



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE UNIVERSITE MOULOD MAMMERI TIZI-OUZOU  
FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION DEPARTEMENT GENIE  
MECANIQUE

# **Identification des défauts de délaminage dans des Structures en matériaux composites multicouches.**

Présenté Par

**AMARI Belkacem**

**02/10/2014**

En vu de l'obtention du diplôme master en génie mécanique

Spécialité : Construction mécanique

Soutenu publiquement devant le Jury composé de:

TIACHACHT Samir

Président

EHTANI Amar

Promoteur

AMZIANI Ahcene

Examineur

BELAID Kamel

Examineur

# Remerciements

*Un projet mené à bien n'est pas que reflet d'un travail personnel, c'est l'harmonie de plusieurs contributions, Qu'elles soient matérielles, financières, morales ou bien spirituelles; elles s'assemblent pour donner vie à l'accomplissement d'un rêve.*

*Je remercie Dieu le tout puissant, qui, par sa miséricorde, ma donné la force et la patience d'arriver à concrétiser mon projet.*

*Je remercie aussi ma famille, laquelle par sa patience, son soutien et ces encouragements ma permis de tenir bon même dans les situations difficiles.*

*Je tiens à remercier aussi fortement Monsieur Amar BEHTANI pour son aide, sa disponibilité et les conseils qu'il n'a cessé de me prodiguer pour l'aboutissement de ce projet, qu'il y trouve ici ma profonde gratitude et toute ma reconnaissance et mon respect.*

*Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner ce travail et de l'enrichir par leurs propositions.*

*Enfin, je tiens également à remercier mes amis; Proches alliés dans ce combat que représente une jeunesse passé a essayer atteindre les objectifs qui me tiennent a cœur.*

# 1. Table des matières

1. Table des matières .....	3
2. Tables des illustrations .....	8
Nomenclature .....	10
Introduction générale .....	12
Chapitre I: Introduction aux matériaux composites .....	14
1. Introduction .....	15
2. Généralités sur les composites .....	15
2.1 Classification des matériaux composites .....	15
2.1.1 Classification suivant la forme des constituants .....	15
2.1.1.1 Composites à fibres: .....	15
2.1.1.2 Composites à particules: .....	15
2.1.1.3 Composites à renforts de paillettes: .....	16
2.1.1.4 Composites stratifiés: .....	16
2.1.2 Classification suivant la nature des constituants .....	16
2.1.2.1 Composites à matrice organique: .....	17
2.1.2.2 Composites à matrice métallique: .....	17
2.1.2.3 Composites à matrice minérale: .....	17
3. Constituants des matériaux composites .....	17
3.1 Les renforts .....	17
3.1.1 Fibre de verre .....	17
3.1.2 Fibre de carbone .....	18
3.1.3 Fibre d'aramide .....	18
3.1.4 Fibre de bore .....	18
3.1.5 Fibre de silice (ou de quartz) .....	18
3.1.6 Fibre de polyéthylène de haut module .....	18
3.1.7 Caractéristiques moyennes des fibres et renforts .....	19
3.1.8 Architecture des renforts .....	19
3.1.8.1 Les unidirectionnels (UD) : .....	19
3.1.8.2 Les tissus : .....	20

3.2	Les charges .....	22
3.2.1	Les charges organiques .....	22
3.2.2	Les charges minérales .....	22
3.2.2.1	Craies et carbonates:.....	22
3.2.2.2	Les silices:.....	22
3.2.2.3	Les talcs:.....	23
3.2.2.4	La wollastonite: .....	23
3.2.2.5	Les argiles et aluminosilicates:.....	23
3.2.3	Le verre.....	23
3.2.3.1	Poudres de verre:.....	23
3.2.3.2	Billes de verres creuses:.....	23
3.2.4	Le carbone .....	23
3.2.4.1	Le noir de carbone:.....	23
3.3	Les matrices.....	24
3.3.1	Les résines thermodurcissables .....	25
3.3.1.1	Polyesters insaturés:.....	25
3.3.1.2	Vinylesters:.....	25
3.3.1.3	Phénoliques:.....	25
3.3.1.4	Epoxydes:.....	25
3.3.1.5	Polyuréthanes et polyurées:.....	26
3.3.2	Les matrices thermoplastiques.....	27
4.	Composites sandwiches.....	28
5.	Structures composites stratifiées.....	30
5.1.1	Stratifiés unidirectionnels.....	31
5.1.2	Les stratifiés hybrides.....	31
5.1.3	Désignation des structures stratifiées .....	32
5.1.3.1	Stratifié symétrique:.....	33
5.1.3.2	Séquences:.....	33
5.1.3.3	Stratifiés hybrides:.....	33
5.2	Structure générale d'un stratifié.....	34
6.	Conclusion.....	34
Chapitre II: Mécanismes d'endommagement et de rupture des matériaux composites .....		35
1.	Introduction .....	36
2.	Les modes de ruptures .....	36
2.1	Mode I:.....	36
2.2	Mode II:.....	36

2.3	Mode III: .....	36
3.	Mécanismes de rupture des stratifiés composites à renforts de fibres longues .....	36
3.1	Mécanismes de rupture d'un unidirectionnel .....	38
3.1.1.1	Rupture des fibres: .....	38
3.1.1.2	Rupture transverse de la matrice:.....	38
3.1.1.3	Rupture longitudinale de la matrice:.....	39
3.1.1.4	Rupture de l'interface:.....	39
3.2	Rupture des stratifiés .....	40
3.2.1	Rupture intralaminaire .....	40
3.2.2	Rupture interlaminaire .....	42
3.2.2.1	Matrice thermodurcissable:.....	42
3.2.2.2	Matrice thermoplastique:.....	44
3.2.3	Rupture translaminaire .....	45
3.2.3.1	Rupture translaminaire en traction:.....	45
3.2.3.2	Rupture translaminaire en compression: .....	46
3.2.4	Rupture par délaminage.....	47
3.2.4.1	Phénomènes physiques du délaminage: .....	47
3.2.4.2	Origines du délaminage:.....	48
4.	Conclusion.....	52
Chapitre III: Recherche bibliographique.....		53
1.	Introduction .....	54
2.	Définition .....	54
3.	Méthodes de contrôle non destructif .....	54
3.2	L'examen visuel.....	54
3.3	Le ressuage .....	55
3.4	Les ultrasons .....	56
3.5	La shearographie.....	57
3.6	La thermographie .....	58
3.7	Radiographie.....	59
3.8	Potentialités et limites des CND .....	60
3.9	Le contrôle continu de l'état de la structure .....	61
4.	Méthodes basées sur les données vibratoires.....	61
4.1	Fréquences naturelles.....	62
4.2	Déformées propres .....	64
4.3	Méthode de l'enveloppe .....	64
4.4	Fonctions de réponse fréquentielle (FRF) .....	65

4.5	Energie de déformation modale.....	66
4.6	Flexibilité modale.....	66
5.	Conclusion.....	68
Chapitre IV: Modélisation de défauts de délaminage sur une poutre multicouches .....		69
1.	Introduction .....	70
2.	Modélisation de la structure en éléments finis.....	70
2.1	Description de la structure .....	70
2.1.1	Caractéristiques du pli UD .....	72
2.1.2	Description de l'interface .....	72
2.1.3	Description du chargement .....	72
2.2	Modélisation du défaut.....	73
3.	Présentation de la méthode basée sur les réponses fréquentielles (FRF) .....	74
3.1	Détection de défauts en utilisant les FRF.....	74
3.2	Présentation des résultats de l'analyse des poutres .....	76
3.2.1	Réponse fréquentielle de la poutre saine .....	76
3.2.2	Réponse fréquentielle de la poutre endommagée sur 20 mm.....	76
3.2.3	Réponse fréquentielle de la poutre endommagée sur 40 mm.....	77
3.2.4	Réponse fréquentielle de la poutre endommagée sur 60 mm.....	78
3.2.5	Variation de la réponse fréquentielle entre la poutre saine et les endommagées .....	78
3.2.5.1	Poutre endommagée sur 20 mm .....	78
3.2.5.2	Poutre endommagée sur 40 mm .....	79
3.2.5.3	Poutre endommagée sur 60 mm .....	79
3.3	Interprétation des résultats.....	80
4.	Conclusion.....	80
Chapitre V: Présentation et application de la méthode de la variation de la sensibilité .....		82
1.	Introduction .....	83
1.1	Théorie .....	83
2.	Application de la méthode.....	84
3.	Présentation des résultats .....	85
4.	Interprétation des résultats .....	89
5.	Conclusion.....	89
Conclusion générale.....		90
Annexe.....		93
6.	Introduction .....	94
7.	Présentation.....	94
8.	Fonctionnalités.....	94

9.	Avantages.....	95
10.	Procédure de réalisation d'une structure sur Patran .....	95
10.1	Géométrie .....	95
10.2	Propriétés mécaniques .....	96
10.3	Discrétisation de la structure .....	97
10.4	Conditions aux limites .....	98
10.5	Force d'excitation .....	99
10.6	Analyse de la structure.....	100
10.7	Résultats.....	100
11.	Conclusion .....	101
	Références bibliographiques .....	102

## 2. Tables des illustrations

Figure 1 1 : différents types de matériaux composites.....	16
Figure 1 2: principaux matériaux de renforts.....	24
Figure 1 3: Matériaux sandwiches à âmes pleines.....	29
Figure 1 4: Matériaux sandwiches à âmes creuses.....	30
Figure 1 5: Stratifié constitué de couches unidirectionnelles.....	31
Figure 1 6: Désignation d'un stratifié.....	32
Figure 2 1: Ruptures par flexion de différentes séquences d'empilement (a) Quasi-isotrope, (b) Unidirectionnelle, (c) $\pm 45^\circ$ , (d) $0^\circ/90^\circ$ .....	37
Figure 2 2: Ruptures par traction de différentes séquences d'empilement (a) $0^\circ/90^\circ$ tissu, (b) Unidirectionnelle, (c) Quasi-isotrope trouée, (d) $0^\circ/90^\circ$ trouée.....	37
Figure 2 3: Rupture d'une fibre.....	38
Figure 2 4: Rupture transverse de la matrice.....	39
Figure 2 5: Rupture longitudinale de la matrice.....	39
Figure 2 6: Décohésion fibre/matrice.....	40
Figure 2 7: Evolution de la fissuration transverse.....	41
Figure 2 8: Schéma de la rupture interlaminaire (a) Mode I traction, (b) Mode II cisaillement.....	42
Figure 2 9: Faciès de rupture (mode I).....	43
Figure 2 10: Microfissures orientée à $45^\circ$ du plan de rupture (mode II).....	43
Figure 2 11: Faciès de rupture en mode II (a) Hackles, (b) Scallops.....	44
Figure 2 12: Faciès de rupture d'un composite à matrice thermoplastique (a) Mode I, (b) Mode II.....	44
Figure 2 13: Rupture translaminaire en traction d'un graphite/époxy.....	45
Figure 2 14: Rupture translaminaire en compression par micro-flambage.....	46
Figure 2 15: Faciès de rupture par micro-flambage.....	46
Figure 2 16: Evolution de défauts.....	47
Figure 2 17: Mécanismes de l'endommagement accompagnant le délaminage.....	48
Figure 2 19: Sources des contraintes interlaminaires dans les pièces structurales.....	50
Figure 2 18: Evolution des contraintes dans la largeur de l'éprouvette [45/-45/-45/45].....	50
Figure 2 20: Enveloppe conique de dommage par impact (a), (b) Section transversal d'un stratifié après impact.....	51
Figure 2 21: Mécanismes de rupture dans un stratifié.....	52
Figure 3 1: Schéma de la méthode du ressuage.....	55
Figure 3 2: Apparition de défauts par ressuage.....	56
Figure 3 3: Contrôle ultrasonore par échographie. Gauche : zone saine ; droite : zone défectueuse.....	56
Figure 3 4: Méthode ultrasonore appliquée aux composites.....	57
Figure 3 5: Scan obtenu par méthode ultrasonore de voilure d'un Falcon 10.....	57
Figure 3 8: Scan par thermographie.....	58
Figure 3 6: Contrôle shearographique d'une structure composite monolithique (a) et en nid d'abeille (b).....	58
Figure 3 7: Schéma de montage de la thermographie.....	58
Figure 3 9: Scan d'une pièce en composite par radiographie.....	59
Figure 3 10: Schéma de fonctionnement de la méthode de l'enveloppe.....	65
Figure 4 1: Modélisation de la structure.....	71
Figure 4 2: Vue latérale de la poutre.....	71
Figure 4 3: Application de la force d'excitation.....	73
Figure 4 4: Position du délaminage sur la poutre.....	74
Figure 4 5: Réponse fréquentielle de la poutre saine.....	76
Figure 4 6: Réponse fréquentielle de la poutre endommagée sur 20 mm.....	77

<i>Figure 4 7: Réponse fréquentielle de la poutre endommagée sur 40 mm.</i>	77
<i>Figure 4 8: Réponse fréquentielle de la poutre endommagée sur 60 mm.</i>	78
<i>Figure 4 9: Décalage de la réponse fréquentielle entre la poutre saine et endommagée sur 20 mm.</i>	79
<i>Figure 4 10: Décalage de la réponse fréquentielle entre la poutre saine et endommagée sur 40 mm.</i>	79
<i>Figure 4 11: Décalage de la réponse fréquentielle entre la poutre saine et endommagée sur 60 mm.</i>	80
<i>Figure 5 1: Localisation du délaminage sur la poutre.</i>	85
<i>Figure 5 2: Variation suivant x de la flexibilité de la structure.</i>	87
<i>Figure 5 3: Variation suivant y de la flexibilité.</i>	88
<i>Figure 6 1: Fenêtre géométrie dans Patran.</i>	95
<i>Figure 6 2: Fenêtre propriétés dans Patran.</i>	96
<i>Figure 6 3: Fenêtre propriétés des solides dans Patran.</i>	97
<i>Figure 6 4: Fenêtre Meshing.</i>	97
<i>Figure 6 5: Vecteur déplacement en 2d.</i>	98
<i>Figure 6 6: Vecteur encastrement.</i>	99
<i>Figure 6 7: fenêtré de déclaration de la force d'excitation.</i>	99
<i>Figure 6 8: Fenêtré de la fonction Analyse.</i>	100
<i>Tableau 1 1: Caractéristiques des fibres et renforts.</i>	19
<i>Tableau 1 2: Principales différences entre matrices TP et TD.</i>	25
<i>Tableau 1 3: Avantages et inconvénients des époxydes.</i>	26
<i>Tableau 1 4: Avantages et inconvénients des polyuréthannes et polyuréées.</i>	26
<i>Tableau 1 5: Caractéristiques mécaniques des matrices TD.</i>	26
<i>Tableau 1 6: Caractéristiques mécaniques des matrices TP.</i>	27
<i>Tableau 1 7: Stratifié symétrique (paire).</i>	33
<i>Tableau 1 8: Stratifié symétrique (impaire).</i>	33
<i>Tableau 1 9: Stratifié avec la séquence.</i>	33
<i>Tableau 1 10: Stratifiés hybrides.</i>	33
<i>Tableau 2 1: Types de problèmes rencontrés selon l'étape d'élaboration d'une pièce en composite.</i>	49
<i>Tableau 3 1: Potentialités et limites des CND. / BS : Bonne Sensibilité ; SM : Sensibilité Moyenne ; FS : Faible sensibilité ; AL : Application Limitée.</i>	60
<i>Tableau 3 2: Principales méthodes de détection d'endommagement.</i>	67
<i>Tableau 5 1: Fréquences propres des poutres saine et endommagée (Hz).</i>	85

# *Nomenclature*

$E_1$  : Module de Young dans la direction de l'axe  $x$ . [MPa]

$E_2$  : Module de Young dans la direction de l'axe  $y$ . [MPa]

$E_3$  : Module de Young dans la direction de l'axe  $z$ . [MPa]

$G_{12}$  : Module de cisaillement dans le plan  $(xy)$ . [MPa]

$G_{13}$  : Module de cisaillement dans le plan  $(xz)$ . [MPa]

$G_{23}$  : Module de cisaillement dans le plan  $(yz)$ . [MPa]

$\nu_{12}$  : Coefficients de Poisson dans le plan  $(xy)$ .

$\nu_{13}$  : Coefficients de Poisson dans le plan  $(xz)$ .

$\nu_{23}$  : Coefficients de Poisson dans le plan  $(yz)$ .

$\omega$  : Pulsation propre. [rad/s]

$\omega_s$ : Pulsation propre poutre saine. [rad/s]

$\omega_e$ : Pulsation propre poutre endommagée. [rad/s]

$f$  : Fréquence. [Hz]

$\{\phi\}$  : Vecteur propre. [m]

$\rho$  : Masse volumique. [Kg/m<sup>3</sup>]

$\{\phi\}_s$  : Vecteur propre de la structure saine. [m]

$\{\phi\}_e$ : Vecteur propre de la structure endommagée. [m]

$L$  : longueur de la poutre. [m]

$B$  : largeur de la poutre. [m]

$E$  : épaisseur de la poutre. [m]

$e$  : épaisseur d'un pli. [m]

$h$  : épaisseur de l'interface. [m]

$R$  : position du délaminage par rapport à l'encastrement. [m]

$X$  : longueur de délaminage. [m]

$F(t)$  : Force d'excitation périodique.[N]

$\Delta f$  : Décalage de la réponse fréquentielle.[Hz]

$[K]$  : Matrice de rigidité.

$[M]$  : Matrice de masse.[Kg]

$[F]=[K]^{-1}$  : Matrice de sensibilité poutre saine.

$[F']$  : Matrice de sensibilité poutre endommagée.

$[\Delta F]$  : Variation de la matrice de sensibilité (flexibilité).

$\delta_{ij}$  : Elément de la matrice  $[\Delta F]$ .

$\delta_j = \text{Max } |\delta_{ij}|$ .

# ***Introduction générale***

## Introduction générale

Jadis utilisés dans les structures qui ne sont pas sollicités, les matériaux composites sont de nos jours de plus en plus utilisés comme alternative aux matériaux "traditionnels" dans les structures, en raison de leur haute résistance, rigidité spécifique, du gain de poids, ainsi que leurs propriétés mécaniques que l'on peut ajuster à sa guise. Les composantes de la structure sont maintenant souvent sollicitées avec des chargements dynamiques qui peuvent causer un endommagement assez sérieux et entraver le bon fonctionnement de la structure. De ce fait, le contrôle continu de ces derniers est devenu une nécessité pour garantir l'intégrité, la fiabilité et la sécurité de la structure.

L'évolution des méthodes de contrôle non destructif (CND) traditionnelles a permis un grand apport dans le domaine du contrôle des structures, mais elles sont limitées par leur incapacité à contrôler la structure en continu, aussi ces méthodes ne peuvent pas être utilisées sur de grandes structures, sans connaître, a priori, l'endroit de la défaillance.

Les méthodes de détection d'endommagement, basées sur des données vibratoires, sont apparues pour maîtriser ces difficultés. L'idée de base de ces méthodes est que l'endommagement provoque un changement dans les propriétés mécaniques de la structure (rigidité, masse et amortissement), ce qui induit à leur tour des changements dans les propriétés dynamiques de la structure (fréquences naturelles, déformées modales, réponse fréquentielle,...). Ces changements sont exploités pour détecter, localiser et quantifier l'endommagement ainsi que la prédiction de la durée de vie de la structure.

Le thème de ce projet se porte sur un aspect de dégradation extrêmement important au niveau du risque sur la structure en composite. Le délaminage ou le décollement entre plis est un mécanisme d'endommagement présent sur les stratifiés, causé par plusieurs phénomènes (défaut de fabrication, impact,...), il représente un risque majeur lors de l'élaboration d'une structure; Majeur par la difficulté de sa détection par les méthodes classiques de contrôle non destructif ainsi que la difficulté de prédire son évolution. L'usage des matériaux composites à grande échelle, nous pousse à essayer d'introduire de nouvelles méthodes moins restrictives et plus efficaces pour palier à ce problème, notamment par l'exploitation des données vibratoires.

Dans ce travail, nous nous sommes fixés l'objectif d'apporter quelques éléments de réponses à ce problème important. Notre contribution est une étude numérique pour déterminer s'il y a dégradation d'une structure en composite par délaminage en se référant aux méthodes exploitant les données vibratoires tel que la réponse fréquentielle, ainsi que la localisation et la quantification de ce défaut.

# **Chapitre I: Introduction aux matériaux composites**

# 1. Introduction

Un matériau composite peut être défini d'une manière générale comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux pris séparément. On appelle maintenant de façon courante "matériaux composites" des arrangements de fibres, les *renforts* qui sont noyés dans une *matrice* dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. La matrice assure la cohésion et l'orientation des fibres, elle permet également de transmettre les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces. Les matériaux ainsi obtenus sont très hétérogènes et anisotropes.

Bien qu'il existe de nombreux types de composites, on peut remarquer que deux familles sont développées selon des objectifs différents.

- Les composites de Grande Diffusion (GD): Ces composites possèdent de faibles caractéristiques mécaniques. Ils sont utilisés pour leur coût global compétitif (matériau+fabrication), et leur faible poids (ex: les pare-chocs automobiles).
- Les composites à Hautes Performances (HP): Tout à l'opposé des précédents, ceci possèdent des caractéristiques spécifiques supérieures à celle des aciers, et à l'exemple des composites (Carbone/Carbone), certains d'entre eux peuvent même supporter des températures très élevées (1000°C). Mais, du fait de la difficulté de fabrication de ces matériaux, leur prix est souvent très élevé. [1]

## 2. Généralités sur les composites

### 2.1 Classification des matériaux composites

Les composites peuvent être classés suivant la forme des composants ou suivant la nature des composants.

#### 2.1.1 Classification suivant la forme des constituants

En fonction de la forme des constituants, les composites sont classés en deux grandes classes: les matériaux composites à particules et les matériaux composites à fibres

##### 2.1.1.1 Composites à fibres:

Un matériau composite ce dit "composite à fibres" si le renfort se trouve sous forme de fibres. Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres continues, soit sous forme de fibres discontinues : fibres coupées, fibres courtes, etc. L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de moduler à la carte les propriétés mécaniques des matériaux composites, pour obtenir des matériaux allant de matériaux fortement anisotropes à des matériaux isotropes dans un plan.

##### 2.1.1.2 Composites à particules:

Un matériau composite se dit à "particules" lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. Une particule, par opposition aux fibres, ne possède pas de dimension privilégiée.

Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait, réduction du prix sans diminution des caractéristiques etc.

### 2.1.1.3 Composites à renforts de paillettes:

Les paillettes ont une dimension très faible par rapport aux autres dimensions. La dispersion de ces « particules minces » est généralement aléatoire. Cependant, les paillettes peuvent être rangées parallèlement l'un à l'autre afin d'avoir des propriétés plus uniformes dans le plan.

### 2.1.1.4 Composites stratifiés:

Un stratifié se compose d'au moins deux couches minces de matériau. Les couches peuvent être constituées de différents matériaux monolithiques comme dans les métaux plaqués ou de même matériau composite empilé selon différentes orientations comme pour des stratifiés composites à renforts de fibres longues. Ce dernier devient une classe hybride du composite comportant à la fois le composite à renfort de fibres et la technique de stratification.

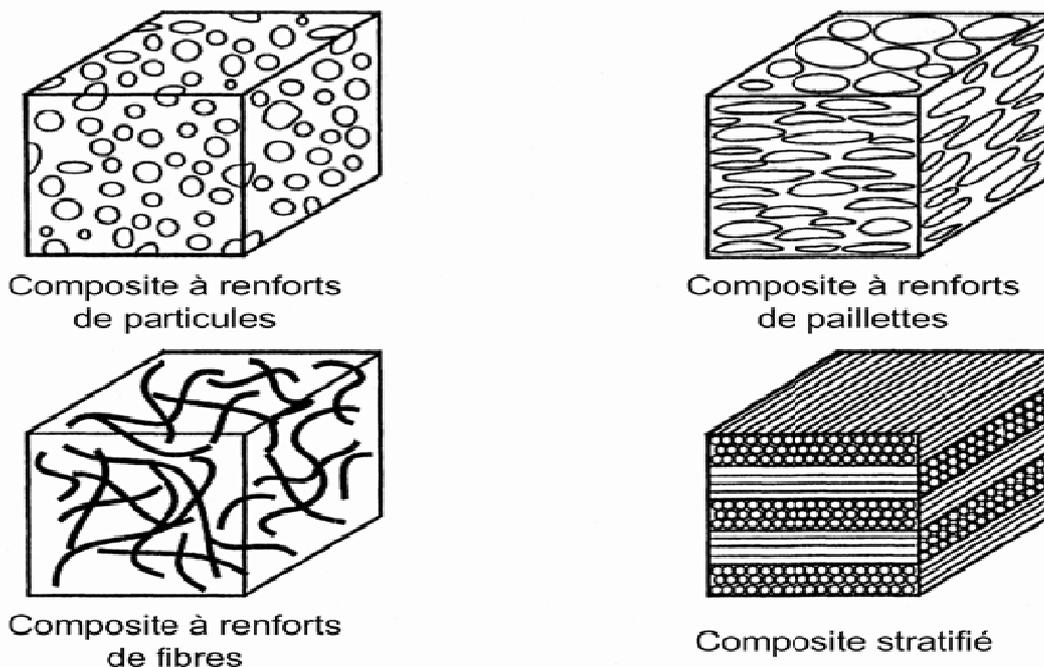


Figure 1 1 : différents types de matériaux composites.

## 2.1.2 Classification suivant la nature des constituants

Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés suivant des composites à matrice organique, à matrice métallique ou à matrice minérale. Divers renforts sont associés à ces matrices. Seuls certains couples d'associations ont actuellement un usage industriel, d'autres

faisant l'objet d'un développement dans les laboratoires de recherche. Parmi ces composites, nous pouvons citer :

### 2.1.2.1 Composites à matrice organique:

Ceci sont utilisés avec:

- ∅ des fibres minérales : verre, carbone, etc.
- ∅ des fibres organiques : Kevlar, polyamides, etc.
- ∅ des fibres métalliques : bore, aluminium, etc.

### 2.1.2.2 Composites à matrice métallique:

Ils sont utilisés avec:

- ∅ des fibres minérales : carbone, carbure de silicium (SiC),
- ∅ des fibres métalliques : bore,
- ∅ des fibres métallo-minérales : fibres de bore revêtues de carbure de silicium (BorSiC).

### 2.1.2.3 Composites à matrice minérale:

- ∅ des fibres métalliques : bore,
- ∅ des particules métalliques : cermets,
- ∅ des particules minérales : carbures, nitrures, etc.

Les matériaux composites à matrice organique ne peuvent être utilisés dans le domaine des températures dépassant 200 à 300 °C, alors que les matériaux composites à matrices métallique ou minérale sont utilisés au-delà : jusqu'à 600 °C pour une matrice métallique, jusqu'à 1000 °C pour une matrice céramique.

## 3. Constituants des matériaux composites

En générale, les matériaux composites se composent de trois constituants distincts. Les renforts, les matrices et les charges.

### 3.1 Les renforts

Les renforts sont des composants qui se présentent le plus souvent sous formes fibreuses ou filamenteuses, c'est eux qui confèrent au composite l'essentiel de ces propriétés mécaniques. Nous distinguons plusieurs types de renforts.

#### 3.1.1 Fibre de verre



Elles constituent le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elle est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore).

### 3.1.2 Fibre de carbone



C'est la fibre la plus utilisée dans les applications hautes performances. Elle est issue de la carbonisation de la fibre de PAN (polyacrylonitrile). Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres:

- Fibres à hautes résistance (HR): pour une combustion de 1000 à 1500°C
- Fibres à haut module (HM): pour une combustion de 1800 à 2000°

### 3.1.3 Fibre d'aramide



Souvent appelée KEVLAR, la fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes:

- Les fibres à bas module: Utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles.
- les fibres haut module: Employées dans les renforcements pour les composites hautes performances.

### 3.1.4 Fibre de bore

Fibres de haut module et insensibles à l'oxydation à hautes températures, elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène.

### 3.1.5 Fibre de silice (ou de quartz)

Elles sont produites comme le verre, par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique dans les tuyères pour moteur de fusée.

### 3.1.6 Fibre de polyéthylène de haut module

Elles présentent une très bonne résistance à la traction mais une mauvaise mouillabilité. Pour des structures peu sollicités, on peut encore utiliser des fibres synthétiques courantes de polyamide ou polyester.

### 3.1.7 Caractéristiques moyennes des fibres et renforts

Renforts	Diamètre du filament ( $\mu\text{m}$ )	Masse volumique ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Module de Young (Mpa)	Module de cisaillement (Mpa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (Mpa)	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique
	d	Mv	E	G	k	Cr	A	$\alpha$
<b>Verre E</b>	16	2600	74000	30000	0.25	2500	3.5	$0.5 \cdot 10^{-5}$
<b>Verre R</b>	10	2500	86000		0.2	3200	4	$0.3 \cdot 10^{-5}$
<b>Carbone HM</b>	6.5	1800	390000	20000	0.35	2500	0.6	$0.08 \cdot 10^{-5}$
<b>Carbone HR</b>	7	1750	230000	50000	0.3	3200	1.3	$0.02 \cdot 10^{-5}$
<b>Kevlar 49</b>	12	1450	130000	12000	0.4	2900	2.3	$-0.2 \cdot 10^{-5}$
<b>Bore</b>	100	2600	400000			3400	0.8	$0.4 \cdot 10^{-5}$
<b>Silicate d'alumine</b>	10	2600	200000			3000	1.5	
<b>Polyéthylène</b>		<b>960</b>	<b>100000</b>			<b>3000</b>		

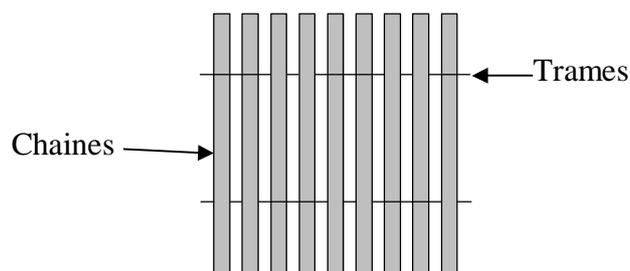
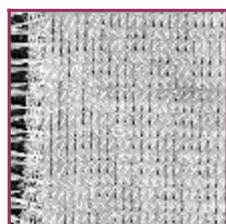
Tableau 1 1: Caractéristiques des fibres et renforts.

