

Université 8 mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique



Mémoire de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme de Master

Option : Construction Mécanique

Présenté par : **Cherf Ayoub**

=====

***Identification des dommages structuraux à travers
l'excitation à des fréquences ultrasoniques***

=====

Sous la Direction de :

Pr. DJAMAA Mohamed Cherif

Année universitaire 2024/2025

REMERCIEMENTS

Au terme de ce parcours académique exigeant mais enrichissant, c'est avec un cœur reconnaissant que je souhaite exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

À Allah, source de toute sagesse et de toute force, je rends grâce pour m'avoir guidé et accordé la persévérance nécessaire pour mener à bien ce projet. Sans Sa bienveillance, rien de tout cela n'aurait été possible.

À Monsieur le Professeur DJAMAA Mohamed Cherif, mon éminent encadreur, je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance pour votre précieux accompagnement. Votre expertise, votre disponibilité et vos conseils avisés ont été des phares tout au long de ce travail. Ce fut un honneur et un privilège de bénéficier de votre direction, marquée par une bienveillance et une rigueur qui m'ont profondément inspiré.

Aux membres respectés du jury, je suis infiniment reconnaissant d'avoir accepté d'évaluer ce modeste travail. Vos critiques constructives et vos suggestions ont grandement contribué à son enrichissement. Puissiez-vous être récompensés pour votre temps et votre engagement.

Enfin, à tous ceux qui, visiblement ou dans l'ombre, ont soutenu ce projet par leurs encouragements, leurs conseils ou leur simple présence, je vous adresse mes remerciements les plus chaleureux. Ce travail est aussi le vôtre.

Que chacun trouve ici l'expression de ma gratitude, aussi humble soit-elle face à l'ampleur de votre générosité.

RÉSUMÉ

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre du contrôle non destructif, appliqué au diagnostic et à la surveillance de l'intégrité des structures mécaniques et plus précisément sur l'identification des dommages structuraux dans une plaque en aluminium. Une étude bibliographique approfondie a permis de recenser les approches directes et inverses de détection, en mettant la lumière sur l'intérêt croissant des méthodes basées sur la mesure des vibratoires, notamment dans le domaine des hautes fréquences. Une formulation mathématique, basée sur la méthode modale pour le problème directe et sur la méthode des différences finies dans le problème inverse ont été présentées. Pour le cas des plaques endommagées, la pente de rigidité et l'indice de dommage ont été calculés. Des simulations de la réponse libre et forcée ont été réalisées à l'aide des logiciels SolidWorks et ANSYS, afin de mieux comprendre le comportement dynamique de la structure endommagée et d'identifier la présence de dommages. Les résultats montrent que, si les basses fréquences permettent une évaluation globale des défauts par la formulation mathématique à travers l'identification inverse, les hautes fréquences (jusqu'à 1 MHz) permettent une localisation précise, notamment via les simulations sous ANSYS, à travers le calcul direct de la réponse vibratoire. Il ressort de cette étude que l'exploitation du comportement vibratoire à des hautes fréquences, en particulier des ondes de Lamb, constitue une voie prometteuse pour la localisation fine des dommages, grâce à leur forte sensibilité aux variations locales d'épaisseur et de rigidité.

ملخص

يندرج هذا البحث ضمن مجال المراقبة غير الإتلافية المطبقة لتشخيص ومراقبة سلامة الهياكل الميكانيكية وبشكل خاص على تحديد الأضرار في صفيحة من الألمنيوم. سمحت دراسة ببليوغرافية معمقة بالتعرف على الطرق المباشرة وغير المباشرة للكشف، مع إبراز الأهمية المتزايدة للطرق التي تعتمد على قياس الاهتزازات، لاسيما في مجال الترددات العالية. تم إعداد صياغة رياضية تعتمد على طريقة كيفية حل المشكلة المباشرة وعلى طريقة الفروق المنتهية حل المشكلة العكسية. من أجل تحديد وجود أضرار من عدمها تم تقييم ميل الصلابة ومؤشر الضرر. كما أُجريت محاكاة للاستجابة الحرة والمجبرة باستخدام برنامجي **SolidWorks** و **ANSYS**، بهدف فهم السلوك الديناميكي للهيكل وتحديد وجود أضرار محتملة. أظهرت النتائج أن الترددات المنخفضة تتيح تقييماً للعيوب من خلال النمذجة الرياضية وذلك بعد إعمال الحسابات العكسية، بينما تُمكن الترددات العالية (حتى 1 ميغاهرتز) من تحديد موقع الضرر بدقة وبصفة مباشرة من خلال الأجوبة الاهتزازية، لاسيما من خلال المحاكاة في **ANSYS**. كما تُبرز هذه الدراسة أن استغلال الترددات العالية، وخصوصاً أمواج **Lamb**، يُعدّ توجهاً واعداً للكشف الدقيق عن العيوب، نظراً لحساسيتها الكبيرة تجاه التغيرات الموضعية في السماكة والصلابة.

ABSTRACT

This work deals within non-destructive testing applied to the diagnostic and the monitoring of the integrity of mechanical structures which focuses specifically on the identification of damages in an aluminum plate. A literature review allowed the classification of both direct and inverse detection approaches, highlighting the growing importance of the measurement of vibrations, particularly in the high-frequency domain. A mathematical formulation based on the modal method to resolve the direct problem and the finite difference method was presented. In the case of damaged structures, the evaluation of the stiffness slope and the damage index are calculated. Simulations of the free and forced responses were carried out using SolidWorks and ANSYS in order to better understand the dynamic behavior of the structure and identify the presence of damage. The results show that, while low frequencies enable defects evaluation through mathematical modeling after the inverse identification is applied, high frequencies (up to 1 MHz) allow a precise localization starting from direct problem, particularly through simulations in ANSYS. This study demonstrates that the excitation at high frequencies, especially Lamb waves, represents a promising approach for the accurate localization of structural damage due to their high sensitivity to local variations in thickness and stiffness.

SOMMAIRE

Introduction Générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Etude bibliographique

I.1. Généralités sur l'intégrité des structures	2
I.1.1. Introduction	2
I.1.2. Définition de l'intégrité structurelle.....	2
I.1.3. Causes et typologies des dommages structurels.....	3
I.1.4. Conséquences des dommages et importance de leur détection	4
I.2. Méthodes de détection des dommages	5
I.2.1. Détection par analyse des vibrations	6
I.2.1.1. Excitateurs de vibrations	7
I.2.1.2. Capteurs de vibrations.....	9
I.3. Synthèse des références bibliographiques	11
I.4. Position du problème.....	21

Chapitre II : Formulation mathématique

II.1. Introduction	22
II.2. Formulation mathématique du problème	22
II.3. Application de la méthode de différences finies	25
II.4. Diagnostic à hautes fréquences.....	27
II.5. Conclusion.....	28

Chapitre III : Simulations numériques

III.1. Introduction	30
III.2. Données du problème	30
III.3. Résultats des calculs par la formulation mathématique.....	30
III.3.1 Résultats de calcul à 1 kHz	30
III.3.2 Résultats de calcul à 1 MHz.....	34
III.4. Résultats des simulations par SolidWorks et ANSYS de la réponse libre	37

III.4.1. Simulations sur une plaque saine	38
III.4.2. Simulations sur une plaque endommagée	41
III.5. Résultats des simulations par ANSYS de la réponse forcée	43
III.6. Conclusion	51
Conclusion Générale	52

INDEX DES FIGURES ET TABLEAUX

Chapitre I

Figure I.1. Les différentes formes de défauts dans les structures	3
Figures I.2. Chaîne de mesure et montage	6
Figure I.3. Schéma du marteau d'impact.....	7
Figure I.4 Schéma d'un excitateur électromagnétique	8
Figure II.5. Excitateur piézoélectrique haute fréquence	8
Figure II.6. Capteurs de vibrations	9
Figure II.7. Montage du proximètre sur un palier	10
Figure II.8. Schéma de principe d'un vélocimètre	10
Figure II.9. Vibromètre laser à effet Doppler (LDV)	11
Figure II.10. Schéma de principe d'un accéléromètre	11

Chapitre II

Figure II.1. Identification d'un défaut structurel sur plaque rectangulaire	24
Figure II.2. Discrétisation en différences finies pour un segment linéaire.....	25
Figure II.3. Schéma aux différences finies centré dans le cas bidimensionnel	26
Figures II.4. Nombres d'onde expérimentaux k_{\max} k_{circfit} , et modes théoriques des ondes de Lamb.....	28

Chapitre III

Figure III.1. Distribution des déplacements à 1kHz.....	31
Figure III.2. Distribution de l'effort à 1kHz.....	31
Figure III.3. Rapport D de la plaque saine. Excitation à 1kHz.....	32
Figure III.4. Rapport D de la plaque endommagée. Excitation à 1kHz	33
Figure III.5. Distribution de l'indice de dommage de la plaque à 1 kHz	33
Figure III.6. Distribution des déplacements à 1MHz	34
Figure III.7. Distribution de l'efforts à 1MHz	34

Figure III.8. Rapport D de la plaque saine. Excitation à 1MHz	35
Figure III.9. Rapport D de la plaque saine. Excitation à 1MHz	36
Figure III.10. Distribution de l'indice de dommage de la plaque à 1 MHz	36
Figure III.11. Plaque aluminium endommagée par SolidWorks	37
Figure III.12. Fichier *.ans exporté à partir de SolidWorks dans ANSYS APDL.....	38
Tableau III.1. Fréquences propres de la plaque saine en Hz, issues de la simulation par SolidWorks, ANSYS APDL et ANSYS Workbench	39
Figures III.13. Déformée 1 à 34.106 Hz.....	39
Figures III.14. Déformée 2 à 81.972Hz.....	39
Figures III.15. Déformée 3 à 207.49 Hz.....	40
Figures III.16. Déformée 4 à 265.52 Hz.....	40
Figures III.17. Déformée 5 à 299.09 Hz.....	40
Figures III.18. Déformée 6 à 522.05 Hz.....	41
Tableau III.2. Comparaison entre les fréquences propres de la plaque avec ou sans dommage, en Hz, issues de la simulation par ANSYS Workbench (En rouge sont des modes de torsion)..	42
Figure III.19. Réponse en fréquence de la plaque saine et endommagée (h3=4mm)	42
Figure III.20. Variation du ratio d'amplitude (plaque endommagée/plaque saine)	43
Figure III.21. Déplacement transversal de la plaque excitée à 1 kHz	44
Figure III.22. Déplacement transversal de la plaque excitée à 10 kHz	44
Figure III.23. Déplacement transversal de la plaque excitée à 20 kHz	44
Figure III.24. Déplacement transversal de la plaque excitée à 1 MHz.....	45
Figure III.25. Distribution du déplacement transversal dans la zone endommagée de la plaque excitée à 1 MHz.....	46
Figure III.26. Déplacement transversal de la plaque excitée à 1 kHz avec un effort reparté	47
Figure III.27. Déplacement transversal de la plaque excitée à 1 MHz avec un effort reparté	47
Figure III.28. Distribution du déplacement transversal dans la zone endommagée de la plaque excitée à 1 MHz avec un effort reparté	48
Figure III.29. Courbes de dispersion de nombre d'ondes pour une plaque d'épaisseur h=10mm	49
Figure III.30. Courbes de dispersion de nombre d'ondes pour une plaque d'épaisseur h=4mm	49
Figure III.31. Distribution des nombres d'ondes K pour différentes fréquences.....	50

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction Générale

Au cœur de toute entreprise de construction réside la volonté non seulement de construire, mais aussi d'optimiser et de perfectionner les processus. Chaque projet reflète une opportunité d'ajouter une valeur aux standards de production et de la performance collective globale. Dans cette optique, l'identification et la correction des défauts de structures occupent une place essentielle car ceci ne représente pas uniquement un défi technique, mais aussi une véritable opportunité d'assurer la qualité et la sécurité des installations au cours de leur vie de fonctionnement.

La capacité d'éviter des anomalies de conception dès les premières étapes d'un projet dépasse la simple garantie de qualité ; c'est un signe de clairvoyance et de responsabilité des ingénieurs et des concepteurs novateurs pour affiner leurs idées et concrétiser leurs ambitions dont l'objectif est d'éviter la naissance des défauts structurels imprévisibles. Pour les grandes entreprises de construction, cette détection précoce permet d'éviter des arrêts inattendus et de garantir une maintenance efficace pour le bon déroulement des opérations.

L'importance et la complexité de la détection des défauts structurels ont donné lieu à de nombreuses recherches sur des méthodes quantitatives dans le domaine de contrôle non destructif tel que les ultrasons, le ressuage, la radiologie, l'analyse vibratoire, etc. Parmi tant de méthodes la plus efficaces, l'analyse vibratoire a été développée pour le diagnostic des défauts soit par des calculs soit par des approches inverses d'identification basées sur la mesure de la réponse vibratoire dans les plages de fréquences normales ou à hautes fréquences.

Utilisée depuis plusieurs décennies par les industriels, l'analyse vibratoire s'est imposée comme un outil essentiel dans le cadre de la maintenance préventive conditionnelle. Son utilisation s'articule autour de trois niveaux d'analyse : la surveillance continue, le diagnostic précis et le suivi de l'état de dégradation des structures. Cette approche permet à la base sur l'analyse modale et met en évidence les comportements dynamiques des structures, qu'elles soient intactes ou endommagées. Elle permet entre autres d'identifier les sources de vibrations dans une structure et servir de référence pour valider ou optimiser les modèles théoriques.

CHAPITRE I

ETUDE

BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Généralités sur l'intégrité des structures

I.1.1. Introduction

Dans les domaines d'ingénierie mécanique, l'aéronautique, l'aérospatial, le génie civil ou encore l'énergie, la fiabilité des structures est un enjeu majeur pour garantir la sécurité des personnes et la performance des ouvrages. Une défaillance structurelle peut entraîner des conséquences catastrophiques sur les vies humaines, sur l'économie et sur l'environnement. Afin de prévenir ces risques, le contrôle de l'intégrité des structures tout au long de leur cycle de vie est indispensable.

La détection précoce des dommages, leur localisation, leur caractérisation et leur suivi sont au cœur des préoccupations de l'ingénierie moderne. Ce champ d'étude est regroupé sous le terme de surveillance de santé structurelle. L'objectif principal de ce chapitre a comme impératif la détection précoce des dommages pour l'amélioration du suivi de l'intégrité structurelle. Le perfectionnement des méthodes de détection et d'analyse a connu de grandes avancées pour une compréhension approfondie de cette problématique complexe et pour une gestion efficace des défauts, en vue de garantir une intégrité structurelle optimale.

I.1.2. Définition de l'intégrité structurelle

L'intégrité structurelle est définie comme l'aptitude d'une structure à supporter les charges externes et internes sans compromettre sa stabilité, sa résistance ni sa fonctionnalité. Elle repose sur la bonne conception mécanique, sur la qualité des matériaux utilisés, sur le respect des tolérances lors de la fabrication et sur l'environnement opérationnel [1].

Une structure intègre doit présenter :

- Une capacité à résister aux charges prévues et imprévues ;
- Une capacité à rester fonctionnelle malgré des endommagements localisés ;
- Une durée de vie fiable avec une marge de sécurité adéquate.

Malheureusement, cette intégrité structurelle peut être affectée au cours de fonctionnement par la perte de rigidité ou de flexibilité, par la perte de masse ou d'épaisseur ainsi que par le changement des caractéristiques mécaniques et thermiques.

I.1.3. Causes et typologies des dommages structurels

Les dommages structurels correspondent à toute modification physique, altération ou dégradation de l'intégrité de la structure qui compromet sa capacité à remplir sa fonction de manière sûre et efficace. Ils peuvent se manifester sous forme visible ou invisible, localisée ou diffuse, résultant de causes multiples telles que des contraintes mécaniques, des conditions environnementales adverses ou des facteurs liés à la conception, à la production ou à la maintenance [2].

Les dommages peuvent se manifester sous diverses formes selon leur nature, leur origine et leur localisation. Quelque soient leurs types : fissuration, corrosion, soufflures de soudure, vieillissement ou délaminage dans le cas des matériaux composites, leur présence compromet l'intégrité mécanique des structures.



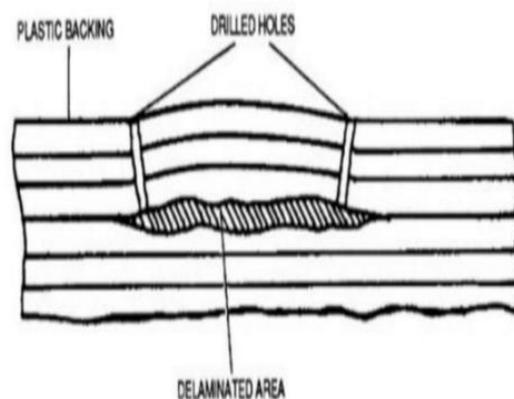
(a) Fissures



(b) Corrosion



(c) Soufflures de soudure



(d) Délaminage

Figure I.1. Différentes formes de défauts dans les structures.

I.1.4. Conséquences des dommages et importance de leur détection

L'apparition de dommages structurels, même mineurs, peut avoir des conséquences graves si elle n'est pas détectée à temps. Ces dommages altèrent les propriétés mécaniques et dynamiques de la structure (raideur, masse, amortissement) et influencent directement son comportement mécanique. La compréhension de ces conséquences et la nécessité de méthodes de détection fiables et précoces constituent l'un des fondements du domaine de contrôle non destructif et de la surveillance de la santé structurelle.

Bien que les dommages structurels affectent essentiellement la résistance mécanique d'un tel ou tel composant, leur impact s'étend à plusieurs dimensions de fonctionnement d'un système. Parmi ces impacts, on peut citer :

Impacts mécaniques : Un dommage altère la répartition des contraintes dans une structure, modifie ses propriétés dynamiques (rigidité, fréquence propre, amortissement) avec l'augmentation du risque de résonance et d'instabilité vibratoire [2].

Impacts économiques : L'absence de détection précoce des dommages entraîne des coûts de réparation élevés, des arrêts non planifiés et une réduction de la durée de vie utile de l'installation. Une stratégie de maintenance réactive est généralement beaucoup plus coûteuse qu'une maintenance préventive appuyée sur une détection fiable.

Impacts environnementaux : Certaines ruptures structurelles peuvent causer des fuites de substances toxiques ou polluantes (hydrocarbures, gaz, produits chimiques), avec des conséquences graves sur les écosystèmes.

Impacts humains et sécuritaires : Les défauts mettent en jeu la vie des usagers ou des opérateurs. L'effondrement d'un pont, la rupture d'un réservoir ou la défaillance d'une aile d'avion peuvent causer des pertes humaines et engager la responsabilité civile ou pénale des exploitants.

Ces dommages structurels justifient l'importance d'adopter des stratégies de surveillance proactive permettant de détecter les dommages à un stade précoce pour la préservation de leur intégrité, la sécurité des usagers, la réduction des coûts de maintenance et l'optimisation du cycle de vie. Ce processus ne se limite pas à la simple localisation d'un défaut, il constitue une étape critique du processus de gestion de la durabilité structurelle.

I.2. Méthodes de détection des dommages

La détection et la localisation des dommages dans les systèmes mécaniques représentent des enjeux fondamentaux en matière de fiabilité, de sécurité et de performance opérationnelle. Une défaillance non détectée peut avoir des conséquences graves, allant de l'arrêt imprévu d'un équipement à des accidents majeurs.

