

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique



MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Électromécanique
Parcours : Master
Spécialité : Maintenance industrielle

Thème

**Étude expérimentale du comportement vibratoire d'une
plaque composite réparée par patch composite**

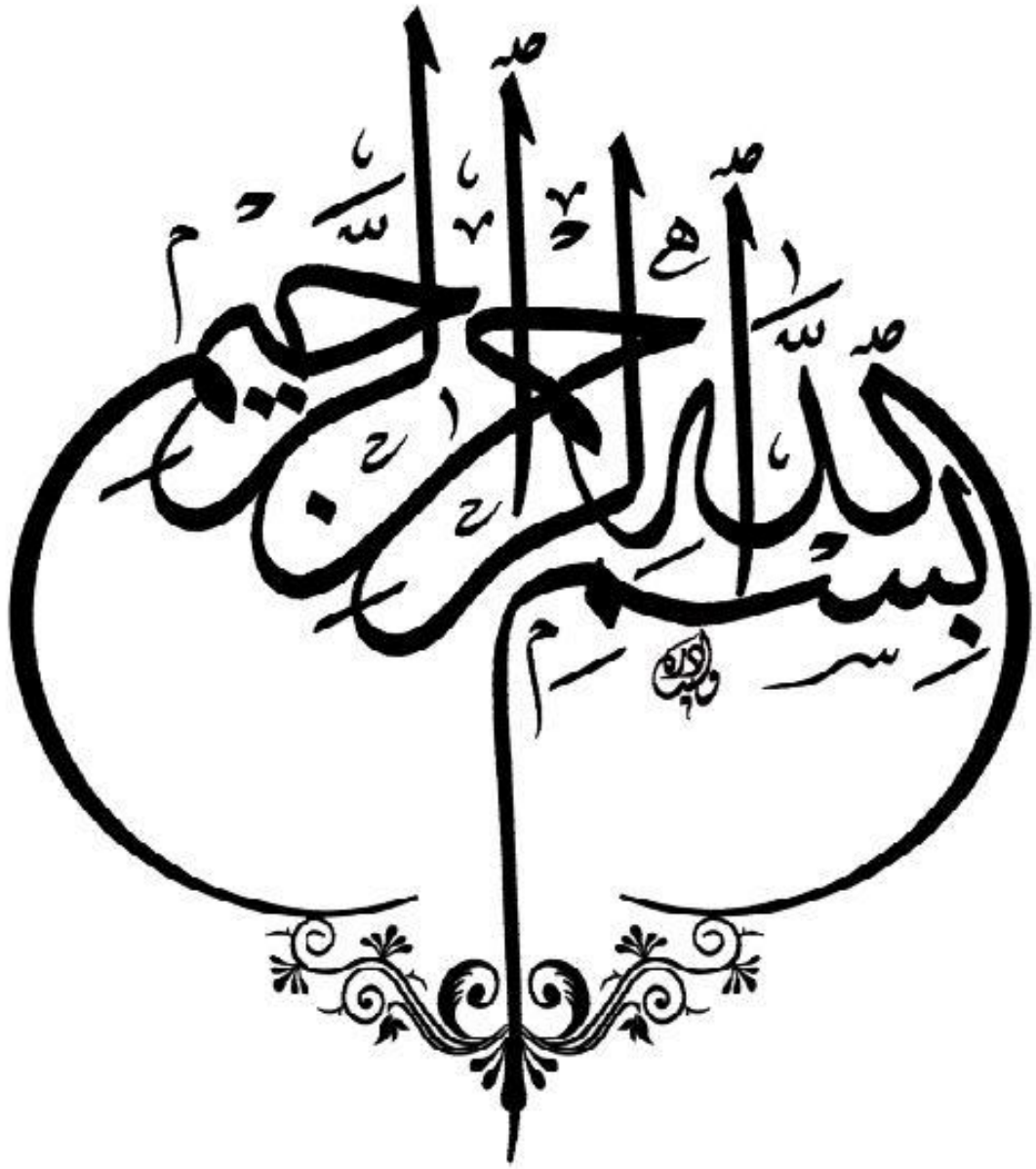
Préparé par :

OULD MOHAMED Farouk et BOUAZA Achref

Soutenu publiquement le : 25 / 06 / 2025, devant le jury composé de :

M. BOUZIDANE Ahmed	Professeur (Université Ibn-Khaldoun-Tiaret)	Président
M. SAAD Mohamed	Maitre de conférences classe A (Université Ibn-Khaldoun-Tiaret)	Examinateur
Mme. YAMANI Sara	Maitre de conférences classe B (Université Ibn-Khaldoun-Tiaret)	Examinateur
M. HOUARI Amin	Maitre de conférences classe B (Université M'hamed Bougara -Boumerdes)	Encadrant

Année universitaire : 2024 – 2025



Remerciements

Nous souhaitons exprimer nos plus sincères remerciements à notre encadrant **Dr. Houari Amin** pour sa disponibilité, ses conseils précieux, ainsi que son accompagnement attentif tout au long de ce travail. Ses orientations scientifiques et son exigence méthodologique ont été déterminantes pour la réussite de notre mémoire.

Nous adressons également notre gratitude à l'ensemble des enseignants et membres du personnel du département génie mécanique, pour la qualité des enseignements dispensés et pour leur soutien tout au long de notre parcours académique.

Nos remerciements s'étendent également au **MR. BOUTCHICHA Djilali le Directeur de laboratoire de test de vibration** à l'IGCMO/USTO, pour les moyens mis à notre disposition, ainsi que pour l'environnement de travail favorable à l'élaboration de notre étude.

Nous n'oublions pas de remercier chaleureusement nos familles respectives, pour leur soutien moral inconditionnel, leur patience et leurs encouragements constants, ainsi que nos camarades pour leur entraide, leur esprit de collaboration et les échanges enrichissants tout au long de cette formation.

À toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce projet, nous adressons un grand merci.

Dédicace

A tous ceux qui ont de loins ou de près contribués a ce
travail

A tous ceux qui nous ont encouragés soutenus et aidés

A nos parents

A nos frères

A nos sœurs

A nos amis

A nos professeurs

A nos collègues

A ceux qui malgré la distance ont toujours été le présent
par leur apport

Morale

Merci à tous et à toutes

Achref et Farouk

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude du comportement vibratoire des structures composites en fibres de carbone, utilisées notamment en aéronautique. L'objectif est d'évaluer l'impact des réparations sur leurs performances dynamiques, en particulier l'amortissement et les fréquences propres.

À travers une analyse modale expérimentale, nous avons identifié les principales caractéristiques vibratoires des structures testées. Les résultats obtenus montrent que la qualité des matériaux, l'orientation des couches et les méthodes de réparation influencent fortement le comportement dynamique global.

Abstract

This thesis focuses on the vibrational behavior of carbon fiber-reinforced composite structures, particularly in the aerospace field. The main objective is to assess the impact of repairs on their dynamic performance, especially damping and natural frequencies.

Through experimental modal analysis, the main vibrational characteristics of the tested structures were identified. The results show that material quality, layer orientation, and repair methods significantly affect the overall dynamic behavior.

المخلص

يتناول هذا البحث دراسة السلوك الاهتزازي للهياكل المصنوعة من المواد المركبة المعززة بألياف الكربون، والمستخدمه خصوصاً في مجال الطيران. الهدف هو تقييم تأثير الإصلاحات على أدائها الديناميكي، خاصة ما يتعلق بالتخميد والترددات الطبيعية. من خلال التحليل النمطي التجريبي، تم تحديد الخصائص الاهتزازية الرئيسية للهياكل المختبرة. وقد أظهرت النتائج أن جودة المواد، وتوجيه الطبقات، وطرق الإصلاح تؤثر بشكل كبير على السلوك الديناميكي العام.

Table des matières

Remerciements	I
Dédicace	II
Résumé	III
Table des matières	IV
Liste des figures	VII
Liste des tableaux	IX
Liste d'abréviation	X
Introduction générale :	1
Partie Théorique	2
<i>Chapitre I : Généralité sur les matériaux composites</i>	3
I.1 Introduction :	4
I.2 Définition d'un composite :	4
I.3 Composition d'un matériau composite :	4
I.3.1 Matrice :.....	4
I.3.1.1 La matrice organique :	5
I.3.1.2 La matrice métallique :	6
I.3.1.3 La matrice céramique :	6
I.3.2 Renfort :.....	6
I.3.2.1 Classification Renforts selon la nature :	6
I.3.2.2 Classification Renfort selon la forme :	7
I.3.2.2.1 Composites à particules :	7
I.3.2.2.2 Composites à fibres :	7
I.3.2.2.3 Composites structuraux :	8
a) Stratifié :	8
b) Sandwichs :	9
I.4 Domaine d'utilisation :.....	10
I.4.1 Matériaux Composites dans les équipements de sports et loisirs :.....	10
I.4.2 Matériaux composites dans l'aviation :	10
I.4.3 Secteur médical :.....	11
I.4.4 Secteur de l'énergie renouvelable :	11
I.5 Procèdes d'élaboration :	12
I.5.1 Moulage au contact :.....	12

I.5.2 Moulage par projection simultanée :	13
I.5.3 Moulage sous vide :	13
I.5.4 Enroulement filamentaire :	14
I.5.5 L'infusion :	14
I.5.6 Enroulement par drapage :	15
I.6 Mécanismes d'endommagements dans un composite :	15
I.6.1 La rupture des fibres :	16
I.6.2 Fissurations de matrice :	16
I.6.3 La rupture de l'interface fibre-matrice :	17
I.7 Réparations composites par patch collée :	17
I.7.1 Méthode de réparation par patch :	18
I.7.1.1 Patches externe :	18
I.7.1.2 Patches interne :	18
I.8 Conclusion :	19
<i>Chapitre II : Comportement vibratoire des structurelles aéronautiques en composites</i>	20
II.1 Introduction :	21
II.2 Définition vibration structurelle :	21
II.3 Paramètres principales de vibration structurelle :	22
II.4 Classification des vibrations :	22
II.4.1 Vibration libre :	22
II.4.2 Vibrations amorties :	23
II.4.3 Vibration forcée :	23
II.5 Causes des vibrations structurelles en aéronautique (composites) :	24
II.5.1 Défauts de fabrication :	25
II.5.2 Fatigue des matériaux composites :	25
II.5.3 Résonance structurelle :	26
II.6 Systèmes de contrôle des vibrations structurelles :	26
II.7 Analyse vibratoire de structure :	27
II.7.1 Activités de l'analyse vibratoire :	28
II.8 Les méthodes d'analyse vibratoire :	28
II.9 Analyse modale expérimentale :	29
II.9.1 Moyens et outils de mesures :	30
II.9.1.1 Chaîne d'acquisition numérique :	31
II.9.1.2 Principe de fonctionnement :	32
II.9.1.3 Capteurs :	32
II.9.1.3.1 Capteurs de déplacement :	33
II.9.1.3.2 Capteurs de vitesse :	33
II.9.1.3.3 Capteurs d'accélération :	34

II.9.1.4 Enregistreurs :.....	34
II.9.1.5 Analyseurs :.....	35
II.10 Traitement de signal :.....	36
II.10.1 Transformé de FOURIER :	36
II.10.2 Fonction de réponse fréquentielle (FRF) :.....	37
II.10.2.1 Définition des FRF :	37
II.10.3 Fréquences modales :.....	38
II.11 L'analyseur bi-canal FFT :.....	38
II.12 Fenêtrage du signal :.....	39
II.13 L'excitation :	39
II.13.1 Excitation par impact :.....	39
II.14 Détermination de la déformée modale :	40
II.15 Conclusion :	41
Partie Pratique	42
<i>Chapitre III : Étude expérimentale du comportement vibratoire d'une plaque réparée par patch collée en composites</i>	<i>43</i>
III.1 Introduction :.....	44
III.2 Méthode et matériel de l'expérimentale :.....	44
III.2.1 Préparation des échantillons :	44
III.2.2 Dispositif expérimentale :	46
III.2.3 Capteur de mesure :.....	46
III.2.4 Logiciel Analyzer (m+p SO Analyzer) :	48
III.2.5 Amplificateur de puissance :.....	48
III.2.6 Châssis :	49
a) Caractéristiques techniques principales :.....	49
b) Configuration et performances :	49
c) Avantages du système CompactDAQ :	49
III.3 Mode d'excitation :.....	50
III.4 Montage expérimental :	50
III.4.1 Test d'impact au Marteau de choc :	51
III.5 Configuration d'acquisition :	52
III.6 Résultats et discussion :.....	53
III.7 Résultats de l'analyse modale :	53
III.8 Rapport d'amortissements :.....	57
III.8.1 Formule mathématique :	58
III.9 Conclusion :.....	59
Conclusion générale	60
Références	63

Liste des figures

Figure I.1 : Matériaux composite.....	4
Figure I.2 Différents types de matrices [02].	5
Figure I.3 : Différents types de renforts. [07]	7
Figure I.4 : Les types des composites selon la forme. [09].....	7
Figure I.5 Les principaux types de tissés [11]	8
Figure I.6 Tissage tri-directionnelle « 3D » [10]	8
Figure I.7 Plaque stratifiée. [12]	9
Figure I.8 Composite sandwich	9
Figure I.9 Les types d'âmes les plus utilisées.....	9
Figure I.10 Pieces de sports et loisirs en materiaux composites.....	10
Figure I.11 Premier avion avec une structure toute en carbone.....	11
Figure I.12 Matériaux composites dans le domaine biomédical.....	11
Figure I.13 Pales éoliennes en composite de carbone.....	12
Figure I.14 Principe du moulage au contact.	12
Figure I.15 : Principe du moulage par projection simultanée. [15]	13
Figure I.16 Moulage sous vide [15]	13
Figure I.17 Enroulement filamentaire [09]	14
Figure I.18 Le procédé d'infusion pour un moule de coque de bateau [16].....	14
Figure I.19 Le drapage de pré-imprégnés [11]	15
Figure I.20 Différents mécanismes d'endommagement d'un composite stratifié [17].....	16
Figure I.21 Rupture de fibre [18]	16
Figure I.22 Initiation (a) et propagation (b) de la fissuration [18].....	17
Figure I.23 : Schéma de réparation par patch collée.....	17
Figure I.24 Schéma de réparation par patch externe [24]	18
Figure I.25 Schéma de réparation par patch interne [24].....	19
Figure II.1 : Vibration aile avion	21
Figure II.2 : Réponse temporelle	22
Figure II.3 : Système de vibration libre (masse + ressort).	23
Figure II.4 : Système de vibration amortie (masse + ressort + amortisseur).....	23
Figure II.5 : Système de vibration forcée (masse + ressort + amortisseur + force).	23
Figure II.6 : Présentations typique des différents types des forces vibratoires	24
Figure II.7 : Essais de vibrations [35]	27
Figure II.8 : Activités de l'analyse vibratoire.....	28
Figure II.9 : Technique de mesure expérimentale [36]	29
Figure II.10 : Analyse de système.....	30
Figure II.11 : Montage expérimental d'une analyse modale.	31
Figure II.12 : Chaîne d'acquisition numérique.....	31
Figure II.13 : Capteur de Déplacement	33
Figure II.14 : Capteur de vitesse.....	34
Figure II.15 : Capteur d'accélération.....	34
Figure II.16 : Enregistreurs de type « SIEMENS SCADAS Recorder » [41].....	35
Figure II.17 : Analyseur du spectre FFT « DEWSOFT » [42].....	35

Figure II.18 : FFT d'un signal réel	36
Figure II.19 : FRF magnitude et phase.....	37
Figure II.20 : Pièces réelles et imaginaires du point de commande FRF.....	38
Figure.II.21 L'excitation par impact	39
Figure.II.22 Exécution d'une excitation sur 4 points (n en vert 1, 2, 3,4).....	40
Figure III.1 : Fabrication de plaques composites par procédé sous vide.....	45
Figure III.2 : Préparation des éprouvettes réparée en composite pour l'essai de vibration.....	45
Figure III.3 : Dispositif expérimental d'un essai au marteau de choc.....	46
Figure III.4 : Accéléromètres	47
Figure III.5 : Positionnement de capteur d'accélération	48
Figure III.6 : Visualisation et acquisition	48
Figure III.7 : Amplificateur	49
Figure III.8 : châssis	50
Figure III.9 : Montage expérimental	50
Figure III.10 : Marteau d'impact.....	52
Figure III.11 : Embout d'impact	52
Figure III.12 : Fonction de reponse fréquentielle pour « PS ».....	53
Figure III.13 : Fonction de reponse fréquentielle pour « PT ».....	54
Figure III.14 : Fonction de reponse fréquentielle pour « PRC ».....	54
Figure III.15 : Fonction de reponse fréquentielle pour « PRV »	54
Figure III.16 : Histogramme des fréquences pour chaque mode	56
Figure III.17 : Histogramme des amplitudes pour chaque mode	57

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Comparatif des systèmes de contrôle vibratoire	26
Tableau III.1 : Caractéristiques mécaniques des poutres en composite de carbone.	45
Tableau III.2 : Caractéristiques géométriques de la poutre.....	51
Tableau III.3 : Valeurs des fréquences expérimentales.....	55
Tableau III.4 : Valeurs des amplitudes expérimentales	55
Tableau III.5 : Rapport d'amortissement estimé pour « PS »	58
Tableau III.6 : Rapport d'amortissement estimé pour « PT »	58
Tableau III.7 : Rapport d'amortissement estimé pour « PRC »	59
Tableau III.8 : Rapport d'amortissement estimé pour « PRV »	59

Liste d'abréviation

CAN : Le convertisseur analogique numérique.

E/B : échantillonneur bloqueur

FRF : Fonction de réponse fréquentielle.

FEA : Finite element analysis.

FAA : Federal Aviation Administration

PS : Plaque simple

PT : Plaque trouée

PRC : Plaque réparé par carbone

PRV : Plaque réparé par verre

SISO: Single input single output.

SIMO: Single input multiple outputs.

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale :

Les matériaux composites s'imposent comme des matériaux d'avenir, qui se distinguent par leur légèreté, leur résistance et leur adaptabilité à des formes complexes. Présents aussi bien dans la nature que dans l'aéronautique, ces matériaux sont devenus essentiels dans de nombreux secteurs comme l'aéronautique, la construction, l'automobile ou le sport.

En parallèle, la compréhension du comportement dynamique des structures s'est imposée comme une nécessité incontournable pour garantir leur fiabilité et leur durabilité. L'analyse vibratoire discipline clé de la mécanique des structures permet d'étudier la réponse des systèmes soumis à des excitations dynamiques, de détecter d'éventuels défauts et d'optimiser les performances mécaniques.

Dans le but de comprendre les principes fondamentaux de l'analyse dynamique et vibratoire, notamment dans le contexte des structures composites, l'étude porte sur les différents types de vibrations, les phénomènes de résonance, ainsi que les méthodes d'identification des paramètres modaux tels que les fréquences propres, les formes modales et les amortissements."

Le but de ce travail est d'évaluer le comportement vibratoire de structures composites, en particulier celles réparées, afin d'optimiser leur performance dynamique.

Partie Théorique

Chapitre I.

*Généralité sur les matériaux
composites*

I.1 Introduction :

Les matériaux composites font désormais partie intégrante de notre quotidien, présents dans de nombreux secteurs tels que la construction, la médecine, l'industrie pétrolière, les transports, le sport et l'aéronautique. Ils se distinguent par plusieurs avantages notables, notamment une excellente résistance à la corrosion, une grande légèreté, ainsi qu'une capacité à adopter une large gamme de formes grâce à la diversité des procédés de mise en œuvre disponibles. [01]

Les composites existent également à l'état naturel. Le bois, par exemple, est un matériau composite naturel constitué de fibres longues de cellulose liées par une matrice organique appelée lignine. En milieu industriel, les composites sont fabriqués par l'association de deux ou plusieurs matériaux non miscibles dont les propriétés se complètent, afin d'obtenir un matériau final aux caractéristiques améliorées. [01]

I.2 Définition d'un composite :

Un matériau composite est constitué de deux ou plusieurs matériaux dont les propriétés individuelles se combinent pour former un matériau hétérogène ayant des performances globales fortement améliorées. [02]

Bien qu'il existe différentes sortes de matériaux composites (comme par exemple, le béton, la boue, le contreplaqué...), ce terme s'adresse plus particulièrement aux pièces plastiques constituées d'une matrice et d'un élément renforçant de type fibreux tel que défini dans la Figure I.1.

