont été élaborés et mis en œuvre pour compenser les effets de la température
- iv. Validation : La validation consiste à comparer les résultats simulés avec les résultats expérimentaux ou ceux présents dans la littérature.

Un organigramme de la méthodologie de recherche est présenté à la figure 1.4

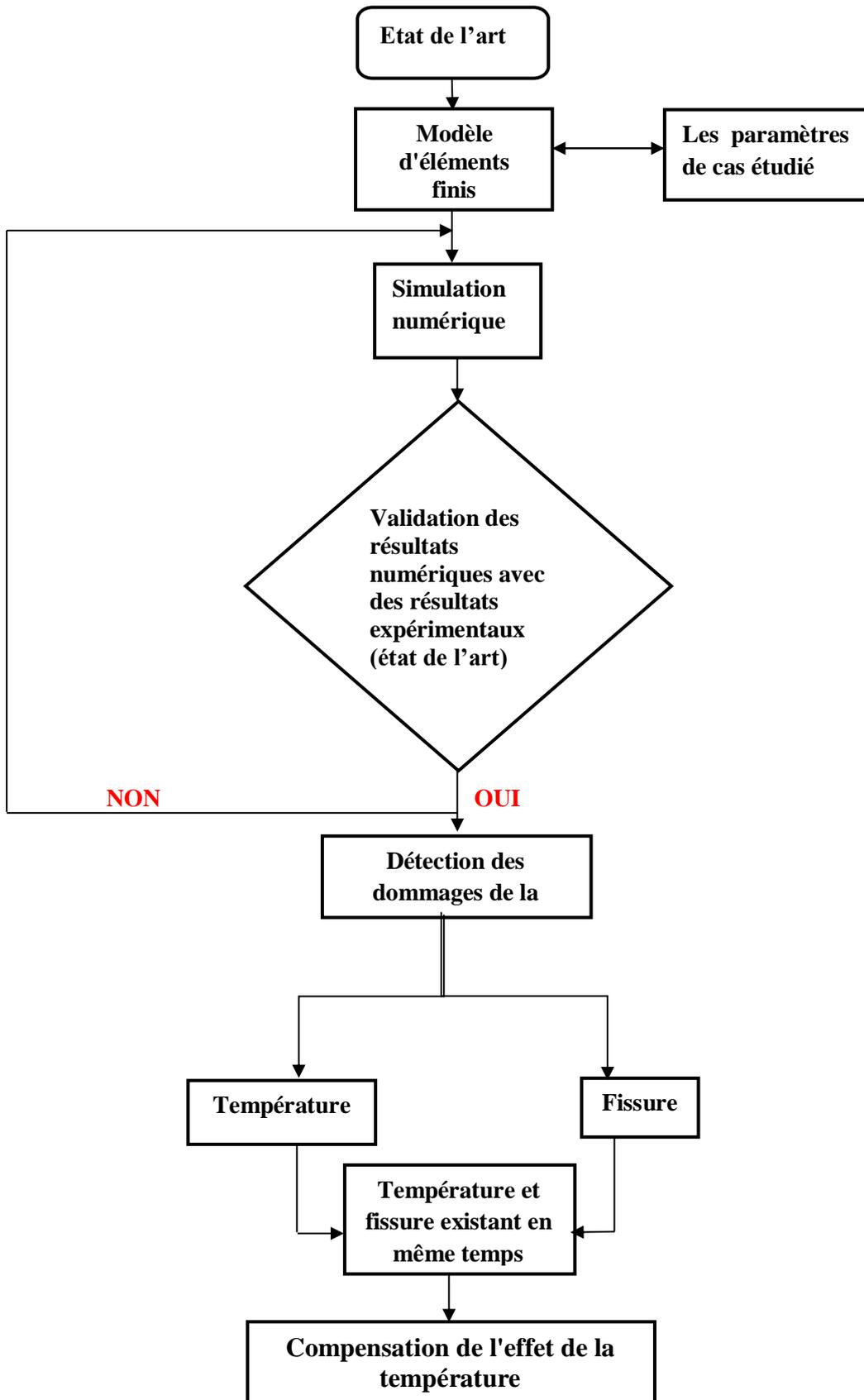


Figure 1.4 : Organigramme de la méthodologie de recherche

CHAPITRE 02 :

ETAT DE L'ART

2 CHAPITRE 02 : ETAT DE L'ART

2.1 INTRODUCTION :

Ce chapitre propose un aperçu historique et une étude de la littérature sur la surveillance de l'état structural basée sur l'impédance. Il est divisé en trois sections principales, comprenant l'introduction et le résumé du chapitre. La deuxième section présente une vue d'ensemble des différents types de dommages afin de comprendre et d'évaluer l'état actuel, ce qui contribuera au développement du sujet de recherche actuel. Cette tâche est réalisée en examinant les résultats des recherches précédentes publiées par d'autres chercheurs. Les références et les liens cités dans cette étude proviennent principalement de leurs travaux, sauf indication contraire dans la littérature présentée. Enfin, le chapitre se termine par un résumé dans la dernière section, mettant en évidence les lacunes de l'étude de la littérature.

2.2 BILAN DES TRAVAUX PRECEDENTS

Le développement théorique de l'application des mesures d'impédance à la surveillance de l'état structural a été initialement proposé par Liang et Sun [41] et ultérieurement approfondi par de nombreux autres chercheurs tels que Chaudhry et al, Sun et al, Park et Kabeya, Park et al, Giurgiutiu et Zagari, Soh et al, Bhalla et al [42-48]. Cette méthode utilise des excitations structurales haute fréquence, généralement supérieures à 30 kHz, à l'aide de plaques PZT collées en surface pour surveiller les changements d'impédance mécanique de la structure. Les plaques PZT nécessitent une très faible tension, généralement inférieure à 1V, pour générer une excitation haute fréquence dans la structure hôte.

La méthode d'impédance a été couronnée de succès pour détecter divers défauts. Cette section a pour objectif d'identifier les travaux de recherche fondamentale existants relatifs aux méthodes de détection des dommages. La plupart des articles examinés dans cette thèse, portant sur différents types de dommages, peuvent être catégorisés ou considérés comme suit.

2.2.1 Dommages (Fissure)

La détection des dommages (fissure) est un élément clé du SHM. Il existe un nombre important d'études de recherche explorant diverses méthodes de détection. Un examen approfondi des applications SHM et de la détection des dommages associés est présenté dans cette section.

Liu et Jiang. [49] ont étudié une application permettant d'utiliser les modes longitudinaux pour l'évaluation des dommages et la détection des fissures. Les résultats expérimentaux et de simulation étaient en bon accord et la longueur de la fissure était proportionnelle au décalage de fréquence de taille du pic d'impédance dont la forme modale a un nœud à la position de la fissure. Il était également évident que si la position de la fissure était située au niveau du ventre de la forme du mode d'observation, le pic d'impédance ne se déplaçait presque pas. Sur la base de ce fait, on pourrait réduire la zone cible où la fissure aurait pu exister.

Rosiek et coll. [50] ainsi que Lin & Giurgiutiu . [51] ont utilisé une poutre dans leur analyse des dommages des fissures associées et ont découvert que la plupart des pics de résonance étaient déplacés vers une fréquence plus basse en raison de la diminution de la rigidité globale résultante de la poutre lorsqu'ils introduisaient des fissures et des entailles dans la structure hôte. Rosiek et coll. [50] ont également constaté que, pour les dimensions du faisceau et du patch utilisé, la largeur du transducteur était la plus influente sur tous les indices de dommages calculés. Pour la variation de la longueur de l'encoche, l'augmentation de la longueur a entraîné une diminution de l'amplitude de la partie réelle de l'impédance avec quelques pics supplémentaires dans toute la gamme de fréquences de 40 kHz utilisée.

De plus, Chen [52] a montré qu'il y avait un changement de signal d'admittance lorsqu'une fissure existait et que tant que le PZT était refroidi, le niveau de conductance et de

susceptibilité serait alors diminué. Dans une tentative de mettre en valeur la nouveauté du sujet, Cortez et al. [53] ont décidé de présenter une nouvelle méthode pour détecter les dommages dans les structures basée sur le principe de l'impédance électromécanique. Le système suivait les variations de la tension de sortie des transducteurs piézoélectriques et ne calculait pas lui-même l'impédance.

Lim et Soh [54] ont présenté une série de tests expérimentaux et d'analyses à l'échelle du laboratoire pour étudier la faisabilité de la détection et de la caractérisation des fissures de fatigue en utilisant la technique EMI. L'étude a étendu les travaux de Lim & Soh . [55] pour intégrer les phases d'amorçage de fissure et de fissure critique. Il a été suggéré que la technique EMI était efficace pour caractériser la fissuration induite par la fatigue, même à son stade naissant. Une micro-fissure invisible à l'œil nu pourrait être détectée par cette technique, en particulier lors de l'utilisation de la gamme de fréquences les plus élevées de 100 à 200 kHz. Une méthode rapide et pratique d'identification des fissures critiques, basée sur la qualité, a également été suggérée en inspectant visuellement le spectre des fréquences d'admission.

Baptista et coll. [56] ont mené une analyse expérimentale de la sensibilité des transducteurs piézoélectriques pour la détection des dommages dans les systèmes de surveillance de l'état des structures (SHM) basée sur la méthode d'impédance électromécanique (EMI). Trois types de transducteurs ont été évalués : 5H PZT conventionnel (zirconate de plomb titanate) piézocéramiques ; dispositifs composites à macrofibres (MFC) ; et des diaphragmes piézoélectriques, communément appelés « buzzers ». Des tests ont été effectués sur des poutres en aluminium et les résultats expérimentaux ont démontré de manière concluante que les transducteurs ont des sensibilités différentes en ce qui concerne la détection de dommages structurels dans une plage de fréquences appropriée.

Freitas et Baptista. [57] ont analysé l'utilisation de diaphragmes piézoélectriques commerciaux pour la détection des dommages basée sur la méthode de l'impédance électromécanique (EMI). Pour évaluer leur faisabilité en matière de détection des dommages, un diaphragme peu coûteux a été comparé à une céramique PZT conventionnelle de forme et de dimensions similaires. Des tests ont été réalisés sur des poutres en aluminium, dans lesquels les dommages ont été simulés en plaçant un boulon métallique à différentes distances des transducteurs. La sensibilité aux dommages a été estimée à l'aide de l'indice de déviation du coefficient de corrélation (CCDM), qui a été calculé à l'aide des signatures d'impédance électrique obtenues à partir de chaque transducteur. Les résultats expérimentaux ont indiqué que les diaphragmes piézoélectriques étaient capables de détecter les dommages.