### 3.1.8 Architecture des renforts

Les structures composites sont anisotropes. La plupart des renforts travaillent bien en traction, mais offrent de moins bonnes performances en compression et cisaillement. Il est donc impératif de jouer sur la texture et la géométrie des renforts pour créer une architecture adaptée. Il existe différentes géométries et textures de renforts :

#### 3.1.8.1 Les unidirectionnels (UD) :

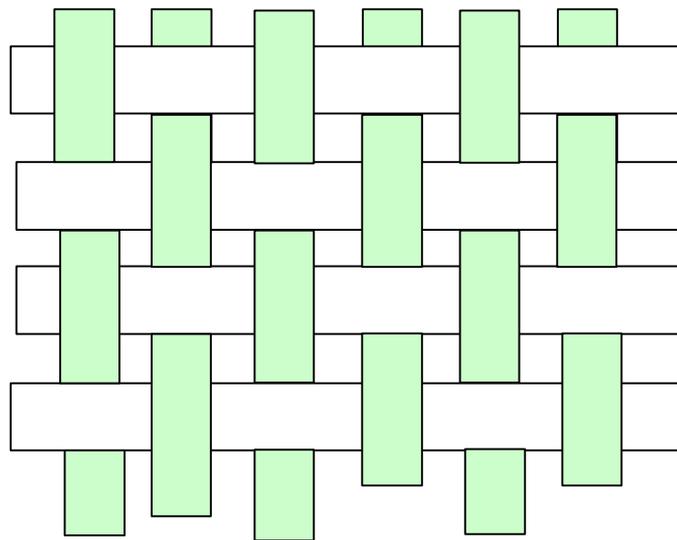
Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère. Taux de déséquilibre très grand.



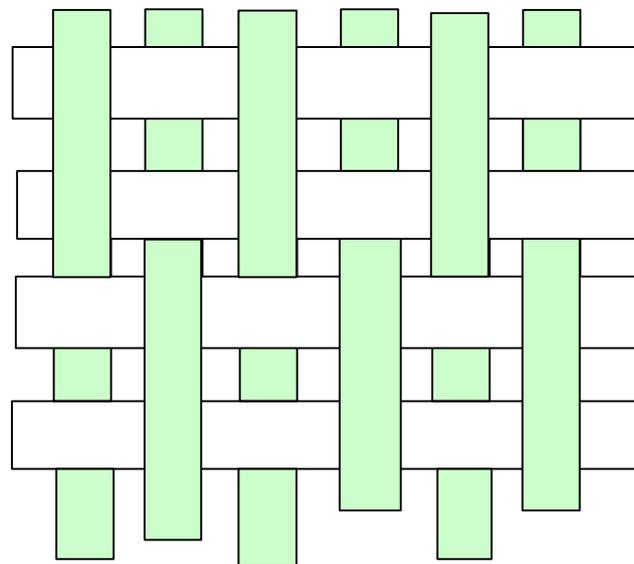
### 3.1.8.2 Les tissus :

Ils se composent de fils de chaînes et de trames perpendiculaires entre eux. Le mode d'entrecroisement ou armure les caractérise.

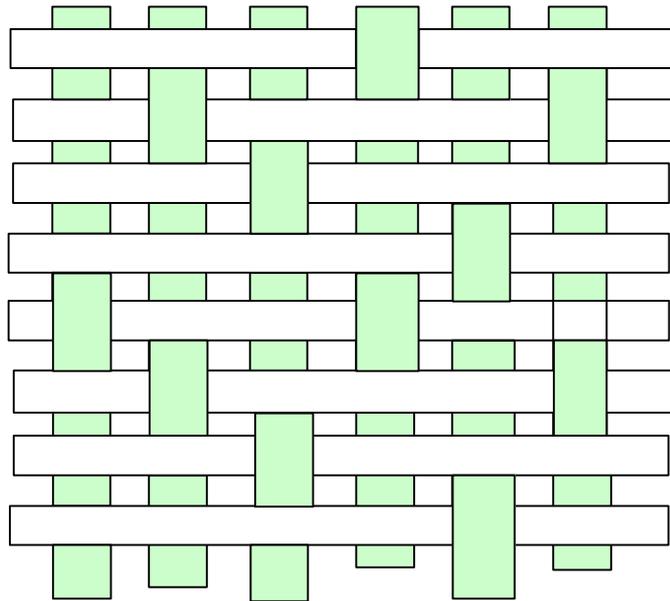
- **Toile ou taffetas**: Chaque fil de chaîne passe dessus puis dessous chaque fil de trame, et réciproquement. Le tissu présente une bonne planéité et une relative rigidité, mais est peu déformable pour la mise en œuvre. Les nombreux entrecroisements successifs génèrent un embuvage important et réduisent les propriétés mécaniques.



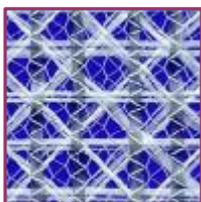
- **Serge** : Chaque fil de chaîne flotte au dessus de plusieurs (n) fils de trame et chaque fil de trame flotte au dessus de (m) fils de chaîne. Armure de plus grande souplesse que le taffetas ayant une bonne densité de fils.



- **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.



Il existe aussi d'autres types d'architectures destinées à des utilisations spécifiques celles-ci sont bi ou tridimensionnelles



Tissu multiaxial



Tissu 3D ou tresse

Il est également possible de réaliser des structures de renforts hybrides en tissant des fibres de natures différentes ou, en superposant des tissus ou nappes de renforts de fibres différentes.



Tissu hybride carbone aramide

## 3.2 Les charges

On désigne sous le nom général de **charge** toute substance inerte, minérale ou végétale qui, ajoutée à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface ou bien, simplement, de réduire le prix de revient du matériau transformé.

A l'inverse des matières *thermoplastiques*, les matières *thermodurcissables* ont toujours contenu des charges de nature et de forme variée, à des taux souvent élevés pouvant atteindre 60 % en masse.

Pour un polymère donné, le choix d'une charge est déterminé en fonction des modifications recherchées pour l'objet fini. Mais, d'une manière générale, les substances utilisables comme charges des matières plastiques devront d'abord satisfaire à un certain nombre d'exigences :

- Ø Compatibilité avec la résine de base.
- Ø Mouillabilité.
- Ø Uniformité de qualité et de granulométrie.
- Ø Faible action abrasive.
- Ø Bas prix de revient.

### 3.2.1 Les charges organiques

- Ø Charges cellulosiques, utilisées en tant que **charges des résines thermodurcissables** (phénoplastes et aminoplastes). Les avantages de ces matières cellulosiques sont leur coût peu élevé et leur faible densité.
- Ø Farines de bois.
- Ø farines d'écorces de fruits et de noyaux.
- Ø fibres végétales.
- Ø pâtes de cellulose.
- Ø Amidons.

### 3.2.2 Les charges minérales

#### 3.2.2.1 Craies et carbonates:

- Ø La craie
- Ø Le calcaire et le marbre
- Ø Le carbonate de calcium-magnésium ( $MgCO_3 \cdot CaCO_3$ )
- Ø Le carbonate de calcium

#### 3.2.2.2 Les silices:

La silice ( $SiO_2$ ), à l'état pur ou combinée avec des oxydes métalliques, est utilisée comme charge sous différentes formes, suivant son origine, sa cristallinité, sa dureté et la taille des particules

### 3.2.2.3 Les talcs:

Les talcs sont utilisés pour améliorer l'isolation thermique et la résistance à l'eau, et faciliter l'opération de moulage.

### 3.2.2.4 La wollastonite:

Cette charge se présente sous différentes formes : aiguilles, granulés, fibres.

Elle est surtout utilisée dans les polyamides, les ABS et les polysulfones, également en remplacement des fibres de verre dans les SMC et les BMC. Elle améliore en particulier la résistance au rayonnement ultraviolet et à l'hydrolyse.

### 3.2.2.5 Les argiles et aluminosilicates:

Ces substances minérales sont en grande partie constituées par de la silice (42 à 70 %) et de l'alumine (14 à 45 %).

## 3.2.3 Le verre

### 3.2.3.1 Poudres de verre:

Une nouvelle variété de poudre de verre de granulométrie 13  $\mu\text{m}$  est apparue sur le marché et son incorporation confère aux thermodurcissables de meilleures résistances à l'abrasion et à la compression ; elle permet par ailleurs d'obtenir un retrait plus faible et plus homogène des pièces moulées.

### 3.2.3.2 Billes de verres creuses:

Les billes de verre creuses, de densité comprise entre 0,1 et 0,5, sont obtenues par chauffage de billes de verre contenant un agent gonflant. Elles améliorent les résistances à l'eau et au vieillissement du PMMA, et diminuent la friabilité des pièces phénoliques. Les densités de ces microsphères creuses du type **borosilicate de sodium et de calcium** sont comprises entre 0,38 et 0,45 ; parallèlement, leur résistance à la compression varie de 1,7 à 31 MPa. Les applications sont nombreuses (bâtiment, automobile et aéronautique).

## 3.2.4 Le carbone

### 3.2.4.1 Le noir de carbone:

Le noir de carbone est utilisé depuis très longtemps dans l'industrie des plastiques, à la fois comme colorant, pigment, barrière anti-UV, antioxydant. Le noir de carbone améliore la résistance à la chaleur du polyéthylène réticulé par irradiation et celle du PVC. La conductivité thermique augmente avec le taux de charges, indépendamment de la taille des particules. Par contre, la conductivité électrique des matériaux chargés augmente avec le taux de carbone et avec la finesse des particules.

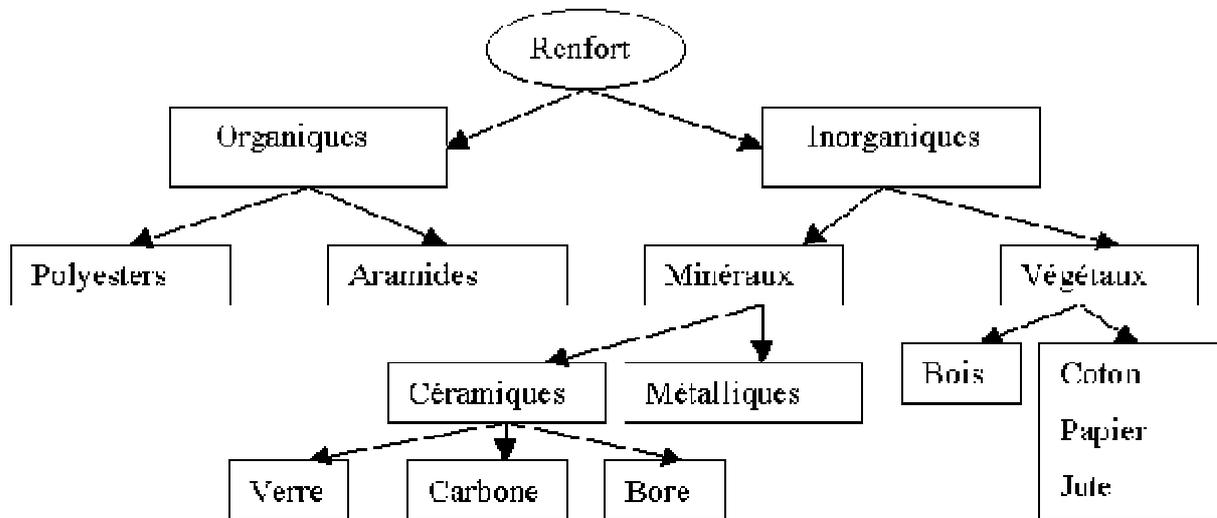


Figure 1 2: principaux matériaux de renforts.

### 3.3 Les matrices

Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. Les résines polymères existent en grand nombre et chacune à un domaine particulier d'utilisation. Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés. Dans le cas des matériaux en carbone des températures de 2 200°C peuvent être atteintes.

Dans notre cas nous allons nous intéresser plus aux matrices à base de résine car c'est elles qui sont utilisées dans la fabrication de stratifiés. On utilise actuellement surtout des résines thermodurcissables (TD) que l'on associe à des fibres longues, mais l'emploi de polymères thermoplastiques (TP) renforcés de fibres courtes se développe fortement.[2]

Il est important de bien situer les différences fondamentales de ces deux types de matrices.

- Ø La structure des TP se présente sous forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour les mettre en forme (les chaînes se plient alors), et les refroidir pour les fixer (les chaînes se bloquent). Cette opération est réversible.
- Ø La structure des TD a la forme d'un réseau tridimensionnel qui se pont (double liaison de polymérisation) pour durcir en forme de façon définitive, lors d'un échauffement. La transformation est donc irréversible.

Matrices	Thermoplastiques TP	Thermodurcissables TD
Etat de base	solide prêt à l'emploi	liquide visqueux à polymériser
Stockage	illimité	réduit
Mouillabilité renforts	difficile	aisée
Moulage	chauffage + refroidissement	chauffage continu
Cycle	court	long
Tenue au choc	assez bonne	limitée
Tenue thermique	réduite	bonne
Chutes et déchets	recyclables	perdus ou recyclés en charges
Conditions de travail	propreté	émanation pour "méthode humide"

Tableau 1 2: Principales différences entre matrices TP et TD.

### 3.3.1 Les résines thermodurcissables

#### 3.3.1.1 Polyesters insaturés:

C'est la résine la plus utilisée dans l'application composite de grande distribution. Une résine de polyester insaturé contenant un monomère (généralement le styrène) est réticulée à température ambiante par addition d'un catalyseur de type peroxyde organique et d'un accélérateur. Elle passe successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel, puis à l'état de solide infusible. La réaction est exothermique et la température de la résine augmente progressivement depuis le gel jusqu'à un maximum pour redescendre ensuite lentement à la température ambiante.

#### 3.3.1.2 Vinylesters:

On peut la considérer comme une variante des polyesters produite à partir d'acides acryliques. Elles possèdent une bonne résistance à la fatigue et un excellent comportement à la corrosion, mais demeure combustible.

#### 3.3.1.3 Phénoliques:

Elles sont issues de la polycondensation du phénol et du formol et se caractérisent par une bonne tenue au feu, sans fumée. Elles restent fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à colorer et à mettre en œuvre.

#### 3.3.1.4 Epoxydes:

Elles résultent de la polyaddition de l'épichlorhydrine sur un polyalcool et constitue la résine type des composites hautes performances HP. On distingue deux classes de résines en fonction :

- Ø du durcissement à chaud ou à froid ;
- Ø de la tenue en température (120-130 °C, ou 180-200 °C).

Avantages	Inconvénients
Tenue mécanique, thermique, chimique et fatigue Faible retrait (1 à 2 %) Excellente adhérence sur fibres Auto-extinguibilité Mise en œuvre facile, sans solvant	Prix élevé Sensibilité à l'humidité et aux UV Vieillessement sous température Sensibilité aux chocs Temps de polymérisation

Tableau 1 3: Avantages et inconvénients des époxydes.

### 3.3.1.5 Polyuréthanes et polyurées:

Dans la fabrication de pièces composites, on utilise surtout des formules élastomériques dont la faible viscosité permet un bon remplissage du moule. Les constituants sont livrés à l'état de prépolymères liquides:

- Ø Polyols + polyisocyanates = polyuréthanes.
- Ø Polyéthers + polyamines = polyurées.

Avantages	Inconvénients
Facilité de moulage in situ Tenue chimique Vieillessement	Résistance mécanique réduite Combustibilité Coloration en masse difficile : foncée

Tableau 1 4: Avantages et inconvénients des polyuréthanes et polyurées.

Matrices TD	Masse volumique (kg.m <sup>-3</sup> )	Module d'élasticité longitudinal (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique °C <sup>-1</sup>
	M <sub>v</sub>	E	G	k	C <sub>r</sub>	A	α
<b>Epoxyde</b>	1 200	4 500	1 600	0,4	130	2	11*10 <sup>-5</sup>
<b>Phénolique</b>	1 300	3 000	1 100	0,4	70	2,5	1*10 <sup>-5</sup>
<b>Polyester</b>	1 200	4 000	1 400	0,4	80	2,5	8*10 <sup>-5</sup>
<b>Polycarbonate</b>	1 200	2 400		0,35	60		6*10 <sup>-5</sup>
<b>Vinylesters</b>	1 150	3 300			75	4	5*10 <sup>-5</sup>
<b>silicone</b>	1 100	2 200		0,5	35		
<b>Uréthanne</b>	1 100	700 à 7 000			30	100	
<b>Polyimide</b>	1 400	4 000 à 19 000	1 100	0.35	70	1	8*10 <sup>-5</sup>

Tableau 1 5: Caractéristiques mécaniques des matrices TD.

### 3.3.2 Les matrices thermoplastiques

Les polymères utilisés sont essentiellement des thermoplastiques techniques qui présentent à l'état vierge de bonnes caractéristiques mécaniques. Un renforcement à l'aide de fibres courtes leur confère une tenue thermique et mécanique améliorée et une bonne stabilité dimensionnelle. Les principales matrices TP utilisées (possédant tous une tenue en température supérieure à 100°C, hors POM) sont les suivantes:

- Ø Polyamide (PA) : tenue au choc, bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures ;
- Ø Polytéréphtalate éthylénique et butylénique (PET, PBT) : bonne rigidité, bonne ténacité ;
- Ø Polycarbonate (PC) : tenue au choc ;
- Ø Polysulfure de phénylène (PPS) : résistance à l'hydrolyse ;
- Ø Polyoxyméthylène (POM) : bonne tenue à la fatigue ;
- Ø Polysulfurés (PSU et PPS) : bonne stabilité chimique et à l'hydrolyse, peu de fluage, tenue au chaud ;
- Ø Polypropylène (PP) : peu onéreux et assez stable en température, mais combustible.

De plus en plus, on utilise des thermoplastiques thermostables (tenue en température >200°C et bonnes propriétés mécaniques), en particulier les suivants :

- Ø Polyamide-imide (PAI) ;
- Ø Polyéther-imide (PEI) ;
- Ø Polyéther-sulfone (PES) ;
- Ø Polyéther-éther-cétone (PEEK).

Matrices TP	Masse volumique (kg.m <sup>-3</sup> )	Module d'élasticité longitudinal (Mpa)	Module de cisaillement (Mpa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique °C <sup>-1</sup>
	Mv	E	G	k	C <sub>r</sub>	A	α
<b>PP</b>	900	1 200		0.4	30	20 à 400	9*10 <sup>-5</sup>
<b>PPS</b>	1 300	4 000			65	100	5*10 <sup>-5</sup>
<b>PA</b>	1 100	2 000		0.35	70	200	8*10 <sup>-5</sup>
<b>PES</b>	1 350	3 000			85	60	6*10 <sup>-5</sup>
<b>PEI</b>	1 150	3 300			105	60	6*10 <sup>-5</sup>
<b>PEEK</b>	1 300	4 000			90	50	5*10 <sup>-5</sup>

Tableau 1 6: Caractéristiques mécaniques des matrices TP.

## 4. Composites sandwiches

Le principe de la technique sandwich consiste à appliquer sur une âme (constituée d'un matériau ou d'une structure légère possédant de bonnes propriétés en compression) deux "feuilles", appelées peaux, possédant de bonnes caractéristiques en traction. L'objectif d'un tel procédé est de constituer une structure permettant de concilier légèreté et rigidité. [2]

Généralement, le choix des matériaux est fait avec pour objectif initial d'avoir une masse minimale en tenant compte ensuite des conditions d'utilisation (conditions thermiques, corrosion, prix, etc.).

Les matériaux les plus couramment utilisés sont :

∅ pour les *âmes pleines* (figure 4) :

- le balsa ou bois cellulaire;
- diverses mousses cellulaires;
- des résines chargées de microsphères creuses de verre, appelées mousses syntactiques ;

∅ pour les âmes creuses (figure 5), essentiellement nid d'abeilles et profilés :

- des alliages métalliques légers;
- du papier kraft (enduit ou non de résine);
- du papier polyamide, type papier Nomex;

Des âmes mixtes peuvent être utilisées.

Les peaux sont le plus souvent des stratifiés (verre, carbone, Kevlar) ou des feuilles d'alliages légers.

Pour que les structures sandwiches jouent pleinement leur rôle, il est nécessaire de veiller à avoir une solidarisation parfaite de l'ensemble âme-peaux, de manière à répartir les efforts entre âme et peaux. L'assemblage est réalisé par un collage à l'aide de résines compatibles avec les matériaux en présence.

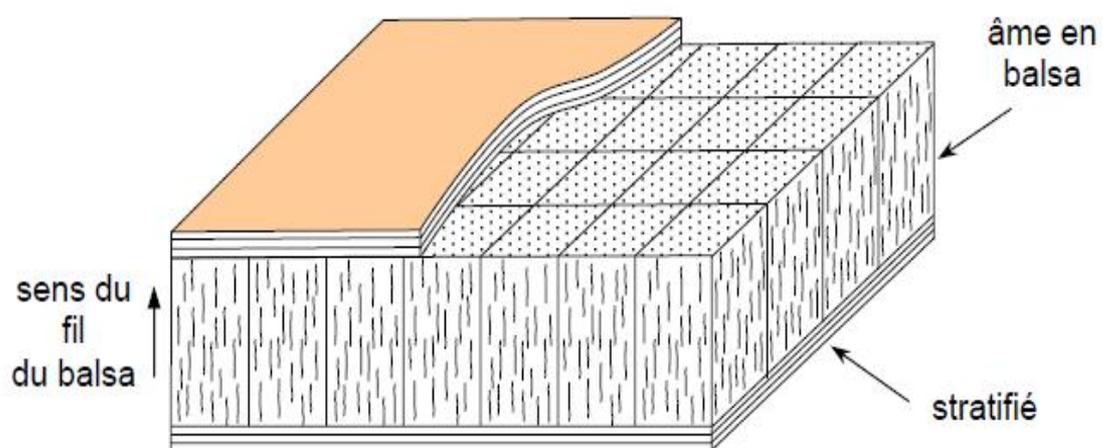
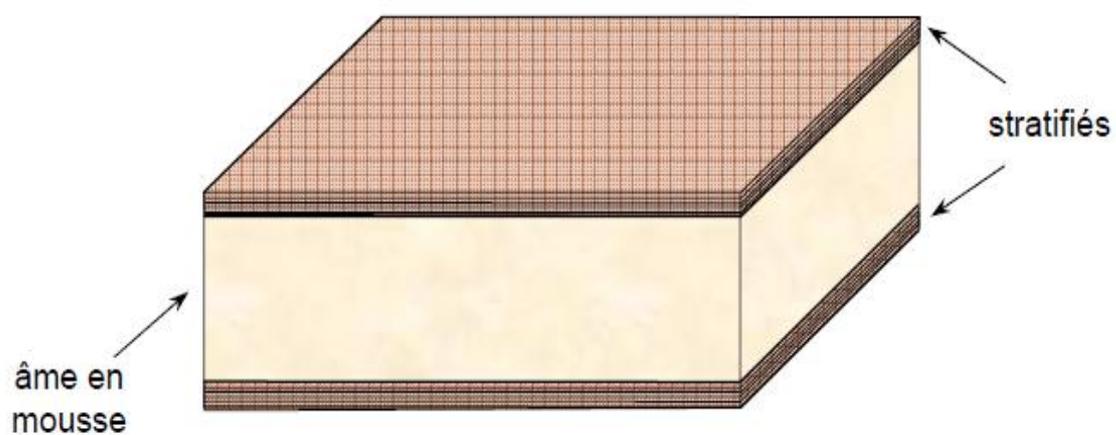


Figure 1 3: Matériaux sandwichs à âmes pleines.

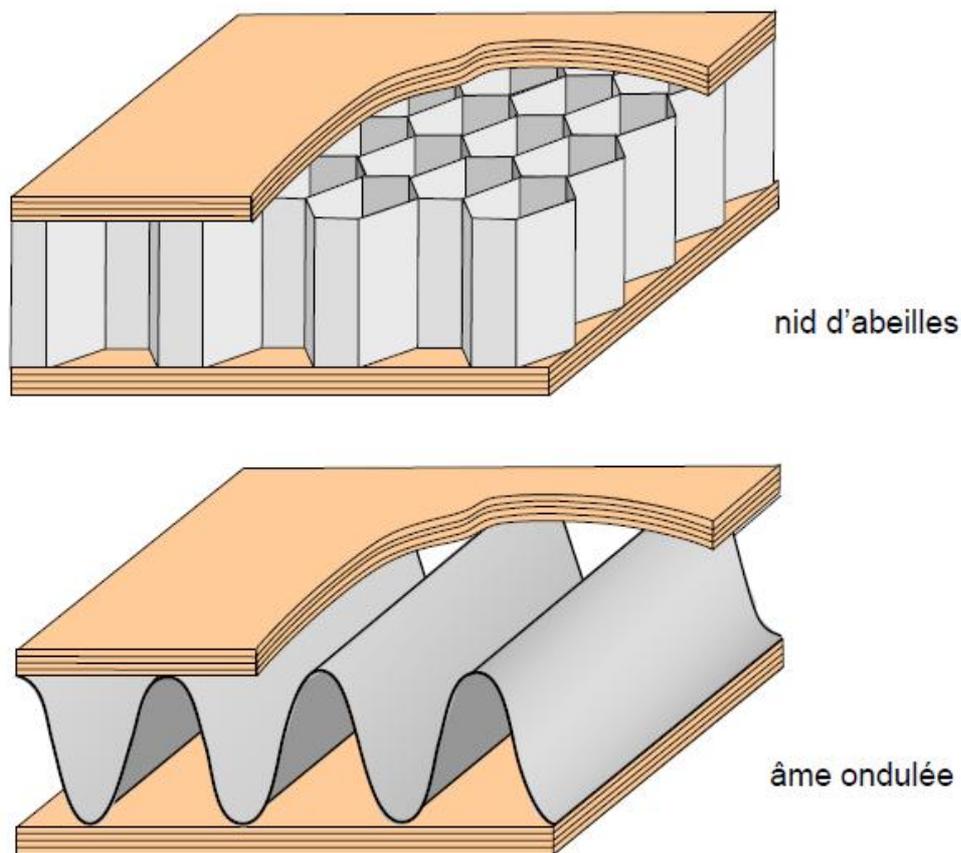


Figure 1 4: Matériaux sandwiches à âmes creuses.

## 5. Structures composites stratifiées

Les structures composites stratifiées sont constituées de couches successives de renforts imprégnés de résines. Les couches sont également nommées plis. Les structures stratifiées réalisées à partir de matériaux composites sont constituées d'empilements de nappes unidirectionnelles ou bi-directionnelles. Ces nappes sont formées de renforts en fibres longues liées par de la résine. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La résine assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques. Les pièces structurales sont réalisées par empilement de nappes en optimisant les directions des renforts en fonction des charges qu'elles doivent subir. [1]

Les matériaux composites sont modélisés à une échelle intermédiaire entre l'échelle microscopique associée aux constituants de base du composite (le renfort et la matrice) et l'échelle macroscopique liée à la structure. À cette échelle, appelée méso-échelle, une structure

stratifiée est schématisée par un empilement de monocouches homogènes dans l'épaisseur et d'interfaces inter-laminaires. La couche et l'interface sont les deux entités appelées méso-constituants, comme illustré sur la figure 4.1, qui forment les bases des modèles dédiés à l'étude des structures stratifiées. L'interface inter laminaire est une entité surfacique assurant le transfert des déplacements et des contraintes normales d'une couche à une autre. En élasticité, les couches sont parfaitement liées et l'interface ne joue aucun rôle particulier. L'étude des composites jusqu'à la phase ultime de la rupture montrera l'utilité d'employer un modèle d'interface pour simuler les phénomènes de délaminage (séparation progressive des couches).

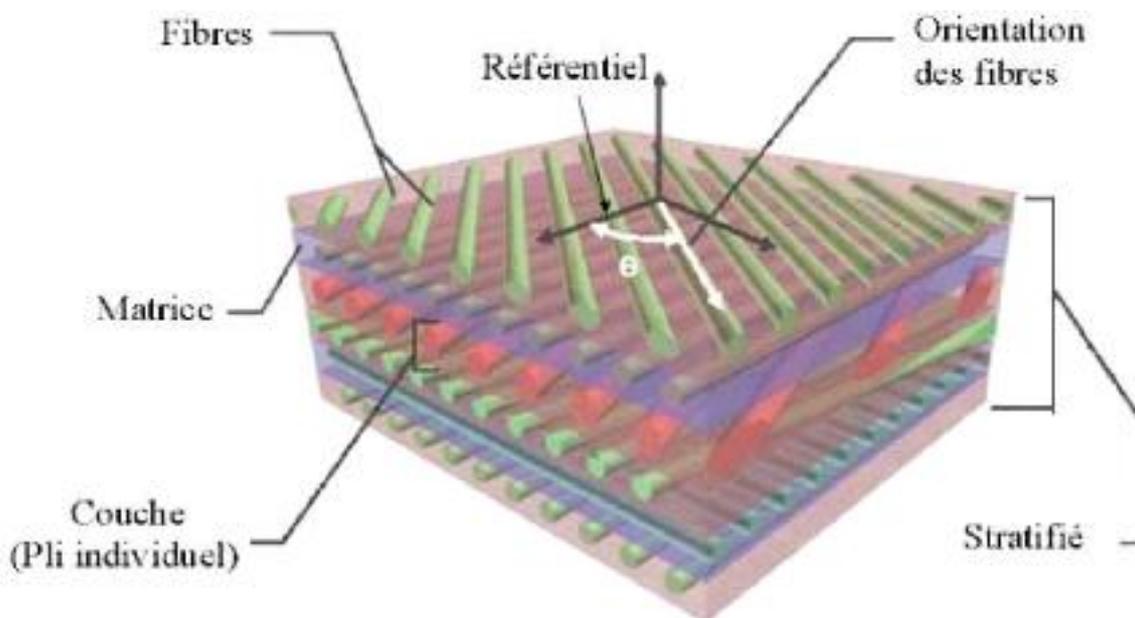


Figure 1 5: Stratifié constitué de couches unidirectionnelles.

### 5.1.1 Stratifiés unidirectionnels

Les stratifiés unidirectionnels sont constitués de couches avec des fibres unidirectionnels, dont la direction est décalée dans chaque couche.

### 5.1.2 Les stratifiés hybrides

Les stratifiés hybrides sont constitués de couches successives comportant des fibres de natures différentes. Il sera alors nécessaire de les mentionner dans la désignation.

Les stratifiés hybrides permettent d'être plus performants en utilisant au mieux les propriétés des diverses fibres disponibles. Parmi les différents hybrides, on peut distinguer :

- ∅ des hybrides inter-couches, constitués d'une suite de couches, chacune de nature différente;
- ∅ des hybrides intra-couches, constitués par une séquence de couches identiques, chaque couche étant constituée de renforts différents;

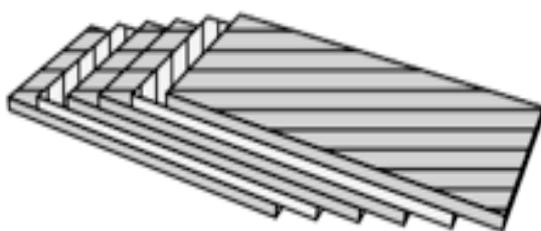
∅ des couches métalliques peuvent également être intercalées entre les couches.