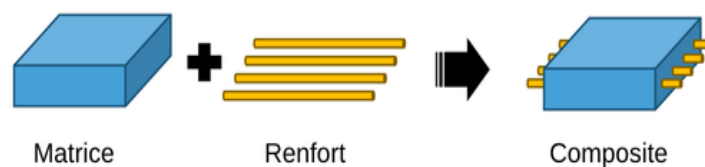


Figure I.1 : Matériaux composite

I.3 Composition d'un matériau composite :

Les matériaux composites sont constitués principalement de :

- D'une matrice.
- D'un renfort

I.3.1 Matrice :

La matrice a pour fonction de lier les fibres de renfort, de répartir les contraintes mécaniques, d'assurer la résistance chimique de la structure et de conférer au produit sa forme finale [03]. Il existe deux types de matrice selon la nature (Figure I.2) :

- La matrice organique
- La matrice minérale

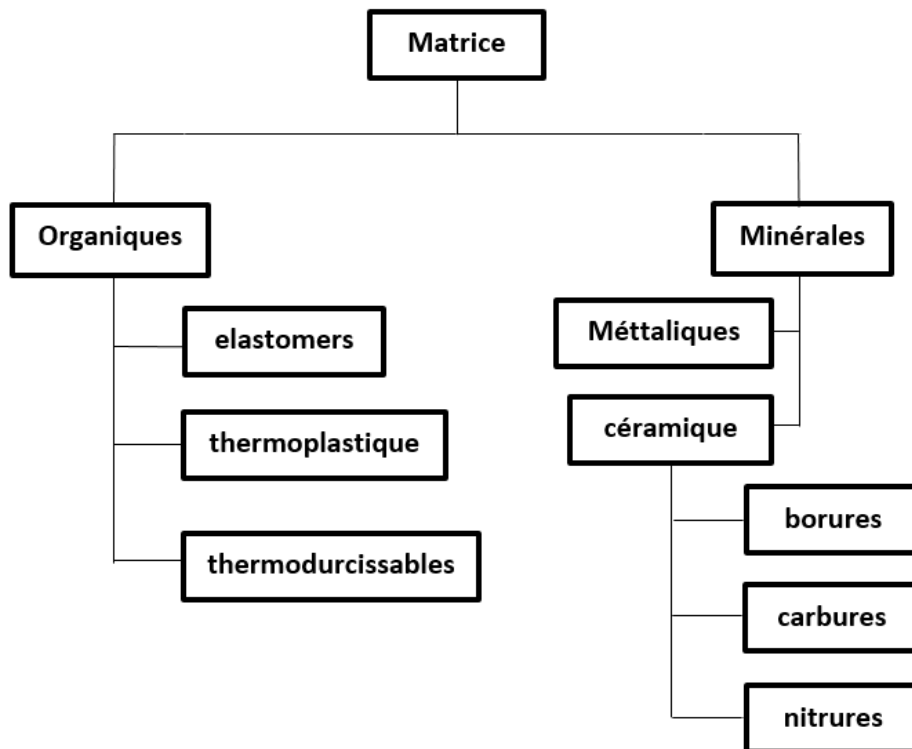


Figure I.2 Différents types de matrices [02].

I.3.1.1 La matrice organique :

Les matrices organiques les plus couramment utilisées sont [03] :

- **Les résines polyester**, économiques, souvent associées aux fibres de verre, elles sont présentes dans de nombreuses applications du quotidien.
- **Les résines vinylester**, principalement utilisées dans des environnements nécessitant une bonne résistance aux agents chimiques.
- **Les résines époxy**, reconnues pour leurs excellentes propriétés mécaniques, elles sont généralement combinées aux fibres de carbone pour la fabrication de pièces structurelles, notamment dans le secteur aéronautique.
- **Les résines phénoliques**, privilégiées dans les applications où la résistance au feu est essentielle, conformément aux normes en vigueur dans les transports civils.
- **Les résines thermoplastiques**, telles que le polypropylène ou le polyamide, utilisés pour leurs propriétés spécifiques et leur facilité de mise en œuvre.

I.3.1.2 La matrice métallique :

Ils utilisent des alliages légers (aluminium, magnésium, titane) comme matrice, renforcés par :

- Des fibres minérales : carbone, carbure de silicium.
- Des fibres métalliques : bore.
- Des fibres metallo-minérales : fibres de bore revêtues de SiC (BorSiC).

Ces matériaux sont utilisés dans les domaines exigeants comme l'aéronautique ou l'automobile, en raison de leur bonne tenue mécanique et thermique. [04]

I.3.1.3 La matrice céramique :

Sont utilisés dans des domaines de haute technicité (spatial, nucléaire, militaire, freinage), car ils résistent à des températures très élevées (jusqu'à 1000 C°) [05]. Ils sont composés de :

- Fibres métalliques : bore.
- Particules métalliques : cermets.
- Particules minérales : carbures, nitrures, etc.

Contrairement aux composites à matrice organique (limites à 200-300 C°), les CMC et CMM permettent une utilisation jusqu'à 600 C° (matrice métallique) et 1000 C° (matrice céramique). [05]

I.3.2 Renfort :

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme filamentaire, allant de la particule de forme allongée à la fibre continue qui donne au matériau un effet directif. [03]

I.3.2.1 Classification Renforts selon la nature :

Les renforts sont les éléments clés qui confèrent aux matériaux composites leurs principales propriétés mécaniques telles que la rigidité, la résistance à la rupture et la dureté. Ils contribuent également à améliorer plusieurs propriétés physiques, notamment le comportement thermique, la résistance aux hautes températures, au feu, à l'abrasion, ainsi que certaines propriétés électriques [06].

Les renforts idéaux doivent posséder des performances mécaniques élevées, une faible masse volumique, une bonne compatibilité avec les résines, être faciles à mettre en œuvre et présenter un coût réduit. Selon l'application visée, ces renforts peuvent être d'origines variées : végétale, minérale, artificielle ou synthétique. La Figure I.3 représente les différents types de renforts organiques et inorganiques [06].

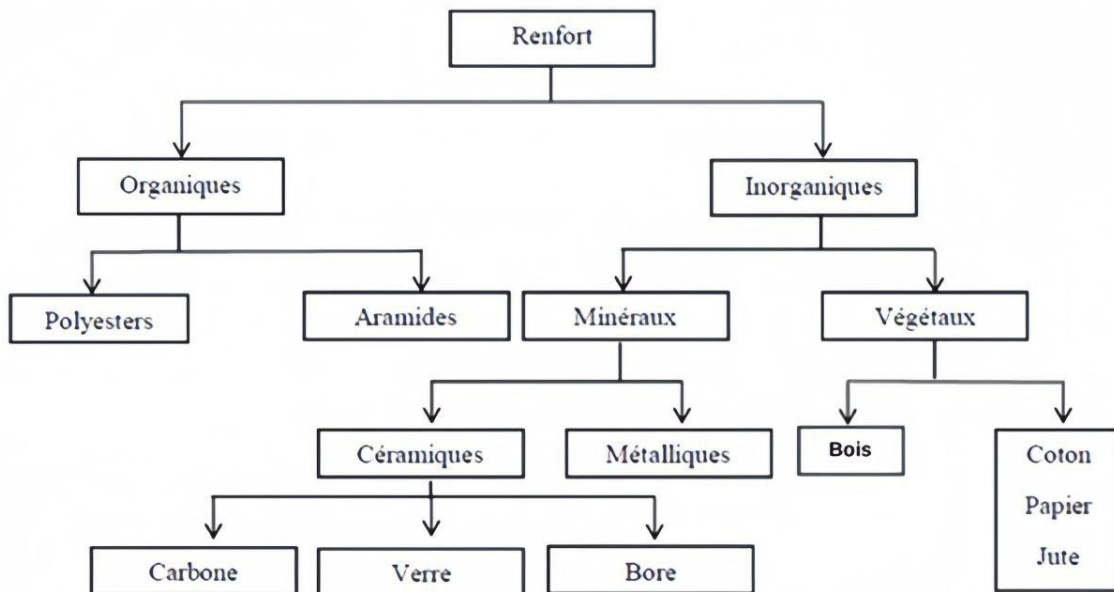


Figure I.3 : Différents types de renforts. [07]

I.3.2.2 Classification Renfort selon la forme :

Selon la forme des renforts, on distingue trois types de composites : [08]

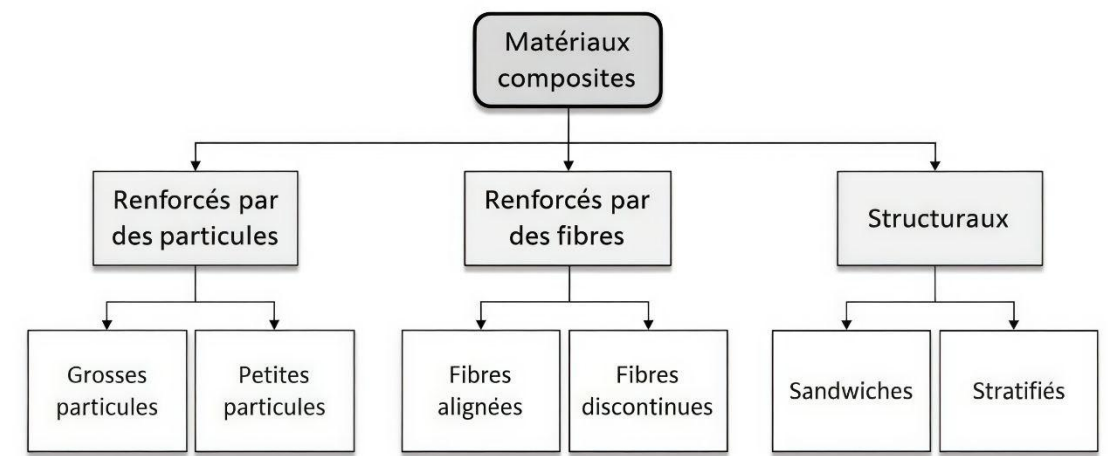


Figure I.4 : Les types des composites selon la forme. [09]

I.3.2.2.1 Composites à particules :

Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux tels que : la dureté, la conductivité électrique.....etc. [10]

I.3.2.2.2 Composites à fibres :

Les renforts par des fibres sont disponibles selon le cout et les besoins mécaniques, elles existent principalement sous deux formes : [08]

- **Linéique (fils, mèches) :** les fibres sont alignées de manière continue et parallèle, créant des formes filiformes ou de mèches. [08]
- **Forme surfaciques :**
 - **Tissés :** Les fibres sont tissées ensemble pour former des tissus bidimensionnels « 2D ». Ces tissus peuvent varier en termes de densité de tissage et de types de fibres utilisées. [08]

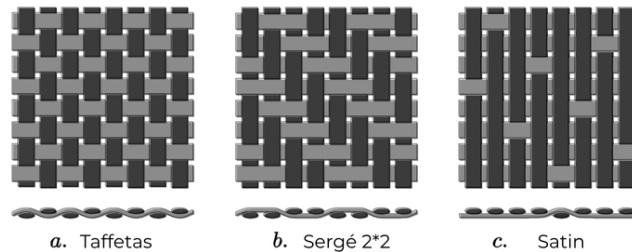


Figure I.5 Les principaux types de tissés [11]

- **Mats :** Les fibres sont disposées de manière aléatoire et liées ensemble pour former une feuille ou un mat. Les mats offrent une résistance isotrope, c'est-à-dire égale dans toutes les directions du plan.
- **Tissés multidirectionnelle :** Les fibres sont tissées ou tricotées de manière à être orientées dans plusieurs directions (trois ou plus) (Figure I.6), créant une structure plus complexe. [08]

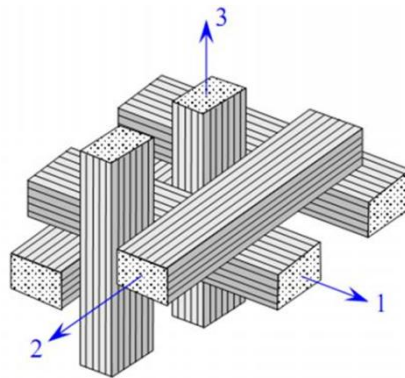


Figure I.6 Tissage tri-directionnelle « 3D » [10]

I.3.2.2.3 Composites structuraux :

Généralement, on distingue deux sortes de matériaux composites structuraux : les stratifiés et les sandwichs. [08]

a) Stratifié :

Un stratifié est un matériau composite constitué d'un empilement ordonné de plusieurs couches (Figure I.7), appelées strates, chacune ayant une orientation (Figure I.7) et une épaisseur

bien définies. Ces couches peuvent être composées de différents matériaux, et leur organisation suit généralement une séquence précise, connue sous le nom de séquence d'empilement qui décrit de façon synthétique l'orientation des couches dans le stratifié, ce qui permet de maîtriser et d'optimiser les propriétés mécaniques du matériau. L'un des grands avantages des matériaux composites stratifiés réside dans leur capacité à être conçus sur mesure, en orientant les couches de façon à répondre au mieux aux efforts spécifiques auxquels la structure sera soumise. Cette flexibilité dans la conception permet de développer des matériaux à hautes performances, adaptés à des applications exigeantes tant sur le plan de la résistance que de la légèreté. [12]

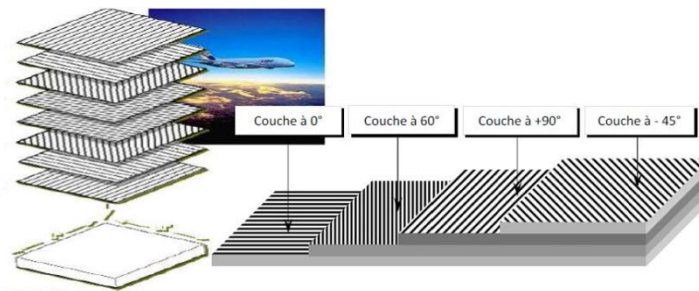


Figure I.7 Plaque stratifiée. [12]

b) Sandwichs :

Les structures composites subissant des sollicitations de type flexion ou torsion sont généralement construites en matériaux sandwichs (Figure I.8). Une structure sandwich est composée d'une âme (cœur) et de deux peaux en matériaux composites. L'assemblage est réalisé par collage à l'aide d'une résine compatible avec les matériaux en présence. Les âmes les plus utilisées sont de type nid d'abeilles, âme ondulée ou mousse (Figure I.9). Les peaux sont généralement constituées de structures stratifiées. [08]

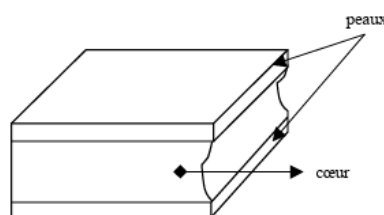


Figure I.8 Composite sandwich

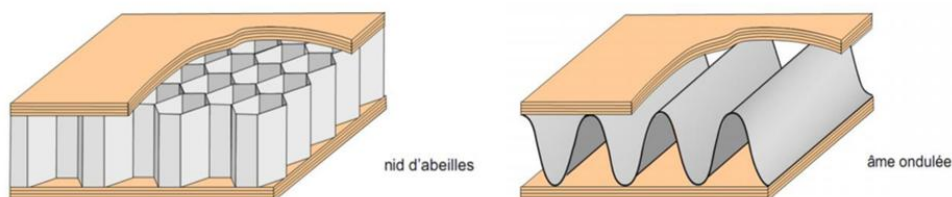


Figure I.9 Les types d'âmes les plus utilisées

I.4 Domaine d'utilisation :

Le développement des matériaux composites dans les industries de pointe au cours de ces dernières décennies touche désormais des domaines de plus en plus nombreux : aéronautique, spatial, automobile, construction civile, électronique, sport et loisirs, médical etc. Leur succès est dû aux nombreux avantages qu'ils offrent par rapport aux matériaux traditionnels : légèreté, bonne tenue à la fatigue, bonne résistance à la corrosion, possibilité d'obtenir des formes complexes et d'intégrer des fonctions. [13]

I.4.1 Matériaux Composites dans les équipements de sports et loisirs :

Les performances sportives exigent des matériaux performants. Les matériaux composites répondent bien à ces exigences, malgré un coût relativement élevé. Les sports concernés par ces matériaux sont surtout, le tennis, le ski, les sports nautiques etc. Les composites permettent d'augmenter sur mesure les performances, la fiabilité des articles de sports. [13]

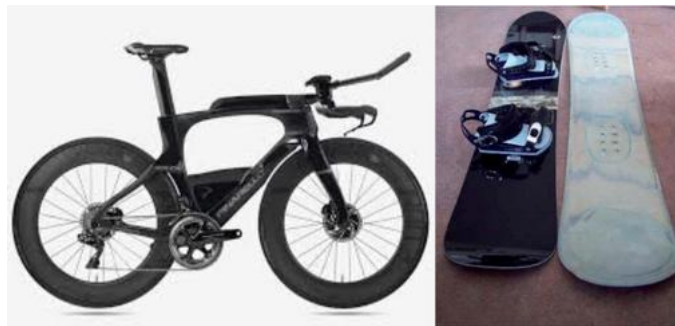


Figure I.10 Pièces de sports et loisirs en matériaux composites

I.4.2 Matériaux composites dans l'aviation :

Les composites hautes performances sont utilisées en aéronautique pour fabriquer des pièces de structure primaire grâce à leur légèreté, leur souplesse et la réduction des coûts de maintenance. D'abord réservés à des parties non critiques, ils sont aujourd'hui employés dans les fuselages et ailes des avions modernes (Boeing, airbus, bombardier). Leur utilisation répond à la demande d'avions plus légers, moins gourmands en carburant et plus respectueux de l'environnement. L'amélioration des procédés de fabrication et des matériaux a favorisé leur adoption dans tout le secteur. [13]



Figure I.11 Premier avion avec une structure toute en carbone

I.4.3 Secteur médical :

Les applications des composites dans le domaine médical et de sécurité sont très récentes et concernent plutôt les composites à hautes performances, à matrice époxy et fibres de carbone, ou à matrice thermoplastique et fibres longues de verre ou de carbone d'autre part [13]



Figure I.12 Matériaux composites dans le domaine biomédical.

I.4.4 Secteur de l'énergie renouvelable :

Les composites sont également très présents dans le domaine des énergies renouvelables, notamment dans la construction de pales d'éoliennes. Leur faible masse et leur grande résistance permettent de fabriquer des pales longues, durables et efficaces. Étant donné l'importance croissante de l'énergie éolienne dans la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre, les matériaux composites jouent un rôle central dans les efforts d'optimisation technologique des systèmes de production d'énergie propre. [13]



Figure I.13 Pales éoliennes en composite de carbone

I.5 Procèdes d'élaboration :

La fabrication d'un matériau composite se déroule généralement en trois étapes fondamentales : [14]

- Imprégnation du renfort par la résine.
- Mise en forme selon la géométrie souhaitée, à l'aide de moules adaptés.
- Durcissement du système, par polymérisation ou cuisson, selon le type de matrice utilisée.

I.5.1 Moulage au contact :

Le procédé consiste à placer dans un moule des renforts (sous forme de mat ou de tissu), puis à les imprégner manuellement d'une résine thermodurcissable, ce procédé permet de fabriquer des pièces de formes variées, mais avec une cadence de production très faible. [15]



Figure I.14 Principe du moulage au contact.