Al- Adnani et al. [58] ont montré des expériences pour démontrer l'effet du changement dans la profondeur des fissures et la réponse de deux matériaux: "Al 6061-T6" et "Composite époxy renforcé de fibres de carbone à armure sergée". Les expériences ont été menées sur la base de la fréquence naturelle variable du structure respective.

Les résultats ont été mesurés à l'aide d'une technique de surveillance et évalués à l'aide de l'indice d'écart quadratique moyen basé sur une analyse statistique.

2.2.2 Effet de la température

Plusieurs difficultés pratiques ont empêché l'application de l'EMI aux structures du monde réel de manière utile et fiable. Les effets de la température ont récemment été abordés dans les expériences scientifiques comme étant problématiques. Bien que certaines propriétés piézoélectriques dépendent fortement des changements de température, il existe des techniques de compensation de température qui peuvent considérablement compenser ces effets. Les effets des variations de température et les procédures de compensation de ces effets ont été largement étudiés.

Koo et coll. [59] ont présenté la technique SHM basée sur l'impédance en tenant compte des effets de la température. Les auteurs ont d'abord noté l'importance de minimiser l'effet des variations de température sur la mesure d'impédance, qui est une technique de compensation déjà existante. Cette technique est basée sur la corrélation croisée entre les données d'impédance concurrentes et de référence, et elle est ensuite validée dans un environnement de variation de température. Cela a été réalisé grâce à une configuration basée sur un élément de pont en treillis en acier de la taille d'un laboratoire. Il a été démontré que la stratégie proposée combinant le décalage de fréquence effectif (EFS) et l'analyse des valeurs aberrantes peut être utilisée efficacement dans le SHM continu automatisé d'éléments structurels critiques sous des variations de température.

Sepehry et coll. [60] ont présenté des résultats liés à la méthode SHM, qui comprenaient des résultats théoriques et expérimentaux. Les résultats ont été pris en compte dans le seul but de valider le modèle proposé afin de prendre en compte la dépendance des propriétés du matériau du capteur actif de plaquette piézoélectrique (PWAS) à la température. À son tour, un modèle lié au PWAS est développé, qui dépend également de la température et avec le matériau lié à une poutre en porte-à-faux d'Euler Bernoulli. L'étude comparative entre les résultats expérimentaux et théoriques justifie une amélioration souhaitable des paramètres du modèle SHM sous variation de température.

Pour améliorer le développement de la surveillance structurelle, Baptista et al. [61] ont introduit un système caractérisé par des capacités de traitement en temps réel. Le système pouvait acquérir des données en temps réel à partir de plusieurs capteurs et était capable de gérer les effets des variations de température. Par conséquent, le système a permis de résoudre un problème lié à la surveillance structurelle et aux diagnostics erronés. Dans le cas du SHM en temps réel, les résultats des expériences ont clairement prouvé la faisabilité et l'efficacité de l'approche proposée.

Dans une autre tentative, Baptista et al. [62] ont considéré le capteur piézoélectrique déployé dans la technique EMI. Dans le cadre de ce processus, une expérience a été réalisée pour étudier l'effet de la température sur l'impédance électrique respective. L'expérience a déployé les capteurs céramiques 5H PZT, bien connus pour leur utilisation avec la technique EMI. Les résultats de l'expérience ont montré que les effets de la température dépendaient fortement de la fréquence correspondante, ce qui incite également à poursuivre les recherches dans le domaine du SHM.

Dans une étude de Huynh et al. [63], la force de précontrainte dans les poutres en béton précontraint (PSC) a été surveillée via une technique basée sur l'impédance utilisant une interface PZT montable sous différentes températures. Une série d'événements de variation de température et de perte de précontrainte ont été simulés pour la poutre PSC à l'échelle du laboratoire. La faisabilité de l'interface PZT montable pour la surveillance de la perte de précontrainte dans l'ancrage des tendons a été vérifiée expérimentalement dans des conditions de température constante. Le dispositif d'interface PZT a été examiné pour la surveillance des pertes de précontrainte sous des changements de température afin de valider son applicabilité. L'effet de la température sur les signatures d'impédance a été compensé en minimisant le CCD entre les modèles d'impédance.

De Souza Rabelo et coll. [64] ont présenté une méthode statistique conçue pour déterminer un niveau seuil pour les données de surveillance de l'état de la structure basée sur l'impédance (ISHM) et ont effectué une analyse de sensibilité de la technique ISHM. Cette méthode prend en compte les notions de SPC et d'intervalle de confiance issues de la théorie statistique. Les tests ont été vérifiés à l'aide de données expérimentales appliquées à des panneaux en aluminium 2024-T3 sous différentes températures. L'expérience réalisée dans le cadre de cette étude a utilisé la méthode de compensation de température connue sous le nom d'EFS par analyse de corrélation. Cette procédure a montré de bons résultats pour la plage de

température analysée dans ce travail (21 °C à 60 °C) en utilisant un total de sept signatures de base. L'analyse statistique comprenait des tests de normalité ainsi que la vérification des échantillons concernant la distribution gaussienne.

Sun et coll. [65] ont discuté des effets sur la température de l'utilisation de la détection par ondes ultrasonores guidées (GUW) dans la détection des dommages pour la surveillance de l'état des structures (SHM) pour le système de stockage nucléaire à sec (DCSS). L'effet de la température sur les capteurs libres a été testé pour la première fois expérimentalement. Des échantillons vierges instrumentés avec PWAS ont ensuite été étudiés au moyen de tests de détection à des températures sélectionnées. Les paramètres des modes d'onde ont été obtenus et évalués pour les changements dans les formes d'onde à différentes températures. Le potentiel d'utilisation de GUW pour la détection de dommages avec effet de température appliqué à l'application DCSS a été discuté et conclu que le changement de température n'affecte pas la force de la forme d'onde mais provoque un changement dans le temps de vol. De plus, il a été constaté que le système sensoriel présenté était applicable à une température de 100 °C. Jusqu'à 100 °C, les capteurs ne peuvent survivre que pendant une courte période.

2.2.3 Indices sensibles aux dommages

Les dommages structurels de base sont généralement caractérisés à l'aide d'indices de dommages. Deux des indices les plus couramment utilisés comprennent l'écart quadratique moyen (RMSD) et la métrique d'écart du coefficient de corrélation (CCDM). Lorsqu'une structure est considérée comme saine, de base ou de référence, des signatures EMI sont prises. Celles-ci sont comparées aux signatures ultérieures pour évaluer l'état de la structure.

La norme euclidienne est à la base de l'indice RMSD ; plusieurs variantes de cet indice peuvent être trouvées dans la littérature. Dans cette étude, l'indice RMSD a été calculé par

$$RMSD = \sum_{k=1}^{\omega_F} \sqrt{\frac{[R_E(Z_{E,D}(k)) - R_E(Z_{E,H}(k))]^2}{R_E^2(Z_{E,H}(k))}} \quad (2-1)$$

Où les indices D et H indiquent respectivement des états endommagés et sains ; $R_E(Z_{E,D}(k))$ et $R_E(Z_{E,H}(k))$ sont les parties réelles des signatures d'impédance électrique acquises par le système de mesure des états endommagé et sain de la structure, respectivement. La plage de fréquence k est mesurée entre les fréquences initiale et finale. Nous utilisons la partie réelle de l'impédance car elle est connue pour être plus réactive aux dommages ou aux changements dans l'intégrité de la structure, et moins sensible aux changements de température ambiante par rapport à la partie imaginaire.

Le coefficient de corrélation constitue la base du deuxième indice, $CCDM$, et est calculé par

$$CCDM = 1 - C_C \quad (2-2)$$

Où C_C est le coefficient de corrélation calculé à partir de la partie réelle des signatures d'impédance électrique de la structure en conditions saines et endommagées, telle que définie précédemment, dans la même gamme de fréquences. Il est calculé à l'aide de l'équation suivante.

$$C_C = \frac{\sum_{k=\omega_i}^{\omega_F} [Z_{E,H}(k) - \bar{Z}_{E,H}] [Z_{E,D}(k) - \bar{Z}_{E,D}]}{\sqrt{\sum_{k=\omega_i}^{\omega_F} [Z_{E,H}(k) - \bar{Z}_{E,H}]^2} \sqrt{\sum_{k=\omega_i}^{\omega_F} [Z_{E,D}(k) - \bar{Z}_{E,D}]^2}} \quad (2-3)$$

2.3 CONCLUSION

Une revue de la littérature existante a été réalisée pour soutenir l'étude entreprise dans cette thèse. Une enquête générale a été réalisée pour retracer les efforts de recherche antérieurs visant à développer une surveillance de l'état des structures à l'aide de l'impédance électromécanique. L'enquête a porté sur les dommages dans différents domaines d'application et sur la température de sortie du système.

La plupart des recherches effectuées dans ce domaine ont exploré des solutions analytiques ou expérimentales. Dans de nombreux cas, réaliser des expériences est très coûteux et également très difficile, voire impossible. Dans cette thèse, des analyses numériques et des simulations utilisant FEM seront effectuées pour comprendre le concept de la technique. Cette approche de simulation sera réalisée pour détecter les dommages et étudier l'effet de la température.

L'accent sera notamment mis sur la réduction de deux lacunes en matière de recherche. D'une part, étudier l'efficacité des EMI en cas de dommages dans la structure. D'autre part, développer une méthode efficace de compensation de température afin que l'EMI puisse détecter de faibles niveaux de dommages lorsqu'il y a des effets de température.

CHAPITRE 03 : MODÉLISATION PAR ÉLÉMENTS FINIS

3 CHAPITRE 03 : MODÉLISATION PAR ÉLÉMENTS FINIS

3.1 INTRODUCTION

Ce chapitre décrit le modèle EF implémenté de SHM basé sur EMI. Afin de valider l'impédance de sortie du système, des modèles numériques seront identifiés et les résultats seront discutés. De plus, la méthode numérique sera expliquée. En plus de cela, ce chapitre présente la terminologie utilisée dans la modélisation FEM et passe en revue les attributs et les types d'éléments finis utilisés en mécanique des structures.

La modélisation numérique des structures élimine les travaux de laboratoire fastidieux et chronophages. Il est nécessaire de déterminer les signatures de conductance par simulation numérique à hautes fréquences en complément des méthodes expérimentales. En plus de développer des algorithmes robustes de reconnaissance de formes capables de classer des situations autres que celles du laboratoire, des simulations numériques à haute fréquence sont nécessaires pour étudier les signatures associées à des types de dommages supplémentaires. Le travail expérimental étant fastidieux et coûteux, les simulations numériques peuvent réduire considérablement les coûts.