### 5.1.3 Désignation des structures stratifiées

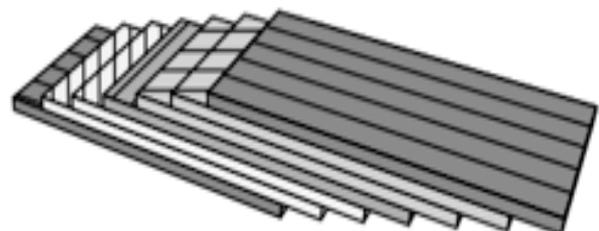
Les structures stratifiées à base de tissus unidirectionnels sont constituées d'un grand nombre de couches ou plis. L'épaisseur d'une couche dépend de son grammage. L'épaisseur de chacune des couches est généralement très faible, de l'ordre de 0,125 mm pour un matériau carbone époxy de type Aéronautique et 0,3 mm pour ceux qui sont utilisés dans l'Industrie Nautique. Ces structures stratifiées sont constituées de couches unidirectionnelles avec des fibres orientées de façon différente d'une couche à l'autre afin d'obtenir les propriétés mécaniques souhaitées pour la structure finale.

La désignation des structures stratifiées est délicate car il faut préciser les axes de référence. Un stratifié est codifié de la façon suivante :

- ∅ chaque couche est désignée par un nombre indiquant la valeur en degré de l'angle que fait la direction des fibres avec l'axe de référence x. Sur les figures 4.2(a) et 4.2(b), les couches sont représentées décalées les unes par rapport aux autres. La structure stratifiée est décrite de bas en haut;
- ∅ les couches sont nommées successivement entre crochet en allant de la face inférieure à la face supérieure. Les couches successives sont séparées par le symbole « / » comme l'exemple de la figure 4.2(a) :  $[-45/45/-45/-45/45/-45]$ ;
- ∅ les couches successives d'un même matériau et de même orientation sont désignées par un indice numérique, comme l'exemple de la figure 4.2(b) :  $[0/45_2/90/-45_2/0]$ ;
- ∅ en cas de stratification hybride (différents matériaux dans un même stratifié), il faut préciser par un indice la nature de la couche;
- ∅ en cas de structures symétriques, la moitié est codifiée et le symbole s indique la symétrie :  $[-45/45/-45/-45/45/-45]$  devient  $[-45/45/-45]$  s et  $[0/45/45/90/-45/-45/0]$  devient  $[0/45_2/90/-45_2/0]$ .



(a)  $[-45/45/-45/-45/45/-45]$



(b)  $[0/45_2/90/-45_2/0]$

Figure 1 6: Désignation d'un stratifié.

### 5.1.3.1 Stratifié symétrique:

Un stratifié est symétrique si son plan moyen est plan de symétrie. Sa désignation ne nécessite alors que la moitié des couches successives. Si le stratifié a un nombre pair de couches, la désignation débute sur une face pour finir au plan de symétrie. Un indice S indique que le stratifié est symétrique.

Orientation des fibres	Notations de stratifié
$90^\circ/45^\circ/45^\circ/0^\circ/0^\circ/45^\circ/45^\circ/90^\circ$	$[90/45_2/0]_s$

Tableau 1 7: Stratifié symétrique (paire).

Si le stratifié comporte un nombre impair de couches, la désignation est semblable à la précédente, la couche centrale étant surlignée. Par exemple :

Orientation des fibres	Notations de stratifié
$90^\circ/45^\circ/45^\circ/0^\circ/45^\circ/45^\circ/90^\circ$	$[90/45_2/\bar{0}]_s$

Tableau 1 8: Stratifié symétrique (impaire).

### 5.1.3.2 Séquences:

La répétition de séquences peut être indiquée par un indice indiquant le nombre de fois où une séquence est successivement répétée. L'alternance  $[0 / 90]_n$  est souvent désignée par stratifié croisé.

Orientation des fibres	Notations de stratifié
$0^\circ/45^\circ/90^\circ/0^\circ/45^\circ/90^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ$	$[(0/45/90)_2]_s$ ou $[(0/45/90)]_{2s}$
$0^\circ/45^\circ/90^\circ/0^\circ/45^\circ/90^\circ/60^\circ/30^\circ/60^\circ/30^\circ/60^\circ/30^\circ$	$[(0^\circ/45^\circ/90^\circ)_2(60^\circ/30^\circ)_3]$

Tableau 1 9: Stratifié avec la séquence.

### 5.1.3.3 Stratifiés hybrides:

Etant donné que les stratifiés hybrides sont constitués de couches successives ayant des fibres de natures différentes. Nous sommes dans la nécessité de désigner les matériaux de renfort de chaque pli. Par exemple, pour des stratifiés avec la même résine :

Orientation des fibres	Notations de stratifié
$0^\circ V/45^\circ C/-45^\circ C/90^\circ C/90^\circ C/-45^\circ C/45^\circ C/0^\circ V$	$[(0V/\pm 45C/90C)_2]_s$ ou $[(0V/\pm 45C/90C)]_{2s}$

Tableau 1 10: Stratifiés hybrides.

## 5.2 Structure générale d'un stratifié

Dans le cas général, le renfort de chaque couche sera de natures diverses : fils, stratifils, mats, tissus, fibres de verre, fibres de carbone, etc. Chaque couche doit alors être désignée par l'indication de la nature des fibres, du type de renfort : fils, mat, tissu avec indication de la proportion de fibres suivant le sens chaîne et trame.

Le choix de la nature et de la séquence des couches dépendra de l'utilisation du matériau composite, en l'adaptant au mieux au champ des contraintes imposé :

- ∅ les couches unidirectionnelles ont de bonnes performances mécaniques dans la direction des fibres;
- ∅ les mats sont peu résistants en traction et devront être réservés aux zones comprimées;
- ∅ une stratification croisée sera sensible au délaminage interlaminaire;
- ∅ une stratification avec au moins trois directions de fibres sera nécessaire pour avoir une pseudo-isotropie dans le plan du stratifié.

Enfin, il est intéressant de noter qu'une stratification symétrique garantira généralement une bonne planéité du stratifié après démoulage.

## 6. Conclusion

Nous avons dans ce chapitre traité d'une composante essentielle des matériaux composites qui est l'étude des constituants. Nous avons présenté un aperçu général sur les matériaux composites, nous les avons définis, classifiés et énuméré quelques constituants essentiels. Dans un deuxième temps nous avons traité les composites stratifiés, inventorié quelques types et mis en avant leurs désignations.

Le prochain chapitre étalera les différents mécanismes d'endommagements des matériaux composites.

**Chapitre II: Mécanismes  
d'endommagement et de  
rupture des matériaux  
composites**

# 1. Introduction

Par mécanisme de rupture, il faut comprendre tout processus mécanique causant au sein d'un matériau une "discontinuité" locale de matière appelée fissure. Il est habituel de parler d'initiation de la rupture et de propagation de la rupture. L'initiation de la rupture peut être considérée comme la création de microfissures à l'échelle microscopique (celle des constituants) à partir d'un défaut. On parlera de microfissuration. La propagation de la rupture est le résultat de la création de nouvelles surfaces de rupture à l'échelle macroscopique (plusieurs fois celle des constituants), à partir des microfissures existantes. On parlera également de macro fissuration. Dans le cas des matériaux composites, l'initiation de la rupture se produit généralement bien avant l'observation d'un changement du comportement macroscopique. [3]

## 2. Les modes de ruptures

Il existe trois modes de ruptures élémentaires lors de la sollicitation d'un matériau en général, cela est indépendant de sa nature.

### 2.1 Mode I:

Une contrainte de traction normale au plan de fissure. Les surfaces de la fissure se déplacent perpendiculairement au plan de fissuration.

### 2.2 Mode II:

Une contrainte de cisaillement agissant parallèlement au plan de la fissure et perpendiculaire au front de fissure. Les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction perpendiculaire au front de la fissure.

### 2.3 Mode III:

Une contrainte de cisaillement agissant parallèlement au plan de la fissure et parallèlement au front de fissure. Les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction parallèle au front de fissuration.

De manière générale, une fissure se propage dans un matériau sous une combinaison de contraintes dans les trois modes

## 3. Mécanismes de rupture des stratifiés composites à renforts de fibres longues

La rupture des stratifiés composites peut se produire de plusieurs façons très complexes. Les modes de rupture dépendent de la stratification et de la direction du chargement par rapport à l'orientation des fibres. Les Figure 2-1 et Figure 2-2 montrent les allures des ruptures par flexion et par traction respectivement. Des différences remarquables à l'échelle macroscopique peuvent être constatées selon différentes stratifications. Etant donné la

diversité de la stratification et du chargement, des modes de rupture bien définis à l'échelle macroscopique ne peuvent pas, en général, être identifiés. [3]

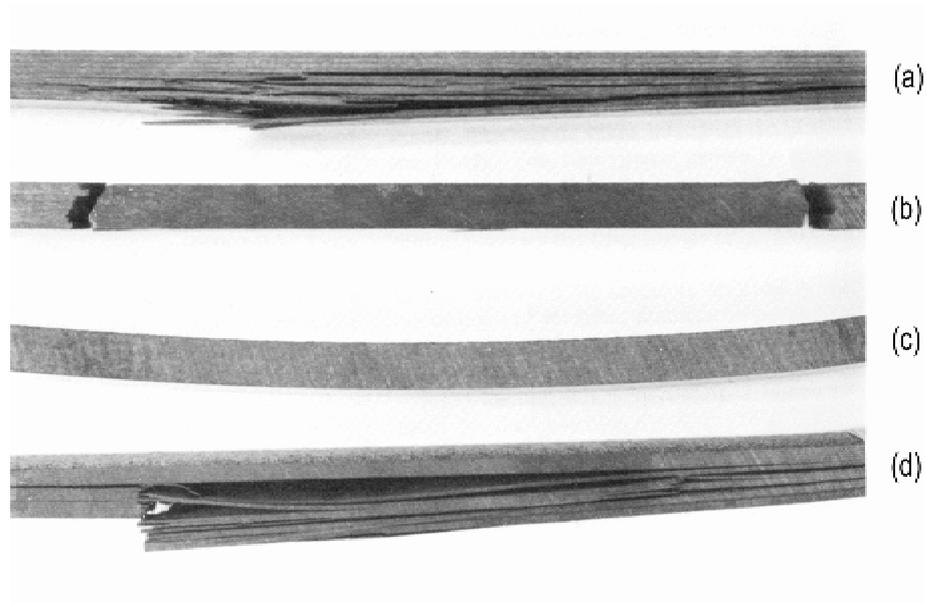


Figure 2 1: Ruptures par flexion de différentes séquences d'empilement (a) Quasi-isotrope, (b) Unidirectionnelle, (c)  $\pm 45^\circ$ , (d)  $0^\circ/90^\circ$ .

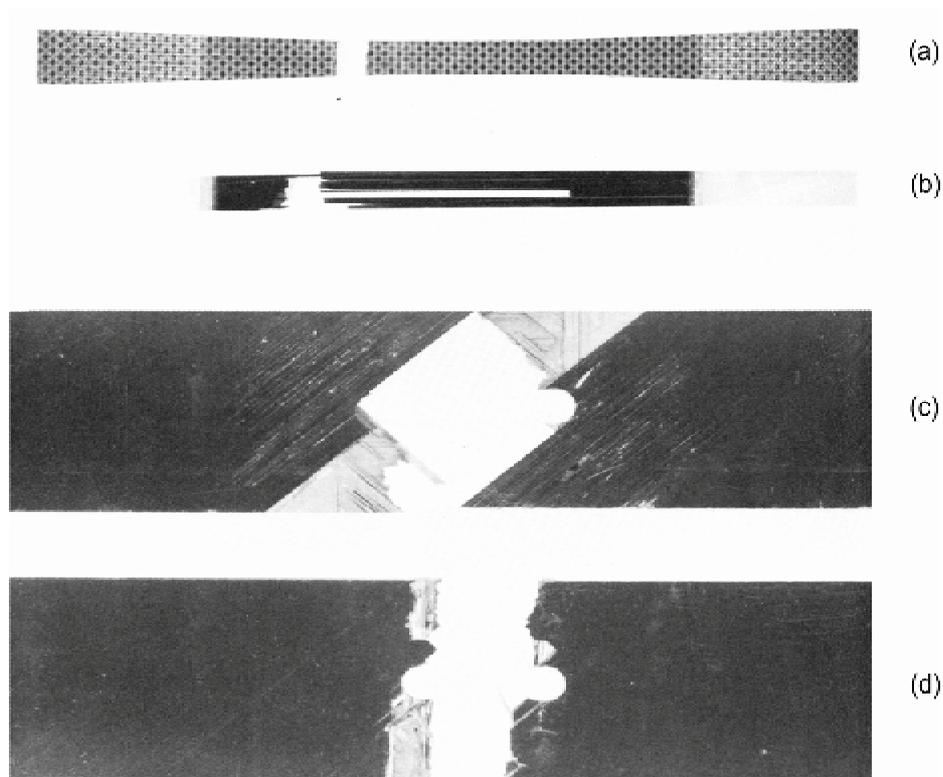


Figure 2 2: Ruptures par traction de différentes séquences d'empilement (a)  $0^\circ/90^\circ$  tissu, (b) Unidirectionnelle, (c) Quasi-isotrope trouée, (d)  $0^\circ/90^\circ$  trouée.

## 3.1 Mécanismes de rupture d'un unidirectionnel

La rupture finale d'un composite unidirectionnel est le résultat de l'accumulation de divers mécanismes élémentaires:

### 3.1.1.1 Rupture des fibres:

Dans un matériau composite unidirectionnel soumis à des sollicitations mécaniques, la rupture des fibres intervient lorsque la contrainte de traction dans une fibre atteint la contrainte à la rupture. La rupture de la fibre produit une concentration de contraintes au voisinage de la rupture, il s'en suit une redistribution de ces contraintes.

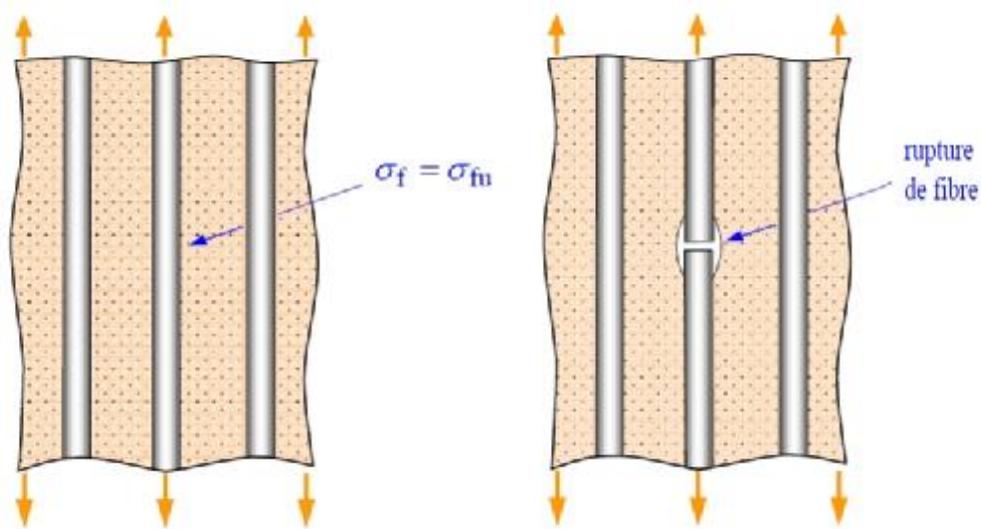


Figure 2 3: Rupture d'une fibre.

### 3.1.1.2 Rupture transverse de la matrice:

L'endommagement transverse de la matrice se produit lorsque la contrainte en traction dans la matrice atteint sa valeur de rupture.

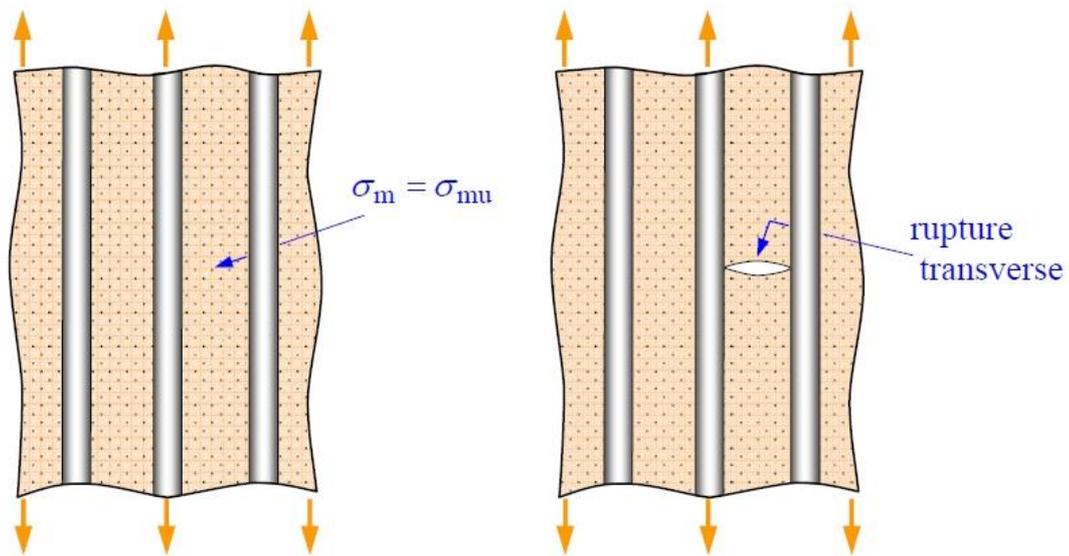


Figure 2 4: Rupture transverse de la matrice.

### 3.1.1.3 Rupture longitudinale de la matrice:

L'endommagement transverse de la matrice se produit lorsque la contrainte de cisaillement dans la matrice atteint sa valeur de rupture.

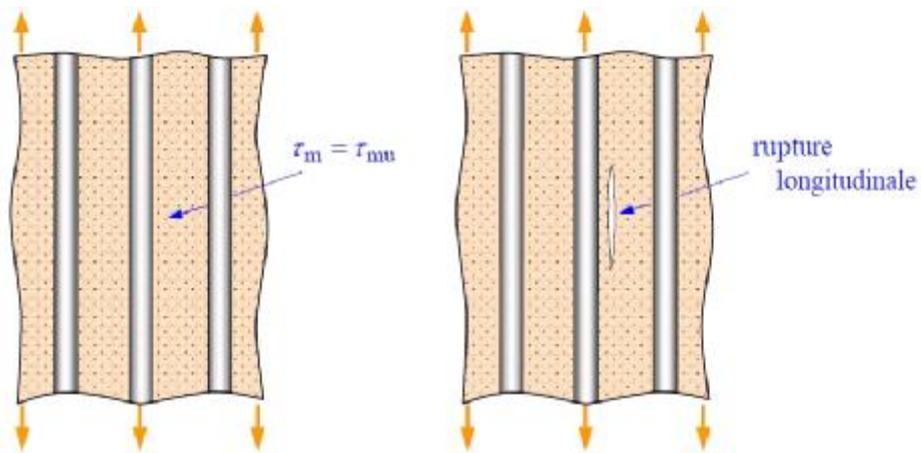


Figure 2 5: Rupture longitudinale de la matrice.

### 3.1.1.4 Rupture de l'interface:

La décohésion de l'interface intervient lorsque la contrainte de cisaillement dans la matrice atteint la contrainte de décohésion, sans qu'elle atteigne la contrainte de rupture en cisaillement de la matrice.

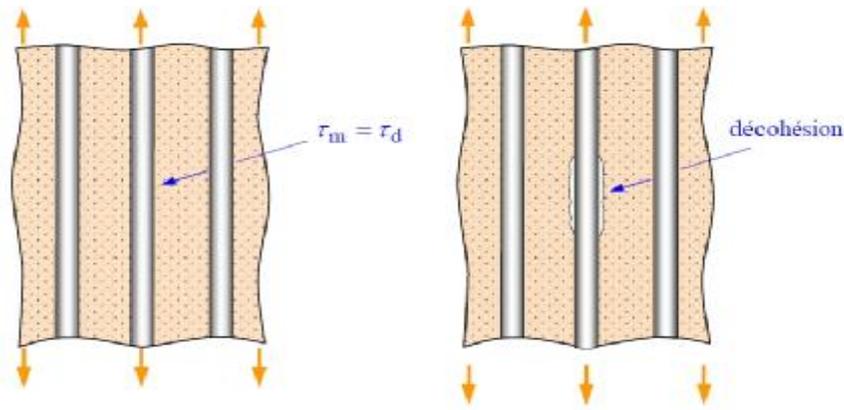


Figure 2 6: Décohésion fibre/matrice.

## 3.2 Rupture des stratifiés

La description de la rupture à l'échelle du pli est très efficace pour le classement des mécanismes de rupture. Les stratifiés à renforts de fibres longues ont trois types de rupture : rupture intralaminare, rupture interlaminare, et rupture translaminare.

### 3.2.1 Rupture intralaminare

La rupture intralaminare est due principalement à la faible résistance de la matrice et de l'adhérence entre la matrice et les fibres. Elle est provoquée par les contraintes dans le plan du stratifié. Un pli se détériore par la contrainte résultante en traction dans la direction normale aux fibres. Ce type de rupture est donc couramment appelée la « fissuration transverse ». Ce type de fissuration de la matrice se produit bien avant la rupture des fibres. [4]

Dans les stratifiés multidirectionnels, la fissuration transverse se présente, en général, successivement du pli le plus faible au plus résistant. Par exemple, la Figure 2-7 présente un stratifié [0/90/+45/-45] d'un graphite/époxy qui subit une traction uniaxiale. La première fissure apparaît dans les plis de 90°. Quand la charge augmente, plus de fissures se développent mais elles restent dans les plis de 90°. Lors que la charge augmente davantage, des fissures se produisent dans les plis adjacents (+45°), puis elles continuent vers les interfaces +45°/-45

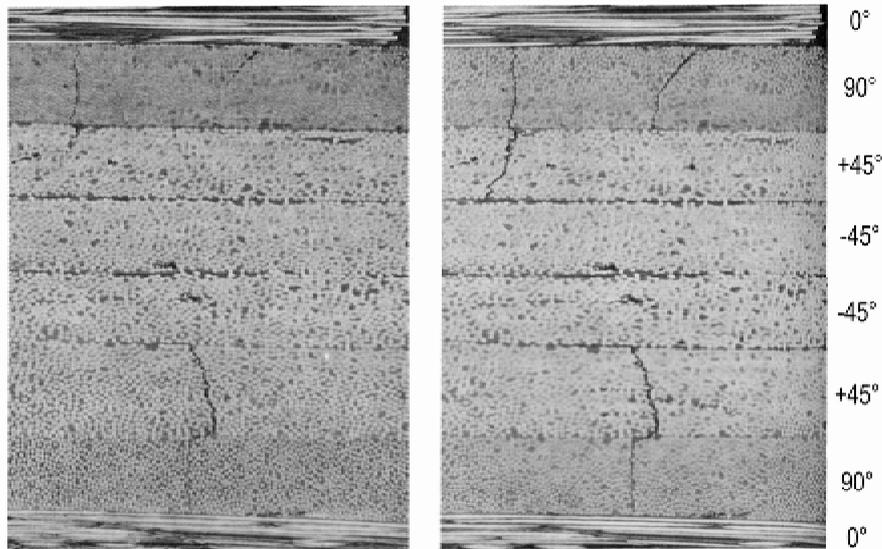


Figure 2 7: Evolution de la fissuration transverse.

Les contraintes intralaminaires et les contraintes interlaminaires ne sont pas deux grandeurs indépendantes parce qu'elles sont couplées par les relations d'équilibre de la pièce sur laquelle elles agissent. Par conséquent, l'apparition de la fissuration transverse peut induire une nouvelle répartition des contraintes et provoquer la rupture interlaminaire. En effet, la rupture intralaminaire et la rupture interlaminaire se produisent souvent dans les stratifiés bien avant la rupture totale de ceux-ci.

### 3.2.2 Rupture interlaminaire

La rupture interlaminaire se produit dans l'interface entre deux plis d'un stratifié. La surface de rupture montre, en général, la rupture de la matrice et la décohésion fibre/matrice. Ces mécanismes impliquent peu de rupture de fibres. Comme pour les matériaux métalliques, la rupture peut être en mode I (ouverture), mode II (glissement droit), mode III (glissement vis), ou une combinaison des trois modes. Bien que le mode III soit moins étudié, un grand nombre d'études décrivent les mécanismes de séparation en mode I et mode II (Figure 2-8).

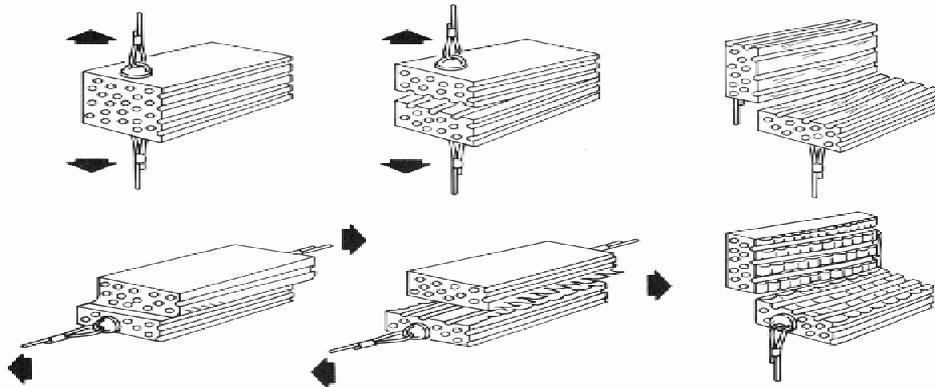


Figure 2 8: Schéma de la rupture interlaminaire (a) Mode I traction, (b) Mode II cisaillement.

Les caractéristiques de la surface de rupture dépendent des types de polymère utilisés. [6]

#### 3.2.2.1 Matrice thermodurcissable:

Pour la plupart des matrices thermodurcissables, la rupture est de type fragile. La surface de rupture présente un plan relativement plat avec peu de marques de la déformation du matériau. La séparation en mode I et mode II est dû au même mécanisme microscopique, à savoir la rupture fragile en traction. La seule différence entre les deux modes est l'orientation de la contrainte principale en traction.

Dans le cas du mode I, le plan de rupture est parallèle au plan de fibres. Le faciès de rupture (Figure 2-9) présente une surface relativement plate de la matrice contenant des « marques de rivière ».

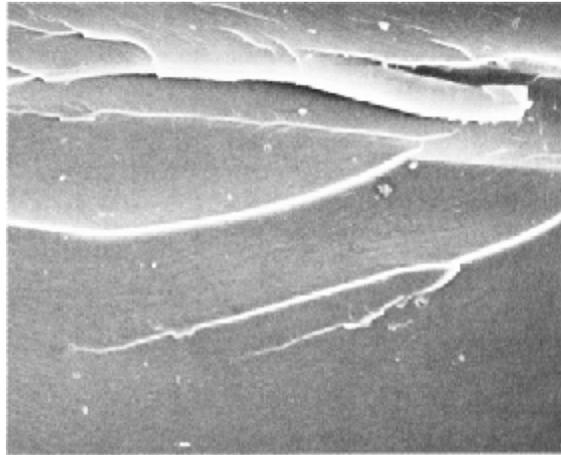


Figure 2 9: Faciès de rupture (mode I).

Sous un chargement en mode II, les deux parties de part et d'autre de la fissure se voient imposer un déplacement relatif dans un même plan. La contrainte principale en traction pour le cisaillement appliqué est donc orientée à  $45^\circ$  du plan de rupture. La rupture fragile de la matrice se produit perpendiculairement à cette contrainte résultante de traction sous la forme d'une série de microfissures inclinées (Figure 2-10).



Figure 2 10: Microfissures orientée à  $45^\circ$  du plan de rupture (mode II).

Pendant le processus de rupture, ces microfissures s'unissent. Une multitude de petites languettes sont formées sur une des surfaces de rupture. Sur la surface opposée, la résine présente des petites zones concaves correspondant aux languettes de la première surface (Figure 2-11). Plusieurs termes ont été utilisés pour décrire ces faciès de rupture. Les termes les plus usités sont les « hackles », qui décrivent les languettes, et les « scallops », qui décrivent les zones concaves.

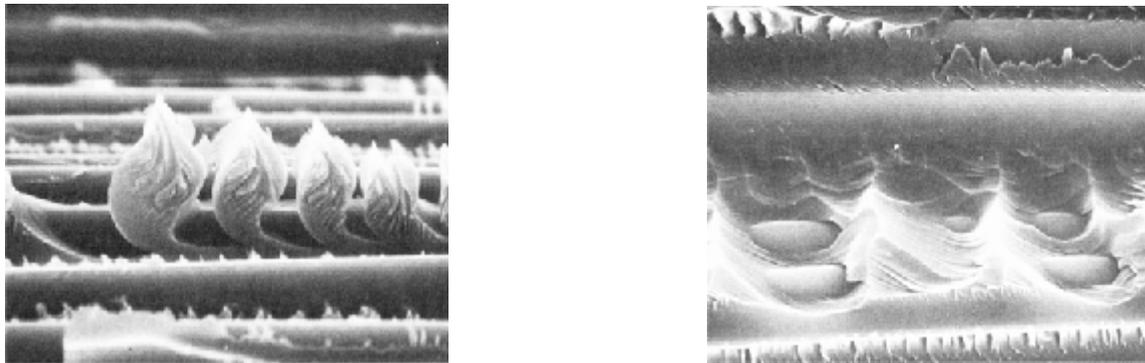


Figure 2 11: Faciès de rupture en mode II (a) Hackles, (b) Scallops.

### 3.2.2.2 Matrice thermoplastique:

Les faciès de rupture des composites à matrice thermoplastique sont notablement différentes de ceux des composites à matrice thermodurcissable discutés précédemment. Les surfaces des deux modes présentent des « pointes » causées par la déformation plastique importante de la matrice (Figure 2-12). La différence principale entre les deux modes est l'orientation des « pointes ». Pour le mode I, elles pointent aléatoirement dans différentes directions. Les crêtes et vallées sont dues à l'arrachage de fibres. Pour la rupture en mode II, les pointes sont orientées parallèlement à la direction de propagation. Il n'y a pas d'indication de la présence des hackles et des scallops comme dans les matrices thermodurcissables.

