الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY

جامعة باجي مختار – عنابـــة

Faculté : Technologie

Département : Génie mécanique

Domaine : Sciences et techniques

Filière : GENIE MECANIQUE

Spécialité : Construction mécanique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

Analyse vibratoire du composites stratifiées renforcées par des fibres naturelles et synthétiques

Présenté par : ZIROURI HAMZA

Encadrant : GAAGAIA DJAMEL EDINNE *Grade MCB*

Jury de Soutenance

Mr. BOUGOFFA.MOHAMED SIF EDDINE	MCB	U.B.M.A	Président
Mr. GAAGAIA DJAMEL EDINNE	MCB	U.B.M.A	Encadrant
Mr. DERDAR ABD RAHIM	MCB	U.B.M.A	Examinateur

2024-2025

Remerciements

Nous commençons par exprimer notre gratitude envers Allah, le tout-puissant, pour nous avoir donné la force, le courage et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous tenons également à remercier chaleureusement mon encadreur, Monsieur GAAGAIA DJAMEL EDINNE, pour avoir accepté de superviser notre mémoire.

Nos remerciements vont également à tous les membres du jury qui ont accepté d'évaluer notre travail :

Mr. BOUGOFFA.MOHAMED SIF EDDINE et .MR.DERDAR ABD RAHIM

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes parents et toute ma famille, qui grâce à leur aide mon travail a vu le jour.

A vous tous, du profond du cœur : Grand Merci !

Abstract

This Master's thesis focuses on the vibrational analysis of laminated composites reinforced with jute fiber fabrics (TFJ), combined with synthetic fibers such as glass fibers (MFV) and aramid fibers (Kevlar, TKV), using two types of matrices: polyester and epoxy. The experimental study involved measuring natural frequencies and damping coefficients of the different materials to evaluate their dynamic behavior. Results show that increasing the number of TFJ layers significantly improves the stiffness of the composites, as evidenced by a notable rise in natural frequencies. Moreover, replacing glass fibers with Kevlar fibers leads to a slight increase in natural frequencies and a marked increase in damping coefficients, making these materials suitable for applications requiring efficient vibration energy dissipation. The matrix type also plays a crucial role: epoxy-based composites exhibit high damping but lower stiffness, while polyester-based composites provide better stiffness with lower damping. The 2MFV–4TFJ composite with polyester matrix proved to be the most efficient, combining high stiffness with low damping, making it particularly suited for load-bearing structures subjected to dynamic loads. This study highlights the importance of fiber selection, orientation, and matrix type in optimizing the vibrational performance of laminated composite materials.

Keywords: laminated composites, natural fibers, synthetic fibers, vibrational analysis, and stiffness.

ملخص

يتناول هذا العمل تحليل الاهتزازات في المواد المركبة الطبقية المعززة بأقمشة ألياف الجوت
باستخدام نوعين من (TFJ) ،(TKVكيفلار،) وألياف الأراميد (MFV) ، والمركبة مع ألياف صناعية مثل ألياف الزجاج المصفوفات: البوليستر والإيبوكسي. شملت الدراسة التجريبية قياس الترددات الطبيعية ومعاملات التخميد للمواد المختلفة لتقييم سلوكها الديناميكي. أظهرت النتائج أن زيادة عدد طبقات ألياف الجوت تحسن بشكل ملحوظ صلابة المركبات، كما يتضح من الزيادة الواضحة في الترددات الطبيعية. بالإضافة إلى ذلك، أدى استبدال ألياف الزجاج بألياف كيفلار إلى زيادة طفيفة في الترددات الطبيعية وزيادة ملحوظة في معاملات التخميد، مما يجعل هذه المواد مناسبة للتطبيقات التي تتطلب قدرة عالية على امتصاص طاقة الاهتزاز. كما يلعب نوع المصفوفة دورًا هامًا، حيث أظهرت المركبات ذات المصفوفة الإيبوكسية تخميدًا عاليًا MFV–4TFJولكن صلابة أقل، بينما توفر المركبات ذات المصفوفة البوليستر صلابة أفضل مع تخميد أقل. وأثبت المركب 2 ذو المصفوفة البوليستر كفاءته العالية، حيث يجمع بين الصلابة العالية والتخميد المنخفض، مما يجعله مناسبًا بشكل خاص للهياكل الحاملة المعرضة لأحمال ديناميكية. تسلط هذه الدراسة الضوء على أهمية اختيار نوع الألياف وترتيبها ونوع المصفوفة لتحسين الأداء الاهتزازي للمواد المركبة الطبقية.

الكلمات المفتاحية:
المواد المركبة الطبقية، الألياف الطبيعية، الألياف الصناعية، تحليل الاهتزازات، الصلابة.

Résumé

Ce travail de Master porte sur l'analyse vibratoire de composites stratifiés renforcés par des tissus en fibres de jute (TFJ), combinés à des fibres synthétiques telles que les fibres de verre (MFV) et les fibres d'aramide (Kevlar, TKV), avec deux types de matrices : polyester et époxy. L'étude expérimentale a consisté à déterminer les fréquences propres et les coefficients d'amortissement des différents matériaux afin d'évaluer leur comportement dynamique. Les résultats montrent que le renforcement par un plus grand nombre de plis TFJ améliore significativement la rigidité des composites, comme en témoigne l'augmentation notable des fréquences naturelles. Par ailleurs, le remplacement des fibres de verre par des fibres de Kevlar entraîne une légère augmentation des fréquences propres et surtout un accroissement marqué des coefficients d'amortissement, rendant ces matériaux adaptés aux applications nécessitant une bonne dissipation d'énergie vibratoire. L'influence de la matrice est également cruciale : les composites à matrice époxy présentent des coefficients d'amortissement élevés mais une rigidité moindre, tandis que ceux à matrice polyester offrent une meilleure rigidité avec un amortissement plus faible. Le composite 2MFV–4TFJ à matrice polyester s'est révélé être le plus performant, combinant rigidité élevée et faible amortissement, ce qui le rend particulièrement adapté aux structures porteuses soumises à des sollicitations dynamiques. Cette étude met ainsi en lumière l'importance du choix des fibres, de leur disposition et de la matrice pour optimiser le comportement vibratoire des matériaux composites stratifiés.

Mots-clés : composites stratifiés, fibres naturelles, fibres synthétiques, analyse vibratoire, rigidité.

Table de matière

CHAPITRE I : Généralités sur les matériaux composites

I.1- Introduction 1

I.2- Définition d'un matériau composite 1

I.3-Classification des matériaux composites 2

Composites à fibre 2

I.3 Les renforts 4

I.3.1 Fibres de verre 4

I.3.2- Fibres aramide 5

I.3.3 Fibres céramiques 6

I.3.4 fibres de carbone 8

I.4 .Architecture des renforts 8

I.4.1 Toile ou taffetas 9

I.4.2 Serge 9

I.4.3- Satin 9

I.5 Les charges 9

I.5.1 Nature, taille et propriétés des charges 10

I.5.2 Les charges organiques 10

I.5.3 Les charges organo-minérales 11

I.6 Additifs 11

I.6.1 Lubrifiants et agents de démoulage 12

I.6.2 pigments et colorants 12

I.6.3 Agents anti-retrait: 12

I.6.4 agent anti ultraviolets 13

I.7 Les matrice 13

I.7.1 Classification des matrices 13

I.7.1.1 Les composites à matrice organique (CMO) : 14

I.7.1.2 Les thermoplastiques 14

I.71.3 Les thermodurcissables 14

I.7.2 Composite à matrice céramique 14

I.7.3 Les composites à matrice métallique 14

I.8 Définition Résine 15

I.8.1 Type de Résine 15

I.8.1.1 Résine thermodurcissable 15

I.8.1.2 Résine thermoplastique 16

I.8.1.3- Résine thermostable 16

I.8.1.4- Elastomère thermoplastique 16
I.9- Les monocouches: 16
I.10- Les Stratifiés 17
I.11- Sandwichs 17
I.12- Technique de préparation des composite 18
I.12.1- Moulage au contact 18
I.12.2- Moulage par injection basse pression de résine – RTM 19
I.12.3- Moulage à la presse à froid « voie humide » basse pression 20
I.12.4 Moulage par enroulement filamentaire 21
I.12.5 Moulage par centrifugation 21
20

Chapitre II
Généralité sur la vibration

II.1 Définition des vibrations 25
II.2- Classification des vibrations 25
II.2.1- Vibrations libres et vibrations forcées 25
II.2.2- Vibrations amorties et vibrations non amorties 26
II.2.3- Vibrations régulières et vibrations non régulières 26
II.3- Caractéristiques d'une vibration 26
II.3.1- Les fréquences 26
II.3.2 Amplitude 27
II.3.3 Accélération (mesure d'intensité de vibration 27
II.4 Classifications des mouvements vibratoires 27
II.4.1 Basse fréquence (1-80 HZ) 28
II.4.2 Moyenne et haute fréquences (>80 Hz) 28
II.5 Effets des vibrations sur les processus de coupe 28
II.6 Analyse vibratoire 29
II.7 Caractérisation par analyse vibratoire 29
II.7.1 Analyse modales 29
II.8 Domaine d'utilisation 30
II.8.1 Véhicule 30
II.9 Problèmes vibratoires typiques 31
II.10 La chaîne de mesure 31
II.10.1 Définition du Vibromètre (Appareil de mesure des vibrations) 32

II.11 Les différents types de vibromètre 32

II.11.1 Vibrométrie monopoint 32

II.11.2 Vibrométrie différentielle 33

II.11.3 Vibrométrie dans le plan 34

II.11.4 Vibrométrie multipoint 34

II.12 Conclusions 34

Chapitre III

Vibration des poutres composites

III.1. Introduction aux vibrations des poutres en matériaux composites 37

III. 2. Etat d'Art 37

III.2 Élaboration du biocomposite 39

III.2.1 Préparation de la surface de la plaque de verre 39

III.2.2 Préparation du mélange de résine 39

III.2.3 Disposition des fibres 39

III.3 Préparation des éprouvettes composites 41

III.4 Matériel utilisé pour les essais de vibration 41

III.5 Conclusion 42

Chapitre VI

Résultats et discussions

IV.1 : Présentation des résultats 44

IV 2 : Comparaison des résultats pour quatre types du composite 46

IV 3 : Interprétation des résultats 49

IV 4 : Interprétations complémentaires 50

VI. 5 Conclusion 51

LISTE DU FIGURES

CHAPITRE I : Généralités sur les matériaux composites

FigureI.1 : matériau composite 2

Figure I.2 : Composites à fibres 3

Figure I.3 : fibres de verre 5

Figure I.4 : Fibres aramide 5

FigureI.5 : Fibres céramiques 6

Figure I.6 : Fibre carbone 8

Figure I.7 : Trois grandes familles de matrices 14

Figure I.8 : Résine polyester 15

Figure I.9 : Structure de composite monocouche 17

Figure I.10 : Les nombres entre crochets désignent l'angle de chaque pli (en degrés) par rapport à une direction de référence. Image Laurent Gornet. 17

Figure I.11 : Sandwichs 18

Figure I.12 : Moulage au contact 18

Figure I.13 : Moulage par projection simultanée 19

Figure I.14 ; Moulage par injection basse pression de résine – RTM 19

Figure I.15 : Moulage à la presse à froid « voie humide » basse pression 20

Figure I.16 : Moulage par enroulement filamentaire 21

Figure I.17 : Moulage par centrifugation 21

Chapitre II 20

Généralité sur la vibration

Figure II.1 ; vibration du pont 25

Figure II.2 : Appareils de mesure des vibrations 31

Figure II.3 : Vibrométrie mono point 32

Figure II.4 ; Bon d'essais par vibromètre laser 33

CHAPITRE IV
RESULTATS ET DISCUSSIONS

Figure IV. 1 : Bon d'essai de vibration par Pulse (a, b, c) 46

Figure IV. 2 : (a, b, c, d) les fréquences et amortissement pour quatre type de matériaux composite 46

Figure IV. 3 : L'influence du materiaux composite sur les fréquences propres 49

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Propriétés de la fibre d'aramide 6

Tableau 2 : Propriétés de la fibre céramiques 7

Introduction générale

Dans de nombreuses applications industrielles modernes, les structures sont de plus en plus sollicitées dans des environnements dynamiques où les phénomènes vibratoires jouent un rôle déterminant dans la performance, la sécurité et la durabilité. Les matériaux composites stratifiés, largement utilisés pour leur légèreté et leur résistance spécifique, doivent ainsi être conçus non seulement pour supporter des charges statiques, mais aussi pour répondre efficacement aux sollicitations vibratoires.

Toutefois, le comportement vibratoire des composites dépend fortement de la nature des fibres de renfort (naturelles ou synthétiques), de la matrice utilisée (polymère rigide ou souple), ainsi que de la configuration des plis. Si les fibres synthétiques comme le verre ou l'aramide (Kevlar) offrent de bonnes performances mécaniques, elles posent des problèmes environnementaux et de coût. À l'inverse, les fibres naturelles comme le jute présentent un fort potentiel écologique, mais leurs performances dynamiques sont encore peu étudiées. Dès lors, comment optimiser la combinaison de fibres naturelles et synthétiques dans un composite stratifié pour atteindre un bon compromis entre rigidité, amortissement et durabilité dynamique ?. Cette question constitue le cœur du présent travail de recherche, qui vise à étudier expérimentalement le comportement vibratoire de poutres composites stratifiées hybrides renforcées par des tissus en fibres de jute (TFJ) et des fibres synthétiques (verre et Kevlar), à matrice polyester ou époxy. L'étude porte sur la détermination des fréquences naturelles et des coefficients d'amortissement, qui sont des indicateurs essentiels pour évaluer les performances dynamiques des matériaux.