3.2 ANALYSE PAR ÉLÉMENTS FINIS (AEF)

L'analyse par éléments finis est une technique numérique utilisée pour obtenir des solutions approximatives de problèmes de valeurs limites en ingénierie. Les problèmes de valeurs limites sont des problèmes mathématiques dans lesquels une ou plusieurs variables dépendantes doivent satisfaire une équation différentielle partout dans un domaine connu de variables indépendantes et satisfaire des conditions spécifiques à la frontière du domaine [66].

AEF est utilisé lorsque les calculs manuels ne peuvent pas fournir des résultats précis. L'analyse par éléments finis de structures réelles implique la décomposition et le rassemblement de la structure réelle. Les principes fondamentaux de la mécanique des

structures, la résolution des forces avec l'équilibre associé et la continuité des déplacements peuvent ensuite être utilisés pour reconstituer la structure démontée qui se présente sous différentes formes, tailles et formes. Le processus implique ensuite l'utilisation d'un modèle discret pour résoudre le champ respectif avec des variables comprenant la vibration, la température et le déplacement. En tant qu'outil, la méthode des éléments finis est devenue d'une utilité considérable pour fournir des solutions aux ingénieurs et aux chercheurs pour différents types de problèmes. Plus récemment, l'analyse par éléments finis a également évolué pour être utile dans ses applications liées à la conception.

En tant que programme par éléments finis, le système logiciel ANSYS est devenu utile et influent grâce à un environnement convivial et des packages complets.

3.2.1 Logiciel ANSYS

Il a été introduit pour la première fois en 1971 et constitue au moins 100 000 lignes de code. Il peut être déployé pour effectuer une étude d'analyse cruciale et a été à l'avant-garde.

Les programmes AEF existent depuis plus de 20 ans et ont maintenant un tout nouveau look et ont été améliorés en programmes avec plusieurs fenêtres intégrant une interface utilisateur graphique (GUI) et d'autres menus [67]. Dans ce projet, le modèle par éléments finis de différents types d'éléments structurels librement suspendus a été créé dans le logiciel ANSYS.

Pour l'étude numérique, ANSYS Multiphysics a été utilisé. Il s'agit d'un programme d'éléments finis sophistiqué et complet qui possède des capacités dans de nombreux domaines physiques différents tels que la dynamique structurelle statique, non linéaire, thermique, implicite et explicite, l'écoulement des fluides, l'électromagnétique et l'analyse du champ électrique. Il peut également effectuer des analyses de champ couplées combinant une ou plusieurs de ces différentes physiques. Étant donné qu'ANSYS possède de nombreuses

capacités et possède une fonction complète en matière de capteur piézoélectrique, il a été décidé de l'utiliser pour le développement EF nécessaire à la présente étude. Sa signification fonctionnelle est évidente dans des études antérieures comme dans [68].

3.2.2 Modèle de matériau

Le modèle par éléments finis d'une poutre en aluminium suspendue librement a été créé dans le logiciel ANSYS. Les dimensions de la poutre ont été considérées comme étant de 500 mm x 30 mm x 2 mm. Le PZT de taille 15 mm x 15 mm x 0,267 mm a été réalisé en matériau PSI-5H4E et situé sur le côté gauche de la structure (à 20 mm de l'extrémité de la poutre). Entre le patch et la poutre, une fine couche d'adhésif époxy de 0,03 mm d'épaisseur a également été prise en compte. Une tension de 1 V a été appliquée sur le nœud maître supérieur tandis que 0 V a été appliquée sur celui du bas (représentant le contact à la terre).

Selon l'emplacement des pics de résonance piézoélectrique, la gamme de fréquences est comprise entre 18,5 et 20,5 kHz dans les spectres d'impédance.

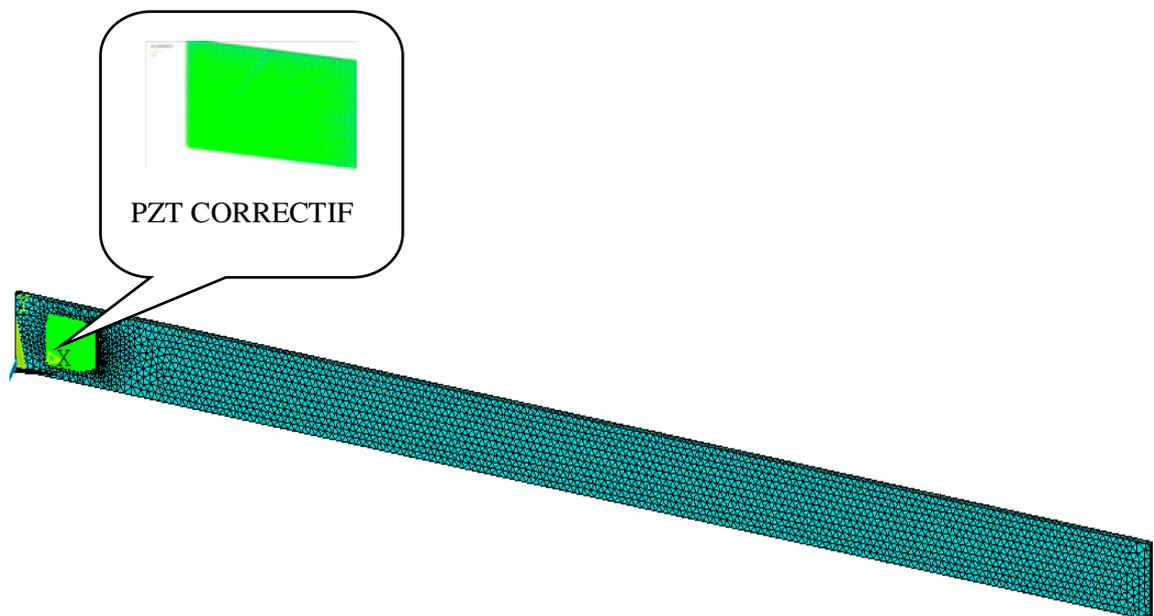


Figure 3.1: Modèle EF pour patch carré sur poutre saine

Pour les résultats d'analyse EF, les constantes de l'aluminium et du PZT variant avec la température sont définies selon Sepehry et coll. [69] (Tableaux 3.1 et 3.2).

Table 3.1 : Propriétés matérielles de la poutre en aluminium (alliage 2024).

Propriété Symbole 25 °C 40 °C 50 °C

Densité (kg/ m³) ρ 2699,99 2697,224 2695,38

Module d'Young (N/ m²) E 70.640E+09 70.247E+09 69.985E+09

$$\rho = -0,1844 T + 2704,6 \text{ et } E = -2,62 \times 10^7 T + 71,295 \times 10^9$$

Table 3.1 : Propriétés matérielles du patch PZT PSI-5H4E

Propriété Symbole 25 °C 40 °C 50 °C

Densité (kg/ m³) 7749,985 7748,896 7748,17

Conformité (Pa⁻¹) S_{11}^E 1,496 x 10⁻¹¹ 1,487 x 10⁻¹¹ 1,482 x 10⁻¹¹

Coefficient de déformation induite dans le plan (m/V) d_{31} -300 . 026x 10⁻¹² -300,08 x 10⁻¹² - 300,11 x 10⁻¹²

Constante diélectrique ϵ_{33} 3850 3850,1 3850,2

$$\rho = -0,0726 T + 7751,8 \text{ et } S_{11}^E = -5,5633 \times 10^{-15} T + 1,51 \times 10^{-11}$$

3.3 CONCLUSION

Les détails des modèles FEM utilisés dans la présente enquête pour l'analyse et la modélisation EF sont présentés dans ce chapitre. Les étapes de simulation du processus ont été présentées en détail pour des types de dommages sains et différents tels que les fissures et la température et réalisées pour déterminer l'effet sur le rendement du système et seront expliquées plus tard dans le chapitre suivant. Cela aidera à avoir une compréhension fondamentale de l'approche de modélisation EF et de son efficacité à l'aide du logiciel multi-physique ANSYS. Le but de ce chapitre était de donner le contexte de tous les aspects du SHM basé sur EMI en termes de modélisation. Les dommages structurels de base sont généralement caractérisés à l'aide d'indices de dommages. Deux des indices les plus couramment utilisés, notamment l'écart quadratique moyen (RMSD) et la métrique d'écart du coefficient de corrélation (CCDM), ont été utilisés dans ce travail. Lorsqu'une structure est considérée comme saine, de base ou de référence, des signatures EMI sont prises. Celles-ci sont comparées aux signatures ultérieures pour évaluer l'état de la structure.

CHAPITRE 04 : RÉSULTATS ET DISCUSSION.

4 CHAPITRE 04 : RÉSULTATS ET DISCUSSION.

4.1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente les résultats et la discussion de l'analyse numérique qui a été menée sur la base des méthodes décrites dans le chapitre 3. Les données obtenues, interprétées et résumées des résultats sont généralement présentées et des graphiques typiques relatifs aux expériences sont fournis dans ce chapitre.

4.2 EFFET DE LA TEMPÉRATURE

La simulation dynamique FEM va encore plus loin pour inclure l'effet de la température. On sait qu'un changement de température affecterait certaines propriétés de la structure hôte ; la couche de liaison et le patch PZT. Le système EMI complet qui est du PZT lié à la structure avec une température simulée. Le résultat comparé aux articles de revues indique que l'expérience pour ce cas a été réalisée par G Baptista et al. [70] La figure 4.1 montre la comparaison entre les résultats de simulation et expérimentaux.