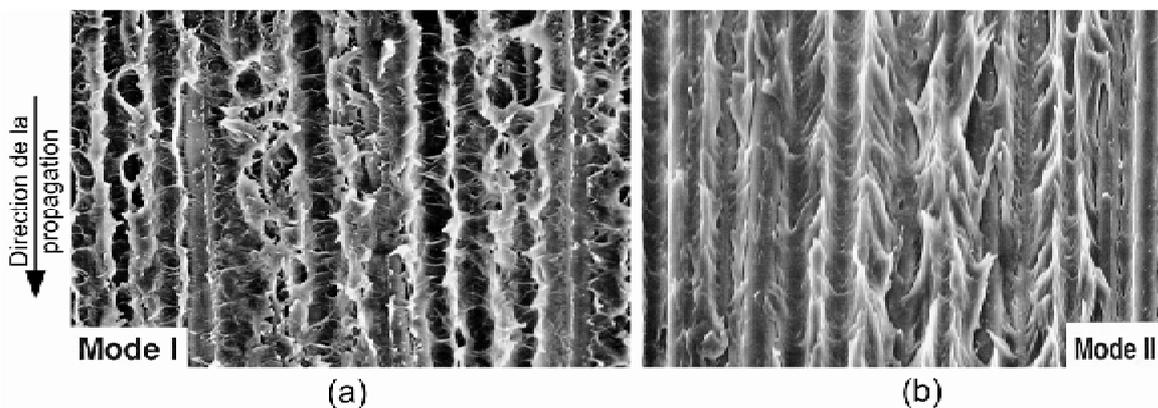


Figure 2 12: Faciès de rupture d'un composite à matrice thermoplastique (a) Mode I, (b) Mode II.

### 3.2.3 Rupture translaminaire

La rupture translaminaire concerne la rupture de fibres. Les surfaces de rupture sont donc généralement marquées par la morphologie rugueuse des bouts de fibres. En effet, la contrainte à rupture des fibres est plus importante que celle de tous les autres constituants d'un stratifié composite. Par conséquent, ce mécanisme de rupture entraîne souvent la rupture totale du stratifié. La rupture translaminaire peut être séparée en deux modes selon les chargements : la rupture par traction et le micro-flambage par compression. La rupture peut être provoquée par un mode individuel ou une combinaison des deux modes

#### 3.2.3.1 Rupture translaminaire en traction:

La rupture fragile des fibres est le mécanisme principal, avec la rupture de la matrice environnante considérée comme secondaire. Les fibres se cassent typiquement par paquets ; les fibres dans chaque paquet ont un plan de rupture commun (Figure 2-13). Différents plans de rupture sont ensuite joints par la décohésion fibres/matrice et par la rupture en cisaillement de la matrice.

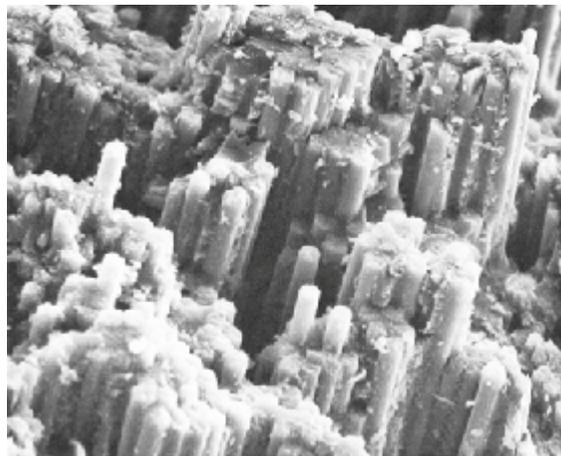


Figure 2 13: Rupture translaminaire en traction d'un graphite/époxy.

### 3.2.3.2 Rupture translaminaire en compression:

Le micro-flambage par compression est le mécanisme principal de ce type de rupture. Les fibres individuelles flambent localement au point où l'instabilité est maximum. Le coude de chaque fibre provoque deux ruptures séparées par une distance de 5 à 10 fois le diamètre de la fibre (Figure 2-14).

La surface de rupture est beaucoup plus plate que celle de la rupture par traction. L'endommagement considérable après rupture est dû au mouvement relatif entre les deux surfaces de rupture en contact (Figure 2-15).

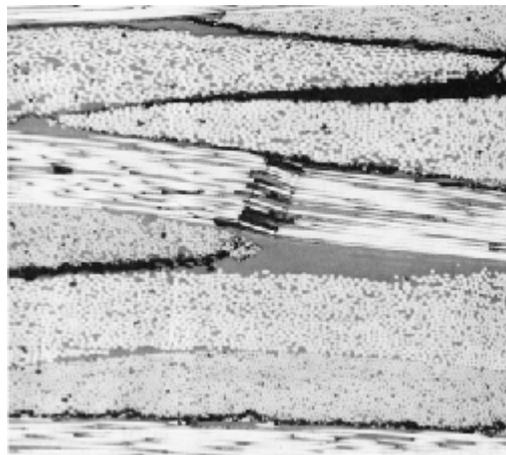


Figure 2 14: Rupture translaminaire en compression par micro-flambage.

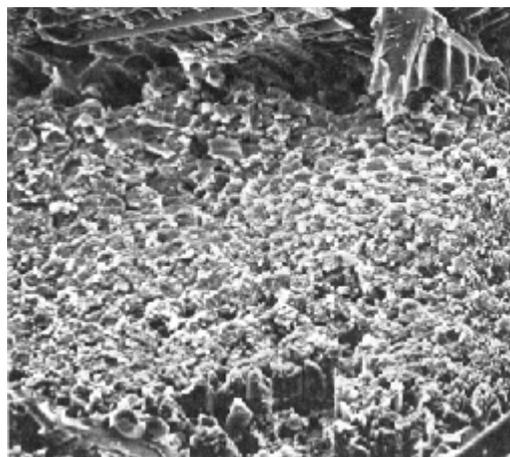


Figure 2 15: Faciès de rupture par micro-flambage.

### 3.2.4 Rupture par délaminage

L'un des avantages majeurs des stratifiés composites à renforts de fibres longues est la capacité d'orienter les fibres de chaque pli afin d'avoir les propriétés, souvent la résistance et la rigidité, appropriées aux chargements dans les directions prévues. Par exemple, une plaque stratifiée peut avoir une rigidité en traction dans une direction deux fois supérieure à celle dans une autre direction. Malgré d'excellentes propriétés dans le plan, les stratifiés présentent un problème propre aux matériaux réalisés par stratification : la rupture interlaminaire. Ce mécanisme de rupture se caractérise par un décollement ou une décohésion entre les plis du stratifié. Il est couramment appelé le « délaminage ». [5]

#### 3.2.4.1 Phénomènes physiques du délaminage:

Un stratifié soumis à un chargement présente différentes étapes de dégradation. Dans le scénario d'évolution des défauts le plus « classique », la matrice et l'interface fibre/matrice sont les premières à se détériorer (Figure 2-16-a). Les premiers défauts sont donc la microfissuration de la matrice et la décohésion fibre/matrice à l'échelle microscopique. Ensuite, ces défauts s'agrandissent de façon stable à l'échelle du pli par coalescence (Figure 2-16-b), les micro-défauts se rejoignent pour former des fissurations transverses. Les fissures transverses peuvent parvenir à l'interface des plis et provoquer le délaminage sous l'effet des contraintes interlaminaires (Figure 2-16-c). Ces défauts et leur évolution dépendent de l'empilement, du nombre de plis, du chargement, et de la taille et de la forme de la structure considérée.

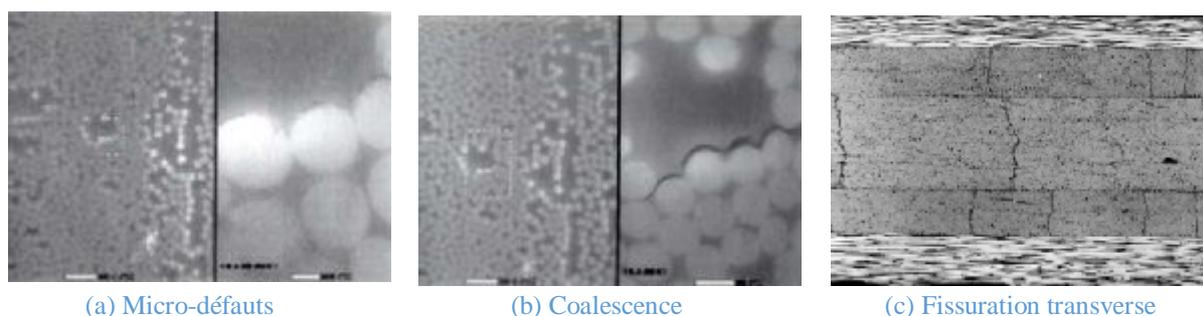


Figure 2 16: Evolution de défauts.

Les micro-mécanismes principaux de l'endommagement qui accompagnent un délaminage sont présentés schématiquement dans la Figure 2-17. Ils incluent :

- Zone endommagée : La forte concentration de contraintes autour de la pointe de fissure provoque une zone endommagée où se trouvent la déformation plastique et/ou des microfissures de la matrice.

- Fissures latérales : Après le passage de la fissure, les microfissures dans la zone endommagée peuvent se transformer en des fissures latérales de la matrice autour du plan de délaminage
- Pontage de fibres : La présence de fissures au dessus ou en dessous du plan de délaminage facilite la création de ponts de fibres reliant les deux surfaces délaminées. Certains ponts de fibres se rompent pendant l'avancée du délaminage.

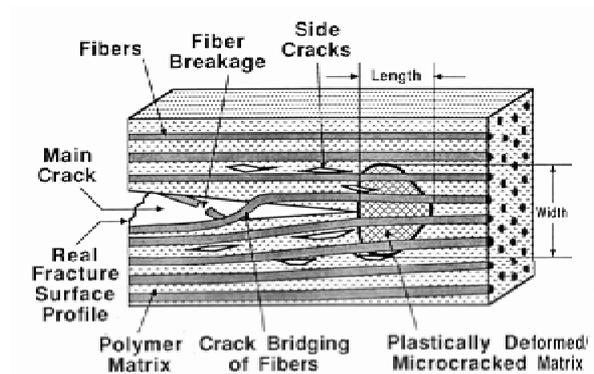


Figure 2 17: Mécanismes de l'endommagement accompagnant le délaminage.

### 3.2.4.2 Origines du délaminage:

La cause de délaminage peut être attribuée, en termes généraux, à l'existence des contraintes interlaminaires. Ces contraintes entre plis peuvent être critiques dans les zones suivantes :

#### 3.2.4.2.1 Défauts de fabrication

Des défauts internes au sein de stratifié tels que des micro-vides ou des impuretés peuvent survenir lors de sa fabrication. Même sous des chargements dans le plan, les contraintes interlaminaires se développent dans les champs de contraintes à ces sites à cause des discontinuités locales [3]

<b>Etape</b>	<b>Type de problème</b>
<b>Conception</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cahier des charges</li> <li>• Manque de calculs, anisotropie...</li> <li>• Dimensionnement insuffisant</li> <li>• Assemblage</li> <li>• Vibration, usure</li> <li>• Mauvaise prise en compte de l'environnement</li> </ul>
<b>Mise en œuvre</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Défauts de fabrication moule et outils</li> <li>• Défauts d'injection des thermoplastiques</li> <li>• Défauts d'extrusion des thermoplastiques</li> <li>• Défauts de peinture</li> </ul>
<b>Mise en œuvre particulière</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fabrication de produits moussés</li> </ul>
<b>Traitement de surface</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Traitement anti-adhérent de l'usage des silicones</li> </ul>
<b>Facteurs humains et économiques en exploitation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Augmentation des cadences</li> <li>• Problèmes liés à un poste de travail</li> </ul>
<b>Stockage/transport</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conditions climatiques</li> <li>• Humidité</li> <li>• Vibration</li> </ul>

Tableau 2 1: Types de problèmes rencontrés selon l'étape d'élaboration d'une pièce en composite.

### 3.2.4.2.2 Bord libre

En ce qui concerne les stratifiés composites multidirectionnelles, les contraintes interlaminaires se développent à cause de la discontinuité de comportement mécanique entre les plis individuels. Par exemple, un stratifié [45/-45/-45/45] sous un chargement de traction simple présente une contrainte interlaminaire au voisinage des bords de l'éprouvette qui devient singulière aux bords libres (Figure 2-18). Par conséquent, ce phénomène est nommé « l'effet de bord libre ». L'intensité de cet effet dépend fortement de la séquence d'empilement des stratifié.

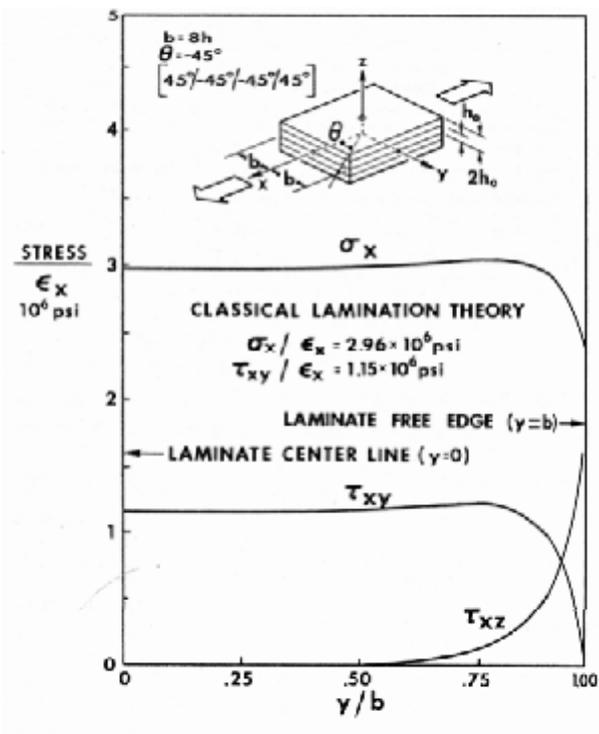


Figure 2 18: Evolution des contraintes dans la largeur de l'éprouvette [45/-45/-45/45].

### 3.2.4.2.3 Applications structurales

L'utilisation des pièces composites dans une structure nécessite des formes spécifiques et des moyens de les assembler avec les autres éléments. La Figure 2-19 présente cinq zones assez courantes des pièces structurales qui présentent une discontinuité locale.

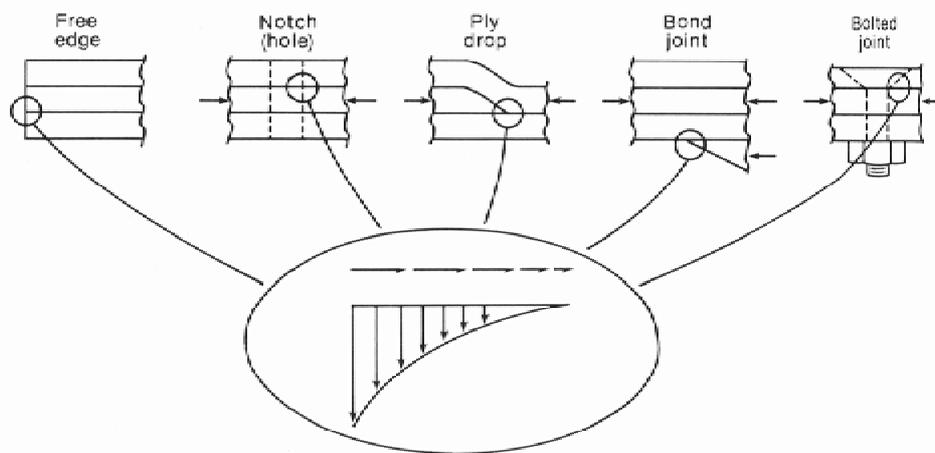


Figure 2 19: Sources des contraintes interlaminaires dans les pièces structurales.

### 3.2.4.2.4 Impact

Une structure peut subir des impacts d'objets en service ou pendant la maintenance (une chute d'outil par exemple). En général, un choc à basse vitesse sur un stratifié composite ne laisse pas de traces apparentes dans la surface, mais entraîne des ruptures importantes de la matrice à l'intérieur de celui-ci. Lors de l'impact, les contraintes de cisaillement entre les plis provoquent également des délaminages. L'enveloppe de dommages qui en résulte est typiquement de forme conique (Figure 2-20)

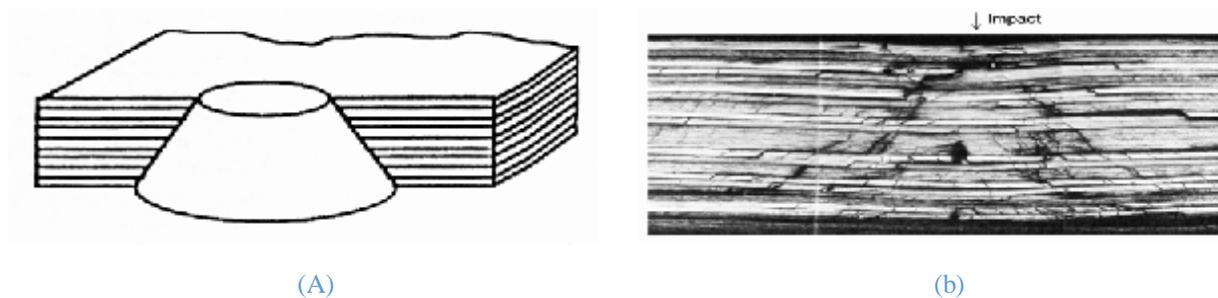


Figure 2 20: Enveloppe conique de dommage par impact (a), (b) Section transversal d'un stratifié après impact.

A l'exception de l'impact balistique, la majorité de l'endommagement se produit dans la matrice. La résistance en traction dans le plan du stratifié ne serait donc pas dégradée considérablement. Cependant, les délaminages diminuent significativement la stabilité en compression du stratifié. Il peut donc subir des flambages locaux qui entraînent la propagation des délaminages ou le flambage global qui conduit à la rupture finale.

En résumé la figure (2-21) regroupe tous les cas d'endommagements que peu subir un stratifié.

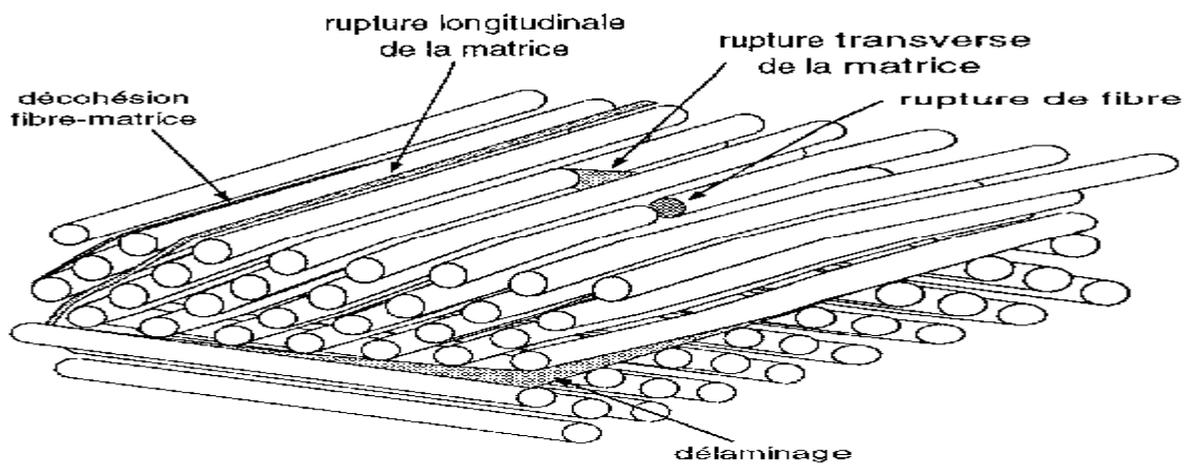


Figure 2 21: Mécanismes de rupture dans un stratifié.

## 4. Conclusion

Nous avons, à travers ce chapitre, décrit et énuméré les différents modes et types de rupture que peut subir un stratifié, ainsi que les unidirectionnels qui le composent. Nous avons aussi approfondi notre recherche en ce qui concerne un type bien précis d'endommagement qui est le délamination; ce défaut a tendance à se produire entre deux couches successives d'unidirectionnels.

Nous allons dans le chapitre suivant nous intéresser aux différents moyens de détection de ces endommagements. Les méthodes en question sauvegardent l'intégrité de la structure étudiée, elles sont regroupées sous le nom de "contrôles non destructifs" CND.

# *Chapitre III: Recherche* *bibliographique*

# 1. Introduction

La capacité à contrôler une pièce mécanique sans l'abimer, ce qui n'était qu'un souhait il y a quelques décennies, est devenu aujourd'hui une réalité.

Il est possible d'effectuer le contrôle non destructif d'un nombre toujours croissant de produits industriels en recourant à des procédés désormais bien connus (ressuage, magnétoscopie, ultrasons par exemple) ou au contraire en pleine évolution (émission acoustique par exemple).

Nous allons dans ce chapitre présenter de manière synthétique les principes des procédés les plus usuels en milieu industriel pour la détection de défauts dans les composites ainsi que leur mise en œuvre.

## 2. Définition

L'appellation Contrôles non destructifs fait naturellement penser au diagnostic appliqué aux pièces mécaniques qui consiste à mettre en œuvre des méthodes d'investigation pour permettre d'apprécier sans destruction, l'état de santé des pièces et de formuler un avis sur leur aptitude à remplir la fonction à laquelle elles sont destinées. Considérée sous cet aspect d'aptitude au bon fonctionnement, la définition suppose une bonne connaissance de tous les phénomènes mis en jeu, en particulier de la nocivité des défauts, de leur évolution dans le temps, des lois générales de la mécanique de la rupture. [5]

## 3. Méthodes de contrôle non destructif

Les principales méthodes de contrôles non destructifs (CND) dites classiques utilisées dans l'analyse de défaillances dans les pièces en matériaux composites se résument à:

- Contrôle visuel.
- Contrôle par ressuage.
- Contrôle par shearographie.
- Contrôle par radiographie.
- Contrôle par ultrasons.
- Contrôle par thermographie infrarouge.

### 3.2 L'examen visuel

L'examen visuel consiste à examiner une structure à l'œil ou à l'aide d'une loupe de poche. Cette méthode permet de mettre en évidence les défauts superficiels et les défauts internes en cas de structures transparentes.

C'est une technique de contrôle non destructif très simple de mise en œuvre mais très riche d'enseignements car elle va nous permettre de préciser le mécanisme mis en jeu dans toutes les autres techniques. Il est également important de noter qu'une évolution se manifeste actuellement pour traduire les résultats d'un contrôle sous la forme d'une image numérisée et que les capteurs de mesure font de plus en plus appel à des systèmes "optoélectriques" mettant en jeu la conversion de photons en électrons.

On retrouve trois phases essentielles dans le cadre de l'examen visuel:

- La phase d'excitation : qui consiste à produire un faisceau lumineux.
- La phase de perturbation: qui consiste à placer la pièce dans le champ optique du faisceau et rechercher son orientation la plus favorable pour la mise en évidence d'éventuels défauts de surface.
- La phase de révélation: qui consiste à placer l'œil dans le champ du faisceau réfléchi par la surface de la pièce.

### 3.3 Le ressuage

Le ressuage est un terme qui désigne l'extraction d'un fluide d'une discontinuité dans laquelle il s'était préalablement accumulé au cours d'une opération d'imprégnation. Le contrôle par ressuage est utilisé pour déceler les défauts qui débouchent à la surface d'une pièce. Essuyage et dégraissage de la surface de la pièce à contrôler. Les étapes de la méthode sont:

- Immersion dans le produit pénétrant ;
- Rinçage de l'excès de produit puis séchage ;
- Application du révélateur qui a pour fonction d'absorber le pénétrant restant dans les défauts de surface ;
- En cas d'utilisation de produits fluorescents, révélation à l'aide d'une lampe à ultraviolets.

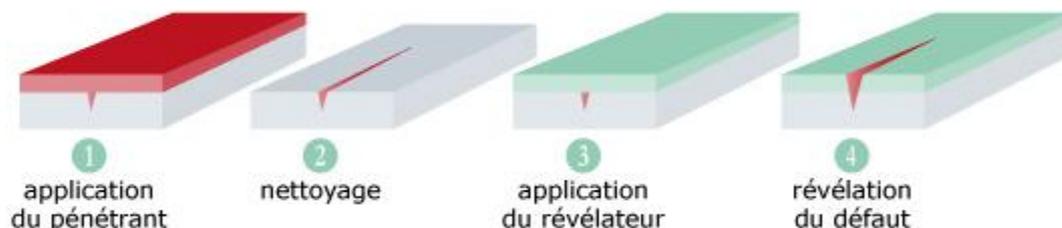


Figure 3 1: Schéma de la méthode du ressuage.

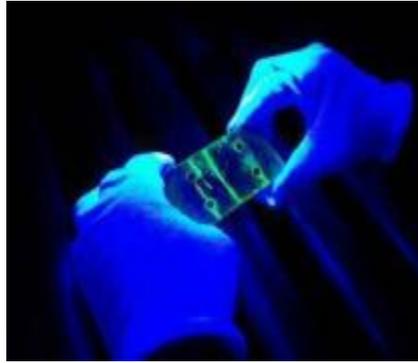


Figure 3 2: Apparition de défauts par ressuage.

La méthode est très simple de mise en œuvre, elle permet une localisation précise des défauts et une appréciation de leurs longueurs. La limite de cette technique est qu'elle ne permet de voir que les défauts débouchant à la surface de la pièce. [6]

### 3.4 Les ultrasons

Le contrôle ultrasonore est basé sur la propagation de faisceaux ultrasonores dans un matériau et sur l'évaluation des défauts provenant des perturbations du signal à la surface du défaut. La méthode la plus classique pour effectuer un contrôle ultrasonore utilise des traducteurs mono-élément.

Un système ultrasonore typique est constitué d'un poste ultrasonore qui émet et reçoit des impulsions électriques d'un transducteur piézo-électrique qui convertit l'énergie acoustique en énergie électrique et inversement. Le contrôle ultrasonore mono-élément peut être effectué selon deux techniques différentes, soit en échographie, soit par transmission. [5]

Dans le cas d'un contrôle ultrasonore par échographie, le transducteur émet et reçoit des ondes ultrasonores qui se réfléchissent soit sur le fond de la pièce, soit sur un défaut. En présence d'un défaut, une partie du faisceau ultrasonore est réfléchi sur le défaut et génère un signal électrique qui se traduit par l'apparition d'un écho supplémentaire [6]

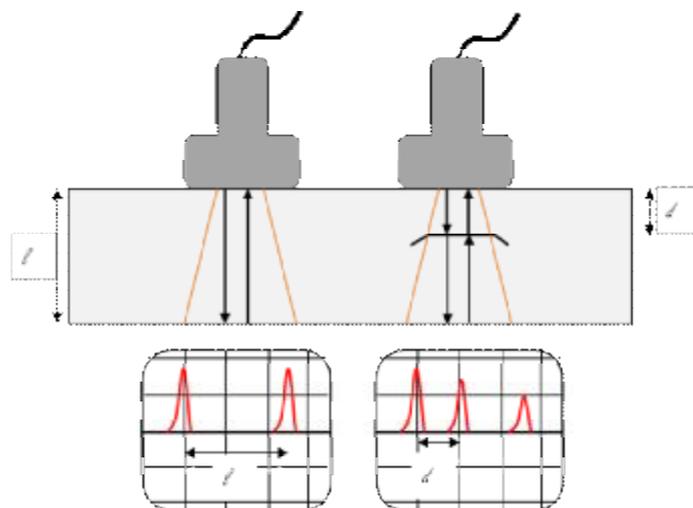


Figure 3 3: Contrôle ultrasonore par échographie. Gauche : zone saine ; droite : zone défectueuse.

Cette technique permet la détection des défauts localisés dans un volume de la pièce et présente une grande sensibilité, seulement, l'interprétation de la nature et de ces dimensions nécessite du personnel de grande expérience.

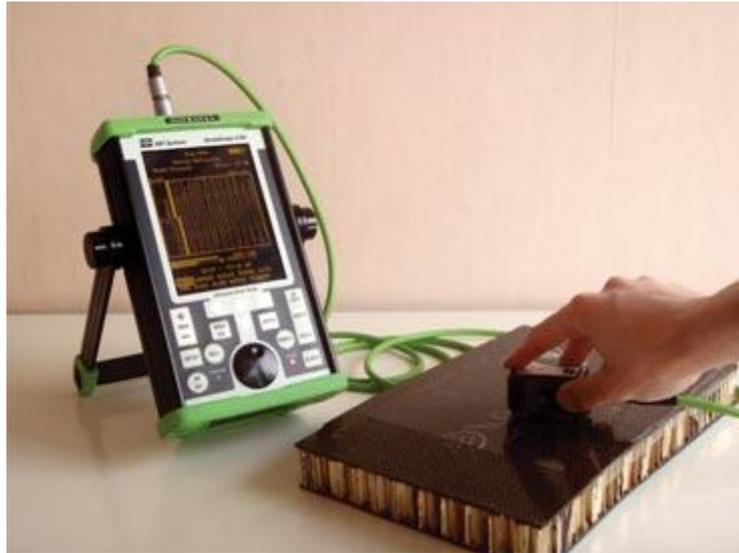


Figure 3 4: Méthode ultrasonore appliquée aux composites.

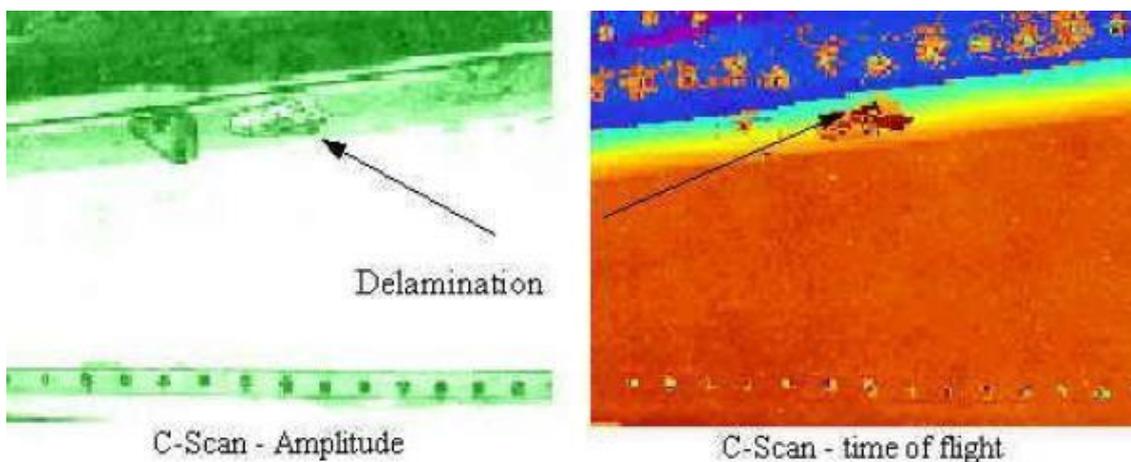


Figure 3 5: Scan obtenu par méthode ultrasonore de voilure d'un Falcon 10

### 3.5 La shearographie

La shearographie est une méthode interférométrique utilisant la lumière laser comme source lumineuse. Le gradient du déplacement de la surface provoquée par la mise sous contraintes de la pièce est mesuré puis analysé et présenté sous forme d'une cartographie des déformations de la surface. Cette cartographie est le résultat de la comparaison d'images obtenues par mesure des variations géométriques à la surface des échantillons sous test à différents intervalles de temps.