Ce procédé est largement utilisé dans les secteurs aéronautique, aérospatial et du transport (bateaux, trains, automobiles), ainsi que dans le domaine sanitaire (bases de douche en fibre de verre), grâce à la résistance, la légèreté et la durabilité des pièces obtenues.

I.5.2 Moulage par projection simultanée :

Ce procédé, réalisable manuellement ou par robot, permet de fabriquer des pièces en résines thermodurcissables sans application de pression et à température ambiante. La mise en œuvre des matières premières s'effectue au moyen d'une machine de projection spécifique équipée de [15] :

- Un système de coupe-projection pour le renfort fibreux
- Un ou deux pistolets assurant la projection simultanée de la résine

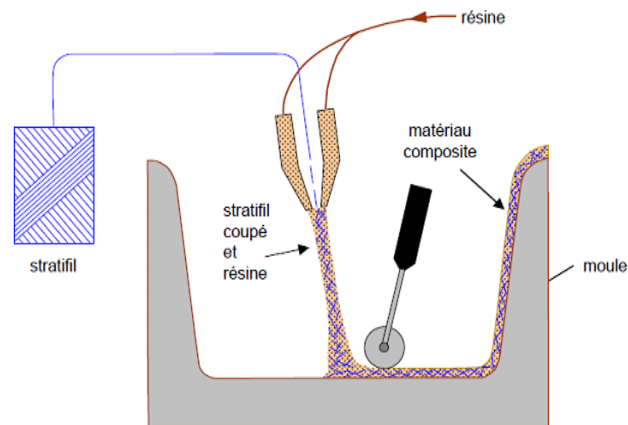


Figure I.15 : Principe du moulage par projection simultanée. [15]

I.5.3 Moulage sous vide :

Le moulage sous vide est une technique plus performante que le moulage au contact, elle permet d'obtenir des pièces composites de formes complexes, avec une meilleure qualité de stratification et moins de défauts liés à l'intervention manuelle. [14]

Le procédé utilise la pression atmosphérique comme contre-moule, ce qui permet de chasser l'air piégé et d'améliorer l'imprégnation des renforts par la résine, il maintient également l'ensemble en place jusqu'au durcissement de la pièce.

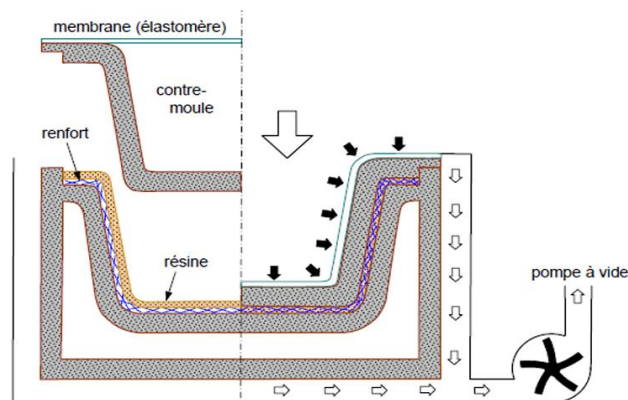


Figure I.16 Moulage sous vide [15]

I.5.4 Enroulement filamentaire :

L'enroulement filamentaire est un procédé utilisé pour fabriquer des pièces composites creuses à section circulaire, comme des tuyaux, réservoirs ou futs sous pression [14]. Le principe consiste à enrouler, autour d'un mandrin, des fibres de renfort imprégnées de résine liquide en passant dans une cuve d'imprégnation.

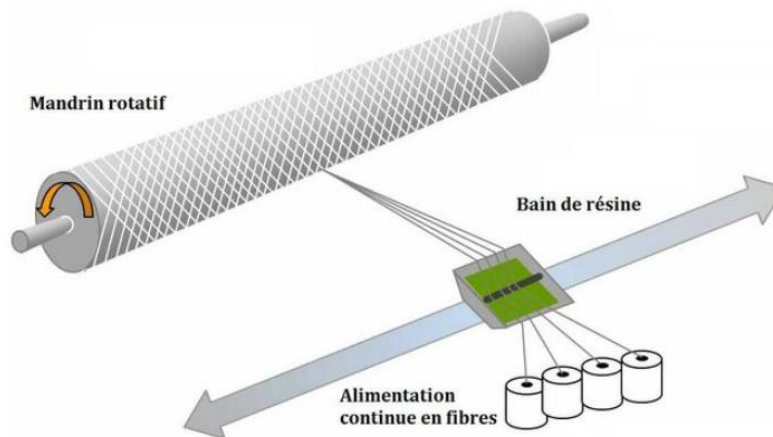


Figure I.17 Enroulement filamentaire [09]

I.5.5 L'infusion :

L'infusion consiste à empiler des renforts secs dans un moule rigide, puis à placer l'ensemble sous vide à l'aide d'une membrane hermétique. [14]

La résine est aspirée à travers l'empilement via un réseau de tissus d'arrachage, films démoulant, grilles de drainage, et bâches à vide. L'étanchéité est assurée par un mastic d'étanchéité, et la circulation de la résine par un ensemble de tuyaux, raccords et connecteurs.

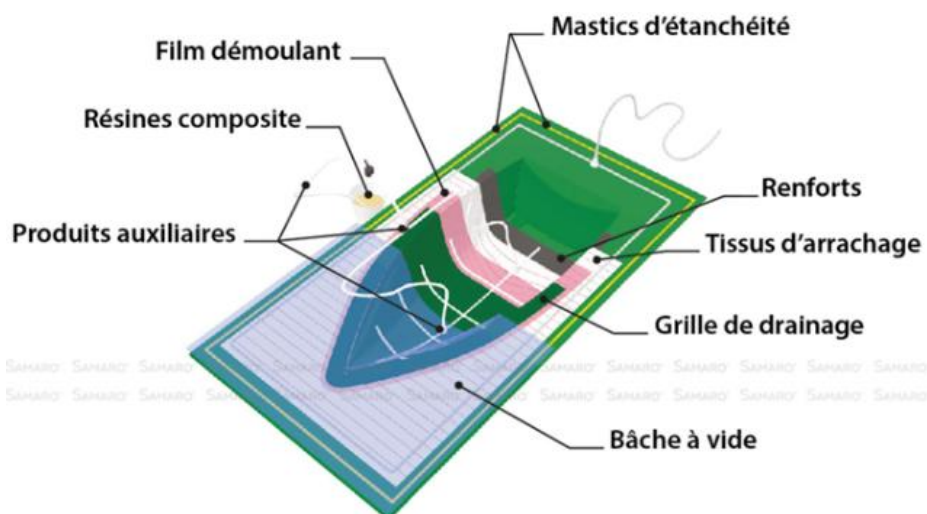


Figure I.18 Le procédé d'infusion pour un moule de coque de bateau [16]

I.5.6 Enroulement par drapage :

Le drapage est un procédé de fabrication de composites qui consiste à déposer manuellement ou mécaniquement des tissus pré-imprègnés sur un moule ayant la forme de la pièce finale. [14]

Une fois le stratifié mis en place, l'ensemble est soumis à une montée en température pour durcir la résine et obtenir une pièce composite à haute performance mécanique.

Ce procédé est particulièrement utilisé pour les pièces aux formes complexes nécessitant une précision élevée, notamment dans l'aéronautique et les sports de haut niveau.

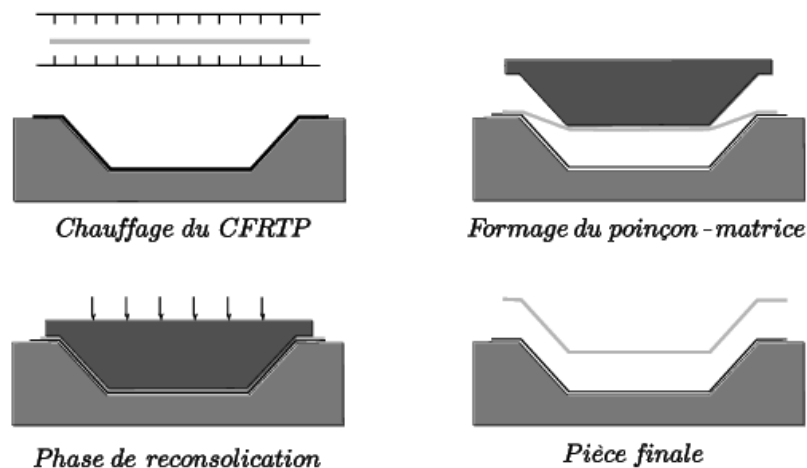


Figure I.19 Le drapage de pré-imprégnés [11]

I.6 Mécanismes d'endommagements dans un composite :

En raison de leur structure hétérogène et de leur anisotropie marquée, les composites stratifiés à fibres longues présentent des mécanismes d'endommagement particulièrement complexes. Sous sollicitations statiques ou cycliques, ces matériaux subissent en effet des dégradations multiformes qui affectent simultanément leurs différents constituants. La matrice polymère peut ainsi développer un réseau de microfissures, tandis que les fibres subissent des ruptures localisées lorsque les contraintes dépassent leur résistance intrinsèque. Parallèlement, les interfaces connaissent des phénomènes de décohésion, tant au niveau des zones de contact fibre/matrice qu'entre les différentes couches du stratifié (délaminage), comme l'illustre la Figure I.20. La rupture finale du matériau résulte de l'accumulation et des interactions entre ces différents modes d'endommagement, qui se manifestent à différentes échelles spatiales - depuis l'échelle micrométrique des interfaces jusqu'à l'échelle macroscopique du stratifié - et dont les effets se potentialisent mutuellement au cours de la sollicitation mécanique. [17]

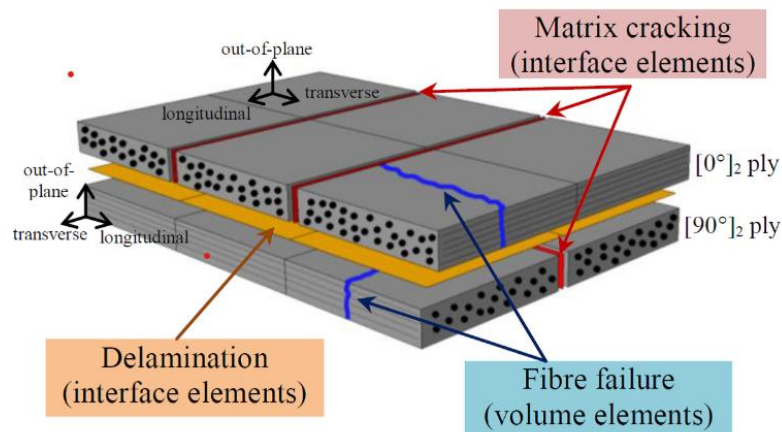


Figure I.20 Différents mécanismes d'endommagement d'un composite stratifié [17]

Les mécanismes d'endommagement des composites dépendent essentiellement du mode de sollicitation. Trois principaux modes d'endommagement peuvent intervenir sur un composite unidirectionnel : les ruptures de fibres, l'endommagement matriciel et la décohésion inter-faciale.[18]

I.6.1 La rupture des fibres :

Les ruptures des fibres débutent au niveau des défauts lorsque la contrainte appliquée dépasse leur résistance maximale (Figure I.21). Cette rupture peut provoquer un arrachement de la fibre au niveau de l'interface, créant ainsi une zone localisée de concentration de contraintes. [18]

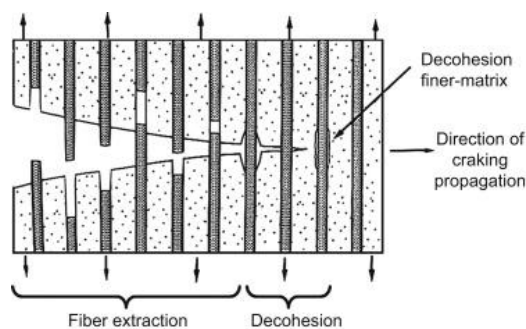


Figure I.21 Rupture de fibre [18]

I.6.2 Fissurations de matrice :

Le phénomène de fissuration se développe en deux étapes distinctes (Figure I.22). Dans un premier temps, des microfissures apparaissent au niveau des défauts intrinsèques de la matrice, tels que les porosités ou inclusions. La fissure progresse ensuite perpendiculairement à la direction de la sollicitation mécanique. Lorsque cette fissure atteint une interface fibre/matrice, deux scénarios sont

possibles : soit une rupture de la fibre, soit un décollement inter-facial, le mécanisme dominant étant déterminé par la qualité de l'adhésion entre la fibre et la matrice. [18]

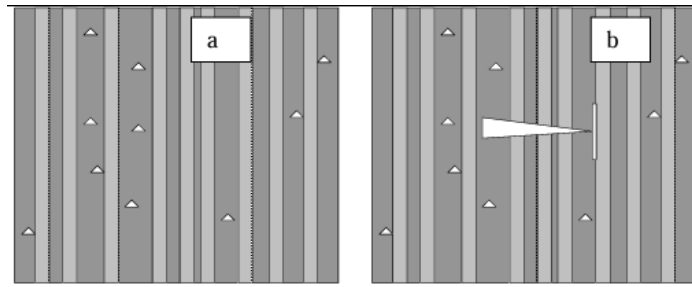


Figure I.22 Initiation (a) et propagation (b) de la fissuration [18]

I.6.3 La rupture de l'interface fibre-matrice :

Les mécanismes de rupture impliquent systématiquement une décohésion à l'interface fibre/matrice. La qualité de cette adhésion conditionne directement le comportement du matériau. Sous sollicitation de traction axiale, deux cas de figure se présentent : avec une interface forte, la rupture est fragile (les fissures se propagent perpendiculairement aux fibres après leur rupture) ; avec une interface faible, le composite se comporte comme un simple faisceau de fibres indépendantes (une fibre rompue ne contribue plus à la résistance mécanique). [18]

Généralement, un mécanisme n'opère pas de manière isolée, mais plusieurs mécanismes coexistent. L'évolution de ces mécanismes dépend des caractéristiques des matériaux et des conditions d'application de contraintes mécaniques imposées. [19]

I.7 Réparations composites par patch collée :

La réparation par collage est une méthode de plus en plus utilisée, notamment dans le domaine aéronautique, en raison de ses nombreux avantages sur les procédés classiques comme le rivetage ou le soudage. Elle permet notamment de réduire le poids, d'éviter les concentrations de contraintes, et de maintenir une bonne résistance à la fatigue. [20]

Conformément aux recommandations de la FAA (2001) [21], la mise sous vide est une étape essentielle pour garantir l'efficacité du patch collé lors de la réparation de structures composites.

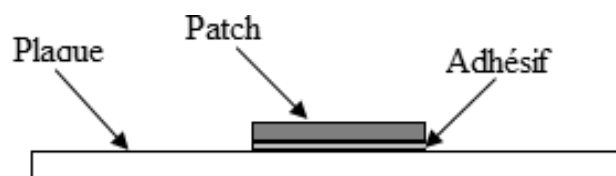


Figure I.23 : Schéma de réparation par patch collée

I.7.1 Méthode de réparation par patch :

Il existe de nombreuses techniques de réparation qui peuvent être ajustées pour une réparation par patch. Les différences entre ces méthodes sont minimales et chacune d'elles pourrait parfaitement s'adapter à notre situation. On distingue deux catégories de patches pour la réparation d'une structure composite endommagée : [22]

- Patches externes.
- Patches internes.

I.7.1.1 Patches externe :

Des patches externes sont appliqués sur la surface des zones dégradées (Figure I.24). L'usage d'un patch externe pour la réparation implique l'insertion d'un bouchon dans la zone « nettoyée », suivie de l'application d'une couche de colle et d'un patch externe. Cette approche nécessite peu de préparation. Elle s'implémente facilement et rapidement. Cependant, la réparation entraîne un renforcement de la structure ainsi qu'une augmentation de son épaisseur. Il est évident que la qualité de cette réparation est fortement liée à la qualité du joint adhésif utilisé. Cette solution suscite actuellement un grand intérêt de la part des secteurs aéronautiques. La performance et la fiabilité de ce genre de réparation sont liées non seulement aux caractéristiques des patches, mais également au comportement mécanique de l'adhésif employé. L'élaboration et l'amélioration de ce genre de réparation se fondent sur une compréhension approfondie du comportement de ce type d'assemblage. [23]

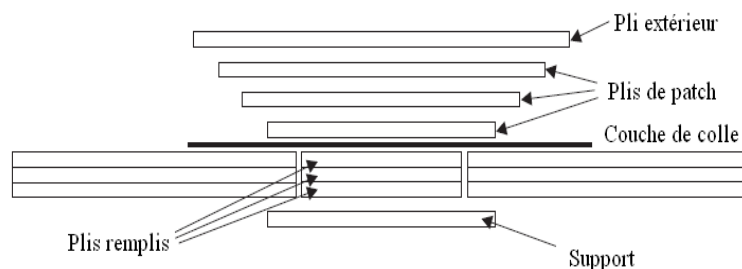


Figure I.24 Schéma de réparation par patch externe [24]

I.7.1.2 Patches interne :

La réparation par patch composite interne est une technique courante pour restaurer l'intégrité des structures aéronautiques endommagées, notamment sur les panneaux sandwich ou les peaux composites. Cette méthode consiste à appliquer un stratifié composite (souvent en pré-impregné carbone/époxy ou fibre de verre) à l'intérieur de la structure, en complément d'un éventuel

patch externe, afin de rétablir les propriétés mécaniques sans alourdir significativement l'ensemble. Les étapes clés incluent [24] :

- Préparation de la surface (dépolissage, dégraissage).
- Application d'un film adhésif structural pour assurer le transfert de charge.
- Polymérisation sous vide et température contrôlée. Les études de Baker et al [13] soulignent que cette approche permet de restaurer jusqu'à 90 % de la résistance initiale tout en minimisant les concentrations de contraintes.

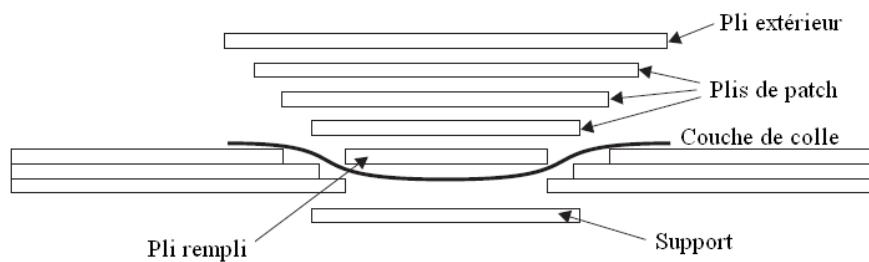


Figure I.25 Schéma de réparation par patch interne [24]

I.8 Conclusion :

Ce chapitre a permis de présenter les matériaux composites dans leur ensemble, en mettant en évidence leur composition, leur classification ainsi que leurs principaux domaines d'application. Ces matériaux offrent des performances mécaniques et physiques élevées tout en assurant une grande légèreté et une bonne résistance. Leur capacité à être façonnés selon des besoins spécifiques les rend particulièrement adaptés à des secteurs exigeants tels que l'aéronautique, le sport, le médical ou les énergies renouvelables.

Les procédés de fabrication, variés et adaptés aux applications visées, jouent un rôle déterminant dans les performances finales des pièces produites. Par ailleurs, la compréhension des mécanismes d'endommagement et des méthodes de réparation, telles que les réparations par patch collé, sont essentielles pour garantir la durabilité et la fiabilité des structures composites.

Chapitre II.