Pour répondre à ces enjeux, un large éventail de méthodes et techniques a été développé pour détecter les dommages dans les systèmes mécaniques. Ces techniques appartiennent majoritairement au domaine des contrôles non destructifs et exploitent différents principes physiques pour révéler l'existence de défauts internes ou superficiels.

Parmi les méthodes les plus couramment utilisées, on peut citer [3] :

Magnétoscopie : Le contrôle par particules magnétiques sont limités aux matériaux ferromagnétiques. Il consiste à magnétiser la pièce, puis à appliquer des particules fines qui s'alignent autour des fissures. Cette méthode permet de localiser des défauts de surface et sous-surface proche, mais uniquement sur des matériaux pouvant être magnétisés.

Radiographie : L'utilisation des rayons X ou gamma pour traverser la pièce et révéler les défauts internes sur un film ou un capteur. C'est une méthode très précise et bien documentée, mais qui nécessite un équipement lourd et présente des risques liés aux radiations.

Ultrasons : Les ondes ultrasonores réfléchies par les défauts permettent une détection précise des défauts internes et des mesures fiables d'épaisseur, mais la technique dépend fortement de la compétence de l'opérateur.

Courants de Foucault : Les courants de Foucault sont utilisés pour examiner des matériaux conducteurs. Une bobine génère un champ magnétique qui induit des courants dans la pièce. Toute discontinuité modifie ces courants et peut être détectée. C'est une méthode rapide, sensible et sans contact, particulièrement adaptée aux contrôles de surface, mais peu efficace en profondeur.

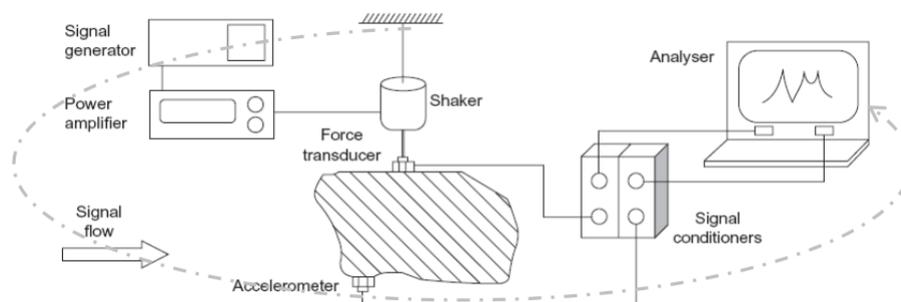
Thermographie Infrarouge : La thermographie infrarouge repose sur la détection des variations de température en surface, révélant des défauts internes par leur influence sur la conduction thermique. Sans contact et adaptée aux grandes surfaces, mais sensible aux conditions environnementales.

Émission Acoustique : L'émission acoustique consiste à capter les sons produits par la formation ou la propagation de fissures dans un matériau soumis à un effort. Cette méthode permet de surveiller l'intégrité d'une structure en temps réel, mais nécessite une instrumentation complexe et une bonne interprétation des signaux.

Cependant, la demande croissante de techniques d'identification de dommages dans les structures a nécessité le développement d'approches innovantes axées sur le suivi des variations des paramètres vibratoires comme indicateurs de l'état structural. Des progrès technologiques incluant les moyens de mesure et de traitement des signaux vibratoires ainsi que les améliorations du calcul et du stockage et l'évolution des logiciels de CAO, basés sur la méthode des éléments finies et bien d'autres méthodes, ont fortement contribué à faire évoluer les techniques de détection de dommages des structures mécaniques.

I.2.1. Détection par analyse des vibrations

Etant une approche non destructive, l'analyse vibratoire consiste à étudier les signaux vibratoires d'une structure endommagée, obtenus par des capteurs (accéléromètres, vibromètres laser, etc.). Il est à noter que les changements des propriétés mécaniques, thermiques et des dimensions conduit automatiquement à la variation du comportement dynamique. L'idée de la technique est d'exciter la structure par un excitateur et de récolter la réponse vibratoire d'une structure dans son état intact ou endommagée, (**Figure I.2**). Dans le cas de détection de défauts d'une structure, il se peut que la structure soit autoexcitée par la présence du défaut.



Figures I.2. Chaîne de mesure et montage [4].

I.2.1.1. Excitateurs de vibrations

Le système d'excitation est le dispositif utilisé pour mettre la structure en mouvement vibratoire, généralement par l'application d'une force motrice appropriée aux différents emplacements présélectionnés. L'une des décisions principales à prendre lors de la phase de planification des essais est le type de force à appliquer à la structure c'est-à-dire la fonction d'excitation, qui dicte indirectement le type de système d'excitation à utiliser [5].

Il y a plusieurs types d'excitateurs pour générer des vibrations contrôlées :

Marteau d'impact : Une méthode d'excitation courante pour la détermination des fréquences propres d'une structure utilise un marteau d'impact (**Figure I.3**), disponible en différentes tailles. Les modèles très petits sont utilisés pour exciter les structures légères et de faibles dimensions et les grands modèles pour les structures lourdes et massives. La force appliquée est mesurée par un capteur de force situé à la base de l'embout du marteau. Cet embout est interchangeable, permettant ainsi de moduler le contenu fréquentiel de l'impulsion de force. Les plages de fréquences typiques s'étendent généralement de 0 à 5 kHz pour les petits marteaux et de 0 à 300 Hz pour des marteaux plus grands [5].

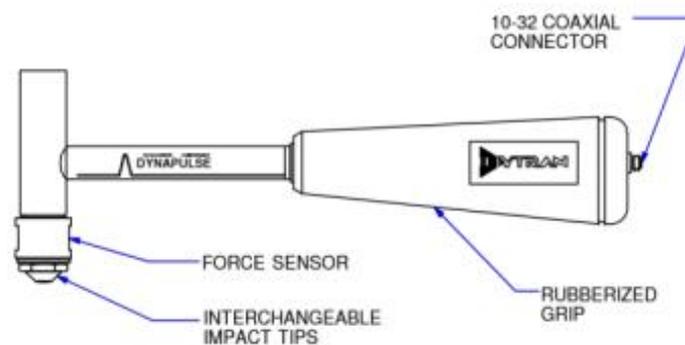


Figure I.3 Schéma du marteau d'impact [6].

Pot vibrant : C'est un dispositif électromagnétique (électrodynamique) ou électrohydraulique qui permet un contrôle précis de la fréquence et de l'amplitude de la force appliquée à la structure. Par rapport aux excitateurs électrohydrauliques, les excitateurs électromagnétiques (**Figure I.4**) sont généralement plus compacts et peuvent fonctionner dans des gammes de fréquences plus élevées allant jusqu'à 30 kHz [5].

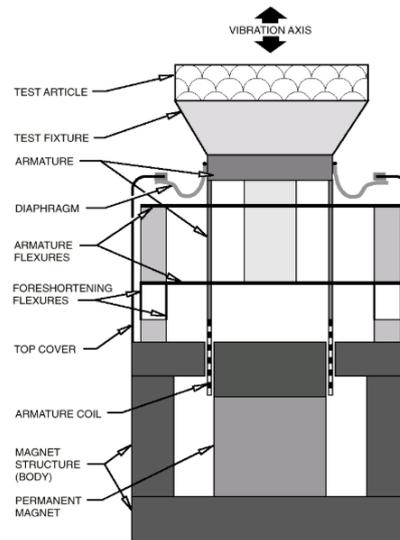


Figure I.4. Schéma d'un excitateur électromagnétique [7].

Excitateur piézoélectrique : L'excitateur piézoélectrique se compose d'un disque en matériau piézoélectrique (quartz), supportant une masse sismique maintenue en précontrainte qui par son mouvement excite la structure en exploitant l'effet piézoélectrique inverse où l'application d'une tension génère un déplacement mécanique. Ce type d'excitateur permet à la fois un contrôle micrométrique et une génération d'ondes mécaniques hautes fréquences pour des applications de précision [8].



Figure I.5. Excitateur piézoélectrique [40].

I.2.1.2 Capteurs de vibrations

L'analyse vibratoire repose sur la mesure de trois grandeurs fondamentales : Le déplacement, la vitesse et l'accélération. Bien que les capteurs de ces grandeurs utilisant des principes physiques différents (**Figure I.6**), mais ils partagent un objectif commun qui est la conversion précise de vibrations mécaniques en signaux électriques exploitables. Les capteurs dits actifs (ex : piézoélectriques) ne nécessitent pas d'alimentation mais ceux appelés passifs (ex : courants de Foucault) nécessitent une alimentation externe. Cette présentation met en évidence le compromis entre autonomie et sensibilité dans le choix des capteurs.

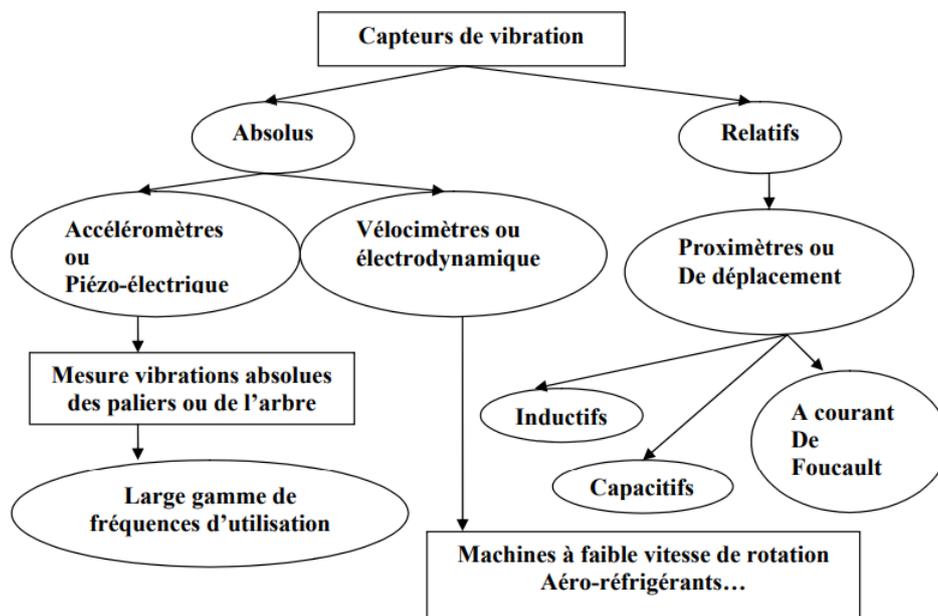


Figure I.6. Capteurs de vibrations [9].

Différents types de capteurs peuvent être utilisés en analyse vibratoire, parmi lesquels :

Proximètres : Le proximètre (**Figure I.7**) est une sonde de déplacement sans contact à courant de Foucault montée en permanence dans le palier, mesurant directement le déplacement relatif des vibrations de l'arbre. Ces mesures, proportionnelles au déplacement, sont cependant limitées aux basses fréquences (< 100 Hz) et ne couvrent pas toutes les gammes fréquentielles. L'utilisation de ce capteur est recommandée pour toutes les applications où la mesure des jeux arbre-palier constitue un paramètre essentiel.

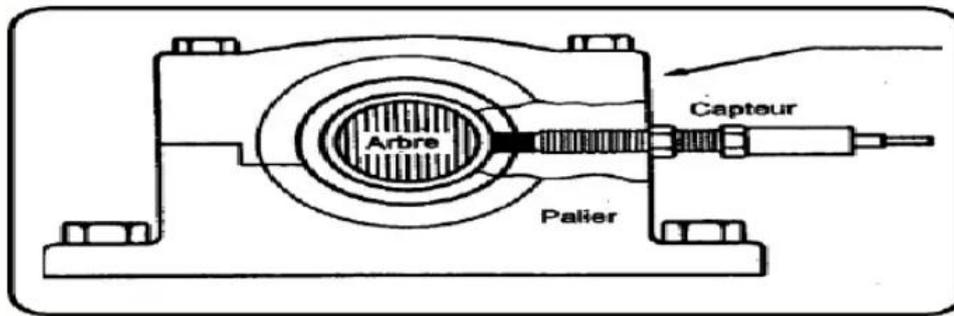


Figure I.7. Montage du proximètre sur un palier [10].

Vélocimètres : Les vélocimètres sont des capteurs de vitesse soit avec contact direct avec la structure ou sans contact. Les vélocimètres avec contact sont constitués d'une sonde sismique mesurant le mouvement absolu de la structure sur laquelle ils sont fixés (Figure I.8). Leur principal avantage réside dans leur autonomie, ne nécessitant ni source d'alimentation externe ni préamplificateur.

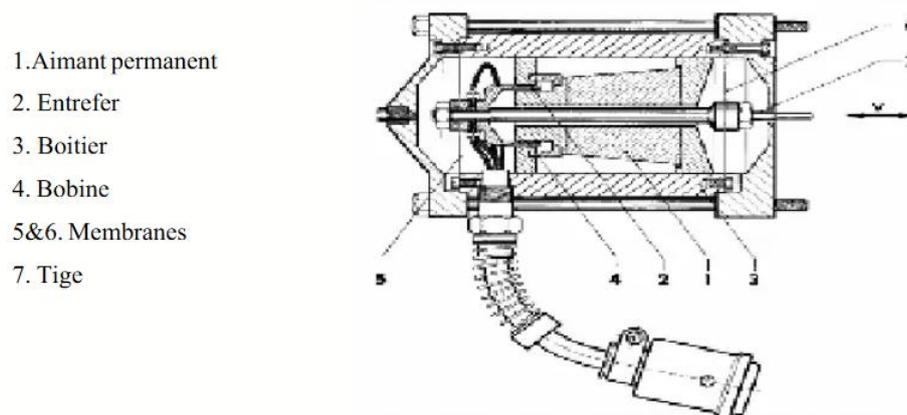


Figure I.8. Schéma de principe d'un vélocimètre [10].

Pour la mesure des vitesses sans contact avec la structure, une nouvelle génération de capteurs appelée vibromètre laser à effet Doppler émettant un faisceau lumineux cohérent et directionnel, basé sur le principe de l'émission stimulée (Figure I.9). Le fonctionnement repose sur l'effet Doppler optique : un laser He-Ne (632,8 nm) est dirigé vers une surface en mouvement et la lumière réfléchié subit un décalage de fréquence proportionnel à la vitesse de cette surface. Grâce à un montage interférométrique, ce décalage est converti en signal mesurable. Il peut mesurer des vibrations sur une large plage de fréquences allant jusqu'à 20 MHz, ce qui le rend particulièrement adapté à l'analyse des vibrations ultrasonores ou sur des structures vibrantes à hautes fréquences [11].



Figure I.9. Vibromètre laser à effet Doppler (LDV) [12].

Accéléromètres : L'accéléromètre piézoélectrique (Figure I.10) se compose d'un disque en matériau piézoélectrique (quartz) fonctionnant comme élément élastique, supportant une masse sismique maintenue en précontrainte qui par son mouvement génère une tension électrique équivalente au mouvement vibratoire.

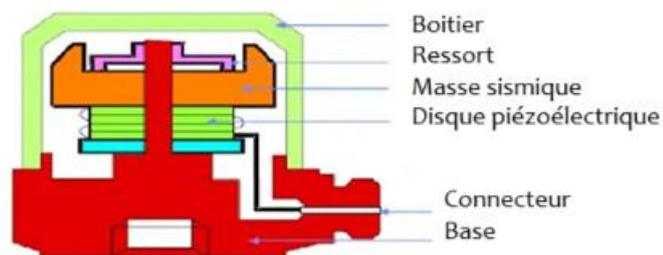


Figure I.10. Schéma de principe d'un accéléromètre [10].

Les accéléromètres piézoélectriques s'imposent progressivement comme la solution de référence pour la surveillance vibratoire en raison de leurs caractéristiques exceptionnelles :

- Large bande passante couvrant des gammes fréquentielles étendues ;
- Linéarité remarquable sur une plage dynamique importante (typiquement 140 dB) ;
- Le signal d'accélération peut être intégré électroniquement pour donner le déplacement et la vitesse ;
- Robustesse intrinsèque grâce à l'absence de pièces mobiles.

I.3. Synthèse des références bibliographiques

Le domaine du contrôle non destructif a fait l'objet de nombreuses recherches visant à détecter, localiser et quantifier les défauts dans les structures industrielles. Cette étude

propose une synthèse des principales approches d'identification de dommages développées dans ce domaine, en les classant selon deux catégories méthodologiques : les méthodes directes, les méthodes inverses.

Dans le cas des structures endommagées, diverses méthodes directes peuvent être employées pour identifier les dommages. Zeddam M. [13] dans son mémoire de master qui présente une étude approfondie sur le contrôle non destructif par ultrasons pour la localisation de défauts dans les structures métalliques, notamment les soudures. Il expose dans un premier temps les fondements théoriques des ultrasons, en détaillant les différents types d'ondes (longitudinales, transversales, de Rayleigh, de Lamb) ainsi que leur propagation, atténuation et interaction avec les matériaux. Il insiste sur l'importance de l'impédance acoustique et des phénomènes de réflexion et réfraction, essentiels à la compréhension du comportement des ondes aux interfaces. L'étude expérimentale est réalisée au sein du laboratoire LMS de l'université de Guelma, et porte sur l'analyse de pièces étalons et d'échantillons soudés. L'auteur y met en œuvre différentes techniques de contrôle ultrasonore, telles que le palpement droit, le palpeur d'angle et la méthode TOFD. Il explique les méthodes de localisation (graphiques, calcul direct) et de dimensionnement des défauts (méthode -6 dB, DAC, écho de fond), en s'appuyant sur des mesures réelles et des représentations A-scan, B-scan, C-scan et 3D. Adhikari et al. [14] ont proposé une méthode de détection et de suivi des dégradations sur des structures en béton à l'aide de la technologie de scan laser X7 pour capturer la géométrie 3D de la structure en béton, suivie d'une analyse détaillée des données pour identifier les zones endommagées ou fissurées. Les techniques d'isodata et d'analyse d'image ont été appliquées à une image 2D générée à partir de points de nuage 3D. La précision globale et les statistiques kappa des deux techniques de classification montrent un bon accord entre l'image classifiée et l'image de référence. La technique OBIA s'est avérée plus efficace pour détecter les fissures mineures (<5 mm) et les dommages sur une structure en béton. Plusieurs autres études basées sur la mesure des vibrations en basses fréquences pour identifier et localiser les défauts. Lee et al. [15] ont développé une méthode pour l'identification des dommages, basée la variation du nombre d'onde en fonction de la fréquence, mesurée à partir des vibrations harmoniques générées par des éléments piézoélectriques dans la structure. Les prédictions du modèle théorique proposé pour analyser la propagation des ondes et les modes d'ondes stationnaires dans la structure ont été comparées aux réponses vibratoires mesurées pour la validité du

modèle théorique. En utilisant la réponse prédite, la sensibilité de l'énergie potentielle aux dommages induits sur une poutre a été déterminée. Les changements dans le nombre d'onde et la rigidité dynamique équivalente ont été obtenus à partir des fonctions de transfert mesurées. L'emplacement et la taille des dommages ont été identifiés avec précision à l'aide d'un indice de dommage, calculé en utilisant le coefficient de corrélation entre la sensibilité de l'énergie potentielle et la variation de la rigidité dynamique. Les résultats confirment l'efficacité de la méthode, notamment sa capacité à localiser précisément des dommages de petite taille, sans recourir à des modèles numériques complexes. L'article de Khiem et al. [16] traite la détection de fissures avec l'analyse de la réponse en fréquence d'une poutre FGM fissurée liée avec une couche piézoélectrique comme capteur distribué sous charge mobile. Les équations gouvernantes de la structure de poutre intégrée sont dérivées à l'aide du principe de Hamilton et résolues par la méthode analytique dans le domaine fréquentiel. Des solutions ont été obtenues explicitement sous forme de réponses mécaniques (flèche au milieu de la portée) et électriques (charge de sortie du capteur), qui ont été examinées numériquement en fonction de l'indice de gradient matériel, de la fréquence et de la vitesse de la charge, ainsi que de la profondeur et de la position de la fissure. Les résultats numériques obtenus ont confirmé que les réponses mécaniques et électriques sont spectralement identiques et présentent une sensibilité similaire à la fissure.