Les contraintes appliquées peuvent être thermiques, vibratoires ou pneumatiques (dépression). [6]

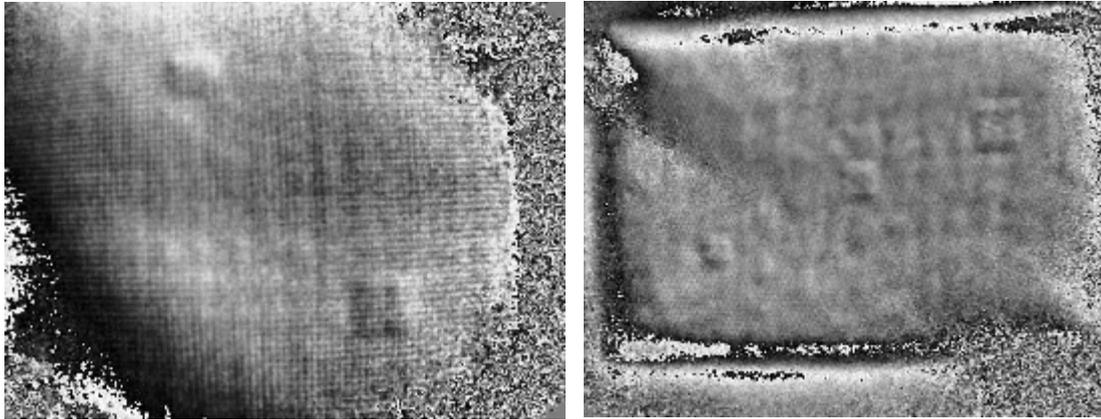


Figure 3 6: Contrôle shearographique d'une structure composite monolithique (a) et en nid d'abeille (b)

### 3.6 La thermographie

La thermographie infrarouge est basée sur la mesure du flux thermique ou rayonnement électromagnétique émis par une pièce dans l'infrarouge. Ce flux est directement proportionnel à la température de surface de la pièce au facteur d'émissivité près. Ainsi, à l'aide d'une caméra infrarouge, une représentation thermique de la pièce peut être reconstituée. La méthode thermographique la plus utilisée pour le contrôle de structures aéronautiques consiste à appliquer une impulsion thermique externe au matériau. Les défauts sont alors mis en évidence par l'étude de la propagation du flux thermique.

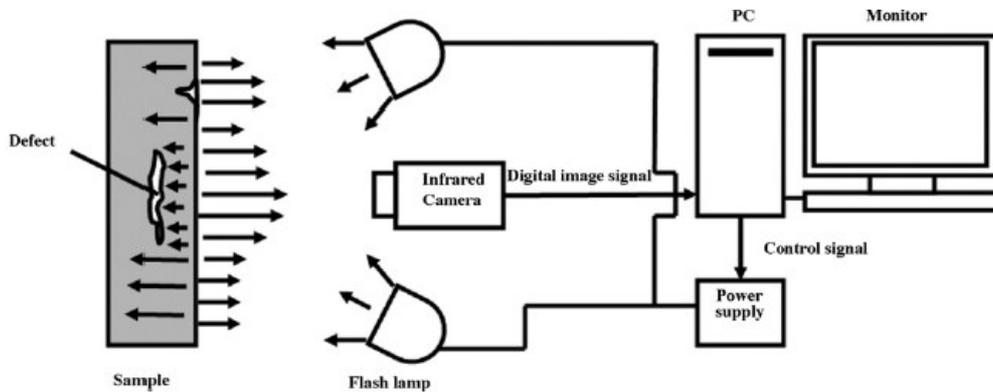


Figure 3 7: Schéma de montage de la thermographie.

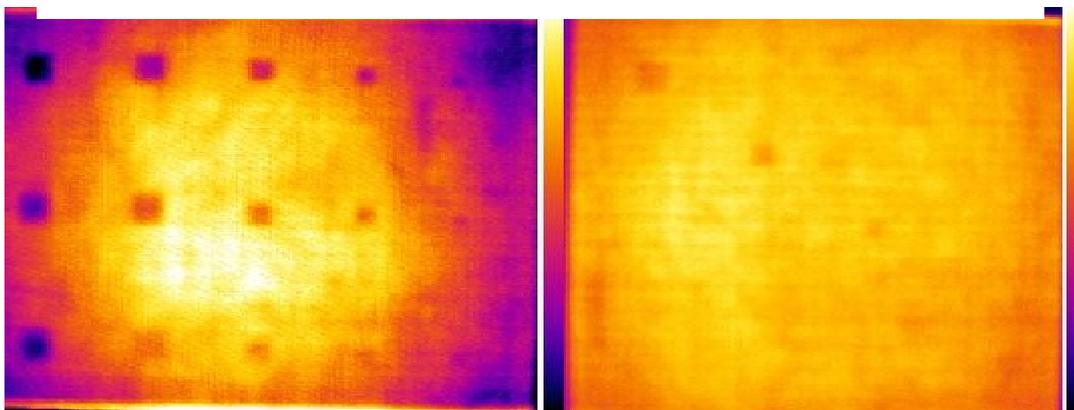


Figure 3 8: Scan par thermographie.

### 3.7 Radiographie

La structure interne du matériau est mise en évidence en soumettant la pièce à contrôler au rayonnement X. on est ainsi en mesure d'observer d'éventuels défauts. Cette technique est particulièrement adaptée pour mettre en évidence les défauts placés dans le plan du faisceau de rayons X (fissures, vides...) ce qui la rend moins sensible pour les défauts de délaminage. [5]

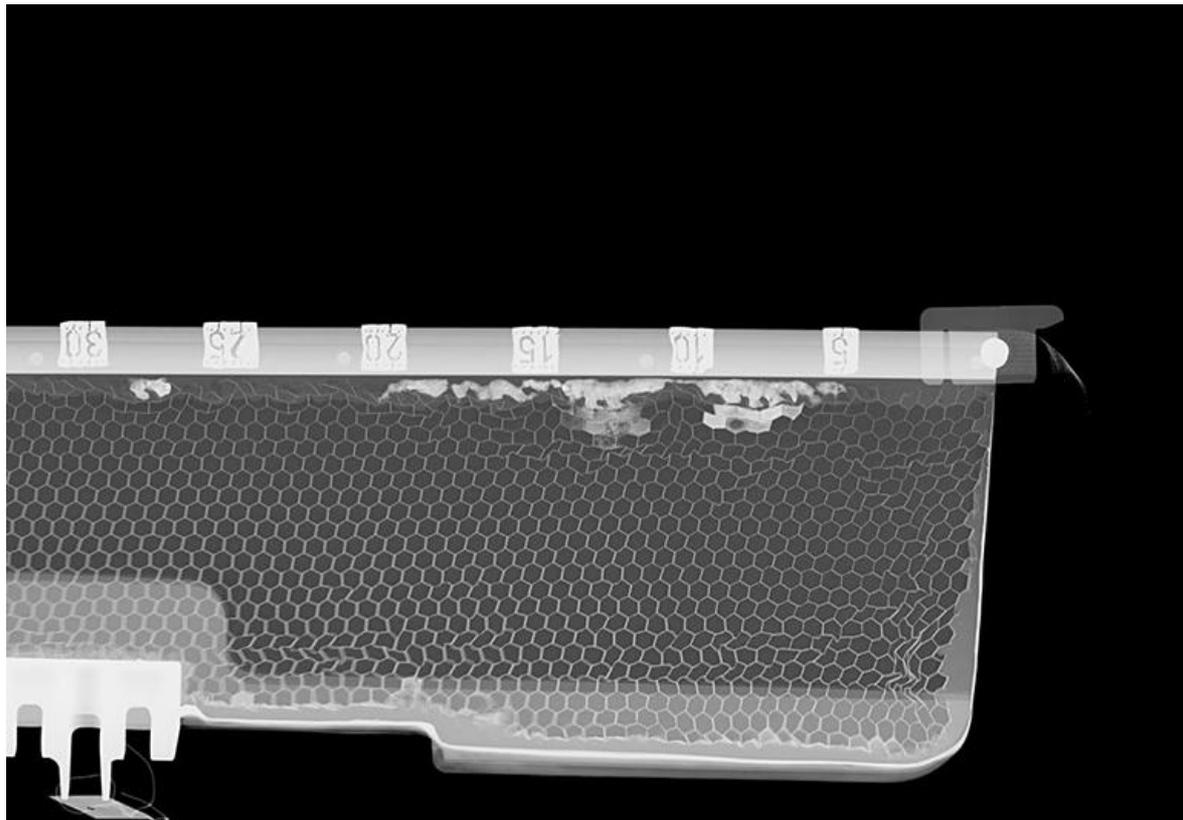


Figure 3 9: Scan d'une pièce en composite par radiographie.

### 3.8 Potentialités et limites des CND

Méthodes CND Type de défauts		Examen visuel	Ressuage	Ultrasons (attén.transm.)	Ultrasons (attén.réflexion)	Ultrasons (mesure de vitesse)	Radiographie	Thermographie
Vide (bulle d'air, manque d'une couche...)	à la surface	BS	BS	BS	AL	/	SM	SM
	près de la surface	AL	FS	BS	AL	/	SM	SM
	en profondeur	FS	FS	BS	BS	SM	SM	AL
Microporosité	près de la surface	AL	FS	BS	AL	/	SM	SM
	en profondeur	FS	FS	BS	BS	SM	SM	AL
Inclusion	près de la surface	AL	FS	SM	AL	/	SM	SM
	en profondeur	FS	FS	SM	BS	/	SM	AL
Contamination		/	/	/	/	/	BS	/
Polymérisation		/	/	AL	AL	SM	/	/
Délaminage (parallèle à la surface)	près de la surface	AL	BS	BS	AL	/	FS	BS
	en profondeur	AL	BS	BS	BS	/	FS	SM
Fissures de matrice (perpendiculaire à la surface)	à la surface	AL	BS	SM	AL	/	BS	SM
	près de la surface	/	BS	SM	SM	/	BS	SM
	en profondeur	/	AL	SM	SM	/	BS	/
Orientation des fibres		AL	/	AL	AL	SM	BS	/
Rupture des fibres		/	/	AL	AL	/	SM	/
Décollement fibre/matrice		AL	AL	AL	AL	AL	AL	/
Variation du taux de fibres		/	/	AL	AL	SM	BS	/
Variation d'épaisseur		SM	/	SM	SM	BS	BS	/
Présence d'humidité		/	/	AL	AL	AL	BS	SM
Impact		AL	/	BS	BS	FS	FS	BS
Manque d'adhésif		AL	BS	BS	BS	/	AL	BS
Porosité dans l'adhésif		/	/	BS	BS	/	AL	/
Variation épaisseur d'adhésif		/	/	AL	SM	/	BS	/
Film de protection restant		/	/	BS	BS	/	AL	/
Découlement peau/peau		AL	/	BS	SM	/	SM	BS

Tableau 3 1: Potentialités et limites des CND. / BS : Bonne Sensibilité ; SM : Sensibilité Moyenne ; FS : Faible sensibilité ; AL : Application Limitée.

Le tableau 3.1 nous donne un aperçu sur les potentialités et les limites des différentes méthodes de contrôle non destructif (CND).

### 3.9 Le contrôle continu de l'état de la structure

Les méthodes de détection de l'endommagement ont contribué de manière significative au développement de la SHM (Structural Health Monitoring). L'endommagement de la structure peut maintenant être défini comme étant un changement introduit au système, ce qui affecte ses performances présentes et futures (*Doebling et al.*) [7]. Un système de classification de détection de l'endommagement a été introduit par *Rytter* en 1993 [8] qui inclut 4 niveaux :

- Niveau 1 : détermination de l'existence de l'endommagement dans la structure.
- Niveau 2 : détermination du type d'endommagement et de sa localisation.
- Niveau 3 : quantification de la sévérité de l'endommagement.
- Niveau 4 : prédiction de la durée de vie en service restante, en se basant sur le suivi de l'endommagement et des conditions de service.

Le développement typique du diagnostique de l'endommagement, est le fruit d'une collaboration entre des domaines multidisciplinaires, tels que la technologie des capteurs, les matériaux intelligents, le traitement du signal, les systèmes intégrés, l'interprétation des données...etc.

Les méthodes de détection basées sur des données vibratoires tiennent une part importante de la recherche dans le domaine de la SHM ces dernières années. Le nombre important d'articles présentés, dans les conférences dédiées à la SHM, montre qu'une multitude de techniques d'acquisition de données et d'algorithmes de diagnostique ont été développés, et que plusieurs techniques ont des applications réelles dans les structures du génie civil, l'aéronautique, les plateformes pétrolières offshore et les pipelines ainsi que dans l'aérospatial.

## 4. Méthodes basées sur les données vibratoires

La détection d'endommagements dans les structures par la variation des paramètres dynamiques, a reçu l'attention considérable des industries de mécanique, aérospatiales, de génie civil, .... L'idée générale est que la variation des propriétés physiques (raideur, masse et amortissement) entraîne une variation des caractéristiques dynamiques de la structure (fréquences de résonances, amortissements modaux et vecteurs propres). La présence d'endommagement cause une diminution de la rigidité de la structure, c'est-à-dire une augmentation de sa flexibilité.

La vibration se réfère usuellement à un mouvement périodique dans le domaine élastique de la structure autour d'une position d'équilibre. Le fondement des méthodes basées sur des données vibratoires est que l'endommagement altère la raideur, la masse ou l'amortissement de la structure, ce qui affecte la réponse dynamique de cette dernière, comme les fréquences naturelles, déformées propres et les coefficients d'amortissement. Donc, intuitivement, ce changement dans les propriétés dynamiques est utilisé pour localiser et quantifier l'endommagement dans la structure.

## 4.1 Fréquences naturelles

De tous les paramètres dynamiques, les fréquences naturelles sont les plus faciles à mesurer. La consultation des changements de fréquences naturelles pour la détection d'endommagement était l'approche primordiale dans les méthodes basées sur les données vibratoires pendant des décennies, où l'analyse modale expérimentale n'était pas encore établie, l'inspection de changement de fréquences naturelles, passionnait la plupart des recherches dans le domaine.

Le sondage systématique du changement des fréquences naturelles, dans la détection d'endommagement, peut être accordé à *Adams et al.* [9] en 1978 et *Cawley et Adams* [10] en 1979. En partant du principe que le changement de raideur est indépendant de celui des fréquences, le rapport de changement de fréquences en deux modes est fonction seulement de la localisation de l'endommagement. Des expériences ont été faites sur une plaque d'aluminium avec un défaut sous forme d'un trou rectangulaire, et sur une plaque composite en polymère renforcé de fibres de carbone, avec des défauts sous formes de fissures et d'écrasement. Avec un modèle éléments finis, de bons résultats furent obtenus en localisant l'endommagement sur la plaque d'aluminium, par contre, pour la plaque composite les résultats n'étaient pas concluants.

En 1990, *Stubbs et Osegueda* [11] [12] ont développé une approche de détection de l'endommagement, à partir du changement de fréquences naturelles, qui est basée sur le critère de *Cawley-Adams*. En 1994, *Friswell et al.* [13] ont aussi développé ce critère en introduisant des analyses statistiques sur les scénarios d'endommagement.

Cependant, comme mentionné par *Doblin et al.* [7] et *Friswell et Penny* [14], l'identification de l'endommagement en utilisant le changement de fréquences naturelles seul a des limitations pratiques dans certaines applications. Par exemple, le changement de fréquences est plus affecté par la température et l'humidité que par l'endommagement dans l'inspection des ponts (*Ferrar et al.*) [15].

En outre, les fréquences naturelles nous informent sur la nature globale de la structure, mais elles sont insensibles aux endommagements naissants, plus spécialement quand ces derniers sont situés dans une région à faibles contraintes.

En 1994 *Armon et al.* [16] ont proposé un classement par rang des modes en changement de fréquences pour détecter les fentes et les fissures dans une poutre, et ils ont démontré que la méthode est efficace même en prenant en considération les erreurs expérimentales et les incertitudes sur le model.

*Messina et al* en 1998. [17] ont développé un algorithme appelé « Damage Location Assurance Criterion (DLAC) ». L'indicateur DLAC est calculé à partir du vecteur de changement de fréquences expérimental et du vecteur de changement de fréquences théorique dans la région du présumé endommagement. La localisation de l'endommagement est obtenue en comparant les modèles de changement de fréquences. Plus tard, *Messina et al.* [18] ont généralisé l'approche pour des endommagements multiples (MDLAC), en incorporant les déformées propres aux fréquences. Le DLAC a pour expression:

$$DLAC_j = \frac{|\Delta\omega_j^T \delta\omega_j|^2}{(\Delta\omega_j^T \Delta\omega_j)(\delta\omega_j^T \delta\omega_j)} \quad (3.1)$$

Avec:

$$\Delta\omega = \frac{\omega_s - \omega_e}{\omega_s} \quad (3.2)$$

$\omega_s$ : pulsation propre de la poutre saine.

$\omega_e$ : pulsation propre de la poutre endommagée.

*Nicholson et Alnefaie* [19] ont introduit, en 2000, un autre paramètre sensible à l'endommagement nommé l'indice du moment modal (Modal Moment Index MMI), qui extrait des paramètres modaux expérimentaux. L'indice a un changement brusque à l'endroit de l'endommagement et peut servir à le quantifier.

Durant la même année, *Chaudhari et Maiti* [20] ont utilisé la technique Frobenius qui gouverne des équations différentielles, et ont obtenu ainsi la localisation du défaut par une approche semi-numérique, tandis que *Chinchalkar* [21] a fait recours à la méthode des éléments finis pour modéliser une modification du premier ordre du problème aux valeurs propres.

*Jones et Turcotte* [22] ont pris les fréquences d'anti résonance dans un model éléments finis pour détecter les endommagements.

Durant l'année 2002, *Palacz et Krawczuk* [23] ont comparé différentes méthodes, basées sur les données vibratoires, incluant le critère de *Cawley-Adams*, pour la détection d'endommagement sur des poutres fissurées, ils indiquent dans leur travail que le changement dans les deux premières fréquences sans erreurs de mesure, et les quatre premières fréquences avec erreurs de mesure peuvent détecter avec succès la position et la profondeur de la fissure.

*Moser et al.* (2011) [24], ont étudié l'effet des conditions environnantes sur le changement de fréquences naturelles, ils ont, de la sorte, pu rendre les fréquences naturelles plus efficaces dans la détection d'endommagement.

## 4.2 Déformées propres

Les déformées propres sont les descriptions spatiales des amplitudes à chacune des fréquences de résonance. Le MAC (Modal Assurance Criterion), et les variantes qui lui sont reliées, a été développé durant les dernières décennies, comme un indicateur pour explorer l'information modale spatiale (*Allemang*) [25]. L'expression de l'indicateur MAC s'écrit :

$$MAC_{ij} = \frac{|\sum_{k=1}^n [\phi_s]_k^i [\phi_e]_k^j|^2}{\sum_{k=1}^n ([\phi_s]_k^i)^2 \sum_{k=1}^n ([\phi_s]_k^j)^2} \quad (3.3)$$

*West* [26] est probablement le premier à avoir proposé une investigation systématique en utilisant le MAC comme indicateur statistique, qui fait la corrélation entre les déformées propres d'une structure saine et une autre endommagée sans passer par la méthode des éléments finis. Un autre critère largement utilisé est le COMAC (Coordinate Modal Assurance Criterion), qui fait l'identification des coordonnées où un ensemble de deux vecteurs propres ne se correspondent pas (*Lieven et Ewins*) [27]. Le COMAC s'écrit :

$$COMAC_{ij} = \frac{|\sum_{k=1}^m [\phi_s]_k^i [\phi_e]_k^j|^2}{\sum_{k=1}^m ([\phi_s]_k^i)^2 \sum_{k=1}^m ([\phi_s]_k^j)^2} \quad (3.4)$$

En outre, *Ratcliffe* [28] a proposé une méthode de détection d'endommagement basée seulement sur les déformées propres. La localisation peut être effectuée à partir d'une approximation aux différences finis de l'opérateur Laplacien aux vecteurs propres.

*Khan et al.* [29] ont utilisé un scanne continu avec laser Doppler vibromètre pour surveiller les discontinuités dans les déformées propres pour détecter l'endommagement.

Contrairement aux fréquences, l'estimation des déformées propres requiert la mesure dans chacun des points où il faut faire l'estimation, posant des difficultés pratiques dues au nombre limité de capteurs et à la capacité d'avoir une mesure fiable. En plus, l'estimation des vecteurs propres à partir de la réponse fréquentielle, même en l'absence d'endommagement, peut devenir problématique quand la structure a une configuration complexe. C'est une méthode qui dépend des techniques mises en œuvre ; la faisabilité et la fiabilité sont affectées par le type de structure, l'étendue de l'endommagement, la façon d'extraire les vecteurs propres et les algorithmes utilisés pour le traitement des données.

## 4.3 Méthode de l'enveloppe

La méthode de l'enveloppe est une technique utilisant la résonance haute fréquence du roulement (ou du capteur). Pour ce faire, elle utilise la fréquence de résonance du roulement pour extraire l'information nécessaire pour la détermination de la présence du défaut et met en évidence cette information dans une plage fréquentielle normalement observée en analyse vibratoire (0 – 1500 Hz). Plus précisément, la méthode de l'enveloppe utilise la modulation de l'amplitude de la fréquence de résonance du roulement, par la fréquence du défaut.

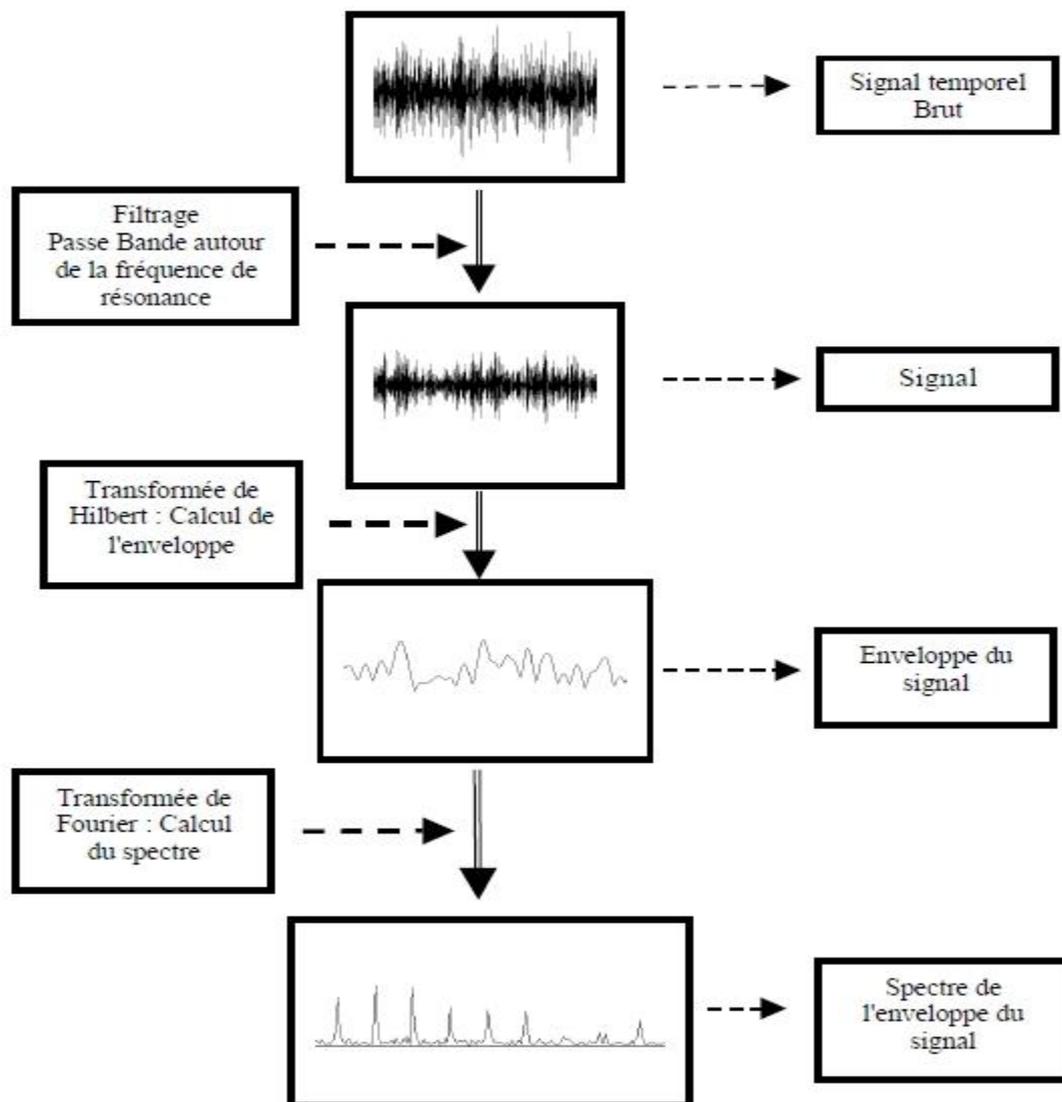


Figure 3 10: Schéma de fonctionnement de la méthode de l'enveloppe.

#### 4.4 Fonctions de réponse fréquentielle (FRF)

Les fonctions de réponse fréquentielle décrivent le domaine fréquentiel du système, et sont très utilisées dans la dynamique des structures et l'identification des systèmes mécaniques pour l'extraction des fréquences de résonance, l'estimation des vecteurs propres et des coefficients d'amortissement, et vérifier les matrices de masse, de raideur et d'amortissement. Plusieurs méthodes de détection d'endommagement basées sur l'évaluation des paramètres modaux sont reliées, directement ou indirectement, à la FRF. Cela implique que l'information contenue dans les données FRF, peut être directement utilisée pour détecter l'endommagement.

*Wang et al.* [30] ont développé un algorithme pour localiser et quantifier l'endommagement en utilisant directement les données FRF mesurées. Le vecteur d'endommagement, qui indique la position et la magnitude de ce dernier, est calculé à partir des perturbations dans les équations de la FRF. *Mottershead et al.* [31] ont exploré la possibilité de détection d'endommagement, en utilisant des équations FRF rationnelles, basée sur l'observation que l'endommagement peut augmenter le comportement non-linéaire d'une structure. Des techniques ont été développées pour extraire ces distorsions des données FRF, afin de localiser et quantifier l'endommagement (*Vanhoenacker et al.*) [32].

En 2014, *Mehrisadat Makki Alamdari et al* [33], ont développé une technique de détection et de localisation d'un défaut qui se base sur la réponse fréquentielle FRF ainsi que la suppression du bruit. *SC Mohan et DK Maiti* [34], ont mis au point un algorithme d'optimisation PSO (Particle swarm optimisation) basé sur la FRF qui permet de localiser et quantifier un défaut dans une structure avec différents scénarios d'endommagements.

## 4.5 Energie de déformation modale

*Yang et al.* [35] ont utilisé la propriété de l'invariance d'énergie de déformation modale élémentaire pour localiser l'endommagement. Dans cette méthode, l'énergie de déformation modale est décomposée en deux parties qui définissent deux indicateurs d'endommagement. Le premier est le rapport de changement d'énergie de déformation modale de compression et le second représente le rapport de changement d'énergie modale de torsion. L'énergie de déformation modale a été obtenue par des formes modales incomplètes et des matrices de raideur élémentaire. Plusieurs cas d'endommagement ont été simulés sur une plate forme pétrolière offshore. D'après les résultats obtenus, les auteurs ont montré l'efficacité et la précision de la méthode dans la détection d'endommagement sur des structures complexes.

*Brehm et al.* [36] ont développé une approche basée sur un model purement mathématique enrichi par des informations physiques obtenues par un model numérique basée sur l'énergie de déformation modale, ils ont ainsi pu localiser et quantifier l'endommagement. *Dixit et al.* [37] ont présenté une méthode basée sur l'énergie de déformation modale obtenue à partir des fréquences naturelles et des déformées propres correspondantes, afin de localiser et de quantifier des endommagements sur des poutres, sous différentes conditions aux limites, et ils ont obtenu des résultats expérimentaux qui démontrent la robustesse de leur approche.

## 4.6 Flexibilité modale

*Li et al.* [38] ont présenté une nouvelle approche basée sur le changement de la matrice de flexibilité modale généralisée, qu'ils ont utilisé pour localiser et quantifier des endommagements. En comparaison avec la matrice de flexibilité modale, la matrice de flexibilité modale généralisée réduit l'effet de troncature des modes d'ordre supérieur.

*Kazemi et al.* [39] ont utilisé la variation de la flexibilité modale pour détecter des défauts sur des structures plaques minces. L'indicateur d'endommagement est formulé à partir de la matrice de flexibilité modale et des équations différentielles de variation des efforts. *Reynders et al.* [40] ont proposé une méthode basée sur la flexibilité quasi statique. La matrice de flexibilité modale est combinée avec des forces virtuelles qui causent des contraintes non nulles sur de petites parties de la structure, où de possible changement de raideur sont à chercher. Ils ont démontré que, si la relation contraintes déformations est proportionnelle, le rapport entre certaines combinaisons de déformations avant et après endommagement, fait apparaître un changement de raideur, égal à l'inverse de la raideur locale. La méthode est appelée flexibilité locale.

Le tableau (Tab3.2.) donne un résumé des différentes méthodes utilisées dans la détection d'endommagement en utilisant des données vibratoires.

Catégorie		Méthodologie
<b>Paramètres modaux</b>	Fréquences naturelles	Changement de fréquences
		Optimisation de la force résiduelle
	Déformées modales	Changement de déformées modales
		Energie de déformation modale
		Dérivées des déformées propres
<b>Méthodes matricielles</b>	Basée sur la raideur	Techniques d'optimisation
		Recalage du model
	Basée sur la flexibilité	Mesure de la flexibilité dynamique
<b>Autres techniques</b>		Analyse temporelle
		Evaluation des fonctions de réponse fréquentielle FRF

Tableau 3 2: Principales méthodes de détection d'endommagement.

## 5. Conclusion

Nous avons dans ce chapitre traité des méthodes de contrôle non destructif (CND) qui nous permettent de manière générale de détecter tout type d'endommagement dans les structures en composites. Qu'elles soient basées sur les ultrasons, la thermographie, les rayons X ou bien sur les données vibratoires, ces méthodes nous offrent des possibilités considérables dans l'amélioration de la fiabilité des matériaux composites en permettant une localisation et quantification accrue ainsi que la détermination de la durée de vie de la structure.