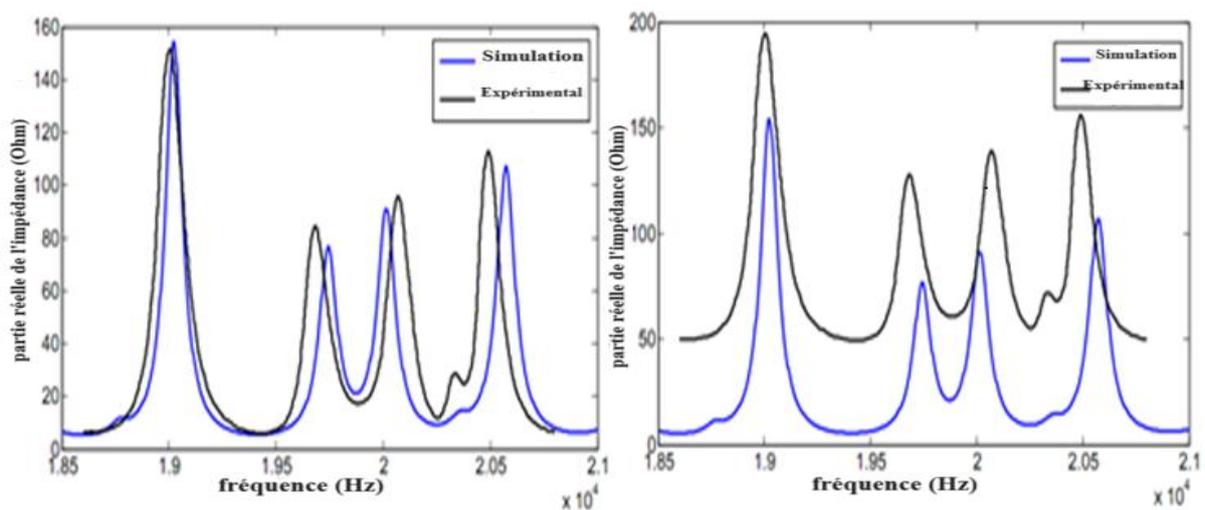


Figure 4.1 : Comparaison entre simulation et résultat expérimental pour une poutre en aluminium (25 °C).

Sur le graphique, on peut voir que le résultat montre un bon accord et que l'emplacement de la plupart des pics est le même en comparant la simulation et l'expérience, cependant la plupart des pics sont décalés. Ces changements sont dus au fait que nous n'avons pas les

propriétés exactes de l'expérience. Certaines propriétés n'étaient pas mentionnées dans le journal. À cet égard, les simulations des paramètres des poutres en aluminium ont été supposées. La différence concernait le déplacement vers le haut ou vers le bas, mais pas la cause de la tendance utilisée avec la résistance dans l'expérience. Tous les cas ont exactement les mêmes fréquences de résonance. On peut en conclure qu'il est prudent de ne pas envisager de modéliser la résistance pour tous les cas de simulation, car seul le déplacement vers le haut était à prévoir chaque fois que la résistance était impliquée.

Nous avons effectué des simulations pour des températures allant de 25 à 85 °C. La figure 4.2 montre la partie réelle des signatures d'impédance électrique pour un faisceau sain, respectivement, sur une plage de fréquences de 18,5 à 21 kHz.

Comme on peut le voir sur la figure 4.2, un décalage vers la gauche de la fréquence de la signature électromécanique dû à une augmentation de la température. De même, la diminution de la température provoque un déplacement vers la droite. Des variations d'amplitude de la résistance électrique et des déplacements verticaux sont également observés.

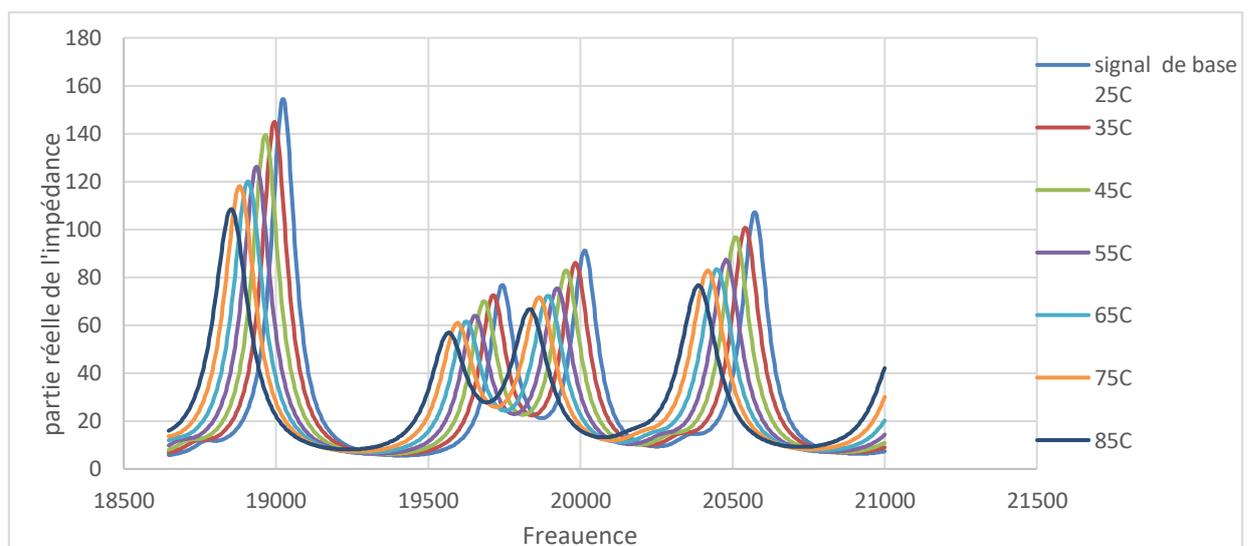


Figure 4.2 : Partie réelle des impédances électromécaniques résultant des changements de température

4.3 DÉTECTION DES DOMMAGES

La deuxième partie de cette section, les dommages à la structure, a été modélisée comme une incision de 2 mm de large avec une profondeur variant de 2 mm à 7 mm, et située à 125 mm du bord vertical gauche de la poutre (figure 4.3).

Des analyses harmoniques multiphasées ont été réalisées avec un modèle d'éléments finis élaboré pour générer les tracés de fréquence de l'impédance électromécanique pour une construction saine et avec des dommages introduits.

Dans cette étude, les résultats indiquent que les plages de fréquences d'une largeur de 18,5 à 21 kHz et d'un pas de fréquence autour de 3,7 Hz donnent de bons résultats.