Ce mémoire s'articule autour de plusieurs chapitres permettant de situer, encadrer et analyser cette problématique :

- Chapitre I **:** Généralités sur les matériaux composites, leurs composants, propriétés mécaniques, types de renforts et de matrices, ainsi que leurs domaines d'application.
- Chapitre II **:** Rappels théoriques sur les phénomènes vibratoires, avec une attention particulière aux structures mécaniques soumises à des sollicitations dynamiques.
- Chapitre III **:** Présentation de la méthodologie expérimentale, des matériaux étudiés, des procédés de fabrication et des outils de mesure utilisés.

- Chapitre IV : Présentation, analyse et discussion des résultats expérimentaux portant sur les fréquences propres et les coefficients d'amortissement des différentes configurations de composites.
- Conclusion générale : Synthèse des principaux résultats obtenus, évaluation des performances des différents matériaux testés, et propositions de perspectives pour des travaux futurs.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

I.1 Introduction

Dans les secteurs industriels, les matériaux alliant haute performance, rentabilité économique et durabilité dans le temps. Face à ces exigences, les chercheurs se trouvent souvent dans l'obligation d'optimiser les matériaux déjà existants en les adaptant à de nouveaux usages ou en améliorant certaines de leurs propriétés. Cependant, dans certains cas spécifiques, les solutions classiques ne suffisent plus, ce qui pousse la recherche à franchir un cap : il devient alors nécessaire de repenser entièrement les approches habituelles et d'envisager des alternatives plus novatrices.

De nos jours, la découverte de matériaux totalement nouveaux est devenue rare. En revanche, les progrès significatifs proviennent surtout de la combinaison intelligente de matériaux connus, dans le but de créer des matériaux hybrides aux propriétés améliorées. Cette démarche a conduit à l'émergence des matériaux composites, qui sont le fruit d'une association maîtrisée entre deux ou plusieurs constituants différents. Ces matériaux permettent d'atteindre des performances que les matériaux traditionnels ne peuvent offrir seuls. C'est précisément cette catégorie de matériaux, les composites, qui constitue l'objet principal de notre module d'étude.

I.2 Définition d'un matériau composite

Un matériau composite est un matériau non miscibles, mais présentant une forte capacité d'adhésion entre eux. Cette union ne résulte pas simplement d'un mélange physique, mais d'une structure organisée où chaque composant joue un rôle bien précis. On distingue généralement deux éléments essentiels dans un composite **:** le renfort et la matrice.

Le renfort, souvent constitué de fibres (comme le verre, le carbone ou l'aramide), joue le rôle de squelette mécanique. Il confère au matériau sa résistance et sa rigidité, et permet de supporter les contraintes mécaniques. Quant à la matrice (qui peut être organique, métallique ou céramique), elle enrobe les fibres de renfort, assure leur cohésion, répartit les charges

appliquées sur l'ensemble du matériau et joue un rôle de protection contre les agressions chimiques et environnementales.

L'intérêt majeur des matériaux composites réside dans le fait que le matériau final possède des propriétés globales supérieures à celles de chacun de ses constituants pris individuellement. En d'autres termes, l'association intelligente du renfort et de la matrice permet d'obtenir un matériau aux performances optimisées, à la fois léger, résistant et durable, répondant ainsi aux exigences de plus en plus poussées de nombreux domaines d'application tels que l'aéronautique, l'automobile, le bâtiment ou encore le sport de haut niveau.

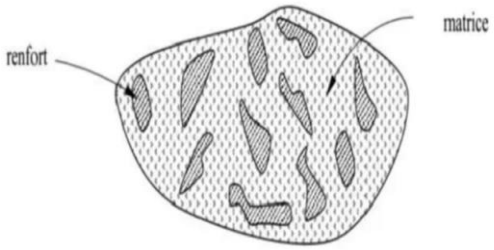


Figure I.1 : matériau composite **[ROKB, 01]**

I.3 Classification des matériaux composites

La Classification des matériaux composites est basée sur leur utilisation**.** On distingue ainsi deux grandes catégories : les composites à grande diffusion (GD)**,** qui sont peu coûteux et largement utilisés dans l'industrie (environ 95 % des matériaux composites utilisés). Ces composites sont généralement constitués de résines polyesters renforcées de fibres de verre, avec un taux de renfort avoisinant les 30 % dans la majorité des cas.

En revanche, les composites à hautes performances (HP) sont beaucoup plus onéreux et leur utilisation est plus restreinte, mais ils offrent d'excellentes propriétés mécaniques. Ils font appel à des renforts sous forme de fibres longues, avec un taux de renfort dépassant souvent les 50 %.

Une autre manière de classer les matériaux composites repose sur la forme de leurs constituants. En fonction de la géométrie et de la nature des éléments qui les composent, les composites peuvent être regroupés en plusieurs familles, ce qui permet une meilleure compréhension de leurs propriétés et de leurs domaines d'application.

Les composites à fibres représentent une catégorie spécifique de matériaux composites, où le matériau est renforcé par des fibres qui peuvent être longues, courtes ou même coupées. L'orientation ainsi que l'arrangement spatial de ces fibres jouent un rôle crucial dans la définition et la modélisation des propriétés mécaniques du composite. Ces propriétés ne sont pas fixes, elles peuvent être ajustées et modulées en fonction de plusieurs paramètres, notamment la nature des constituants utilisés, la proportion relative de ces constituants, ainsi que l'orientation précise des fibres au sein de la matrice. Cette capacité d'adaptation permet de concevoir des matériaux composites aux performances sur mesure, adaptés à des besoins variés et spécifiques.

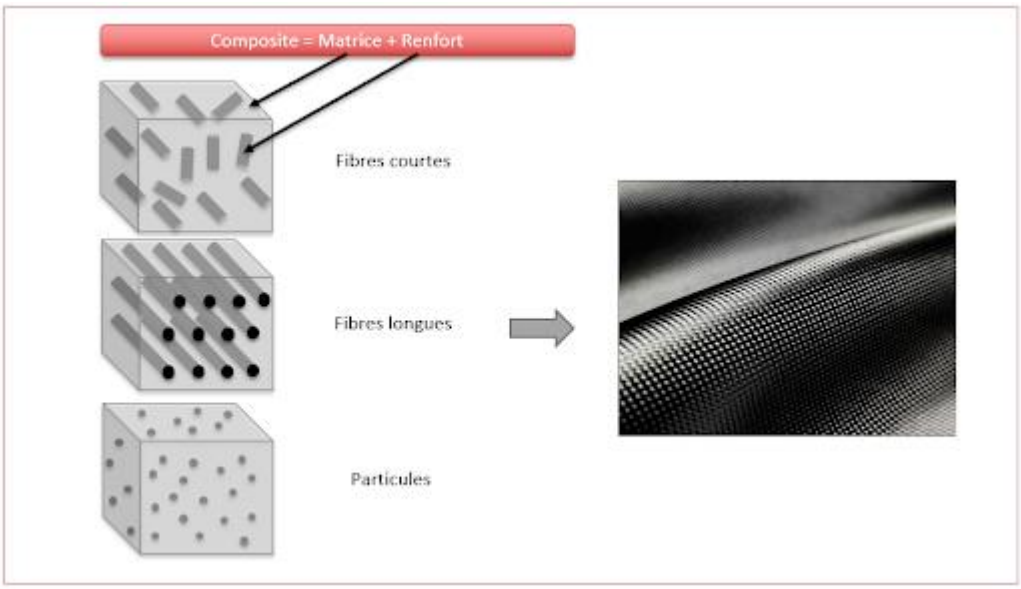


Figure I.2 : Composites à fibres **[SABA, 14]**

I.3.1 Les renforts :

Qualifié de composite à fibres lorsque son renfort est sous forme de fibres. Ces fibres peuvent être continues, offrant une résistance optimale, ou discontinues, comme les fibres coupées ou courtes, qui apportent d'autres caractéristiques mécaniques. L'arrangement spatial et l'orientation de ces fibres jouent un rôle déterminant dans la modulation des propriétés mécaniques des composites. Cette organisation permet d'obtenir une large gamme de comportements, allant de matériaux fortement anisotropes, où les propriétés varient selon la direction, à des matériaux isotropes dans un plan, offrant des propriétés uniformes dans ce plan.

Les types de renforts couramment utilisés dans les composites sont nombreux et varient selon les applications. Une liste détaillée de ces renforts est souvent présentée dans les documents techniques spécialisés.

I.3.2Fibres de verre

Les fibres de verre bénéficient d'un excellent rapport performance-prix, ce qui les place largement en tête des matériaux de renfort utilisés aujourd'hui dans la fabrication des structures composites. Grâce à leur coût relativement faible, leur bonne résistance mécanique et leur légèreté, elles sont très prisées dans de nombreux secteurs industriels, notamment dans la construction, l'aéronautique, l'automobile et le nautisme. Ces fibres offrent également une bonne résistance à la corrosion et aux agressions chimiques, ce qui renforce leur utilité dans des environnements variés.



Figure I.3 : Fibres de verre

I.3.3 Fibres aramide

Les fibres aramides se distinguent par leurs excellentes propriétés mécaniques en traction, comparables à celles des fibres de carbone. Cependant, leur résistance à la compression demeure relativement faible. Cette faible performance en compression est généralement attribuée à une adhérence insuffisante entre les fibres et la matrice dans le matériau composite. Afin de pallier ce défaut, des traitements de surface spécifiques, tels que le « enjimage » des fibres, peuvent être appliqués pour améliorer l'interface fibre-matrice.

Par ailleurs, l'utilisation de composites à fibres hybrides constitue une solution efficace pour compenser les limitations propres aux composites à fibres aramides. Des renforts hybrides combinant, par exemple, les fibres de verre et de kevlar, ou de carbone et de kevlar, sont largement employés dans des applications récréatives et sportives telles que le ski ou les raquettes de tennis. Ces combinaisons permettent de tirer parti des avantages complémentaires de chaque type de fibre, optimisant ainsi les performances globales du matériau composite.



FigureI.4 : Fibres aramide **[DERO, 10]**

Tableau 1 : Propriétés de la fibre d'aramide [**KRISH, 88**]

	K29	K49	K119	K129	K149
Densité (g/cm^3)	1.44	1.45	1.44	1.45	1.47
Diamètre (µm)	12	12	12	12	12
Résistance à latraction (GPa)	2.8	2.8	3.0	3.4	2.4
Allongement à la rupture (%)	3.5-4.0	2.8	4.4	3.3	2.4
Module d'élasticité en traction (GPa)	65	125	55	100	147
Teneur humidité (%) à 25 °C, 65 % HR	6	4.3	-	-	1.5
Coefficient de dilatation thermique (10^{-6} K^{-1})	-4.0	-4.3	-	-	-

I.3.3 Fibres céramiques

Les fibres céramiques constituent un type spécifique de matériaux composites dans lesquels à la fois le renfort et la matrice sont d'origine céramique. Ces fibres sont généralement fabriquées par dépôt chimique en phase vapeur sur un filament support. Elles sont principalement utilisées dans des applications soumises à des températures très élevées, allant de 200 °C à 500 °C, où la résistance thermique est cruciale.

Ces matériaux trouvent notamment leur place dans les zones chaudes des moteurs d'avions, où les conditions extrêmes exigent des performances mécaniques et thermiques élevées.

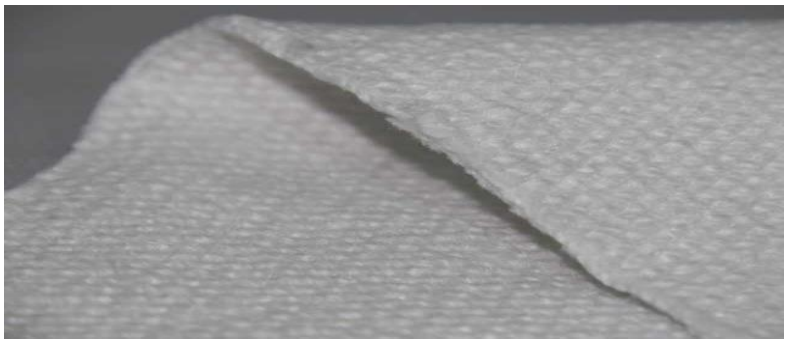
Plusieurs exemples de fibres céramiques couramment employées incluent les fibres de carbure de silicium (SiC), d'alumine (Al2O3) et de nitrure de bore (BN), chacune offrant des propriétés spécifiques adaptées à ces environnements sévères.

Céramiques :

• fibres de Carbure de Silicium

• fibres de Bore

•fibres de Bore carbure de silicium



FigureI.5 : Fibres céramiques **[UMIR ,16]**

Tableau 2 : Propriétés de la fibre céramiques **[KRISH, 88]**

Type de fibre	**composition (pourcentage massique**	**Diamètre (µm)**	**Densité (g/cm³**	**Résistance à la traction (GPa**	**Modul de Young**
Nextel 312	Al_2O_3-62,5;SiO_2-24,5;B_2O_3 - 13	10-12	2.7	1.7	150
Nextel 440	Al_2O_3-70;SiO_2-28; B_2O_3 - 2	10-12	3.05	2.0	190
Nextel 550	Al_2O_3-73;SiO_2-27	10-12	3.03	2.0	193
Nextel 610	Al_2O_3 - 99	10-12	3.9	3.1	370

Nextel 650	Al_2O_3-89;ZrO_2-10 ; Y_2O_3 - 1	10-12	4.10	2.5	358
Nextel 720	Al_2O -85;SiO_2-15	10-12	3.40	2.1	260
Saffil	Al_2O_3-96;SiO_2 -3	3	3.2	1.0	100
Saphikon	Monocristald'Al_2O_3	75-250	3.83	3.1	380

I.3.4 Fibres de carbone

Les fibres de carbone se caractérisent par des propriétés mécaniques exceptionnelles, faisant d'elles des matériaux de choix pour de nombreuses applications techniques. Leur fabrication débute à partir d'un polymère dit « précurseur », dont le polyacrylonitrile (PAN) est actuellement le plus couramment utilisé. La qualité intrinsèque des fibres de carbone finales dépend étroitement des caractéristiques du précurseur initial.