Dans le domaine des vibrations hautes fréquences, Monnier [17] propose une méthode innovante pour la surveillance de l'intégrité des panneaux d'avion en composites renforcés à l'aide des émetteurs et récepteurs piézoélectriques. La technique consiste à émettre et recevoir des ondes Lamb pour détecter des dommages internes, tels que la délamination. L'analyse spectrale (FFT) des ondes de Lamb permet de définir un indice de dommage (DI) quantifiant les variations des signaux ultrasonores. Des tests sur un panneau d'Airbus rigidifié, soumis à des impacts contrôlés, confirment l'efficacité de la méthode pour détecter des dommages même inférieurs au seuil macroscopique. Des comparaisons avec le C-scan, montre une sensibilité élevée et une applicabilité aux structures complexes, bien que des défis persistent pour définir des seuils de détection robustes en conditions réelles. La recherche de He et al. [18] explore l'utilisation des ondes de Lamb, en particulier la méthode d'excitation symétrique, pour détecter et localiser des fissures. Une simulation numérique sur une plaque d'acier soudée a été réalisée avec le module ABAQUS/EXPLICIT. La propagation des ondes de

Lamb et leurs effets sur des modèles intacts et endommagés ont été simulés. En utilisant les caractéristiques de propagation et la méthode de localisation par ellipse avec MATLAB, l'emplacement des fissures a été déterminé par une méthode d'addition d'amplitude. Les résultats montrent une bonne concordance entre les simulations et les dommages réels. Les signaux reçus ont été analysés d'un point de vue énergétique, et deux méthodes de surveillance par ondes de Lamb unimodales ont été comparées. Il a également été démontré qu'une excitation symétrique simplifie les ondes reçues et permet de détecter les fissures dans les structures en acier soudées, validant ainsi l'approche expérimentale.

Autres alternatives aux méthodes dites directes, des méthodes inverses consistent à utiliser les réponses vibratoires pour remonter aux efforts qui agissent sur les structures ainsi que des dommages structurels. Certaines méthodes ont pour principe d'ajuster un modèle numérique pour retrouver les paramètres de la structure endommagée (raideur, masse, etc.) à partir des réponses mesurées via un modèle numérique ou probabiliste. Nastac et al. [19] abordent les aspects théoriques et expérimentaux liés à la détection précoce des dommages des éléments d'isolation passive des vibrations en caoutchouc viscoélastique. L'étude met en évidence l'évolution des caractéristiques de ces éléments sous charges dynamiques, notamment les changements de rigidité et d'amortissement dus à la dissipation d'énergie interne et à l'échauffement. La méthode est basée sur l'analyse des changements de fréquences naturelles et des caractéristiques de transfert dynamique où les tests expérimentaux ont montré que la température interne peut atteindre 95°C, en régime stabilisé, entraînant une dégradation accélérée. Des simulations numériques ont été développées pour des configurations simples de dispositifs d'isolation ont permis d'analyser l'impact de ces dégradations sur le comportement global, facilitant ainsi la détection et la surveillance non destructive des dommages durant la durée de vie des systèmes. Xu et al. [20] présentent une nouvelle méthode d'identification inverse développée pour détecter les dommages structurels en analysant les perturbations locales des caractéristiques d'équilibre d'une structure. Les auteurs montrent que les dérivées spatiales d'ordre élevé sont particulièrement sensibles aux dommages et ne nécessitent ni structures de référence, ni signaux de base, ni modèles globaux, ni sources d'excitation supplémentaires, tant que la structure vibre de manière stable en conditions normales. La méthode est indépendante des conditions aux limites et intègre des techniques de réduction du bruit de mesure pour améliorer la précision de l'identification. Testée sur une

poutre simple, la méthode a permis d'explorer les relations entre fréquence de vibration, densité des points de mesure et taille des dommages détectables, facilitant ainsi le choix des paramètres de mesure. Validée numériquement et expérimentalement avec un vibromètre laser, cette méthodologie est applicable à des systèmes complexes, à condition que les équations de mouvement soient connues à l'avance. L'article d'Ablitzer et al. [21] propose une méthode inverse pour identifier les propriétés de rigidité et d'amortissement des plaques vibrantes, en se basant sur une équation locale du mouvement, supposée a priori, qui établit une relation relativement directe entre le champ de déplacements et les propriétés du matériau. Les dérivées spatiales du déplacement dans l'équation sont calculées à l'aide de la méthode des différences finies. Comme cette opération amplifie le bruit de mesure, un ajustement automatiquement du niveau de régularisation est appliquée avant de résoudre le problème inverse. Wang et al. [22] proposent une méthode innovante de mesure de dommage structurel basée sur un cadre d'analyse de fiabilité non probabiliste. Un cadre d'analyse non probabiliste par intervalles est développé pour quantifier l'intervalle des paramètres de rigidité des éléments structurels. Selon l'intersection d'intervalles des paramètres de rigidité des éléments dans les états non endommagés et endommagés, la possibilité d'existence de dommages est définie sur la base de la théorie de la fiabilité. Un indice de mesure des dommages est proposé comme le produit de la réduction nominale de la rigidité et de la possibilité d'existence de dommages définie. Ce nouvel indice reflète simultanément la sévérité des dommages et la possibilité de dommages pour chaque composant structurel. Les résultats montrent que la méthode proposée peut améliorer la précision du diagnostic des dommages par rapport à la méthode d'identification des dommages déterministe. L'étude de Eraky et al. [23] se concentre sur la détection des dommages locaux dans les structures, en utilisant la méthode de l'indice de dommage en comparant les énergies de déformation modales des structures à différents stades de dégradation. La méthode a été testée et validée expérimentalement sur des structures en acier, incluant une poutre et une plaque, soumises à diverses configurations d'endommagement. Les données d'accélération collectées ont été analysées pour vérifier l'efficacité de la DIM. Les résultats expérimentaux et numériques montrent une bonne concordance, confirmant l'efficacité de la DIM pour identifier les dommages dans les structures. Luo et al. [24] ont présenté une nouvelle méthode de détection de dommages dans les structures en cadres de cisaillement soumis à des excitations stochastiques non stationnaires. La méthode repose sur l'utilisation des matrices de

transmissibilité spectrale en ondelettes, une caractéristique innovante appelée fonction de transmissibilité spectrale en ondelettes. Cette fonction permet de caractériser le comportement dynamique de la structure près des fréquences naturelles. La détection des dommages est effectuée en appliquant une décomposition en valeurs singulières (SVD) sur ces matrices pour identifier les fréquences naturelles, puis en utilisant une nouvelle indicatrice de dommage basée sur ces fonctions de transmissibilité et la méthode des moindres carrés linéaires contraints. La validité de cette approche a été confirmée par des simulations numériques et des expériences en laboratoire, montrant qu'elle est efficace même en présence de chargements environnementaux non stationnaires. L'étude de Xu et al. [25] présente une méthode de détection de dommages appelée Déflexion Vibratoire Virtuelle (VVD), reposant sur une approche innovante basée sur la formulation "faible" de la pseudo-excitation (PE). La méthode VVD repose sur la division de la structure en sous-régions, chacune traitée comme une structure "virtuelle" vibrant indépendamment. La déflexion vibratoire de ces sous-régions est utilisée pour calculer un indice de dommage, offrant une approche localisée et précise. La VVD présente une meilleure immunité au bruit et une plus grande précision grâce à l'utilisation combinée de multiples types de signatures vibratoires, comme les déplacements et les courbures. La validation numérique sur une poutre en porte-à-faux avec un dommage simulé a démontré la robustesse de la méthode face au bruit de mesure, tout en soulignant l'importance d'une densité de mesure suffisante (au moins 15 points par sous-région). Une expérimentation sur une poutre en aluminium comportant plusieurs défauts a confirmé l'efficacité de la VVD, permettant une localisation précise des dommages malgré des niveaux de bruit élevés. Le travail de Djamaa et Ouelaa [26] présente une méthode de diagnostic des dommages à travers l'identification des caractéristiques mécaniques d'une coque cylindrique par une méthode inverse. La distribution spatiale du dommage est déterminée en calculant un indice de dommage qui intègre les déplacements dans le modèle dynamique de la structure, permettant de localiser précisément le défaut séparant les deux zones saines. Ce défaut a également été identifié via le calcul du rapport D , sensible aux variations significatives des propriétés mécaniques, et qui perd sa linéarité dès l'apparition du défaut. Le filtrage de la distribution spatiale de l'indice de dommage dans le domaine des nombres d'onde a permis d'atténuer l'effet du bruit et d'obtenir des résultats satisfaisants. Dans le travail de Zenzen et al. [27], une technique de diagnostic des dommages dans des structures en poutre ou en treillis est proposée, utilisant la fonction de réponse en fréquence (FRF) couplée à des algorithmes

d'optimisation pour estimer la localisation et la gravité des dommages. Les dommages dans les structures sont simulés par une réduction de la rigidité de membres spécifiques. L'approche, reposant sur la minimisation d'une fonction objectif en comparant les FRF mesurées et calculées par la Méthode des Eléments Finis (FEM), fournit des solutions plus rapides que d'autres méthodes existantes dans la littérature. Dahak et al. [28] proposent une technique pour identifier l'emplacement et la profondeur des dommages dans une poutre en utilisant une méthode de contour de fréquence. Une ligne de contour est tracée en utilisant uniquement la valeur des changements dans les fréquences naturelles mesurées et les vecteurs des formes modales de courbure de la structure intacte, qui peuvent être calculés numériquement ou dérivés des formes modales mesurées. Une simulation numérique et un essai expérimental sur une poutre en porte-à-faux ont été conçus, et les résultats confirment l'applicabilité efficace de la méthode développée. Smith et Hernandez [29] présentent une approche pour détecter des dommages spatialement épars à l'aide de la sensibilité de la réponse impulsionnelle, combinée à la régularisation LASSO. L'expression analytique de la sensibilité de la réponse impulsionnelle a été dérivée en utilisant le calcul de Vetter. L'algorithme proposé exploite le fait que lorsque les dommages sont localisés, une régularisation de type (norme l_1) est plus adaptée que la minimisation classique des moindres carrés (norme l_2). La méthodologie proposée est appliquée avec succès dans le contexte d'une poutre de cisaillement non uniforme simulée à 21 degrés de liberté et les résultats numériques démontrent la capacité de la méthode à détecter des réductions de rigidité aussi faibles que 1%, même en présence de bruit de mesure et avec un nombre limité de capteurs. Une nouvelle méthode présentée par Li et al. [30], basée sur l'analyse des signaux de vibration pour la détection des dommages locaux dans les structures poutres. Un algorithme basé sur le filtre de Kalman non parfumée (UKF) est développé et évitant ainsi le calcul complexe des matrices Jacobiennes requis par le filtre de Kalman étendu (EKF). La méthode utilise des variables d'état augmentées intégrant déplacement, vitesse, rigidité et coefficients d'amortissement résolues par transformation non parfumée. Les résultats expérimentaux obtenus sur une structure cadre à quatre étages composés de colonnes en aluminium et de plaques en plexiglas démontrent que l'algorithme permet d'identifier les dommages avec précision même en présence de bruit. Une méthode d'identification des dommages de Li et al. [31] est basée sur la méthode des éléments finis inverses (iFEM). L'indice de dommage est établi uniquement à partir des données modales de déformation après endommagement pour localiser les dommages. Afin de vérifier davantage

l'efficacité de l'iFEM, la méthode proposée est démontrée numériquement sur une plaque en porte-à-faux soumise à des conditions de dommage unique et de dommages multiples. Les résultats montrent que l'iFEM peut reconstruire avec précision la déformation, et que l'indice de dommage direct, basé sur l'iFEM permet de réaliser la détection des dommages et offre une nouvelle approche de recherche pour la SHM. Li et al. [32] ont proposé une nouvelle méthode pour l'identification des dommages structurels basée sur la méthode des éléments finis inverses et de l'approche pseudo-excitation. La méthode iFEM-PE est étendue pour mieux s'adapter à l'état opérationnel de la structure, où plusieurs groupes de réponses vibratoires dans une large bande de fréquence sont utilisés. Une fusion hybride des données est appliquée pour traiter l'indice de dommage (DI) construit à partir des réponses multiples, conduisant à des résultats de détection capables d'indiquer avec précision les positions de délaminage. L'étude de Xu et al. [33] propose une nouvelle approche pour identifier les dommages structurels en utilisant un nombre limité de mesures modales et une régression bayésienne ultra-éparse. Une technique itérative basée sur l'énergie de déformation modale croisée (CMSE) est introduite pour établir un modèle de régression linéaire, augmentant ainsi le nombre de modes disponibles et atténuant les problèmes liés à un ordre modal insuffisant. L'estimateur bayésien avancé Horseshoe (HS) est utilisé pour fournir une régularisation ultra-éparse, offrant des solutions plus efficaces que le lasso bayésien (BL). Les avantages incluent une mise en œuvre simple, une convergence rapide, une stabilité élevée et une capacité à gérer des problèmes inverses mal posés. La méthode est validée par des simulations et des tests expérimentaux, démontrant son efficacité malgré le bruit de mesure et les données limitées. La méthode d'identification des dommages proposée par Li et al. [34] utilise la méthode inverse élément fini (iFEM), basée sur les différences de modes de déformation, associée à un réseau de neurones convolutifs (CNN). Les données globales de déformation peuvent être obtenues à partir d'un nombre limité de points de mesure pour identifier et localiser les dommages. L'application d'un réseau de neurones convolutifs (CNN) entraîné avec des données d'entrée bruitées aléatoirement pour l'estimation des dommages structurels offre une grande précision dans différentes conditions d'endommagement.

Dans le domaine d'utilisation des hautes fréquences, l'article de Pai et al. [35] examine la détection de défauts dans des plaques circulaires en acier ou en aluminium à l'aide d'un vibromètre laser à balayage. Les résultats montrent que des formes de déflexion

opérationnelles (ODS) à haute fréquence sont nécessaires pour localiser de petits défauts. La détection de deux défauts est expérimentalement étudiée en utilisant les distributions de vitesses RMS sous excitations chirp, les ODS, la rupture de symétrie des ODS, la division des fréquences naturelles, et une méthode de détection des effets de bord (BED) Les résultats confirment que ces approches permettent de localiser avec précision de petits défauts dans les plaques circulaires. Su et Ye [36] présentent une méthode de détection et d'identification des dommages dans les composites carbone-époxy (CF-EP) quasi-isotropes en utilisant les ondes de Lamb et un réseau de neurones artificiels. Diverses simulations dynamiques tridimensionnelles par éléments finis (FEM) correspondantes ont été réalisées et des modèles couplés pour l'actionneur piézoélectrique (PZT) et le capteur avec les stratifiés composites ont été établis pour décrire une onde de Lamb. Un module de traitement du signal basé sur la transformée en ondelettes a été conçu pour purifier les signaux d'onde acquis et extraire des caractéristiques à partir des spectres d'énergie des ondes de Lamb dans le domaine temps-échelle. Le concept « d'empreintes numériques de dommage » a été introduit, permettant de construire une base de données de paramètres de dommage (DPD) utilisée pour l'entraînement hors ligne d'un réseau de neurones, supervisé par un algorithme neuronal à rétropropagation d'erreur (BP). La méthode vise à fournir une identification précise et en temps réel des dommages, améliorant ainsi la surveillance structurale des composites dans des applications aéronautiques. Le travail de Migot et al. [37] présente une approche combinée pour l'évaluation de la gravité des dommages structuraux à l'aide des ondes Lamb, comprenant des simulations numériques et des expérimentations. Les auteurs ont employé une méthode de simulation hybride, combinant un modèle global analytique et une modélisation locale par éléments finis, afin de prédire efficacement l'interaction des ondes avec des fissures. Un réseau de capteurs piézoélectriques (PWAS) a été utilisé sur des plaques en aluminium, dans les modes pitch-catch et pulse-echo, pour capturer les ondes de Lamb. L'étude met en évidence un fort effet directionnel, influençant la qualité des signaux diffusés et donc la performance des méthodes d'imagerie. Les deux approches se sont montrées capables de localiser et de caractériser les fissures, bien que la première tende à sous-estimer la taille des défauts tandis que la seconde a parfois tendance à la surestimer. Pour les petits défauts circulaires (1 à 3 mm), la localisation est restée précise, mais la quantification de la taille s'est révélée plus difficile. Sedaghati et al. [38] présentent une nouvelle méthode utilisant les ondes de Lamb pour détecter, localiser et dimensionner les défauts circulaires, tels que la corrosion, dans des

plaques métalliques minces. Ces ondes ultrasonores guidées sont générées de manière omnidirectionnelle grâce à une sonde spéciale en forme de frustum, permettant une émission multidirectionnelle des ondes en plaçant la sonde au moins en trois points différents autour du défaut. Un algorithme estime ensuite la position et la taille du défaut à partir de la mesure des temps d'arrivée des échos réfléchis. Les résultats expérimentaux et numériques par éléments finis montrent une grande précision. L'article de Despres et al. [39] présente une approche exploitant la sensibilité des ondes de Lamb pour caractériser les modules viscoélastiques et l'épaisseur de plaques. Les fonctions de sensibilité analytiques sont d'abord dérivées dans le cas d'une plaque isotrope, puis intégrées dans un problème inverse itératif afin d'optimiser les modules viscoélastiques et l'épaisseur à l'aide d'une méthode de recherche de zéro (algorithme de Gauss-Newton pour un problème multivariable). Cette méthode est validée numériquement pour une plaque viscoélastique et montre une grande précision ainsi qu'un faible coût de calcul par rapport aux méthodes existantes. Une validation expérimentale démontre la capacité de l'algorithme à évaluer simultanément les modules viscoélastiques et l'épaisseur de structures isotropes en forme de plaque. L'étude de Ege et al. [40] présente une méthode innovante de détection de dommages dans des structures plates, basée sur l'estimation large bande du nombre d'ondes local. Une mesure sans contact du champ de vitesse d'une plaque en aluminium est réalisée par vibromètre laser à balayage, à partir de laquelle la rigidité équivalente est estimée localement dans une large bande de fréquences dans le domaine ultrasonore. La méthode permet de visualiser des défauts de réduction d'épaisseur sur la face cachée d'une plaque en aluminium jusqu'à plusieurs centaines de kHz. La première partie détaille le protocole expérimental, suivie d'une seconde partie mettant en avant l'identification des nombres d'onde des modes symétriques S_0 et antisymétriques A_0 . La comparaison avec les courbes de dispersion théoriques des ondes de Lamb révèle la précision de la méthode. La méthodologie valide la possibilité d'estimer avec précision l'épaisseur locale du matériau et, par conséquent, la localisation, la taille et la profondeur d'un défaut de référence en forme de trou à fond plat. L'étude de Djamaa [41] présente une approche combinant excitation ultrasonore et des mesures par vibromètre laser pour la détection des dommages dans une plaque circulaire. La méthode repose sur l'analyse des modifications du comportement dynamique induites par des défauts localisés. Bien que les résultats soient préliminaires mais la topologie des vitesses mesurées montre la possibilité de détection directe du défaut dans sa position exacte. Zima et Moll [42] ont mené des études théoriques, expérimentales et

numériques pour identifier les dommages causés par la corrosion, en s'appuyant sur la symétrie du champ d'ondes propagées, mesurées à l'aide d'un réseau circulaire de transducteurs piézoélectriques. Des plaques corrodées avec différents niveaux de dégradation sont modélisées à l'aide d'une approche par champs aléatoires à une bande de fréquence d'excitation allant de 50 à 150 kHz. Chaque scénario compare les niveaux de symétrie des fronts d'onde estimés à l'aide de degrés de symétrie rotationnelle et bilatérale comme paramètres indicateurs. Les résultats montrent l'efficacité de l'approche d'analyse du champ d'ondes pour évaluer l'intégrité structurelle, comme en témoigne la concordance entre les prévisions numériques et les observations expérimentales.