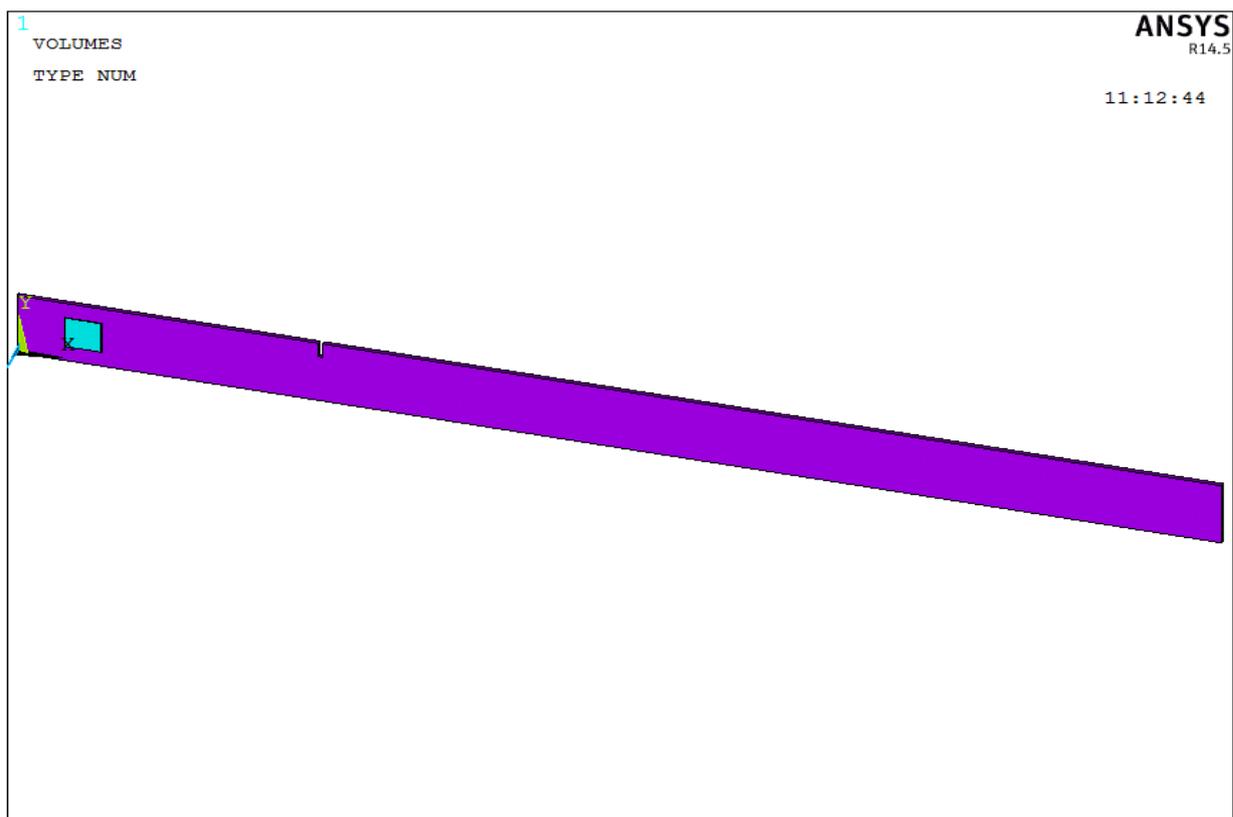


Figure 4.3 : Modèle éléments finis d'une poutre en aluminium avec fissures

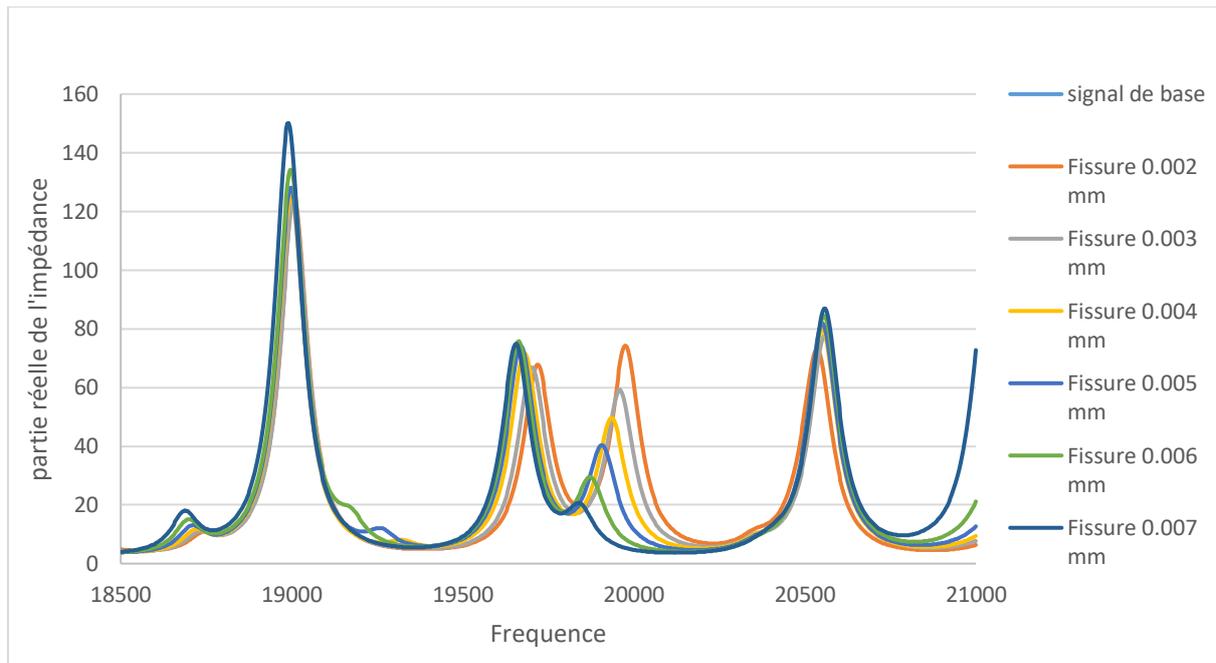


Figure 4.4 : Impédance réelle de la pièce pour différentes tailles de fissure

À la suite de l'analyse harmonique, les tracés d'impédance EM pour les structures saines et affectées ont été obtenus (figure 4.4). Seule une partie réelle de l'impédance EM a été prise en compte pour l'évaluation des défaillances, car elle est censée être plus sensible aux dommages naissants. La figure 4.4 montre qu'en augmentant la taille de la fissure, les sommets sont décalés vers la gauche en raison de la diminution de la rigidité de la structure. Par exemple, le graphique des dégâts de 0,004 m est décalé de plus de 0,003 m vers la gauche. En augmentant la taille de la fissure, de nouveaux pics sont apparus en raison de changements structurels importants.

La quantification et l'identification des dommages ont été simplement calculées à l'aide des indices CCDM et RMSD des conditions de dommages d1-d6 qui sont tracés dans les histogrammes de la figure 4.5 (a), (b). Il ressort de la figure que, parallèlement à l'augmentation du montant des dommages, les indices RMSD et CCDM calculés respectivement dans les équations (2-1) et (2-2). Étant donné que le signal de dommage de la

poutre en aluminium obtenu à l'aide du PZT n'est pas suffisamment sensible, les indices de dommage des conditions de dommage d1 et d2 sont faibles. Cependant, lorsque la profondeur des dommages de d6 atteint presque le quart de la largeur du faisceau, les indices de dommages commencent à montrer une croissance évidente. À en juger par les résultats de l'analyse, les changements dans l'ampleur des dommages dans la poutre en aluminium peuvent être surveillés par la méthode EMI. Les deux indices évalués ont été normalisés, ce qui donne $CCDM = 1$ et $RMSD = 1$ pour la structure saine.

Ces résultats sont très importants pour estimer la sensibilité du système à révéler des dommages ainsi que pour identifier des paramètres significatifs afin d'évaluer le potentiel de diagnostics faussement positifs de la santé structurelle dus aux effets de la température.

En revanche, malgré quelques changements mineurs liés aux variations de température. Il est connu que les dommages structurels provoquent non seulement des déplacements verticaux ou horizontaux de l'EMI, mais conduisent également à un changement de forme, ce qui est très différent des changements résultant des effets de variation de température. Cependant, les déplacements observés comme le montre la figure 4.2 entraînent des variations significatives des indices métriques, qui restreignent le diagnostic de la structure hôte en temps réel. Par conséquent, les effets de la température devraient être compensés en utilisant certaines méthodes liées à un système de surveillance en temps réel.

(Une) (b)

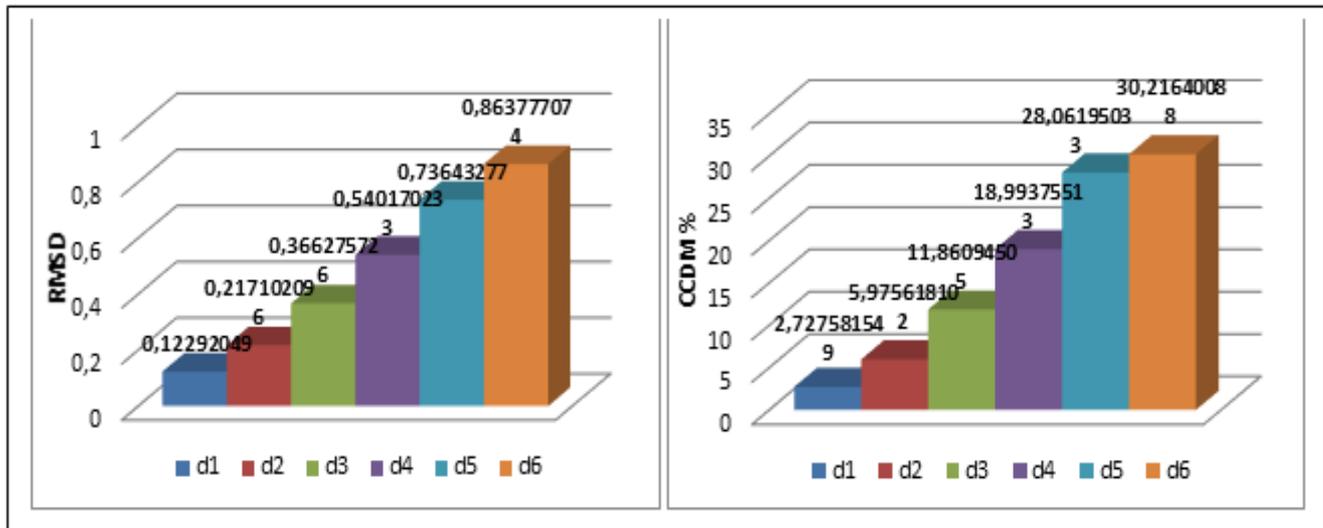


Figure 4.5 : Histogramme du (a) RMSD et (b) CCDM des fissures

4.4 COMPENSATION DES EFFETS DE LA TEMPÉRATURE

Les changements dans les signatures EMI, résultant des variations de température, ont été l'un des inconvénients majeurs de l'utilisation de la technique EMI dans des applications réelles. Ces changements provoquent un faux diagnostic de la structure saine surveillée. Ainsi, les méthodes qui neutralisent ou réduisent automatiquement les effets de la température devraient être examinées afin de permettre une surveillance en temps réel. La partie réelle de la signature EMI est beaucoup plus sensible pour détecter les dommages structurels et moins sensible aux effets de la température. Par conséquent, la méthodologie de ce modèle est présentée pour compenser les effets de la température sur la partie réelle de l'impédance anticipée.

Plusieurs méthodes ont été améliorées pour compenser les variations de température. Parc et coll. [44] ont compensé les changements de fréquence et d'amplitude en utilisant un indice métrique RMSD modifié. Koo et coll. [59] modifié la méthode a été améliorée développée par Park et al. [44] pour développer un décalage de fréquence efficace (EFS) pour

compenser les effets de la température. Sun et coll. [71] ont utilisé le concept de corrélation croisée pour compenser les variations de signatures. Dans ce travail, une méthodologie similaire proposée dans cette étude précédente [72] est utilisée pour révéler des similitudes entre deux signaux entre les signatures mises à jour et la ligne de base afin de compenser les changements de fréquence.

La corrélation croisée $R_{x,y}$ de deux signaux $x(t)$ et $y(t)$ est défini par.

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T f_x(t) f_y(t + \tau) dt \quad (4-1)$$

où $f_x(t)$ est l'amplitude du signal au point x , au temps t , et $f_y(t + \tau)$ est l'amplitude du signal en un point y au temps $t + \tau$. En faisant varier τ , on obtient la relation entre les signaux en x et y en fonction du temps.

Pour les signaux échantillonnés, il est défini comme :

$$R_{xy}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-m+1} x(n) y(n + m - 1) \quad (4-2)$$

$m=1, 2, 3, \dots, N+1$

Où N est la longueur de l'enregistrement (c'est-à-dire le nombre d'échantillons).

Matlab était le logiciel utilisé pour compenser les effets de la température. Il fournit une fonction appelée **xcorr.m** qui peut être utilisée pour implémenter une fonction de corrélation croisée. Doit être modélisé pour obtenir la signature d'impédance de base du capteur, qui sera utilisée comme référence pour compenser les effets de la température.

Une petite fissure d'entaille est ensuite appliquée en la plaçant à une distance de 125 mm du capteur. La taille des fissures était 2 mm x 2 mm (figure 4.3).

De plus, l'impédance du capteur PZT a été simulée pour un faisceau sain à une température régulée de 35°C. À la même température, l'impédance des structures a été à nouveau simulée pour une structure endommagée. La figure 4.6 montre la partie réelle compensée des signatures d'impédance obtenues entre 25 et 85 °C par rapport à la signature de base obtenue à 35 °C en utilisant une bande de fréquence étroite de 18,6 à 21 KHz.

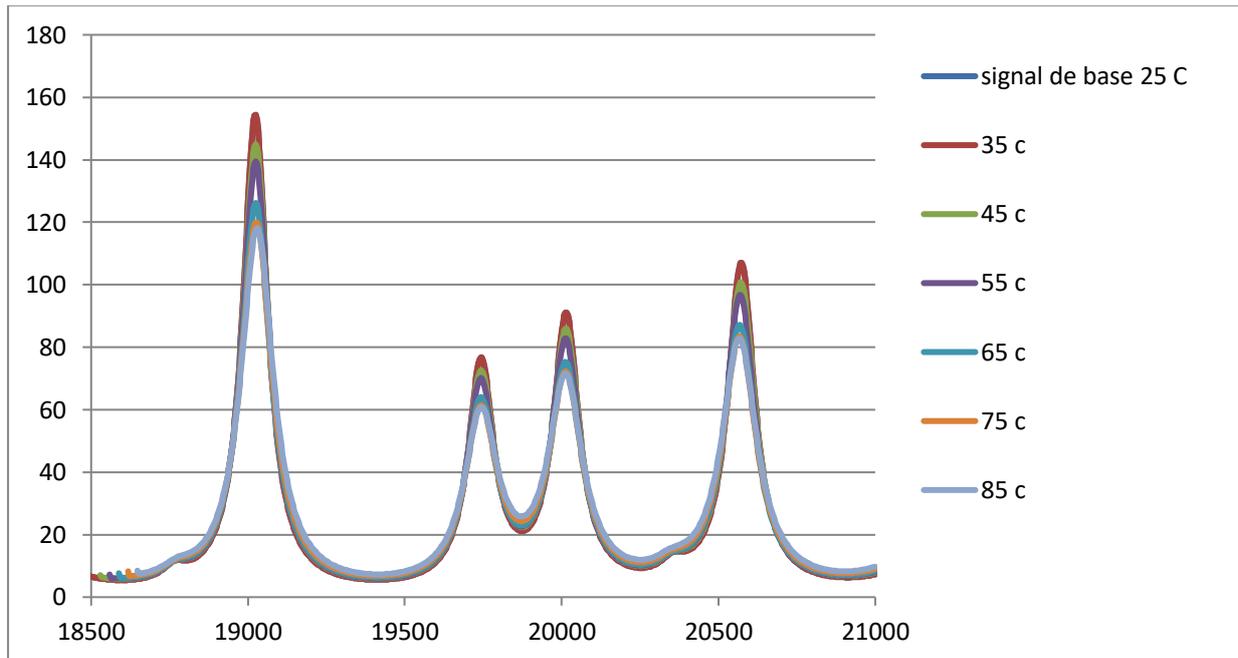


Figure 4.6: Partie réelle des signatures d'impédance avec la méthode de compensation proposée pour les effets de température