*Comportement vibratoire des
structurelles aéronautiques en
composites*

II.1 Introduction :

L'analyse de structure est un domaine crucial dans l'ingénierie, permettant d'évaluer et de prédire le comportement des structures soumises à diverses sollicitations. Parmi les méthodes les plus importantes, l'analyse dynamique de structure et l'analyse vibratoire de structure jouent un rôle majeur dans la conception et la maintenance des infrastructures, des machines et de divers équipements industriels.

Dans cette partie, nous explorerons les notions des vibrations structurelles, les principes de base de l'analyse dynamique et de l'analyse vibratoire des structures. Vous découvrirez les différentes catégories de forces dynamiques et les types variés de vibrations. Nous expliquerons l'importance de ces analyses et leurs applications concrètes dans divers domaines tels que l'ingénierie, la construction, l'industrie ou l'aéronautique.

II.2 Définition vibration structurelle :

La vibration structurelle désigne le mouvement mécanique répétitif, dans le temps, d'un élément de structure (comme une poutre, une plaque, un châssis ou une aile d'avion), ce phénomène résulte généralement d'un déséquilibre dynamique, d'un choc, d'une force vibratoire appliquée ou d'un couplage avec une autre source de vibration. [25]

Il s'agit d'un aspect fondamental à prendre en compte dans la conception, le dimensionnement et la maintenance des structures, en particulier dans les domaines du génie civil, du transport, de l'aéronautique et des machines industrielles. [25]

Les vibrations structurelles peuvent se manifester dans une grande variété de situations pratiques, tant dans le domaine de l'ingénierie mécanique dans les structures aéronautiques [26], comme exemple : Une aile d'avion qui vibre sous l'effet des turbulences atmosphériques, provoquant des déformations oscillatoires pouvant affecter la stabilité d'avion (Figure II.1).



Figure II.1 : Vibration aile avion

II.3 Paramètres principales de vibration structurelle :

Au cœur de la compréhension des vibrations structurelles se trouvent plusieurs concepts et paramètres clés. Ces principes fondamentaux constituent la base de l'analyse et de la résolution des problèmes de vibration au sein des structures [27]. Les vibrations structurelles sont décrites à l'aide de plusieurs paramètres physiques essentiels :

- **Amplitude** : représente l'intensité ou l'ampleur du mouvement vibratoire. Elle est généralement exprimée en déplacement, vitesse ou accélération.
- **Fréquence** : correspond au nombre d'oscillations par seconde, exprime en Hz, elle détermine la rapidité du mouvement vibratoire.
- **Les modes propres** décrivent les formes spécifiques prises par la structure lorsqu'elle vibre selon l'une de ses fréquences naturelles.
- **La fonction de réponse fréquentielle (FRF)** permet de caractériser le comportement dynamique de la structure en rapportant la réponse mesurée à l'excitation imposée, en fonction de la fréquence. [27]

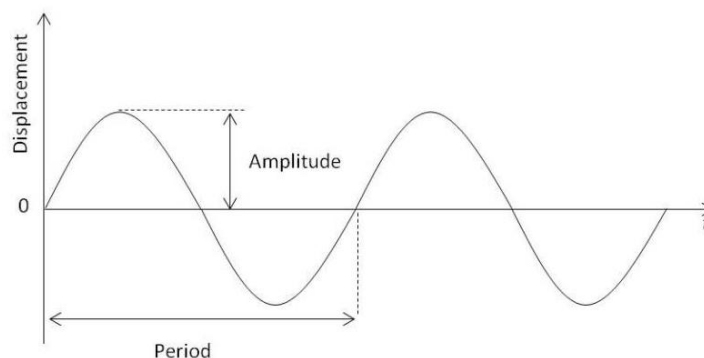


Figure II.2 : Réponse temporelle

II.4 Classification des vibrations :

Les vibrations peuvent être classées de plusieurs manières. Certaines des classifications les plus importantes sont les suivantes : [28]

II.4.1 Vibration libre :

Si un système, après une perturbation initiale, est laissé à lui-même pour vibrer, la vibration qui en résulte est appelée vibration libre. Aucune force extérieure n'agit sur le système. L'oscillation d'un pendule simple est un exemple de vibration libre. [28]

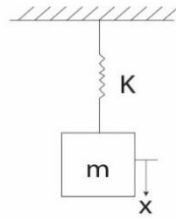


Figure II.3 : Système de vibration libre (masse + ressort).

II.4.2 Vibrations amorties :

L'énergie est progressivement dissipée par le biais de forces de frottement ou de résistances. La compréhension de ces types est fondamentale pour l'ingénierie et la conception de structures sécurisées.

Pendant l'oscillation, la vibration est dite non amortie. En revanche, si une partie de l'énergie est perdue de cette manière, on parle de vibration amortie. Dans de nombreux systèmes physiques, l'amortissement est si faible qu'il peut être négligé dans la plupart des applications en ingénierie.

Cependant, la prise en compte de l'amortissement devient extrêmement importante lorsqu'on analyse des systèmes vibratoires proches de la résonance. [28]

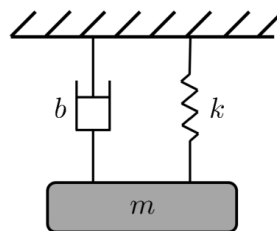


Figure II.4 : Système de vibration amortie (masse + ressort + amortisseur).

II.4.3 Vibration forcée :

Si un système est soumis à une force extérieure, la vibration qui en résulte est appelée vibration forcée. L'oscillation produite dans une structure telle qu'une aile d'avion est un exemple de vibration forcée.

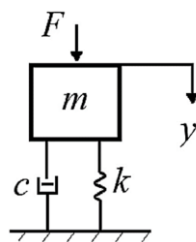


Figure II.5 : Système de vibration forcée (masse + ressort + amortisseur + force).

Chapitre II : Comportement vibratoire des structures aéronautiques en composites

Si la force extérieure coïncide avec l'une des fréquences naturelles du système, une condition appelée résonance se produit, et le système subit des oscillations d'une amplitude dangereusement élevée. Des défaillances de structures telles que les ailes d'avion ont été associées à l'apparition de la résonance [28]. Ce type de vibration génère des phénomènes plus ou moins périodiques ou apériodiques complexe. Les forces générées sont présentées et résumées ci-dessous :

- Forces impulsionnelles (chocs)
- Forces transitoires (variations de charge)
- Forces périodiques (balourd)
- Forces aléatoires (frottements)

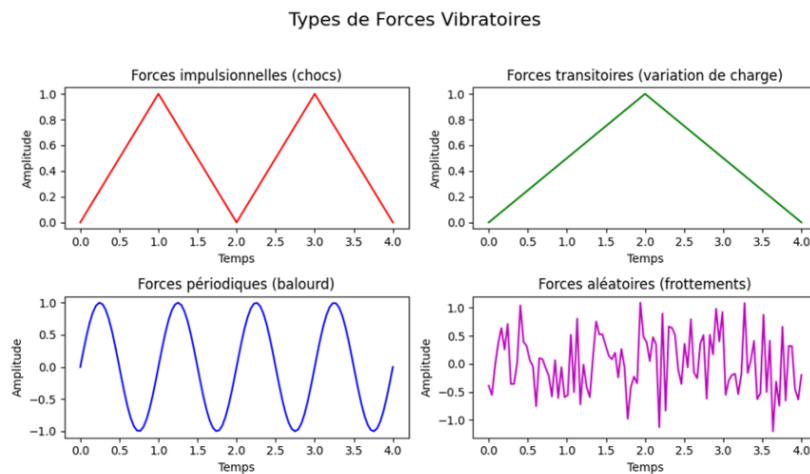


Figure II.6 : Présentations typique des différents types des forces vibratoires

II.5 Causes des vibrations structurelles en aéronautique (composites) :

Les matériaux composites, tels que les fibres de carbone, de verre, ou les matrices polymères, sont couramment utilisés dans l'industrie aéronautique en raison de leur faible masse volumique et de leur haute résistance mécanique. Cependant, ils présentent un comportement vibratoire particulier lié à leur anisotropie, c'est-à-dire des propriétés mécaniques différentes selon les directions (longitudinale, transversale, etc.). [29]

Selon deghboudj (2022) [29], l'anisotropie des matériaux composites influe directement sur leurs fréquences naturelles et leurs modes de vibration, rendant leur analyse plus complexe que celle des matériaux isotropes, cette spécificité peut induire des risques accrus de résonance locale, notamment dans les structures minces ou les pièces de revêtement (coques, ailes, panneaux).

Les vibrations peuvent être amplifiées lorsque la structure composite est soumise à des excitations mécaniques ou aérodynamiques proches de ses fréquences propres. Ainsi, la compréhension du comportement dynamique des composites est essentielle pour garantir la fiabilité, la durabilité et la sécurité des aéronefs.

Chapitre II : Comportement vibratoire des structures aéronautiques en composites

Les vibrations indésirables dans les avions notamment dans les ailes, le fuselage et les empennages réalisés en matériaux composites peuvent provoquer :

- Des pertes de performance aérodynamique.
- Une fatigue accélérée des matériaux.
- Avoir des défaillances structurelles graves.

II.5.1 Défauts de fabrication :

Les matériaux composites utilisés en aéronautique peuvent présenter divers défauts introduits lors de leurs fabrications, tels que : [30]

- Inclusions de particules étrangères.
- Décollements de couches (délaminages).
- Présence de bulles d'air.
- Mauvaise imprégnation de la résine.

Ces défauts altèrent localement la rigidité et l'homogénéité mécanique de la structure, créant des zones faibles plus susceptibles de vibrer ou de résonner sous excitation mécanique ou aérodynamique.

Les délaminages et les porosités modifient significativement la réponse dynamique des structures composites, notamment en réduisant les fréquences naturelles locales et en amplifiant certains modes vibratoires, La présence de défauts internes perturbe la transmission des efforts dans le matériau et peut déclencher une instabilité dynamique. [30]

II.5.2 Fatigue des matériaux composites :

Les matériaux composites utilisés en aéronautique sont soumis, au cours de leur vie en service, à des cycles répétés de charge et de décharge. Cette exposition prolongée induit progressivement des fissures internes dans la matrice ou entre les fibres, souvent invisibles en surface, ce phénomène est caractéristique de la fatigue des matériaux composites. L'accumulation de ces dommages internes modifie les propriétés dynamiques globales de la structure, en particulier :

- Une diminution de la fréquence propre.
- Une augmentation de l'amortissement.
- Une altération de la rigidité effective.

Ces modifications vibratoires sont des indicateurs sensibles de l'endommagement, même lorsque les défauts ne sont pas détectables visuellement, il est donc essentiel de recourir à la surveillance vibratoire pour détecter l'évolution de la fatigue et prévenir les défaillances en service. [31]

Chapitre II : Comportement vibratoire des structures aéronautiques en composites

II.5.3 Résonance structurelle :

Les structures aéronautiques, notamment celles constituées de matériaux composites, sont sujettes à des phénomènes de résonance lorsque la fréquence d'excitation externe (d'un moteur, de la turbulence, ou de vibrations aérodynamiques) se rapproche de la fréquence propre de certaines parties de l'avion (aile, fuselage, empennage, etc.), ce phénomène provoque une amplification des vibrations, potentiellement destructrice.

Ce risque est accentué dans les composites, car leur capacité d'amortissement est généralement plus faible que celle des matériaux métalliques traditionnels, ce qui rend la résonance plus critique (Belghamri et Ben Khoukha, 2017) [32].

De plus, les structures composites anisotropes peuvent présenter un couplage entre les modes de flexion et de torsion, ce couplage complique le comportement vibratoire global et peut conduire à des instabilités dynamiques, telles que le flutter. Cette instabilité aérodynamique peut apparaître de façon soudaine si plusieurs modes vibratoires se combinent de manière non linéaire. [32]

II.6 Systèmes de contrôle des vibrations structurelles :

La maîtrise des vibrations dans les structures aéronautiques composites repose sur différents types de systèmes de contrôle, classes en trois grandes catégories : [33]

Type de système	description	Exemples	Avantages
Passif	Absorbe l'énergie vibratoire sans alimentation externe. Fonctionne par dissipation mécanique	Matériaux viscoélastiques, couches amortissantes, joints en caoutchouc	fiables et peu coûteux, mais limites en performance.
Actif	Utilise des capteurs pour détecter les vibrations et des actionneurs pour générer une réponse opposée, en temps réel .	Capteurs + actionneurs + unité de contrôle électronique	contrôle précis et adaptif, idéaux pour les structures composites modernes sensibles à la résonance.
Semi-actif	Ne génère pas d'énergie opposée, mais ajuste dynamiquement ses propriétés mécaniques en fonction des vibrations.	Amortisseurs a fluide magnéto-rhéologique, systèmes a friction variable	efficaces, adaptables, et avec une consommation énergétique réduite.

Tableau II.1 : Comparatif des systèmes de contrôle vibratoire

Chapitre II : Comportement vibratoire des structures aéronautiques en composites

L'industrie aéronautique met en œuvre des systèmes de contrôle actif des vibrations (Active vibration control-AVC), souvent intégrés dans des structures composites intelligentes. [34]

Ces systèmes reposent sur l'intégration de capteurs et actionneurs capables de détecter les déformations locales et d'appliquer une réponse corrective en temps réel, ces technologies permettent de réduire efficacement les vibrations, même en présence de défauts internes comme des délaminages ou un décollement partiel des capteurs, cela améliore non seulement la fiabilité dynamique des structures, mais aussi leur durée de vie opérationnelle. [34]. Cette section traite du contrôle actif des vibrations par la méthode analyse vibratoire tel qu'il s'applique à notre travail.

II.7 Analyse vibratoire de structure :

L'analyse vibratoire de structure se concentre sur l'étude des réponses d'une structure à des forces variables dans le temps, comme celles dues au vent ou aux impacts. Contrairement à l'analyse statique, qui considère des forces constantes, l'analyse vibratoire prend en compte les effets du mouvement et des vibrations sur le comportement des éléments structuraux.

Les principes de base de l'analyse vibratoire reposent sur la modélisation de la structure et l'application des lois de la mécanique. Les ingénieurs utilisent des modèles mathématiques pour simuler le comportement dynamique, en intégrant des paramètres tels que la masse, la rigidité et l'amortissement. Ces modèles aident à prédire comment une structure réagira sous différentes conditions de charge.



Figure II.7 : Essais de vibrations [35]

L'objectif principal de l'analyse vibratoire est d'éviter un maximum de panne. Les roulements faisant parties des éléments les plus importants d'une machine tournante, les défauts sur ces éléments seront d'avantage pris en considération. De plus, l'analyse vibratoire permettra de mettre en évidence un grand nombre de problèmes entraînant une diminution de la durée de vie des

Chapitre II : Comportement vibratoire des structures aéronautiques en composites

éléments de la machine : résonance de structure, balourd, mauvaise fixation des roulements, tension trop élevée des courroies, mauvais alignement d'une ligne d'arbre.

II.7.1 Activités de l'analyse vibratoire :

On distingue deux principales activités :

- La surveillance.
- Le diagnostic.

L'outil de mesure enregistre le signal vibratoire brut, ensuite on définit des indicateurs calculés à partir de ce signal en fonction des besoins de l'analyse. Il existe deux types d'indicateurs :

- Indicateur de surveillance.
- Indicateur de diagnostic.

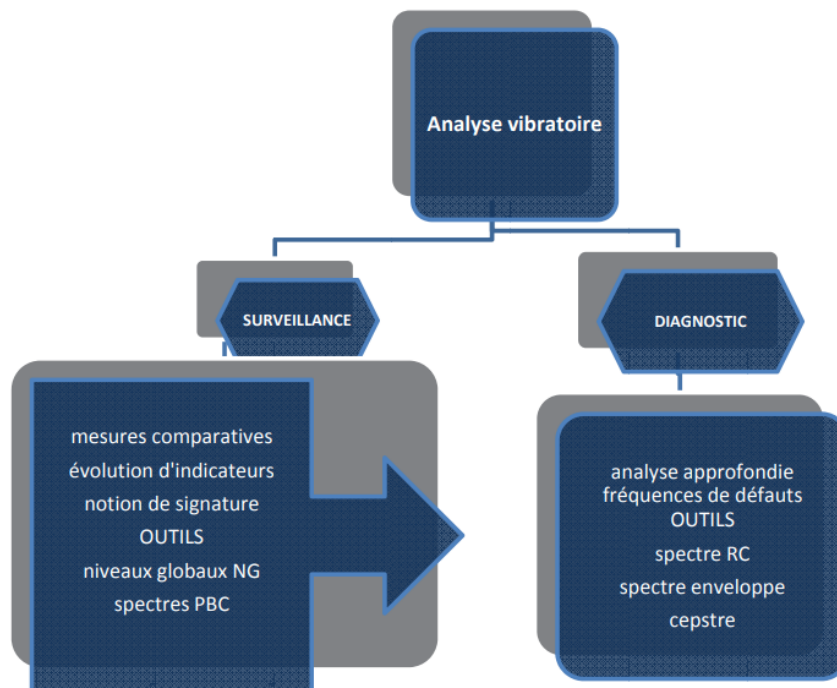


Figure II.8 : Activités de l'analyse vibratoire

II.8 Les méthodes d'analyse vibratoire :

L'analyse vibratoire utilise plusieurs méthodes pour mesurer et évaluer les vibrations d'une structure. Parmi les méthodes les plus courantes, on trouve :

- **Mesures expérimentales** : Utilisation d'instruments tels que les **accéléromètres** pour mesurer les vibrations en temps réel.



Figure II.9 : Technique de mesure expérimentale [36]

- **Analyses modales :** Cette méthode permet d'identifier **les fréquences naturelles** de vibration et les modes de déformation d'une structure.
- **Méthodes numériques :** Les logiciels d'analyse par éléments finis (FEA) sont utilisés pour simuler le comportement vibratoire sous diverses conditions.

Ces méthodes offrent des informations précieuses pour le diagnostic de défaillances, le contrôle de la maintenance et l'optimisation des conceptions.

II.9 Analyse modale expérimentale :

L'analyse modale expérimentale permet d'identifier les paramètres structuraux dynamiques ou paramètres modaux d'une structure tels que : les fréquences de résonance, l'amortissement et les déformées modales. L'analyse de système détermine les caractéristiques propres d'une structure (comme ses paramètres dynamiques), à partir d'une excitation mesurée et d'une observation de la réponse (Figure II.10), elle permet d'obtenir un modèle dynamique précis du système [37]. L'analyse modale permet de décrire précisément la réponse dynamique d'une structure à partir de données expérimentales. Elle aide à valider les choix de conception et à créer un modèle modal utile pour simuler des modifications structurelles ou anticiper les performances dans d'autres conditions de fonctionnement. [38]

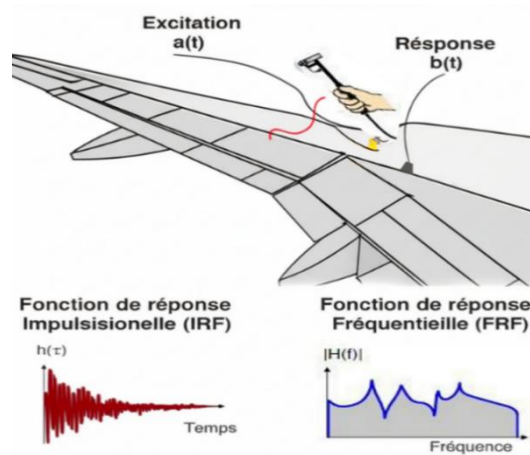


Figure II.10 : Analyse de système

La réalisation d'un essai d'analyse modale nécessite généralement la mesure de la réponse vibratoire de la structure ainsi que de la force d'excitation en différents points permettant ainsi le calcul de la Fonction de Réponse en Fréquence (FRF). Les méthodes à référence unique appelées SISO (Single Input Single Output) ou SIMO (Single Input Multiple Outputs) mesurent respectivement une ou plusieurs FRF sur la structure. Les méthodes conventionnelles d'excitation sont généralement le pot vibrant et le marteau d'impact [39].

