



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master en Fabrication Mécanique et
Productique

**Caractérisation des matériaux composites par les méthodes
non destructives**

Proposé et encadré par :
M.Faci Youcef
Mme.Tahar Chaouche Karima

Réalisé par :
Rouab Mohamed Yacine
Ouhdadou Mohamed Lamine

Remercîment

En premier lieu nous remercions DIEU tout puissant de nous avoir donné la patience, la santé et la volonté pour achever ce travail.

Nous aimerons adresser plus qu'un merci pour notre encadreur M.FACI YUCEF et Mme TAHAR-CHAOUCHE KARIMA. Qui ont su nous partager leurs savoir-faire, leurs connaissances et leurs temps pour nous porter aide pendant et hors de leurs heures de travail.

Nos remerciements sont transmis après aux présidents, rapporteur et membres du jury qui nous ont fait l'honneur de vouloir évaluer ce travail.

En conclusion, Nous exprimons nos sincères reconnaissances aux personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail de notre formation

Dédicaces

A nos très chers parents Nous vous devons ce que nous sommes aujourd'hui, grâce à votre amour, votre patience et vos innombrables sacrifices.

Que ce modeste travail, soit pour vous une petite compensation et reconnaissance pour tout ce que vous avez fait.

Que Dieu, vous préserve et vous procure santé et longue vie afin que nous puissions à notre tour vous combler.

À nos très chers ami(e)s

En témoignage de l'amitié sincère qui nous lie et les bons moments passés ensemble. Nous vous dédions ce travail en vous souhaitons un avenir radieux et plein de réussites.

A tous ceux qui nous a aidé, soutenu et encouragé pour la réalisation de ce modeste travail

Liste des figures

Figure I-1 <i>Poutre chargée en traction. [2]</i>	7
Figure I-2 <i>Poutre chargée en flexion trois points.</i>	8
Figure I-3 <i>Organigramme des principales familles des matrices</i>	10
Figure II-1 <i>Principe du moulage au contact [8]</i>	22
Figure II-2 <i>Principe du moulage par projection simultanée</i>	22
Figure II-3 <i>Moulage sous vide</i>	24
Figure II-4 <i>Principe de moulage par injection de résine</i>	24
Figure II-5 <i>Principe de moulage par centrifugation</i>	25
Figure II-6 <i>Constitution d'un stratifié</i>	26
Figure II-7 <i>Exemple d'empilement symétrique quasi-isotrope [-45/90/45/0] °C</i>	27
Figure II-8 <i>Schématisation de l'effet miroir sur la stratification.</i>	27
Figure II-9 <i>Désignation du signe de l'orientation.</i>	28
Figure II-10 <i>Mécanismes d'endommagement observés dans un composite stratifié</i>	29
Figure II-11 <i>Exemple de fissuration matricielle.</i>	29
Figure II-12 <i>Décohésion fibre/matrice</i>	30
Figure II-13 <i>Rupture de fibre</i>	31
Figure II-14 <i>Délamination</i>	32
Figure II-15 <i>Vides</i>	32
Figure II-16 <i>Fissures dues à l'oxydation</i>	32
Figure II-17 <i>Porosités</i>	33
Figure II-18 <i>Mécanismes d'endommagement dans les stratifiés</i>	34
Figure III-1 <i>Le principe de la tomographie : a) Acquisition d'une série de projections suivant différents angles de vue. b) Un volume reconstruit de l'objet est obtenu à partir de ces projections grâce à un algorithme de reconstruction.</i>	38
Figure III-2 <i>Le détecteur présentant une géométrie a) en éventail et b) conique</i>	38
Figure III-3 <i>Principe de la détection de la propagation de défauts par émission acoustique [11]</i> ..	40
Figure III-4 <i>Propagation d'ondes longitudinales</i>	41
Figure III-5 <i>Propagation d'une onde de cisaillement</i>	42
Figure III-6 <i>Onde de Rayleigh</i>	43
Figure III-7 <i>Ondes de Lamb : a) symétrique, b) antisymétrique [Roy99]</i>	44
Figure III-8 <i>Courbes de dispersion pour une plaque d'aluminium</i>	44
Figure III-9 <i>Dispositif expérimental de suivi in-situ de l'endommagement</i>	45
Figure III-10 <i>Etat de référence et état déformé liés par un déplacement et une déformation homogène : méthode de corrélation d'images numériques.</i>	47

Liste des tableaux

Tableau I-1 <i>Caractéristiques des résines thermodurcissables et thermoplastiques [5]</i>	12
Tableau I-2 <i>propriétés modifiées par l'incorporation d'une charge</i>	17
Tableau II-1 <i>Tableau des avantages et inconvénients du moulage sous vide</i>	23

Sommaire

Chapitre I. GENERALITE SUR LES MATERIAUX COMPOSITES.....	2
I.1. Matériaux composites	3
I.1.1. Définition.....	3
I.2. Caractéristiques générales.....	3
I.3. Les différents types des matériaux composites	4
I.3.1. Composites à matrice organique (CMO).....	4
I.3.2. Composites à matrice céramique (CMC)	4
I.4. Classification des matériaux composites	5
I.4.1. Classification suivant la forme des constituants	5
I.4.2. Classification suivant la nature des constituants.....	6
I.5. Application des matériaux composites.....	6
I.5.1. Caractéristiques mécaniques spécifiques	6
I.5.2. Caractéristiques mécaniques des matériaux	9
I.5.3. Les matériaux composites.....	9
I.6. Eléments Constituants d'un matériau composite	9
I.6.1. Introduction.....	9
I.6.2. Matrice	10
I.7. Renfort	15
I.7.1. Charges particulières renforçantes.....	15
I.7.2. Charges particulières inertes.....	16
I.7.3. Renforts fibreux.....	16
I.7.4. Interface charge/ matrice	17
Chapitre II. MISE EN ŒUVRE DES MATERIAUX COMPOSITES	19
II.1. Introduction	20
II.2. Les principaux types de fibre.....	20
II.2.1. Les fibres de verre.....	20
II.2.2. Les fibres de carbone	20
II.2.3. Fibre d'aramide.....	20
II.2.4. Les fibres métalliques ou céramiques.....	21
II.2.5. Les microbilles	21
II.3. Procédés d'élaborations des matériaux composites.....	21
II.3.1. Moulage sans pression.....	21

II.3.2.	Moulage sous vide	22
II.3.3.	Moulage par projection de résine	24
II.3.4.	Moulage par centrifugation.....	24
II.4.	Structure des matériaux composites.....	25
II.4.1.	Les monocouches.....	25
II.4.2.	Sandwichs.....	25
II.4.3.	Stratifié.....	26
II.5.	Développement des mécanismes et processus de rupture.....	33
II.6.	La loi de mélange pour les composites stratifiés	34
Chapitre III.	LES TECHNIQUE DE DETECTION DE L'ENDOMMAGEMENT.....	36
III.1.	Introduction	37
III.2.	Les différentes techniques de contrôle non destructif.....	37
III.2.1.	La tomographie X.....	37
III.2.2.	Principe de la tomographie	37
III.3.	Émission acoustique	39
III.4.	Ultrason.....	40
III.4.1.	Les ondes de volume.....	40
III.4.2.	Les ondes longitudinales	41
III.4.3.	Les ondes transversales	42
III.4.4.	Les ondes de surfaces et de plaques, les ondes guidées	42
III.4.5.	Les ondes de surfaces : les ondes de Rayleigh	43
III.4.6.	Les ondes de plaques : les ondes de Lamb.....	44
III.4.7.	Avantages et inconvénients d'un capteur ultrason	45
III.5.	Une méthode optique de suivi de l'endommagement in-situ	45
III.6.	La technique de corrélation d'images	46
III.6.1.	Principe de la technique de corrélation d'images	47
III.7.	Analyse Rx	49
III.7.1.	Principe de la méthode	49
III.7.2.	Les avantages et les inconvénients de l'analyse Rx	50

يتمثل عملنا في تطوير بحث كتابي حول المواد المركبة بشكل عام وآليات تلفها. الكلمات المفتاحية: المواد المركبة، التلف، الاختبار غير المتلف.

Résumé

notre travail consiste a élaborer une recherche bibliographique sur les matériaux composites en générales et leur mécanismes d'endommagements.

Les mots clés : Matériaux composites ;endommagement ;Contrôle non destructif

Abstract

Our work consists in developing a bibliographic research on composite materials in general and their damage mechanisms.

Keywords: Composite materials; damage; Non-destructive testing.

INTRODUCTION GENERALE

Un matériau composite dérive de l'association hétérogène d'au moins deux matériaux aux propriétés distinctes. De cette association résulte un nouveau matériau qui pourra combiner par exemple la plasticité d'une matrice polymère et la haute résistance de fibres de renfort. La matrice a pour but d'assurer la cohésion globale du matériau, de maintenir la géométrie des renforts souhaités par le constructeur et surtout de transmettre aux renforts les contraintes imposées à la structure. Cependant, en liaison avec leurs processus de production particuliers et leurs conditions d'utilisation très spécifiques et de plus en plus exigeantes, ces matériaux nécessitent un contrôle de leur état de santé particulièrement minutieux. En effet, des défauts (porosité, microfissuration, vieillissement prématuré) peuvent apparaître dès la mise en forme si les conditions de température, de pression ou d'humidité sont mal contrôlées ou si les conditions de stockage des composants de base n'avaient pas été satisfaisantes. Il peut également survenir des erreurs dans la préparation des échantillons qui risquent d'avoir des conséquences particulièrement néfastes lors de l'utilisation ultérieure du composite. Par exemple, le mauvais alignement des fibres dans un composite unidirectionnel entraîne une baisse de la résistance mécanique dans la direction de la contrainte uni-axiale pour laquelle ce composite avait été optimisé. Ou encore, un mauvais empilement de couches pré-imprégnées dans un composite stratifié peut faire apparaître un degré d'anisotropie supérieur à celui initialement prévu. Pendant leur utilisation, les matériaux composites et plus particulièrement les composites aéronautiques subissent des agressions à l'origine d'une large variété d'endommagements, qui sont classés en deux catégories principales: Des défauts microstructuraux répartis de façon homogène, dus à l'exposition à l'humidité (vieillessement hygrothermique) ou à des cycles de température (fatigue thermique). Il peut s'agir de microfissurations matricielles, de rupture de fibres, de décohésions à l'interface entre fibre et matrice. Des défauts macroscopiques localisés, dus à la fatigue mécanique, à des impacts balistiques (choc en vol avec des micrométéorites, oiseaux ...) ou à des impacts basse vitesse (chute d'objet lors de maintenance). Ces événements entraînent des ruptures de fibres, des ruptures de la matrice et, dans le cas des matériaux stratifiés, des délaminages aux interfaces entre plis. Même de faible étendu, ces dommages peuvent servir de précurseurs à un endommagement qui va croître avec la répétition des sollicitations imposées à la structure en service, et éventuellement conduire à sa ruine totale. Il est donc indispensable de recourir au CND systématique des matériaux composites depuis leur polymérisation jusqu'à la fin de leur cycle de vie.

**Chapitre I. GENERALITE SUR LES MATERIAUX
COMPOSITES**

I.1. Matériaux composites

I.1.1. Définition

Les matériaux composites sont des matériaux solides constitués de l'assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles et de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'association confère à l'ensemble des propriétés qu'aucun des composants pris séparément. [1] Le renfort généralement de nature fibreuse permet de supporter la charge de la structure, réduit les contraintes thermiques et assure la rigidité et la résistance macroscopique. La matrice permet de lier le renfort, assurer une protection face aux agents extérieurs et transférer les charges au renfort via la liaison entre la fibre et la matrice.

I.2. Caractéristiques générales

D'une manière générale, un matériau composite est un produit constitué d'au moins deux matériaux – l'un étant un renfort et l'autre un liant (ou matrice) unissant les deux matériaux.

Il existe de nombreux produits composites fabriqués avec plus de deux matières premières. Ces matériaux ne sont pas miscibles et possèdent des caractéristiques dissemblables.

La quantité, la position et l'orientation des renforts ainsi que la sélection de la matrice sont des aspects critiques de la conception du produit et de son développement. Ces paramètres doivent être optimisés pour améliorer constamment le produit. Les propriétés des matériaux composites résultent :

- Des propriétés des matériaux constituants
- De leur distribution géométrique
- De leur interaction

Ainsi, pour accéder à la description d'un matériau composite, il sera nécessaire de spécifier:

- La géométrie du renfort, sa distribution
- La nature de l'interface matrice/ renfort

Il existe deux types de matériaux composites :

- les composites grandes diffusions (GD)
- les composites hautes performances (HP) Les composites GD

I.3. Les différents types des matériaux composites

I.3.1. Composites à matrice organique (CMO)

Il s'agit, de loin, des composites les plus répandus : ce sont en effet les seuls composites ayant, pour beaucoup d'entre eux, des coûts unitaires suffisamment réduits pour pouvoir être produits en grandes séries. Plus précisément, on distingue généralement deux types de CMO :

- Les composites à grande diffusion, peu coûteux et représentant près de 95% des CMO fabriqués, utilisés pour toutes sortes de pièces faiblement sollicitées ;
- Les composites à haute performance, plus onéreux mais présentant des qualités mécaniques supérieures, notamment employés dans l'aéronautique, le nautisme, les sports et loisirs ou encore la construction industrielle.

I.3.2. Composites à matrice céramique (CMC)

Beaucoup moins répandus que leurs homologues à matrice organique en raison d'un coût élevé, les CMC s'adressent aux applications à très haute température. Ils sont principalement utilisés dans l'industrie spatiale et l'aéronautique militaire, ainsi que pour la conception d'organes haut de gamme comme des disques ou plaquettes de freins .(a) (b) (c) Quelques applications des CMC : (a) la tuyère d'un moteur spatial , (b) le disque à aubes d'une turbine, (c) un disque de frein haut de gamme .Les céramiques possèdent de nombreux atouts pour de telles applications : elles peuvent résister à des températures très élevées, sont plus légères que de nombreux métaux, et présentent une bonne stabilité chimique. Malheureusement, leur grande fragilité limite fortement leur domaine d'utilisation. Le principe des CMC est donc de rendre les céramiques moins cassantes en leur donnant une structure composite, c'est-à-dire en les façonnant sous forme de renforts et d'une matrice.