I.4. Position du problème

Les défauts effectifs dans les structures proviennent, en général, de la fabrication ou lors de fonctionnement dans un domaine spécifique. La présence des fissures, des porosités et le délaminage pourraient endommager la structure au cours de sollicitations de travail. La découverte précoce de la présence d'un tel défaut peut garantir la sécurité et la fiabilité des structures avant l'apparition d'une défaillance. De nombreuses méthodes développées s'appuient sur l'analyse des vibrations pour traiter les problèmes de détectabilité de dommages sur les structures dans la bande des fréquences normales en se basant sur des approches inverses. Le problème réside dans les erreurs de mesure qui perturbent toute tentative de localisation et nécessitent des méthodes de traitement de signal puissantes pour le débruitage des résultats. Dans le domaine hautes fréquences, l'utilisation des excitateurs piézoélectriques peuvent générer autres types d'ondes tels que les ondes de Lamb qui sont très sensibles à toute variation de l'épaisseur de la structure et qui peuvent aider à la détection des défauts de structures directement à partir de la réponse vibratoire. Dans ce travail, on va essayer d'appliquer cette approche en faisant des simulations numériques dans l'objectif de détecter et de localiser un défaut structural créé volontairement sur une plaque en Aluminium.

CHAPITRE II
FORMULATION
MATHÉMATIQUE

II.1. Introduction

Les plaques d'aluminium sont partout, dans plein de machines et structures en raison de leur légèreté, de résistance à la corrosion et de bonne conductivité thermique. Elles sont couramment employées dans divers domaines comme l'aéronautique, l'automobile, les équipements industriels. Durant le cycle de vie des plaques, elles peuvent être soumises à des contraintes mécaniques et thermiques et des attaques chimiques favorisant leur dégradation, ce qui va diminuer l'efficacité du système complet. A partir de la connaissance du comportement vibratoire des plaques, on peut intervenir pour contrôler l'état de santé de ces structures par différentes techniques de diagnostic.

Ce chapitre représente la formulation du problème en suggérant l'application fondée sur l'équation de mouvement de la plaque dans des conditions aux limites exigées. La possession de la réponse vibratoire en termes de déplacements, vitesses ou accélérations est la clé de la détermination des efforts inconnus, appliqués sur la structure ainsi que le diagnostic concernant la présence de dommages peut également être déterminé sur une partie de la plaque supposé contenant un défaut structurel.

II.2. Formulation mathématique du problème

Le comportement dynamique d'une plaque avec et sans défaut structurel diffère principalement en termes de fréquences propres, formes modales et amortissement. La présence d'un défaut (comme un trou ou une fissure) modifie la rigidité locale, ce qui entraîne des changements notables dans l'analyse modale. La méthode proposée basée sur une plaque mince sans défauts.

L'équation différentielle de vibration libre d'une plaque mince homogène sur appuis, en coordonnées cartésiennes, est donnée par l'équation de Kirchhoff-Love :

$$D\nabla^4 w(x, y, t) + \rho h \frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial t^2} = F(x, y, t) \quad (\text{II.1})$$

avec:

- $w(x, y, t)$ est le déplacement transversal de la plaque,
- $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ est la rigidité en flexion de la plaque,
- ρ est la masse volumique du matériau,

- h est l'épaisseur de la plaque,
- E est le module d'élasticité,
- ν est le coefficient de Poisson,
- ∇^4 est l'opérateur biharmonique défini par : $\nabla^4 w = \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4}$

La solution générale de l'équation différentielle peut être développée en série de fonction en série connue. Donc, le déplacement transversal $w(x, y, t)$ d'une plaque rectangulaire peut être développé en série de Fourier en considérant des conditions aux limites appropriées. Les fréquences propres sont sous la forme :

$$\omega_{mn} = \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \left(\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \right) \quad (\text{II.2})$$

La solution complète est sous la forme :

$$w(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) (A_{mn} \cos(\omega_{mn} t) + B_{mn} \sin(\omega_{mn} t)) \quad (\text{II.3})$$

En remplaçant la solution complète du déplacement transversal dans l'équation différentielle (II.1), on obtient une relation qui relie les fréquences naturelles ω_{mn} aux propriétés physiques de la plaque (rigidité D , masse volumique ρ , épaisseur h) et aux nombres d'onde m et n . On arrive à l'équation en fréquence suivant :

$$D \nabla^4 w(x, y) - \rho h \omega^2 w(x, y) = F(x, y) \quad (\text{II.4})$$

Quand on cherche à localiser un effort excitateur agissant sur la plaque, on peut appliquer une méthode inverse basée sur la discrétisation des dérivées d'ordre 4 par un schéma aux différences finies en termes de déplacements. Ces déplacements peuvent être obtenus par la mesure (ou calculés par simulation numérique) puis sont introduits dans l'équation (II.5).

$$F(x, y) = D \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) w(x, y) - \rho h \omega^2 w(x, y) \quad (\text{II.5})$$

Dans le cas où on s'intéresse à la recherche d'un défaut structural représentant un dommage dans la structure, on procède à l'excitation de la structure par un effort à un endroit connu à fréquence déterminée, choisie hors résonance pour minimiser l'effet de

l'amortissement et on mesure les déplacements résultants en dehors de la zone où la force est appliquée (Figure II.1).

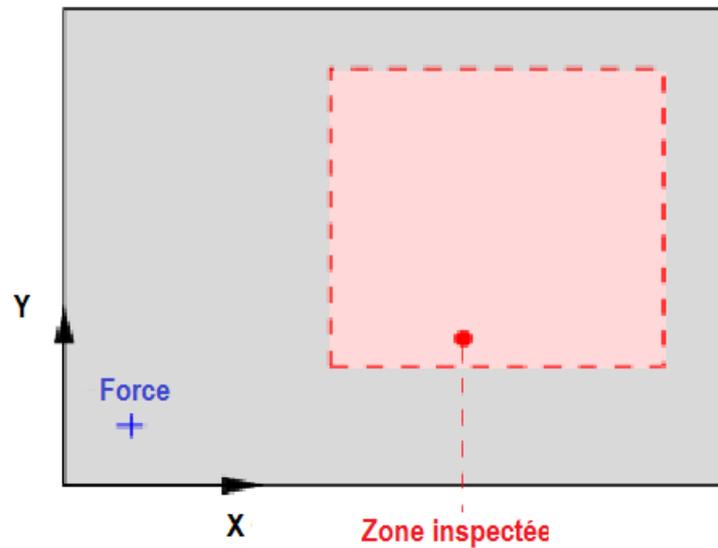


Figure II.1. Identification d'un défaut structural sur plaque rectangulaire.

Dans le cas où l'indice de dommage (ID) est nul, cela signifie que la zone inspectée n'est pas endommagée.

$$ID = D \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) - \rho h \omega^2 w(x, y) = 0 \quad (II.6)$$

En revanche, quand une zone est endommagée, l'indice de dommage devient significatif ou différent de zéro. Si le défaut structural se manifeste par une diminution de la rigidité et de la densité de la plaque, on peut reformuler l'indice de dommage comme suit :

$$ID = D \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) - \rho h \omega^2 w(x, y) \neq 0 \quad (II.7)$$

Le déplacement transversal $w(x, y)$ est influencé par la variation de module de Young complexe E , de la densité ρ , du moment d'inertie I et l'épaisseur de la plaque h .

Une autre méthode proposée par Djamaa et Ouelaa [26], basée sur le calcul de la rigidité en flexion de la plaque, représentée la pente D à partir de l'équation (II.6). En principe cette pente est linéaire dans le cas où la zone inspectée ne présente pas de défaut structural du fait que la pente D est sensible à toute variation des caractéristiques mécaniques et de l'épaisseur.

Si la zone inspectée présente un défaut tel que la perte d'épaisseur par corrosion, cette pente perd sa linéarité à l'endroit où le défaut est détecté.

$$D = \frac{\rho h \omega^2 w(x,y)}{\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right)} \quad (\text{II.8})$$

II.3. Application de la méthode différences finies

Pour passer d'un problème physique continu à une approximation discrète, plusieurs méthodes numériques sont disponibles, chacune reposant sur des principes distincts : les différences finies et les éléments finies. Ces méthodes diffèrent par leur manière de reformuler les équations fondamentales de la physique.

- ▶ Conservation des flux locaux pour les volumes finis.
- ▶ Décomposition en fonctions de base globales pour les méthodes spectrales.

La méthode des différences finies est appliquée, ce qui consiste à remplacer les dérivées par des déplacements des points de maillage [41]. La mise en œuvre de cette méthode est simple et présente un faible coût computationnel, mais elle est limitée à certaines formes régulières, ce qui rend difficile la prise en compte des conditions aux limites. Dans le cas unidimensionnel, on discrétise l'intervalle continu $[a, b]$ en un nombre fini de points (x_i) avec un pas régulier (Δ) .

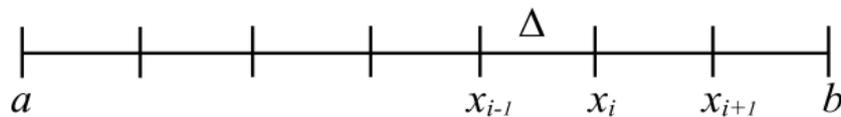


Figure II.2. Discrétisation en différences finies pour un segment linéaire.

$$\begin{cases} -w''(x) = f(x), & a < x < b \\ w(a) = \alpha, & w(b) = \beta \end{cases}$$

On remplace ainsi le problème continu par des valeurs approchées w_i de la solution exacte $w(x_i)$ aux points x_i .

Le schéma aux différences finies centrées d'ordre 1 est donné par :

$$w'(x_i) \approx \frac{w_{i+1} - w_{i-1}}{2\Delta}$$

Avec Δ le pas de discrétisation.

La discrétisation centrée classique de la dérivée seconde peut avoir la forme suivante :

$$w''(x_i) \approx \frac{w_{i+1} - 2w_i + w_{i-1}}{\Delta^2}$$

Pour la dérivée troisième, la forme est la suivante :

$$w'''(x_i) \approx \frac{w_{i+2} - 3w_{i+1} + 3w_{i-1} - w_{i-2}}{2\Delta^3}$$

La discrétisation centrée classique d'ordre deux de la dérivée quatrième est :

$$w''''(x_i) \approx \frac{w_{i+2} - 4w_{i+1} + 6w_i - 4w_{i-1} + w_{i-2}}{\Delta^4}$$

On peut observer que les approximations sont toutes en fonction des déplacements. Si nous sommes dans le cas unidimensionnel, le schéma nécessite la connaissance des déplacements en cinq points répartis deux à deux autour du point central. Dans le cas bidimensionnel, le schéma exige la connaissance de douze points autour du point central (**Figure II.3**).

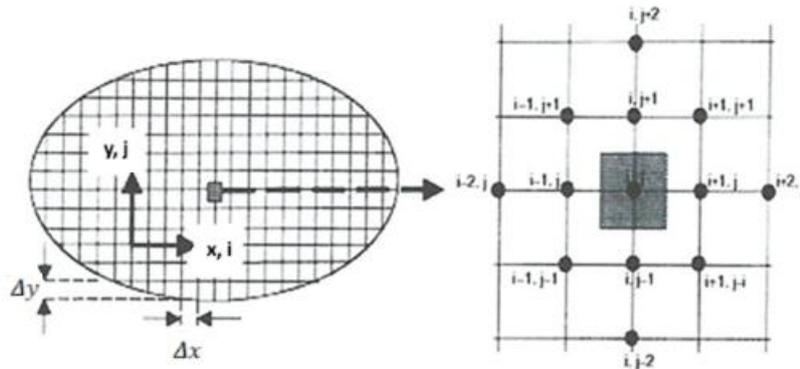


Figure II.3. Schéma aux différences finies centré dans le cas bidimensionnel.

Les dérivées spatiales d'ordre 4 peuvent être exprimées en termes de déplacements par le schéma aux différences finies comme suit :

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \approx \frac{w_{i+2,j} - 4w_{i+1,j} + 6w_{i,j} - 4w_{i-1,j} + w_{i-2,j}}{(\Delta x)^4}$$

$$\frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \approx \frac{w_{i,j+2} - 4w_{i,j+1} + 6w_{i,j} - 4w_{i,j-1} + w_{i,j-2}}{(\Delta y)^4} \tag{II.9}$$

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} \approx \frac{1}{(\Delta x)^2 (\Delta y)^2} (w_{i+1,j+1} - 2w_{i+1,j} + w_{i+1,j-1} - 2w_{i,j+1} + 4w_{i,j} - 2w_{i,j-1} + w_{i-1,j+1} - 2w_{i-1,j} + w_{i-1,j-1})$$

Δx et Δy , représentent la distance entre deux points consécutifs, respectivement le long de la direction X et Y.

Après remplacements des dérivées discrétisées (II.9) dans les équations (II.5), (II.6), (II.8), on peut localiser l'effort excitateur, les dommages s'ils existent à partir de l'introduction des déplacements transverses mesurées (calculés).

II.4. Diagnostic à hautes fréquences

Dans le domaine du diagnostic des défauts à travers la mesure des vibrations, il est courant de distinguer deux grandes plages fréquentielles : la première correspond aux basses fréquences, généralement inférieures à 1 kHz, utilisées pour l'étude des comportements dynamiques globaux des structures, et la seconde concerne les hautes fréquences, au-delà de 1 kHz et pouvant atteindre plusieurs mégahertz, où apparaissent des ondes mécaniques guidées telles que les ondes de Lamb ou les ondes de Rayleigh, particulièrement sensibles aux variations locales de rigidité ou d'épaisseur.

Dans un travail récent, Ege et al. [40] propose une méthode pour l'extraction des nombres d'onde selon deux méthodologies d'extraction : par maximisation standard de la FFT 2D k_{\max} et par ajustement circulaire de la carte k_{circfit} pour les modes A_0 et S_0 .

Pour une plaque isotrope, le nombre d'ondes $k(\omega)$ des ondes de Lamb est déterminé à partir de l'équation de dispersion suivante :

$$(k^2 - q^2) \tan\left(q \frac{h}{2} + \alpha\right) + 4pqk^2 \tan\left(p \frac{h}{2} + \alpha\right) = 0 \quad (\text{II.10})$$

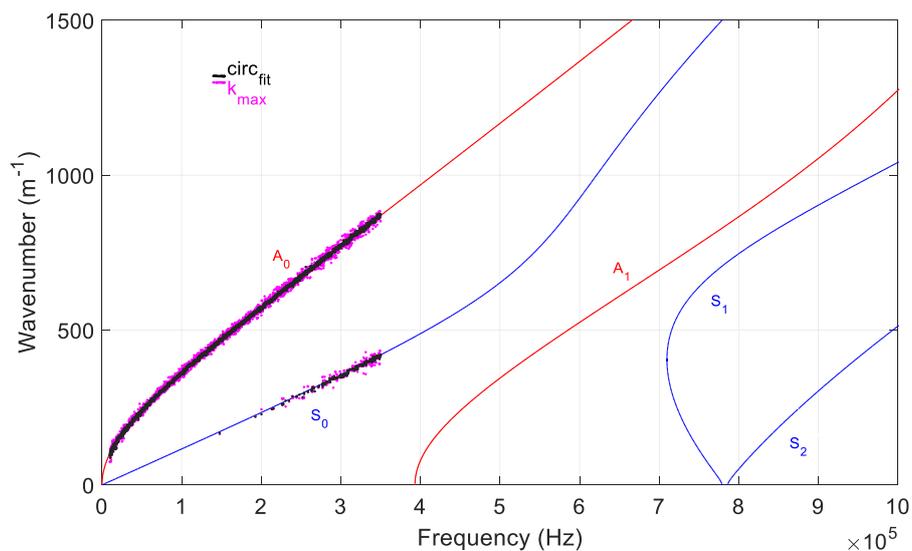
où

$$p = \sqrt{k_L^2 - k^2}, \quad q = \sqrt{k_S^2 - k^2}, \quad k_L = \frac{\omega}{c_L}, \quad k_S = \frac{\omega}{c_S}, \quad \omega = 2\pi f \text{ est la pulsation angulaire,}$$

et $c_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$ et $c_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}$, représentent respectivement les vitesses de propagation des ondes de volume longitudinales et des ondes de cisaillement. Lorsque le

paramètre α est fixé à 0, l'équation (II.10) correspond aux modes symétriques, tandis que lorsque α est fixé à $\pi/2$, elle correspond aux modes antisymétriques. La résolution de l'équation de dispersion est possible analytiquement uniquement dans des domaines asymptotiques, lorsque la pulsation ω tend vers zéro ou vers l'infini. De manière générale, ces équations sont résolues numériquement afin de tracer l'évolution du nombre d'onde k en fonction de la pulsation angulaire ω .

Les résultats du modèle théorique des modes guidés de propagation (ondes de Lamb) dans une plaque d'aluminium d'épaisseur $h = 4$ mm, avec un module d'Young $E = 71$ GPa, un coefficient de Poisson $\nu = 0,329$ et une masse volumique $\rho = 2700$ kg.m⁻³ sont comparés avec les extractions expérimentales. Les prédictions théoriques et expérimentales correspondent particulièrement bien sur l'ensemble de la bande de fréquence pour les modes A_0 et S_0 , démontrant la précision de l'approche choisie dans ce travail (figure 25).



Figures II.4. Nombres d'onde expérimentaux k_{\max} k_{circfit} , et modes théoriques des ondes de Lamb.

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la formulation mathématique pour la détection des défauts dans les structures, basée sur une approche inverse en se servant des déplacements calculés (mesurés) afin de reconstruire les efforts appliqués ou de localiser des défauts structuraux dans le domaine de basses fréquences. A l'opposé, des excitations peuvent

être réalisées à hautes fréquences par des excitateurs piézoélectriques permettant la génération des ondes de Lamb très sensibles à toute variation de l'épaisseur d'une structure.