L'analyse de système détermine les caractéristiques propres d'une structure (comme ses paramètres dynamiques), à partir d'une excitation mesurée et d'une observation de la réponse, elle permet d'obtenir un modèle dynamique précis du système. [37]

II.9.1 Moyens et outils de mesures :

Avant l'usage des instruments modernes, l'homme détectait certains défauts mécaniques par ses sens (toucher, ouïe, vue), Ces mesures subjectives sont maintenant complétées par les mesures objectives fournies par les capteurs actuels. Il n'en faut cependant pas les mépriser ni les délaissier, car elles apportent un complément utile à l'interprétation et à la prise de décision. À cause de développement de l'industrie il faut développer les moyens et les outils de mesures (capteur, logiciel de traitement de l'information...etc.). Le calcul et la visualisation des paramètres modaux sont possibles à l'aide d'une analyse des signaux d'excitation et des réponses de la structure. Le montage expérimental typique peut comporter les éléments comme montre la Figure II.11

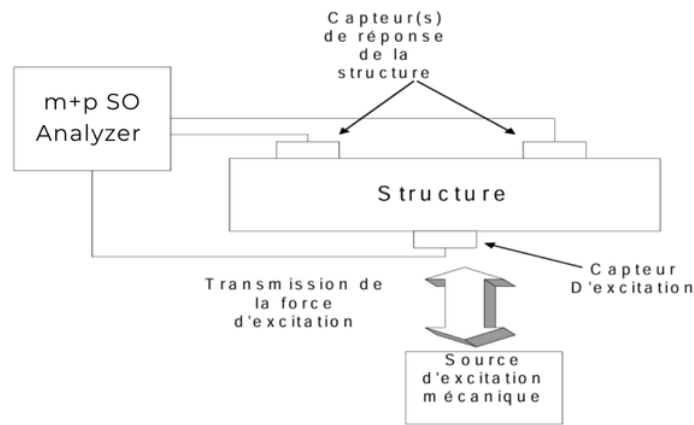


Figure II.11 : Montage expérimental d'une analyse modale.

II.9.1.1 Chaîne d'acquisition numérique :

Une chaîne d'acquisition numérique garantit une acquisition fidèle des données pour l'analyse vibratoire (Figure.II.12).

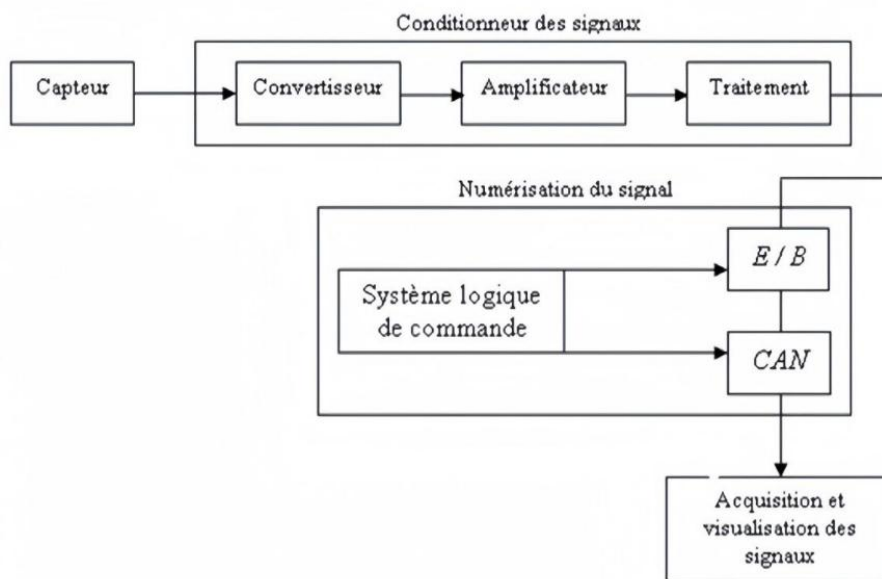


Figure II.12 : Chaîne d'acquisition numérique

Les composants principaux de cette chaîne d'acquisitions utilisées dans les essais de vibration, à savoir :

- **Les capteurs** : ils sont chargés de la mesure proprement dite. Leurs caractéristiques autant physiques que fonctionnelles offrent une large gamme de choix permettant leur emploi dans les différents types d'essais de vibrations.
- **Les conditionneurs** : premier élément de la chaîne d'acquisition après le capteur, ils ont un rôle important sur la qualité de la mesure.

Chapitre II : Comportement vibratoire des structures aéronautiques en composites

Le signal issu du capteur est transformé par un conditionneur de signaux qui comprend généralement les éléments suivants :

- **Convertisseur de mesure** : qui transforme généralement le signal en un courant électrique aisément transportable dans les chaînes d'acquisitions modernes.
- **L'amplificateur** : qui a pour but d'augmenter l'intensité du signal et de le rendre moins sensible au bruit de fond ambiant.

Plusieurs dispositifs de traitement de signal, mettant en œuvre des fonctions très variées allant des filtres aux corrélations entre signaux en passant par la conversion en valeur efficace ou la linéarisation. En sortie du conditionneur de signaux, le signal est échantillonné et numérisé par les éléments suivants :

- **L'échantillonneur bloqueur (E/B)** a pour mission, au moment indiqué par le système logique de commande, de filtrer la valeur instantanée du signal puis le convertisseur analogique numérique effectue sa conversion.
- **Le convertisseur analogique numérique (CAN)** a pour rôle de coder la valeur instantanée du signal en entrée en un nombre. Son fonctionnement est géré par le système logique de commande qui peut être un microprocesseur.

II.9.1.2 Principe de fonctionnement :

Le capteur produit un signal analogique proportionnel aux vibrations mesurées. Ce signal est ensuite amplifié et converti en tension par un conditionneur. Avant d'être analysé numériquement (via la transformation de Fourier), il doit être numérisé par un convertisseur analogique-numérique.

II.9.1.3 Capteurs :

C'est le premier maillon de toute une chaîne de mesure, acquisition de données, de tout système d'asservissement, régulation et de tout dispositif de contrôle. Le capteur est un organe chargé de prélever une grandeur physique à mesurer et de la transformer en une grandeur exploitable. Donc c'est un organe de saisie d'informations selon la gamme des fréquences étudiées les capteurs doivent mesurer soit le déplacement, soit la vitesse ou l'accélération dans les phénomènes d'analyse vibratoire. Pour chaque grandeur on utilise un capteur spécifique comme suite :

- Le capteur de déplacement régi par principe de courant de Foucault.
- Le capteur de vitesse régi par principe électrodynamique.
- Le capteur d'accélération régi par principe piézo-électrique.

Il existe des capteurs spécifiques à chacun de ces paramètres mais l'accéléromètre ou le capteur d'accélération est le type de sonde le plus utilisé dans l'analyse vibratoire en raison de sa large gamme de fréquences d'utilisation (il peut mesurer un déplacement ou une vitesse) et il est caractérisé par une faible dimension.

II.9.1.3.1 Capteurs de déplacement :

Le proximètre (Figure II.13), également appelé sonde de proximité, est un capteur de déplacement sans contact. Il génère un signal électrique proportionnel au déplacement relatif d'un arbre ou d'un rotor en vibration. Cependant, les mesures de déplacement ne sont pas précises sur toutes les plages de fréquences. Ce type de capteur est principalement utilisé dans les applications où la surveillance des jeux mécaniques entre les arbres et les paliers est cruciale. C'est pourquoi on les retrouve fréquemment installés sur les turbines hydroélectriques et autres turbomachines. [40]

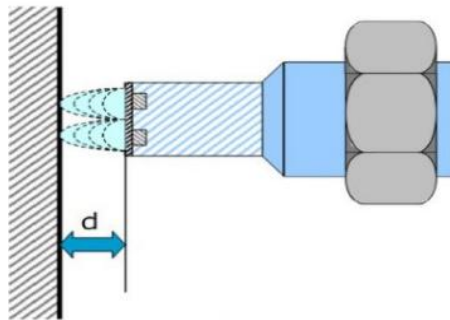


Figure II.13 : Capteur de Déplacement

II.9.1.3.2 Capteurs de vitesse :

Les capteurs de vitesse (Figure II.14), également nommés vélocimètres, intègrent une sonde à contact de type sismique mesurant le mouvement absolu de la pièce mécanique sur laquelle ils sont montés.

Les modèles les plus courants sont constitués d'une masse sismique reliée au boîtier par un ressort et solidaire d'une bobine mobile placée dans un champ magnétique permanent généré par un barreau aimanté. Lorsque le palier portant le capteur vibre, le déplacement de la bobine dans ce champ magnétique induit une tension électrique directement proportionnelle à sa vitesse de déplacement.

Ces capteurs présentent généralement une fréquence de résonance située entre 8 et 15 Hz, tandis que leur gamme de fonctionnement utile s'étend typiquement de 20 à 2000 Hz, couvrant ainsi une large plage de mesures vibratoires industrielles. [40]

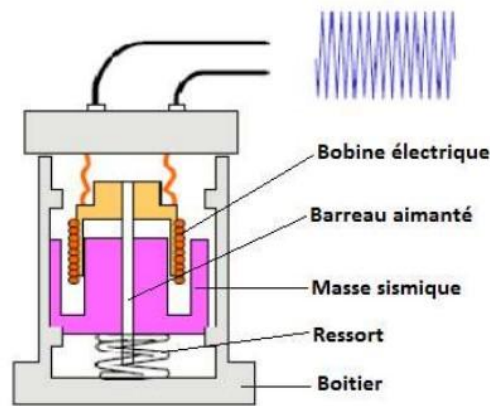


Figure II.14 : Capteur de vitesse

II.9.1.3.3 Capteurs d'accélération :

L'accéléromètre (Figure II.15) utilise un disque en matériau piézoélectrique (comme le quartz) qui sert à la fois d'élément élastique et de transducteur. Une masse sismique, maintenue en position précontrainte, est supportée par ce disque. Lorsque l'accélération provoque le déplacement de la masse, celle-ci applique des contraintes mécaniques sur le disque piézoélectrique. Cette déformation génère alors une charge électrique en surface, dont l'amplitude est directement proportionnelle à l'accélération subie. [40]

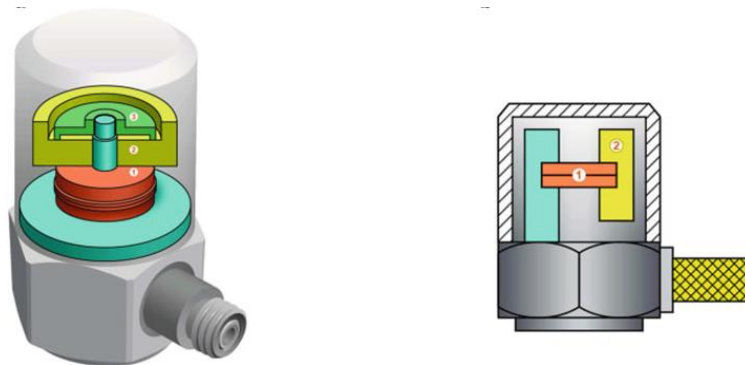


Figure II.15 : Capteur d'accélération

II.9.1.4 Enregistreurs :

Les informations sont collectées : soit sur magnétophones portatifs qui conservent le signal en analogique et permettent pour certains de prendre la mesure de plusieurs points simultanément et d'étudier le déphasage révélateur de nombreux défauts. Soit sur des appareils d'enregistrements qui souvent d'un encombrement plus faible et qui permettent la programmation de la tournée d'inspection.



Figure II.16 : Enregistreurs de type « SIEMENS SCADAS Recorder » [41]

II.9.1.5 Analyseurs :

Ces appareils permettent de disséquer le signal d'une mesure globale afin d'aider au diagnostic. Il Ya plusieurs types d'analyseur qui sont :

- Analyseur de mesures globales.
- Analyseur à filtre accordable.
- Analyseur du spectre en temps réel (FFT).

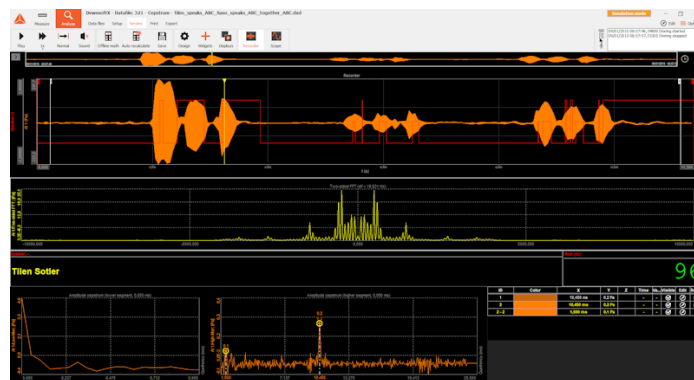


Figure II.17 : Analyseur du spectre FFT « DEWSOFT » [42]

Ce dernier convertie les données temporelles en données fréquentielles et permet de voir tous les changements intervenus dans le domaine des fréquences. Il fait automatiquement la transformation de Fourier soit par un système analogique soit par un système numérique

Les analyseurs de spectres et ces logiciels associés permettent d'effectuer un certain nombre d'opérations :

- **Zoom** : c'est une fonction de recherche plus fine dans le signal, elle permet d'afficher une bande de fréquence réduite sur toute la largeur d'écran.
- **Différentiation et intégration** : des données prélevées par un accéléromètre peuvent être converti par intégration en vitesse et déplacement et inversement.

- **Comparaison de spectre** : les comparaisons des spectres sont possibles grâce à la mise en mémoire des informations et à leur exploitation par le logiciel.

II.10 Traitement de signal :

L'information utile au diagnostic doit être contenue dans le signal d'origine. Elle doit être reconnaissable, le premier élément de la chaîne est le capteur. Son choix (type, localisation) et les dispositifs de traitement de signal sont des éléments déterminants de la qualité du diagnostic. Le traitement du signal est la discipline technique qui, s'appuyant sur les ressources de l'électronique, de l'informatique et de la physique appliquée, a pour objet l'élaboration ou l'interprétation des signaux. Son champ d'application se situe dans les domaines concernés par la perception, la transmission ou l'exploitation des informations véhiculées par ces signaux.

II.10.1 Transformé de FOURIER :

La décomposition d'un signal vibratoire périodique complexe en ses différentes composantes sinusoïdales, représentées chacune par leur amplitude A_i et leur fréquence F_i est réalisée par une transformation temps-fréquence appelée transformée de fourier. Cette fonction mathématique réalise une transposition du signal de l'espace temporel vers l'espace fréquentiel. La représentation du signal obtenu est appelée un spectre en fréquences. La transformée de FOURIER est implémentée dans les analyseurs de spectre modernes sous une forme appelée FFT (fast fourier transform).

Cette transformation produit un spectre complexe contenant des informations d'amplitude et de phase pour chaque fréquence. La transformée inverse permet de revenir au signal temporel original. Pour obtenir une estimation fiable de la densité spectrale [43], des techniques de moyennage sont appliquées, permettant :

- D'éliminer le bruit aléatoire.
- Et d'augmenter la confiance statistique des résultats.

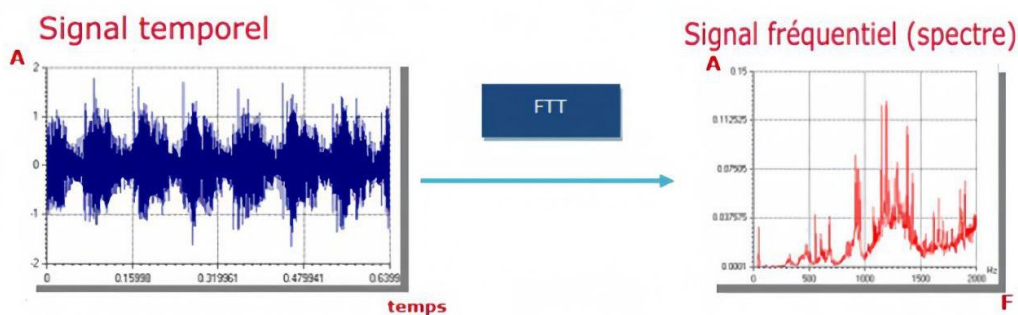


Figure II.18 : FFT d'un signal réel

II.10.2 Fonction de réponse fréquentielle (FRF) :

II.10.2.1 Définition des FRF :

La fonction de réponse fréquentielle décrit le comportement dynamique d'un système en fonction de la fréquence. Elles caractérisent la relation entre une force d'excitation appliquée et la réponse vibratoire mesurée, généralement en déplacement, vitesse ou accélération. [44]

Les FRF sont couramment utilisés dans diverses applications d'ingénierie, notamment l'analyse structurelle, les essais de vibrations structurelles et la conception de systèmes de contrôle. Ils jouent un rôle crucial dans la prédiction et l'optimisation de la réponse des structures et des systèmes mécaniques aux excitations externes, garantissant ainsi leur fiabilité, leur sécurité et leurs performances.

Les FRF dépendent uniquement des propriétés du système (masse, raideur, amortissement) et non de l'amplitude des forces appliquées, sous hypothèse que le système est : Linéaire, Invariant dans le temps, Observable et Réciproque.

Les FRF sont mesurés entre un transducteur de référence (force ou excitation) et un ou plusieurs transducteurs de réponse (accéléromètres, capteurs de déplacement, etc.). Elles contiennent des informations sur : [44]

- **L'amplitude de la réponse**, représente l'amplification ou l'atténuation du signal d'entrée à chaque fréquence.
- **La phase** indique le retard temporel ou le déphasage entre les signaux d'entrée et de sortie

Sur un courbe FRF typique :

- On observe des pics aux fréquences de résonance.
- Des creux aux fréquences d'antirésonance.

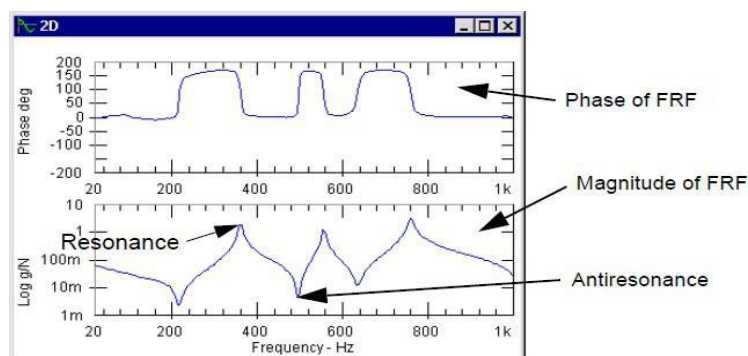


Figure II.19 : FRF magnitude et phase

Chapitre II : Comportement vibratoire des structures aéronautiques en composites

Dans ce cas, la fonction de réponse fréquentielle (FRF) présente certaines propriétés spécifiques :

La partie imaginaire de la FRF est entièrement positive ou négative, selon la convention de signe adoptée pour les directions de l'entrée et de la sortie.

Les pics ou creux de cette partie imaginaire correspondent directement aux fréquences de résonance du système. [44]

Ces variations sont visibles sur le graphique de la FRF, comme illustre à la figure II.20.

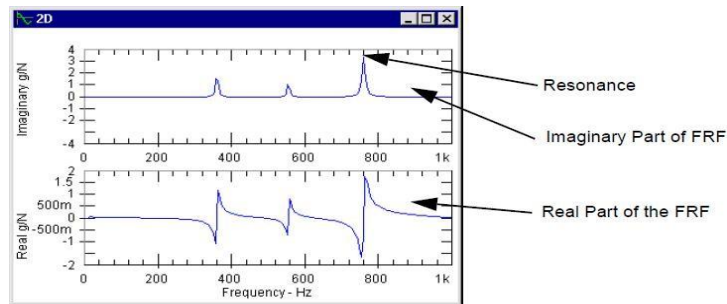


Figure II.20 : Pièces réelles et imaginaires du point de commande FRF.