Le procédé de fabrication implique une décomposition thermique contrôlée des fibres acryliques, réalisée sans fusion, aboutissant à une structure graphitique cristalline conférant aux fibres leurs performances mécaniques élevées. Par ailleurs, le brai, un sous-produit issu du raffinage du pétrole ou de la houille, constitue également une source alternative de matière première pour la production de fibres de carbone, bien que ses propriétés diffèrent de celles des fibres dérivées du PAN.

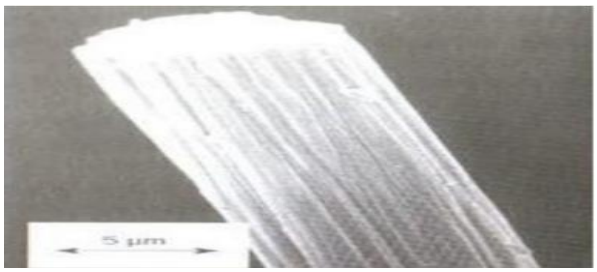


Figure I.6 : Fibre en carbone **[BONN, 10]**

I.4 Architecture des renforts

Il existe différentes géométries et textures de renforts

I.4.1Toile ou taffetas :

La toile (ou taffetas) est une armure dans laquelle les fils impairs et pairs alternent à chaque coup, au-dessus et au-dessous de la trame. C'est la plus simple et la plus ancienne des armures. Elle est aussi la plus solide grâce à un maximum d'entrecroisements des fils de chaîne et de trame. Les tissus obtenus n'ont ni envers ni endroit. L'armure toile donne un aspect grenu au tissu. La toile et le taffetas ont la même structure mais sont constitués de matières distinctes. Le terme de toile est utilisé pour des étoffes à base de fibres discontinues comme le coton, la laine, le lin

I.4.2 Serge :

Chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs (n) fils de trame et chaque fil de trame flotte au-dessus de (m) fils de chaîne. Armure de plus grande souplesse que le taffetas ayant unebonne densité de fils. Ci-contre, un sergé 2/2.

I.4.3 Satin :

Chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs (n-1) fils de trame et réciproquement. Ces tissus ont des aspects différents de chaque côté. Ces tissus sont assez souples et adaptés à la mise en forme de pièces à surfaces complexes. Ce type de tissus présente une forte masse spécifique.

I.5 Les charges :

Les charges dans les matériaux composites représentent des particules ou des phases secondaires incorporées au sein de la matrice afin d'améliorer les propriétés globales du composite. Leur introduction vise à optimiser des caractéristiques spécifiques telles que la

rigidité, la résistance mécanique, la stabilité thermique, ainsi que la réduction des coûts de production.

La nature des charges peut être variée : elles peuvent être minérales, métalliques, organiques ou synthétiques. La morphologie, la granulométrie et la répartition homogène des charges dans la matrice sont des paramètres cruciaux influençant la performance mécanique et physique du matériau composite. En effet, une dispersion contrôlée des charges permet une meilleure transmission des contraintes et une amélioration des propriétés mécaniques du composite, notamment la résistance à la traction, à la compression et à l'usure.

Par ailleurs, le dosage optimal des charges est essentiel pour maintenir un équilibre entre les propriétés mécaniques recherchées et les contraintes liées au procédé de fabrication, telles que la viscosité de la matrice ou la densité du matériau final.

I.5.1 Nature, taille et propriétés des charges

Les composites actuels contiennent une grande diversité de particules de charge variant par la taille, la composition et le pourcentage de celles–ci.Les charges, la plupart du temps minérales, varient d'un composite à l'autre mais sont composées de SILICE (SiO_2) sous différentes formes et d'autres types de particules.

I.5.2 Les charges organiques

Les charges organiques jouent un rôle essentiel dans l'amélioration des performances globales du matériau. Ces charges, constituées principalement de résine matricielle polymérisée, sont introduites dans la matrice pour réduire la rétraction due à la polymérisation, diminuer le coefficient de dilatation thermique, améliorer les propriétés optiques, et accroître la dureté du matériau final.

De nos jours, l'industrie intègre des charges dites « organiques », parmi lesquelles figurent les Or MoCers (Organical Modified Ceramics). Ces dernières sont des macro monomères hybrides, composés d'un noyau inorganique de silice greffé par des groupements méthacrylate multifonctionnels, conférant au matériau des propriétés à la fois organiques et inorganiques. Par ailleurs, on identifie également des charges dites organo-organiques, telles que le Tri Méthylol Propane Triméth acrylate(TMPTMA), généralement présentes sous forme de particules de taille moyenne avoisinant ±20 µm.

I.5.3 Les charges organo-minérales

Les charges organo-minérales constituent une catégorie hybride de renforts utilisés dans les matériaux composites, combinant à la fois des caractéristiques minérales et organiques. Elles sont composées d'un noyau minéral, généralement constitué de silice vitreuse ou d'aérosil, enrobé d'une matrice résineuse polymérisée. Cette structure bicomposante permet d'associer la rigidité et la stabilité thermique du noyau minéral aux propriétés d'adhésion et de dispersion de la phase organique.

Ces charges se présentent le plus souvent sous forme de micro-charges**,** qui sont exclusivement utilisées dans cette configuration pour garantir une compatibilité optimale avec la matrice polymère et une amélioration ciblée des propriétés mécaniques, rhéologiques et optiques du composite final.

I.6Additifs

Dans le but d'optimiser les performances globales des matériaux polymères, tant sur le plan physique (propriétés mécaniques, thermiques...) que chimique, et d'en faciliter la mise en œuvre lors du processus de transformation, il est courant d'incorporer divers additifs à la matrice polymère. Ces additifs jouent un rôle fondamental dans l'ajustement des propriétés

fonctionnelles du matériau final, en répondant à des exigences spécifiques d'usage, de durabilité ou de stabilité.

I.6.1 Lubrifiants et agents de démoulage

De faciliter les opérations de moulage et de façonnage. Leur fonction principale consiste à réduire l'adhérence des résines aux surfaces des moules et mandrins, permettant ainsi un démoulage aisé, une meilleure qualité de surface des pièces obtenues, et une prolongation de la durée de vie des équipements de production. Ils contribuent également à limiter les défauts liés à l'arrachement ou à l'adhésion excessive, ce qui améliore la productivité et la reproductibilité des procédés.

I.6.2 pigments et colorants :

Les pigments et les colorants sont des additifs utilisés pour conférer une teinte spécifique aux matériaux polymères. Les pigments, généralement insolubles, se présentent sous forme de poudres ou de paillettes, et sont principalement issus d'oxydes ou de sels métalliques. Leur stabilité chimique et thermique en fait des agents colorants privilégiés dans les applications industrielles. En revanche, les colorants sont des composés organiques solubles dans des solvants spécifiques. Bien qu'ils permettent une coloration vive et uniforme, leur utilisation reste limitée en raison de leur faible résistance aux agents chimiques et aux températures élevées, ce qui restreint leur champ d'application.

I.6.3 Agents anti-retrait :

Les agents anti-retrait, communément appelés « low profile » ou « lowshrink », sont des additifs spécifiques incorporés aux résines polymères afin de compenser ou d'éliminer les phénomènes de retrait survenant lors de la polymérisation. Ces retraits sont généralement dus à la diminution des distances interatomiques entre les monomères au cours de leur réticulation.

En plus de limiter ces déformations dimensionnelles, ces additifs contribuent à améliorer l'écoulement de la matière dans certaines techniques de moulage. Ils sont constitués principalement de polymères thermoplastiques ou d'élastomères, et sont disponibles sous forme de poudres ou dissous dans des solvants tels que le styrène.

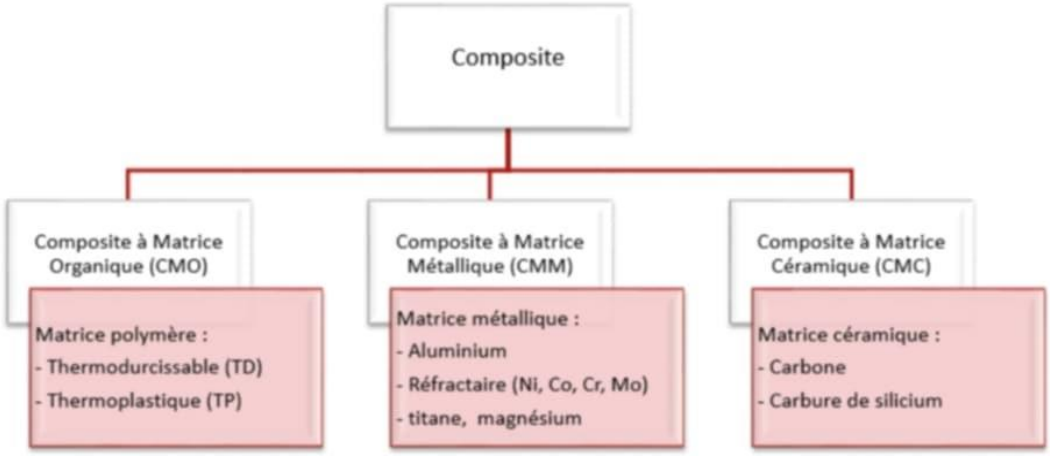
I.6.4 Agent anti ultraviolets :

Les agents anti-ultraviolets sont des additifs essentiels destinés à préserver l'intégrité des résines exposées aux rayonnements solaires. En absorbant les rayons ultraviolets (UV), ces composés empêchent les dégradations structurelles qui pourraient résulter de la rupture des liaisons atomiques ou de la transition des molécules vers un état excité favorisant les processus d'oxydation. Leur incorporation permet ainsi de prolonger la durabilité et la stabilité chimique des matériaux polymères soumis à des environnements extérieurs.

I.7Les matrice

La matrice constitue l'élément fondamental qui lie et maintient ensemble les fibres au sein d'un matériau composite. Elle joue un rôle crucial en répartissant les efforts mécaniques, notamment la résistance à la compression et à la flexion, assurant ainsi la cohésion structurelle du composite. Par ailleurs, la matrice protège chimiquement les fibres des agressions environnementales, contribuant à la durabilité et à la stabilité du matériau final

I.7.1 Classification des matrices



.:

FigureI.7 : Trois grandes familles de matrices[**SABA, 14**]

Les matrices sont classées en trois familles :

I.7.1.1 Les composites à matrice organique (CMO) :

I.7.1.2 Les thermoplastiques : qui se présentent sous forme solide (granulés, plaques...) et que l'on met en forme en les ramollissant par chauffage, puis en les solidifiant par refroidissement.

I.7.1.3 Les thermodurcissables : qui se présentent sous forme liquide visqueux et que l'on met en forme en déclenchant une réaction chimique de polymérisation par ajout d'un durcisseur, ce qui entraîne une solidification.

I.7.2 Composite à matrice céramique :

Les composites à matrice céramique ou CMC sont des matériaux composites faisant partie des céramiques techniques. Ils sont caractérisés par un ensemble de fibres céramiques incorporées dans une matrice également céramique. Fibres et matrice peuvent en principe être constituées de toutes les céramiques connues, en y incluant même le carbone.

I.7.3 Les composites à matrice métallique :

Les CMM ou Composites à Matrice Métallique (MMC) pour Metal Matrix Composite dans les pays anglo-saxons) sont des matériaux dans lesquels des particules ou des fibres de céramique (SiC, Al2O3, B4C…) sont insérées dans une matrice métallique (aluminium, fonte, titane, cuivreux) et leur confèrent des propriétés d'usage optimisées où les contraintes tribologiques, mécaniques ou thermiques sont élevées. Les performances d'un CMM sont dues essentiellement à la nature de la matrice et celle du renfort (nature, taux d'introduction, taille des particules).

I.8. Définition Résine

Les résines constituent la matrice principale dans les matériaux composites. Parmi celles-ci, les plus couramment utilisées sont les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques. Les résines thermodurcissables, une fois durcies, forment un réseau tridimensionnel rigide qui confère au composite une grande stabilité thermique et mécanique. Les résines thermoplastiques, quant à elles, peuvent être ramollies et remodelées par chauffage, offrant ainsi une certaine flexibilité dans le processus de fabrication et de recyclag



Figure **I.8** : résine polyester **[SAAI,18].**

I.8.1 Type de Résine

I.8.1.1Résine thermodurcissable

La résine thermodurcissable est matériau insoluble après traitement thermique (chaleur, radiation) ou physico-chimique (catalyse, durcisseur).

I.8.1.2 Résine thermoplastique :

Les polymères pouvant être alternativement ramollie par chauffage et durci par refroidissement dans un intervalle de température spécifique du polymère étudié. Les résines thermoplastiques présentent l'aptitude à l'état ramolli, de se mouler aisément par plasticité.

I.8.1.3 Résine thermostable :

Les polymères présentant des caractéristiques mécaniques stables sous des pressions et des températures élevées (>200°C) appliquées de façon continue. Cette propriété est mesurée en déterminant la température que peut supporter la résine durant 2000h sans perdre la moitié de ses caractéristiques mécaniques.

I.8.1.4 Elastomère thermoplastique

Elastomère thermoplastique est un polymère fortement élastique avec une structure des matériaux composites suivante :

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types

•Les monocouches

•Les stratifiées

•Les sandwiches

I.9 .Les monocouches :

Les monocouches constituent l'unité fondamentale de la structure des matériaux composites. Elles se distinguent principalement par la forme et l'orientation des renforts en fibres longues, qui peuvent être unidirectionnelles (UD) ou réparties aléatoirement, ainsi que par la nature des fibres tissées ou

courtes. Cette classification influe directement sur les propriétés mécaniques et fonctionnelles des composites.