Comme expliqué dans la ressource « Matériaux composites et structures composites », cela conduit à une meilleure résistance à la rupture, pour deux raisons :

- Les fibres ayant un diamètre microscopique, il est possible de les fabriquer avec très peu de défauts, ce qui conduit à des contraintes de rupture plus élevées ;
- Lorsque le composite se dégrade, les fissures ont tendance à suivre les interfaces situées entre les fibres et la matrice au lieu de se propager dans les fibres ; au lieu de rompre brutalement, le matériau se « désassemble » donc progressivement. Afin de ralentir le plus

possible la rupture, les matrices céramiques possèdent généralement une structure multicouches: la matrice est faite de plusieurs couches superposées, ce qui permet de multiplier les interfaces et donc les déviations des fissures. Tout ceci fait que les CMC sont beaucoup moins fragiles et beaucoup plus tenaces que les céramiques massives, et peuvent donc être utilisés dans des pièces mécaniques.

I.4. Classification des matériaux composites

La classification des composites peut être effectuée selon la forme des composants ou suivant leurs natures

I.4.1. Classification suivant la forme des constituants

Une manière simple consiste à les classer par les formes des renforts (selon leurs morphologies). Les composites sont donc divisés en quatre catégories suivantes :

• **Composites à renforts de particules** : Le renfort est considéré comme une particule si toutes ses dimensions sont approximativement égales et petites devant les autres dimensions du matériau. Les particules dures sont dispersées aléatoirement dans la matrice moins rigide.

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.

Composites à renforts de fibres : Une fibre a une longueur bien supérieure aux dimensions de la section transversale. Ce type de composites peut être divisé selon les renforts : en fibres discontinues (courtes) ou en fibres continues (longues).

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.

I.4.2. Classification suivant la nature des constituants

•Composites à matrice organique :(résine, charges) avec

- Fibres minérales : verre, carbone, etc.
- Fibres organiques : Kevlar, polyamides, etc.
- Fibres métalliques : bore, aluminium, etc.

•Composites à matrice métallique :(alliages légers et ultralégers d'aluminium, de magnésium, de titane), 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 (BSiC).

•Composites à matrice minérale : (céramique), avec :

- Des fibres métalliques : bore ;
- Des particules métalliques : cermets ;
- Des particules minérales : carbures, nitrures, oxydes réfractaires.

I.5. Application des matériaux composites

Nous avons indiqué l'aptitude des matériaux composites à être conçus à la carte. D'autres raisons justifient leur développement, et nous en donnons ici quelques éléments.

I.5.1. Caractéristiques mécaniques spécifiques

Considérons une poutre chargée en traction par une charge **F** (figure 1.1).

La relation entre la charge et l'allongement Δl de la poutre est :

$$\frac{ES}{l} = \Delta l \quad (I-1)$$

où **E** est le module d'Young du matériau, **S** la section de la poutre et **l** sa longueur. La rigidité **K = ES/l** caractérise les performances mécaniques de la poutre dans le domaine élastique. Dans le cas de deux matériaux 1 et 2, le rapport des rigidités est :

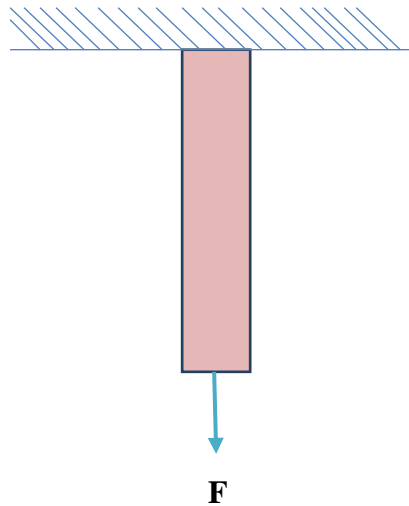


Figure I-1 Poutre chargée en traction. [2]

Domaine élastique. Dans le cas de deux matériaux 1 et 2, le rapport des rigidités est :

$$\frac{K1}{K2} = \frac{E1S1}{E2S2} \frac{l2}{l1} \quad \text{(I-2)}$$

et le rapport des masses des deux poutres s'écrit :

$$\frac{m1}{m2} = \frac{S1l1}{S2l2} \frac{\rho1}{\rho2} \quad \text{(I-3)}$$

en introduisant les masses volumiques des matériaux. La combinaison des relations (I-4) et (1.3) conduit à :

$$\frac{K1}{K2} \frac{E1/\rho1}{E2/\rho2} \{l2/l1\}^2 \quad \text{(I-5)}$$

Dans une structure, l'encombrement des éléments est donné, et la comparaison des rigidités doit se faire à longueurs identiques. Soit, pour \$l_1 = l_2 = l\$:

$$\frac{K1}{K2} = \frac{E1/\rho1}{E2/\rho2} \frac{m1}{m2} \quad \text{(I.5)}$$

Enfin, l'utilisation des matériaux dans le domaine de l'espace et de l'aviation, et au-delà dans les domaines du sport, du bâtiment, etc., a conduit à opérer une comparaison des performances mécaniques des structures à masses égales. Pour \$m_1 = m_2\$, le rapport des rigidités s'écrit :

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{E_1/\rho_1}{E_2/\rho_2} \quad (1.6)$$

Ainsi, il apparaît que le meilleur matériau est celui qui possède la valeur de E/ρ la plus élevée, conduisant à la valeur de la rigidité la plus élevée de la poutre. Le terme E/ρ est appelé le module spécifique d'Young du matériau. Un calcul semblable peut être mené dans le cas d'une poutre en flexion trois points soumise à une charge F (figure 1.2).

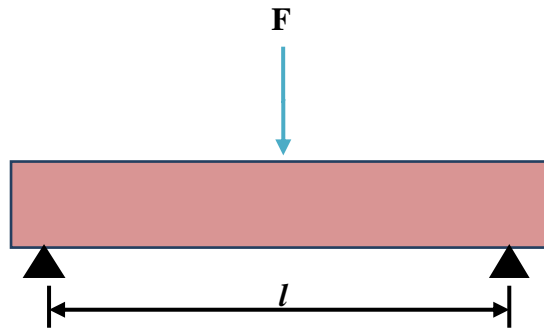


Figure I-2 Poutre chargée en flexion trois points.

La relation charge-flèche s'écrit :

$$F = 48 \frac{El}{l^3} f = K f \quad (1.7)$$

Où f est la flèche de la poutre, I le moment d'inertie de sa section droite et l la distance entre appuis. Le coefficient K est la rigidité de la poutre sollicitée en flexion. Dans le cas d'une poutre cylindrique de rayon r .

— le moment est donné par $I = \frac{\pi}{4} r^4$

— la masse s'écrit $m = \rho \pi r^2 l$

Il en résulte que, dans le cas de deux matériaux 1 et 2, le rapport des rigidités s'écrit :

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{E_1/\rho_1^2}{E_2/\rho_2^2} \left(\frac{m_1}{m_2} \right)^2 \left(\frac{l_2}{l_1} \right)^5 \quad (1.8)$$

Il apparaît donc ici que le meilleur matériau est celui qui possède la valeur E/ρ^2 la plus élevée. Des raisonnements analogues peuvent être repris pour diverses formes de structures: plaques, coques, structures complexes. La conclusion est toujours de même nature : à masse et encombrement identiques, les constructions les plus rigides sont celles qui possèdent la masse volumique la plus faible. De même, la comparaison des résistances à la rupture conduit à des conclusions semblables sur les contraintes à la rupture. Ainsi, il est devenu usuel de comparer les performances mécaniques des matériaux en considérant

les valeurs spécifiques (rapportées à la masse volumique) du module et de la contrainte à la rupture.

I.5.2. Caractéristiques mécaniques des matériaux

Partant des considérations précédentes, il reste à rechercher les matériaux les plus performants: module élevé, masse volumique faible. Il est évident également que l'élaboration de ces matériaux ne doit pas aboutir à un coût prohibitif, qui dépend d'ailleurs du domaine d'utilisation. Par exemple, dans le domaine de l'espace, de l'aviation, de hautes performances sont recherchées, et le coût matériau a une incidence faible. Par contre, dans le domaine de l'automobile, l'amélioration des performances ne peut pas se faire au détriment du coût du produit fini.

I.5.3. Les matériaux composites

Du fait de leurs faibles sections (diamètres de 10 à 20 μm), les fibres ne peuvent toutefois être utilisées directement dans des applications mécaniques. D'où l'idée de les incorporer dans une matrice polymère pour constituer un composite à fibres. La matrice a alors diverses fonctions : lier les fibres entre elles, transférer les charges mécaniques aux fibres, protéger les fibres de l'environnement extérieur, etc. Ainsi est né un nouveau matériau, modulable et présentant des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées.

I.6. Eléments Constituants d'un matériau composite

I.6.1. Introduction

Un matériau composite est constitué d'une matrice et d'un renfort, constitué de fibres. La matrice est elle-même composée d'une résine (polyester, époxyde, etc.) et de charges dont le but est d'améliorer les caractéristiques de la résine tout en diminuant le coût de production. D'un point de vue mécanique, l'ensemble résine charges se comporte comme un matériau homogène, et le composite est considéré comme constitué d'une matrice et d'un renfort. Le renfort apporte au matériau composite ses performances mécaniques élevées, alors que la matrice a pour rôle de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de protéger les fibres vis-à-vis des agressions extérieures.

I.6.2. Matrice

Les matrices jouent un rôle important dans la structure des pièces composites :

- Elles maintiennent la disposition géométrique des fibres,
- Elles apportent au composite ses caractéristiques chimiques et thermiques
- Elles transfèrent les sollicitations mécaniques. [3]

De plus elle permet de transférer les charges entre les fibres et de les protéger contre l'environnement. Les performances générales du composite sont très liées à la nature de la matrice, notamment pour la tenue à long terme.

Comme décrit sur la figure 1.3, il existe différentes catégories de matrices qui regroupent les matrices thermodurcissables, thermoplastiques, céramiques et métalliques. Le choix d'une matrice pour une application donnée se base sur différentes propriétés :

- **Les propriétés d'adhésion et de compatibilité avec les renforts.**
- **Les propriétés mécaniques et de résistance à la fatigue** : si les composites montrent des propriétés en fatigue comparables à celles des métaux, leur résistance dépend des propriétés de ténacité des matrices.
- **L'absorption d'eau** : selon la nature des composants, une sensibilité à la présence d'eau plus ou moins importante implique un vieillissement prématuré de la matrice.

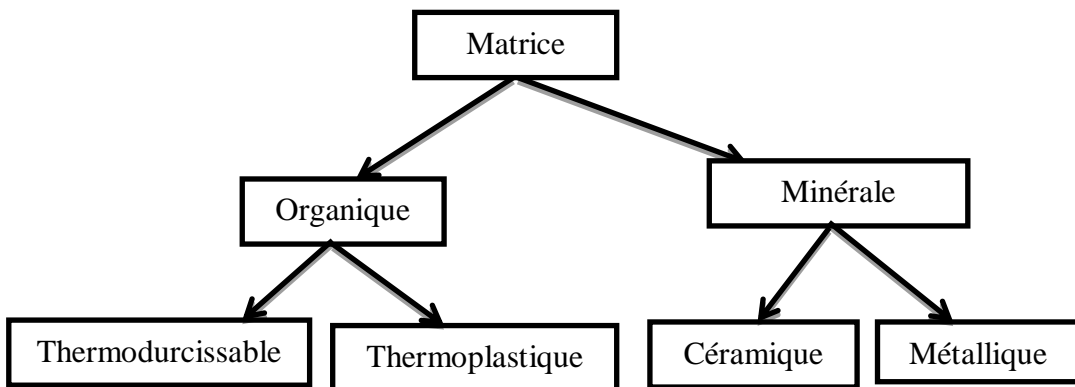


Figure I-3 Organigramme des principales familles des matrices

I.6.2.1. Matrices polymères

Le rôle de la matrice polymère est de recevoir les renforts, répartir les contraintes, apporter la tenue de la structure et donner la forme désirée au composite. On peut utiliser des polymères thermoplastiques ou des polymères thermodurcissables. Ces deux types de polymères diffèrent en leur structure moléculaire aussi bien que leur comportement. Ces polymères sont souvent modifiés par l'addition des charges ou l'ajout des adjuvants pour des raisons économiques telles que le coût, mais aussi pour répondre à certaines exigences techniques telles que la mise en œuvre et les propriétés chimiques, physiques et mécaniques.

I.6.2.1.1. Résines thermoplastiques (TP)

Les thermoplastiques, qui sont des composés formés par addition et fondent lorsqu'on les chauffe. Ce sont des matières transformables à l'état fondu. Dans la plupart des procédés de fabrication, les thermoplastiques sont chauffés, puis formés par moulage, injection, extrusion ou thermoformage, avant d'être refroidis afin que le produit fini conserve sa forme. On trouve aujourd'hui de nombreux types de thermoplastiques offrant une vaste gamme de propriétés intéressantes. On peut les rendre aussi souples que le caoutchouc, aussi rigides que le métal et le béton, ou aussi transparents que le verre, pour un usage dans de nombreux produits de tuyauterie et autres composants. Certains peuvent supporter des températures atteignant 315 °C. D'autres conservent leurs propriétés jusqu'à -73 °C.

Ils ne s'oxydent pas, ont une haute résistance à la corrosion et sont d'excellents isolants thermiques et électriques. De par leur légèreté, leur haute résistance mécanique et leur résistance aux effets de l'environnement, les thermoplastiques constituent un matériau idéal pour de très nombreuses applications. [4]

Parmi les matrices thermoplastiques, on trouve :

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

Les matrices thermoplastiques possèdent de faibles propriétés mécaniques. Leur renforcement (le plus souvent par des fibres courtes) confère une meilleure résistance mécanique, une bonne stabilité dimensionnelle, ainsi qu'un accroissement de la tenue en température.

I.6.2.1.2. Résines thermodurcissables (TD)

Les thermodurcissables sont jusqu'à présent les plus utilisées dans l'industrie des composites à matrice organique du fait de leurs propriétés mécaniques et de leur stabilité une fois transformés. Contrairement aux thermoplastiques, un thermodurcissable durcit au cours de la polymérisation lors de la montée en température en formant un réseau tridimensionnel de monomères liés par liaisons covalentes. La transformation est unique et donne lieu à une pièce définitive. Les matériaux thermodurcissables ont une stabilité thermique beaucoup plus élevée en comparaison avec les matériaux thermoplastiques, un grand avantage pour des applications d'une demande très élevée.