CHAPITRE III
SIMULATIONS
NUMÉRIQUES

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats des calculs suite à la formulation mathématique précédente et différentes simulations numériques en se servant des logiciels existants tels que SolidWorks et ANSYS. Deux types de plaques de forme carrées en alliage d'aluminium ont été considérées dont l'une est saine et l'autre présentant un défaut structural. L'objectif est de chercher à identifier le défaut et de le localiser sur la plaque.

III.2. Données du problème

Voici les dimensions caractéristiques de la plaque :

- ▶ Largeur (a) : 500 mm ;
- ▶ Longueur (b) : 500 mm ;
- ▶ Épaisseur (h) : 10 mm.

Les caractéristiques mécaniques de plaque en Aluminium sont :

- ▶ Le module d'élasticité (E) = 7.2×10^{10} MPa ;
- ▶ Le coefficient de Poisson (ν) = 0.33 ;
- ▶ La masse volumique du matériau (ρ) = 2810 Kg/m^3 .

III.3. Résultats des calculs par la formulation mathématique

Le calcul des déplacements de la plaque est réalisé par la méthode modale où la plaque est maillée en 51×51 nœuds à raison de 10 mm de pas. La plaque est excitée par un effort ponctuel de 1 kN à la position $x=0.3$ mm et $y=0.2$ mm. Pour simuler le défaut, positionné entre $x=0.3-0.35$ mm et $y=0.3-0.35$ mm, nous avons imposé des valeurs des déplacements de l'ordre de 10^{-7} mm dans la zone représentant le défaut

III.3.1 Résultats de calcul à 1 kHz

La plaque, maillée en 51×51 nœuds à raison de 10 mm de pas, est excitée par un effort ponctuel de 1 kN à la position $x=0.3$ mm et $y=0.2$ mm. Les déplacements calculés sont présentés par la **Figure III.1**. Il est clair que distribution des déplacements à cette fréquence ne donne lieu à aucune localisation de l'effort appliquée. La réponse globale masque toute information sur l'endroit de l'application de l'effort. Dans ce cas, il est nécessaire d'appliquer la méthode inverse pour chercher à localiser le point d'application de l'effort. La **Figure III.2** Il montre

clairement que distribution spatiale de l'efforts permet la localisation de l'effort à l'endroit exact de l'excitation.

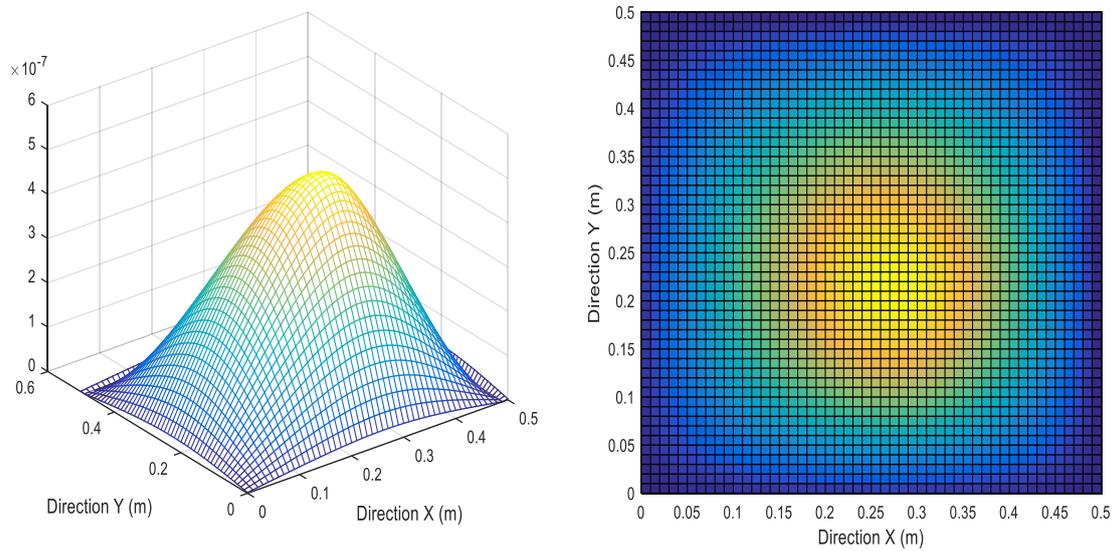


Figure III.1. Distribution des déplacements à 1 kHz.

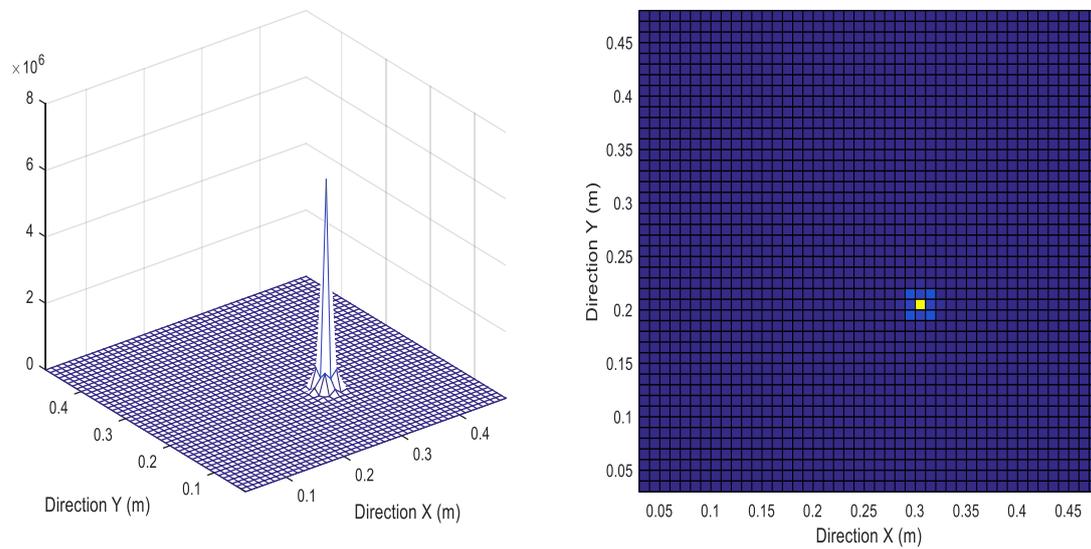


Figure III.2. Distribution de l'effort à 1 kHz.

Pour simuler le défaut, positionné entre $x=0.3-0.35$ mm et $y=0.3-0.35$ mm, nous avons imposé des valeurs de déplacement de l'ordre de 10^{-7} mm pour représenter le défaut.

Le calcul de la pente D permet de tracer ce rapport dans le cas de la plaque saine (**Figure III.3**) et de la plaque endommagée (**Figure III.4**). On peut constater que la pente D est linéaire dans le cas de la plaque saine mais en présence d'un dommage, ce rapport perd sa linéarité dès qu'il arrive à une zone avec défaut structural. Cela signifie qu'il est possible de détecter un défaut à partir des déplacements calculés ou mesurés.

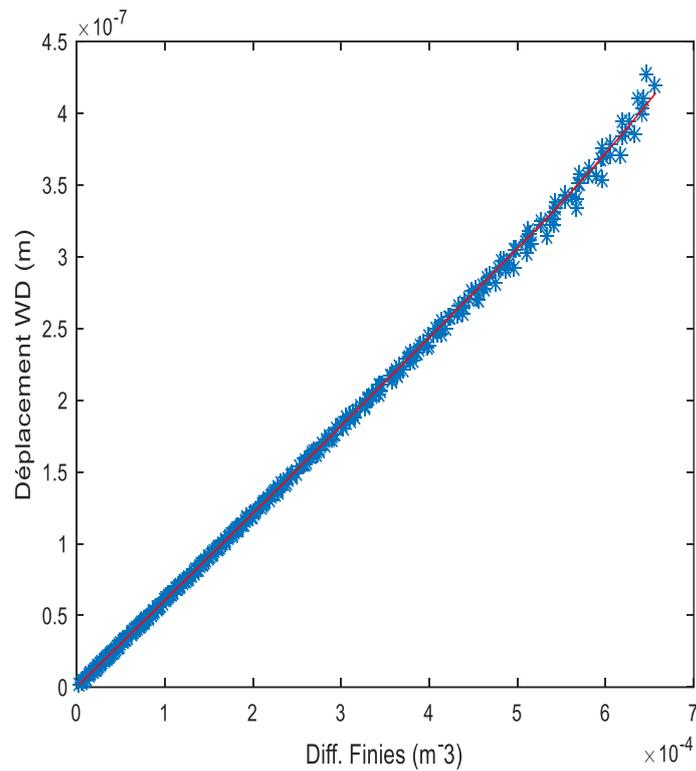


Figure III.3. Rapport D de la plaque saine. Excitation à 1 kHz.

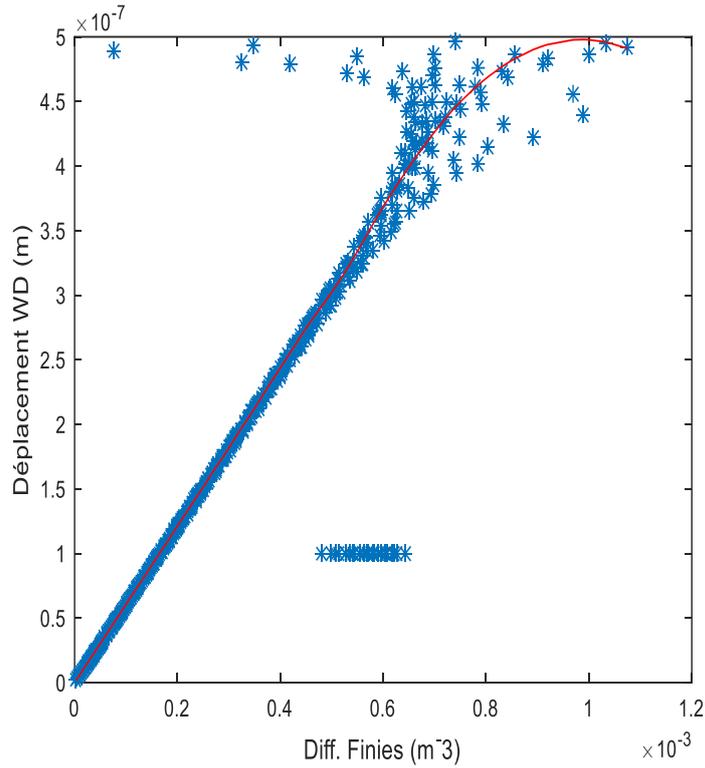


Figure III.4. Rapport D de la plaque endommagée. Excitation à 1 kHz.

Afin de localiser exactement le défaut, on a procédé au calcul de l'indice de dommage dans la zone endommagée. La (Figure II.5) montre clairement la position exacte du défaut.

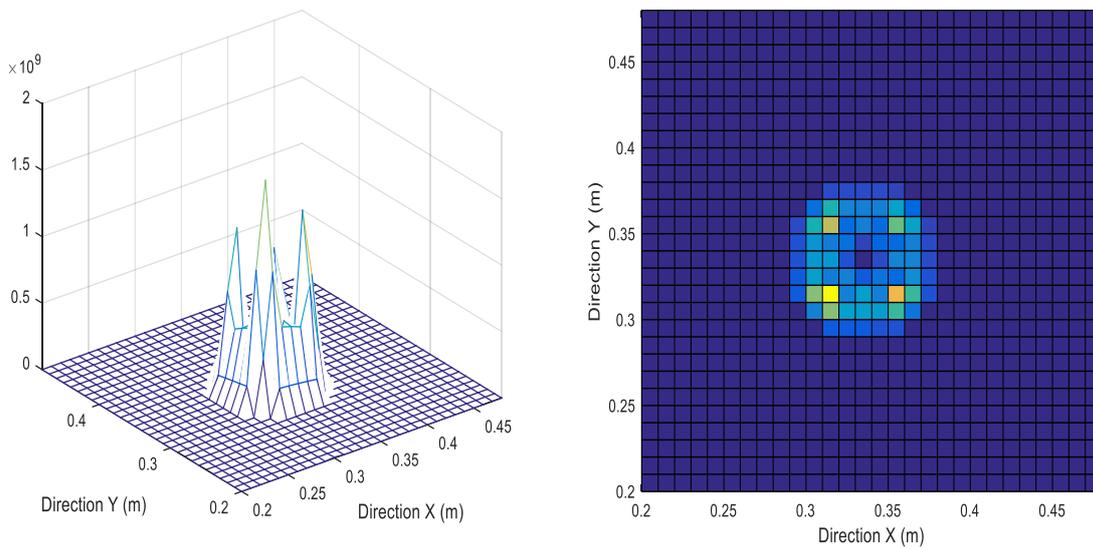


Figure III.5. Distribution de l'indice de dommage de la plaque à 1 kHz.

III.3.2 Résultats de calcul à 1 MHz

Passons maintenant au calcul des déplacements à une fréquence de 1 MHz. On observe que la distribution des déplacements, présentée dans la **Figure III.6**, est parfaitement localisée à l'endroit prévu à haute fréquence. Cette position est confirmée par la distribution de l'effort (**Figure III.7**). En revanche, à basse fréquence, la distribution des déplacements n'a fourni aucun résultat.

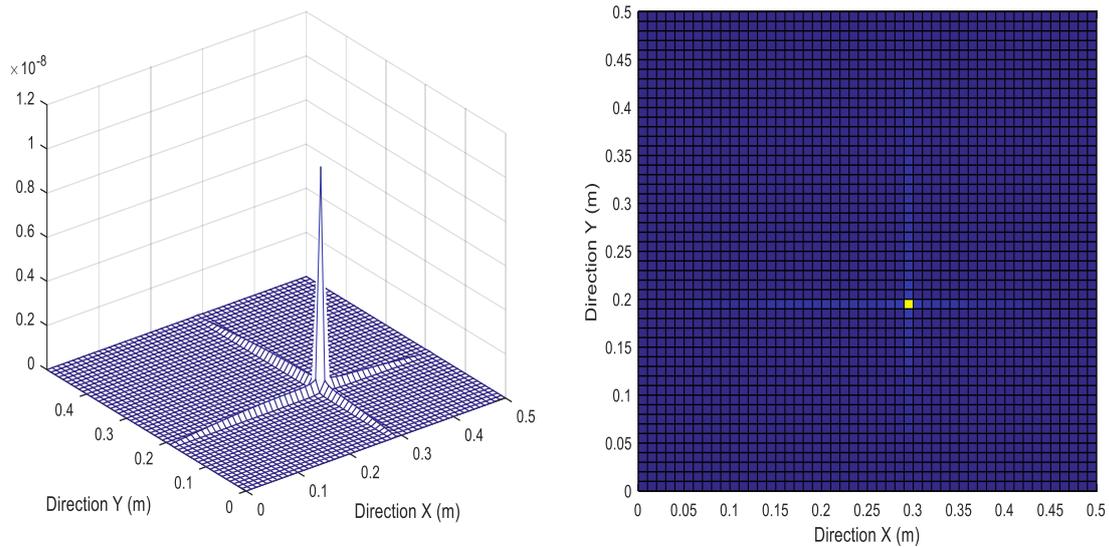


Figure III.6. Distribution des déplacements à 1 MHz.

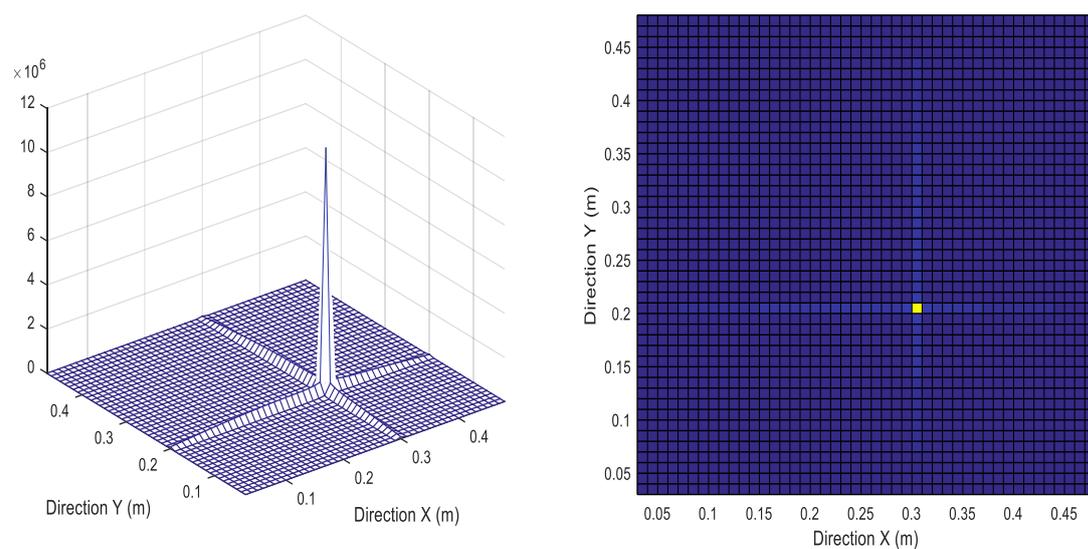


Figure III.7. Distribution de l'efforts à 1 MHz.

De la même manière, nous calculons la pente D à une excitation de 1 MHz. On observe que le tracé du rapport dans les deux cas de la plaque saine (**Figure III.8**) et de la plaque endommagée (**Figure III.9**), perd sa linéarité. Cela indique que les résultats ne permettent pas de détecter clairement la présence du défaut à partir de la pente D tant que la possibilité de localisation est acquise dès la mesure des déplacements.

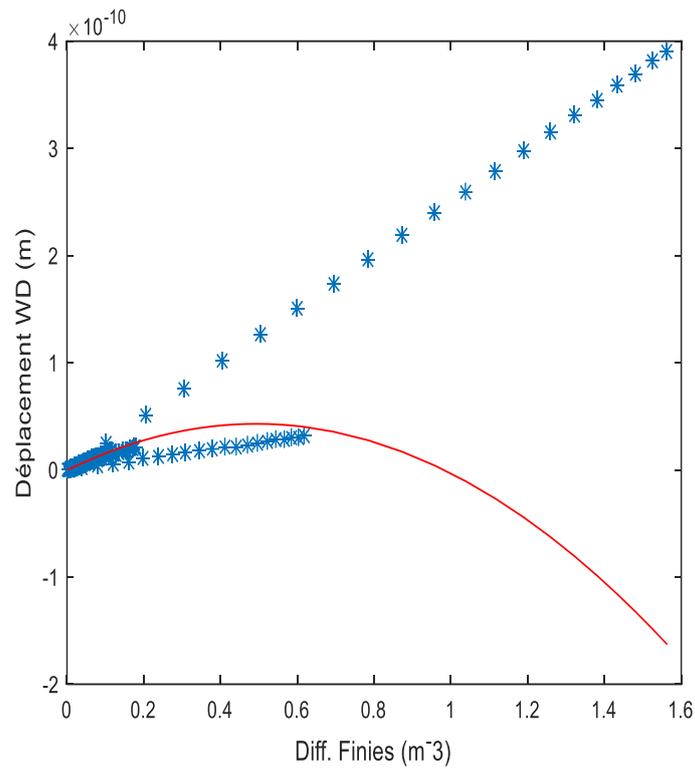


Figure III.8. Rapport D de la plaque saine. Excitation à 1 MHz.