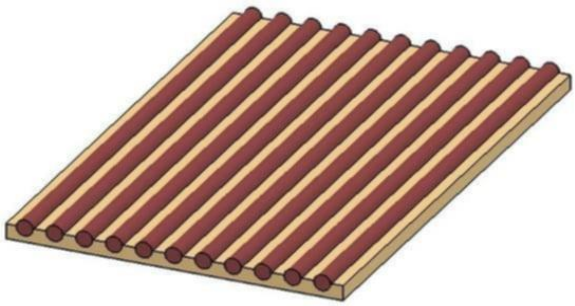


Figure I.9 : Structure des composites monocouches **[BOU, 21]**

I.10. Les Stratifiés :

Un stratifié est défini comme un assemblage superposé de plusieurs monocouches, chacune présentant une orientation spécifique par rapport à un référentiel commun, appelé référentiel du stratifié. Cette organisation structurale permet d'adapter les propriétés mécaniques globales du matériau composite selon les besoins fonctionnels.



Figure I.10 : Stratifié à plis de construction 0/90/0/0/90/0° **[ASMA, 22]**

1. Equilibré stratifié comportant autant de couches orientée suivant la direction +0 que de couches orientée suivant la direction -0.

2. Symétrique : stratifié comportant des couches disposées symétriquement par rapport

3 .Orthogonal: stratifié comportant autant de couches à 0º que de couches à 90°.

I.11 .Sandwichs:

Un panneau sandwich est généralement constitué de deux semelles rigides et minces, enveloppant une âme épaisse mais peu résistante. Cette configuration confère à la structure une grande légèreté tout en assurant une excellente résistance à la flexion. De plus, le matériau sandwich offre d'excellentes propriétés d'isolation thermique, ce qui en fait un choix privilégié dans de nombreuses applications techniques et industrielles.

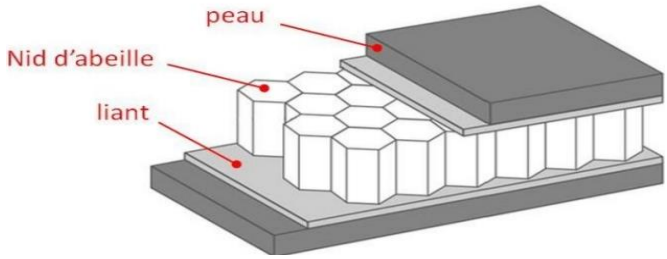


Figure I.11 : Sandwichs **[BONN, 10]**

I.12 Technique de préparation des composite

I.12 1 Moulage au contact

Le principe de procédé manuel pour la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression. Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détourée.

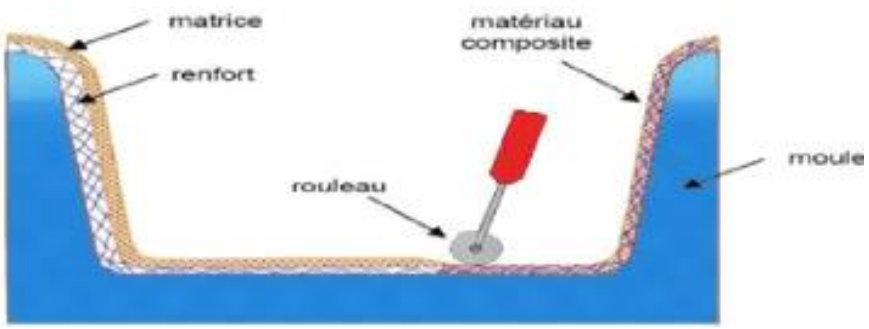


Figure I.12 : Moulage au contact **[ASSB, 22]**

I.12.2 Moulage par projection simultanée

Le principe de procédé manuel ou robotisé permettant la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables à température ambiante et sans pression. Les matières premières sont mises en œuvre à l'aide d'une machine dite « de projection » comprenant : - un dispositif de coupe – projection du renfort (roving) un ou deux pistolets projetant simultanément la résin

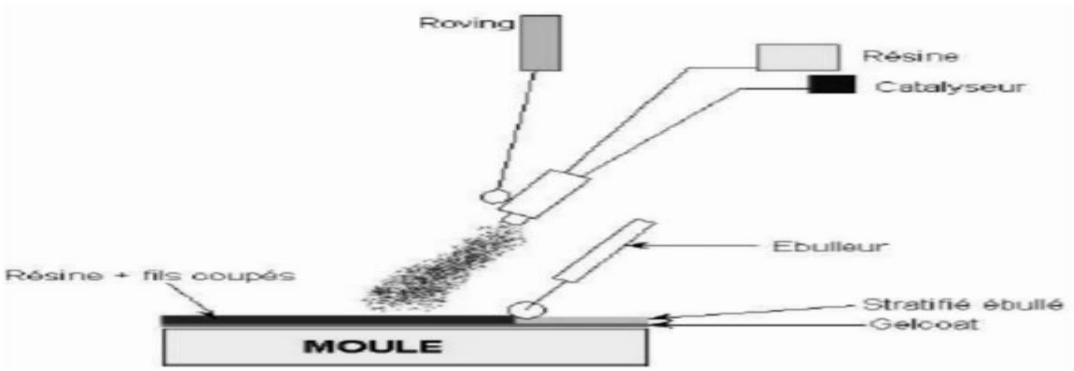


Figure.I.13 : Moulage par projection simultanée **[SAMI, 16]**

I.12.2. Moulage par injection basse pression de résine – RTM

Le mécanisme du procédé pour le moulage par injection de résine liquide RTM (Résine Transfert Molding) s'effectue entre moule et contre-moule rigides. Le renfort (mats, préforme, éventuellement tissus) est disposé dans l'entrefer du moule. Une fois celui-ci solidement fermé, la résine, accélérée et catalysée, est injectée sous faible pression (1.5 à 4 bars) à travers le renfort jusqu'au remplissage complet de l'empreinte. Après durcissement de la résine, le moule est ouvert et la pièce démoulée.

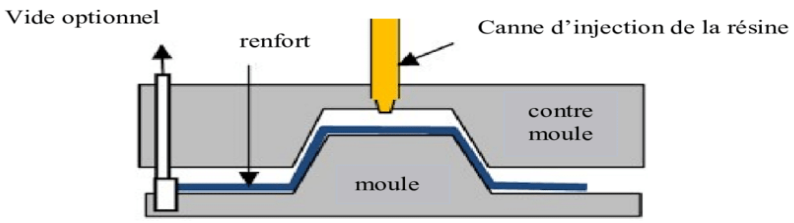


Figure I.14 : Moulage par injection– RTM **[SAMI ,21].**

I.12.3 Moulage à la presse à froid « voie humide » basse pression

Le principe de moulage à l'aide d'une presse à compression entre moule et contre-moule rigides en composite, initialement sans apport thermique extérieur. Moule ouvert, le renfort (mat) est posé sur la partie inférieure du moule et la résine, dotée d'un système catalytique très réactif, est versé en vrac sur le renfort.

La fermeture du moule sous pression (2 à 4 bars) entraîne la répartition de la résine dans l'empreinte et l'imprégnation du renfort. Le durcissement de la résine est accéléré progressivement par l'élévation de température du moule due à l'exothermie de la réaction, ce qui permet un démoulage rapide. Les performances du procédé peuvent être considérablement améliorées par l'usage de moules métalloplastiques, voire métalliques, et d'un système de régulation thermique basse température.

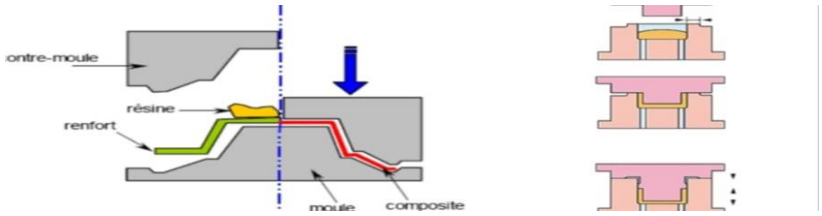


Figure I.15 : Moulage à la presse à froid « voie humide » **[BEN, 10]**

I.12.4 Moulage par enroulement filamentaire

Le mode de fonctionnement de moulage limité aux formes de révolution. Initialement, destiné à la réalisation d'enveloppes de révolution nécessitant de hautes performances mécaniques par enroulement progressif sur un mandrin, selon un angle déterminé de fils de verre imprégnés de résine. Par la suite, le procédé a été étendu à des structures moins performantes en associant aux rovings bobinés d'autres types de renfort (fils coupés, mat, tissu) appliqués de façon adaptée

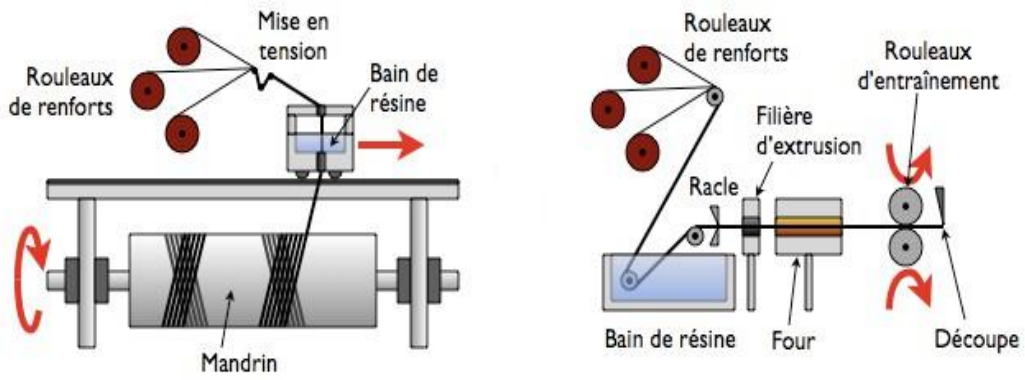


Figure I.16 : Moulage par enroulement filamentaire **[FEDE, 11]**

I.12.6 Moulage par centrifugation

Le principe de procédé de moulage limité aux enveloppes cylindriques. A l'intérieur d'un moule cylindrique en rotation à basse vitesse, on dépose des fils coupés à partir de roving (ou du mat), de la résine catalysée et accélérée et éventuellement des charges granulaires. Puis, on augmente la vitesse de rotation du moule pour densifier et débuller la matière. Après durcissement de la résine, éventuellement accélérée par un apport thermique, on peut extraire très facilement la pièce du moule.

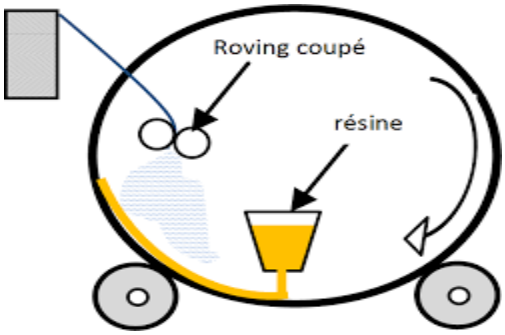


Figure I.17 : Moulage par centrifugation **[GUI, 16]**

Les matériaux composites suscitent un intérêt croissant dans le domaine de l'ingénierie moderne en raison de leur combinaison unique de propriétés mécaniques, physiques et chimiques. Ils sont constitués de deux ou plusieurs phases distinctes – typiquement une matrice et un renfort – dont la synergie permet d'obtenir des performances supérieures à celles des

matériaux classiques. Cette structure complexe rend les composites particulièrement adaptés aux secteurs exigeants tels que l'aéronautique, l'automobile, le spatial ou encore les énergies renouvelables. Néanmoins, malgré leurs nombreux avantages, l'analyse de leur comportement dynamique, notamment sous l'effet des vibrations, représente un enjeu majeur pour la conception fiable de structures légères et performantes.

Les vibrations sont omniprésentes dans les systèmes mécaniques et peuvent être à l'origine de phénomènes indésirables, tels que le bruit, la fatigue ou même la rupture. Dans le cas des matériaux composites, leur comportement vibratoire est influencé par plusieurs facteurs comme l'orientation des fibres, la nature du renfort et de la matrice, l'empilement des couches, ou encore les conditions aux limites. Par rapport aux matériaux métalliques, les composites présentent généralement un amortissement interne plus élevé, ce qui peut contribuer à la réduction des amplitudes vibratoires. Toutefois, cette caractéristique peut aussi engendrer des effets complexes, notamment des variations des fréquences propres du système, une sensibilité accrue à la délamination ou encore la concentration locale des contraintes.

L'étude des vibrations dans les matériaux composites repose sur des approches expérimentales, numériques et analytiques. D'un côté, les essais modaux expérimentaux permettent de mesurer les réponses dynamiques et d'identifier les modes propres de structures composites. D'un autre côté, les outils de modélisation comme la méthode des éléments finis (FEM) sont essentiels pour simuler le comportement vibratoire en tenant compte des anisotropies et de l'hétérogénéité du matériau. De plus, les approches hybrides combinant l'intelligence artificielle et les capteurs embarqués ouvrent la voie à des systèmes de surveillance vibratoire intelligents capables de détecter les défauts naissants et de prévenir les défaillances structurelles.

Enfin, la maîtrise des phénomènes vibratoires dans les matériaux composites ne se limite pas à la réduction des vibrations indésirables, mais englobe également leur exploitation dans des dispositifs innovants tels que les absorbeurs passifs, les structures adaptatives ou les composites à réponse vibratoire contrôlée. Dans cette optique, la compréhension fine des interactions entre la microstructure du matériau et son comportement dynamique constitue un domaine de recherche stratégique, au carrefour de la mécanique des structures, de la science des matériaux et de l'ingénierie vibratoire.

CHAPITRE II

GENERALITE SUR LA VIBRATION

II.1 Définition des vibrations

Les vibrations désignent un mouvement oscillatoire d'un corps ou d'un système autour d'une position d'équilibre. Ce phénomène peut être mécanique, acoustique ou même moléculaire. Les vibrations se manifestent dans de nombreux domaines de la physique et de l'ingénierie, et peuvent être volontaires (comme dans les instruments de musique) ou indésirables (comme dans le cas des machines industrielles).



Figure II.1 : vibration du pont **[WEI, 23].**

II.2 Classification des vibrations

Les vibrations peuvent être classifiées sous plusieurs formes. On s'intéresse à la classification la plus commune qui range les vibrations dans trois catégories.