Parmi les matrices thermodurcissables, on trouve :

- **Les résines polyesters.**
- **Les résines phénoliques.**
- **Les résines époxydes.**

Matrice	Thermoplastiques TP	Thermodurcissable TD
Etat de base	Solide prêt à l'emploi	Liquide visqueux à polymériser
Stockage	Illimité	Réduit
Mouillabilité renfort	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 recyclé en charge
Conditions de travail	Propreté	Emanation pour « méthode d'humidité »

Tableau I-1 *Caractéristiques des résines thermodurcissables et thermoplastiques [5]*

I.6.2.1.3. Les résines thermostables

Les résines thermostables se distinguent des autres résines, précédemment considérées, essentiellement par leurs performances thermiques qui conservent leurs propriétés mécaniques pour des températures plus élevées que 200°C. Dans la pratique nous retrouvons pour ces résines les deux grandes familles des résines thermoplastiques et thermodurcissables. Les résines thermostables sont développées surtout dans les domaines de l'aviation et de l'espace, où les laboratoires cherchent à mettre au point de nouvelles résines. Parmi les résines thermostables, les résines bismaléimides et poly-imides sont les plus utilisées. Les résines bismaléimides sont des résines dont le réseau est élaboré à des températures de 180 à 200°C. Les procédés de moulage sont identiques à ceux des composites à matrice thermodurcissable de type polyester ou époxyde. Les résines poly-imides sont apparues sur le marché vers 1970. Ce sont des résines à haute résistance thermique, mais de prix très élevé. Ces résines permettent d'obtenir des composites de résistance supérieure, à 250 °C, à la résistance de l'aluminium.

I.6.2.1.4. Résines époxydes

➤ Définition

Les résines époxydes sont des matériaux de polymère souples caractérisé par la présence de deux ou plus des groupes époxydes dans leur structure moléculaire.

Le terme « résine époxy » peut faire double emploi. En effet, il peut être utilisé pour désigner à la fois la résine époxy de départ (pré-polymère) et la résine qui s'est durcie lors de sa réticulation. Il faut donc distinguer ces deux cas en utilisant les termes « pré-polymère époxy » ou « composé(poly)époxydique » pour le pré-polymère et les termes « résine », « résine époxy », « résine époxy réticulée » ou « résine époxy durcie » pour le matériau résultant de la polymérisation du pré-polymère.

Les poly-époxydes sont des résines thermodurcissables qui contiennent, dans leur molécule, deux ou plusieurs fonctions EPOXY

➤ Principales familles de poly-époxydes

- le diglycidyléther du bisphénol A (DGEBA) ; c'est la résine la plus utilisée (parfois mélangée à des résines plus performantes pour améliorer sa souplesse ou sa mise en œuvre)

C'est le premier pré-polymère époxyde apparu sur le marché et le plus répandu puisqu'il constitue à lui seul 95% de la production mondiale.

- les diglycidyléther du bisphénol A et du tétrabromobisphénol A qui ont un comportement au feu amélioré par rapport au DGEBA.

- les Novolaques (EPN) présentant une meilleure tenue en température et une résistance chimique accrue.

- les époxydes cyclo-aliphatiques : avec des propriétés mécaniques, électriques, et de résistance au vieillissement supérieures. Ces résines sont très intéressantes pour les formulations bicomposantes avec le durcisseur anhydride, soit seules, soit mélangées à la DGEBA.

➤ Résine époxyde réticulée

Dans la plupart des cas, pour obtenir la résine époxyde réticulée, on fait réagir le pré-polymère avec une molécule qu'on appelle un durcisseur. Ce dernier ouvre le cycle époxy et réagit avec le pré-polymère pour relier les chaînes en un réseau tridimensionnel. Le choix de durcisseurs est aussi très vaste. Il se fait en fonction des conditions de mise en œuvre et des propriétés souhaitées (viscosité du mélange réactif, la vitesse de réaction, le degré de réticulation, les propriétés mécaniques). Les durcisseurs les plus fréquents sont les amines telles que les polyamines aliphatiques et les polyamines aromatiques.

➤ Mécanismes de réaction entre époxyde et durcisseur

Le processus de formation du réseau consiste en une réaction chimique dans laquelle les groupes époxyde du réseau pré-polymère réagissent avec un durcisseur pour former un réseau tridimensionnel (la fonctionnalité d'un réactif étant supérieure à 2). Une large variété de durcisseurs pour les pré-polymères époxyde est disponible et leurs choix dépendent du procédé et des propriétés visées. Les amines sont les agents les plus employés pour réagir avec les époxydes, la réactivité des amines primaires et secondaires avec l'époxyde est très élevée tandis que les amines tertiaires sont généralement utilisées comme catalyseurs.

Un réseau tridimensionnel peut être obtenu à partir de plusieurs pré-polymères époxydes et de durcisseurs amines. La réticulation peut être effectuée à température ambiante en employant une diamine aliphatique ou cyclo-aliphatique, mais une température comprise entre 100 et 180°C est nécessaire pour une diamine aromatique.

I.7. Renfort

Les renforts sont les éléments qui contribuent majoritairement à la réponse mécanique du composite. L'incorporation d'une charge au sein d'une matrice permet d'agir sur plusieurs propriétés du matériau composite formé : propriétés physico-chimiques (résistances aux produits acido-basiques...), propriétés mécaniques (résistances aux chocs, à la compression, aux cisaillements...), propriétés électriques (amélioration de la conductivité ou de la résistance) facilité de mise en œuvre, réduction du coût...

Différentes natures de charge peuvent être utilisées. On distingue trois grandes familles :

- Les charges minérales telles que le carbonate de calcium, le sulfate de calcium, qui sont souvent utilisées comme additif permettant de diminuer le coût de revient du matériau. Elles permettent aussi de modifier certaines propriétés mécaniques.
- Les charges métalliques qui permettent de conférer au matériau des propriétés électriques, ou d'améliorer leur comportement thermique.
- Les charges organiques (souvent des polymères) sont, la plupart du temps, utilisées pour améliorer les propriétés mécaniques et faciliter la mise en œuvre du matériau.

Les différentes familles de charges peuvent être décomposées et classées suivant leur type

Les charges particulières qui se divisent en deux sous-familles :

- Les charges renforçantes qui ont une action bénéfique sur les propriétés de la matrice.
- Les charges inertes qui n'ont pas d'effet sur les propriétés mais qui permettent de diminuer le prix de revient du mélange.

Les charges fibreuses utilisées uniquement pour l'amélioration des propriétés mécaniques

I.7.1. Charges particulières renforçantes

Elles sont constituées de très fines particules (sphères, écailles, paillettes, ...), leur intérêt principal réside dans leur géométrie qui répartit régulièrement les efforts et évite les concentrations des contraintes, lorsqu'elles sont bien dispersées dans la matrice.

Dans ce type de charge, les plus utilisées sont les billes de verres, creuses ou non, de diamètre compris entre 10 et 150 μm . N'étant pas poreuses, elles n'absorbent pas la matrice et permettent donc de ne pas trop faire augmenter la viscosité ; elles améliorent la

résistance aux contraintes de flexion et de compression, la dureté superficielle et permettent aussi de diminuer la masse volumique du mélange.

Elles ont la faculté d'augmenter les propriétés électriques des matériaux, mais aussi d'améliorer la rigidité mécanique.

I.7.2. Charges particulières inertes

En plus de leur faible coût, leur rôle essentiel est de réduire le prix de revient du matériau.

Elles permettent aussi d'améliorer la mise en œuvre et certaines propriétés telles que la dureté, la résistance à la rupture...

Ce type de charge regroupe surtout les matières minérales telles que : les silices, les kaolins (silicates d'aluminium hydratés), le carbonate de calcium, la craie qui permet de diminuer le prix de revient des mélanges, le talc qui confère aux mélanges de bonnes propriétés mécaniques et une grande résistance aux acides.

Généralement, l'incorporation des charges minérales dans les résines modifient les propriétés de la manière suivante :

- En augmentation : Viscosité du mélange
Densité
Module d'élasticité
Dureté
Stabilité dimensionnelle
- En diminution : résistance à la traction et à la flexion.

I.7.3. Renforts fibreux

Les fibres de renforcements des matériaux composites proviennent de deux origines :

- les fibres minérales : fibre de verre, de carbone, céramiques,
- les fibres organiques.

Les qualités importantes recherchées lors de l'introduction de fibres dans une matrice sont en premier lieu un module de Young élevé, une résistance à la rupture élevée et tous deux reliés à la légèreté du matériau. Le tableau 1.2 rassemble les propriétés courantes qui peuvent être modifiées par l'incorporation d'une charge telle que celles évoquées ci-dessus dans une matrice polymère.

Propriétés recherchées	Types de propriétés	Types de charges
Mécaniques	Résistance à l'abrasion	Oxyde d'aluminium, silice, métaux
	Forces à l'impact	Fer ; aluminium, fibres, particules d'élastomères
	Module de flexion	Carbonate de calcium, sulfate de calcium
	Résistance à la compression ou à la flexion	Silice, alumine, fer, aluminium
	Résistance à la traction	Fibres, métaux
Electriques	Résistance électrique	Alumine, silice, talc, mica
	Conductivité électrique	Or, argent, cuivre, aluminium, graphite
Physico-chimiques	Résistance à la corrosion	Zinc
Nucléaire	Boucliers antiradiations	Plomb, carbure de bore
Thermiques	Transfert de chaleur	Silice, aluminium, argent
	Réduction de chaleur	Silice, fer, aluminium

Tableau I-2 propriétés modifiées par l'incorporation d'une charge

I.7.4. Interface charge/ matrice

Les propriétés d'un composite dépendent non seulement des propriétés des matériaux le constituant (matrice et charge), mais aussi de la qualité de l'interface entre ces deux matériaux (épaisseur, forces interfaciales, mouillabilité du renfort par la matrice, ...)

Le rôle essentiel des zones interfaciales est d'assurer un transfert de charge entre la matrice et le renfort. L'interface se formant au cours du procédé même de l'élaboration du composite, le contrôle de ce procédé est d'importance majeur : contamination des surfaces, phénomènes de diffusion, gradients thermiques... sont autant de paramètres qui influent sur la constitution de l'interface. Cette interface est souvent considérée comme la surface de contact entre la charge et la matrice. Près de l'interface et sur une faible distance, la structure de la matrice peut être différente du cœur. Cette zone, peut être le lieu où se concentrent les défauts : porosité et humidité, couches de réactions chimiques, gradients de composition, modification de texture cristalline. Par conséquent, l'interface peut être considérée comme une zone d'interaction, dénommée interphase, et non pas une simple

surface de contact. Généralement, les charges sont associées à des agents de couplage (ou traitement de surface) pour améliorer la cohésion à l'interface.

L'interphase est la zone où s'effectue précisément le transfert de charge de la matrice vers le renfort. De nombreux travaux montrent que l'étude des interfaces est un facteur clé pour comprendre les propriétés des composites. La qualité du matériau dépend de l'adhésion entre la matrice et les charges. Que ces travaux soient de nature expérimentale ou théorique, ils portent sur un grand nombre de paramètres, tels que la géométrie des renforts, le facteur de forme, le traitement de surface, la fraction volumique de renfort.

Chapitre II. MISE EN ŒUVRE DES MATERIAUX COMPOSITES

II.1. Introduction

La plupart des méthodes de mise en œuvre consistent à élaborer les pièces en matériaux composites par couches successives comportant matrice et renfort. Cette technique générale appelée stratification, conduisant à l'élaboration de stratifiés, nous amènera ensuite à nous intéresser à l'architecture des matériaux composites.

II.2. Les principaux types de fibre

II.2.1. Les fibres de verre

Sont les plus anciennes (1940) et les moins chères (environ 1 euro/kg) des fibres du marché, et celles dont on réalise le plus fort tonnage. Elles sont fabriquées par extrusion du verre au travers d'une filière percée de trous de 1 à 2mm de diamètre, puis étirées jusqu'à obtenir des diamètres de 5 à 15mm, enduites et bobinées. Il existe différentes variétés (E,R,S) selon la proportion de chaque composant (SiO₂, Al₂O₃, B₂O₃, CaO, MgO). [6]

II.2.2. Les fibres de carbone

Doivent leurs propriétés à la très forte anisotropie des cristallites de graphite qui les composent. Elles sont fabriquées à partir de fibres de polymère (par exemple polyacrylonitrile) préalablement tissées, et carbonisées sous tension en plusieurs étapes, oxydation (100 à 200 C°), puis pyrolyse (1500-2500 C°). on distingue deux types de fibres:

- fibres haute résistance (HR) : pour une combustion de 1000 à 1500 °C ;
- fibres haut module (HM) : pour une température de combustion de 1800 à 2000 °C.

II.2.3. Fibre d'aramide

Souvent appelée KEVLAR® de prix élevé (20 euros/kg), 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 basses module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles
- les fibres hautes module : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances.

II.2.4. Les fibres métalliques ou céramiques

Sont les plus chères de toutes, en raison de leur difficulté de fabrication (de l'ordre de 1000 euros/kg). Les fibres de bore sont obtenues par réduction à 1100_C de chlorure de bore, qui se dépose sur un fil de tungstène de 10 à 15mm de diamètre. Le diamètre résultant est de 100 à 200µm pour la fibre. La même procédure expérimentale est utilisée pour produire des fibres de carbure de silicium (SiC). Les derniers développements concernent la production de trichites, ("whiskers") qui sont des monocristaux filamenteux obtenus par décomposition d'un sel métallique en ambiance réductrice. Leur longueur est de quelques millimètres, pour un diamètre d'environ 1µm. Elles approchent les propriétés d'un cristal parfait. [7]

II.2.5. Les microbilles

Pleines ou creuses peuvent être produites en verre, carbone ou polystyrène. Elles ont des diamètres compris entre 10 et 150µm ; le taux volumique de charge peut atteindre 50%. Le composite résultant a des propriétés mécaniques isotropes.

II.3. Procédés d'élaborations des matériaux composites

II.3.1. Moulage sans pression

Les méthodes de moulage à froid et sans intervention d'une presse sont les méthodes les plus simples à mettre en œuvre. Elles nécessitent un minimum d'équipement et par conséquent d'amortissement. Cette facilité a été à l'origine du succès des matériaux composites à fibres de verre, dans l'industrie et l'artisanat. Ces méthodes permettent la réalisation de pièces en petites et moyennes séries, sans restriction de formes et dimensions. Bien que la proportion de fibres puisse varier, elle reste toutefois limitée. Les pièces comportent une seule face lisse, reproduisant l'aspect du moule. Enfin, la qualité de la pièce moulée dépend dans une large mesure du savoir-faire du mouleur.