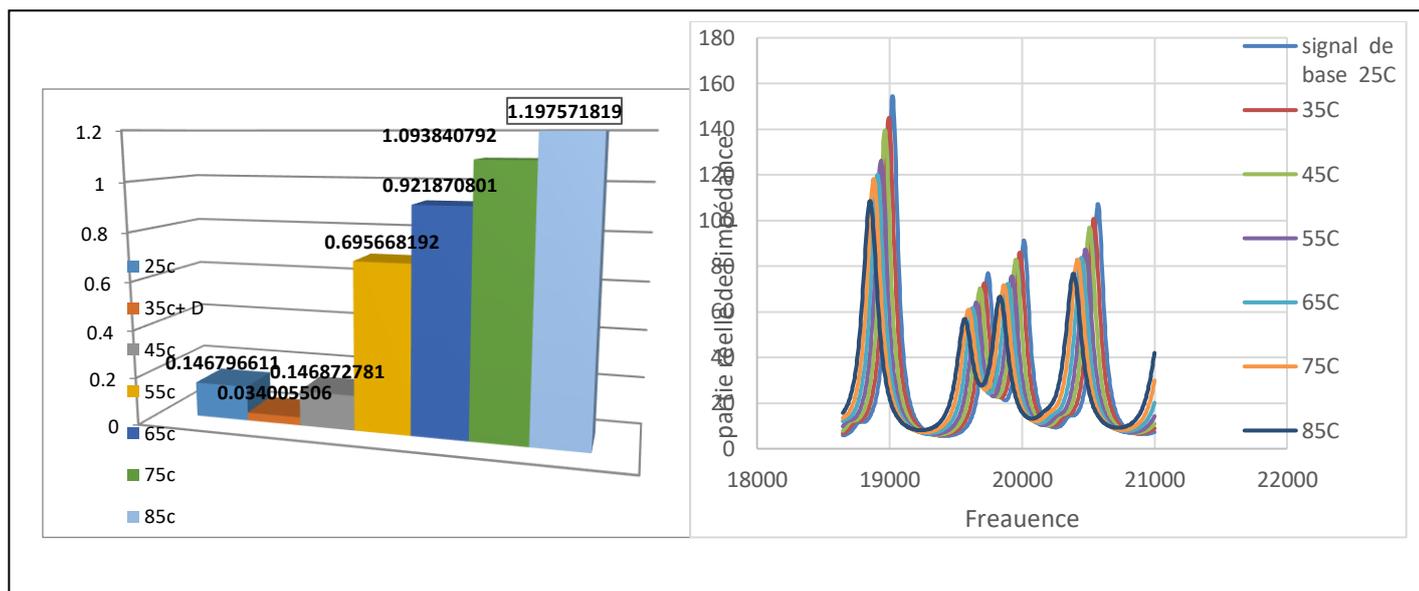
La figure 4.6 montre le résultat de la méthode de compensation. Par rapport à la figure 4.5, on peut dire que la technique de compensation de température minimise avec succès les effets de la température. La principale difficulté liée aux variations de température pour les applications réelles et pratiques de la technique EMI réside dans les diagnostics faussement positifs de la structure surveillée, c'est-à-dire qu'en raison des changements de fréquence, le système SHM indique une surveillance structurelle saine bien que la structure soit endommagée (Figure 4.7(a)).

De plus, nous anticipons la sensibilité du système pour révéler des dommages structurels en évaluant les indices RMSD et CCDM pour les dommages induits dans la poutre en aluminium. Nous calculons les variations de l'indice CCDM, qui est basé sur l'équation du coefficient de corrélation (2-2).

L'indice CCDM est choisi ici de manière significative car il est insensible aux variations de l'amplitude de l'impédance électrique et n'est sensible qu'aux variations de la forme de la signature d'impédance. Par conséquent, si l'on considère uniquement les variations de l'impédance électrique résultant des changements de température, l'indice CCDM serait une très bonne option pour éviter les faux diagnostics de la structure surveillée résultant des effets de la température.

La signature EMI considérée comme référence obtenue pour le faisceau à une température de 35°C et certaines signatures obtenues à des températures variant de 25 à 85°C sont présentées sur la Figure 4.7(a) structure de dommage à 35°C sans compensation et (b) avec le mode de compensation proposé. Sont également présentés les indices CCDM obtenus pour les dommages à une distance de 125 mm du capteur à une température de 35°C et les autres indices obtenus à d'autres températures pour le faisceau en bon état.

(a)



(b)

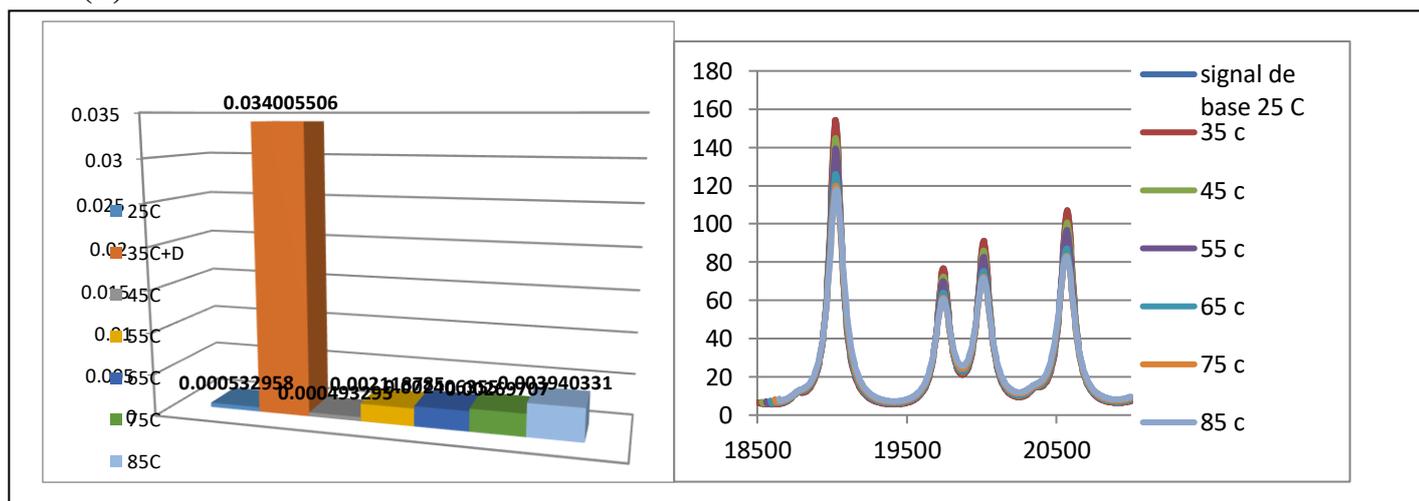


Figure 4.7 : Partie réelle des signatures d'impédance et des indices CCDM obtenus pour la poutre (a) endommageant la structure à 35°C sans compensation et (b) avec la méthode de compensation proposée pour les effets de température.

Comme on peut le voir sur la figure 12a , la signature était la même que celle obtenue pour l'échantillon endommagé à 35°C. Il est donc difficile de diagnostiquer les dommages causés à la structure.

D'après la figure 12b, le résultat s'est considérablement amélioré après l'utilisation de la méthode de compensation. Les courbes correspondent parfaitement à la mesure de base à 35°C ; nous pouvons clairement observer la différence entre le changement de température et

les dommages grâce à la technique de compensation de température. Aussi ; les indices CCDM étaient très faibles après la compensation et probablement même de petits dommages pourraient être détectés dans des applications à température variable en fixant un seuil approprié pour l'indice métrique. Les résultats étaient raisonnables pour d'autres températures. Même à une température de 85°C (écart de 50°C par rapport à la ligne de base).

4.5 CONCLUSION

Plusieurs résultats importants ressortent des résultats de simulation visant à déterminer les effets de différents types de dommages, d'ambiance et d'autres variations structurelles sur la technique de surveillance de l'état basée sur l'impédance. Ensuite, l'effet de la température sur la simulation dynamique FEM est observé. On sait que la variation de température modifie non seulement certaines propriétés de la structure hôte, mais peut également affecter le PZT lui-même. Une correspondance étroite entre les résultats simulés et les données expérimentales de la littérature a été illustrée. Enfin, plusieurs analyses numériques ont été réalisées pour étudier l'effet de certains dommages liés à la température qui existent sur la structure. Ce travail actuel a montré qu'il est possible que le système EMI puisse être utilisé pour la surveillance continue des structures.

5 CONCLUSION GENERALE

La recherche intégrée dans cette thèse examine et étend la technique de surveillance de l'état structurel basée sur l'impédance pour détecter et identifier les dommages structurels sur diverses applications. Plus précisément, l'effort de recherche identifie les principales limites de la méthode d'impédance et étend l'applicabilité de la technique. Les analyses incluses dans cette recherche fournissent une base de connaissances étendue et précieuse qui présente un intérêt particulier pour l'utilisation de la technique de surveillance de l'état des structures basée sur l'impédance pour des applications réelles sur le terrain.

Dans ce modèle, l'effet de la température a été étudié sur les signatures d'impédance électrique d'un capteur PSI-5H4E conventionnel utilisé dans la surveillance de l'état des structures. Les variations des deux termes, l'amplitude et la fréquence, ont utilisé une analyse par éléments finis en utilisant un échantillon d'aluminium et en obtenant des signatures d'impédance à des températures allant de 25 à 85 °C. Comme vu dans les sections précédentes, la réponse dynamique des PZT et des structures dépend de la température. La variation d'impédance associée au changement de température est similaire à celle produite par la présence de dommages et pourrait donc conduire à une conclusion erronée quant à l'intégrité de la structure en question. En conséquence, une technique de compensation de température est nécessaire pour minimiser les effets des changements de température ambiante ou structurelle dans la surveillance de l'état structurel basée sur l'impédance.