II.10.3 Fréquences modales :

Les fréquences modales, aussi appelées fréquences de résonance, sont les paramètres dynamiques les plus simples à identifier lors d'une analyse modale.

La résonance se manifeste par l'apparition d'un pic marqué dans le spectre d'amplitude de la fonction de réponse en fréquence (FRF). Grâce à l'analyseur de spectre, il est possible d'utiliser un curseur pour se déplacer d'un pic à l'autre et relever précisément les valeurs des fréquences de résonance. [45]

Cependant, la précision de la mesure dépend fortement de la résolution fréquentielle de l'analyseur. Une meilleure résolution peut être obtenue :

- En réduisant la bande passante analysée.
- Ou en réalisant un zoom spectral autour de la fréquence d'intérêt [45].

II.11 L'analyseur bi-canal FFT :

L'analyseur bi-canal FFT convertit les signaux analogiques d'entrée en données numériques, puis calcule automatiquement les FRF via la transformation de fourrier rapide. Il nécessite uniquement deux signaux :

- Un pour la force d'excitation.
- Un pour la réponse.

Chapitre II : Comportement vibratoire des structures aéronautiques en composites

Les enregistrements numériques issus de l'échantillonnage représentent les variations temporelles du signal mesure. Deux paramètres influencent directement la qualité de l'analyse : [43]

- **La vitesse d'échantillonnage**, qui définit la fréquence maximale observable (selon le théorème de nyquist).
- **La longueur de l'enregistrement**, qui détermine la résolution fréquentielle.

II.12 Fenêtrage du signal :

Chaque enregistrement temporel peut être pondéré par une fonction fenêtre, afin de réduire les effets de fuite spectrale. Cette pondération permet de lisser les transitions au début et à la fin des signaux, et de mieux adapter les données à l'analyse par blocs. [43]

II.13 L'excitation :

Pour mesurer la mobilité, on doit exciter la structure de façon contrôlée, mais la forme du signal d'excitation reste libre, à condition que la force soit mesurable.

II.13.1 Excitation par impact :

L'excitation par impact, généralement réalisée à l'aide d'un marteau d'instrumentation, est une méthode courante en analyse modale. Elle génère une impulsion brève transférant de l'énergie sur un large spectre de fréquences, avec une intensité maximale à basse fréquence qui diminue ensuite. La forme du spectre dépend de la durée de l'impact, elle-même influencée par la masse et la raideur du système et du marteau, le choix de l'embout du marteau permet d'ajuster la fréquence de coupure, car il agit comme un filtre mécanique. [46]

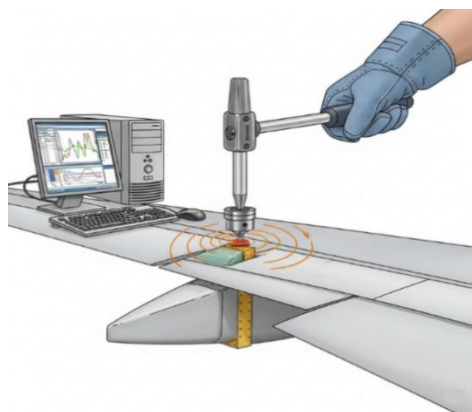


Figure.II.21 L'excitation par impact

Avantages des essais d'analyse modale par marteau d'impact :

- Rapidité d'exécution.

- Absence de fixations spéciales.
- Préservation de la masse structurelle.
- Cout réduit.

Inconvénients de la méthode par marteau d'impact :

- Sensibilité aux non-linéarités.
- Risque de dommages sur grandes structures.
- Signal déterministe difficile à adapter.
- Fonction de cohérence limitée.

II.14 Détermination de la déformée modale :

La méthode la plus simple pour déterminer la déformée modale d'une structure consiste à utiliser la méthode des quadratures. Cette technique repose sur hypothèse que le couplage entre les modes est faible, c'est-à-dire que chaque mode peut être analysé de manière relativement indépendante des autres. Elle permet d'estimer la forme de vibration associée à chaque fréquence modale, en identifiant les amplitudes relatives de réponse en différents points de la structure. [46]

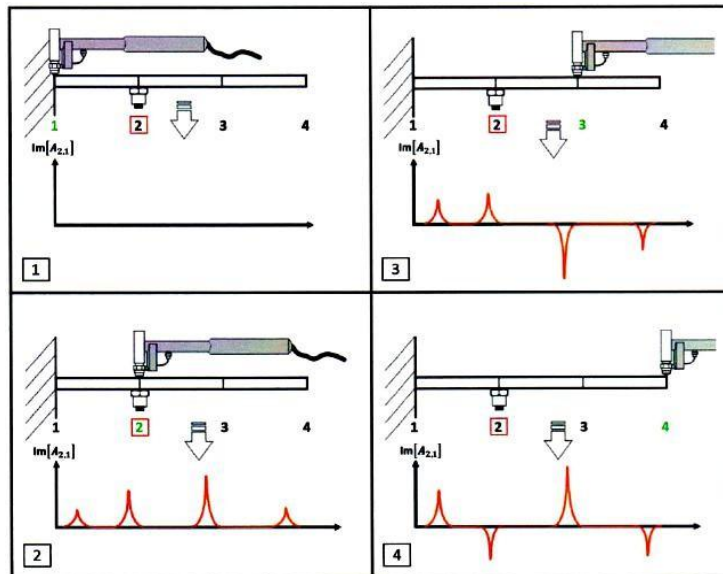


Figure.II.22 Exécution d'une excitation sur 4 points (n en vert 1, 2, 3,4)

En pratique, les structures mécaniques sont généralement faiblement amorties (facteur d'amortissement $< 1\%$), ce qui justifie hypothèse de faible couplage entre modes. Cela facilite l'analyse modale expérimentale, notamment par l'application de la méthode des quadratures.

Autour d'un point de mesure fixe, on effectue des excitations en différents points de la structure, tout en relevant la partie imaginaire de la fonction de réponse en fréquence (FRF)

Chapitre II : Comportement vibratoire des structures aéronautiques en composites

pour chaque point. A n'importe quelle fréquence, l'amplitude de la FRF représente la somme des contributions de l'ensemble des modes excités.

Cependant, lorsqu'un léger couplage modal est présent, la réponse dynamique de la structure autour d'une fréquence propre reste dominée par un seul mode. Dans ce cas, la méthode des quadratures peut être utilisée avec fiabilité pour isoler la contribution de ce mode et ainsi reconstituer sa déformée modale, malgré la présence résiduelle d'autres contributions modales. [46]

Cela facilite l'analyse modale expérimentale, notamment par l'application de la méthode des quadratures. Autour d'un point de mesure fixe, on effectue des excitations en différents points de la structure, tout en relevant la partie imaginaire de la fonction de réponse en fréquence (FRF) pour chaque point. A n'importe quelle fréquence, l'amplitude de la FRF représente la somme des contributions de l'ensemble des modes excités.

En présence d'un couplage faible entre les modes, la réponse structurale est dominée par le mode considéré. Dans ce cas, la méthode de quadrature peut être utilisée pour isoler et interpréter clairement la déformée modale associée. [46]

II.15 Conclusion :

Les vibrations sont le résultat de forces dynamiques à l'intérieur des structures qui comprennent des endommagements au sein des structures, les différents éléments vibreront à des fréquences et des amplitudes différentes. Les vibrations créent de la fatigue et de l'usure et elles sont souvent à l'origine de l'endommagement des structures. Le bon choix de l'indicateur de vibration joue un rôle très important pour réaliser une surveillance.

L'endommagement des structures peut entraîner des nuisances, voire leur indisponibilité, engendrant ainsi des coûts de maintenance importants. Le contrôle de la santé de la structure est donc essentiel et permet de :

- Déterminer les sources de problèmes
- Réduire les coûts de maintenance
- Planifier les interventions et planifier les stocks

Dans le domaine des matériaux, l'analyse vibratoire est un outil privilégié qui a pris une importance considérable ces dernières années.

Partie Pratique

Chapitre III.

*Étude expérimentale du comportement
vibratoire d'une plaque réparée par patch
collée en composites*

III.1 Introduction :

Une bonne maîtrise de la dynamique des structures est cruciale pour concevoir et développer de nouvelles constructions, mais aussi pour diagnostiquer et résoudre les problèmes affectant les structures existantes. L'analyse modale expérimentale sert à caractériser une structure en identifiant ses propriétés dynamiques intrinsèques, telles que les fréquences propres, les modes propres, et les coefficients d'amortissement modal.

Que ce soit par une approche analytique ou expérimentale, l'analyse modale permet d'extraire les paramètres nécessaires à l'élaboration d'un modèle mathématique dynamique. Ces paramètres sont déterminés en mesurant et analysant une fonction de transfert, également appelée fonction de réponse fréquentielle (FRF).

Les applications de l'analyse modale sont nombreuses et variées. Elles vont de la simple vérification des fréquences propres à des simulations numériques s'appuyant sur un modèle modal. Une seule FRF peut révéler des faiblesses structurelles liées aux fréquences de résonance, tandis qu'un ensemble complet de FRF permet de reconstituer les déformées modales.

Parmi les principales utilisations des données modales, on trouve :

- La validation et l'optimisation des modèles analytiques.
- La visualisation qualitative des déformées modales.

Ces outils offrent une meilleure compréhension du comportement dynamique des structures, facilitant ainsi leur conception et leur maintenance.

III.2 Méthode et matériel de l'expérimentale :

III.2.1 Préparation des échantillons :

La fabrication des plaques composites étudiées était entièrement réalisée au sein d'AIRALGERIE. Ces plaques ont été produites par moulage sous vide à température ambiante, permettant un meilleur contrôle des propriétés mécaniques (Figure III.1). Cette technique précise génère des pièces de haute qualité avec peu de défauts et de bulles, offrant une finition lisse et esthétique adaptée à diverses applications. Les caractéristiques de la résine, associées à un renforcement adéquat, garantissent une excellente durabilité face aux agressions extérieures. Léger et facile à usiner, ce composite est un choix de prédilection pour les structures modernes. Léger et facile à usiner, ce composite est un choix privilégié dans les structures modernes. Selon le protocole expérimental, on commence par appliquer l'époxy, puis on ajoute du tissu pour chaque couche, jusqu'à atteindre 12 couches. L'ensemble est placé dans un sac sous un vide de 60 kPa pendant 8

Chapitre III : Étude expérimentale du comportement vibratoire d'une plaque réparée

heures à 25 °C. Les plaques ont été fabriquées à partir de deux types de fibres (carbone et verre) de dimensions 300x300x2 mm et un taux de fibre de 75 %.

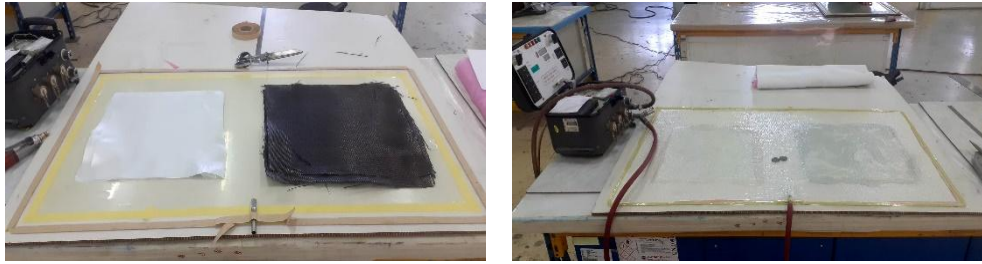


Figure III.1 : Fabrication de plaques composites par procédé sous vide.

Les plaques sont découpées en éprouvettes de dimensions 300x32x2 mm à l'aide d'une machine DXT, conformément à la norme ASTM D3039 (Figure III.2), pour étudier le comportement mécanique et les réponses vibratoires encastre-libre des structures réparées par patch collée et non réparées.

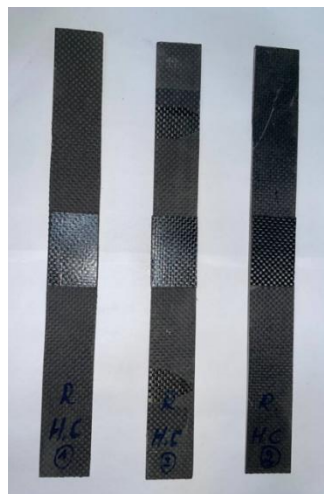


Figure III.2 : Préparation des éprouvettes réparée en composite pour l'essai de vibration

Caractéristiques mécaniques des poutres en composite de carbone, montre dans le tableau suivant ;

Module de Young (MPa)	Coefficient Poisson	Modules de cisaillement (MPa)	Masse volumique (Kg / m3).
E1=110000	v12=0.32	G12=4500	$\rho=1860$
E2=9800	v13=0.32	G13=4500	
E3=9800	v23=0.45	G23=4000	

Tableau III.1 : Caractéristiques mécaniques des poutres en composite de carbone.

III.2.2 Dispositif expérimentale :

Le banc expérimental utilisé pour les essais dynamiques repose sur un principe simple. Il intègre une chaîne d'acquisition chargée d'enregistrer les signaux d'excitation et de réponse de la structure. Ces données sont ensuite traitées et analysées à l'aide du logiciel « m+p SO Analyser ». Comme l'illustre la figure III.3, le dispositif comprend un excitateur « un marteau de choc » ainsi que des capteurs de mesure et un amplificateur de signal.

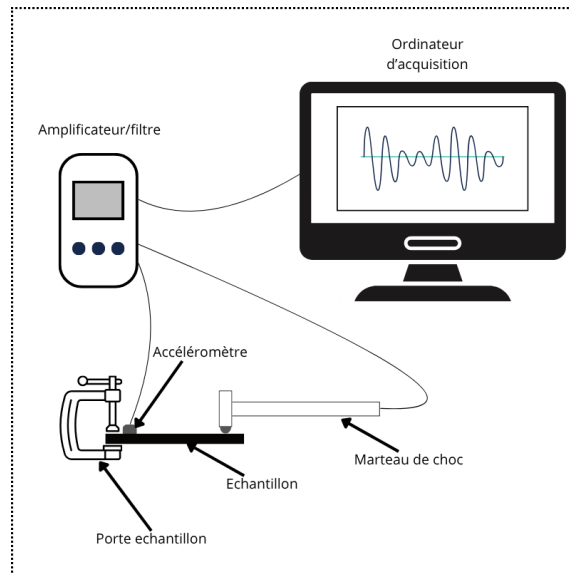


Figure III.3 : Dispositif expérimental d'un essai au marteau de choc

III.2.3 Capteur de mesure :

Pour mesurer la réponse vibratoire, on peut mesurer au choix de déplacement, de vitesse ou d'accélération, La force d'excitation est mesurée à l'aide d'un capteur d'accélération, dans lequel une fraction de la force est transmise au travers du capteur.

Le choix d'un accéléromètre est pour les raisons suivantes :

- Une méthode de montage simple.
- Une bonne linéarité.
- Un poids réduit.
- Une gamme de fréquences étendue (de 0,2 Hz à plus de 10 KHz).
- Une construction solide et une conception simple (certains types de capteur supportent des chocs supérieurs à 20 000 g).
- Une grande résistance à l'environnement.
- Une faible sensibilité transversale.



Figure III.4 : Accéléromètres

Ces accéléromètres reposent sur l'effet piézoélectrique. Leur conception intègre un élément piézoélectrique associé à une masse sismique, formant un système amorti maintenu sous précontrainte par un ressort. Sous sollicitation vibratoire, la masse induit une force alternée sur l'élément piézoélectrique, générant ainsi des charges électriques par effet piézoélectrique. Le capteur convertit les vibrations en signal électrique transmis à un amplificateur sous forme de tension, avec une réponse proportionnelle à l'accélération.

Différentes méthodes de fixation sont disponibles (collage, vissage, fixation magnétique ...). Pour nos essais, l'utilisation d'une couche de gel fixateur (Petro Wax) sur la base du capteur s'est avérée optimale. Cette solution présente une réponse linéaire jusqu'à 10 kHz, en offrant un gain de temps notable grâce à sa mise en œuvre rapide.

Caractéristiques de l'accéléromètre (PCB 356A15 de type ICP) :

- Sensibilité : 100 mV/g
- Plage de mesure : ± 50 g pk
- Plage de fréquence : 1.4 à 6500 Hz
- Plage de température : -54 to +121 °C
- Masse : 10.5 g.

Le positionnement des capteurs joue un rôle essentiel dans la qualité et la fiabilité des données mesurées lors d'un essai de vibration. Dans le cadre de cette étude, deux types de capteurs ont été utilisés : un accéléromètre, pour mesurer la réponse de la poutre, et un capteur de force intégré dans le marteau d'impact, permettant de quantifier l'excitation appliquée.

L'accéléromètre a été placé à l'extrémité libre de la poutre (Figure III.5), afin de capter la réponse maximale lors de l'excitation des modes de flexion, car l'extrémité libre est généralement le point où l'amplitude de déplacement est la plus élevée pour les premiers modes de vibration, ce qui permet une meilleure résolution dans l'identification des fréquences propres. L'accéléromètre a été fixé à l'aide d'un gel spécial, assurant à la fois la préservation de la surface du matériau composite.



Figure III.5 : Positionnement de capteur d'accélération

III.2.4 Logiciel Analyzer (m+p SO Analyzer) :

m+p SO Analyzer est une solution complète pour l'acquisition et l'analyse de signaux dynamiques, qu'ils soient vibratoires ou acoustiques. Ce système permet également de générer des rapports personnalisés pour différents besoins d'étude.

Il offre des fonctionnalités avancées de traitement du signal, aussi bien en temps réel qu'en post-traitement, grâce à des outils d'analyse temporelle et fréquentielle. Doté d'assistants sensibles, il facilite les opérations d'acquisition, de visualisation des résultats et d'interprétation des données. Son interface conviviale, simplifie la création de rapports adaptés aux exigences clients.

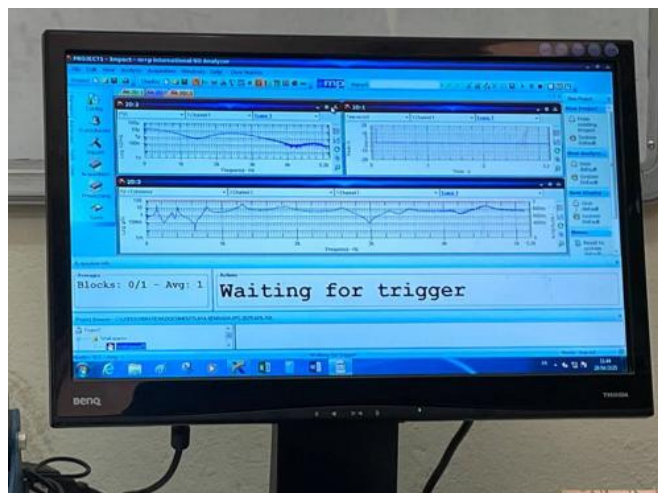


Figure III.6 : Visualisation et acquisition

III.2.5 Amplificateur de puissance :

Les amplificateurs jouent un rôle crucial dans la chaîne de mesure. Après l'étape de filtrage, ils amplifient le signal soit automatiquement (auto-range), soit manuellement et adaptent sa dynamique à celle du système d'acquisition. Cette opération permet de minimiser le bruit et d'assurer une transmission optimale du signal pour un traitement ultérieur. Techniquement, un amplificateur électronique est un dispositif conçu pour augmenter la puissance d'un signal variable dans le temps

Chapitre III : Étude expérimentale du comportement vibratoire d'une plaque réparée

(tension ou courant). Il puise dans une source d'alimentation externe l'énergie nécessaire à l'amplification du signal d'entrée.