Nous avons aussi mis en exergue les méthodes basées sur les données vibratoires en les classant et en faisant une large revue sur les travaux de recherche effectués sur le thème.

Ce chapitre est un prélude au suivant où nous allons, sur la base des données vibratoires développer une des méthodes décrites pour identifier dans le cadre de ce projet le délaminage dans une structure en stratifié.

# *Chapitre IV: Modélisation de défauts de délaminage sur une poutre multicouches*

# 1. Introduction

La présence d'une fissure dans une structure présente une flexibilité locale qui affecte la réponse dynamique. D'ailleurs, une fissure de respiration, ce qui est le cas du délaminage, est une fissure qui s'ouvre et se ferme dans le temps selon les conditions de charge et l'amplitude de la vibration. Les changements des caractéristiques dynamiques peuvent être mesurés et mènent à une identification des changements structuraux, qui pourraient par la suite être utile à la détection d'une présence d'une fissure. Plusieurs investigations analytiques, numériques et expérimentales existent maintenant [40].

Dans le but de détecter si il y a présence d'un défaut et de localiser son emplacement dans une structure, les méthodes vibratoires offrent un large panel d'approche. Basé sur la réponse fréquentielle (FRF), la méthode que nous allons utiliser, consiste à surveiller et interpréter les changements dans les réponses fréquentielles d'une structure ceci nous permettra de diagnostiquer son état de santé. Cette méthode est simple d'emploi et donne des résultats assai satisfaisants.

## 2. Modélisation de la structure en éléments finis

Pour modéliser le stratifié, nous avons opté pour la méthode des éléments finis (MEF), qui est aujourd'hui l'une des techniques les plus utilisée pour résoudre des problèmes complexes, dans les différents domaines de l'ingénierie. Son succès est dû au développement rapide de l'outil informatique, ainsi que la formulation simple des problèmes, physique et mécanique, complexes.

Notre structure est une poutre en stratifié multicouches de plis carbone époxy modélisée dans un environnement complet de pré et post-traitement (logiciel) dédié à l'analyse par éléments finis, qui permet aux ingénieurs de développer et tester virtuellement des conceptions de produits.

### 2.1 Description de la structure

La structure étudiée est une poutre encastree libre en composite stratifié carbone époxy symétrique avec 8 plis orienté de la manière suivante  $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]$  s.

La poutre a été modélisée en utilisant le logiciel Patran, sur lequel nous avons programmé le model éléments finis. Pour les besoins de notre étude, notre stratifié comportera une interface en son milieu. Ceci nous permettra de simuler notre délaminage sur cette interface. Les dimensions de la poutre sont:

La longueur  $L=1000$  mm; Largeur  $B= 30$  mm; Epaisseur  $E=16$  mm

Epaisseur du pli  $e=2$  mm; Epaisseur de l'interface  $h= 0.2$  mm

La figure (4.1) illustre notre structure.

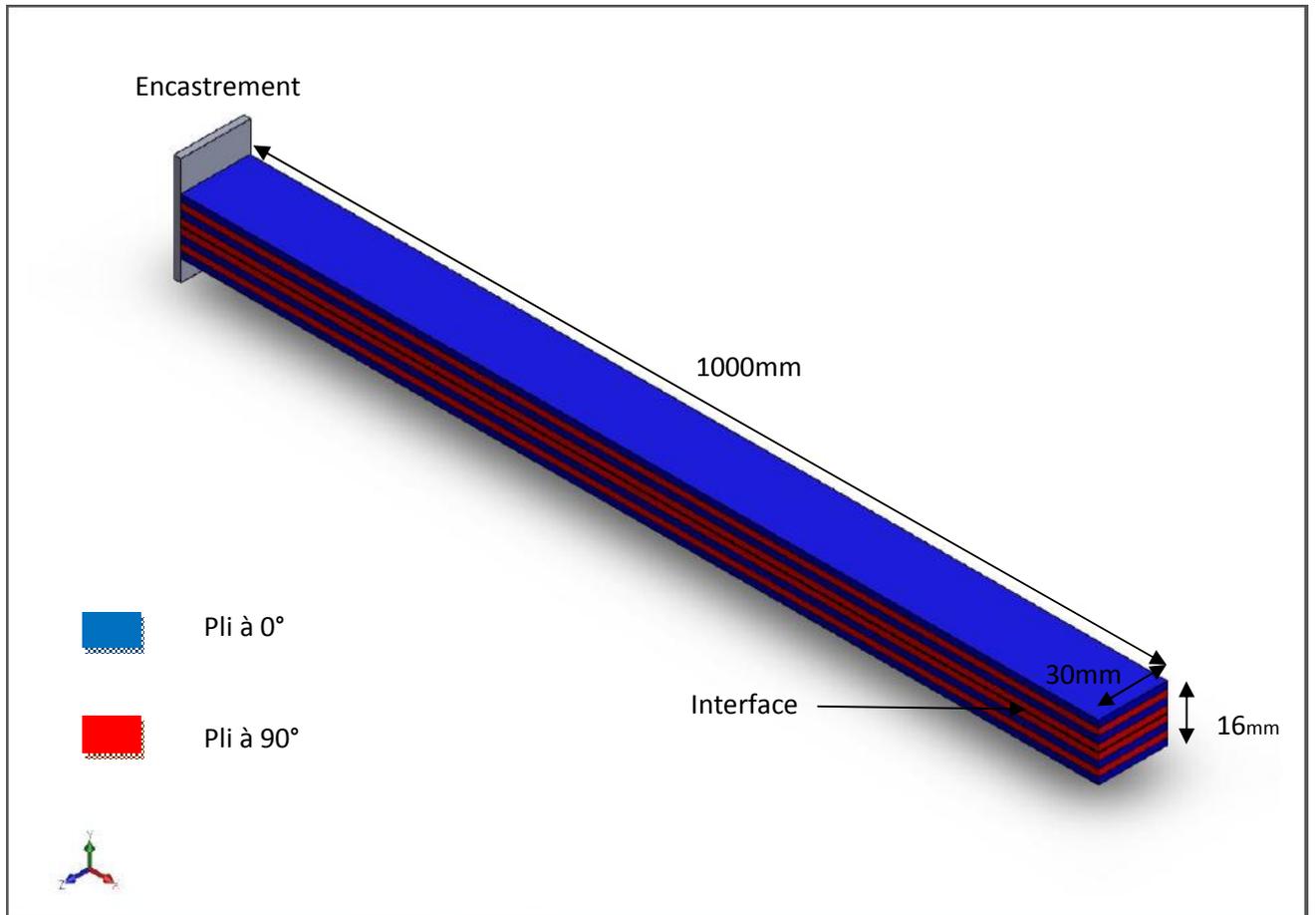


Figure 4 1: Modélisation de la structure.

La figure (4.2) nous montre une vue latérale de notre poutre avec les dimensions des plis et de l'interface.

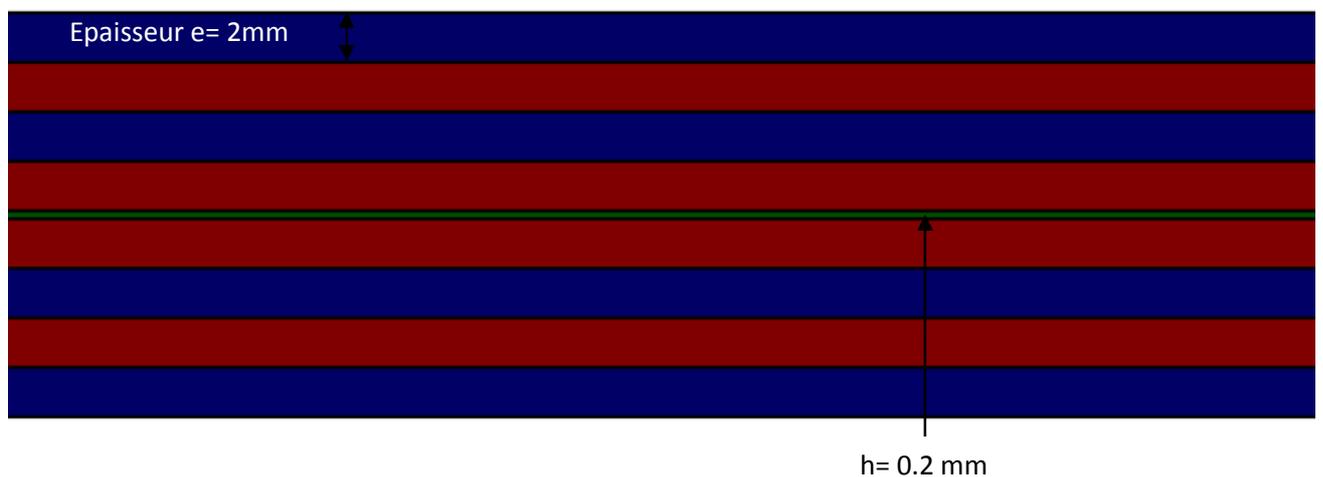


Figure 4 2: Vue latérale de la poutre.

### 2.1.1 Caractéristiques du pli UD

Nôtre pli unidirectionnel est en carbone époxy à fibre longues qui possède les caractéristiques suivantes:

- Matériau orthotrope 3d avec les modules de Young:  $E_1 = 120\text{GPa}$   $E_2 = E_3 = 6.9\text{GPa}$
- Modules de cisaillements:  $G_{12}=5.2\text{GPa}$   $G_{13}=5.2\text{GPa}$   $G_{23}=5.2\text{GPa}$
- Coefficient de Poisson:  $\nu_{12}=\nu_{13}=0.3$ ,  $\nu_{23}=0.011$
- Masse volumique :  $\rho=1813.9\text{Kg/m}^3$

### 2.1.2 Description de l'interface

Pour les besoins de notre étude nous allons décrire une interface entre les plis avec les caractéristiques mécaniques que nous allons poser comme étant celles des plis voisins, ceci dans le but de créer un endommagement de type délaminage dans cette interface. Dans notre cas l'interface se situe au milieu de notre structure entre les plis 4 et 5. Ces caractéristiques sont celles de l'unidirectionnel orienté à 90 degrés :

- Matériau orthotrope 3d avec les modules de Young:  $E_1 = E_3=6.9\text{GPa}$   $E_2 = 120\text{GPa}$
- Modules de cisaillements:  $G_{12}=5.2\text{ GPa}$   $G_{13}=5.2\text{ GPa}$   $G_{23}=5.2\text{ GPa}$
- Coefficient de Poisson:  $\nu_{12}=\nu_{13}=0.3$ ,  $\nu_{23}=0.011$
- Masse volumique :  $\rho=1813.9\text{Kg/m}^3$

### 2.1.3 Description du chargement

Notre poutre est sollicité en dynamique par une force harmonique d'une amplitude de 100N suivant l'axe Y; Cette force est appliquée à une distance de 900mm par rapport a l'encastrement de la poutre; La variation de la fréquence de la force d'excitation se fait de 0Hz à 2000Hz (figure (4.3)).

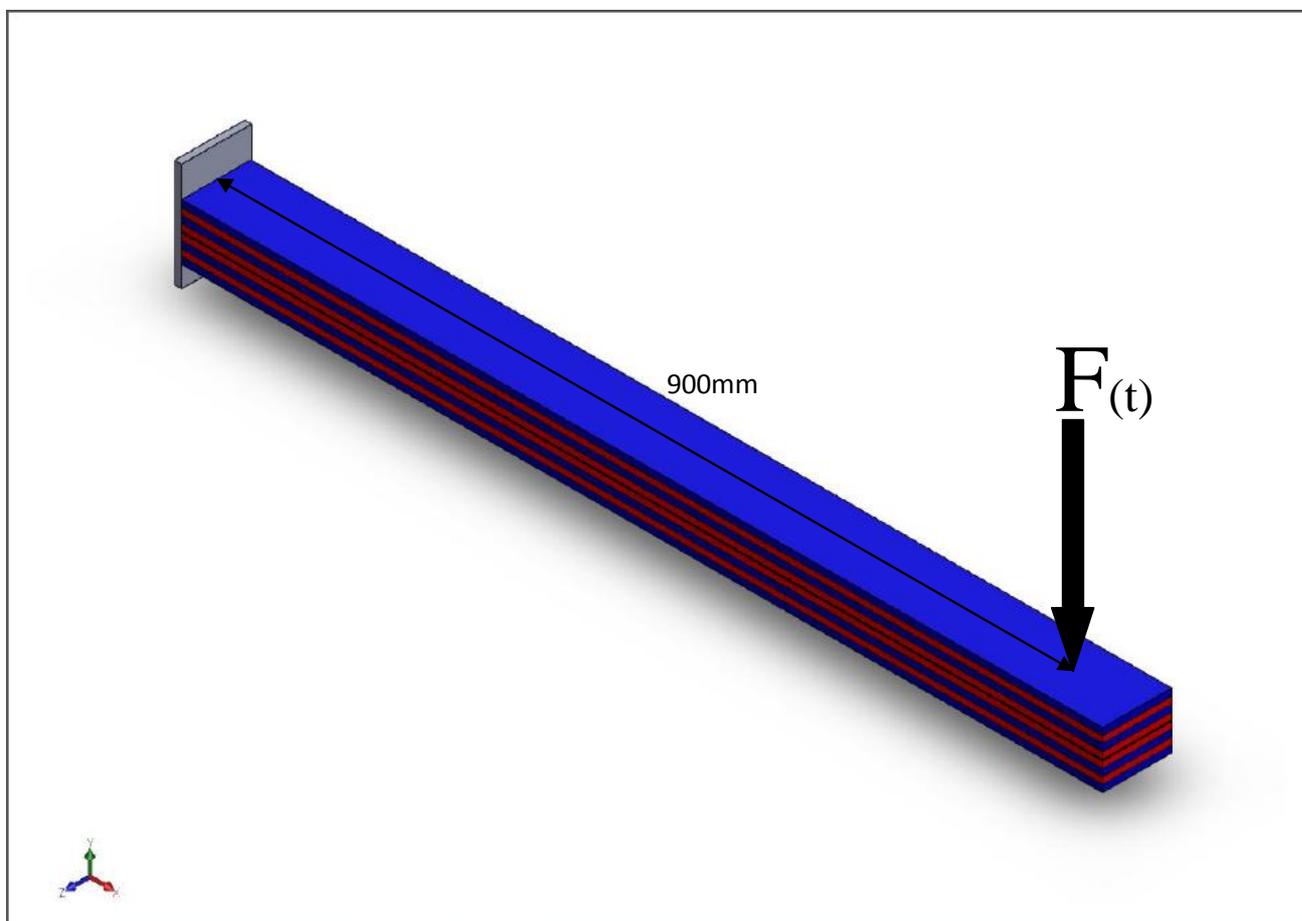


Figure 4 3: Application de la force d'excitation.

## 2.2 Modélisation du défaut

Le type d'endommagement que nous allons étudier est un délaminage. Nous allons le modéliser en tenant les caractéristiques mécaniques de la zone ciblée, c'est-à-dire nous allons considérer  $E_1$   $E_2$   $E_3$  et  $G_1$   $G_2$   $G_3$  de l'ordre de      MPa. Nous verrons par la suite différents degrés d'endommagements en augmentant la taille de la zone du délaminage. La zone de délaminage se trouve à une distance  $R = 200$  mm de l'encastrement, englobant toute la largeur de la poutre, la zone endommagée a une largeur  $X$  qui; dans notre cas; prendra les valeurs 20 mm, 40 mm et 60 mm.

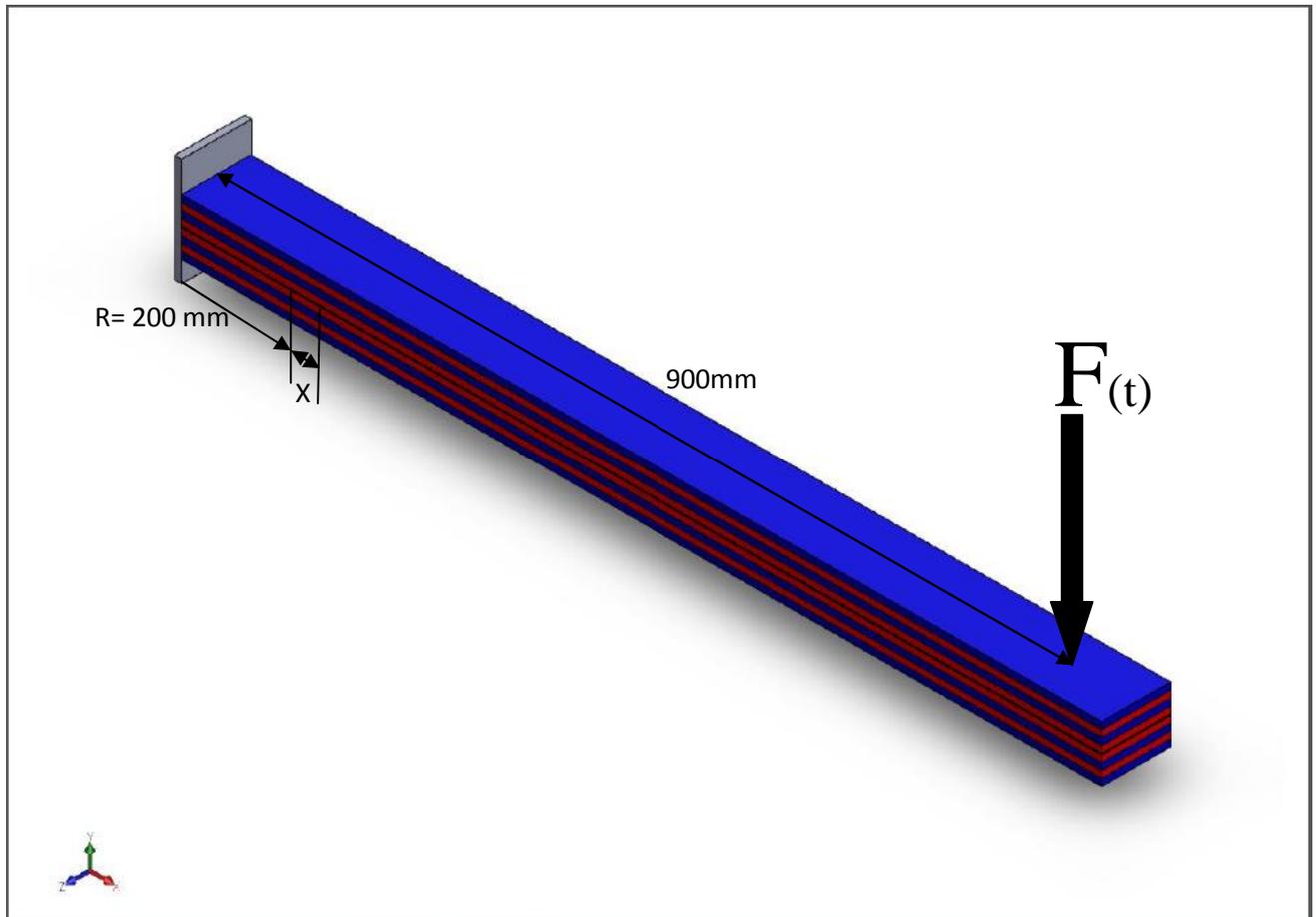


Figure 4 4: Position du délaminage sur la poutre.

### 3. Présentation de la méthode basée sur les réponses fréquentielles (FRF)

En fait cette méthode se divise en deux parties bien distinctes. La première étape est de déterminer s'il y a présence d'un défaut; dans notre cas se sera un délaminage; et cela en utilisant la réponse fréquentielle de la structure a une force excitatrice de type harmonique. La deuxième étape consiste dans la localisation de l'endommagement et de la détermination de la sévérité ou bien la quantification du défaut.

#### 3.1 Détection de défauts en utilisant les FRF

La présence d'un délaminage dans une structure présente une flexibilité locale qui affecte la réponse dynamique. D'ailleurs, une fissure de fatigue ou un délaminage est une fissure qui s'ouvre et se ferme dans le temps selon les conditions de charge et l'amplitude de la vibration [40].

Le principe de cette étape est que la réponse d'une structure endommagée à une sollicitation vibratoire diffère de celle d'une structure saine, donc nous n'avons qu'à comparer les deux réponses afin de déterminer s'il y a présence d'un défaut dans la structure.

Les équations de mouvement d'une structure saine à N degrés de libertés (N ddl) peuvent être exprimées de la manière suivante:

$$[Ms]\{\ddot{x}(t)\} + [D]\{\dot{x}(t)\} + [Ks]\{x(t)\} = F(t) \quad (4.1)$$

[Ms], [D] et [Ks] représentent les matrices globales de masse, amortissement, et de rigidité de la structure saine, et F(t) la force excitatrice

Dans notre cas nous allons négliger l'amortissement de la structure, ainsi l'équation (4.1) devient

$$[Ms]\{\ddot{x}(t)\} + [Ks]\{x(t)\} = F(t) \quad (4.2)$$

Si nous supposons que la force d'excitation est harmonique, la force extérieure et le déplacement peuvent alors s'écrire de la manière suivante.

$$f(t) = \{F\} (\cos \omega t + \varphi) \quad \text{et} \quad x(t) = \{X\} (\cos \omega t + \varphi) \quad (4.3)$$

Ou bien sous la forme:

$$f(t) = \{F\}e^{j\omega t} \quad \text{et} \quad x(t) = \{X\}e^{j\omega t} \quad (4.3')$$

Si nous remplaçons les équations (4.3') dans l'équation (4.2) nous aurons:

$$\{-\omega^2[Ms] + [Ks]\}\{X\}e^{j\omega t} = \{F\}e^{j\omega t} \quad (4.4)$$

La même chose pour une structure endommagée

$$\{-\omega^2[Me] + [Ke]\}\{X\}e^{j\omega t} = \{F\}e^{j\omega t} \quad (4.5)$$

Avec: [Me] et [Ke] les matrices de masse et de rigidité de la structure endommagée

En simplifiant par  $e^{j\omega t}$  dans les deux termes de l'équation, nous obtenons la réponse fréquentielle (FRF), [Xs] et [Xe] pour les deux structures sous la forme suivante:

$$[Xs] = \{(-\omega^2[Ms] + [Ks])^{-1}\} * [F] \quad (4.6)$$

$$[Xe] = \{(-\omega^2[Me] + [Ke])^{-1}\} * [F] \quad (4.7)$$

Pour une même force d'excitation, la réponse fréquentielle varie suivant l'état de la structure. De là, nous dégageons l'indicateur de détection d'endommagement que nous allons utiliser dans cette méthode et cela en comparant [Xs] et [Xe]

La comparaison avec la méthode graphique donne un résultat direct et facile à déchiffrer. Le décalage entre la réponse nous renseigne sur l'endommagement ou non d'une des deux structures. En général la réponse fréquentielle de la structure endommagée a des fréquences de résonance plus petites que celle de la structure saine.

## 3.2 Présentation des résultats de l'analyse des poutres

Pour plus de clarté nous allons présenter les résultats sous forme de graphiques ça nous permettra de visualiser directement le décalage entre la réponse fréquentielle de la poutre saine et celles des poutres endommagées.

### 3.2.1 Réponse fréquentielle de la poutre saine

La poutre est sollicitée par une force harmonique d'amplitude 100N à une distance 10 cm de son extrémité libre. La figure 4.5 nous montre la réponse fréquentielle de notre structure.

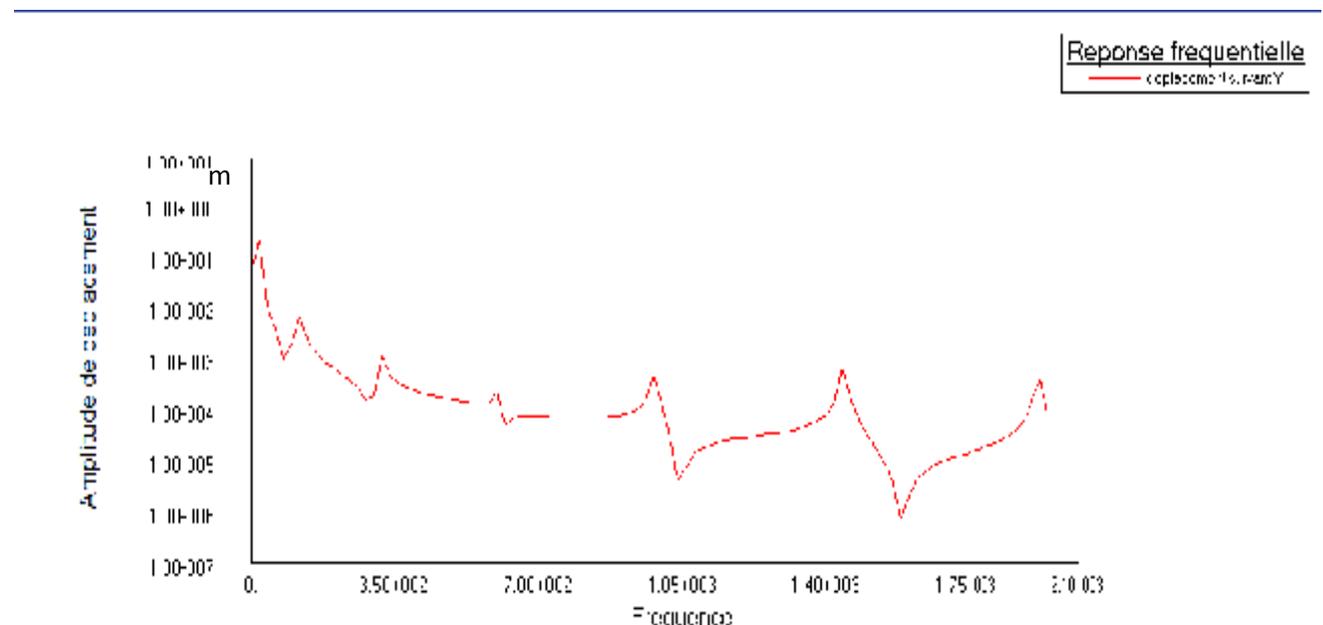


Figure 4.5: Réponse fréquentielle de la poutre saine.

### 3.2.2 Réponse fréquentielle de la poutre endommagée sur 20 mm

La poutre est sollicitée par une force harmonique d'amplitude 100N à une distance 10 cm de son extrémité libre. Le délaminage se trouve sur l'interface à une distance  $R=200$  mm de l'encastrement, il englobe toute la largeur de la poutre sur  $X=20$ mm.

La réponse fréquentielle est présentée sur la figure (4.6).

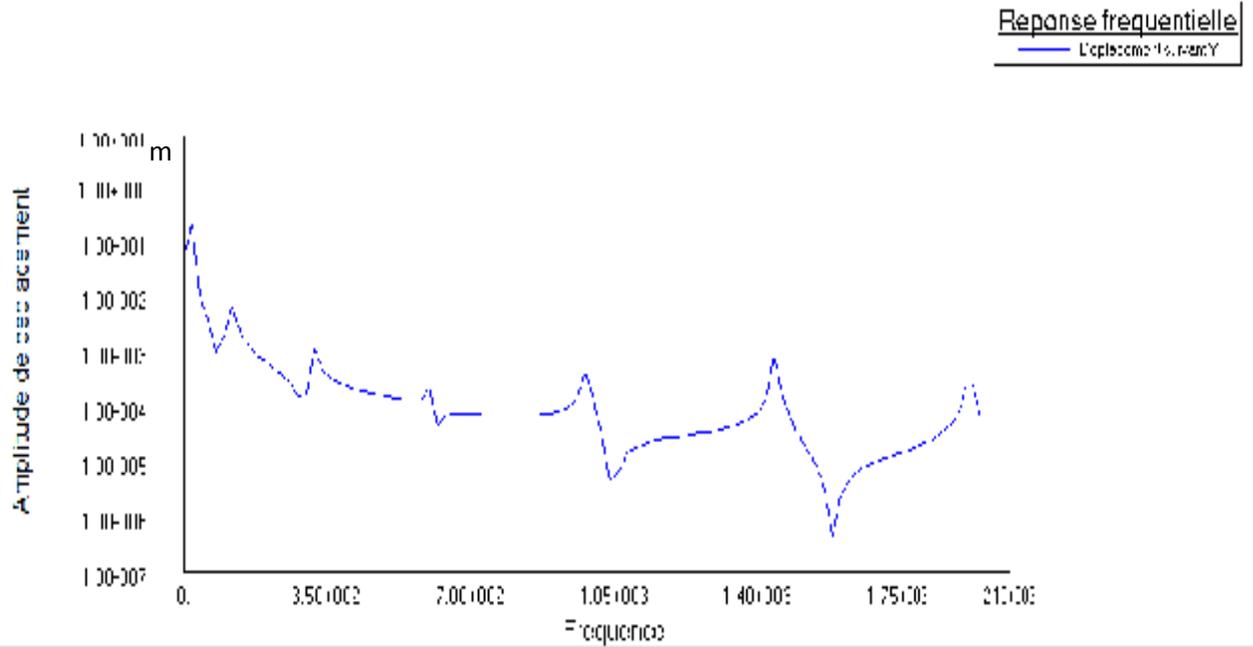


Figure 4.6: Réponse fréquentielle de la poutre endommagée sur 20 mm.

### 3.2.3 Réponse fréquentielle de la poutre endommagée sur 40 mm

La poutre est sollicitée par une force harmonique d'amplitude 100N à une distance 10 cm de son extrémité libre. Le délaminage se trouve sur l'interface à une distance  $R=200$  mm de l'encastrement, il englobe toute la largeur de la poutre sur  $X=40$ mm.

La réponse fréquentielle est présentée sur la figure (4.7).

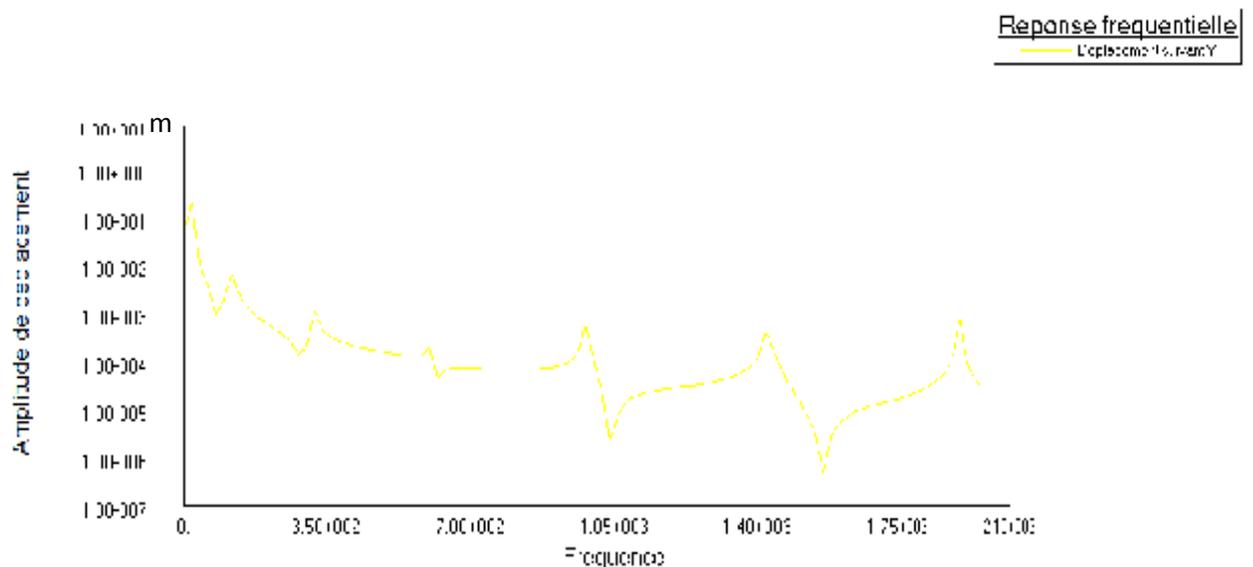


Figure 4.7: Réponse fréquentielle de la poutre endommagée sur 40 mm.