II.2.1 Vibrations libres et vibrations forcées

Lorsqu'un système vibratoire est soumis à une perturbation initiale, puis laissé libre sans l'action d'aucune force extérieure, les vibrations qui en résultent sont qualifiées de vibrations

libres**.** L'oscillation d'un pendule simple constitue un exemple classique de ce type de vibrations, où le mouvement est uniquement déterminé par les conditions initiales du système. En revanche, lorsque le système est soumis à une force externe continue durant sa vibration, les oscillations qui en découlent sont désignées sous le nom de vibrations forcées. Un exemple illustratif est celui du pendule simple soumis à une force périodique extérieure agissant sur sa masse, ce qui modifie son comportement vibratoire naturel.

II.2.2 Vibrations amorties et vibrations non amorties

Si l'énergie totale du système est conservée l'hors des vibrations (il n'y a pas de dissipation de l'énergie), ces vibrations sont dites non amorties. En revanche si le système perd de l'énergie au cours de ces vibrations (si l'on considère la résistance de l'air sur la masse du pendule simple dans l'exemple précédant), après certain temps la masse s'arrête à cause de la dissipation de l'énergie. Ces vibrations, sont dites vibrations amorties

II.2.3 Vibrations régulières et vibrations non régulières

Si l'amplitude du mouvement vibratoire est connue à tout moment, les vibrations résultantes sont appelées régulières ou déterministes. D'une autre manière, c'est le mouvement vibratoire dont on peut prévoir la valeur de l'amplitude à n'importe quel moment. Dans le cas contraire, les vibrations sont dites non régulières ou non déterministes.

II.3 Caractéristiques d'une vibration

Une vibration est caractérisée par :

II.3.1 Les fréquences

Un objet vibrant effectue un va-et-vient de part et d'autre de sa position fixe normale. Un cycle complet de vibration est produit lorsque l'objet se déplace d'une position extrême à l'autre position extrême, puis revient au point de départ. Le nombre de cycles effectués par un objet

vibrant pendant une seconde est appelé sa fréquence. L'unité de fréquence est le hertz (Hz). Un hertz correspond à un cycle par seconde

II.3.2 Amplitude

Un objet vibrant se déplace sur une distance maximale de part et d'autre de sa position fixe. L'amplitude est la distance comprise entre la position fixe et la position extrême, d'un côté ou de l'autre, et elle est mesurée en mètres (m). L'intensité de la vibration dépend de l'amplitude

II.3.3 Accélération (mesure d'intensité de vibration)

La vitesse d'un objet vibrant passe de zéro à une valeur maximale pendant chaque cycle de vibration. Elle est maximale lorsque l'objet passe par la position fixe naturelle qu'il occuperait en l'absence de vibration, en déplacement vers une position extrême. L'objet vibrant ralentit à mesure qu'il s'approche de sa position extrême, où il s'arrête, pour repartir ensuite dans le sens contraire vers la position fixe et l'autre position extrême. La vitesse de la vibration s'exprime en mètres par seconde (m/s). L'accélération est une grandeur qui indique dans quelle mesure la vitesse varie en fonction du temps. La mesure s'exprime en unités de vitesse (mètres par seconde) par seconde ou en mètres par seconde carrée (m/s^2). L'accélération passe de zéro à une valeur maximale pendant chaque cycle de vibration. Elle augmente à mesure que l'objet s'approche de la position fixe qu'il occuperait en l'absence de vibration, les directions de mesure comme suit :

Axe X : dans le sens horizontal perpendiculaire au tronc d’avant en arrière

Axe Y : dans le sens horizontal, transversal du tronc de gauche à droite

Axe Z : dans le sens vertical

II.4 Classifications des mouvements vibratoires

Très basse fréquence (1 < Hz)

Ne provoque pas d'effets à long terme, ce sont les vibrations retrouvées sur un bateau

II.4.1 Basse fréquence (1-80 HZ)

Elle représente les vibrations globales du corps et elles sont ressenties dans le corps entier, elles proviennent des véhicules de toutes sortes

II.4.2 Moyenne et haute fréquences (>80 Hz)

Ce sont généralement les vibrations segmentaires et elles proviennent des outils portatifs, leur transmission se confine généralement aux membres supérieurs (système main bras)

II.5 Effets des vibrations sur les processus de coupe

Les vibrations du système (machine- porte pièce- pièce- outil- porte outil), phénomène dit aussi de broutement, qui apparaissent lors des opérations d'usinage sont la source de multiples difficultés.

Elles dégradent la qualité de la surface usinée

.• Elles affectent la durée de l'outil et accélèrent son usure.

- Elles conduisent à une détérioration rapide de certains organes de la machine-outi

- (roulements- glissières…). Elles peuvent entraîner des déréglages de certains organes de la machine-outil.

- Les vibrations entre la pointe de l'outil et la surface usinée engendrent des défauts

•géométriques sur la pièce. Les vibrations importantes diminuent la productivité et rendent même parfois

•impossible l'opération sur la machine-outil. Elles peuvent être aussi une source de fatigue et de gêne pour l'opérateur

L’augmentation des performances des outils, l’apparition de nouveau matériaux difficilement usinables rendent ces problèmes de plus en plus aigus, les machines étant alors souvent poussées au maximum de leurs possibilités.

II.6 Analyse vibratoire

L’analyse vibratoire constitue une méthode de diagnostic complémentaire couramment utilisée en association avec les mesures acoustiques ou thermiques afin de raffiner l’identification des anomalies de fonctionnement des machines. Elle repose sur l’étude des vibrations générées par les équipements mécaniques, dans le but de détecter et de caractériser d’éventuels dysfonctionnements. Cette technique permet notamment de repérer des défauts tels qu’un mauvais serrage, un désalignement des arbres de transmission ou encore des courroies endommagées.

Les vibrations sont détectées au moyen de dispositifs de mesure généralement non intrusifs, parmi lesquels figurent les accéléromètres (capteurs d’accélération ou de rotation), les vibromètres laser, les enregistreurs numériques et les analyseurs de spectres. Ces vibrations peuvent être quantifiées selon plusieurs paramètres, notamment l’amplitude, le niveau sonore (exprimé en décibels), ou la fréquence (en hertz).

II.7 Caractérisation par analyse vibratoire

II.7.1 Analyse modales

Les méthodes d’analyse modale représentent des approches d’investigation relativement récentes, développées dans le but d’établir ou d’améliorer la connaissance du comportement dynamique des structures réelles. Ces méthodes permettent d’identifier les paramètres dynamiques essentiels, même pour des structures linéaires complexes, en les réduisant à un

ensemble restreint de grandeurs dites paramètres modaux, à savoir : les fréquences propres**,** les taux d'amortissement, et les modes propres**.**

La connaissance de ces paramètres suffit, en l'absence de tout modèle mathématique explicite, à prédire le comportement dynamique d'une structure soumise à des excitations particulières. Grâce aux avancées significatives dans les domaines de l'instrumentation et de l'informatique, l'analyse modale expérimentale s'est imposée comme un outil privilégié dans l'étude dynamique des structures.

On distingue principalement deux grandes catégories de méthodes d'analyse modale :

- Les méthodes dans le domaine temporel**,**
- Les méthodes dans le domaine fréquentiel**.**

II.8 Domaine d'utilisation

II.8.1 Véhicule

L'analyse vibratoire est souvent utilisée dans le domaine des véhicules. Dans une étude de recherche, Les mesures de vibrations ont été réalisées en fixant des accéléromètres à des endroits spécifiques au plancher des différents types de véhicules pour permettre l'évaluation des différents modes vibratoires requis.

Pour les autobus urbains, les chenillettes de déneigement et les chariots élévateurs à conduite assise, un accéléromètre tri- axial est fixé à l'aide d'un aimant sur une partie rigide à proximité de la base de fixation du siège du conducteur. Les trois mesures résultantes, représentées par le numéro 1, 2 et 3 dans la figure, représentent les modes vibratoires selon les trois directions suivantes :

II.9 Problèmes vibratoires typiques

Nos consultants en vibration sont régulièrement appelés pour traiter divers problèmes liés aux vibrations dans les secteurs résidentiels, industriels et environnementaux. Résoudre ces problèmes nécessite des connaissances approfondies sur les vibrations et, plus important encore, une caractérisation appropriée du comportement vibratoire du système. Pour chaque secteur et type de problèmes, il existe diverses solutions et les ingénieurs en vibrations devraient être consultés pour identifier et mettre en œuvre la meilleure d'entre elles. Ci-dessous les situations les plus classiques ou les lieux où de hauts niveaux de vibrations sont typiquement engendrés :

II.10 La chaîne de mesure

Le prélèvement de l'information : Le capteur, accéléromètre ou sonde de proximité, capte les informations et les transmet au collecteur de données. (Movipack) Le conditionnement et le traitement du signal: C'est le rôle du collecteur de données qui, en plus, affiche les résultats.

La gestion des résultats: Un logiciel (eDiag) et un ordinateur permettent de suivre l'évolution et la dérive des mesures.

Appareils de mesure des vibrations



Figure II.2 : Appareils de mesure des vibrations

II.10.1 Définition du Vibromètre (Appareil de mesure des vibrations) :

Un vibromètre est un instrument de mesure utilisé pour détecter, mesurer et analyser les vibrations mécaniques d'un objet ou d'un système. Il permet de quantifier différents paramètres vibratoires tels que :

• Le déplacement (déformation)

• La vitesse vibratoire

• L'accélération

• La fréquence des vibrations

Ces grandeurs sont essentielles pour évaluer l'état de fonctionnement d'une machine, anticiper des défaillances mécaniques, ou encore dans les études dynamiques des structures.

II.11 Les différents types de vibromètre

II.11.1 Vibrométrie mono point

Les vibromètre mono point mesurent les vibrations d'un objet dans le sens du faisceau laser. Si le système est perpendiculaire à la surface, le terme vibromètre « hors plan » est également utilisé. Ce cas général d'un capteur LDV se retrouve dans des applications microscopiques et également dans des mesures à grandes distances. Les capteurs en un point fournissent des amplitudes et des fonctions de transfert. La combinaison de capteurs.



Figure II.3 : Vibrométrie mono point

En un point et de vibromètre multipoints permet également de mesurer sans contact des déformées opérationnelles. Des procédés à balayage sont utilisés pour des opérations stationnaires (voir section distincte).

Dans le domaine des matériaux généralement sont utilisé comme Vibromêtre-laser tel que ce dernier est un dispositif de mesure utilisé est un vibromètre laser composé d'une tête optique OFV 302 R couplée à un contrôleur OFV 3000. Les signaux, tant ceux générés pour exciter la plaque que ceux issus du vibromètre, sont numérisés puis analysés à l'aide d'un analyseur dynamique de signaux développé par la société SigLab. Cet analyseur se compose d'une carte d'acquisition et de traitement associée à un logiciel dédié de commande et d'analyse des données. La carte est dotée d'un processeur intégré, ce qui lui permet de capturer deux signaux simultanément, avec une fréquence d'échantillonnage maximale de 50 kHz et une résolution de 13 bits par canal **[KHAR, 09]**.

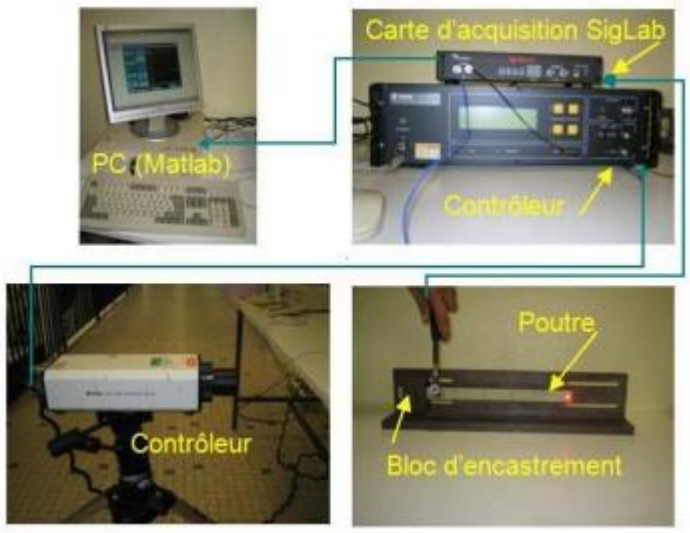


Figure II.4 : Bon d'essais par vibromètre laser **[KHAR,09]**

II.11.2 Vibrométrie différentielle

Les procédés rotationnels désignent la mesure de vitesse angulaire et d'angle vibratoire de rotation, sur toute structure rotative. La dynamique de rotation, par exemple sur des lignes

motrices, des turbines à gaz, des générateurs électriques, des imprimantes et des photocopieurs est ainsi analysée.

II.11.3 Vibrométrie dans le plan

La vibrométrie dans le plan décrit la mesure de vibrations et de déplacements perpendiculairement à un axe de mesure. La vibrométrie dans le plan détecte sans contact, par exemple des mouvements de levage de pistons, de tiges de soupape ou d'outils, elle est utilisée pour des mesures de déformation extrêmement dynamiques.

II.11.4 Vibrométrie multipoint

La vibrométrie multipoint est idéale pour la capture de processus variables ou transitoires dans le temps. Contrairement au procédé de balayage, les valeurs mesurées sont enregistrées simultanément sur tous les canaux de manière synchrone. Le concept multisensor permet d'analyser les données soit par intervalles de temps, soit par plages de fréquence.