Par conséquent, les effets de la température constituent un problème critique pour la surveillance de l'état des structures basée sur l'impédance électromécanique, en particulier pour détecter de faibles niveaux de dommages, et des méthodes efficaces de compensation des effets de la température restent à développer.

LES REFERENCE

1. Zhu, Y., Li, F. et Bao, W. (2019). Détection de fissures de fatigue dans des conditions de vibration basées sur des ondes guidées par ultrasons. *Surveillance de la santé structurelle*, 1475921719860772.
2. Kess , RH et Adams, DE (2007). Enquête sur les effets de la variabilité opérationnelle et environnementale sur les algorithmes de détection des dommages dans une plaque composite tissée. *Systèmes mécaniques et traitement du signal*, 21(6), 2394-2405.
3. Shahidan , S., Pulin , R., Bunnori , NM et Holford , KM (2013). Classification des dommages dans une poutre en béton armé par analyse du signal d'émission acoustique. *Construction et matériaux de construction*, 45, 78-86.
4. Pinheiro Rulli , R., Dotta , F. et da Silva, PA (2013). Essais en vol réalisés par EMBRAER avec les systèmes SHM. Dans *Key Engineering Materials* (Vol. 558, pp. 305-313). Trans Tech Publications Ltée.
5. Sun, FP, Chaudhry , Z., Liang, C. et Rogers, CA (1995). Identification de l'intégrité de la structure en ferme à l'aide du capteur-actionneur PZT. *Journal des systèmes et structures matérielles intelligentes*, 6(1), 134-139.
6. Xu, D., Banerjee, S., Wang, Y., Huang, S. et Cheng, X. (2015). Effets de température et de charge du capteur piézoélectrique intelligent intégré pour la surveillance de l'état des structures en béton. *Construction et matériaux de construction*, 76, 187-193.
7. Liang, C., Sun, FP et Rogers, CA (1994). Une méthode d'impédance pour l'analyse dynamique des systèmes de matériaux actifs.
8. Giurgiutiu , V. et Craig, AR (1997). Méthode d'impédance électromécanique (E/M) pour la surveillance de l'état des structures et l'évaluation non destructive.
9. Park, G., Sohn , H., Farrar, CR et Inman, DJ (2003). Aperçu de la surveillance de l'état de santé basée sur l'impédance piézoélectrique et voie à suivre. *Résumé des chocs et des vibrations*, 35(6), 451-464.
10. Giurgiutiu , V., Bao, J. et Zhao, W. (2003). Capteur actif de plaquette piézoélectrique intégrant des ultrasons dans des poutres et des plaques. *Mécanique expérimentale*, 43(4), 428-449.
11. Bhalla , S. et Soh , CK (2004). Modélisation d'impédance électromécanique pour transducteurs piézo -électriques collés . *Journal des systèmes et structures matérielles intelligentes*, 15(12), 955-972
12. Liang, C., Sun, F. et Rogers, CA (1996). Modélisation d'impédance électromécanique des systèmes de matériaux actifs. *Matériaux et structures intelligentes*, 5(2), 171.
13. Yang, Y., Lim, YY et Soh , CK (2008). Questions pratiques liées à l'application de la technique d'impédance électromécanique dans la surveillance de l'état des structures civiles : I. Expérience. *Matériaux et structures intelligentes*, 17(3), 035008
14. Hamzeloo , SR, Shamsirsaz , M. et Rezaei , SM (2012). Détection d'endommagement sur cylindres creux par méthode d'impédance électro-mécanique : expérimentations et modélisation par éléments finis. *Comptes Rendus Mécanique*, 340(9), 668-677
15. Park, HW, Kim, EJ, Lim, KL et Sohn, H. (2010). Formulation d'éléments spectraux pour l'analyse dynamique d'un système couplé de plaquette et de faisceau piézoélectrique. *Ordinateurs et structures*, 88(9-10), 567-580.
16. Lee, U. (2009). Méthode des éléments spectraux en dynamique des structures.
17. Bhalla , S., Naidu, ASK et Soh , CK (octobre 2003). Influence des interactions structure-actionneur et de la température sur les signatures mécatroniques piézoélectriques pour les END. Dans *Matériaux, structures et systèmes intelligents* (Vol. 5062, pp. 263-269). Société internationale d'optique et de photonique
18. Sun, FP, Chaudhry , ZA, Rogers, CA, Majmundar , M. et Liang, C. (mai 1995). Surveillance automatisée de l'état de la structure en temps réel via la reconnaissance de modèles de signature. Dans *Smart Structures and Materials 1995 : Smart Structures and Integrated Systems* (Vol. 2443, pp. 236-247). Société internationale d'optique et de photonique.
19. Park, G., Kabeya , K., Cudney , HH et Inman, DJ (1999). Surveillance de l'état des structures basée sur l'impédance pour les applications à température variable. *JSME International Journal Series A Mécanique des solides et ingénierie des matériaux*, 42(2), 249-258
20. Koo, KY, Park, S., Lee, JJ et Yun, CB (2009). Surveillance automatisée de l'état des structures basée sur l'impédance intégrant un décalage de fréquence efficace pour compenser les effets de la température. *Journal des systèmes et structures matérielles intelligentes*, 20(4), 367-377.

21. Lim, HJ, Kim, MK, Sohn, H. et Park, CY (2011). Détection des dommages basée sur l'impédance dans différentes conditions de température et de charge. *Ndt & E International*, 44(8), 740-750.
22. Bastani, A., Amindavar, H., Shamshirsaz, M. et Sepehry, N. (2012). Identification des variations de température et des perturbations vibratoires dans la surveillance de l'état des structures basée sur l'impédance à l'aide de la méthode d'un réseau de capteurs piézoélectriques. *Surveillance de l'état des structures*, 11(3), 305-314.
23. Xu, D., Banerjee, S., Wang, Y., Huang, S. et Cheng, X. (2015). Effets de température et de charge du capteur piézoélectrique intelligent intégré pour la surveillance de l'état des structures en béton. *Construction et matériaux de construction*, 76, 187-193.
24. Park, S., Ahmad, S., Yun, CB et Roh, Y. (2006). Détection de fissures multiples dans les structures en béton à l'aide de techniques de surveillance de l'état des structures basées sur l'impédance. *Mécanique expérimentale*, 46(5), 609-618. <http://doi.org/10.1007/s11340-006-8734-0>.
25. Park, G., Sohn, H., Farrar, CR et Inman, DJ (2003). Aperçu de la surveillance de l'état de santé basée sur l'impédance piézoélectrique et voie à suivre. *Le résumé des chocs et des vibrations*, 35(6), 451-463. <http://doi.org/10.1177/05831024030356001>
26. Giurgiutiu, V. (2005). Excitation et détection des ondes de Lamb optimisées avec des capteurs actifs à plaquettes piézoélectriques pour la surveillance de l'état des structures. *Journal des systèmes et structures matérielles intelligentes*, 16(4), 291-305. <http://doi.org/10.1177/1045389X05050106>.
27. Xu, L., Ling, S.-F., Lu, B., Li, H. et Hu, H. (2006). Capacité de détection d'un actionneur cantilever entraîné par PZT. *Capteurs et actionneurs A : Physique*, 127(1), 1-8. <http://doi.org/10.1016/i.sna.2005.07.027>.
28. C. Liang, CA Rogers, Analyse électromécanique couplée des systèmes de matériaux adaptatifs - Détermination de la consommation d'énergie de l'actionneur et du transfert d'énergie du système, *J. Intel. Tapis. Syst. Str.* 5 (1994) 12-20.
29. G. Park, H. Sohn, CR Farrar, Présentation de la surveillance de la santé basée sur l'impédance piézoélectrique et voie à suivre, *Shock Vib.* 35(6) (2003) 451-463.
30. FP Sun, Z. Chaudhry, C. Liang, CA Rogers, Identification de l'intégrité de la structure en treillis à l'aide d'un capteur-actionneur PZT, *J. Intel. Tapis. Syst. Str.* 6 (1995) 134-139.
31. Park, G., Sohn, H., Farrar, CR et Inman, DJ (2003). Aperçu de la surveillance de l'état de santé basée sur l'impédance piézoélectrique et voie à suivre. *Le résumé des chocs et des vibrations*, 35(6), 451-463. <http://doi.org/10.1177/05831024030356001>.
32. Simmers Jr, GE (2005). Surveillance de l'état des structures basée sur l'impédance pour détecter la corrosion (thèse de doctorat, Virginia Tech).
33. Liang, C., Sun, FP et Rogers, CA (1997). Analyse électromécanique couplée de systèmes de matériaux adaptatifs - détermination de la consommation électrique des actionneurs et du transfert d'énergie du système. *Journal des systèmes et structures matérielles intelligentes*, 8(4), 335-343.
34. Liu, X. et Jiang, Z. (2009). Conception d'un patch PZT pour mesurer l'impédance en mode longitudinal dans l'évaluation des dommages aux structures en treillis. *Matériaux et structures intelligents*, 18(12), 125017. <http://doi.org/10.1088/0964-1726/18/12/125017>.
35. Tarazaga, PA, Peairs, DM, Wilkie, WK et Inman, DJ (2006). Surveillance de l'état structurel d'un barrage gonflable soumis à des dommages simulés par des micrométéoroïdes/débris orbitaux, 6176, 61760N-61760N-9. <http://doi.org/10.1117/12.658717>.
36. Meitzler, AH, Tiersten, HF, Warner, AW, Berlincourt, D., Couqin, GA et Welsh III, FS (1988). Norme IEEE sur la piézoélectricité. Société.
37. Sirohi, J. et Chopra, I. (2000). Compréhension fondamentale des capteurs de contrainte piézoélectriques. *Journal des systèmes et structures de matériaux intelligents*, 11(4), 246-257. <http://doi.org/10.1177/104538900772664765>
38. Yan, W., Cai, JB et Chen, WQ (2011). Un modèle d'impédance électromécanique d'une poutre composite fissurée avec des patchs piézoélectriques collés. *Journal du son et des vibrations*, 330(2), 287-307. <http://doi.org/10.1016/j.jsv.2010.08.013>.
39. Annamdas, VGM, Yang, Y. et Soh, CK (2007). Influence de la charge sur l'admittance électromécanique des transducteurs piézocéramiques. *Matériaux et structures intelligents*, 16(5), 1888. Récupéré de <http://stacks.iop.org/0964-1726/16/i=5/a=045>.