### 3.2.4 Réponse fréquentielle de la poutre endommagée sur 60 mm

La poutre est sollicitée par une force harmonique d'amplitude 100N à une distance 10 cm de son extrémité libre. Le délaminage se trouve sur l'interface à une distance 200 mm de l'encastrement, il englobe toute la largeur de la poutre sur 60mm.

La réponse fréquentielle est présentée sur la figure (4.8).



Figure 4 8: Réponse fréquentielle de la poutre endommagée sur 60 mm.

### 3.2.5 Variation de la réponse fréquentielle entre la poutre saine et les endommagées

#### 3.2.5.1 Poutre endommagée sur 20 mm

La figure Suivante (figure 4.9) représente le décalage entre la réponse fréquentielle de la poutre saine et la poutre endommagée sur 20 mm.

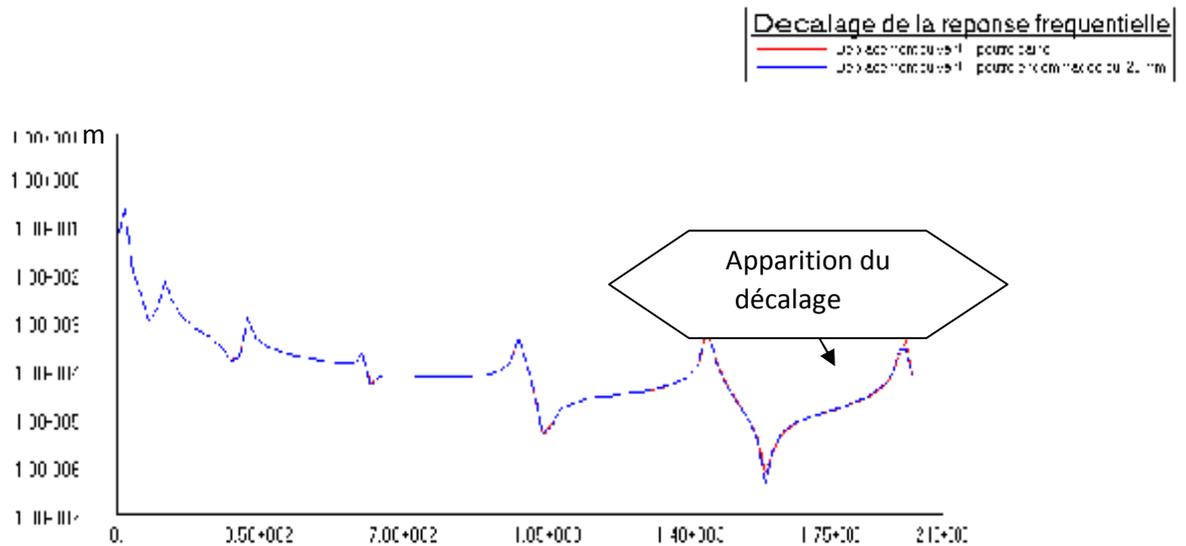


Figure 4 9: Décalage de la réponse fréquentielle entre la poutre saine et endommagée sur 20 mm.

Le décalage dans ce cas est très petit.

### 3.2.5.2 Poutre endommagée sur 40 mm

La figure Suivante (figure 4.10) représente le décalage entre la réponse fréquentielle de la poutre saine et la poutre endommagée sur 40 mm.

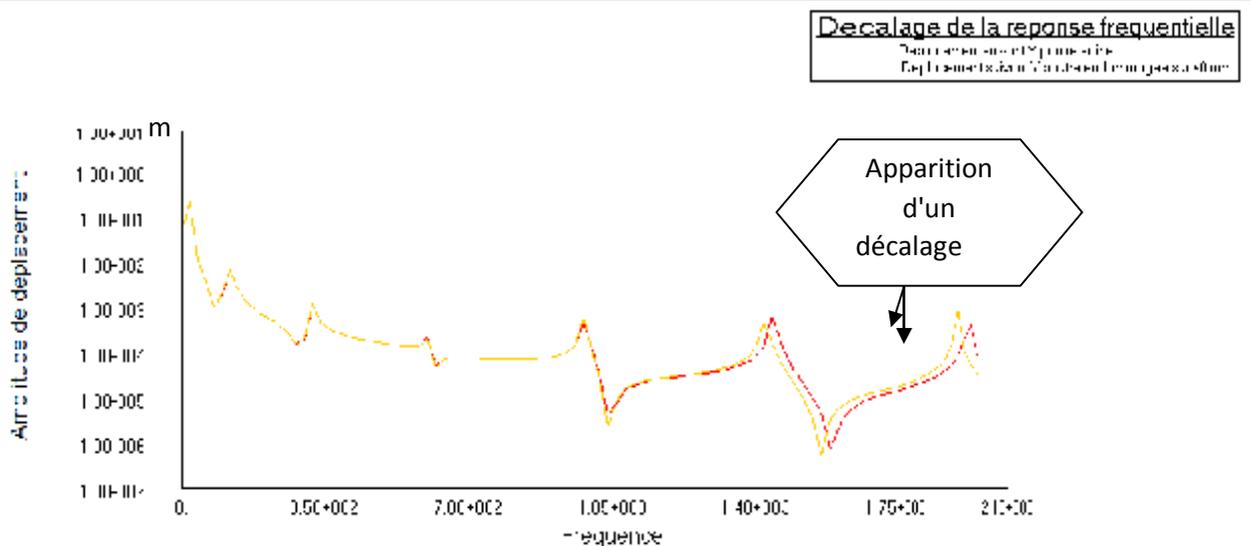


Figure 4 10: Décalage de la réponse fréquentielle entre la poutre saine et endommagée sur 40 mm.

La valeur du décalage a augmentée avec l'augmentation de la taille du défaut

### 3.2.5.3 Poutre endommagée sur 60 mm

La figure Suivante (figure 4.11) représente le décalage entre la réponse fréquentielle de la poutre saine et la poutre endommagée sur 60 mm.

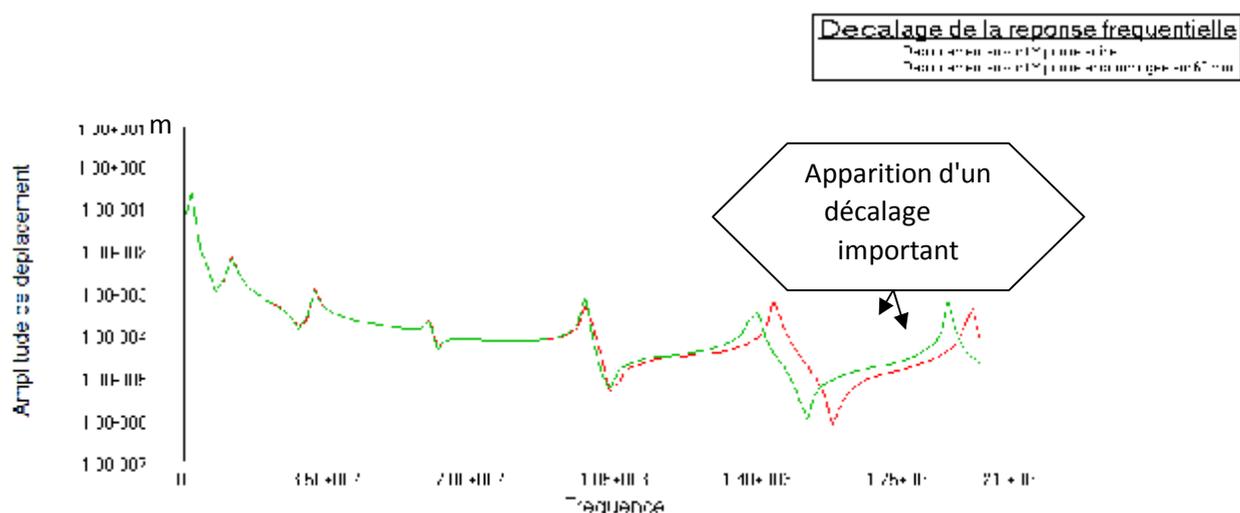


Figure 4 11: Décalage de la réponse fréquentielle entre la poutre saine et endommagée sur 60 mm.

La valeur du décalage est devenue plus grande par rapport aux autres poutres saines et endommagées.

### 3.3 Interprétation des résultats

Nous remarquons une variation de la réponse fréquentielle entre la structure saine et les différentes structures endommagées soit sur 20mm, 40mm ou 60 mm {figures 4 9, 4 10, 4 11}; Cette variation se traduit par une diminution des fréquences de résonances des poutres endommagées sollicitées par le même chargement harmonique que la poutre saine. Cet amoindrissement de la fréquence de résonance est principalement causé par la perte de rigidité liée aux défauts contenus dans chaque interface.

Nous remarquons aussi que l'amoindrissement de la réponse fréquentielle augmente selon le degré d'endommagement de la structure. Ce qui veut dire concrètement que plus on augmente le nombre d'éléments endommagés plus la rigidité de la structure diminue, se traduisant par une diminution de la réponse fréquentielle.

## 4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité de la manière avec laquelle nous modélisons une structure dans Patran avec tout l'aspect lié à la géométrie de la structure, les caractéristiques mécaniques et physiques des matériaux employés ainsi que les conditions aux limites et les chargements.

Nous avons aussi montré une méthode de modélisation d'un défaut de délaminage qui se base sur la diminution extrême des caractéristiques mécaniques des éléments de la structure contenant cet endommagement; ces défauts sont localisés sur l'interface entre deux plis successifs de la structure.

Nous avons par ailleurs opté pour une méthode de détection de l'endommagement d'une structure en se basant sur les données vibratoires qui la réponse fréquentielle (FRF); Elle nous permet de manière très simple de déterminer si la structure comporte un défaut avec le décalage des réponses fréquentielles entre elle et une structure considéré comme saine.

Finalement, nous avons mis en évidence que la réponse fréquentielle dépend du degré d'endommagement de la structure, car, plus l'endommagement est prononcé plus la réponse fréquentielle de la structure tend à diminuer, donc nous aurons des fréquences de résonances plus petites. Dans le prochain chapitre nous allons localiser sur la structure et quantifier le défaut.

***Chapitre V:Présentation et  
application de la méthode de la  
variation de la sensibilité***

# 1. Introduction

Ces trois dernières décennies, la détection des endommagements dans les structures par la variation des paramètres dynamiques, a reçu l'attention considérable des ingénieurs. L'idée est que la variation des propriétés physiques de la structure ( raideur, amortissement, masse,...) causent une variation des caractéristiques dynamiques ( modes propres, réponse fréquentielle,...). Les propriétés telles que la matrice de sensibilité (flexibilité), la matrice de raideur et les modes propres de vibration, sont obtenus à partir des paramètres modaux.

La méthode que nous allons appliquer est la matrice de sensibilité.

## 1.1 Théorie

L'équation aux valeurs propres de la structure à N ddl s'exprime comme suit:

$$[K] \cdot \{\phi\}_i = \omega_i^2 [M] \cdot \{\phi\}_i \quad (1).$$

Multiplions les deux termes par  $\{\phi\}_i^T \cdot [K]^{-1}$

$$\{\phi\}_i^T [K] \cdot [K]^{-1} = \omega_i^2 [K]^{-1} \{\phi\}_i^T [M] \cdot \{\phi\}_i \quad (2).$$

Nous obtenons :

$$\{\phi\}_i \{\phi\}_i^T = \omega_i^2 [K]^{-1} \quad (3).$$

Posons :  $[F] = [K]^{-1}$

A partir des expressions nous obtenons:

- Pour une poutre saine:

$$[F] = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_i^2} \{\phi\}_i \{\phi\}_i^T \quad (4).$$

- pour une poutre endommagée:

$$[F'] = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_i'^2} \{\phi'\}_i \{\phi'\}_i^T \quad (5).$$

Avec  $(\omega_i, \omega'_i)$  les fréquences naturelles des structures, respectivement saine et endommagée.  $\{\phi\}_i$  et  $\{\phi'\}_i$  sont les vecteurs propres, normalisés par la matrice de masse respectivement des structures saines et endommagées.

N: Nombre de modes mesurés.

La variation de la flexibilité causée par l'endommagement peut être obtenue par la différence entre les matrices suivantes:

$$[\Delta F] = [F] - [F'] \quad (6).$$

Où  $[\Delta F]$  représente la variation de la matrice de flexibilité.

Soit  $\delta_j$  la valeur maximale absolue des éléments de chaque colonne de la matrice  $[\Delta F]$ , d'ici:

$$\delta_j = \max_{i=1:N} |\delta_{ij}| \quad (7).$$

Où :  $\delta_{ij}$  est l'élément de la matrice de sensibilité  $[\Delta F]$ .

$\delta_j$  : Indique l'emplacement de la mesure.

$j$  : Est la colonne de la matrice de sensibilité correspondant à la variation la plus grande; elle indique le degré de liberté où est localisé le défaut.

## 2. Application de la méthode

Pour cette étude, nous avons choisi d'appliquer la méthode de la variation de la sensibilité sur notre poutre modélisée précédemment pour localiser le délaminage au niveau de l'interface entre plis.

Nous allons endommager notre structure sur l'interface avec un délaminage de 50mm à une distance  $R = 200\text{mm}$  de l'encastrement.

Les caractéristiques mécaniques de l'interface endommagée sont de l'ordre de  $10^{-2} \text{MPa}$ .

La figure (5 1) nous présente la position du défaut de délaminage dans la structure.

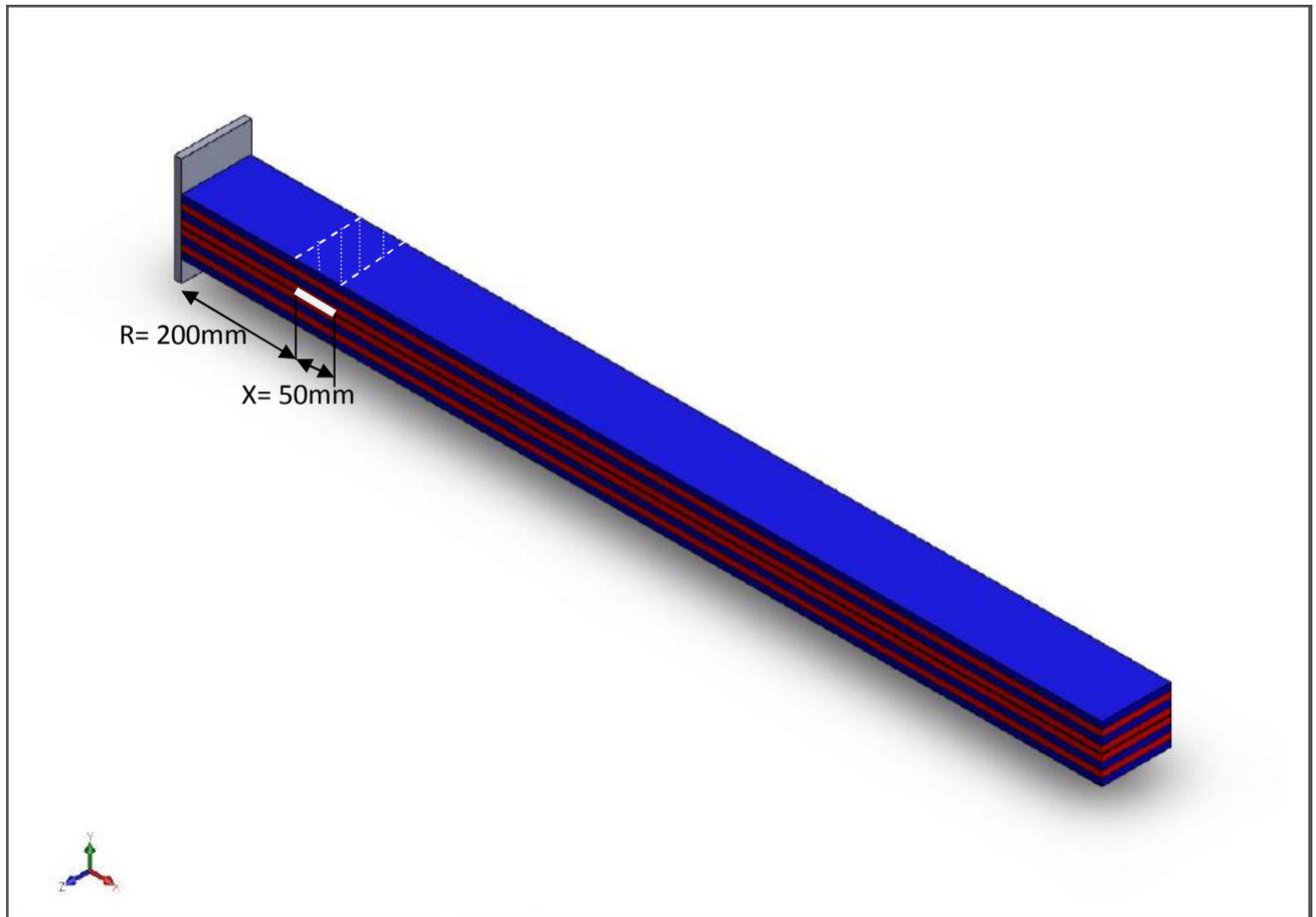


Figure 5 1: Localisation du délaminage sur la poutre.

### 3. Présentation des résultats

Les valeurs des fréquences propres de la poutre saine et de la poutre endommagée sont données dans le tableau suivant.

Fréquences de la poutre saine	Fréquences de la poutre endommagée	
2.123533E+01	2.123286E+01	0.00247
1.322996E+02	1.321594E+02	0.1402
3.676963E+02	3.673782E+02	0.3181
7.135445E+02	7.135323E+02	0.0122
1.165583E+03	1.161811E+03	3.772
1.709962E+03	1.701006E+03	8.956
1.716752E+03	1.709703E+03	7.049
2.358680E+03	2.340467E+03	18.213
3.081537E+03	3.079634E+03	1.903
3.873983E+03	3.873983E+03	0.0001

Tableau 5 1: Fréquences propres des poutres saine et endommagée (Hz).

Nous remarquons dans le tableau précédent une variation des fréquences propres entre la structure saine et la structure endommagée; Ceci est dû a la perte de rigidité locale au niveau de l'emplacement du délaminage sur la structure endommagée. Cette variation ou décalage entre les fréquences propres peu aussi être utilisé comme un moyen pour détecter un éventuel défaut dans une structure.

Les figures qui vont suivre (figure 5 2, figure 5 3) représentent la variation de la flexibilité suivant respectivement l'axe x et l'axe y dans notre repère. étant donné le nombre important d'éléments finis simulés sur la structure et dans un souci de clarté dans les résultats, nous avons décidé de séparer les vecteurs  $\{\phi\}_i$  et  $\{\phi\}'_i$  en doubles vecteurs  $\{\phi\}_{ix}$ ,  $\{\phi\}_{iy}$  et  $\{\phi\}'_{ix}$ ,  $\{\phi\}'_{iy}$ .

l'opération réalisée est une séparation des variables x et y.

Nous avons aussi groupé plusieurs paquets d'éléments suivant l'épaisseur de la poutre le résultat final étant passé de 1050 à 80 valeurs pour chaque variable spatiale (x, y).

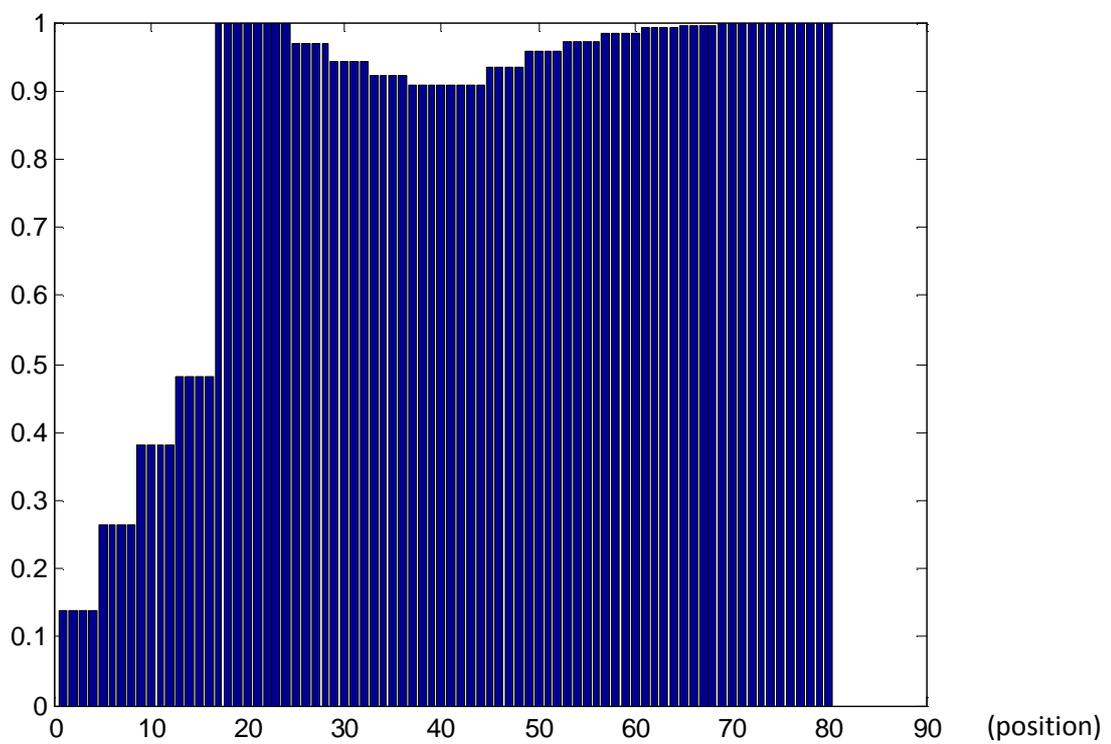


Figure 5 2: Variation suivant x de la flexibilité de la structure.

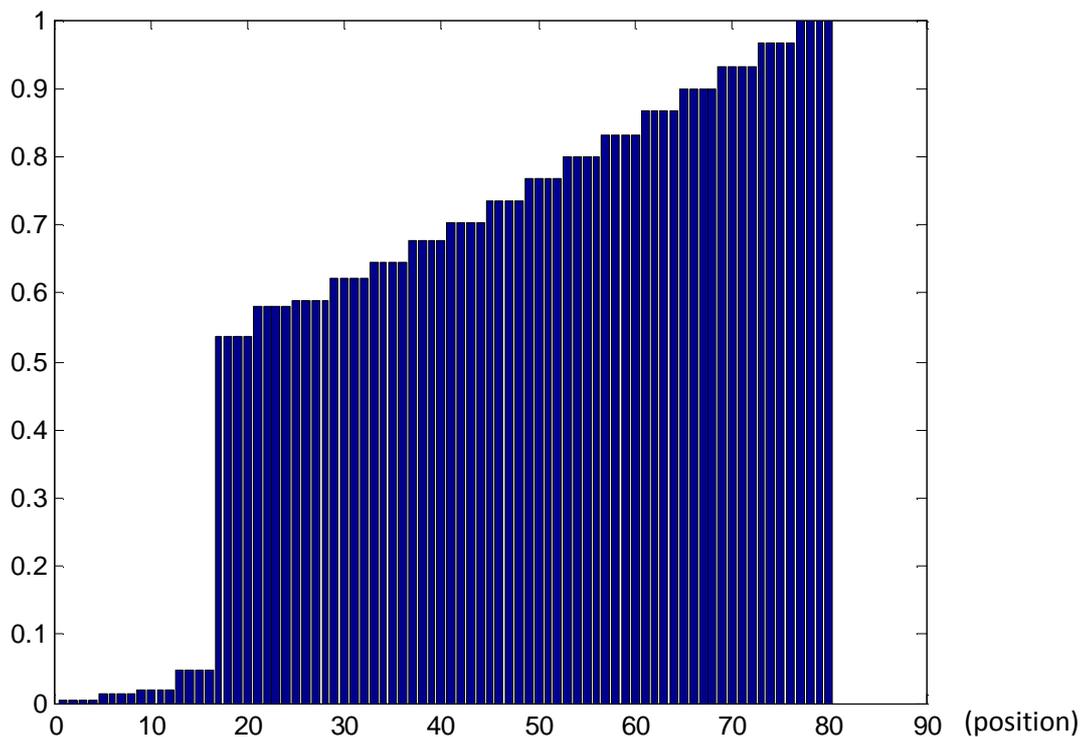


Figure 5 3: Variation suivant y de la flexibilité

Les résultats se présentent sous forme de paquets de barres, chaque paquet aillant 4 barres. Chaque barre représente le max des valeurs de la variation de la flexibilité de 9 éléments finis superposés suivant l'épaisseur de la structure, chaque élément formant un pli dans l'épaisseur.

Chaque paquet représente les valeurs de la variation de la flexibilité des 4 colonnes formant la largeur de la poutre.

Après normalisation des résultats par rapport à la valeur max de la variation est égale à 1.

Pour retrouver l'endommagement suivant la longueur de la poutre nous allons effectuer un léger calcul en utilisant la relation suivante:

$$R = (N-1) * S$$

Avec:

R: la distance entre l'endommagement et l'encastrement;

N: Numéro du paquet où se trouve le plus grand décalage de la valeur de la flexibilité;

S: Longueur de l'élément finis suivant la direction choisie.

Dans notre cas, S=50mm.

## 4. Interprétation des résultats

Nous remarquons sur la figure (5 2) que pour les paquets des barres 1 à 4 ( les barres allant de 1 à 16), l'évolution de la flexibilité suivant x se fait de manière faible et monotone, les valeurs étant petites. Ceci dénote qu'il n y a pas d'endommagement à ce niveau de la structure.

Nous remarquons aussi qu'à partir du paquet 5, une croissance soudaine de la valeur de la variation flexibilité arrivant à la valeur max. Le saut soudain de la valeur nous indique une présence de défaut de délaminage au niveau du paquet N=5

pour retrouver R on utilise la formule précédente

$$R = (N-1)*S \text{ avec } S=50\text{mm}$$

$$R = (5-1)*50=200\text{mm.}$$

Notre défaut se trouve à 200mm de l'encastrement.

Sur la figure (5 3), la même remarque peut être faite concernant l'évolution de la flexibilité suivant la direction y, pour les 4 premiers paquets la variation de la flexibilité est extrêmement petite, nous déduisons qu'il n y a pas de défaut dans cette zone de la structure.

À partir du paquet 5 le saut dans la valeur est extrêmement grand, donc , nous déduisons la présence du défaut dans la zone en question. avec le même calcul que le précédent nous déduisons que le délaminage est présent à une distance R= 200mm par rapport à l'encastrement. La formule étant.

$$R = (N-1)*S \text{ avec } S=50\text{mm}$$

$$R = (5-1)*50=200\text{mm.}$$

## 5. Conclusion

D'après les résultats obtenue à l'application de la méthode de la variation de la sensibilité (flexibilité) nous pouvons conclure que l'indicateur est sensible a la détection et localisation, des défauts de délaminage et leurs positions sur la structure ainsi le taux cependant le taux d'endommagement est difficile a démontrer. Aussi la masse de calcul rend cette méthode difficile à mettre au point.

# *Conclusion générale*

Dans le cadre de ce mémoire, qui fut très instructif sur le plan technique, nous avons modélisé une poutre stratifiée en éléments finis, et nous avons étudié quelques méthodes de détection d'endommagement sur notre poutre, notamment celles basées sur la FRF, ces méthodes reposent sur des données vibratoires.

Les deux méthodes utilisées nous ont permis de déterminer s'il y a présence d'un défaut de délaminage sur la structure. La méthode basée sur la FRF détermine cela, alors que la deuxième méthode est plus dirigée vers une localisation et estimation du dommage. Nous arrivons à localiser l'endommagement sans que les éléments sains ne soient perturbés, ce qui la rend intéressante pour une application pratique.

La première méthode utilisée consiste à comparer la réponse fréquentielle d'une structure endommagée avec celle d'une structure saine, cette méthode nous permet de détecter de manière très simple si il y a présence d'un défaut, la méthode prend tout son sens en superposant les graphes des réponses fréquentielles, le décalage apparaît directement. Dans notre cas de figure nous avons aussi remarqué que le degré d'endommagement influe sur la réponse fréquentielle, c'est-à-dire que plus le délaminage est important plus la variation entre les réponses des poutres augmente, cela est dû à la relation de causalité entre le degré d'endommagement et la perte de rigidité de la structure.

La deuxième méthode s'est basée sur une modélisation des poutres du chapitre VI , notamment dans la détermination des fréquences propres de la structure saine et la structure endommagée, nous avons ensuite appliqué la méthode de la variation de la sensibilité afin de déterminer la localisation de notre défaut de délaminage, la méthode a été modélisé sur MATLAB. La méthode en question a donné de bons résultats sur la localisation du défaut étant donné que nous avons réussi à déterminer l'emplacement sur la longueur de la poutre. cependant pour une discrétisation en éléments finis de la structure avec plus finesse , engendre volume de calcul très grand complexe à réaliser.

D'autre part, l'utilisation de cette méthode pour une structure endommagée sur plusieurs zones reste à vérifier, la masse de calcul étant très grande, nous n'avons pas réussi à réaliser cette simulation. Cette simulation peut être faite dans le cadre de recherches futures.

Dans le cadre des futures recherches, nous pouvons affiner le model éléments finis tridimensionnel avec une fissure de respiration en créant une contrainte de contact entre les plis successifs dans la zone d'endommagement, le problème devient alors non linéaire se qui est plus conforme à la réalité des phénomènes mis en jeu. Aussi nous pouvons développer la méthode de la variation de la sensibilité (flexibilité) pour localiser un défaut dans la largeur et l'épaisseur d'une structure, cela en jouant sur la superposition des résultats.

Enfin, pour compléter l'étude sur le délaminage, La prise en compte de l'évolution du délaminage par la modélisation de l'interface avec les méthodes cohésives permettrons de déterminer la durée de vie de la structure en simulant l'ouverture de la fissure avec un chargement donné.