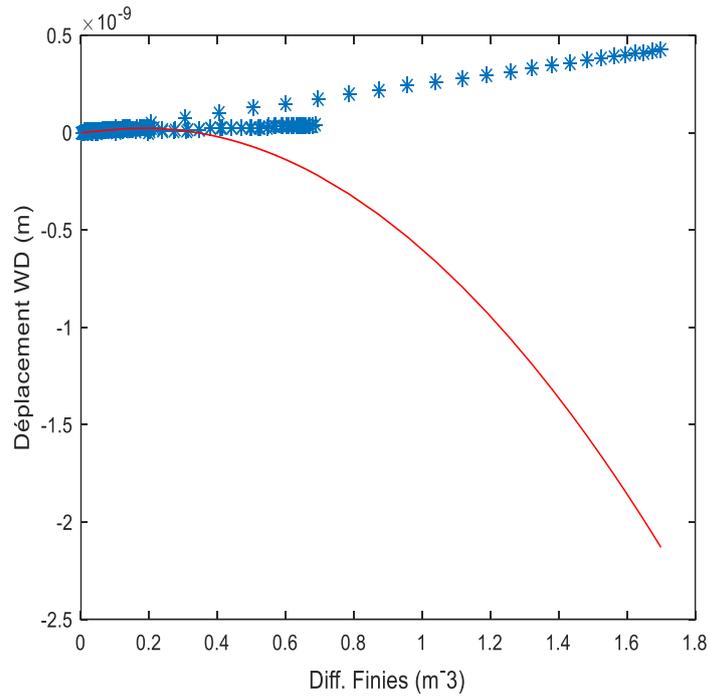


Figure III.9. Rapport D de la plaque saine. Excitation à 1 MHz.

D'après la **Figure III.10** on observe que l'indice de dommage obtenu à haute fréquence ne donne aucun résultat clair et ne permet pas de déterminer la position exacte de défaut. Cela indique que les résultats ne permettent pas de détecter la présence du défaut à partir de l'indice de dommage ID tant que la possibilité de localisation est acquise dès la mesure des déplacements.

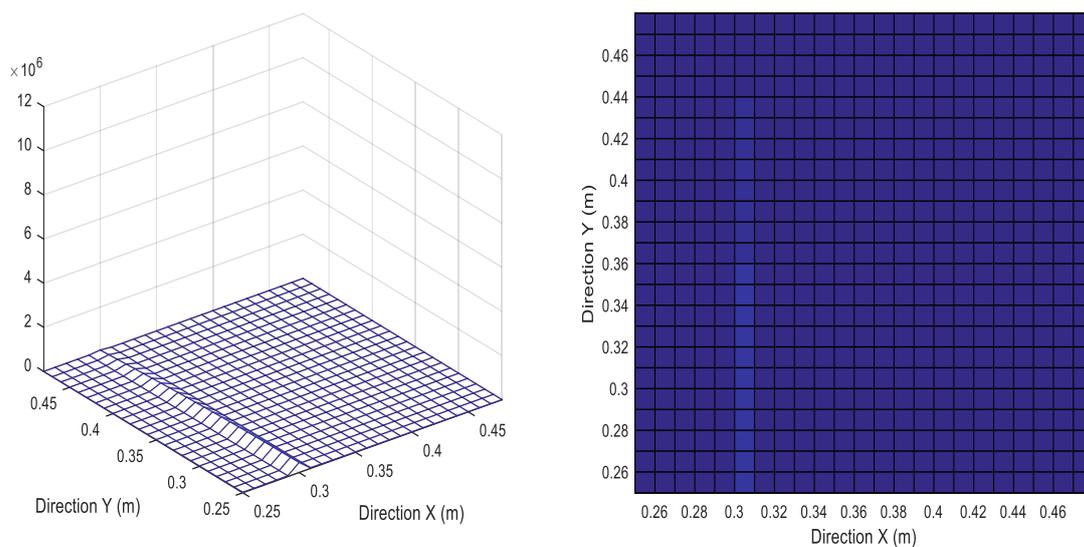


Figure III.10. Distribution de l'indice de dommage de la plaque à 1 MHz.

III.4. Résultats des simulations par SolidWorks et ANSYS de la réponse libre

Pour réaliser les simulations, deux plaques ont été conçues par SolidWorks dont une présentant un défaut sous forme d'un trou circulaire de 15 mm de diamètre sur une profondeur de 4 mm, positionné en $x=250$ mm et $y=100$ mm (**Figure III.11**). Une première analyse est faite par SolidWorks pour une plaque saine encadrée sur le bord supérieur ayant les caractéristiques mécaniques précédemment citées tout en fixant taille de l'élément de maillage à $\Delta x=\Delta y=5$ mm dans le but de calculer les fréquences propres.

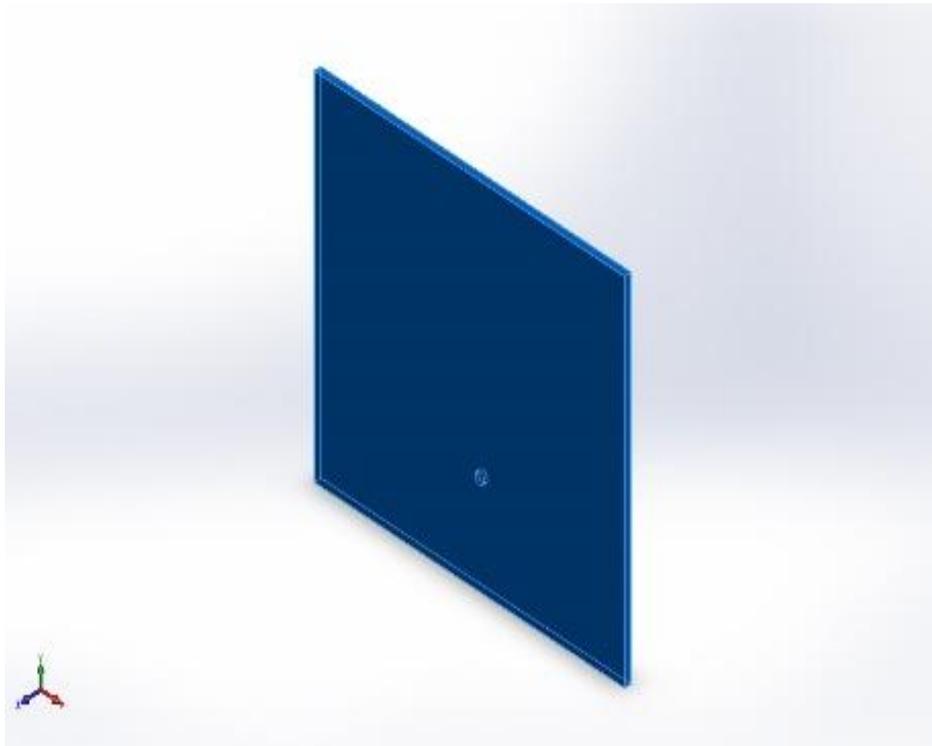


Figure III.11. Plaque aluminium endommagée par SolidWorks.

Une seconde simulation est réalisée par les deux versions de ANSYS : APDL et Workbench en se servant du fichier *.IGES et *.ans (**Figure III.12**), exportés à partir de SolidWorks en adoptant le matériau avec ses caractéristiques mécaniques, les conditions limites et le maillage de même taille que précédemment.

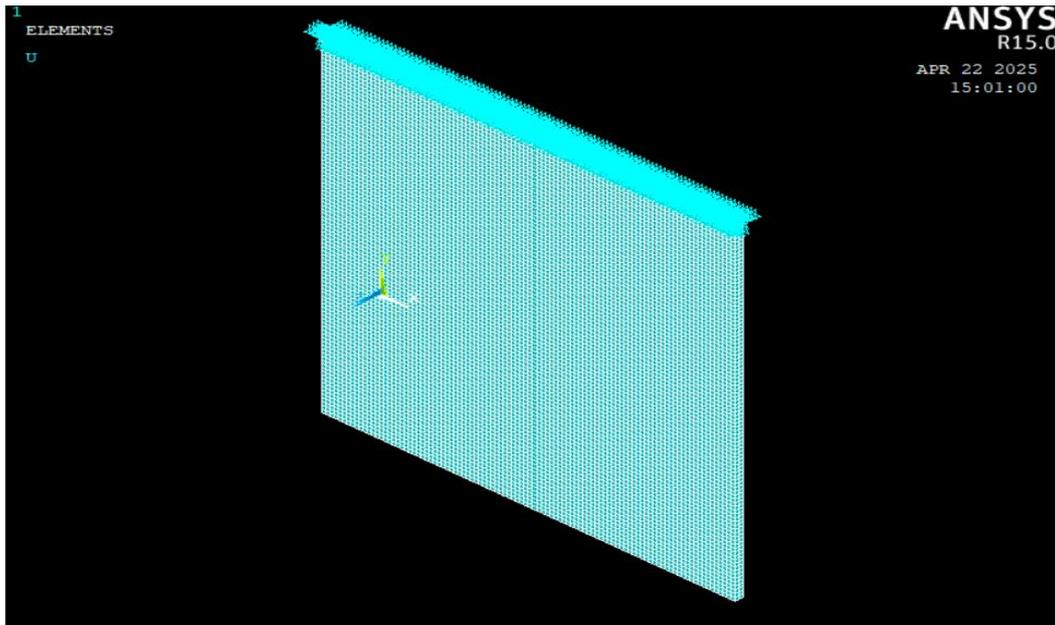


Figure III.12. Fichier *.ans exporté à partir de SolidWorks dans ANSYS APDL.

III.4.1. Simulations sur une plaque saine

Nous allons présenter les 20 premières fréquences propres selon les trois logiciels (Tableau III.1).

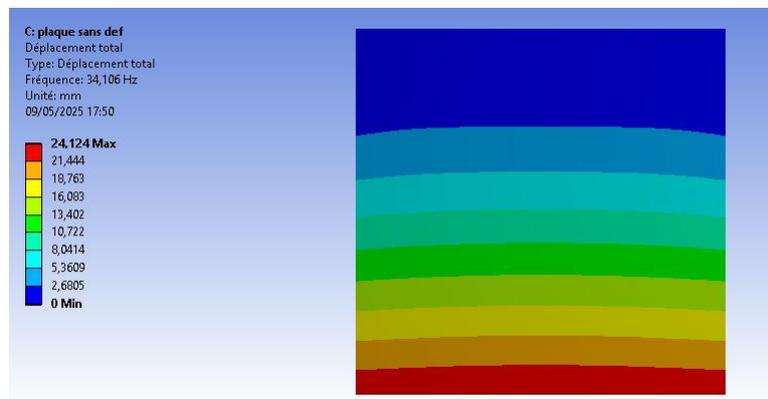
Numéro du mode	Fréquences propres de la plaque saine (Hz)		
	SolidWorks	ANSYS APDL	ANSYS Workbench
1	34,102	34,112	34,106
2	81,969	81,946	81,972
3	207,45	207,41	207,49
4	265,49	265,29	265,52
5	299,06	298,95	299,09
6	521,98	522,04	522,05
7	599,07	598,79	599,21
8	622,62	622,74	622,77
9	690,13	690,21	690,27
10	897,09	897,08	897,27
11	934,72	934,52	934,93
12	1056,7	1056,8	1056,7
13	1156,2	1156	1156,6
14	1210	1209,7	1210,4
15	1245,7	1246	1246,1
16	1340,3	1340,7	1340,6

17	1445,8	1446,3	1446,2
18	1519,3	1518	1519,8
19	1891,4	1891,8	1892,1
20	1921	1921.8	1921,7

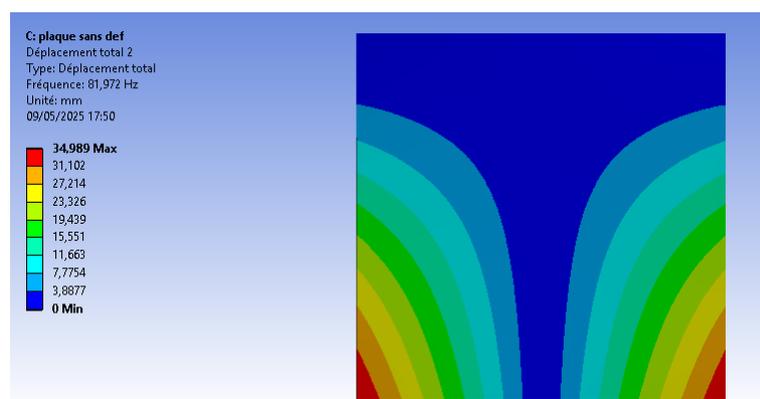
Tableau III.1. Fréquences propres de la plaque saine en Hz, issues de la simulation par SolidWorks, ANSYS APDL et ANSYS Workbench.

Nous constatons qu’il n’y a pas de différence significative entre les résultats et que tous les résultats sont presque identiques.

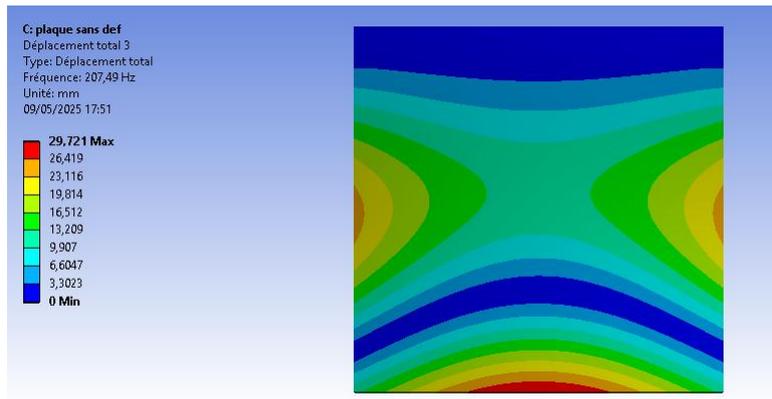
Dans la suite, nous pouvons également obtenir les déformées des 06 premières fréquences propres par ANSYS Workbench (**Figures III.13 a III.18**).



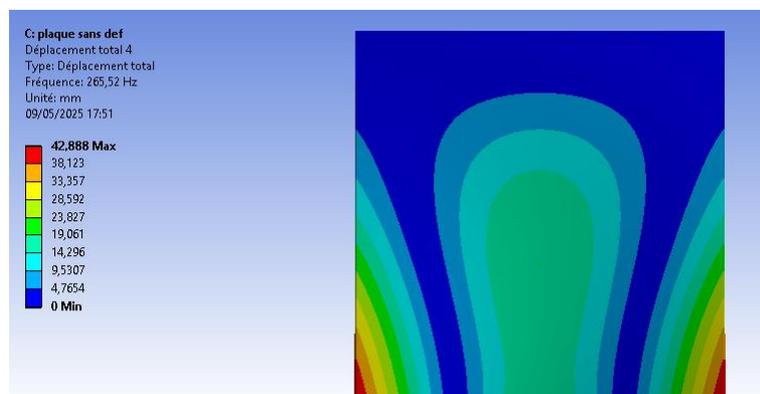
Figures III.13. Déformée 1 à 34.106 Hz.



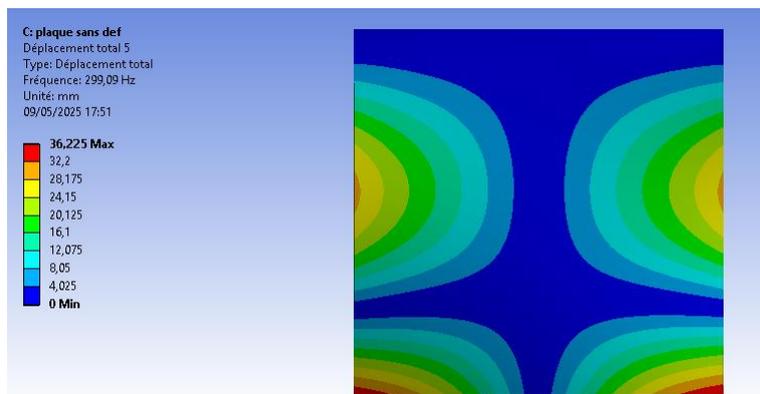
Figures III.14. Déformée 2 à 81.972Hz.



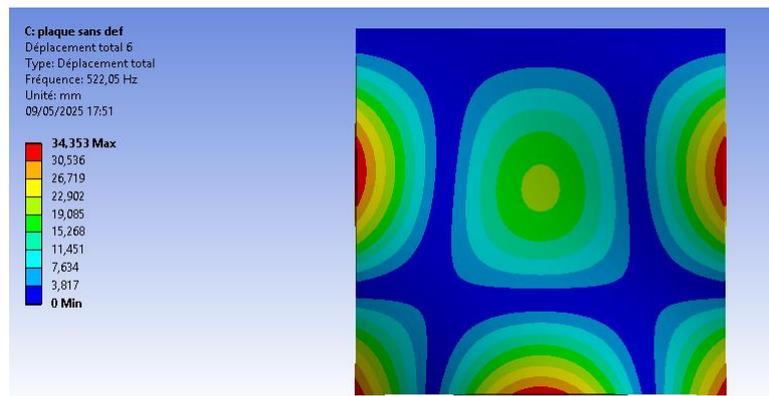
Figures III.15. Déformée 3 à 207.49 Hz.



Figures III.16. Déformée 4 à 265.52 Hz.



Figures III.17. Déformée 5 à 299.09 Hz.



Figures III.18. Déformée 6 à 522.05 Hz.

III.4.2. Simulations sur une plaque endommagée

Un défaut dans la structure peut se traduire soit par un changement de certaines caractéristiques mécaniques, soit par une réduction de l'épaisseur de la zone endommagée. Vu la simplicité de réduction de l'épaisseur, nous avons créé un lamage, localisé au milieu et en bas de la plaque de coordonnées ($x=250$ mm, $y=100$ mm) avec 30 mm de diamètre et de différentes profondeurs ($h_1=1$ mm, $h_2=2$ mm et $h_3=4$ mm). Ensuite, nous avons procédé aux calculs des fréquences propres pour les différentes configurations.

Pour comparer les fréquences propres de la plaque sans dommage et avec dommage selon sa gravité, nous les avons regroupés dans le **Tableau III.2**. D'une manière générale, le défaut structurel provoque une chute des fréquences propres. Plus grave est le défaut, plus la fréquence propre diminue. Ce qui représente un premier constat de la présence d'un défaut.

N° du mode	Plaque saine	Plaque endommagée ($h_3=4$ mm)	Plaque endommagée ($h_2=2$ mm)	Plaque endommagée ($h_1=1$ mm)
1	34,106	34,146	34,126	34,116
2	81,972	81,901	81,928	81,952
3	207,49	207,39	207,42	207,45
4	265,52	264,59	264,94	265,23
5	299,09	298,56	298,76	298,93
6	522,05	522,08	522,09	522,11
7	599,21	598,11	598,53	598,87
8	622,77	622,54	622,65	622,73
9	690,27	689,96	690,09	690,2
10	897,27	896,55	896,85	897,1
11	934,93	934,15	934,51	934,79

12	1056,7	1057,5	1057,1	1056,9
13	1156,6	1153,8	1154,7	1155,7
14	1210,4	1207,6	1208,5	1209,4
15	1246,1	1246	1246,1	1246,2
16	1340,6	1339,1	1339,7	1340,2
17	1446,2	1445,8	1446,1	1446,2
18	1519,8	1515,5	1516,9	1518,4
19	1892,1	1891,7	1892	1892,2
20	1921,7	1921,1	1921,4	1921,7

Tableau III.2. Comparaison entre les fréquences propres de la plaque avec ou sans dommage, en Hz, issues de la simulation par ANSYS Workbench (En rouge sont des modes de torsion).