II.3.1.1. Moulage au contact

Procédé manuel pour la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression. Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détournée. Figure II.1

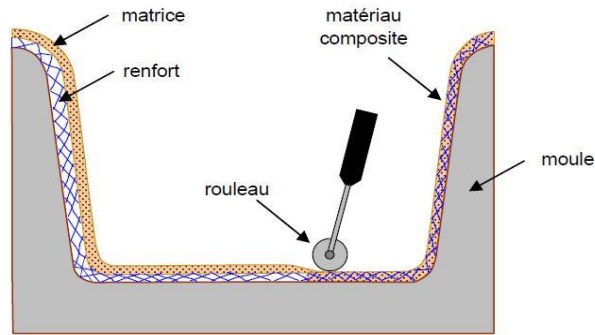


Figure II-1 Principe du moulage au contact [8]

II.3.1.2. Moulage par projection simultanée

Procédé manuel ou robotisé permettant la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables à température ambiante et sans pression. Les matières premières sont mises en œuvre à l'aide d'une machine dite "de projection" comprenant :

- Un dispositif de coupe - projection du renfort (fibre)
- Un ou deux pistolets projetant simultanément la résine

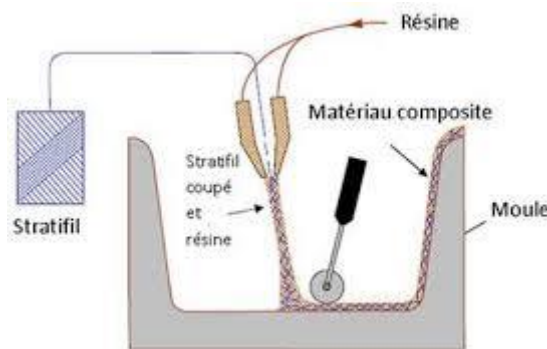


Figure II-2 Principe du moulage par projection simultanée

II.3.2. Moulage sous vide

Le moulage sous vide s'effectue entre moule et contre moule rigide, semi-rigide ou souple suivant la technologie de mise en œuvre. Le renfort est placé à l'intérieur du moule ; la résine catalysée est versée sur le renfort. On utilise la pression qui s'exerce sur le moule lors de la mise sous vide pour répartir la résine et imprégner le renfort. La résine peut

également être injectée par l'aspiration consécutive au vide. Le tableau suivant représente les avantages et les inconvénients du moulage sous vide :

Les Avantage	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Deux faces lisses éventuellement gel-coatés. - Qualité constante - Bonne cadence de production - Nécessite peu de surface - Investissement très modéré (moule, pompes à vide) - Bonnes conditions de travail et d'hygiène. 	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilité de forme plus réduite qu'au contact. - Mise au point parfois difficile.

Tableau II-1 *Tableau des avantages et inconvénients du moulage sous vide*

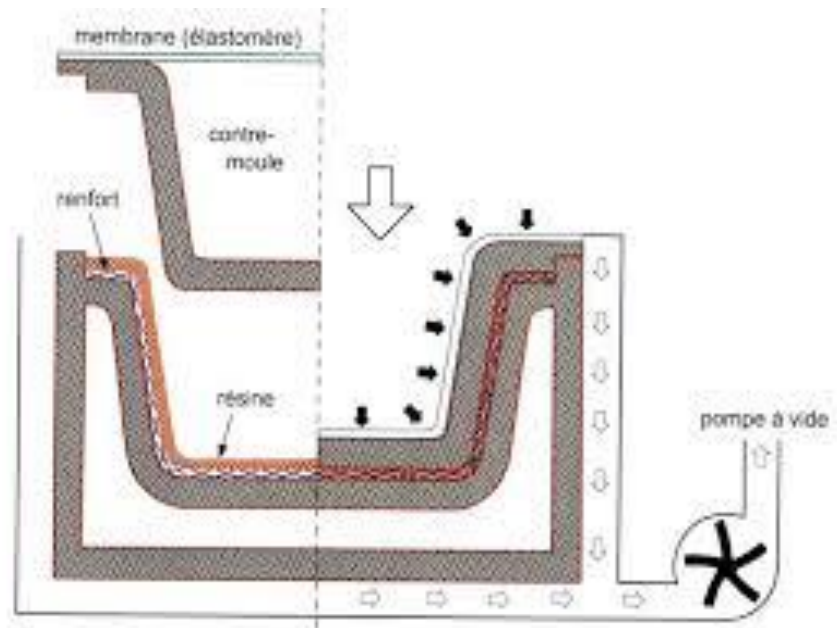


Figure II-3 Moulage sous vide

II.3.3. Moulage par projection de résine

Le moulage par injection de résine RTM (Résine Transfert Molding). Une nappe de fibre (tissus, mats) est déposée dans un moule fermé étanche et la résine est injectée à basse pression.

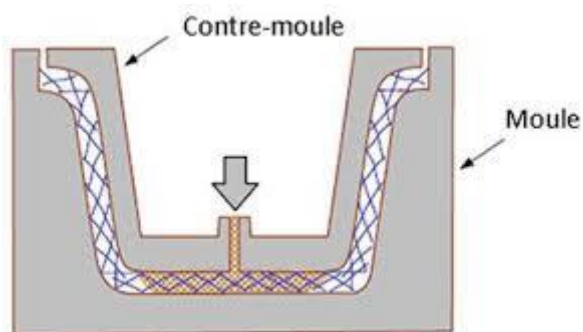


Figure II-4 Principe de moulage par injection de résine

II.3.4. Moulage par centrifugation

Procédé de moulage limité aux enveloppes cylindriques. Le renfort (fibres longues coupées) et la résine sont déposés dans un moule cylindrique chauffé tournant à grande Vitesse

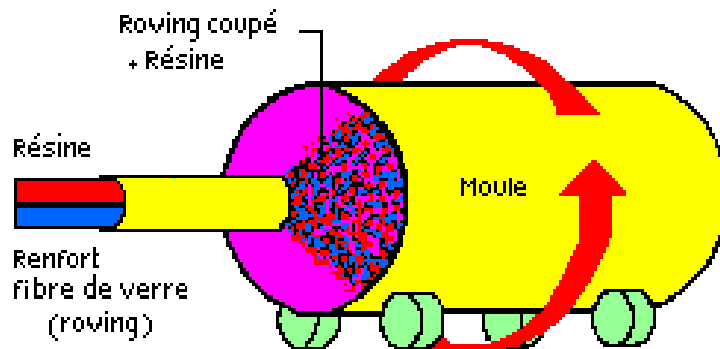


Figure II-5 Principe de moulage par centrifugation

II.4. Structure des matériaux composites

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types :

- Les monocouches
- Les sandwichs
- Les stratifiées (ce qui fait l'objet de notre étude)

II.4.1. Les monocouches

Les monocouches sont les éléments de base des structures composites. Des fibres unidirectionnelles placées dans le plan médian sont emprisonnées dans une matrice polymère. Ils sont caractérisés par le type de renfort utilisé : des fibres longues (unidirectionnelles ou non), courtes, sous forme de tissus, de rubans

II.4.2. Sandwichs

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

II.4.3. Stratifié

On appelle stratifié un matériau composé d'un ensemble ordonné de couches d'orientation et d'épaisseur données, constituées de divers matériaux. Une couche d'un stratifié est souvent appelée une strate. Le type de stratifié est défini généralement par sa séquence d'empilement, information qui fournit de manière synthétique l'orientation des diverses couches d'un stratifié. L'avantage que présentent les composites stratifiés est de permettre de créer des matériaux aux propriétés mécaniques orientées de manière optimale afin de mieux répondre aux sollicitations de la structure

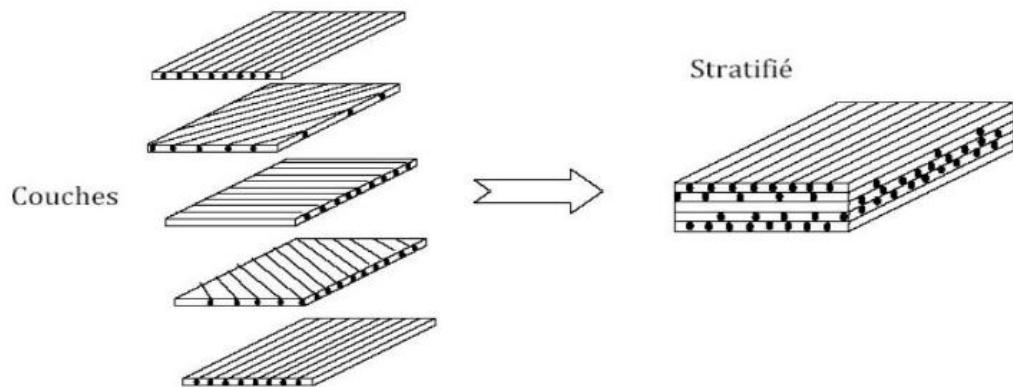


Figure II-6 Constitution d'un stratifié

II.4.3.1. Les orientations normalisées

On désigne les stratifiés par l'orientation des fibres de chaque pli par rapport à un repère global arbitraire(x,y,z), l'axe x correspondant le plus souvent à la direction du chargement. Un pli orienté à 0° présente des fibres dirigées selon l'axe x et un pli orienté à 90° des fibres selon y. Un stratifié quelconque de N plis est ainsi désigné par le N-up let des orientations de ses plis dans le sens des z croissants. Pour condenser l'écriture, on note sous forme d'indice le nombre de plis adjacents de même orientation ainsi que le nombre de répétitions d'une même séquence de plis. L'indice "s" correspond à un stratifié symétrique pour lequel on ne renseigne que la moitié de l'empilement, de la surface au plan de symétrie miroir.

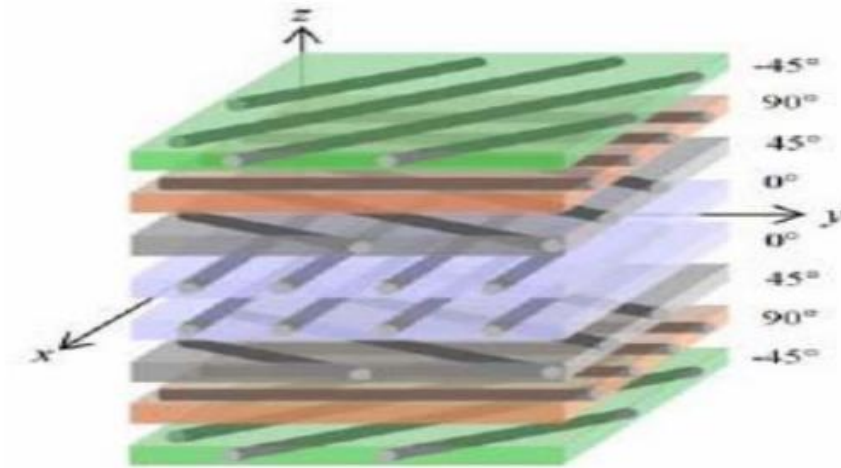


Figure II-7 Exemple d'empilement symétrique quasi-isotrope $[-45/90/45/0]^\circ\text{C}$

II.4.3.2. la symétrie miroir

Lors de la constitution de la pièce stratifiée, les plis successifs imprégnés de résine sont drapés à température ambiante, puis placés dans une étuve pour la polymérisation. Dans le composite ainsi créé à chaud, la dilatation d'ensemble de la pièce, d'origine thermique, s'effectue sans qu'il y ait variation globale de sa forme par voilement ou gauchissement. Par contre, lors du refroidissement, les plis ont tendance à se contracter différemment suivant le sens des fibres ou suivant le sens travers. De là, l'apparition des contraintes d'origine thermique.

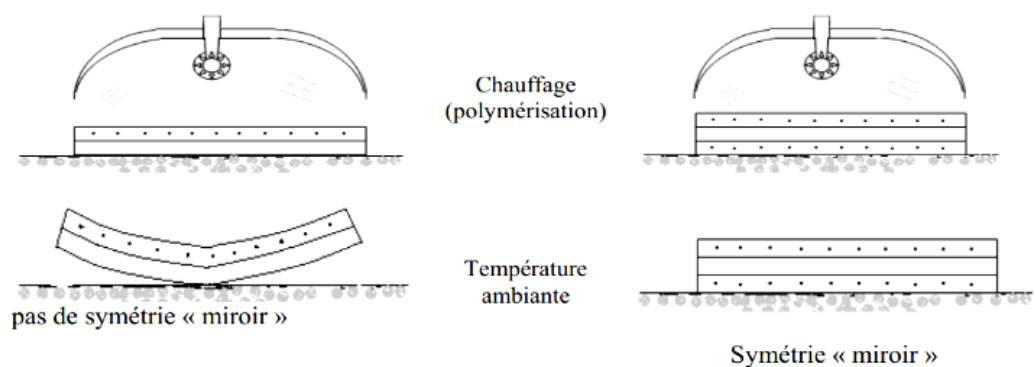


Figure II-8 Schématisation de l'effet miroir sur la stratification.

II.4.3.3. Angles positifs et négatifs

Lorsque des couches sont orientées à des angles égaux en valeurs absolues, mais des signes opposés, les signes + ou – sont utilisés. La convention pour les angles positifs ou négatifs dépend du système d'axes choisi : une inversion peut apparaître suivant le choix effectué.

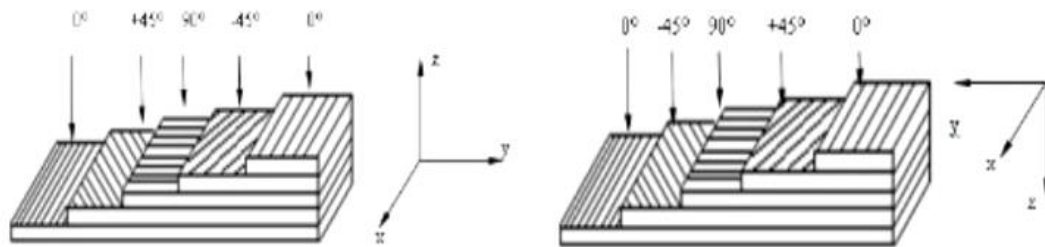


Figure II-9 Désignation du signe de l'orientation.