# *Annexe*

# 1. Introduction

Dans cette annexe, nous allons nous intéresser au logiciel "PATRAN" avec lequel nous avons modélisé notre structure sur laquelle nous avons développé notre méthode de détection d'endommagements en se basant sur les données vibratoires ou plus précisément La Fonction Réponse Fréquentielle ( FRF ).

# 2. Présentation

Patran est un environnement complet de pré- et post- traitement dédiés à l'analyse par éléments finis, qui permet aux ingénieurs de développer et tester virtuellement des conceptions de produits. Utilisé par les leaders mondiaux comme standard pour la création et l'analyse de modèles de simulations, Patran associe conception, analyse et évolution des résultats au sein d'un environnement unique.

Patran constitue une excellente solution de modélisation par éléments finis et de visualisation et de traitement des résultats pour les entreprises désireuses d'utiliser l'analyse par éléments finis, dans le but de réduire la durée et le coût des processus de développement de produits grâce à un recours accru à la simulation. En donnant accès aux ingénieurs à la solution leader d'analyse de MSC. Software, Patran aide les entreprises à réduire les coûts et les contraintes liées à la maintenance de plusieurs outils de pré- et post-traitement dans différents services de l'entreprise, ainsi qu'à mettre sur le marché plus rapidement des produits de meilleure qualité.

# 3. Fonctionnalités

- Interface graphique intuitive avec accès direct aux géométries de CAO.
- Intégration avec les solveurs d'analyse MSC. Software.
- Génération automatique de maillage surfacique et solide avec des fonctionnalités avancées comme le Mech on Mech.
- Création de connecteurs et de boulons précontraints
- Contact général 3D total disponible pour les analyses non linéaires.
- Prise en charge de l'optimisation de conception et de topologie Nastran.
- Post-traitement complet des résultats.
- Standardisation des résultats à l'aide de modèles.
- Personnalisation grâce au langage de commande Patran (PLC).

## 4. Avantages

- Améliorer la productivité des processus de conception et de développement.
- Réduire les fais de développement par un recours accru aux technologies de simulation.
- Développer la productivité et la précision grâce à l'analyse et à l'optimisation multidisciplinaire.

## 5. Procédure de réalisation d'une structure sur Patran

### 5.1 Géométrie

La création d'une géométrie se fait de manière très facile sur Patran, pour cela la fonction "Geometry" est disponible. Les étapes à suivre pour notre cas de figure sont:

- Créer tout d'abord une structure tridimensionnelle en déclarant les plis un par un avec la fonction "Geometry". Dimensions du pli
- Donner les dimensions de chaque pli. [1000mm, 2mm, 30mm]
- Entrer les dimensions de l'interface. [1000mm, 0.5mm, 30mm]

Se faisant, nous aurons ainsi notre poutre aux dimensions voulues. La figure 6. 1 montre la procédure à suivre:

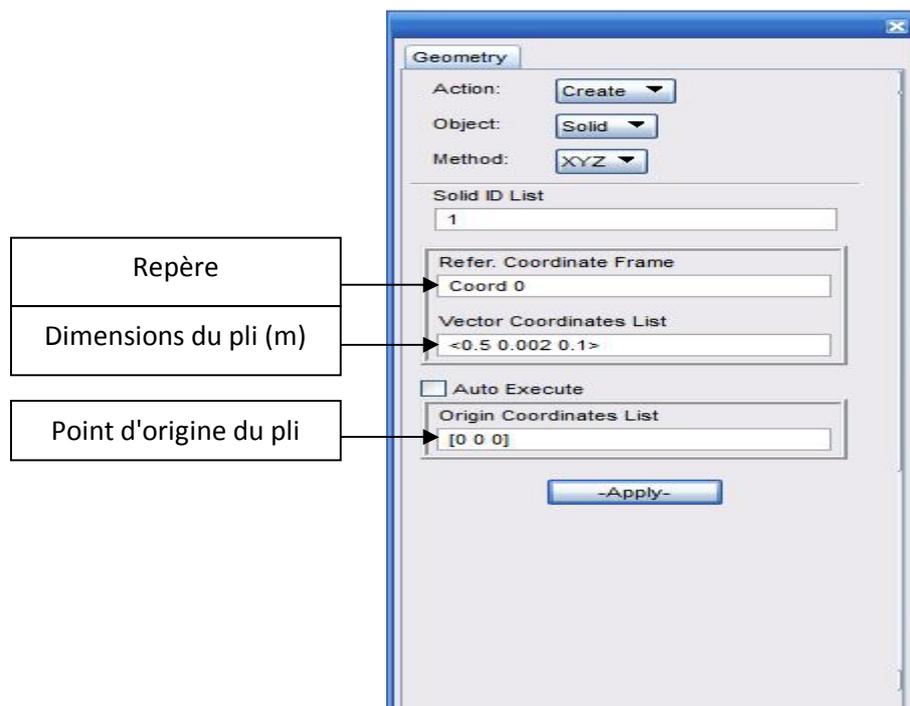


Figure 6 1: Fenêtre géométrie dans Patran.

## 5.2 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques d'une structure sont très simples à déclarer, Patran nous offre plusieurs choix de comportements mécaniques.

Nous allons maintenant déclarer les propriétés physiques et mécaniques de la poutre, pour cela nous allons d'abord:

- Créer un matériau orthotrope 3d avec les caractéristiques du pli à 0°. Ensuite, créer un autre avec les caractéristiques du pli à 90°.

Pli à 0° :  $E1 = 120\text{GPa}$   $E2 = E3 = 6.9\text{GPa}$ ,  $G12 = 5.2\text{GPa}$   $G13 = 5.2\text{GPa}$   $G23 = 5.2\text{GPa}$ ,  $\nu12 = \nu13 = 0.3$ ,  $\nu23 = 0.011$

Pli à 90°:  $E2 = 120\text{GPa}$   $E1 = E3 = 6.9\text{GPa}$ ,  $G12 = 5.2\text{GPa}$   $G13 = 5.2\text{GPa}$   $G23 = 5.2\text{GPa}$ ,  $\nu23 = \nu13 = 0.3$ ,  $\nu12 = 0.011$

- Associer aux plis correspondants dans la structure les caractéristiques des matériaux créés.

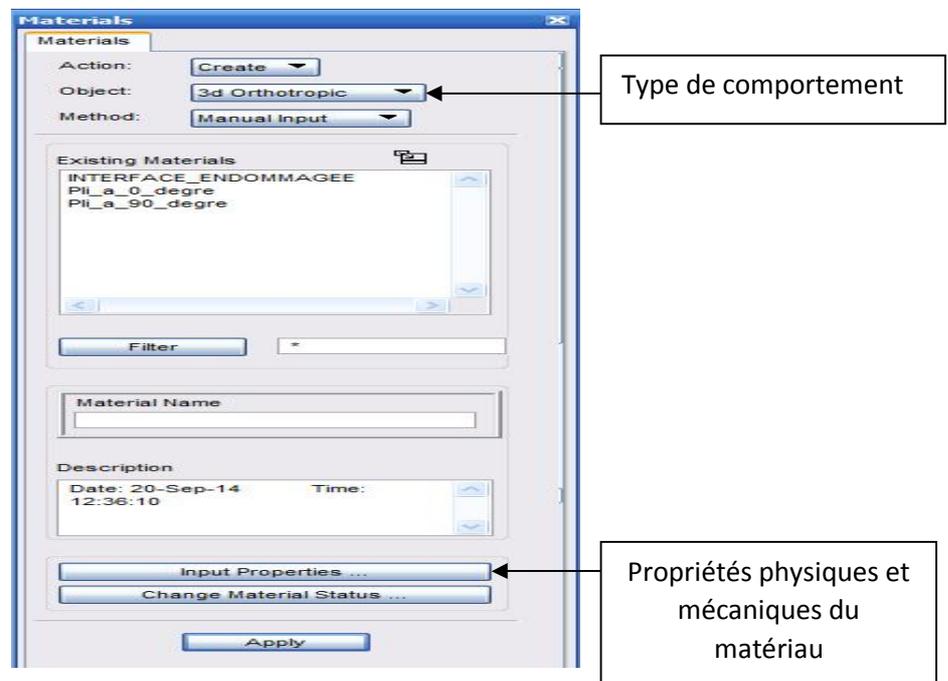


Figure 6 2: Fenêtre propriétés dans Patran.

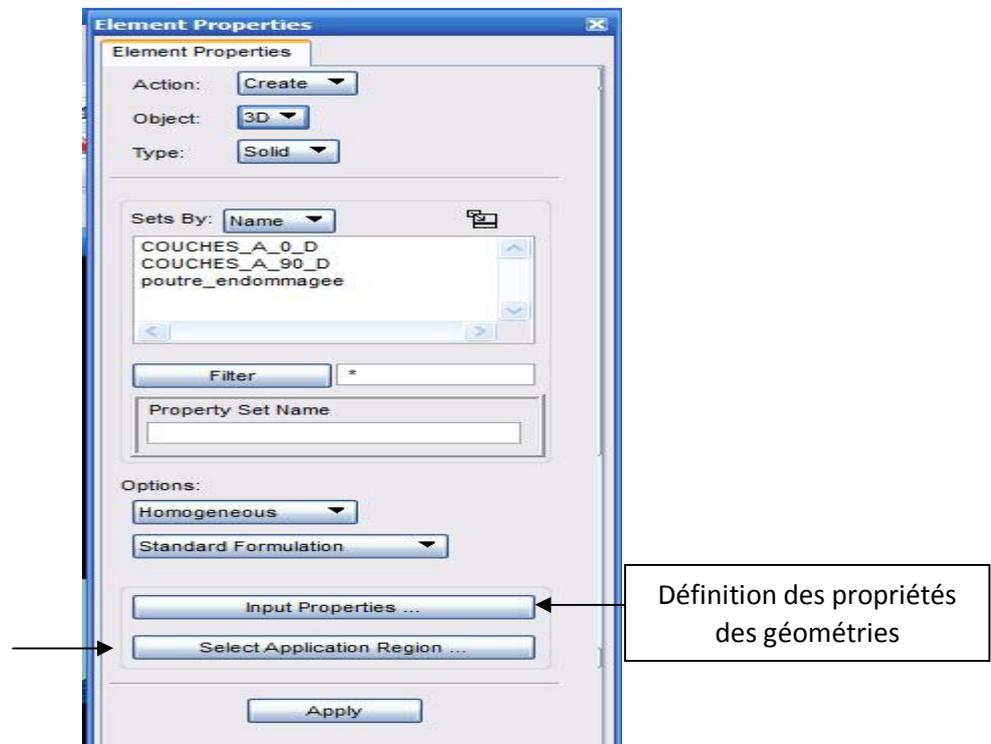


Figure 6 3: Fenêtre propriétés des solides dans Patran.

### 5.3 Discrétisation de la structure

Pour discrétiser la structure en éléments finis nous utilisons la fonction "Meshing" la procédure est:

- Déclarer le type éléments que nous allons utiliser. La discrétisation se fera automatiquement.

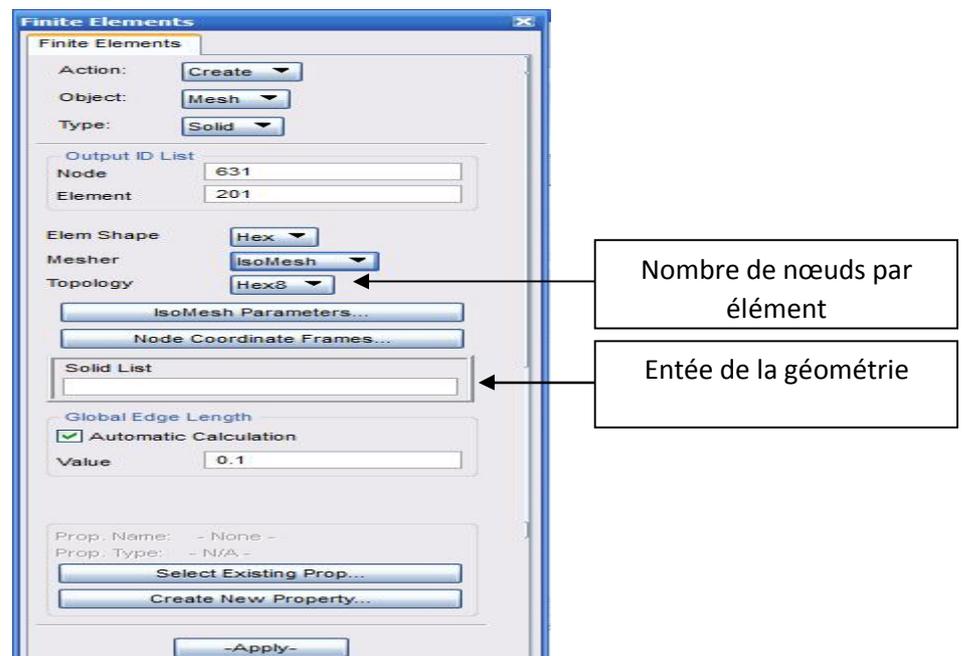


Figure 6 4: Fenêtre Meshing.

## 5.4 Conditions aux limites

Patran nous offre une interface très intuitive.

Notre structure se déplace dans le plan OXY; Donc nous devons déclarer deux conditions de déplacements. La fonction à utiliser est "Load / boundary conditions" de la manière suivante.

- Déclarer un déplacement en 2d avec un vecteur de translations  $T = [ , , 0]$  ceci va empêcher la translation suivant Z
- Déclarer un vecteur des rotations  $R = [0,0,]$  qui va autoriser seulement la rotation autour de Z.
- Appliquer ces conditions à toute la structure.

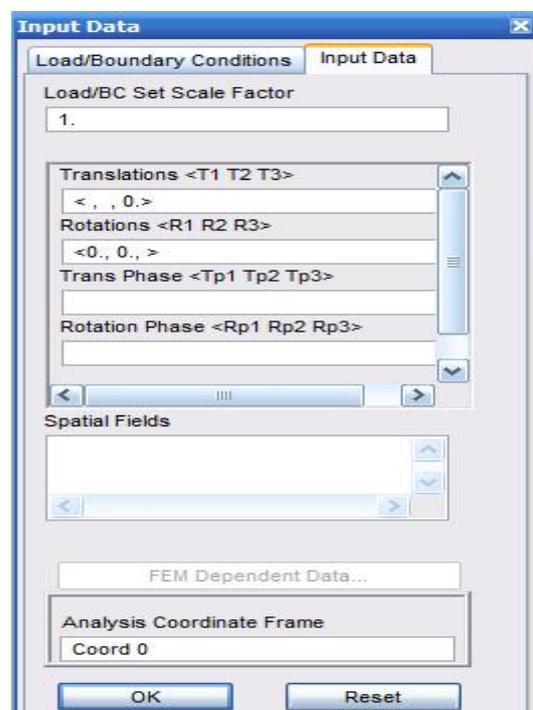


Figure 6 5: Vecteur déplacement en 2d.

- Déclarer un vecteur translation  $T = [0 0 0]$  et un vecteur rotation  $R = [0 0 0]$ , donc nous déclarons un encastrement.
- Appliquer à la surface au vecteur  $[0,0.009, 0.1]$ .

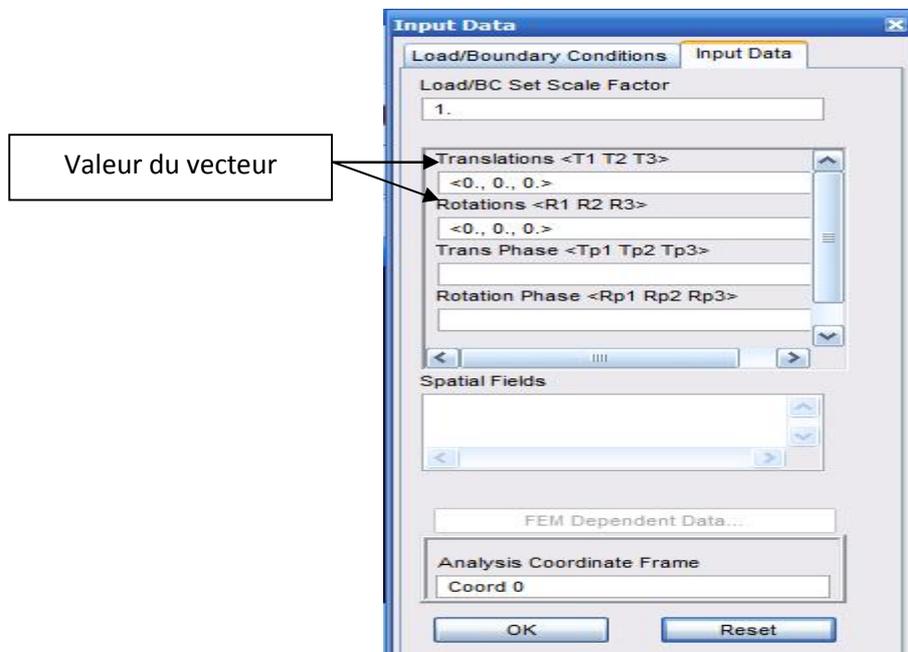


Figure 6 6: Vecteur encastrement.

## 5.5 Force d'excitation

- Appliquer une force d'excitation d'une valeur de  $F = -100\text{N}$  sur la structure à une distance de 900 mm de l'encastrement suivant la direction Y; Cette force est harmonique avec une fréquence variant de 0 Hz à 2000 Hz. La fonction à utiliser est toujours "Load / Boundary conditions".

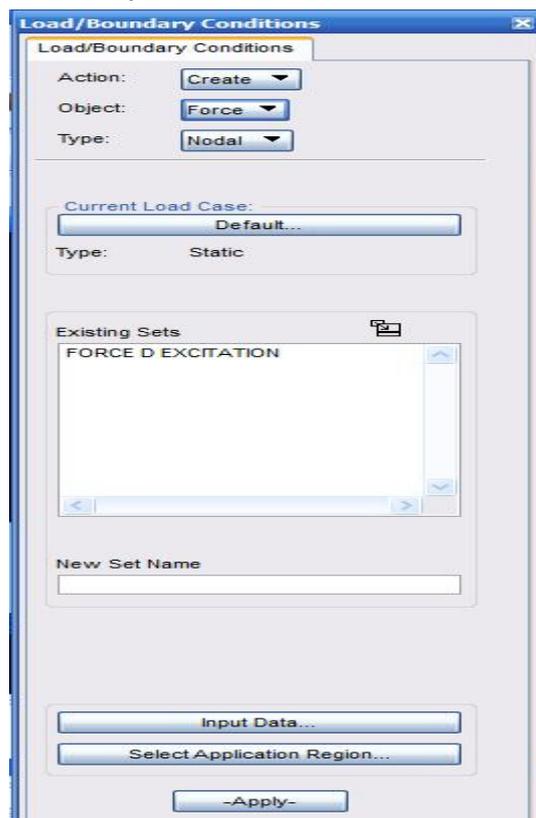


Figure 6 7: fenêtre de déclaration de la force d'excitation.

## 5.6 Analyse de la structure

Après avoir déclaré toutes les caractéristiques de la structure géométrie, propriétés physiques et mécaniques, Le type de discrétisation par éléments finis, les conditions aux limites, Le chargement extérieur

- Lancer l'analyse de la structure avec la fonction "Analyze"

Dans notre cas le résultat voulu est la réponse fréquentielle de la poutre.

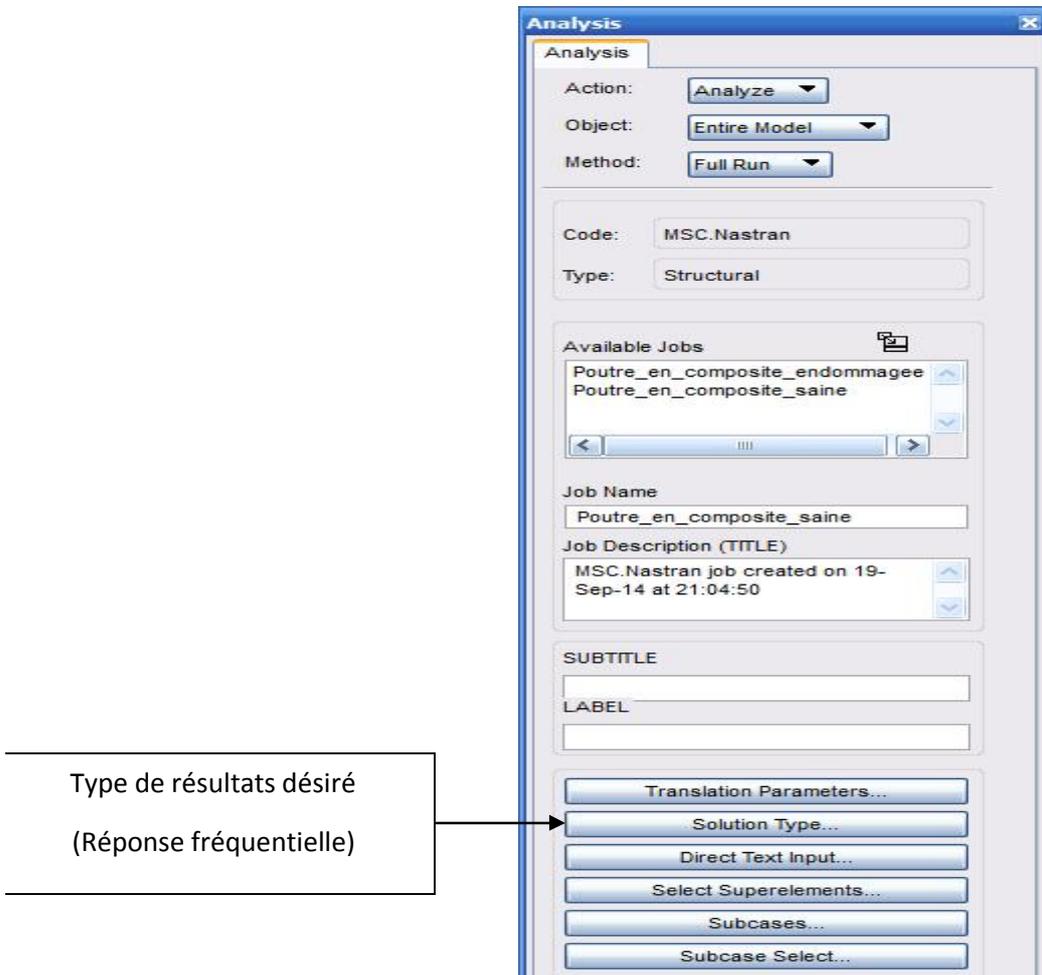


Figure 6 8: Fenêtre de la fonction Analyse.

## 5.7 Résultats

Le délaminage a été simulée en tuant (propriétés très faibles de l'ordre de ) l'élément correspondant au défaut dans l'interface entre les plis [40].

Les étapes pour créer une structure endommagée est la même que pour la poutre saine sauf que nous allons changer les caractéristiques mécaniques de quelque éléments de l'interface entre les plis. Et pour cela il faut:

- Créer les caractéristiques physiques et mécaniques du défaut. Les valeurs doivent être très petites.
- Appliquer les caractéristiques aux éléments considérés comme un délaminage.

## **6. Conclusion**

Patran est un logiciel de conception et d'analyse qui offre à l'ingénieur des possibilités très importants dans le cadre de la simulation sur ordinateur de structures. Cette solution software nous permet de diminuer de manière considérable le coût des essais sur les structures; Pour cela il comporte une interface très intuitive qui permet une prise en main rapide et efficace.

# Références bibliographiques

- [1] CARMA –Actualisation octobre, 2006, "Glossaire des matériaux composites"
- [2] Jean-Marie Berthelot, 2010, "Mécanique des matériaux et structures composites", *Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancés*, Le Mans, France.
- [3] Pongtorn PROMBUT, 2007, "Caractérisation de la propagation de délaminage des stratifiés composites multidirectionnels"
- [4] BREK Samir, 2012, " Modélisation numérique de la propagation de l'endommagement et de la rupture dans les matériaux composites stratifiés sous sollicitations thermomécaniques et cycliques"
- [5] G.FRAMEZELLE, F.LEPILLER, "Contrôle non destructif de structures composites pour l'aéronautique"
- [6] Centre technique des industries mécaniques, 1994, "les contrôles non destructifs généralités"
- [7] Doebling, S. W. Ferrar, C. R. and Prime, M. B., 1998, "A summary review of vibration-based damage identification methods" *The Shock and Vibration Digest*, 30(2), 91-105.
- [8] Rytter, A., 1993, "Vibration-based inspection of civil engineering structures," Ph.D. dissertation, Aalborg University, Denmark.
- [9] Adams, R. D., Cawley, P., Pye, C. J. and Stone, B. J., 1978, "A vibration technique for non-destructively assessing the integrity of structures," *Journal of Mechanical Engineering Science*, 20(2), 93-100.
- [10] Cawley, P. and Adams, R. D., 1979, "The location of defects in structures from measurements of natural frequencies," *Journal of Strain Analysis*, 14(2), 49-57.
- [11] Stubbs, N. and Osegueda, R., 1990, "Global non-destructive damage evaluation in solids," *Modal Analysis: the International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, 5(2), 67-79.
- [12] Stubbs, N. and Osegueda, R., 1990, "Global damage detection in solids: experimental verification," *Modal Analysis: the International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, 5(2), 81-97.

- [13] Friswell, M. I., Penny, J. E. T., and Wilson, D. A. L., 1994, "Using Vibration data and statistical measures to locate damage in structures," *Modal Analysis: the International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, 9(4), 239-254.
- [14] Friswell, M. I. and Penny, J. E., 1997, "The practical limits of damage detection and location using vibration data," *Proceedings of the 11th VPI & SU Symposium on Structural Dynamics and Control*, Blacksburg, VA, pp. 1-10.
- [15] Farrar *et al.*, 1994, "Dynamic characterization and damage detection in the I-40 bridge over the Rio Grande," *Los Alamos National Laboratory Report*, LA-12767-MS.
- [16] Armon, D., Ben-Haim, Y., and Braun, S., 1994, "Crack detection in beams by ranki-ordering of eigenfrequency shifts," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 8(1), 81-91.
- [17] Messina, A., Jones, A. and Williams, E. J., 1996, "Damage detection and localization using natural frequency changes," *Proceeding of the 14th International Modal Analysis Conference*, Orlando, FL, pp. 67-76.
- [18] Messina, A., Contursi, T. and Williams, E. J. and, 1997, "Multiple damage evaluation using natural frequency changes," *Proceeding of the 15th International Modal Analysis Conference*, Orlando, FL, pp. 658-664.
- [19] Nicholson, D. W. and Alnefaie, K. A., 2000, "Modal moment index for damage detection in beam structures," *Acta Mechanica*, 144(3-4), 155-167.
- [20] Chaudhari, T. D. and Maiti, S. K., 2000, "A study of vibration of geometrically segmented beams with and without crack," *International Journal of Solids and Structures*, 37(5), 761-779.
- [21] Chinchalkar, S., 2001, "Determination of crack location in beams using natural frequencies," *Journal of Sound and vibration*, 247(3), 417-429.
- [22] Jones, K. W. and Turcotte, J. S., 2001, "Finite element model updating using antiresonant frequencies," *Proceeding of the 19th International Modal Analysis Conference*, Kissimmee, FL, pp. 341-347.
- [23] Palacz, M. and Krawczuk, M., 2002, "Vibration parameters for damage detection in structures," *Journal of Sound and Vibration*, 249(5), 999-1010.
- [24] Moser P. and Moaveni B., 2011, "Environmental effects on the identified natural frequencies on the Dowling Hall Footbridge," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(2011), 2336-2357.
- [25] Allemang, R. J., 2002, "The modal assurance criterion (MAC): twenty years of use and abuse," *Proceedings of SPIE*, v. 4753, pp. 397-405.
- [26] West, W. M., 1984, "Illustration of the use of modal assurance criterion to detect structural changes in an orbiter test specimen," *Proceedings of the Air Force Conference on Aircraft Structural Integrity*, pp. 1-6.

- [27] Lieven, N. A. J. and Ewins, D. J., 1988, "Spatial correlation of mode shapes, the coordinate modal assurance criterion (COMAC)," *Proceeding of the 6th International Modal Analysis Conference*, Kissimmee, FL, pp. 690-695.
- [28] Ratcliffe, C. P., 1997, "Damage detection using a modified Laplacian operator on mode shape data," *Journal of Sound and Vibration*, 204(3), 505-517.
- [29] Khan, A. Z., Stanbridge, A. B. and Ewins, D. J., 1999, "Detecting damage in vibrating structures with a scanning LDV," *Optics and Lasers in Engineering*, 32(6), 583-592.
- [30] Wang, Z., Lin, R. M. and Lim, M. K., 1997, "Structural damage detection using measured FRF data," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 147(1-2), 187-197.
- [31] Mottershead, J. E., Kyprianou, A. and Ouyang, H., 2003, "Estimation of rotational frequency responses," *Mechanical and Corrosion Properties, A – Key Engineering Materials*, 245/246, 157-116.
- [32] Vanhoenacker, K., Schoukens, J., Guillaume, P. and Vanlanduit, S., 2004, "The use of multisine excitations to characterize damage in structures," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 18(1), 43-57.
- [33] Mehrisadat Makki Alamdari et al, 2014, "FRF-based damage localisation method with noise suppression approach"
- [34] S.C. Mohan, D.K. Maiti, D. Maity, 2014, "Structural assessment using FRF employing particle swarm optimisation"
- [35] Yang H.Z., Li H.S. and Wang S.Q., 2003, "Damage location of offshore platforms under ambient excitation", *China Ocean Engineering*, v. 17, pp. 495-504.
- [36] Brehm M., Zabel V. and Bucher C., 2010, "An automatic mode pairing strategy using an enhanced modal assurance criterion based on modal strain energies", *Journal of Sound and Vibration*, 329(2010), 5372-5392.
- [37] Dixit A. and Hanagud S., 2011, "Single beam analysis of damaged beams verified using a strain energy based damage measure", *International Journal of Solids and Structures*, 48 (2011), 592-602.
- [38] Li J. Wu B. Zeng Q.C. and Lim C.W., 2010, "A generalized flexibility matrix approach for structural damage detection", *Journal of Sound and Vibration*, 329 (2010), 4583-4587.
- [39] Kazemi S., Fooladi A. and Rahai A.R., 2010, "Implementation of the modal flexibility variation to fault identification in thin plates", *Acta Astronautica*, 66 (2010), 414-426.
- [40] Ouahabi A., Thomas M. et Lakis A.A." détection de fissures de respiration de fatigue par excitation harmonique et analyse temps fréquence" *Proceedings of the 24th seminar on machinery vibration, paper B8-* ISBN-2-921145-61-8, Montréal