Pour mieux voir les variations en fréquence, nous allons calculer les réponses en fréquence des plaques saine et endommagée suite à une excitation par une force harmonique d'amplitude 1000 N sur la face supérieure (Figure III.19).

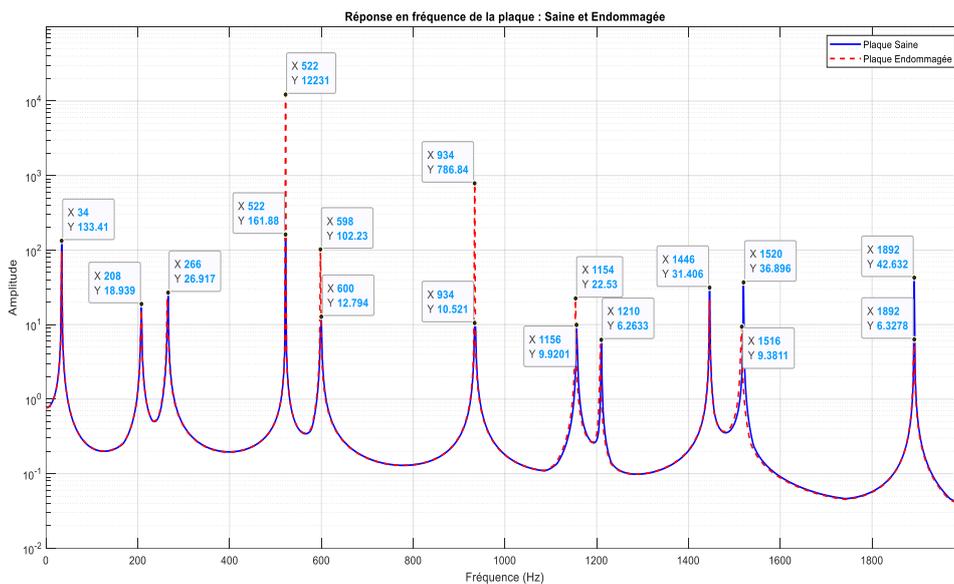


Figure III.19. Réponse en fréquence de la plaque saine et endommagée (h3=4 mm).

L'analyse comparative des vibrations pour chaque fréquence (de 2 Hz à 2000 Hz) révèle des différences marquées entre les deux cas étudiés. Il est clair que les plus grandes différences en amplitude sont observées au niveau des résonances 522 Hz et 934 Hz. On constate une augmentation spectaculaire de l'amplitude des deux résonances de la plaque avec défaut par

rapport à celle sans défaut de l'ordre de 75 fois (**Figure III.20**). Ces variations extrêmes constituent des indicateurs fiables de la présence d'un défaut structural.

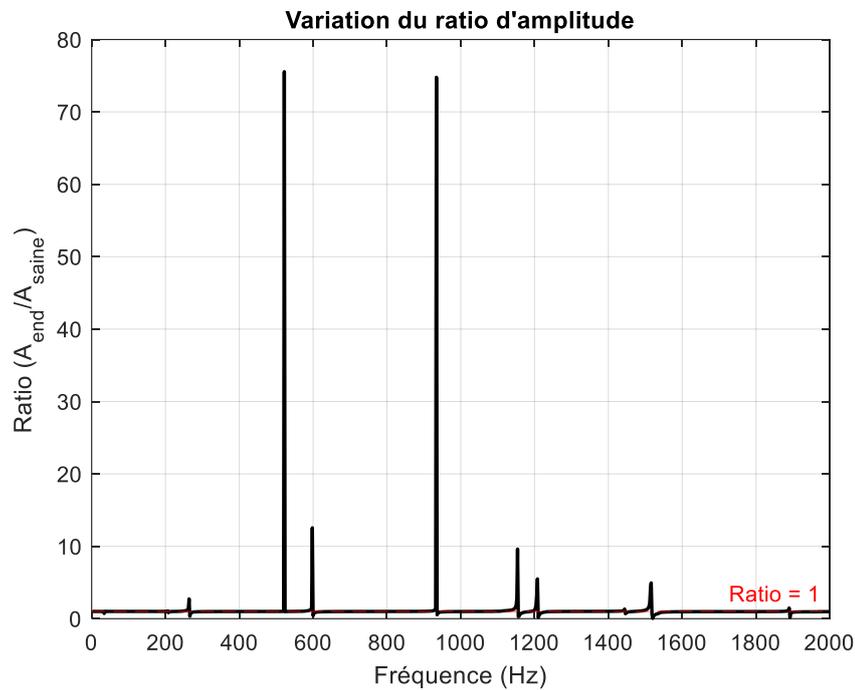


Figure III.20. Variation du ratio d'amplitude (plaque endommagée/plaque saine).

III.5. Résultats des simulations par ANSYS de la réponse forcée

Pour faire les calculs de la réponse forcée, on a importé le fichier de la plaque avec défaut déjà conçu par SolidWorks en format *.ans dans ANSYS Workbench. La plaque libre est excitée avec une force ponctuelle de 1 kN en dehors de la zone endommagée de coordonnées 250 mm par rapport au bord gauche et Y400 mm par rapport au bord inférieur. Les simulations pour le calcul des déplacements ont été réalisées à plusieurs fréquences : 1 kHz, 10 kHz, 20 kHz et 1 MHz.

Les **Figures III.21** et **III.22** montrent que l'effort n'est pas parfaitement localisé au point d'excitation prévu à 1 kHz et 10 kHz. Les déplacements transverses mesurés ne permettent pas de localiser avec précision le point d'application de la force car la réponse vibratoire globale masque la zone d'excitation exacte.

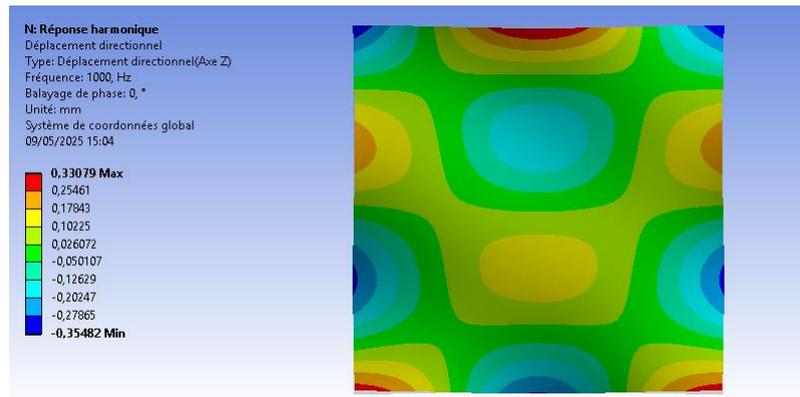


Figure III.21. Déplacement transversal de la plaque excitée à 1 kHz.

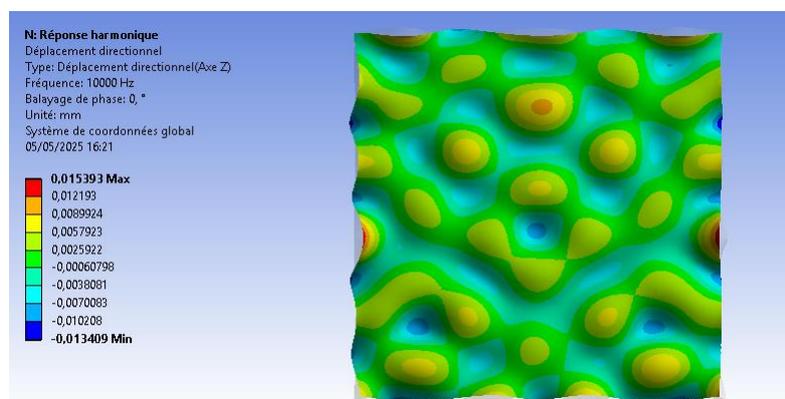


Figure III.22. Déplacement transversal de la plaque excitée à 10 kHz.

A 20 kHz, on observe que les déplacements au point d'excitation sont réduits d'un facteur de 10 par rapport à 10 kHz. La Figure III.23 montre également que l'effort appliqué commence à être localisé avec plus de précision, bien que des vibrations résiduelles persistent.

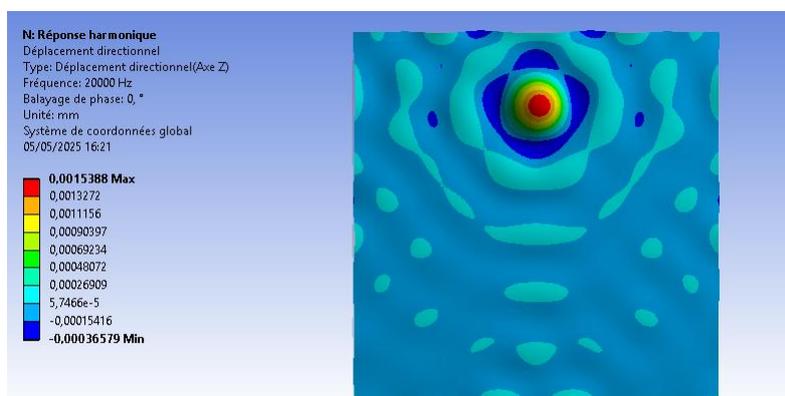


Figure III.23. Déplacement transversal de la plaque excitée à 20 kHz.

La **Figure III.24** présente le résultat suite à une excitation de 1 MHz. Dans ce cas, les déplacements sont quasi-nuls sauf dans la zone d'excitation où les valeurs permettent d'identifier avec précision la position de l'effort appliqué.

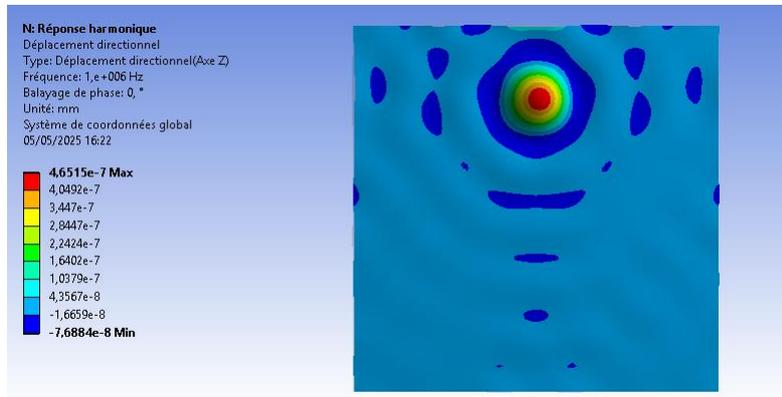


Figure III.24. Déplacement transversal de la plaque excitée à 1 MHz.

Les résultats montrent clairement que l'excitation à hautes fréquences permet effectivement de localiser, avec précision, le point d'application de la force à travers les déplacements résultants. Contrairement, aux basses fréquences, la réponse n'offre pas cette possibilité du fait que la réponse vibratoire globale masque la zone d'excitation exacte.

En partant des résultats de la figure précédente et afin de chercher le défaut dans la zone défectueuse, nous avons isolé les déplacements de cette zone sur la face frontale de la plaque ayant les dimensions $310 \times 310 \text{ mm}^2$. L'idée est de voir si l'amplitude des déplacements générés par l'effort ont écrasé celui des déplacements résultant de la présence du défaut (**Figure III.25**). Malheureusement, le défaut n'est plus localisé dans cette zone même si cette fréquence est très élevée. Ce résultat peut être interpréter par le fait que la force d'excitation appliquée loin de la zone de défaut et suite à l'amortissement de la plaque, cet effort n'arrive pas à exciter suffisamment la zone de défaut différemment de la zone non endommagée.

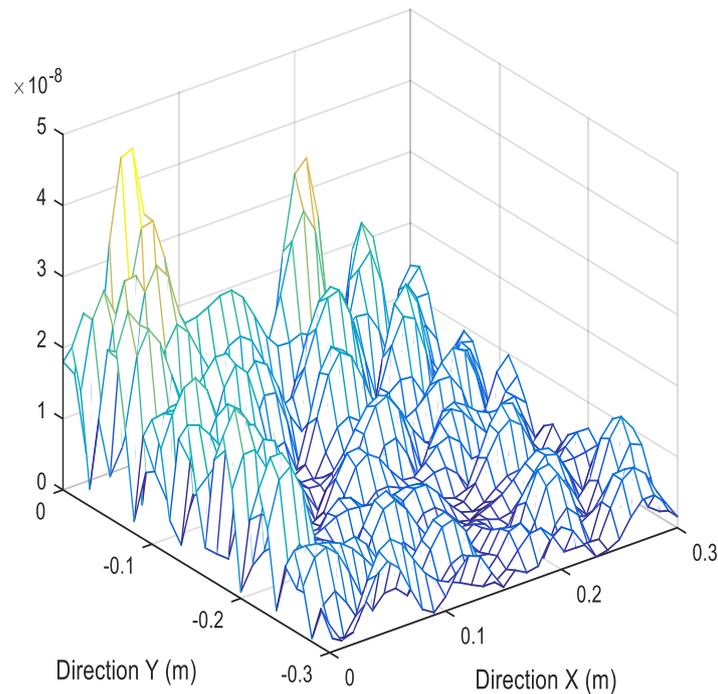


Figure III.25. Distribution du déplacement transversal dans la zone endommagée de la plaque excitée à 1 MHz.

Pour confirmer l'interprétation précédente qui suppose que l'effort est amorti au niveau de la zone endommagée au point qu'il n'arrive pas à exciter cette zone d'une manière suffisante, nous avons appliqué une excitation à travers un effort réparti sur la face frontale et nous avons calculé les déplacements résultants. Les **Figures III.26 et III.27** montrent les résultats des simulations à 1 kHz et 1 MHz, respectivement. A basse fréquence, aucun résultat clair n'est obtenu pour la localisation du défaut, alors qu'à haute fréquence, une localisation précise du défaut est prononcée. Cela confirme notre interprétation que plus le point d'application de l'effort est proche de la zone endommagée, plus l'excitation est forte et plus la réponse est significative.

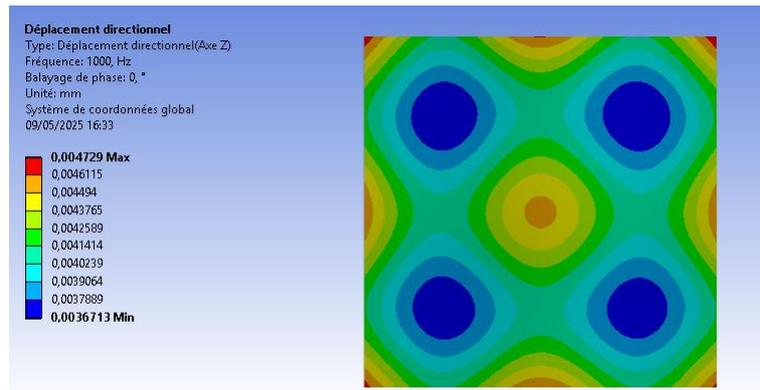


Figure III.26. Déplacement transversal de la plaque excitée à 1 kHz avec un effort repart.

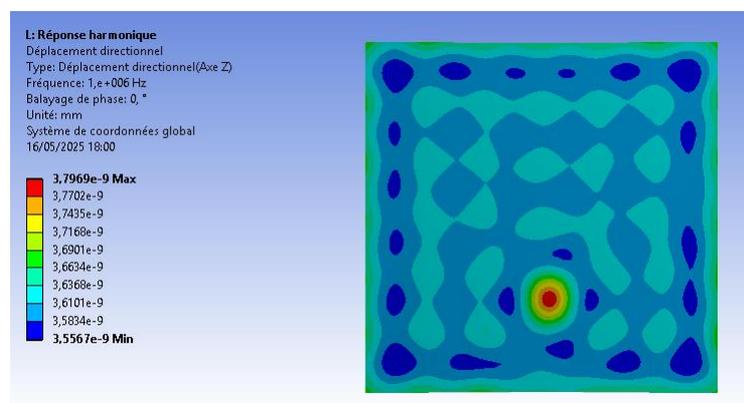


Figure III.27. Déplacement transversal de la plaque excitée à 1 MHz avec un effort repart.

Nous avons fait un zoom sur la zone endommagée en traçant par Matlab la distribution des déplacements dans cette zone de la plaque pour une fréquence 1 MHz et dans ce cas on observe que le défaut est bien localisé avec précision (Figure III.28).

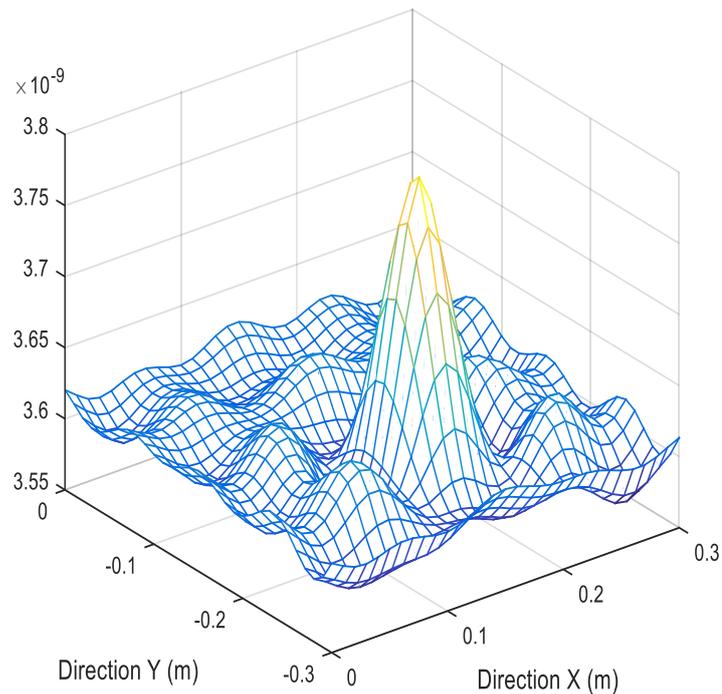


Figure III.28. Distribution du déplacement transversal dans la zone endommagée de la plaque excitée à 1 MHz avec un effort repart.

Partant de l'équation (II.10), on peut tracer les courbes de dispersion des nombres d'onde pour deux plaques d'épaisseur différente (10 mm et 4 mm), celles-ci sont présentées respectivement par les (**Figures III.29** et **III.30**). Ces courbes sont fondamentales pour comprendre le comportement des ondes de Lamb dans les structures et se révèlent très sensibles à l'épaisseur. L'analyse comparative des courbes de dispersion pour la plaque de 10 mm d'épaisseur met en évidence les modes fondamentaux A0 et S0 jusqu'à 165 kHz, suivis par l'apparition des modes supérieurs A1 et S1 au-delà de 175 kHz. En revanche, pour une plaque plus mince de 4 mm, les modes A0 et S0 persistent jusqu'à 450 kHz, seuil à partir duquel les modes d'ordre supérieur A1 et S1 se manifestent. Cette différence notable dans le comportement fréquentiel illustre clairement l'influence de l'épaisseur sur la dispersion des ondes Lamb.