II.4.3.4. Principaux mécanismes d'endommagement dans les matériaux stratifiés

Lorsqu'ils sont soumis à des contraintes externes, les matériaux composites (fibres/matrice) subissent différents types de dégradation résultant de l'endommagement local au niveau de la matrice, des fibres et de l'interface fibre/matrice. Généralement, ces mécanismes se produisent simultanément, réduisant ainsi les propriétés mécaniques du matériau composite. Les mécanismes de dégradation se développent suivant la nature des matériaux et les conditions de sollicitation mécanique imposées. Pour les composites à base polymère soumis à une sollicitation mécanique, l'expérience a montré que l'on peut distinguer quatre principaux modes d'endommagement : la fissuration matricielle, la rupture de l'interface fibre/matrice ou décohésion, la rupture des fibres et le délaminage inter plis.

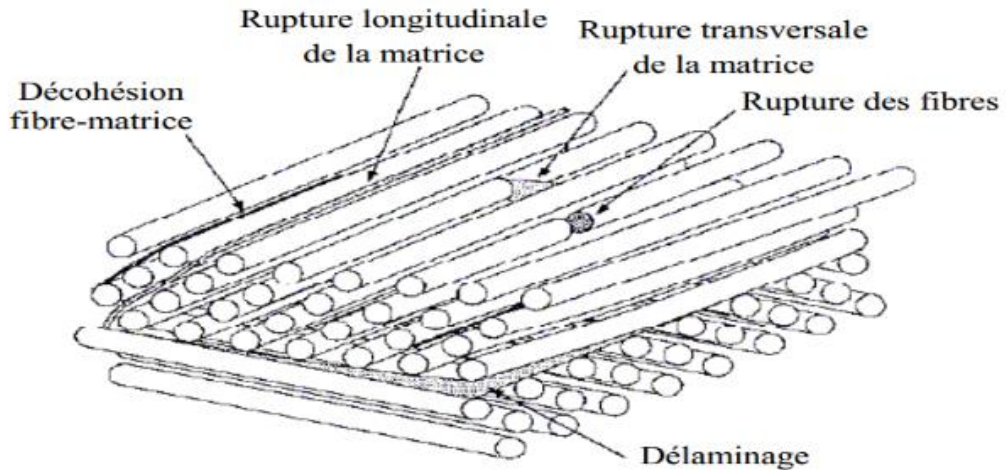


Figure II-10 Mécanismes d'endommagement observés dans un composite stratifié

1. Fissuration matricielle

Les microfissures qui se produisent au sein de la matrice apparaissent aux niveaux des porosités et des inclusions, soit par fissuration transversale, soit par fissuration longitudinale. Ce dernier mode de rupture se produit lorsque la contrainte de décohésion est supérieure à celle de cisaillement. Dans ce cas, les fissures sont orientées dans la direction de la sollicitation. La fissuration transversale se propage selon la direction perpendiculaire à la sollicitation et elle peut provoquer une décohésion fibre/matrice

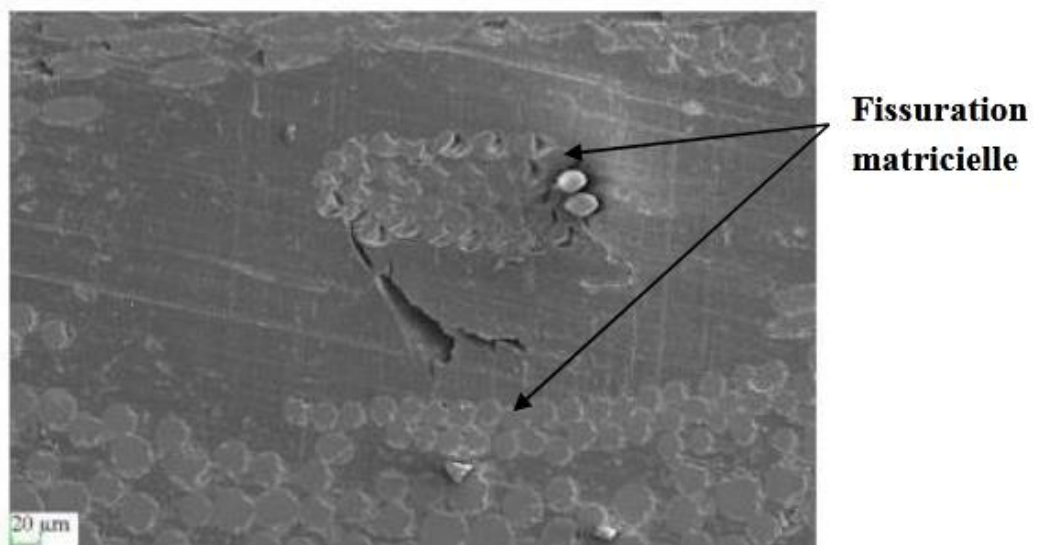


Figure II-11 Exemple de fissuration matricielle.

2. Décohésion fibre/matrice

C'est dans la zone de l'interface où s'effectue le transfert de charge de la matrice vers les fibres ou vice versa. Après initiation, la propagation de la rupture change suivant la nature de l'adhésion fibre/matrice. Dans le cas d'un composite à fibres unidirectionnelles sollicité parallèlement aux fibres, on peut distinguer les cas suivants:

-Cas d'une interface très forte : si l'adhérence entre les fibres et la matrice est très forte, on aura une propagation de la fissure initiée soit par rupture de fibres, soit par rupture de la matrice comme si elle n'avait rencontré aucun obstacle. La rupture observée sera de type fragile.

-Cas d'une interface très faible: la fissuration matricielle est déviée à l'interface et la décohésion fibre/matrice s'étend sur une très grande distance.

-Cas d'une interface ayant des propriétés intermédiaires: la fissure au contact d'une fibre se dévie dans un plan perpendiculaire en provoquant un décollement de la matrice au niveau de l'interface.

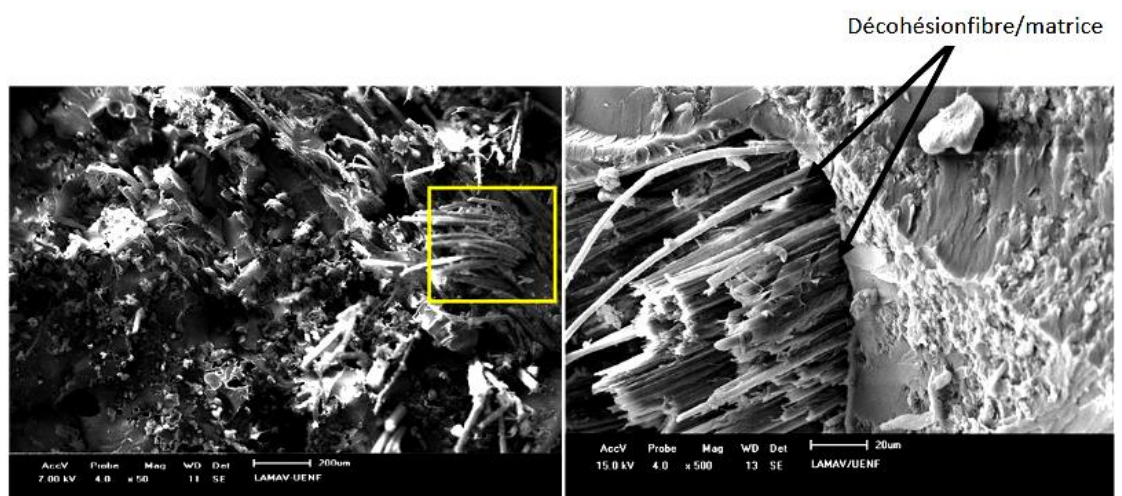


Figure II-12 *Décohésion fibre/matrice*

3. Rupture de fibre

La rupture de fibre intervient lorsque la contrainte de traction dans une fibre atteint sa contrainte à la rupture.

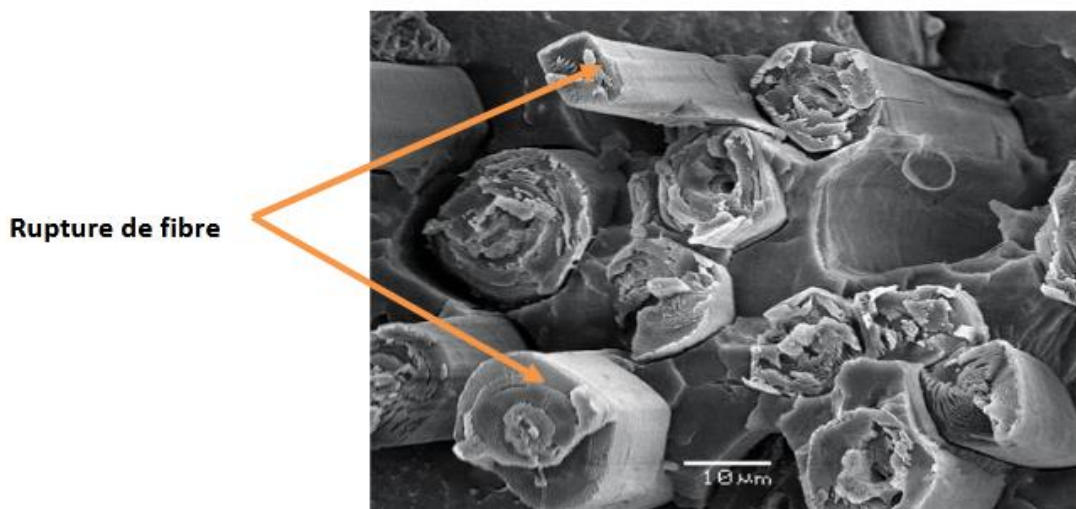


Figure II-13 *Rupture de fibre*

Elles interviennent essentiellement au sein des plis les moins désorientés par rapport à la direction de la sollicitation pour lesquels les fibres reprennent le plus d'efforts. [9] Ce mode d'endommagement est la conséquence de concentrations de contraintes dues aux deux types d'endommagement précédents. Lorsqu'une fissure apparaît dans une fibre, son instabilité devient grande, entraînant ainsi sa rupture complète.

4. Délaminage

Dans le cas de stratifiés à plis croisés, aux mécanismes décrits précédemment (fissuration matricielle, décohésion et rupture de fibres), s'ajoute un autre mécanisme d'endommagement entre couches appelé délaminage. Le processus de délaminage est le résultat d'une chronologie de divers types d'endommagement. Le délaminage est donc une séparation locale de deux plis du composite. Elle est due soit à une concentration de contraintes locale près des bords, soit à une densité de fissurations transversales très importante.

Ce type d'endommagement contribue largement à la dégradation des propriétés mécaniques de la structure.

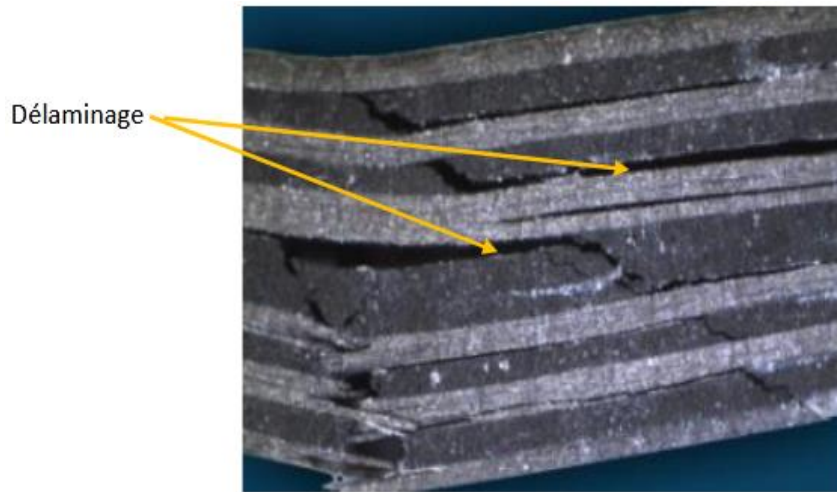


Figure II-14 *Délaminage*

5. **Vide** : il apparaît suite à une pénétration capillaire lente et inégale de la résine dans les espaces entre les filaments pendant le processus d'imprégnation.

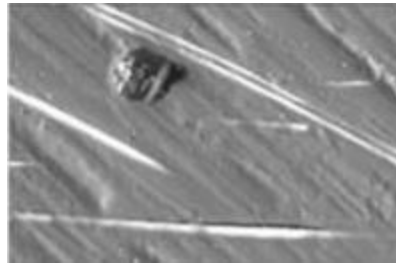


Figure II-15 *Vides*

6. **Oxydation** : elle est la conséquence d'un couplage entre la diffusion de l'oxygène au sein de la matière et des réactions chimiques de l'espèce oxydante avec le réseau époxyde, réactions qui sont activées thermiquement.

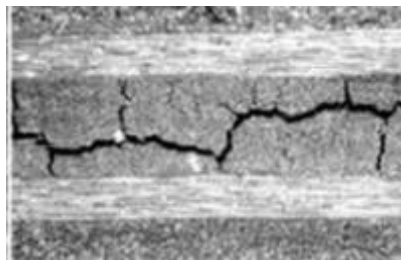


Figure II-16 *Fissures dues à l'oxydation*

7. **Porosité** : elle apparaît en raison de l'inclusion d'air, de solvants ou d'autres agents de contamination pendant le mélange de la résine.

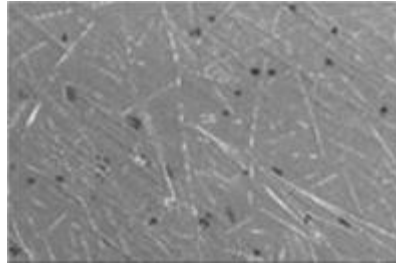


Figure II-17 *Porosités*

II.5. Développement des mécanismes et processus de rupture

La figure suivante récapitule les mécanismes de dégradation présentés précédemment et leurs échelles correspondantes. Outre la nature de la sollicitation appliquée (statique/dynamique, direction, vitesse,...), ces mécanismes sont fortement conditionnés dans leurs types (évolution et cinétique) par les différents paramètres suivants :

- La nature et les propriétés des constituants (en particulier leur mode d'endommagement propre).
- Leur arrangement géométrique (proportion, forme et orientation dans chaque pli séquence d'empilement)
- L'interaction entre les différentes phases (types d'interfaces notamment).
- Le processus de fabrication (porosité initiale, contraintes résiduelles).