-
40. Bhalla , S. et Soh , CK (2004). Modélisation d'impédance électromécanique pour les transducteurs piézo -électriques collés par adhésif. Journal des systèmes et structures matérielles intelligentes, 15(12), 955-972. <http://doi.org/10.1177/1045389X04046309> .
41. Boller , C., Chang, F.-K. et Fujino , Y. (2009). Encyclopédie de la surveillance de la santé des structures. John Wiley.
42. Liang, C., Sun, FP et Rogers, Californie (1997). Analyse électromécanique couplée de systèmes de matériaux adaptatifs-détermination de la consommation électrique des actionneurs et du transfert d'énergie du système. Journal des systèmes et structures matérielles intelligentes, 8(4), 335-343.
43. Chaudhry , ZA, Joseph, T., Sun, FP et Rogers, CA (1995). Surveillance locale de l'état de santé des avions via des patches d'actionneurs/capteurs piézoélectriques. Structures et matériaux intelligents, volume 244. <http://doi.org/10.1177/12.208264>
44. Sun, F., Chaudhry , Z., Liang, C. et Rogers, CA (1995). Identification de l'intégrité de la structure en ferme à l'aide du capteur-actionneur PZT. Journal des systèmes et structures matérielles intelligentes, vol. 6. <http://doi.org/10.1177/1045389X9500600117>
45. Park, G., Kabeya , K., Cudney , HH et Inman, DJ (1999). Surveillance de l'état des structures basée sur l'impédance pour les applications à température variable. JSME International Journal Series A Mécanique des solides et ingénierie des matériaux, 42(2), 249-258.
46. Park, G., Cudney , HH et Inman, DJ (2001). Faisabilité de l'utilisation d'une évaluation des dommages basée sur l'impédance pour les structures de pipelines. Ingénierie sismique et dynamique structurelle, 30(10), 1463-1474. <http://doi.org/10.1002/eqe.72>
47. Giurgiutiu, V. et Zagari, AN (2000). Caractérisation des capteurs actifs piézoélectriques sur plaquette. Journal des systèmes et structures de matériaux intelligents, 11(12), 959-976. <http://doi.org/10.1177/104538900772664260>
48. Soh , CK, Tseng, KKH, Bhalla , S. et Gupta, A. (2000). Performance des patches piézocéramiques intelligents dans la surveillance de la santé d'un pont RC. Matériaux et structures intelligents, 9(4), 533.
49. Bhalla , S., Naidu, AS et Soh , CK (octobre 2003). Influence des interactions structure-actionneur et de la température sur les signatures mécatroniques piézoélectriques pour les END. Dans Matériaux, structures et systèmes intelligents (pp. 263-269). Société internationale d'optique et de photonique.
50. Liu, X. et Jiang, Z. (2009). Conception d'un patch PZT pour mesurer l'impédance en mode longitudinal dans l'évaluation des dommages aux structures en treillis. Matériaux et structures intelligents, 18(12), 125017. <http://doi.org/10.1088/0964-1726/18/12/125017>
51. Rosiek , M., Martowicz , A. et Uhl , T. (2010). Analyse d'incertitude et de sensibilité du système SHM basé sur l'impédance électromécanique. Dans la série de conférences IOP : Science et ingénierie des matériaux (Vol. 10, n° 1, p. 012207). <http://doi.org/10.1088/1757-899X/10/1/012207>
52. Lin, B. et Giurgiutiu , V. (mars 2006). Sur la modélisation de l'analyse d'impédance des capteurs actifs de plaquettes piézoélectriques pour la surveillance de l'état des structures. Dans Structures et matériaux intelligents (pp. 61740A-61740A). Société internationale d'optique et de photonique.
53. Chen, Y., Cai , JB et Feng , Q. (juillet 2011). Etude expérimentale sur la détection des dommages aux structures basée sur la technique d'impédance électromécanique. Dans Technologie multimédia (ICMT), Conférence internationale 2011 sur (pp. 5849-5853). IEEE.
54. Cortez, NE, Filho , JV et Baptista , FG (2012). Un nouveau système microcontrôlé de surveillance de l'état des structures basé sur le principe de l'impédance électromécanique. Surveillance de l'état des structures, 12(1), 14-22. <http://doi.org/10.1177/1475921712461163>
55. Lim, YY et Soh , CK (2014). Surveillance des fissures naissantes basée sur l'impédance électromécanique (EMI) et identification des fissures critiques des structures de poutres. Recherche en évaluation non destructive , 25(2), 82-98. <http://doi.org/10.1080/09349847.2013.848311>
56. Lim, YY et Soh , CK (2011). Estimation de la durée de vie en fatigue d'une poutre en aluminium 1D sous chargement en mode I à l'aide de la technique d'impédance électromécanique. Matériaux et structures intelligents, 20(12), 125001. Extrait de <http://stacks.iop.org/0964-1726/20/i=12/a=125001>
57. Baptista , FG, Budoya , DE, De Almeida, VA et Ulson , JAC (2014). Une étude expérimentale sur l'effet de la température sur les capteurs piézoélectriques pour la surveillance de l'état des structures basée sur l'impédance. Capteurs , 14 (1), 1208-1227.
58. Freitas, ES De et Baptista, FG (2015). Une première étude des diaphragmes piézoélectriques commerciaux pour la détection des dommages basée sur le principe d'impédance électromécanique (Ccdm).

-
59. Al- Adnani , NNA, Mustapha, F., Sapuan , SM et Saifulnaz , MRR (2016). Surveillance de l'état structurel et identification des dommages pour les panneaux composites à l'aide d'un capteur intelligent. *Journal des systèmes et structures matérielles intelligentes*, 1045389X16629553.
60. Koo, K.-Y., Park, S., Lee, J.-J. et Yun, C.-B. (2008). Surveillance automatisée de l'état des structures basée sur l'impédance intégrant un changement de fréquence efficace pour compenser les effets de la température. *Journal des systèmes et structures matérielles intelligentes*, 20(4), 367-377. <http://doi.org/10.1177/1045389X08088664>
61. Baptista , FG, Filho , JV et Inman, DJ (2012). Système de mesure multicapteurs en temps réel avec compensation des effets de température pour la surveillance de l'état des structures basée sur l'impédance. *Surveillance de l'état des structures*, 11(2), 173-186. <http://doi.org/10.1177/1475921711414234>
62. Baptista , FG, Budoya , DE, de Almeida, VAD et Ulson , JAC (2013). Une étude expérimentale sur l'effet de la température sur les capteurs piézoélectriques pour la surveillance de l'état des structures basée sur l'impédance. *Sensors (Bâle, Suisse)*, 14(1), 1208-1227. <http://doi.org/10.3390/s140101208>
63. Huynh, TC, Nguyen, TC, Choi, SH et Kim, JT (2016). Surveillance de l'impédance au niveau de l'ancrage du tendon via une interface PZT montable et une compensation de l'effet de la température. Dans *SPIE Smart Structures and Materials+ Évaluation non destructive et surveillance de la santé* (pp. 97990A-97990A). Société internationale d'optique et de photonique.
64. De Souza Rabelo, D., Steffen Jr, V., Finzi Neto, RM et Lacerda, HB (2016). Surveillance de l'état structurel basée sur l'impédance et méthode statistique pour la détermination du niveau de seuil appliquée aux panneaux en aluminium 2024-T3 à différentes températures. *Surveillance de la santé structurelle*, 1475921716671038.
65. Sun, X., Ma, L., Howden , S., Lin, B. et Yu, L. (juillet 2016). Effets de la température sur la détection guidée des ondes ultrasoniques pour la surveillance de l'état du stockage à sec. Dans *Conférence sur les récipients sous pression et la tuyauterie* (Vol. 50428, p. V06AT06A017). Société Américaine des Ingénieurs en Mécanique.
66. Kaneko, H., Bey , KS et Hou , GJ (2006). Méthode des éléments finis Galerkin discontinue pour les problèmes paraboliques. *Appliqué mathématiques et calcul*, 182(1), 388-402.
67. Rahman , AA (2009). Rapport de recherche final Modèle théorique pour la réponse aux dommages et aux vibrations dans les ponts en béton. Génie Civil Université Teknologi Malaysia, soumis à : Research Management Center (RMC), FRGS 78007 (août).
68. Rosiek , M., Martowicz , A. et Uhl , T. (2010). Analyse d'incertitude et de sensibilité du système SHM basé sur l'impédance électromécanique. Dans la série de conférences IOP : Science et ingénierie des matériaux (Vol. 10, n° 1, p. 012207). <http://doi.org/10.1088/1757-899X/10/1/012207>
69. Sepehry , N., Shamshirsaz , M. et Bastani , A. (2011). Analyse expérimentale et théorique de la surveillance de l'état des structures basée sur l'impédance à température variable. *Surveillance de l'état des structures*, 10(6), 573-585.
70. Baptista , FG, Filho , JV et Inman, DJ (2012). Système de mesure multicapteurs en temps réel avec compensation des effets de température pour la surveillance de l'état des structures basée sur l'impédance. *Surveillance de l'état des structures*, 11(2), 173-186.
71. Sun, FP, Chaudhry, ZA, Rogers, CA, Majmundar, M. et Liang, C. (1995). Surveillance automatisée de l'état de la structure en temps réel via la reconnaissance de modèles de signature (Vol. 2443, pp. 236-247). Récupéré de <http://dx.doi.org/10.1117/12.208261>
72. Liu, W. et Giurgiutiu , V. (avril 2007). Simulation par éléments finis de capteurs actifs de plaquettes piézoélectriques pour la surveillance de l'état structurel avec des éléments couplés. Dans *Technologies de capteurs et de structures intelligentes pour les systèmes civils, mécaniques et aérospatiaux 2007* (Vol. 6529, p. 65293R). Société internationale d'optique et de photonique.

ANNEXE

CODE MATLAB DE COMPENSATION DE TEMPÉRATURE

```
>> V=[]
V =
>>for i=1:6
D(i)=finddelay(V(:,2),V(:,i+2));
end
>> D
D =
    -8   -16   -24   -32   -40   -47   -47
>> D=[0 D];
>>for i=1:7
plot(V(-D(i)+1:end,1), V(1:end+D(i),i+1),'-k')
hold on
end
>>for i=1:7
C=corrcoef(V(:,2)',V(:,i+1)');
CC(i)=C(1,2);
CC1(i)=1-CC(i);
end
>> CC
CC =
    1.0000    0.8774    0.5983    0.3327    0.1311   -0.0147   -0.1130
>> CC1
CC1 =
    0.0000    0.1226    0.4017    0.6673    0.8689    1.0147    1.1130
```