II.12 Conclusions

Les vibrations sont un type de mouvement périodique qui se produit lorsqu'un corps oscille autour de sa position d'équilibre sous l'effet d'une force. Elles constituent un phénomène physique fondamental présent dans de nombreux systèmes naturels et techniques. On distingue principalement deux types de vibrations : les vibrations libres, qui surviennent lorsqu'un corps est déplacé puis relâché sans qu'aucune force extérieure continue ne soit appliquée elle dépend uniquement des propriétés du système comme la masse et la rigidité ; et les vibrations forcées, provoquées par une force extérieure périodique. Les vibrations peuvent aussi être amorties, c'est-à-dire que leur amplitude diminue progressivement avec le temps en raison des forces de résistance telles que le frottement ou la résistance de l'air, jusqu'à l'arrêt du mouvement. Les caractéristiques principales des vibrations incluent l'amplitude (déplacement maximal), la

fréquence (nombre d'oscillations par seconde), la période (temps pour effectuer un cycle complet) et la phase (position du corps dans son cycle à un instant donné). L'étude des vibrations est essentielle pour comprendre le comportement des systèmes dynamiques et en analyser la performance. Elle trouve des applications variées dans les domaines du génie civil, mécanique et électrique, où le contrôle des vibrations est crucial pour éviter les pannes ou les dommages. Les vibrations apparaissent aussi dans la vie quotidienne, par exemple dans les cordes d'instruments de musique, les bâtiments pendant les tremblements de terre, ou encore les composants de machines et de véhicules.

CHAPITRE III

VIBRATION DES POUTRES COMPOSITES

III.1. Introduction aux vibrations des poutres en matériaux composites

L'étude des vibrations dans les poutres en matériaux composites s'est largement développée avec l'essor de ces nouveaux matériaux dans diverses applications industrielles (aéronautique, automobile, construction, etc.). En effet, les propriétés spécifiques des composites telles que leur légèreté, leur rigidité élevée et leur capacité d'amortissement exigent une analyse vibratoire adaptée pour garantir leur bon comportement dynamique en service. Ainsi, à mesure que l'utilisation des matériaux composites s'est intensifiée, l'analyse des vibrations est devenue une étape incontournable dans leur conception et leur mise en œuvre. De nombreux chercheurs se sont donc penchés sur ce domaine pour comprendre comment ces structures réagissent aux sollicitations dynamiques et pour développer des modèles prédictifs fiables

III. 2. Etat d'Art

De nombreux travaux dans la littérature visent à développer des méthodes plus adaptées pour caractériser le comportement dynamique des matériaux composites à l'aide de spécimens en forme de poutres ou de plaques. L'analyse des vibrations en flexion de ces structures repose principalement sur la détermination des fréquences et des modes propres. Ćetković et Vuksanovic **[Ćetk, 12]** ont ainsi appliqué la théorie Layerwise pour analyser la vibration libre des plaques composites stratifiées et sandwiches.

La maîtrise des vibrations est essentielle, car elle représente souvent un défi majeur dans l'évaluation des caractéristiques dynamiques sous différentes configurations de renforcement. Dans ce contexte, Ghinet et Atalla **[GHIN, 06]** ont exploré les relations de dispersion dans un cadre de problème aux valeurs propres polynomiales complexes. Ces relations ont permis de formuler des expressions analytiques des fréquences critiques et de calculer les fréquences propres de panneaux à partir des solutions de la relation de dispersion.

Kerwin **[KERW, 59]** fut le premier à proposer une expression des fréquences propres et du facteur de perte pour des poutres en matériau sandwich, en supposant que l'âme se déforme uniquement en cisaillement transversal tandis que les peaux élastiques assurent la rigidité en flexion. Ditaranto **[DITA, 65],** a ensuite généralisé ce modèle pour considérer des conditions aux limites arbitraires. Meifeng et Wenbin **[MEIF, 69]** ont, de leur côté, développé un modèle similaire pour étudier les vibrations forcées sous diverses conditions aux limites. Yu **[YU, 62]** a adopté une approche variationnelle intégrant les effets d'inertie transversale, longitudinale et rotative pour évaluer le facteur de perte des structures sandwiches symétriques. Rao **[RAOD, 77]** a utilisé cette même approche pour modéliser la vibration des poutres sandwiches asymétriques, en comparant les résultats aux données existantes.

Le concept de module complexe a été introduit par plusieurs auteurs, **[LASCO, 10]**, en s'appuyant sur le principe de correspondance entre élasticité et viscoélasticité. Dans ce cadre, la partie réelle du module représente la rigidité élastique, tandis que la partie imaginaire traduit la dissipation d'énergie. Ce concept a été associé à des théories de cisaillement d'ordre supérieur.

Parallèlement, des études expérimentales et théoriques approfondies ont été menées pour comprendre l'influence des paramètres géométriques sur le comportement dynamique. Zhuang et Malcolm **[ZHUA, 12]** ont combiné modélisation analytique (modèles Ross–Ungar–Kerwin) et mesures expérimentales par vibromètre laser. Ils ont démontré que le doublement de l'épaisseur de l'âme entraîne des variations importantes des fréquences propres à basses fréquences et une augmentation de l'amortissement modal aux fréquences moyennes et élevées. En revanche, l'épaisseur des peaux a montré peu d'impact sur les fréquences propres.

Boudjemai et al. **[BOUD, 12]** ont conduit une analyse modale par éléments finis sur des poutres sandwiches en nid d'abeille. Les trois premières fréquences propres obtenues numériquement

ont été validées expérimentalement, avec des écarts de moins de 4 % pour les deux premières et de 10 % pour la troisième. Leur étude a également évalué l'influence de l'épaisseur des composants et de la taille des cellules.

Élaboration du biocomposite » passe avant « Préparation des éprouvettes composites », tout en gardant un style clair et académique :

III.2 Élaboration du biocomposite

III.2.1 Préparation de la surface de la plaque de verre

La feuille de verre standard est d'abord soigneusement nettoyée et séchée afin d'éliminer toutes les impuretés pouvant nuire à l'adhérence. Ensuite, une couche de démoulant Asir est appliquée sur la surface pour assurer une finition lisse et faciliter le démoulage du composite après polymérisation.

III.2.2 Préparation du mélange de résine

La résine polypoxyde est mélangée à un additif selon un ratio précis : 500 g de résine + 15 g d'additif. Le mélange est homogénéisé pour former une matrice cohérente qui assurera la liaison entre les différentes couches de renfort.

III.2.3 Disposition des fibres

1. Une première couche de fibre de verre est déposée sur la plaque de verre recouverte de démoulant.

2. Une couche intermédiaire de fibre de jute est ensuite ajoutée pour renforcer la structure et améliorer ses propriétés mécaniques.

3. Enfin, une seconde couche de fibre de verre est placée au-dessus pour finaliser la stratification.

III.3 Préparation des éprouvettes composites

Les éprouvettes sont constituées de poutres composites stratifiées fabriquées à partir de combinaisons de renforts et de matrices. Trois types de renforts sont utilisés :

- Tissu en fibres de verre
- Tissu en fibres de jute
- Mat en fibres de verre
- Tissu en fibre hybride kevlar et verre

Les matrices sont à base de résine polyester et époxy.

Chaque configuration de composite est représentée par cinq échantillons pour quatre types, et cinq essais sont réalisés par un échantillon, ce qui donne un total de 100 essais.

Types de composites étudiés :

- (2MFV-2TFJ)/polyester " 2 plis de mât fibre de verre+2 plis tissu en fibre de jute »
- (2TKV-2TFJ)/Epoxy" 2 plis tissu en fibre de Kevlar et fibre de verre+2plis tissue en fibre de jute"
- (6TFJ)/Epoxy "6 plis tissu en fibre de jute »
- (2MFV-4TFJ)/ polyester " 2 plis de mât fibre de verre+4plis tissue en fibre de jute»

Dimensions des éprouvettes :

(Conformes à la norme ISO 7626, avec un rapport longueur/hauteur ≥ 10) :

- 6TFJute / polyester : (180 × 17 × 8) mm
- 2MFV-2TFJ / époxy : (180 × 17 × 6) mm
- 2MFV-4TFJ / polyester : (260 × 260 × 4) mm
- 2TFKV-2TFJ / époxy : (260 × 260 × 4) mm

III. Objectif de l'étude :

Effectuer une analyse modale pour déterminer les fréquences propres de chaque type de composite, dans le but d'identifier le matériau le plus performant sur le plan vibratoire.

Conditions aux limites :

Les essais sont réalisés sous condition encastrement-libre (E-L).

III.4 Matériel utilisé pour les essais de vibration :

Les essais de vibration ont été réalisés à l'aide d'un ensemble de matériels spécialisés permettant l'excitation, la mesure et l'analyse du comportement dynamique des éprouvettes composites. Les principaux équipements utilisés sont :

Un accéléromètre (capteur de vibration) :

Utilisé pour mesurer les réponses vibratoires en termes d'accélération. Il est fixé sur l'éprouvette à un point bien défini.

Un marteau d'impact instrumenté :

Sert à exciter l'éprouvette en générant une impulsion contrôlée. Il est équipé d'un capteur de force intégré pour mesurer la force d'impact.

Un analyseur de signaux (FFT) :

Appareil chargé de traiter les signaux issus du capteur et du marteau. Il permet de calculer les fréquences propres, les amplitudes et les courbes de réponse fréquentielle.

Un amplificateur de charge :

Utilisé pour amplifier les signaux faibles provenant de l'accéléromètre, garantissant une mesure précise.

Un logiciel d'acquisition et d'analyse (type LMS Test.Lab, Dewesoft, ou LabVIEW) :

Permet d'enregistrer, de visualiser et d'analyser les données vibratoires, notamment les courbes de réponse en fréquence (FRF) et les pics de résonance.

Un support d'essai avec condition aux limites Encastrement-Libre (E-L) :

Permet de fixer une extrémité de l'éprouvette tout en laissant l'autre libre, conformément aux conditions de l'étude.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les étapes principales de la fabrication des biocomposites ainsi que la préparation des éprouvettes destinées aux essais de vibration. Quatre types de composites stratifiés ont été élaborés, combinant des fibres naturelles (jute) et synthétiques (verre, hybride), associés à des matrices polymères (polyester et époxy). Chaque configuration a été conçue en respectant les normes techniques, garantissant ainsi la fiabilité des essais. Nous avons également détaillé le dispositif expérimental utilisé pour l'analyse modale, incluant les capteurs de mesure (accéléromètre, marteau d'impact), l'analyseur de signaux (FFT) et les logiciels de traitement. Le montage a été réalisé de manière à reproduire des conditions aux limites de type encastrement-libre (E–L)**,** en adéquation avec les objectifs de l'étude. Les résultats issus de ces essais expérimentaux permettront, dans le chapitre suivant, de déterminer les fréquences propres de chaque configuration composite. Ces données serviront à évaluer leur comportement dynamique et à comparer l'influence des différents types de renforts et de matrices sur la réponse vibratoire globale des matériaux testés.

CHAPITRE IV

RESULTATS ET DISCUSSIONS

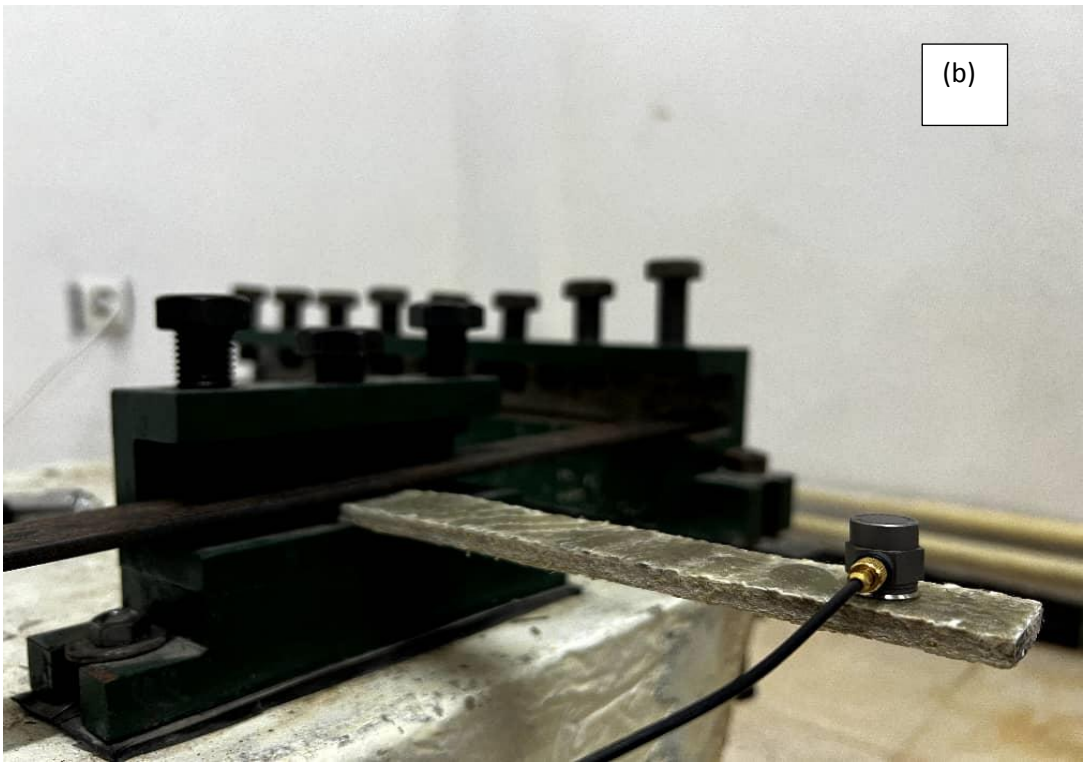
IV.1 : Présentation des résultats

Procédure expérimentale

Dans la figure IV.1 présente les étapes de l'expérimentale par la méthode modale pour différente type de composites.

Pour mesurer les fonctions de transferts dans les quatre type de composite, nous avons utilisé un analyseur de vibration *Pulse B&K 16.1* équipé par un logiciel d'acquisition et de traitement des données, le pulse MTC Hammer, ce système effectue l'acquisition des signaux et le contrôle des conditions d'acquisition tels que: sensibilité des capteurs, bande passante et conditions de déclenchement de la mesure, un accéléromètre mono axial de masse 2g et de sensibilité 0.3144pc/m/s^2 a été choisie, afin d'éviter l'influence de la masse rajouter du capteur sur les fréquences propres, et un marteau de choc de type 56305, équipé d'un capteur de force type 8206-001, de sensibilité 11.4mv/n. Pour assurer les mêmes conditions aux limites des quatre type de composite, on utilise une clé dynamométrique. Les mesures ont été prises dans la bande de fréquence [0, 16 KHz] qui nous permet de localiser cinq modes propres. Afin d'éviter le rebond du marteau de choc le point d'excitation est choisi prés de l'encastrement.