Figure III.7 : Amplificateur

III.2.6 Châssis :

Le NI 9234 est un module d'acquisition 4 voies de la série CompactDAQ spécialisé dans les mesures audio haute précision. Compatible avec les systèmes CompactDAQ et CompactRIO, il prend en charge les capteurs piézoélectriques IEPE et non-IEPE.

a) Caractéristiques techniques principales :

- Plage dynamique étendue (102 dB)
- Couplage AC/DC logiciel
- Conditionnement de signal IEPE intégré pour accéléromètres et microphones
- Acquisition simultanée sur 4 canaux à 51,2 kHz/canal
- Filtres anti-repliement configurables

b) Configuration et performances :

La sélection et la configuration optimales sont facilitées par :

- Le Guide de sélection NI CompactDAQ
- Des outils de calcul intégrés pour estimer les performances
- La prise en compte du nombre de voies actives

c) Avantages du système CompactDAQ :

Ce système modulaire combine :

- La simplicité du plug-and-play USB
- La polyvalence (laboratoire, terrain, production)
- Des performances instrumentales dans un format compact
- Rapidité et précision des mesures



Figure III.8 : châssis

III.3 Mode d'excitation :

La mesure d'une fonction FRF sur une structure implique que la structure soit excitée par des forces dynamiques mesurables. Pour l'étude dynamique de notre structure, nous avons à disposition un marteau de choc.

III.4 Montage expérimental :

L'analyse modale par impact est une méthode simple et efficace pour étudier les vibrations d'une structure. Dans notre cas, nous avons utilisé une poutre en carbone fixée à une extrémité (encastre-libre). Un marteau excite la poutre à différents points, tandis qu'un accéléromètre placé à l'extrémité libre mesure les vibrations. Quatre Des essais ont été réalisés sur quatre configurations de plaques (intactes, trouées et réparées par patch carbone ou verre) afin de déterminer les fréquences propres de la poutre. Quatre éprouvettes ont été testées par configuration. Les éprouvettes sont excitées avec un marteau d'impact (PCB 086C03) à côté de l'extrémité encasturé. Un accéléromètre de type (PCB 356A15) a été utilisé pour mesurer l'amplitude à l'extrémité libre de la poutre. Le dispositif expérimental utilisé est présenté dans la Figure III.9.

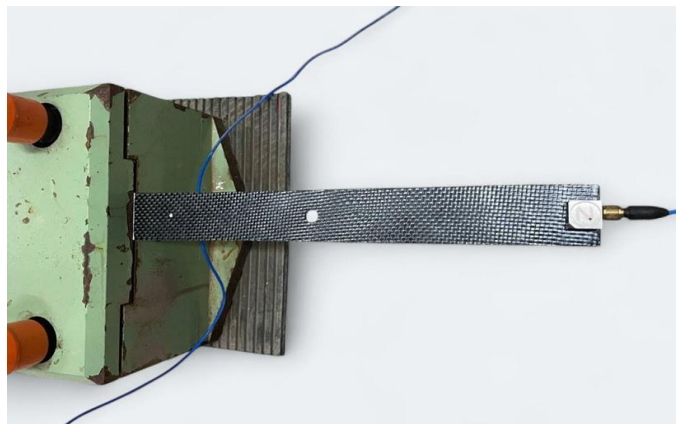


Figure III.9 : Montage expérimental

L'analyseur enregistre et stocke les spectres vibratoires pour chaque point mesuré. Il

traite le signal de l'accéléromètre en le conditionnant et en amplifiant. Selon les besoins, il peut fournir en sortie un signal proportionnel au déplacement, la vitesse ou à l'accélération.

Au niveau de l'essai, il est nécessaire de prévoir suffisamment de pointe de mesure. Pour déterminer les fréquences propres la structure est excitée à l'aide d'un marteau d'impact avec un capteur de force incorporé dans la tête et la réponse est détectée en un autre point de la structure à l'aide d'un accéléromètre piézo-électrique qui permet de convertir un paramètre physique en signal électrique. L'appareil d'analyse affiche directement les différentes mesures.

Dans cette section, l'efficacité de l'indicateur proposé sont vérifiées dans les conditions aux limites encastre-libres de la structure composite. Des informations générales sur les caractéristiques géométriques de la poutre composite sont présentées dans le tableau.III.2

Propriétés/unité	Valeur
Largeur (b) (mm)	32
Epaisseur (e) (mm)	2
Longueur (L) (mm)	300
Masse totale (g)	100 g

Tableau III.2 : Caractéristiques géométriques de la poutre.

Pour les mesures, nous avons utilisé la carte d'acquisition NI 9234, les accéléromètres est utilisé et les données sont collectées à l'extrémité de la poutre. Les fréquences ont été calculées après plusieurs positions d'impact du marteau.

III.4.1 Test d'impact au Marteau de choc :

La méthode par impact, développée dans les années 1970, reste la technique modale la plus populaire. Utilisant un marteau instrumenté (Figure III.10), elle permet une caractérisation rapide et fiable des structures, quel que soit leur type.

Un marteau d'impact piézoélectrique est constitué d'une tête fixe contenant un capteur de force, d'un manche avec une poignée en caoutchouc, des extensions interchangeables pour la tête ainsi que différents embouts d'impact (acier, aluminium, plastique dur ou souple) (Figure III.11)

Différentes tailles de marteaux sont alors requises pour fournir une force d'impact appropriée à la taille de la structure.

La sollicitation au marteau de choc est un événement de très courte durée. L'impact

Chapitre III : Étude expérimentale du comportement vibratoire d'une plaque réparée

transfère son énergie à la structure et produit ainsi une onde. La forme du spectre d'un impact est déterminée, par la masse et la raideur de la structure et par la nature de l'objet qui sert d'impacter.



Figure III.10 : Marteau d'impact



Figure III.11 : Embout d'impact

Caractéristiques de marteau (PCB 086C03 de type ICP) :

- Sensibilité : 2,2 mV/N
- Gamme : 2200 N
- Gamme de fréquence : jusqu'à 8 kHz
- Masse du marteau : 160 grammes
- Différents embouts
- Masse additionnelle

III.5 Configuration d'acquisition :

Afin d'assurer la qualité et la fiabilité des données acquises lors des essais de vibration, une configuration d'acquisition soigneusement définie a été mise en place. Le système utilisé pour l'enregistrement des signaux est le logiciel M+P SO Analyzer, couplé à une unité matérielle d'acquisition multivoie. Ce système permet une acquisition synchronisée des signaux de force (impact) et accélération (réponse), ce qui est indispensable pour le calcul précis des fonctions de réponse en fréquence (FRF).

Pour améliorer le rapport signal/bruit et réduire les incertitudes dues aux variations manuelles lors de l'impact, chaque mesure a été répétée plusieurs fois, et une moyenne temporelle a

Chapitre III : Étude expérimentale du comportement vibratoire d'une plaque réparée

été effectuée automatiquement par le logiciel. Cette technique permet de lisser les écarts entre essais, notamment en cas de variation légère de la force d'impact ou de son angle d'application.

Le choix des paramètres d'acquisition a été guidé par la plage fréquentielle attendue des modes propres de la poutre. Une fréquence d'échantillonnage de 4 kHz a été retenue, ce qui permet de couvrir un spectre suffisamment large pour capter les premiers modes de flexion. La durée d'enregistrement de chaque impact a été définie de manière à inclure l'ensemble de la réponse libre transitoire de la structure, typiquement de quelques centaines de millisecondes à une seconde.

III.6 Résultats et discussion :

A la fin des essais nous obtenons les résultats des points de mesures sous différentes formes (réponses temporelles, spectres de réponses, fonctions de réponses fréquentielles ...). Nous montrons sur les résultats les fonctions de réponses fréquentielles FRF en forme cascades. Le type d'analyse choisi est le model à plusieurs degrés de liberté MDOF, nous allons étudier notre structure comme un system à plusieurs degré de liberté.

III.7 Résultats de l'analyse modale :

Les résultats expérimentaux sont présentés sous formes de spectres de fréquences, chaque spectre a nécessité un essai dynamique par l'excitateur. Nous avons choisi l'excitation par marteau d'impact comme résultat de l'expérience. La configuration expérimentale, FRF et les quatre premières fréquences naturelles sont illustrées au Figure III.12-15

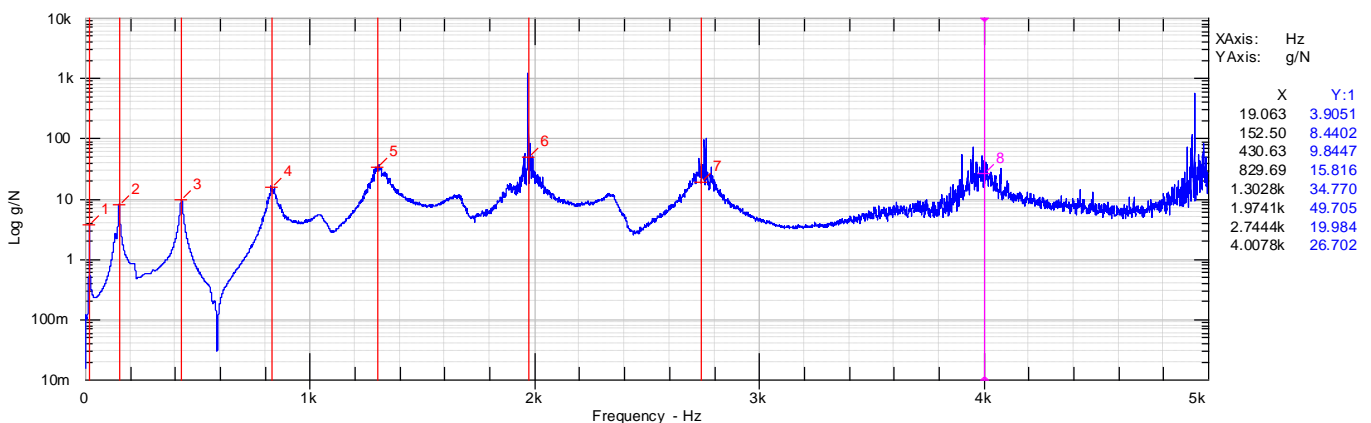


Figure III.12 : Fonction de reponse fréquentielle pour « PS »

Chapitre III : Étude expérimentale du comportement vibratoire d'une plaque réparée

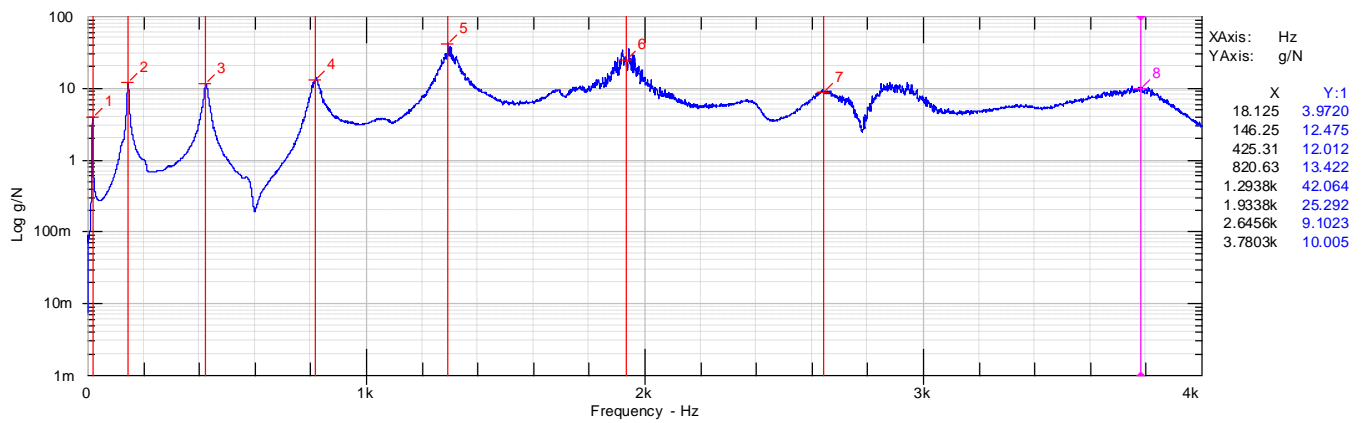


Figure III.13 : Fonction de réponse fréquentielle pour « PT »

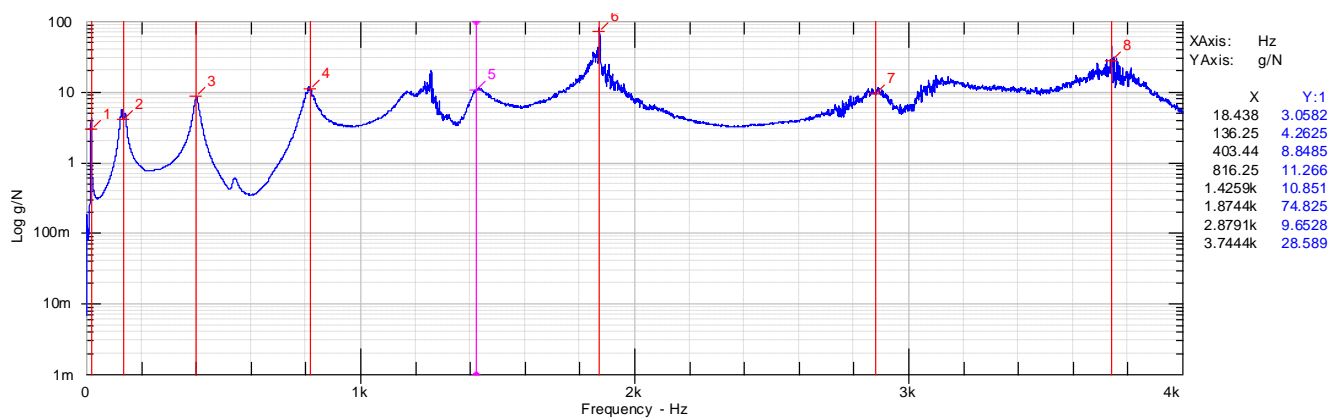


Figure III.14: Fonction de réponse fréquentielle pour « PRC »

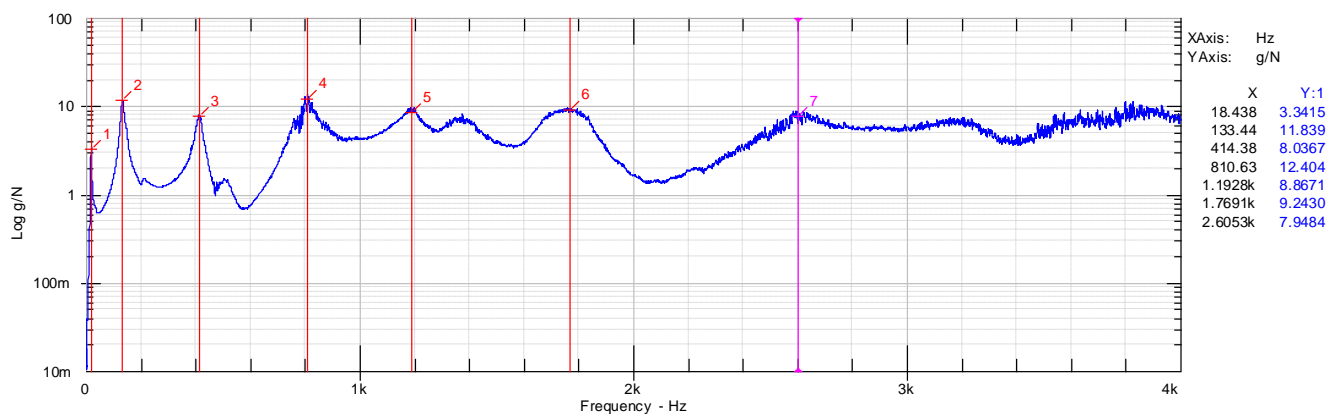


Figure III.15 : Fonction de réponse fréquentielle pour « PRV »

Chaque poutre testée avait une largeur nominale de 300 mm et une épaisseur nominale donnée de 2 mm, Pour chaque poutre, les mesures sont reportées de la première au quatrième mode de flexion. Le cinquième mode n'a pas été retenu vu les difficultés des mesures

Chapitre III : Étude expérimentale du comportement vibratoire d'une plaque réparée

d'amortissement pour ce mode. Ces difficultés pouvant être attribuées à l'imperfection et le frottement à l'extrémité serrée.

Les figure III.12 a III.15 présente l'évolution d'amplitude en fonction de fréquence pour les quatre configurations pour les modes de vibration étudiés des composites à fibres carbone.

Pour un mode donné, l'amplitude augmente avec l'augmentation de fréquence de plaque composite jusqu'à mode la fréquence 2000 Hz. En effet, la fréquence propre est proportionnelle à la rigidité du matériau qui est plus élevée lorsque les plaques intactes. De plus, on observe que les fréquences propres pour le stratifié carbone de plaque intacte sont supérieures à celles du stratifié réparée par patch composite alors qu'elles sont inférieures pour les autres. Le tableau III.3 et III.4 met en évidence l'écart entre les quatre configurations.

Numéro de mode	Fréquences (Hz)			
	Poutre simple	Poutre trouée	Poutre réparée par patch carbone	Poutre réparée par patch verre
1	19.063	18.125	18.438	18.438
2	152.50	146.25	136.25	133.44
3	430.63	425.31	403.44	414.38
4	829.69	820.63	816.25	810.63

Tableau III.3 : Valeurs des fréquences expérimentales

Numéro de mode	Amplitude g/N			
	Poutre simple	Poutre trouée	Poutre réparée par patch carbone	Poutre réparée par patch verre
1	3.9051	3.9720	3.0582	3.3415
2	8.4402	12.475	4.2625	11.839
3	9.8447	12.012	8.8485	8.0367
4	15.816	13.422	11.266	12.404

Tableau III.4 : Valeurs des amplitudes expérimentales

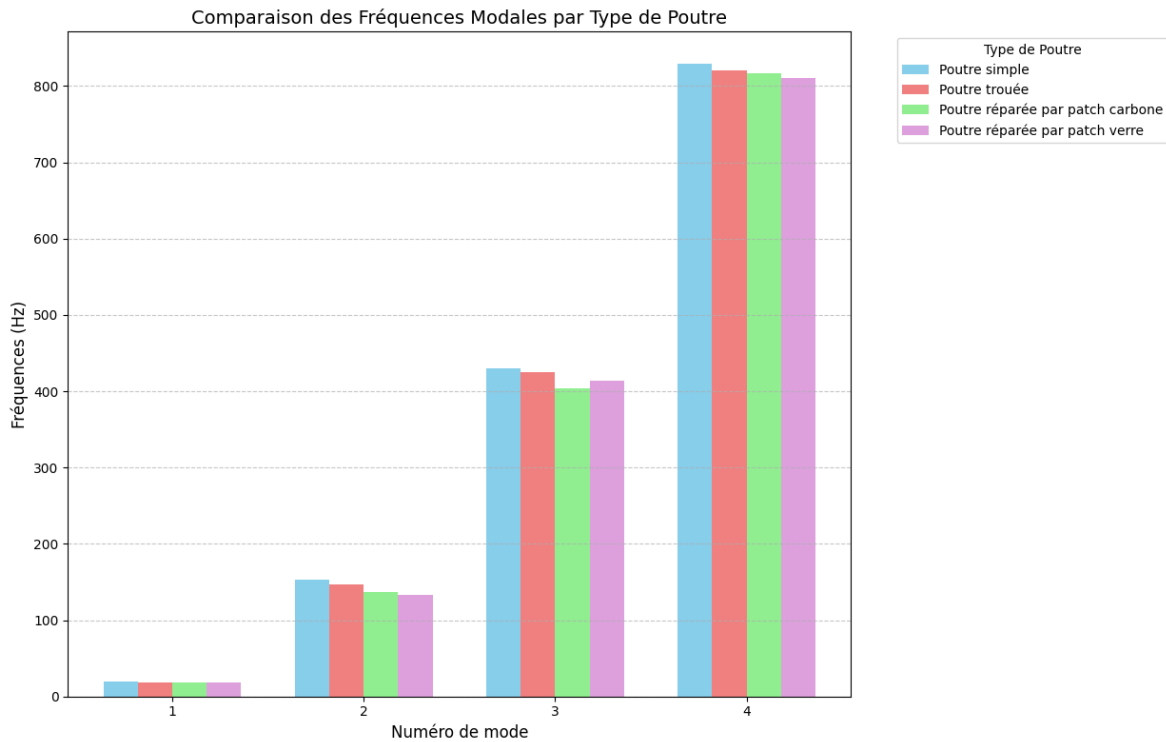


Figure III.16 : Histogramme des fréquences pour chaque mode

Le graphique présenté illustre la comparaison des fréquences modales et amplitude de quatre types de plaques composites : une plaque simple (PS), une plaque trouée (PT), une plaque réparée par un patch en carbone (PRC) et une autre réparée par un patch en fibre de verre (PRV), pour les quatre premiers modes de vibration. On observe que la plaque simple présente systématiquement les fréquences les plus élevées à chaque mode, ce qui traduit sa rigidité optimale en absence de défauts ou d'interventions. L'introduction d'un trou dans la plaque (PT) provoque une diminution visible des fréquences modales, reflétant une perte de rigidité due à la discontinuité structurelle.