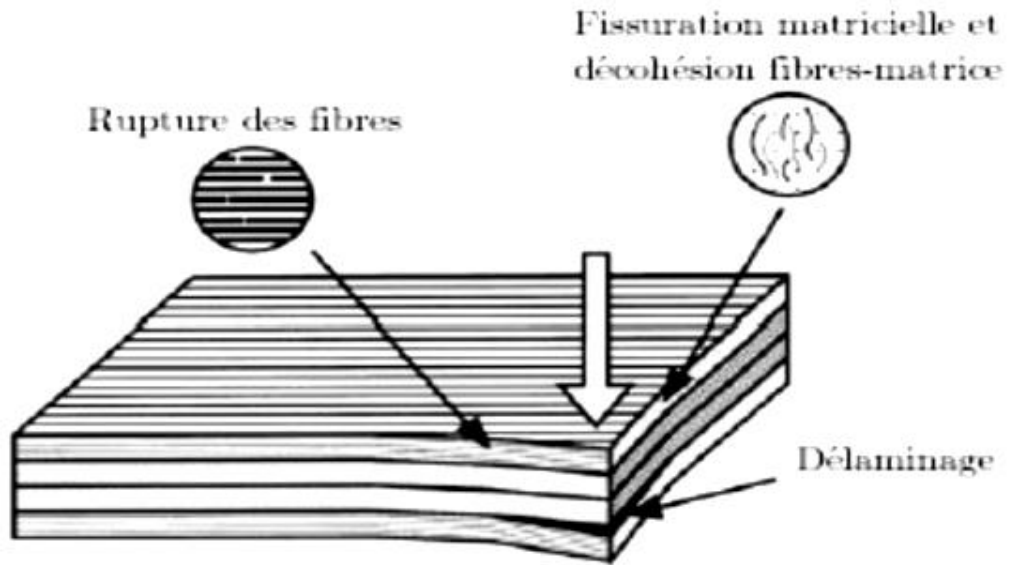


Figure II-18 Mécanismes d'endommagement dans les stratifiés

II.6. La loi de mélange pour les composites stratifiés

Les déformations des matériaux homogènes et iso-tropiques peuvent être décrites assez simplement à l'aide des modules d'élasticité et des contraintes de déformation, qui sont les propriétés de base des matériaux bruts. Dans le cas des composites, chaque élément joue un rôle différent et c'est l'association de ces propriétés qui confère au matériau final ses caractéristiques propres. Bien que ces caractéristiques finales soient le résultat d'interactions complexes entre le renfort et la matrice, il est possible d'en donner une estimation simple à l'aide de la Loi des Mélanges appliquée aux composites stratifiés :

$$P_c = \rho_c \times V_c = \rho_f \times V_f + \rho_m \times V_m \quad \text{où } (V_f + V_m) = 1 \dots \dots \text{(II-1)}$$

Avec :

V_f = fraction volumique de fibres

V_m = fraction volumique de matrice 15

P_c = poids estimé du composite

P_f = masse volumique de la fibre

ρ_m = masse volumique de la matrice

Il s'agit de valeurs théoriques, en réalité la présence de vides fait que $V_f + V_m \leq 1$. Par exemple, le module d'élasticité en traction peut être estimé en se basant sur les modules respectifs de la fibre et de la matrice. Cette équation peut être modélisée par un système de ressorts associés en parallèle

$$E_c = E_f \times V_f + E_m \times V_m \dots \dots \dots \text{(II-2)}$$

Avec :

E_c = module d'élasticité en traction estimé du composite

E_f = module d'élasticité en traction de la fibre

E_m = module d'élasticité en traction de la matrice

V_f = fraction volumique de fibres

V_m = fraction volumique de matrice

**Chapitre III. LES TECHNIQUE DE DETECTION DE
L'ENDOMMAGEMENT**

III.1. Introduction

Les méthodes de CND ont été initialement développées vers le milieu du vingtième siècle pour les structures métalliques classiques. On qualifie de contrôle non destructif une technique qui permet de contrôler une pièce sans qu'il y ait une altération de ses caractéristiques. Ces méthodes restent encore couramment utilisées dans différentes industries. Cependant l'émergence progressive de nouveaux matériaux et le désir d'améliorer la précision des contrôles ont stimulé la recherche dans le sens de leur adaptation, ou bien leur couplage dans le but d'avoir de nouvelles techniques plus performantes. Ne pas concevoir une instrumentation spécifique, en se contentant seulement des méthodes de caractérisation et de contrôle qui ont déjà fait leurs preuves avec les matériaux classiques, permet d'ajouter une attractivité supplémentaire à ce type de matériaux. En effet, plusieurs méthodes peuvent être réadaptées.

III.2. Les différentes techniques de contrôle non destructif

III.2.1. La tomographie X

La radiographie X est utilisée depuis de nombreuses années pour caractériser les défauts dans les matériaux composites. Cette technique est efficace pour la détection de porosités et inclusions. Cependant, la radiographie n'est pas très efficace lorsqu'il faut détecter des fissures qui sont orientées dans une direction perpendiculaire à la source de rayonnement, et pour la détection des délaminages . De plus, une simple radiographie ne peut pas donner une information sur la morphologie complète d'un défaut et notamment sur la localisation en profondeur dans la pièce examinée. Le développement de la tomographie X a permis de surmonter ces limitations, cette technique permettant de visualiser la structure interne de l'objet.

III.2.2. Principe de la tomographie

La tomographie assistée par ordinateur (Computed Tomography, ou CT) est une technique permettant la reconstruction d'une section d'un volume ou d'un volume à partir d'une série de mesures effectuée sur l'objet, appelées projections. Une série de projections suivant différentes incidences est acquise, donnant une information sur la réponse du système à une source qui peut être de différente nature (émission radioactive, ultrasons, rayons X, ...). Un algorithme de reconstruction permet de reconstruire une coupe ou le volume de l'objet à partir de projections. Le principe de la tomographie par rayons X consiste à acquérir une série de radiographies X d'un objet vu suivant différents angles (figure III.1-a).

L'information reconstruite est le coefficient linéique d'atténuation μ (en cm^{-1}) (figure III.1-b), qui est la caractéristique locale d'atténuation des rayons X de l'objet considéré. L'atténuation dépend de la densité du milieu, de sa composition chimique et de l'énergie du faisceau de rayons X. Les systèmes de tomographie X sont caractérisés par leur géométrie d'acquisition.

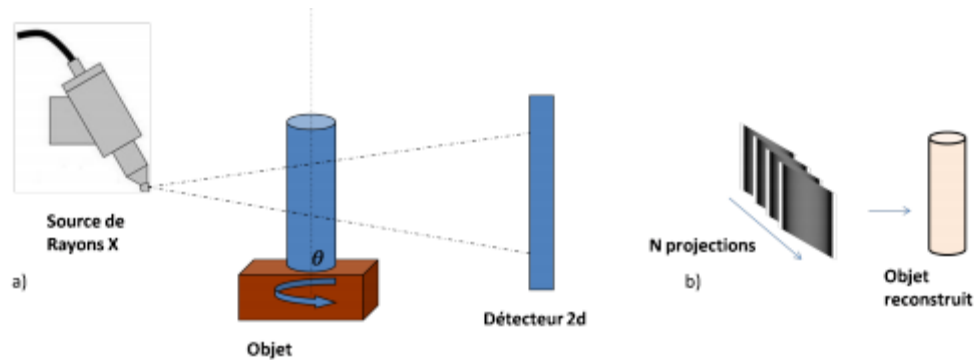


Figure III-1 *Le principe de la tomographie : a) Acquisition d'une série de projections suivant différents angles de vue. b) Un volume reconstruit de l'objet est obtenu à partir de ces projections grâce à un algorithme de reconstruction.*

On distingue notamment la géométrie en éventail et la géométrie conique. La géométrie en éventail (ou fan-beam, figure III.2-a) consiste à mesurer les projections sur un détecteur unidimensionnel. La reconstruction à partir d'un jeu de projections unidimensionnelles permet alors de reconstruire un plan. On peut accéder à un volume soit en effectuant plusieurs reconstructions planes, soit en considérant une acquisition hélicoïdale du jeu de projections. La géométrie conique (ou cone-beam, figure III.3-b) consiste en la mesure de projections sur un détecteur bidimensionnel. Ceci permet de reconstruire un volume à partir d'un seul jeu de projections.

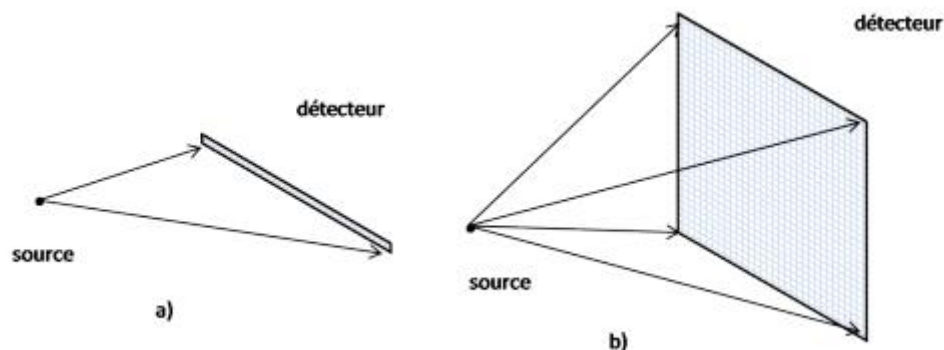


Figure III-2 *Le détecteur présentant une géométrie a) en éventail et b) conique*

III.3. Émission acoustique

L'émission acoustique (EA) consiste en l'observation d'une émission d'ondes ultrasonores par un matériau soumis à une contrainte. En effet, la propagation des ondes produites est utilisée pour réaliser la caractérisation grâce à des palpeurs disposés sur le matériau pour la détection des signaux. L'EA constitue une méthode CND semblable à la sismologie qui étudie les ruptures locales de l'écorce terrestre par suite d'accumulation de contraintes finissant par dépasser la résistance du matériau. L'activité de la structure engendre donc des ondes ultrasonores dont la propagation peut être modélisée par des fonctions de Green. L'acquisition de ces signaux via des capteurs de type piézoélectrique permet d'effectuer des examens non destructifs tels que la surveillance de fabrication et le suivi en fonctionnement des structures. Les techniques d'analyse des signaux issus des mesures s'avèrent sensibles aux phénomènes de fuite et permettent d'étendre dans les hautes fréquences les surveillances vibratoires classiques. On distingue généralement deux types d'émission acoustique :

- L'émission discrète où chaque phénomène donne lieu à une salve discriminable du bruit de fond dans le temps ;
- L'émission continue dans laquelle la superposition des différents événements donne naissance à un seul signal. Les premières applications de l'EA ont été réalisées dans le génie civil pour la surveillance des ponts la réparation des structures en béton armé renforcées par des poutres composites à fibres de carbone. L'utilisation de l'EA comme moyen de CND des matériaux composites effective dans la mesure où l'application d'une contrainte croissante ou variable fait subir des modifications internes (fissurations, délaminages, plastification, ruptures de fibres, ...).

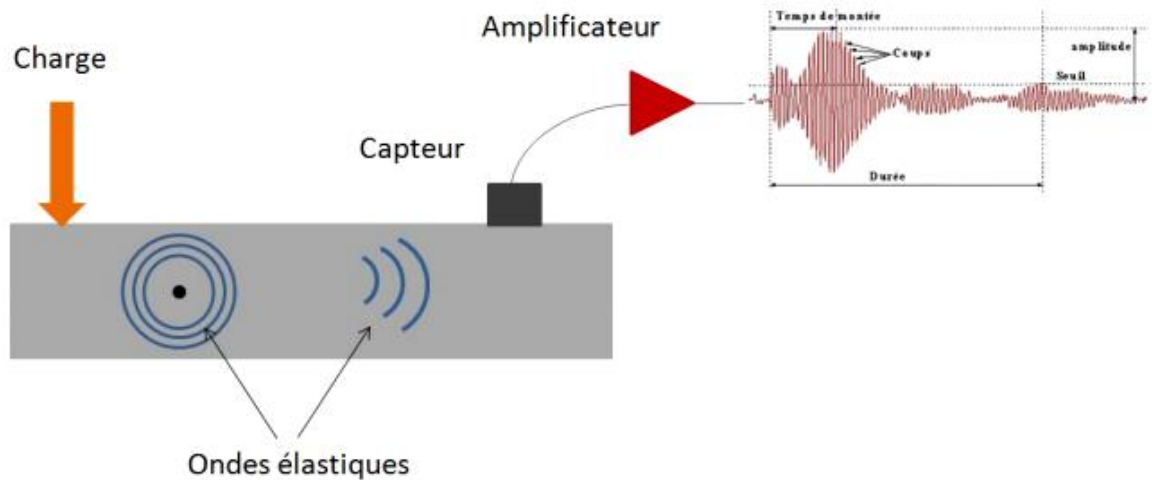


Figure III-3 Principe de la détection de la propagation de défauts par émission acoustique [11]

III.4. Ultrason

Les techniques utilisant les ondes ultrasonores font parties des plus utilisées pour les contrôles non destructifs. Les ondes mécaniques correspondent à une propagation d'énergie par déplacement d'un volume élémentaire du milieu autour de sa position d'équilibre. Par hypothèse, la théorie de la propagation des ondes ultrasonores se fait dans le cadre des petites déformations. Ceci dans le but de pouvoir considérer la réponse du matériau comme proportionnelle à l'amplitude de la source excitatrice tout en conservant la fréquence de la sollicitation acoustique. [12]

Il existe différentes ondes classées selon leur mode de propagation. Deux grandes catégories prédominent : les ondes de volumes qui se propagent au sein du matériau et les ondes modales (surfaces et plaques) pour lesquelles l'énergie acoustique se propage le long des couches d'un milieu isotrope fini. Au sein même de ces groupes plusieurs types d'ondes subsistent. Les différentes caractéristiques des ondes mécaniques, comme la vitesse par exemple dépendent des propriétés élastiques et de la densité du matériau. Ce paragraphe présente les mécanismes de propagation des ondes les plus utilisées pour la caractérisation non destructive.