(a)
Proper hit


(b)

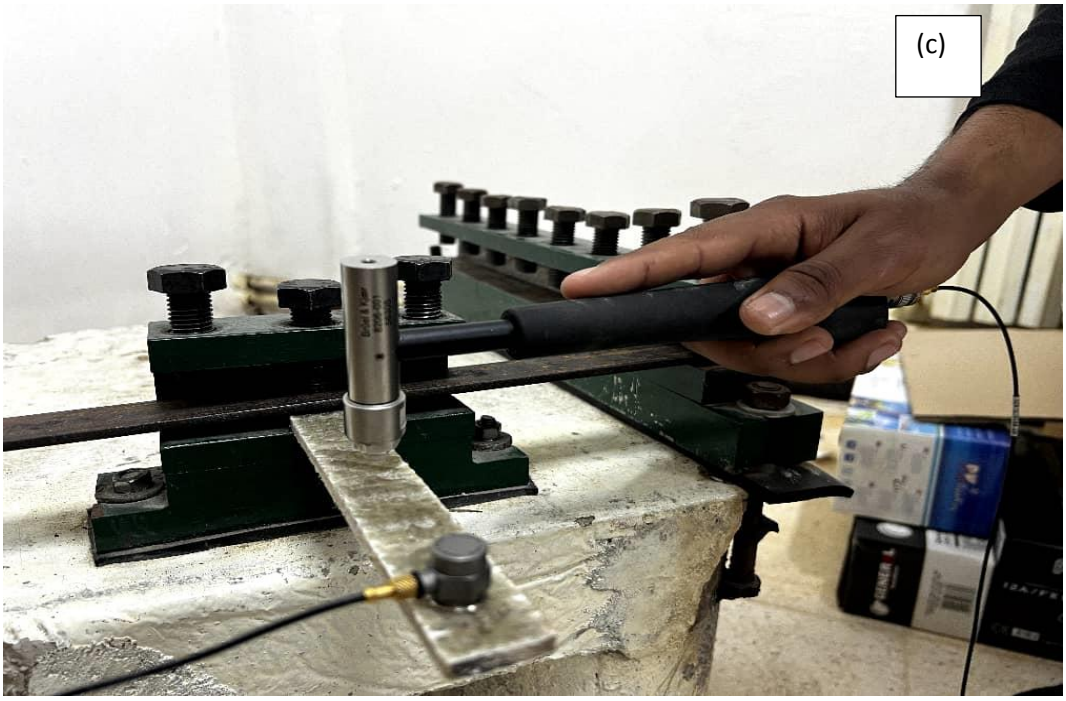
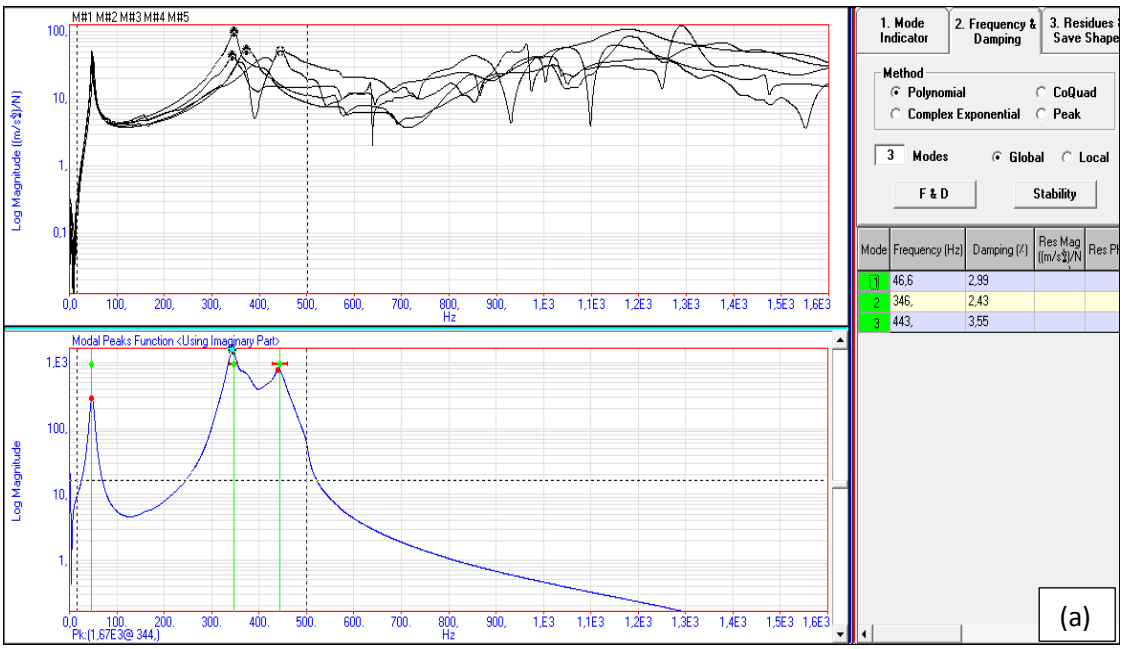


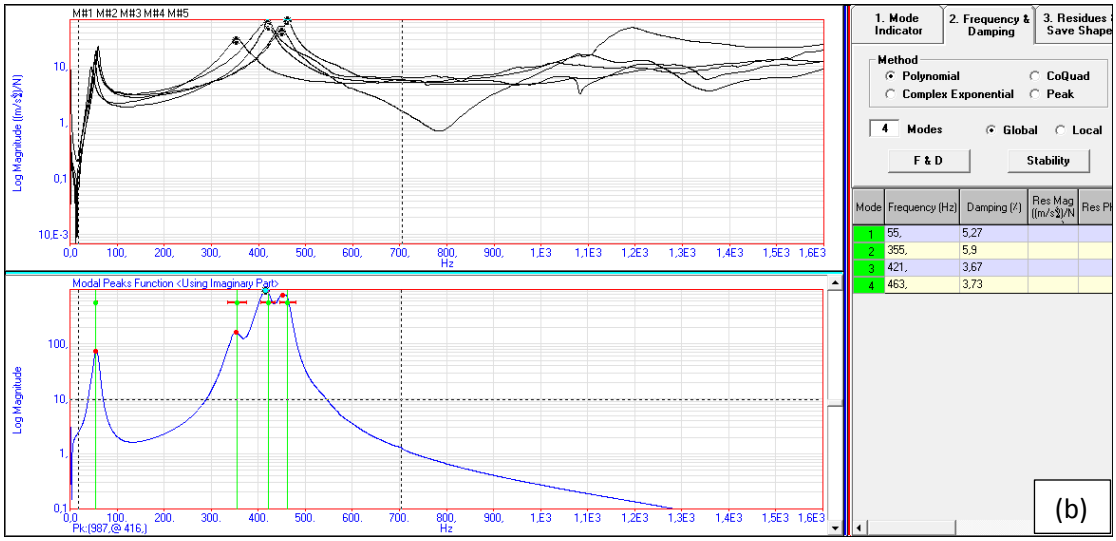
Figure IV. 1 : Bon d'essai de vibration par Pulse (a, b, c)

IV 2 : Comparaison des résultats pour quatre types du composites :

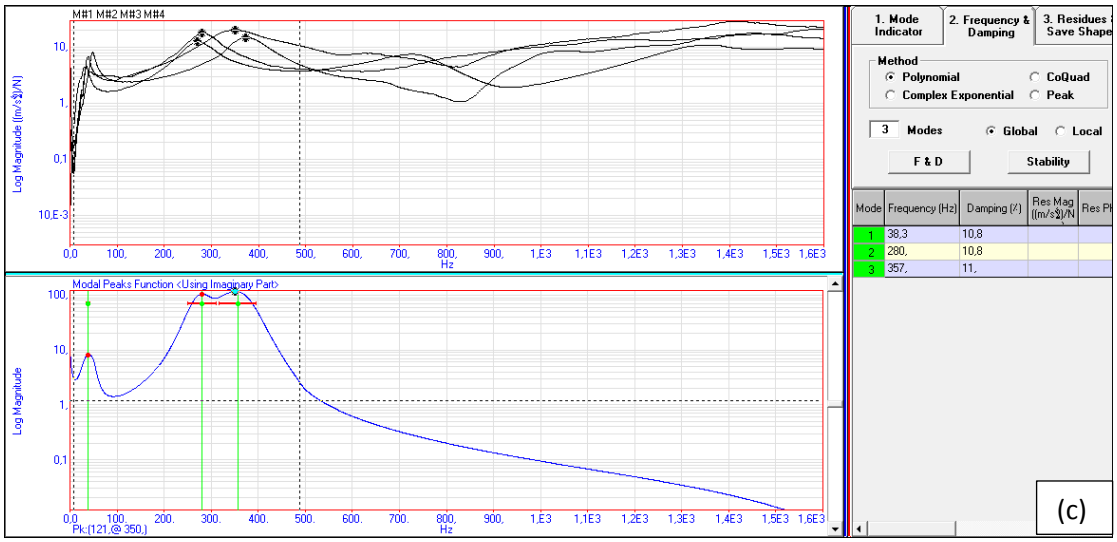
(2MFV-2TFJ)/polyester



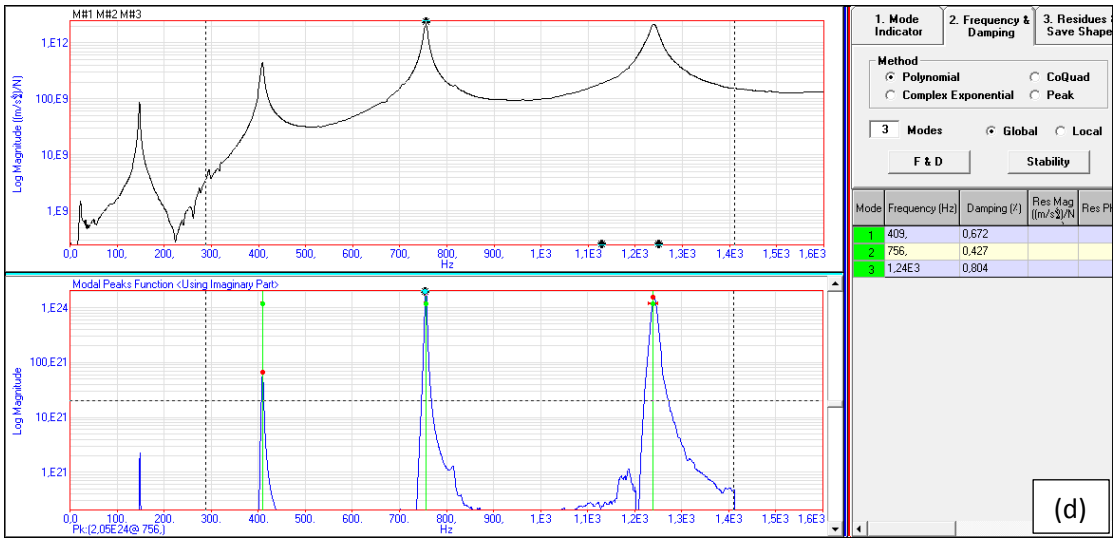
(2TKV-2TFJ)/Epoxy



6TFJ/Epoxy



(2MFV-4TFJ)/Polyester



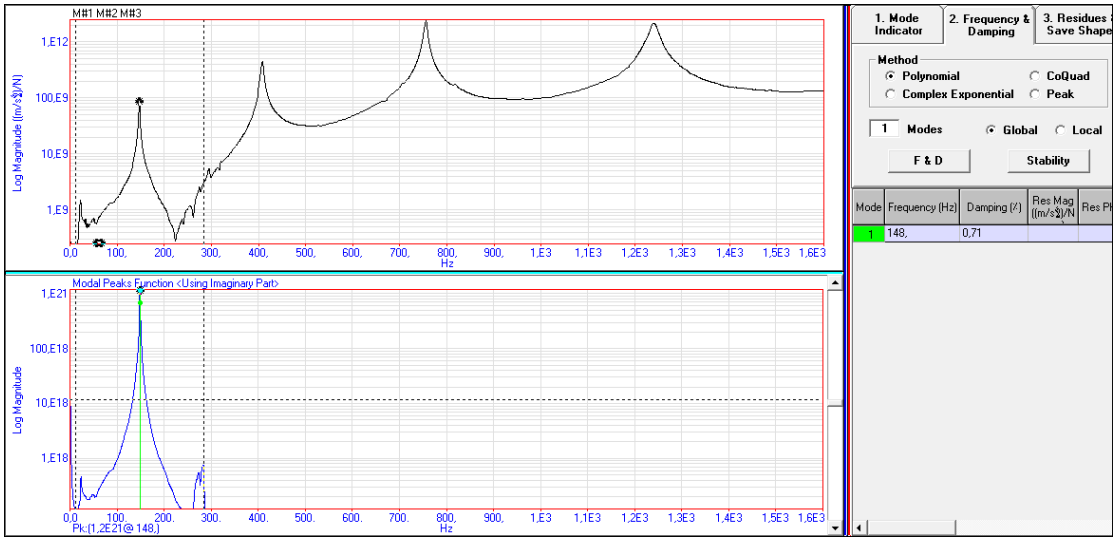


Figure IV. 2 : (a, b, c, d) les fréquences et amortissement pour quatre type de matériaux composite