Les plaques réparées par patch présentent des comportements intermédiaires. Pour les modes 1 et 2, les fréquences des plaques réparées restent inférieures à celles de la plaque simple, mais supérieures ou proches de celles de la plaque trouée, indiquant une restauration partielle des propriétés dynamiques. Au mode 3, la plaque réparée par patch carbone (PRC) montre une fréquence modale étonnamment plus basse que celle de la plaque trouée, ce qui suggère que la réparation, bien que rigide, a pu introduire une perturbation locale défavorable à ce mode particulier, probablement en raison d'une mauvaise compatibilité mécanique ou d'un effet de masse local. En revanche, la plaque réparée par patch en fibre de verre (PRV) se comporte de manière plus régulière, avec une fréquence modale supérieure à celle de la PRC au même mode, ce qui peut indiquer une meilleure adaptation du matériau au comportement global de la plaque.

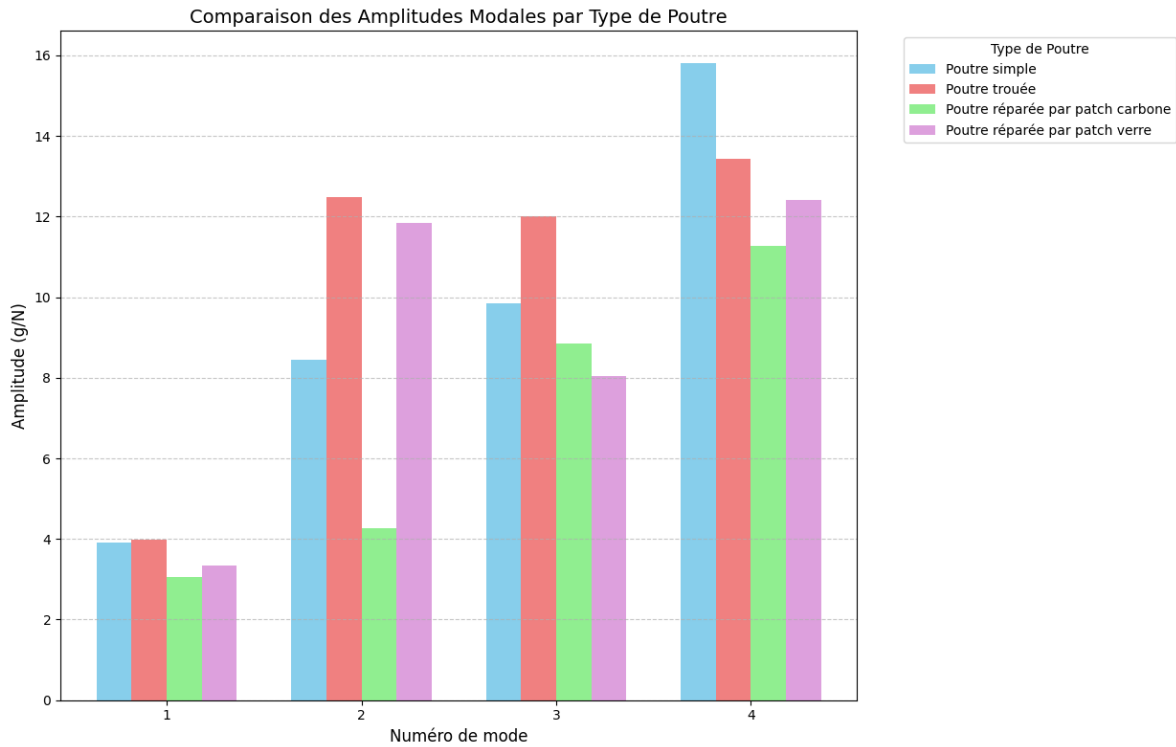


Figure III.17 : Histogramme des amplitudes pour chaque mode

Au mode 4, les différences entre les quatre types de plaques deviennent plus réduites, bien que la plaque simple conserve l'avantage. À ce niveau de vibration, le patch carbone semble reprendre l'avantage sur le patch verre, traduisant une meilleure efficacité de la réparation pour les modes de vibration à haute fréquence. De manière générale, on peut conclure que les réparations permettent une récupération partielle des caractéristiques dynamiques perdues à cause du défaut, avec une légère supériorité du patch en carbone à haute fréquence, mais une performance plus stable et prévisible du patch en fibre de verre pour les modes intermédiaires. Ces résultats mettent en évidence l'importance du choix du matériau de réparation et de la qualité du collage pour garantir une restauration efficace du comportement vibratoire des structures composites.

III.8 Rapport d'amortissements :

Parmi les différentes approches utilisées pour estimer l'amortissement d'un système vibratoire, la méthode des 3 dB (ou méthode de la demi-puissance) est l'une des plus simples et couramment employées dans l'analyse expérimentale. Elle se base sur l'observation de la courbe de réponse en fréquence (FRF) d'un système soumis à une excitation.

La méthode des 3 dB est une technique expérimentale utilisée pour estimer le taux d'amortissement d'un système vibratoire à partir de sa fonction de réponse en fréquence (FRF). Elle consiste à mesurer l'écart entre deux fréquences situées de part et d'autre d'un pic de résonance, pour lesquelles l'amplitude de la réponse chute de 3 décibels (soit environ 70,7 % de l'amplitude

Chapitre III : Étude expérimentale du comportement vibratoire d'une plaque réparée

maximale). Cet écart fréquentiel permet ensuite de calculer le facteur d'amortissement associé à la résonance analysée.

III.8.1 Formule mathématique :

Le facteur d'amortissement ζ (zêta) autour d'une fréquence de résonance f_r peut être estimé par la relation suivante :

$$\zeta = \frac{f_2 - f_1}{2f_r}$$

Où :

- f_r est la fréquence de résonance (fréquence au pic de la FRF),
- f_1 est la fréquence pour laquelle la réponse diminue de 3 dB avant la résonance,
- f_2 est la fréquence pour laquelle la réponse diminue de 3 dB après la résonance.

Les tableaux suivants (III.5 à III.8) résume le rapport d'amortissement estimé pour chaque mode :

Mode	Fréquence de résonance (f_r) (Hz)	Amplitude max (A_{max}) (g/N)	Amplitude a -3dB (A_{-3dB}) (g/N)	f_1 (Hz) (estimé)	f_2 (Hz) (estimé)	Δf (Hz)	Rapport d'amortissement (ζ)
1	19.083	3.9051	2.76	18.5	19.6	1.1	0.0288
2	152.50	8.4402	5.97	152.3	152.7	0.4	0.0013
3	430.63	9.8447	6.96	429.5	431.8	2.3	0.0026
4	829.69	15.818	11.18	828.5	830.8	2.3	0.0014

Tableau III.5 : Rapport d'amortissement estimé pour « PS »

Mode	Fréquence de résonance (f_r) (Hz)	Amplitude max (A_{max}) (g/N)	Amplitude a -3dB (A_{-3dB}) (g/N)	f_1 (Hz) (estimé)	f_2 (Hz) (estimé)	Δf (Hz)	Rapport d'amortissement (ζ)
1	18.125	3.9720	2.808	17.5	18.7	1.2	0.0331
2	146.25	12.475	8.821	145.8	146.6	0.8	0.0027
3	425.31	12.012	8.494	424.5	426.2	1.7	0.0020
4	820.63	13.422	9.491	819.5	821.5	2.0	0.0012

Tableau III.6 : Rapport d'amortissement estimé pour « PT »

Mode	Fréquence de résonance (f_r) (Hz)	Amplitude max (A_{max}) (g/N)	Amplitude a -3dB (A_{-3dB}) (g/N)	f_1 (Hz) (estimé)	f_2 (Hz) (estimé)	Δf (Hz)	Rapport d'amortissement (ζ)
1	18.438	3.0562	2.161	17.8	19.0	1.2	0.0325
2	136.25	4.2625	3.014	135.5	137.0	1.5	0.0055
3	403.44	8.8485	6.257	402.0	405.0	3.0	0.0037
4	816.25	11.266	7.966	814.5	818.0	3.5	0.0021

Tableau III.7 : Rapport d'amortissement estimé pour « PRC »

Mode	Fréquence de résonance (f_r) (Hz)	Amplitude max (A_{max}) (g/N)	Amplitude a -3dB (A_{-3dB}) (g/N)	f_1 (Hz) (estimé)	f_2 (Hz) (estimé)	Δf (Hz)	Rapport d'amortissement (ζ)
1	18.438	3.3415	2.363	17.8	19.0	1.2	0.0325
2	133.44	11.839	8.371	132.8	134.0	1.2	0.0045
3	414.38	8.0367	5.683	413.0	416.0	3.0	0.0036
4	810.63	12.404	8.769	809.0	812.5	3.5	0.0022

Tableau III.8 : Rapport d'amortissement estimé pour « PRV »

III.9 Conclusion :

Cette étude présente une caractérisation du comportement vibratoire des composites à fibres carbone. L'influence de réparation par patch par collage sur l'amortissement des stratifiés a été étudiés. Une analyse expérimentale a été réalisée sur des plaques composites en utilisant la technique d'impulsion. Les fréquences modales ont été déduites de la fonction de réponse fréquentielle (FRF).

La comparaison entre les résultats obtenus des composites non réparée et réparée montrent que la réparation joue un rôle majeur sur la réponse de la structure. De plus, il a été observé que les propriétés dynamiques dépendent aussi de la direction et de la fraction volumique de fibres carbone

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

L'analyse de structure, et plus particulièrement l'analyse dynamique et vibratoire, est un domaine incontournable de l'ingénierie moderne. Grâce à des méthodes avancées et des outils expérimentaux, les ingénieurs peuvent concevoir des structures en composite plus robustes, sécurisées et durables. Que ce soit dans la construction, l'aéronautique ou d'autres secteurs, ces analyses permettent d'améliorer les performances, de réduire les risques de défaillances et d'assurer un niveau élevé de sécurité pour les utilisateurs.

En intégrant ces pratiques dans le développement et la maintenance des structures composites, les entreprises peuvent non seulement économiser sur les coûts à long terme, mais également garantir un fonctionnement optimal face aux défis dynamiques de notre environnement.

Références

Références

- [1] D. Stokke, "Lignocellulosic materials," in Introduction to Wood and Natural Fiber Composites, Wiley, 2013
- [2] ANFA, Dossier pédagogique: Les matériaux composites, éd. 2014, réalisé avec la collaboration de l'Éducation nationale, Marc Marzano (Action Composite), Pascal Celle (GNFA).
- [3] L'industrie française des matériaux composites, [En ligne]. Disponible: <https://pdfcoffee.com/lx27industrie-francaise-des-materiaux-composites-pdf-free.html>
- [4] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, Materials Science and Engineering: An Introduction, 10th ed., Wiley, 2020.
- [5] A. R. Bunsell and J. Renard, Fundamentals of Fibre Reinforced Composite Materials, CRC Press, 2005.
- [6] T. Moumene, Modélisation de l'endommagement des matériaux composites avec la méthode XFEM, polycopie de cours, Master I Chimie des Matériaux, Université de Tiaret, Faculté des Sciences de la Matière.
- [7] JULES.E.J. Couplages entre propriétés thermiques, réactivité chimique et viscosité des matériaux composites therm durcissables en relation avec les conditions de leur élaboration fondée sur l'hystérésis Diélectrique, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers, 2001
- [8] N. Mahmoudi, Étude et modélisation du comportement mécanique des matériaux composites, thèse de doctorat en génie mécanique, spécialité sciences des matériaux.
- [9] A. El Ghazzaoui, Y. Habibi, and F. Mahiou, "Développement de matériaux composites fibreux à hautes performances à matrice bio-sourcée," ResearchGate, 2018
- [10] Cours: Les matériaux composites [PDF]. Université de Tiaret. [en ligne]. Disponible : https://fsm.univ-tiaret.dz/docs/cours/C_M1_CM_les%20composites.pdf.
- [11] N. Probst, Étude des propriétés mécaniques et électriques de nanocomposites à matrice élastomère chargés de noir de carbone, Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 2012
- [12] JoelCugnoni, « Identification par recalage modal et fréquentiel des propriétés constitutives de coques en matériaux composites », Thèse, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, 2005.
- [13] L. Berreur, B. de Maillard, and S. Nösperger, "L'industrie française des matériaux composites," et I. M. Daniel and O. Ishai, Engineering Mechanics of Composite Materials, 2nd ed., Oxford University Press, 2006.
- [14] A. Khettab, Comportement vibratoire des matériaux composites, mémoire de Master académique, 2017.
- [15] CARMA « Glossaire des matériaux composites » Actualisation octobre 2006
- [16] Samaro, "Le procédé d'infusion pas à pas," Samaro.fr, 2021.
- [17] A. Djabali, Étude expérimentale du comportement mécanique et de l'endommagement d'un composite stratifié carbone/epoxy épais, Ecole National polytechnique, 2021.

Références

doi:10.5281/zenodo.4407056.

- [18] S. HUGUET, Application de classificateurs aux données d'émission acoustique : identification de la signature acoustique des mécanismes d'endommagement dans les composites à matrice polymère, Ph.D, INSA de Lyon, Lyon, France, 2002.
- [19] K. K. Chawla, Composite Materials: Science and Engineering, 3rd ed., Springer, 2012.
- [20] A. A. Baker, L. R. F. Rose, and R. Jones, Advances in the Bonded Composite Repair of Metallic Aircraft Structures, Elsevier, 2002.
- [21] Federal Aviation Administration, "Airworthiness Directives," Federal Aviation Administration,
- [22] "Bonded repair of composite structures in aerospace application," Journal of Materials and Engineering Structures.
- [23] A. A. Baker, Al, Composite Materials for Aircraft Structures, 2nd ed., AIAA, 2002.
- [24] Alan Baker , Andrew J. Gunnion & John Wang (2015) On the Certification of Bonded Repairs to Primary Composite Aircraft Components, The Journal of Adhesion, 91:1-2, 4-38,DOI: 10.1080/00218464.2014.88331
- [25] Mekhalfia Haroun , Boutouil H'maida, Mémoire, Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master, Thème: Diagnostic Des Défauts Des Roulements Par Analyse Vibratoire Et Leurs Impact Sur Les Machines
- [26] l'ouvrage Dynamics of Structures de Clough et Penzien (3e édition, 2003) ,
- [27] Cours de : Meca 06- MÉCANIQUE DE VIBRATION Université des Frères Mentouri Constantine Institut des Sciences et Techniques Appliquées, P14.
- [28] Mechanical Vibrations Sixth Edition in SI Units, P46, P47.
- [29] COURS TECHNIQUES DE DETECTION DES DEFAILLANCES , Chapitre 02 : Détection des vibrations .
- [30] IFM. (2022). Applications de la surveillance vibratoire selon ISO 10816. ifm.com.
- Mobley, R. K. (2002). An Introduction to Predictive Maintenance (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- [31] Yang, Z., Yang, Y., Zheng, Z., & Shao, J. (2023). Study on fatigue damage and frequency attenuation characteristics of carbon fiber composite.
- Pruftechnik. (2023). Analyse des vibrations : Un guide complet.
- [32] Belghamri, M., & Ben Khoukha, M. (2017). Comportement vibratoire des matériaux composites. Université Kasdi Merbah – Ouargla.
- [33] A. Preumont, Vibration Control of Active Structures, 3^e éd., Springer, 2011.
- P. Lemoine et R. Dufour, Maîtrise des vibrations mécaniques, Éditions Lavoisier, 2006.
- [34] Khan, A., & Kim, H. S. Active Vibration Control of a Piezo-Bonded Laminated Composite in the Presence of Sensor Partial Debonding and Structural Delaminations. (2019)

Références

- [35] Siemens Digital Industries Software, “Essais de vibrations au sol (Ground Vibration Testing),” Simcenter Testlab – Siemens
- [36] Siemens Digital Industries Software, Aircraft Ground Vibration Testing: Enhancing the Efficiency of Aircraft Structural Dynamics Testing, White Paper, Siemens, 2022.
- [37] Ewins, D. J., Modal Testing, Research Studies Press, 2000.
- [38] Modal Testing: Theory and Practice, By Cheng-Yu Hsieh
- [39] M. Thomas, "Analyse modale expérimentale : Méthodes et applications," École de technologie supérieure (ETS).
- [40] Chapitre II – Analyse vibratoire des machines tournantes,” Université Ibn Khaldoun – Tiaret, Chapitre II du mémoire, 2017. [En ligne]. Disponible : DSpace – Université Tiaret.
- [41] Siemens Digital Industries Software, “Simcenter SCADAS Mobile,” PLM Software – Siemens,
- [42] Dewesoft, “Analyseur FFT – Analyse de fréquence, FFT, Zoom FFT, Spectrogramme,” Dewesoft,
- [43] Randall, R. B., Vibration-based Condition Monitoring, Wiley, 2011.
- [44] N. M. M. Maia et J. M. M. Silva, Theoretical and Experimental Modal Analysis, Research Studies Press, 1997.
- [45] Maia, N. M. M., & Silva, J. M. M. (1997). Theoretical and Experimental Modal Analysis. Research Studies Press.
- [46] D. J. Ewins, Modal Testing: Theory, Practice and Application, 2^e éd., Research Studies Press, 2000.

Annexe

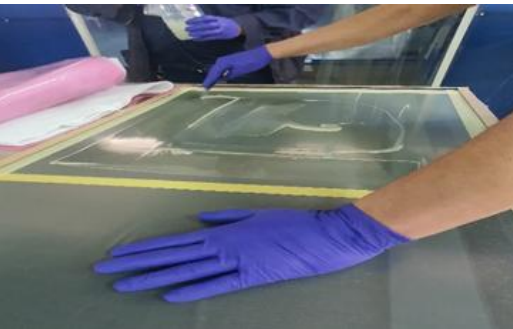
Références

Méthode de élaboration les plaque composite

On débute en plaçant le film en nylon sur une plaque.



Par la suite, on place un tissu de carbone (50x50 cm) sur un autre film,



Suivi d'une couche de résine puis d'un autre tissu. On dispose le stratifié prêt sur la plaque.



Ensuite, on place le tissu d'extraction. On place le tissu de drainage, À la fin on ferme l'enveloppe par un autre film.



On utilise la valise pour avoir une pression proche de zéro à l'intérieur de l'enveloppe et en le maintien pendant 24 h. En fin de compte, on retire les plaques de composites du moule.