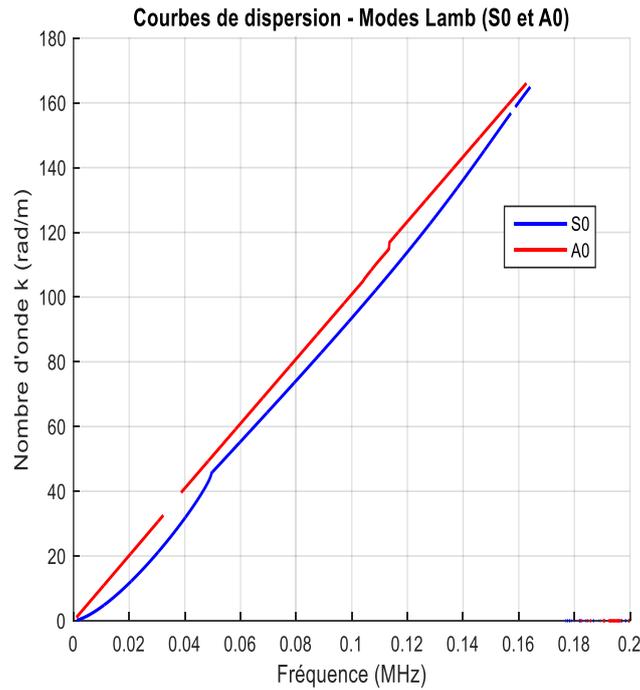


Figure III.29. Courbes de dispersion de nombre d'ondes pour une plaque d'épaisseur $h=10\text{mm}$.

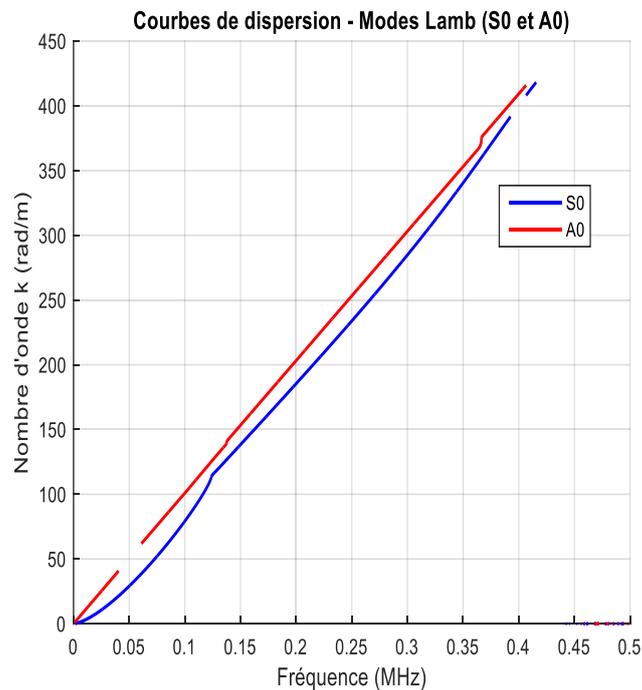


Figure III.30. Courbes de dispersion de nombre d'ondes pour une plaque d'épaisseur $h=4\text{mm}$.

En partant de la distribution des déplacements d'une plaque avec défaut et en appliquant la FFT à cette distribution, les nombres d'ondes dans les deux directions et pour différentes fréquences d'excitation sont représentés par la **Figure III.31**. Le nombre d'onde naturel associé aux ondes de flexion du mode antisymétrique fondamental A0 et symétrique S0 des ondes de

Lamb peuvent être extraits sur l'ensemble de la bande de fréquence analysée en utilisant des méthodes d'extraction particulières comme celles proposées par Ege et al. [40]. Par ailleurs, il est clair que les nombres d'ondes du mode antisymétrique fondamental A0 apparaissent en premier lieu, par contre les nombres d'onde du mode symétrique fondamental S0 ne sont pas encore visibles sur toute la plage fréquentielle étudiée. Ces derniers peuvent avoir naissance certainement aux fréquences plus élevées, au-dessus de 200 kHz.

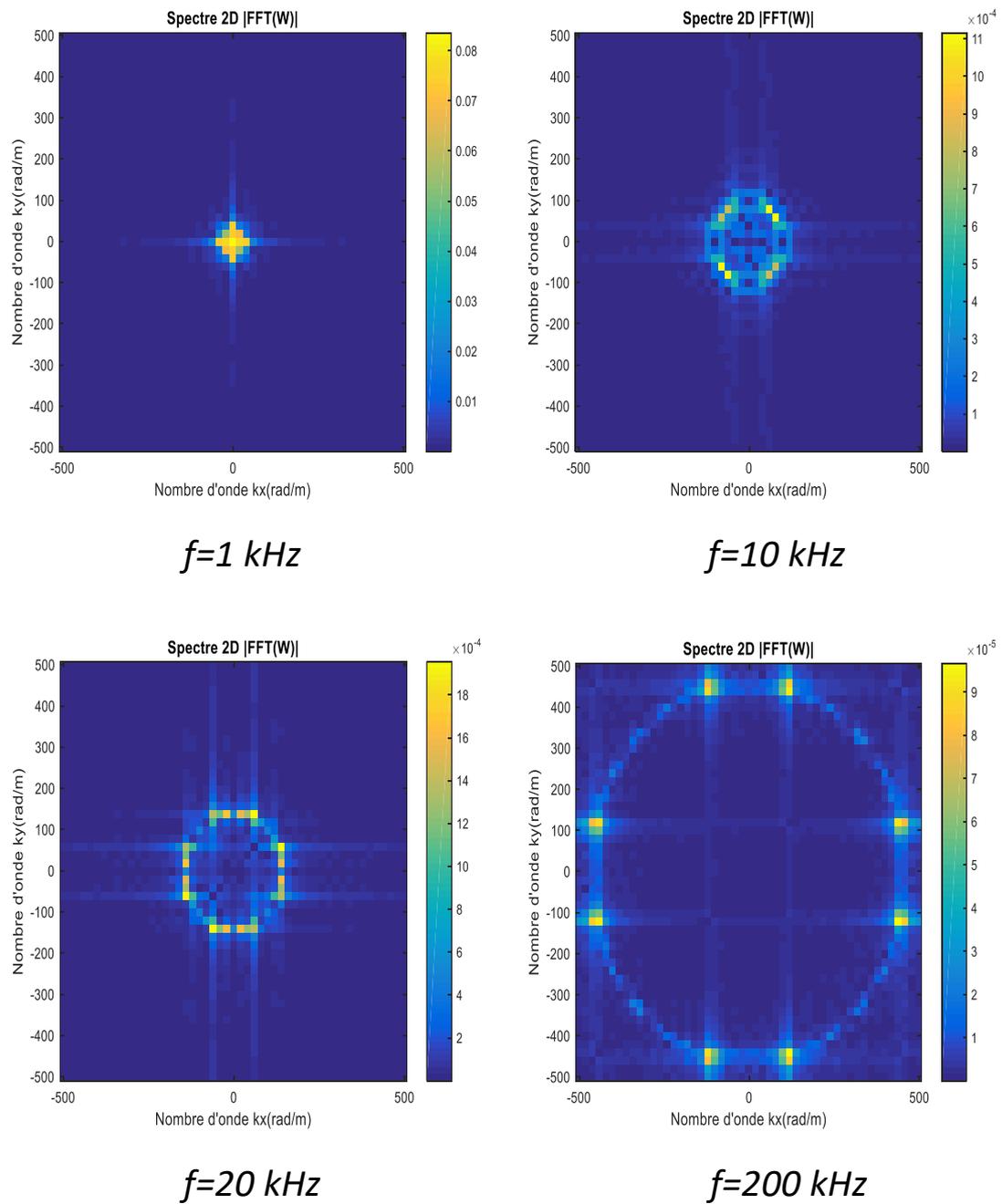


Figure III.31. Distribution des nombres d'ondes K pour différentes fréquences.

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés les résultats numériques basées sur la méthode modale où nous avons calculé les déplacements d'une plaque en Aluminium excité par un effort ponctuel. A des fréquences normales, la distribution des déplacements n'a pas permis la localisation directe de l'effort. La reconstruction de l'effort appliquée n'est possible qu'après l'application d'une méthode inverse ainsi que le calcul d'un indice de dommage qui a permis la localisation de la position exacte du dommage. A de très hautes fréquences, la distribution des déplacements montre directement la position de l'application de l'effort sans avoir recours à une méthode inverse. Par contre, la position du dommage n'était pas possible par le calcul de l'indice de dommage. Des simulations numériques sous SolidWorks et ANSYS ont permis via l'étude des fréquences propres de signaler la présence préalable d'un dommage quelconque de la structure. A travers la réponse vibratoire, une localisation optimale des défauts en hautes fréquences est possible, où les ondes de Lamb présentent une sensibilité accrue aux variations d'épaisseur et aux propriétés mécaniques.

Conclusion Générale

Nous avons commencé ce travail par un premier chapitre présentant une synthèse bibliographique approfondie sur l'intégrité des structures et son lien crucial avec les techniques de détection des dommages, ainsi qu'une synthèse des travaux de recherche menés dans ce domaine.

Dans le deuxième chapitre, nous avons formulé le problème en nous appuyant sur l'équation des plaques minces de Kirchhoff-Love et nous avons proposé une approche inverse fondée sur les déplacements mesurés ou calculés afin de reconstruire les efforts appliqués et de localiser les dommages dans le domaine des basses fréquences. Cette approche nous a permis d'introduire l'indice de dommage comme outil pertinent pour détecter les zones affaiblies. En parallèle, nous avons mis en évidence le potentiel des hautes fréquences pour exciter des ondes de Lamb, particulièrement sensibles aux variations locales de rigidité ou d'épaisseur.

Le troisième chapitre, nous avons validé cette approche par des simulations numériques. Nous avons modélisé une plaque en aluminium, soumise à un effort ponctuel, et analysé les déplacements induits. Aux fréquences normales (1 kHz), nous avons constaté que la simple distribution des déplacements ne permettait pas une localisation directe de l'effort. Cependant, en appliquant la méthode inverse et en calculant l'indice de dommage, nous avons pu identifier précisément la zone endommagée. À l'inverse, aux très hautes fréquences (jusqu'à 1 MHz), la réponse vibratoire montrait directement la position de l'effort appliqué, sans nécessiter de méthode inverse. Toutefois, l'identification du dommage via l'indice de dommage s'est révélée moins fiable dans ce cas. Nous avons également mené des simulations sous SolidWorks et ANSYS. L'analyse des fréquences propres nous a permis de constater que la présence d'un défaut structurel entraîne des variations significatives des modes propres, confirmant la sensibilité du comportement dynamique aux dommages. Enfin, les simulations de réponse vibratoire à haute fréquence ont montré qu'une localisation efficace des défauts est possible grâce à l'analyse des ondes de Lamb, qui offrent une sensibilité accrue aux modifications d'épaisseur ou de rigidité.

Références bibliographiques

- [1] https://fr.wikipedia.org/wiki/Int%C3%A9grit%C3%A9_et_d%C3%A9faillance_structurale
- [2] Farrar, C. R., & Worden, K. (2012). Structural health monitoring: a machine learning perspective, John Wiley & Sons.
- [3] Hellier, C. (2001). Handbook of Nondestructive Evaluation. New York, McGraw-Hill.
- [4] Fu, Z.-F., & He, J. (2001). Modal analysis, Elsevier.
- [5] Gatti, P. L. (1999). Applied structural and mechanical vibrations: theory, methods and measuring instrumentation, CRC Press.
- [6] <https://blog.alliantech.com/comment-utiliser-marteau-impact/>
- [7] <https://fr.scribd.com/document/193798774/Electrodynamic-Shakers>
- [8] Sui, L., Xiong, X., & Shi, G. (2012). "Piezoelectric actuator design and application on active vibration control." Physics Procedia **25**: 1388-1396.
- [9] Bensana, T. (2008). Diagnostic des défaillances basé sur l'analyse vibratoire d'une turbine à vapeur. Département de Mécanique, Université de Annaba-Badji Mokhtar. **Mémoire de Magister**.
- [10] Belkhir, T., & Ben Saci, M. (2016, 6). La maintenance des équipements par l'analyse vibratoire. Département de Mécanique, Université Kasdi Marbah Ouargla. **Mémoire de Master**.
- [11] Castellini, P., Martarelli, M., & Tomasini, E. P. (2006). "Laser Doppler Vibrometry: Development of advanced solutions answering to technology's needs." Mechanical Systems and Signal Processing **20**(6): 1265-1285.
- [12] <https://www.tradeindia.com/products/laser-doppler-vibrometer-4021520.html>
- [13] Zeddani, M. (2015). Localisation des défauts dans les structures par ultrasons. Département de Génie Mécanique Université 8 Mai 1945 Guelma. Mémoire de Master.
- [14] Adhikari, M. D., Kim, T.-H., Yum, S.-G., & Kim, J.-Y. (2023). "Damage detection and monitoring of a concrete structure using 3D laser scanning." Engineering Proceedings **36**(1): 1.
- [15] Lee, S., Jeong, S., & Park, J. (2014). "Damage identification using flexural vibration actuated and sensed by piezoelectric transducers." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science **228**(12): 2132-2140.
- [16] Khiem, N. T., Huan, D. T., & Hieu, T. T. (2023). "Vibration of cracked FGM beam with piezoelectric layer under moving load." Journal of Vibration Engineering & Technologies **11**(2): 755-769.
- [17] Monnier, T. (2006). "Lamb waves-based impact damage monitoring of a stiffened aircraft panel using piezoelectric transducers." Journal of Intelligent Material Systems and Structures **17**(5): 411-421.

Références bibliographiques

- [18] He, J., Yang, L., Sun, X., & Hu, M. (2018). "Damage identification in welded structures using symmetric excitation of Lamb waves." Advances in Mechanical Engineering **10**(9): 1687814018794817.
- [19] Nastac, S., Leopa, A., & Debeleac, C. (2011). "Damage detection at vibration passive isolation devices." Analele Universității "Dunărea de Jos" din Galați. Fascicula XIV, Inginerie mecanică= Annals of "Dunarea de Jos "University of Galati. Fascicle XIV, Mechanical Engineering **18**(1): 47-50.
- [20] Xu, H., Cheng, L., Su, Z., & Guyader, J.-L. (2011). "Identification of structural damage based on locally perturbed dynamic equilibrium with an application to beam component." Journal of Sound and Vibration **330**(24): 5963-5981.
- [21] Ablitzer, F., Pézerat, C., Gènevaux, J.-M., & Bégué, J. (2014). "Identification of stiffness and damping properties of plates by using the local equation of motion." Journal of Sound and Vibration **333**(9): 2454-2468.
- [22] Wang, X., Xia, Y., Zhou, X., & Yang, C. (2014). "Structural damage measure index based on non-probabilistic reliability model." Journal of Sound and Vibration **333**(5): 1344-1355.
- [23] Eraky, A., Anwar, A. M., Saad, A., & Abdo, A. (2015). "Damage detection of flexural structural systems using damage index method—Experimental approach." Alexandria Engineering Journal **54**(3): 497-507.
- [24] Luo, J., Liu, G., & Huang, Z. (2017). "Damage detection for shear structures based on wavelet spectral transmissibility matrices under nonstationary stochastic excitation." Structural Control and Health Monitoring **24**(1): e1862.
- [25] Xu, H., Su, Z., Cheng, L., & Guyader, J.-L. (2017). "On a hybrid use of structural vibration signatures for damage identification: a virtual vibration deflection (VVD) method." Journal of Vibration and Control **23**(4): 615-631.
- [26] Djamaa, M. C., & Ouelaa, N. (2018). Diagnostic des Dommages à travers l'Identification des Caractéristiques Mécaniques d'une Coque Cylindrique par une Méthode Inverse. The 2nd International Workshop on Signal Processing Applied to Rotating Machinery Diagnostics. Djelfa, Algeria.
- [27] Zenzen, R., Belaidi, I., Khatir, S., & Magd, A. W. (2018). "A damage identification technique for beam-like and truss structures based on FRF and Bat Algorithm." Comptes Rendus Mécanique **346**(12): 1253-1266.
- [28] Dahak, M., Touat, N., & Kharoubi, M. (2019). "Damage detection in beam through change in measured frequency and undamaged curvature mode shape." Inverse Problems in Science and Engineering **27**(1): 89-114.
- [29] Smith, C. B., & Hernandez, E. M. (2019). "Detection of spatially sparse damage using impulse response sensitivity and LASSO regularization." Inverse Problems in Science and Engineering **27**(1): 1-16.

Références bibliographiques

- [30] Li, X., Shi, D., & Yu, Z. (2020). "Nondestructive damage testing of beam structure based on vibration response signal analysis." Materials **13**(15): 3301.
- [31] Li, M., Wu, Z., Yang, H., & Huang, H. (2021). "Direct damage index based on inverse finite element method for structural damage identification." Ocean Engineering **221**: 108545.
- [32] Li, T., Cao, M., Li, J., Yang, L., Xu, H., & Wu, Z. (2021). "Structural damage identification based on integrated utilization of inverse finite element method and pseudo-excitation approach." Sensors **21**(2): 606.
- [33] Xu, M., Guo, J., Wang, S., Li, J., & Hao, H. (2021). "Structural damage identification with limited modal measurements and ultra-sparse Bayesian regression." Structural Control and Health Monitoring **28**(6): e2729.
- [34] Li, M., Jia, D., Wu, Z., Qiu, S., & He, W. (2022). "Structural damage identification using strain mode differences by the iFEM based on the convolutional neural network (CNN)." Mechanical Systems and Signal Processing **165**: 108289.
- [35] Pai, P. F., Oh, Y., & Lee, S.-Y. (2002). "Detection of defects in circular plates using a scanning laser vibrometer." Structural Health Monitoring **1**(1): 63-88.
- [36] Su, Z., & Ye, L. (2005). "Lamb wave propagation-based damage identification for quasi-isotropic CF/EP composite laminates using artificial neural algorithm: Part I-methodology and database development." Journal of Intelligent Material Systems and Structures **16**(2): 97-111.
- [37] Migot, A., Bhuiyan, Y., & Giurgiutiu, V. (2019). "Numerical and experimental investigation of damage severity estimation using Lamb wave-based imaging methods." Journal of Intelligent Material Systems Structures **30**(4): 618-635.
- [38] Sedaghati, A., Honarvar, F., & Sinclair, A. N. (2019). "Lamb wave-based experimental and numerical studies for detection and sizing of corrosion damage in metallic plates." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science **233**(6): 2107-2120.
- [39] Despres, C., Biateau, C., Castaings, M., Quaegebeur, N., Masson, P., & Ducasse, E. (2024). "Characterization of viscoelastic moduli and thickness of isotropic, viscoelastic plates using multi-modal Lamb waves." NDT E International **144**: 103095.
- [40] Ege, K., Monnier, T., Allois, D., & Leclère, Q. (2024). "Damage detection by means of broadband local wavenumber estimation in plate-like structures." INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings **270**(10): 1574-1580.
- [41] Djamaa, M. C. (2024). Identification of structural damage on a circular plate excited at ultrasonic frequencies using scanning laser vibrometer measurements. International conference of Materials, Engineering and Renewable Energy "ICMERE'2024". Guelma , Algeria.
- [42] Zima, B., & Moll, J. (2024). "Corrosion damage identification based on the symmetry of propagating wavefield measured by a circular array of piezoelectric transducers: Theoretical, experimental and numerical studies." Mechanical Systems Signal Processing **217**: 111538.