III.4.1. Les ondes de volume

Les ondes de volume se répartissent en deux catégories : les ondes longitudinales ou ondes de compression et les ondes transversales ou ondes de cisaillement. Les ondes ultrasonores de volume sont le plus souvent générées par des pastilles piézoélectriques.

III.4.2. Les ondes longitudinales

Pour les ondes longitudinales, la déformation du milieu est parallèle à la direction de propagation de l'onde. Le front d'onde avance par alternance de compression et de dilatation du volume (Figure III.4).

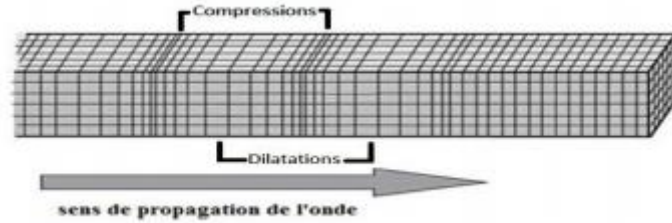


Figure III-4 Propagation d'ondes longitudinales

Elles se propagent dans tous les milieux (fluide et solide) et sont les plus rapides. La vitesse d'une onde ultrasonore longitudinale (c_l) se calcule de la manière suivante pour un matériau idéal (homogène, isotrope, élastique et linéaire) :

$$c_t = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (\text{III-1})$$

où E représente le module d'Young en Mpa , ν le coefficient de Poisson, ρ la masse volumique en $kg\ m^{-3}$, tous ces paramètres diffèrent selon les matériaux. Dans son ouvrage Couvrat indique quelques valeurs de vitesses longitudinales pour différents matériaux :

- Acier : $5900\ m.\ s^{-1}$
- Aluminium : $6200\ m.\ s^{-1}$
- Polymère : $2700\ m.\ s^{-1}$ (environ)
- Air : $330\ m.\ s^{-1}$

III.4.3. Les ondes transversales

Pour les ondes transversales, à l'inverse des ondes longitudinales, la déformation du milieu se fait perpendiculairement à la direction de la propagation de l'onde (Figure III.5).

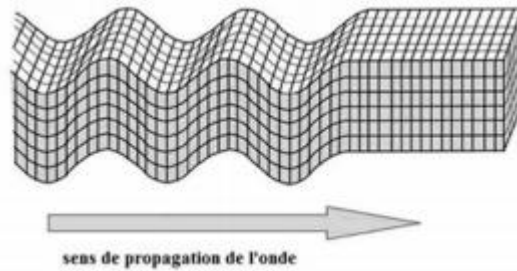


Figure III-5 Propagation d'une onde de cisaillement

Pour une onde de cisaillement, et pour un milieu idéal, la vitesse (C_s) se calcule ainsi :

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad \text{(III-2)}$$

Quelques valeurs de vitesses d'ondes de cisaillement sont données à titre d'indication [Oly06]

- Acier 1020 : 3240 m. s^{-1}
- Aluminium : 3130 m. s^{-1}

L'utilisation des ondes transversales perpendiculairement à un joint collé, engendre la sollicitation en cisaillement de l'interface matériau/colle. Cela signifie que le joint de colle est sollicité dans le sens de sa plus faible tenue mécanique.

III.4.4. Les ondes de surfaces et de plaques, les ondes guidées

Il est habituel de décrire les ondes de surface et les ondes de plaques qui correspondent à des modes de propagation guidés par la géométrie de la pièce. Les principaux modes de propagation d'ondes ultrasonores guidées sous forme de plaque sont ceux relatifs aux ondes de Lamb et ondes SH ainsi que les ondes de surfaces, les ondes de Rayleigh sont des ondes guidées par un plan seulement. Pour des géométries cylindriques la combinaison des ondes possibles donne naissance à des modes guidés selon l'axe du cylindre ou du tube (ondes de torsion, compression et flexion) . L'étude des ondes guidées devient un axe de développement des méthodes de CND.

Les ondes guidées existent en milieu borné. Pour se propager elles nécessitent la présence d'une surface particulière. La surface peut être soit une surface libre, soit une surface de séparation entre deux matériaux différents, comme par exemple entre de la colle et de l'aluminium. Entre les deux milieux, les ondes sont dites guidées. Leur célérité est plus lente que pour les ondes de volume mais elles sont plus énergétiques car elles ne se propagent pas dans tout le volume de la pièce mais dans une petite partie proche de la surface. Leurs noms et leurs propriétés dépendent notamment de la géométrie et des conditions aux limites sur les interfaces. Dès les années 90, le développement de méthodes par ondes guidées pour caractériser un joint de recouvrement ou des zones collées commence. Dans ce paragraphe, les ondes présentées sont celles qui sont le plus utilisées pour le CND.

III.4.5. Les ondes de surfaces : les ondes de Rayleigh

Les ondes de Rayleigh ont été découvertes en 1885 par le physicien Lord Rayleigh. C'est une onde dite de surface. Elle se propage à la surface libre d'un solide semi-infini, c'est un agencement particulier entre onde de compression et onde de cisaillement. La Figure III.6 représente le déplacement d'un milieu à la surface duquel se propage une onde de Rayleigh. Par hypothèse la propagation se fait selon une direction horizontale, et la partie haute de la figure correspond à l'interface du milieu considéré.

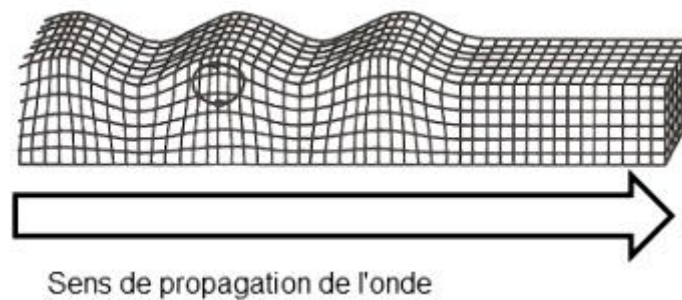


Figure III-6 Onde de Rayleigh

L'onde est non dispersive, c'est-à-dire que la vitesse des ondes de Rayleigh (V_r) ne dépend pas de la fréquence. Mais elle dépend des valeurs des ondes de volumes (c_l et c_t) quel que soit le milieu :

$$\left(2 - \frac{V_r^2}{c_t^2}\right)^2 = 4 \sqrt{\left(1 - \frac{V_r^2}{c_l^2}\right)\left(1 - \frac{V_r^2}{c_t^2}\right)} \quad (\text{III-3})$$

III.4.6. Les ondes de plaques : les ondes de Lamb

Les ondes de Lamb sont des ondes qui se propagent le long de guides de type plaques. Elles résultent de la superposition d'ondes longitudinales et transversales au sein de la plaque. Les ondes de Lamb sont classées en deux catégories relatives aux symétries du champ de déplacement (CD) dans l'épaisseur de la plaque. Les modes sont dit symétriques lorsque les vibrations longitudinales (parallèles au plan de la plaque) sont égales et les composantes transversales (normales au plan de la plaque) sont opposées. Tandis que les modes antisymétriques ont des composantes longitudinales opposées et des composantes transversales égales (cf Figure III.7).

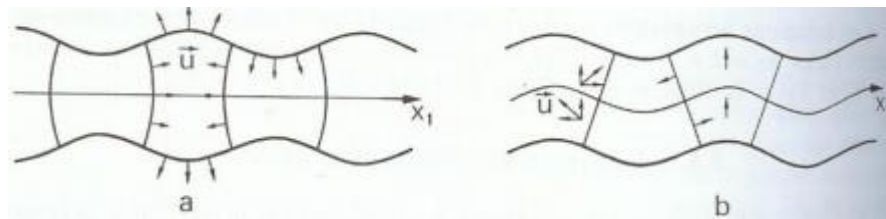


Figure III-7 Ondes de Lamb : a) symétrique, b) antisymétrique [Roy99]

Les ondes de Lamb sont dispersives, leurs vitesses varient en fonction du produit fréquence * épaisseur ($f e$). Les courbes de dispersion permettent d'obtenir la vitesse de phase en fonction de la fréquence et permettent de choisir le meilleur produit pour le contrôle (Figure III.8). Les modes les plus souvent utilisés sont les modes S0 et A0, car leurs vitesses de phase sont peu dispersives. De plus, pour les basses fréquences ils peuvent être obtenus séparément des autres modes. Ces ondes sont très utilisées pour le contrôle du collage.

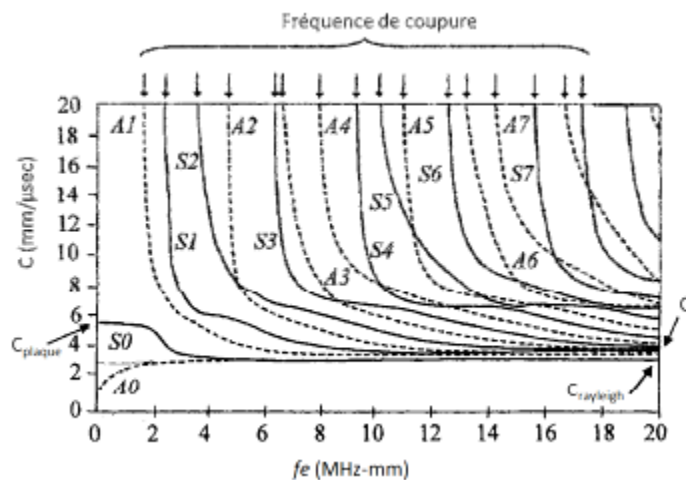


Figure III-8 Courbes de dispersion pour une plaque d'aluminium .

III.4.7. Avantages et inconvénients d'un capteur ultrason

Un capteur ultrason présente plusieurs avantages :

Comparativement à d'autres types de capteurs (infrarouge ou laser par exemple), le capteur ultrason est relativement peu cher

La mesure est assez précise, mais il faut être vigilant à ne pas avoir une distance trop importante

Le cône d'émission est large, ce qui est avantageux pour la détection d'un objet rapproché

Toutefois, un des principaux inconvénients du capteur ultrason est sa sensibilité à la température et à la pression. La vitesse de propagation des ondes sonores dépend des conditions environnantes. Ils sont également sensibles à d'autres capteurs à proximité, et il peut y avoir une interférence entre ces derniers. [13]

III.5. Une méthode optique de suivi de l'endommagement in-situ

La technique consiste à observer et à photographier une zone de l'éprouvette (dans notre cas le bord libre de l'éprouvette) à l'aide d'une caméra montée sur une colonne autorisant des déplacements dans les trois directions permettant de balayer tout le champ de l'éprouvette. La caméra CCD couplée à un zoom optique grossissant jusqu'à 12 fois permet d'accéder aux détails de la microstructure. Le bord libre de l'éprouvette doit être poli au préalable pour faciliter l'observation (Figure III.9). [14]

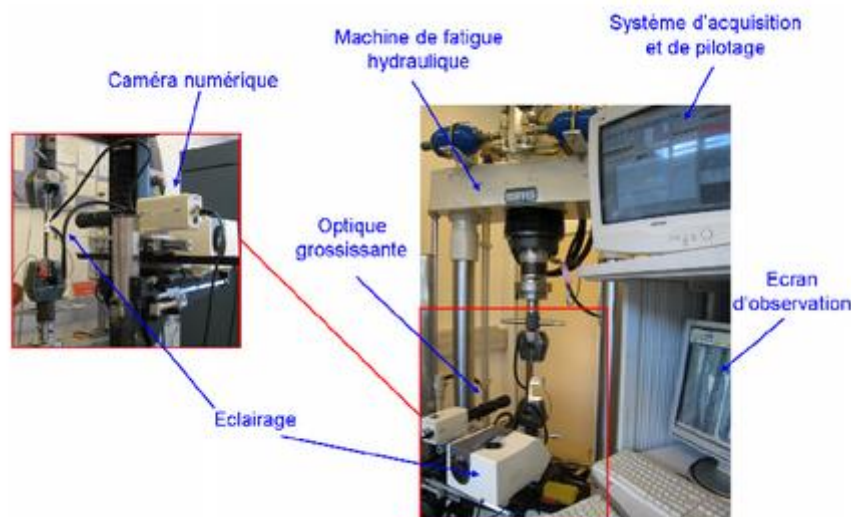


Figure III-9 Dispositif expérimental de suivi in-situ de l'endommagement

Outre la simplicité de mise en œuvre, l'avantage de cette méthode est d'éviter le démontage de l'éprouvette après chaque sollicitation et donc de limiter le nombre d'opérations. De plus l'observation peut se faire sous charge ce qui facilite la détection de l'endommagement. Enfin, les éprouvettes testées sont équipées d'un extensomètre afin de mesurer le déplacement longitudinal et d'avoir accès à la rigidité longitudinale du stratifié.

III.6. La technique de corrélation d'images

Pour opérer une mesure avec la CIN, un élément clé pour une mesure de qualité est la qualité de l'image. En effet, comme nous l'avons expliqué précédemment, la CIN utilise une texture d'image qui permet d'identifier de manière unique chaque élément de surface à l'état initial et d'assurer ainsi son suivi temporel jusqu'à l'état déformé pour en déduire son déplacement. Par ailleurs, les niveaux de gris sont censés avoir une large dynamique de telle sorte à couvrir la profondeur des niveaux de gris de l'encodage des images qui dépend du codage de la caméra qui va de 8 à 16-bits. Il est souhaitable que les images ne montrent pas de saturation en niveau de gris. En effet, les pixels ne pourront pas avoir des valeurs de niveau de gris en dessous ou au-delà des deux valeurs extrêmes définissant les seuils de perceptibilité des niveaux de gris par la caméra. Si l'image révèle qu'une bonne partie des pixels affichent des niveaux de gris qui se situent en-dessous du seuil minimal et/ou au-delà du seuil maximal, la sensibilité de la méthode à la détection des déplacements va certainement diminuer. En effet, les contrastes forts d'un pixel à l'autre rendent la CIN plus sensible aux petits déplacements. Pour cela, nous pouvons dire de manière générale que la dynamique des niveaux de gris doit être assez large afin de couvrir le mieux possible la profondeur des niveaux de gris de l'encodage des images.