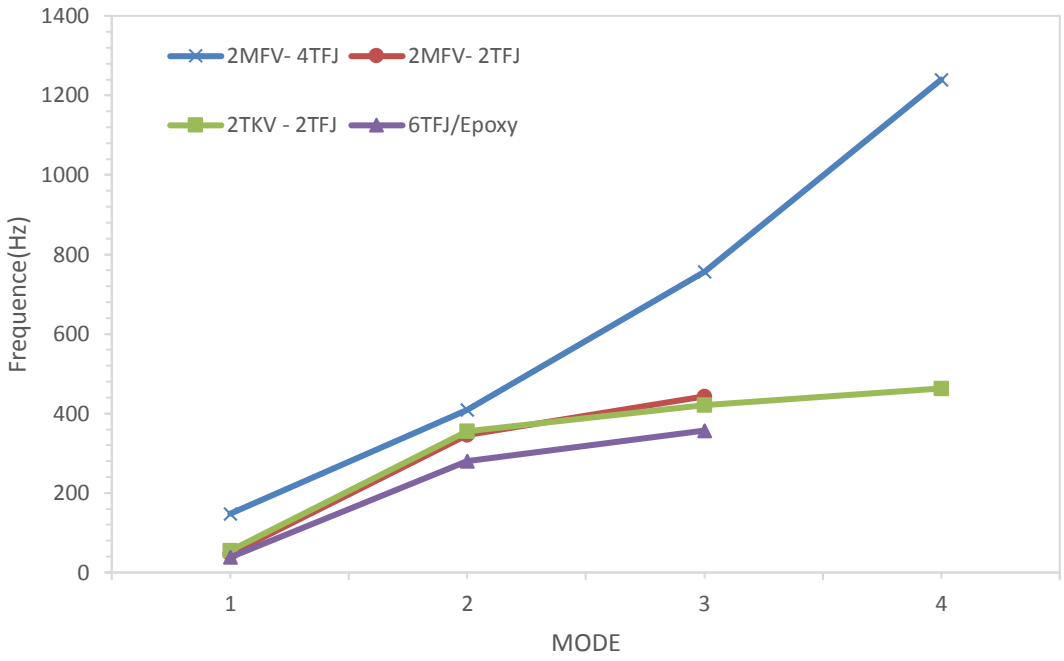


Figure IV. 3 : L'influence du materiaux composite sur les fréquences propres

IV 3 Interprétation des résultats

1) 2MFV - 2TFJ / Polyester

- ✓ Fréquences faibles (ex : 46.6 Hz en mode 1), mais amortissement modéré ($\eta \approx 2.4–3.5$).
- ✓ Bon compromis pour des structures nécessitant une absorption modérée des vibrations, sans rechercher une rigidité maximale

2) 2TKV - 2TFJ / Époxy

- ✓ Fréquences légèrement supérieures à celles de MFV/Polyester → meilleure rigidité.
- ✓ Amortissement nettement plus élevé, en particulier au mode 2 ($\eta = 5.9$).
- ✓ Le Kevlar + époxy apporte donc une meilleure capacité de dissipation d'énergie, tout en maintenant une rigidité convenable.

3) 6TFJ / Époxy

- ✓ Le plus faible en rigidité, mais le plus élevé en amortissement ($\eta \approx 10.8$ à 11).
- ✓ Cela signifie que ce matériau est hautement dissipatif**,** mais très souple → adapté pour des structures amortissantes, mais non porteuses.

4) 2MFV - 4TFJ / Polyester

- ✓ Fréquences les plus élevées sur tous les modes (jusqu'à 1240 Hz en mode 4).
- ✓ Amortissement très faible ($\eta \approx 0.4$–0.8), ce qui est attendu pour un matériau très rigide.
- ✓ Convient parfaitement aux structures nécessitant une stabilité dynamique maximale, mais peu de dissipation vibratoire.

IV 4 : Interprétations complémentaires

Effet du nombre de plis (TFJ) :

« La comparaison entre 2MFV-2TFJ et 2MFV-4TFJ montre que le doublement du nombre de plis augmente très significativement la rigidité du premier mode de flexion. »

- ✓ En effet, la fréquence du mode 1 passe de 46.6 Hz à 148 Hz, soit une augmentation de plus de 200 %, montrant que le renfort par plis TFJ est très efficace mécaniquement.

Effet du type de fibres (MFV vs TKV) :

« Le tissu en fibre de Kevlar augmente d'environ 10 Hz les fréquences propres des deux premiers modes en comparaison avec le mât en fibre de verre. »

- ✓ Le Kevlar (2TKV-2TFJ) donne un gain d'environ 8–9 Hz sur les modes 1 et 2 par rapport au MFV.
- ✓ De plus, il augmente aussi fortement l'amortissement, ce qui en fait un bon choix pour des applications nécessitant un compromis entre rigidité et dissipation**.**

VI. 5 Conclusion

- 2MFV - 4TFJ / Polyester: le matériau le plus rigide avec le plus faible amortissement → idéal pour des structures porteuses, soumis à des vibrations contrôlées**.**
- 2TKV - 2TFJ / Époxy **:** bon équilibre entre rigidité moyenne et forte capacité d'amortissement → adapté pour des systèmes vibrants ou des protections dynamiques.
- 6TFJ / Époxy **: très** souple mais hautement dissipatif → usage idéal en amortissement passif**.**
- 2MFV - 2TFJ / Polyester **:** compromis intermédiaire, avec des performances plus modestes.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE

Conclusion générale

L'étude menée dans le cadre de ce travail de Master visait à analyser le comportement vibratoire de différents matériaux composites renforcés par des tissus en fibres (TFJ) et associés à différentes matrices (polyester, époxy), ainsi que des renforts variés (fibres de verre – MFV, fibres d'aramide – TKV). Cette analyse s'est appuyée sur la détermination expérimentale des fréquences propres (modes de vibration) et des coefficients d'amortissement (η), qui sont des indicateurs clés du comportement dynamique des matériaux.

Les résultats obtenus ont permis de tirer plusieurs enseignements importants **:**

1. Effet du nombre de plis TFJ sur la rigidité : La comparaison entre les matériaux 2MFV–2TFJ et 2MFV–4TFJ a clairement montré que le doublement du nombre de plis de renfort TFJ permet une amélioration spectaculaire de la rigidité, notamment au premier mode de flexion, avec une fréquence passant de 46.6 Hz à 148 Hz. Cela confirme l'importance du renforcement transversal dans les matériaux composites pour augmenter leur capacité à résister aux déformations dynamiques.
2. Effet du type de fibres de renfort (MFV vs TKV) **:**

   L'introduction de fibres de Kevlar (2TKV–2TFJ) à la place des fibres de verre (2MFV–2TFJ) a entraîné une légère augmentation des fréquences propres (gain d'environ 10 Hz sur les deux premiers modes), ce qui indique une rigidité dynamique légèrement supérieure. Plus intéressant encore, le Kevlar s'est distingué par des coefficients d'amortissement nettement plus élevés (jusqu'à $\eta = 5.9$), ce qui en fait un excellent choix pour des applications nécessitant une dissipation d'énergie vibratoire importante (ex. : équipements de protection, pièces soumises aux chocs).

3. Rôle de la matrice et structure spécifique (époxy vs polyester) **:**

Le matériau 6TFJ / Époxy, malgré le nombre élevé de plis TFJ (6), a présenté les fréquences les plus faibles (ex : 38.3 Hz en mode 1), traduisant une faible rigidité globale. Toutefois, il a montré les plus forts coefficients d'amortissement (jusqu'à $\eta = 11$), ce qui en fait un matériau extrêmement dissipatif**,** mais peu adapté aux charges structurelles. Cela démontre que la seule augmentation du nombre de plis ne suffit pas sans une matrice rigide ou un bon équilibre fibre/matrice.

4. **Comportement optimal du matériau 2MFV–4TFJ / Polyester** :

Ce matériau a affiché les meilleures performances globales avec des fréquences très élevées dans tous les modes (jusqu'à 1240 Hz au mode 4) et un faible amortissement ($\eta \approx 0.4–0.8$)**,** ce qui est typique des matériaux très rigides. Il est donc idéal pour des structures porteuses**,** où la stabilité mécanique et la résistance à la résonance sont primordiales, mais où une capacité d'amortissement élevée n'est pas nécessaire.

Synthèse et perspectives

Les résultats expérimentaux de cette étude permettent de conclure que la rigidité et la capacité d'amortissement d'un composite sont fortement influencées par trois paramètres clés: le type de fibre de renfort, le nombre de plis, et la nature de la matrice. Il est donc essentiel de choisir et concevoir les composites en fonction des exigences spécifiques de l'application visée (structurelle, amortissante, légère, résistante aux chocs...).

Pour des perspectives futures, il serait pertinent de :

- Étendre l'étude à des configurations hybrides (ex. : MFV + TKV).
- Évaluer l'effet de l'orientation des fibres et de la stratification.

- Intégrer des analyses numériques (modélisation éléments finis) pour prédire le comportement dynamique.
- Tester l'influence des conditions environnementales (humidité, température) sur les propriétés vibratoires.

Références bibliographique

[SABA, 14] : Johan Saba,Consultant Senior au sein de BLOOMOON, Johan Saba a occupé des postes d'ingénieur R&D et ingénieur projets au sein de grands groupes des secteurs de la chimie, de la plasturgie et de la cosmétique. Johan Saba est ingénieur de l'École Nationale Supérieure de Chimie et Physique de Bordeaux et docteur de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan.

Composites à fibres

[DEGH ,21] « Un composite est l'assemblage de plusieurs matériaux non miscibles de nature différente et dont les qualités se complètent afin d'obtenir un matériau hétérogène dont les performances sont supérieures à celles de ses composants. Un matériau composite est constitué d'un renfort (ossature du matériau) qui assure la tenue mécanique et d'une matrice »**2**

[BONN, 10] Cédric Bonnet. » Compréhension des mécanismes de coupe lors du perçage à sec de l'empilageTi6Al4V/Composite fibre de carbone. Génie mécanique [physics.class-ph]. Arts et Métiers Paris-Tech, 2010. Français »

[DERO, 10] Guillaume Derombise » Comportement à long terme des fibres aramides en milieux neutres et alcalins. Matériaux et structures en mécanique [physics.class-ph]. Ecole des Ponts Paris Tech, 2009 »

[BONN, 10] Cédric Bonnet. » Compréhension des mécanismes de coupe lors du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite fibre de carbone. Génie mécanique [physics.class-ph]. Arts et Métiers Paris-Tech, 2010. Français »

[SABA, 14] Johan Saba **»**Consultant Senior au sein de BLOOMOON, Johan Saba a occupé des postes d'ingénieur R&D et ingénieur projets au sein de grands groupes des secteurs de la

chimie, de la plasturgie et de la cosmétique. Johan Saba est ingénieur de l'École Nationale Supérieure de Chimie et Physique de Bordeaux et docteur de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan. »

Composites à fibres

[SAMI, 16] Samir Bensaid **«** CONTRIBUTION A LA CARACTERISATION ET A LA MODELISATION ELEC-TROMAGNETIQUE ET THERMIQUE DES MATERIAUX COMPOSITES ANISOTROPES. » Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Nantes, 2006. Français

[GUID, 16] RÉSINESPOLYESTERINSATURÉDANSLES MATÉRIAUXCOMPOSITES

[ROKB ,01] Rokbi Mansour « COMPORTEMENT A LA RUPTURE ET CARACTERISATION MECANIQUE DU COMPOSITES POLYESTER_FIBRES DE VERRE » Jan 2001

[ASMA, 22] Asma Bessaad « Etude du comportement mécanique des matériaux composites destinés à l'aéronautique » 09/2022

[WEI, 23] Wei Wang, Rui An, Huihui Huang, Jie Li, Jinghang Niu, Huan Liao, Jian Jiao, Li Zhiqiang, Yuekai Tao, « Analyse des vibrations d'une passerelle piétonne à faible rapport hauteur/portée sous excitation anthropique », *Advances in Civil Engineering*, 13 juin 2023, **https://doi.org/10.1155/2023/5515450**

[KHAR, 09] Mounir Kharoubi, Abderrahim El Mahi, Mustapha Assarar, LouendiFatmi, Rachid El Guerjouma , »Analyse vibratoire de composites stratifiés endommagés = Vibration analysis of damage in composites laminates ».

[GHIN, 06] Ghinet S and N.Atalla.vibro-acoustic behaviors of flat sandwich composite panels. *Transactions of the CSME/de la SCGM*2006;30:4-5.

[Ćetk, 12] Ćetković M,Vuksanović D.Vibrations of isotropic, orthotropic and laminated composite plates with various boundary conditions. *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics* 2012;6:83-96.

[KERW, 59]: Kerwin M. Damping of Flexural, Waves by a Constrained Viscelastic Layer, *Journal of the Acoustical Society of America*1959; 31:952-962.

[DITA, 65]: Ditaranto A. Theory of vibratory bending for elastic and viscoelastic layered finite length beams, *Journal ofAppliedMechanics*1965;32:881–886.

[MEIF, 69] Meifeng He, Wenbin Hu. The forced vibration of a three layer damped sandwich beam with arbitrary boundary conditions. Journal of Sound and Vibration.1969; 10:163–175.

[YU, 62] Y. Damping of Flexural Vibrations of Sandwich Plates, Journal of the AerospaceSciences1962; 29:790-03.

[RAOD, 77] Rao D. Vibration of short sandwich beams. *Journal of Sound and Vibration*1977; 52:253-263.

[VASW, 88] Vaswani J,A snani N T, Nakra B C. Vibration and Damping Analysis of Curved Sandwich Beams with a Viscoelastic Core. *Composite Structures* 1988;10:231-245.

[BOUD, 12] BoudjemaiA, Amri M, SalemA, Bouanane M H, BoutchichaD. Modal analysis and testing of hexagonal honeycomb plates used for satellite structural design. *Materials and Design*2012; 35: 266–275.

[ZHUA, 06] Zhuang Li, Malcolm J., Crocker Effects of thickness and delamination on the damping in honeycomb–foam sandwich beams. *Journal of Sound and Vibration*2006*;* 294: 473 – 485.

[LASCO, 10] Lascoup B, Aboura Z, Khellil K, Benzeggagh M. Homogenization of the core layer in stitched sandwich structures, *composites Science and Technology* 2010;70:350–355