Par conséquent, nous pouvons en déduire qu'un des gros avantages de cette méthode est qu'elle peut exploiter la texture de certains matériaux dont le contraste de pixel en pixel est naturellement élevé à l'échelle de l'observation. Certaines applications de la CIN ont montré d'ailleurs qu'il est possible d'effectuer des mesures sur des matériaux en acier inoxydable 304L ou encore en carbure de silice car la texture de la surface est propice à ce genre de mesures. D'autres le sont moins et nécessitent le dépôt d'une texture artificielle sur leur surface via la pulvérisation de fines gouttelettes de peinture noire sur un fond blanc (ou inversement).

III.6.1. Principe de la technique de corrélation d'images

La technique de Corrélation d'Images Numériques consiste à mettre en correspondance deux images de la surface étudiée à deux états mécaniques différents : un état dit « de référence » et un autre dit « déformé ». [15] La correspondance entre les deux images s'effectue sur des sous-domaines, de forme carrée ou rectangulaire, dont les positions sont définies par une grille virtuelle de points de mesure régulièrement espacés établie à l'état de référence. La corrélation doit permettre pour chaque domaine D , de position X (X,Y) dans l'image initiale, de retrouver la position x (x,y) de son homologue dans l'image déformée en évaluant le degré de ressemblance des niveaux de gris de chaque sous-domaine (voir Figure III.10). La corrélation d'images numériques exploite l'évolution du motif présent sur la surface de l'échantillon pendant sa déformation. Ce motif se doit d'être une signature de chaque élément ou sous-domaine de surface et doit être seulement convecté par le champ de déplacement sans autre altération. Ainsi, afin de déterminer la meilleure correspondance entre deux états de déformation, la procédure de corrélation autorise chaque sous-domaine à se déplacer et également à se déformer. La CIN fournit donc les composantes du vecteur déplacement U de chaque sous-domaine D représentant ainsi le mouvement entre les deux images, modélisé par la transformation matérielle \emptyset :

$$x = \emptyset(X) = X + U(X) \quad \text{(III-4)}$$

L'ensemble des valeurs de U pour tous les sous-domaines forme le champ discret de déplacement mesuré sur la surface de l'échantillon.

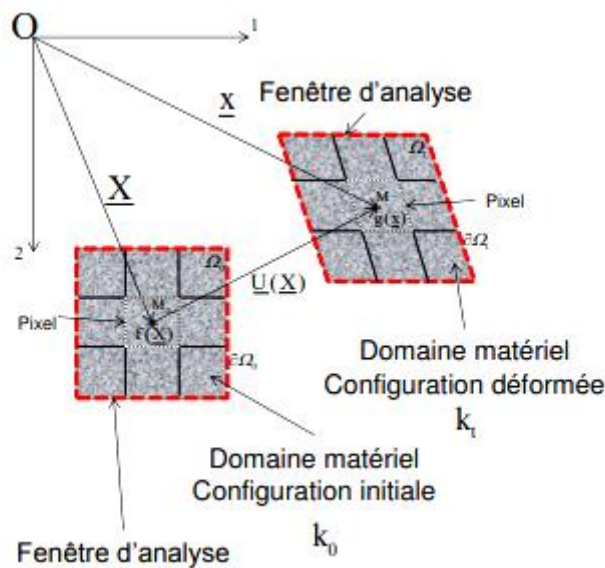


Figure III-10 Etat de référence et état déformé liés par un déplacement et une déformation homogène : méthode de corrélation d'images numériques.

Pour mener correctement cette procédure, il est nécessaire de disposer d'un motif sur chaque sous-domaine présentant des variations spatiales de niveaux de gris. Pour cela, différents motifs peuvent être employés. Suivant le support, il est parfois possible d'utiliser la texture naturelle des surfaces ou bien d'apporter un motif artificiel si cette texture naturelle ne fournit pas de variations de niveaux de gris suffisantes. Le motif peut être une grille régulière de traits (obtenue par marquage ou gravure) ou bien aléatoire comme le dépôt d'une poudre ou la projection d'une peinture.

La mise en correspondance des sous-domaines entre les deux images par la procédure de corrélation suppose la conservation du flux optique (intensité des niveaux de gris) durant tout le chargement. Il devrait donc y avoir égalité entre les grandeurs $f(X)$ et $g(x)$ qui sont les niveaux de gris d'un même sous-domaine respectivement à l'état de référence et à l'état déformé : $f(X) = g(x)$ soit encore $f(X) = g(\emptyset(X))$. Cette relation pourrait conduire à la détermination du vecteur déplacement U mais l'égalité ne peut pas être vérifiée parfaitement. La détermination du déplacement U nécessite donc la minimisation de la quantité $(f(X) - g(\emptyset(X)))$.

Cependant, dans cette expression la transformation matérielle \emptyset est inconnue mais elle peut être approximée localement sur chaque sous-domaine. Sur le domaine D centré sur le point $X^0(X, Y)$ à l'état de référence, la transformation matérielle \emptyset_0 est approchée par le développement limité du déplacement U :

$$\emptyset_0 = X + U(X_0) + \frac{\partial U}{\partial X}(X_0)(X - X_0) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial X^2}(X_0)(X - X_0)^2 + \dots$$

$$\frac{1}{(n-1)!} \frac{\partial^n U}{\partial X^n}(X_0)(X - X_0)^n + \mathbf{0} \quad \text{(III-5)}$$

A l'ordre 0, les variations de déplacement sur le domaine D sont supposées nulles et la transformation \emptyset_0 correspond alors uniquement à un déplacement de solide rigide :

$$\emptyset_0 = X + U(X_0) \quad \text{(III-6)}$$

Dans ce cas, la transformation matérielle locale est définie par deux paramètres correspondant aux composantes du vecteur déplacement : $U(X_0) = (u, v)$

A l'ordre 1, la transformation correspond à une translation et un gradient local homogène sur le domaine, les variations du champ de déplacement étant supposées linéaires :

$$\emptyset_0 = X + U(X_0) + \frac{\partial U}{\partial X}(X_0) \cdot (X - X_0) \quad \text{(III-7)}$$

Cette transformation matérielle locale prend en compte la rotation de solide rigide et la déformation locale homogène du sous-domaine D. Elle est définie par six paramètres : les composantes du vecteur déplacement (u,v) ainsi que les quatre composantes du gradient

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}\right) \quad \text{(III-8)}$$

Si l'évolution de la transformation réelle \emptyset est non-linéaire sur D, la transformation apparente $\emptyset_0(X)$ doit manifester un caractère non linéaire aussi. Dans ce cas-là, il est plus judicieux d'utiliser une transformation $\emptyset_0(X)$ non-linéaire (d'ordre 2 ou plus) dont la forme est donnée par la formule 1 en prenant $n = 2$.

Le choix de l'ordre de l'approximation doit être adapté aux mécanismes de déformation mis en jeu. La détermination des valeurs optimales des paramètres de la transformation approchée et en particulier des composantes du vecteur déplacement sur chaque domaine de corrélation D nécessite la minimisation de la quantité,

$$C = \sum_{X \in D} (f(X) - g(\emptyset(X))) \quad \text{III-9 appelée coefficient de corrélation.}$$

III.7. Analyse R_x

La Diffraction des Rayons X (DRX) est une puissante technique sans effets destructeurs destinée à caractériser les matériaux cristallins. [16] qu'ils soient massifs, sous forme de poudre ou de dépôts. En laboratoire, cette technique est principalement appliquée aux matériaux inorganiques : minéraux, métaux, alliages, céramiques....

III.7.1. Principe de la méthode

Le principe est le suivant : les faisceaux de Rayons X produits par le tube sont envoyés sur l'échantillon dans lequel ils sont déviés par les atomes. Ces faisceaux diffractés interfèrent entre eux, conduisant à la production d'un signal intense dans certaines zones précises de l'espace. C'est ce signal qui est collecté par le détecteur, et tracé sous forme d'une courbe (diffractogramme) qui présente des pics à des angles bien spécifiques de diffraction. La position de ces pics est une véritable signature de l'arrangement des atomes à l'intérieur d'un cristal (distance entre atomes, entre plans intracristallins). La relation empirique qui relie les angles auxquels sont observés les pics et les distances entre plans atomiques est la loi de Bragg.

La diffraction des rayons X permet de distinguer des produits ayant la même composition chimique mais dont les arrangements atomiques diffèrent. Par exemple, les carbonates de calcium comme la calcite et l'aragonite, de même formule chimique (CaCO_3), ont des diagrammes de diffraction différents. En revanche, les phases de nature chimique différente mais dont les atomes sont organisés selon le même arrangement présentent de grandes similitudes, à savoir des pics de diffraction localisés aux mêmes positions angulaires.

Dans un mélange, il est possible de déterminer la nature de chacune des phases cristallines en présence, sous réserve de connaître préalablement la signature de chacune de ces phases. La procédure d'identification se fait en deux étapes, la première (search) consiste à comparer les pics obtenus avec ceux contenus dans une base de données qui comprend plusieurs centaines de milliers de fiches. Cette étape est suivie par une étape de validation (match) au vu de la composition chimique. La validation est effectuée par l'utilisateur qui doit avoir une bonne connaissance de l'échantillon, afin de lever les ambiguïtés et les confusions.

III.7.2. Les avantages et les inconvénients de l'analyse R_x

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> -Sans effets destructeurs -Mesure quantitative du contenu des phases et orientation de la texture -Exigences minimales ou inexistantes de préparation des échantillons -Conditions ambiantes pour toute l'analyse 	<ul style="list-style-type: none"> -Ne peut identifier les matériaux amorphes -Pas d'informations sur le profil en profondeur -Taille minimum de réglage (spot size) de ~50µm

Tableau 1.4 Les avantages et les inconvénients de l'analyse R_x

CONCLUSION GENERALE

Les matériaux composites présentent un intérêt primordial dans l'industrie moderne .C'est ainsi que la recherche des mécanismes d'endommagements et les techniques utilisées représentent un intérêt dans la compréhension de la durabilité de ces matériaux. Notre recherche s'est articulée sur une étude théorique sur ces matériaux composites, les techniques utilisées.

Au départ, cette étude avait pour objectif d'élaborer des éprouvettes en matériaux composite à matrice Epoxy et des renforts de nature différents (organique et minérale), par la suite mener une étude comparative sur le comportement mécanique.

En perspectives :

Plusieurs pistes pour compléter cette étude bibliographique peuvent être envisagées :

- Elaboration des éprouvettes en matériaux composites stratifiées avec une résine mélangée avec un renfort :organique comme une poudre Perglas de dattes ou une poudre de noyau d'olive, fibres de verre, d'aramide ...), et renfort minérale comme les fibres de carbone, métalliques, et mener une étude expérimentale de caractérisation sous différentes sollicitations : sollicitations de traction simple, traction cyclique, compression pure, compression cyclique, couplage traction-compression, couplage traction-cisaillement et enfin compression dynamique. Ces essais permettront de déterminer les paramètres des lois d'endommagement.
- Elaborer une modélisation numérique du comportement d'un stratifié à un chargement mécanique et relever l'impact des contraintes, la vitesse de chargement l'impact des défauts sur l'endommagement des matériaux composite et la durabilité de ces matériaux.

LISTES DES REFERENCES

Référence [1] : Touhar Lilia, Caractérisation d'un matériau composite stratifié à fibre de verre/époxy en traction, Diplôme pour obtention de Master 2014-2015, Université Baji Mokhtar ANNABA

Référence [2] : J.M Berthlot , Mécaniques des matériaux et structures composites, Novembre 2010

Référence [3] : Pascal Celle, Les matériaux composites, dossier pédagogique créé avec la collaboration de Marc Marzano-Action composite, ANFA/ed 2014,
http://www.educauto.org/sites/www.educauto.org/files/file_fields/2015/04/01/dossier_pedagogique_materiaux_composites_1.pdf

Référence [4] : A.Baouya, Etude physico-chimique et tests microbiologiques d'un revêtement non contaminable à base d'hypoxy, Diplôme de Master 2018-2019, Université de Saad Dahleb_Blida 2

Référence [5] : A.Baouya, Etude physico-chimique et tests microbiologiques d'un revêtement non contaminable à base d'hypoxy, Diplôme de Master 2018-2019, Université de Saad Dahleb_Blida 2

Référence [6] : Structure et matériaux composites,
http://mms2.enscm.fr/mms_paris/plaque/polycop/f_plaque_poly.pdf

Référence [7] : Contribution à l'étude du comportement d'un matériau composite à base de fibres de carbone pour la réalisation de prothèse orthopédiques (ONAPH ANNABA), Diplôme de Master 2018-2019, Université Baji Mokhtar ANNABA

Référence [8] : J.M Berthlot , Mécaniques des matériaux et structures composites, Novembre 2010

Référence [9] : B.Bakhouché, Caractérisation d'un matériau composite stratifié à fibre de verre/époxy en flexion 3 points statiques, Diplôme de Master 2017-2018, Université Baji Mokhtar ANNABA.

Référence [10] : B.Bakhouché, Caractérisation d'un matériau composite stratifié à fibre de verre/époxy en flexion 3 points statiques, Diplôme de Master 2017-2018, Université Baji Mokhtar ANNABA.

Référence [11] : Eril Kuhn, Contrôle non destructif des matériaux composites excité par une onde acoustique ou thermique /Observation par thermographie , Thèse de Doctorat , 6 décembre 2013 ,Université PARIS Ouest Nanterre la défense_Ecole doctorale 139.

Référence [12] : E.B Ndiaye, Contrôle santé de structures sandwichs composites caractérisation et évaluation non destructives de l'adhésion et du vieillissement_Simulations par éléments finis et expérimentation par mesure d'impédance et par ultrasons multi éléments, Thèse pour obtenir de grade de Docteur 17 Septembre 2014, Université de Havre, Ecole Doctorale SPMIL.

Référence [13] : <https://www.eeca.eu/capteur-ultrason-une-technologie-de-pointe/> .

Référence [14] : N.R- J.R- A.T- L.B- P.C, Suivi de l'endommagement dans les structures en composites par une analyse optique in-stu, Article Janvier 2010, Revue de Metalurgie 107,

https://www.researchgate.net/publication/46421153_Suivi_de_l'endommagement_dans_les_structures_en_composites_par_une_analyse_optique_in-situ

Référence [15] : P.Lecont Grosbras, Utilisation de la techniques de corrélation d'images pour l'étude des effets de bord dans les composites stratifiés, Thèse de Doctoratn Ecole centrale de LILLE.

Référence [16] : Diffraction des rayons X, Analyse XRD,
<https://www.eaglabs.fr/cm/xrd.html>