



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique



جامعة وهران 2 محمد بن أحمد  
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed  
معهد الصيانة و الأمن الصناعي  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

## Département de Maintenance en Electromécanique



### MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière :** Génie Industriel

**Spécialité :** Maintenance – Fiabilité - Qualité

### Thème

**Effet de la position et du nombre de fibre sur le facteur  
d'intensité de contrainte d'un VER hybride composite sous une  
charge statique**

Présenté et soutenu publiquement par :

- Abbassini Mohamed El Amine et - Moulay Abdelkader

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
ABDI Ghezail	MCA	IMSI UNIV ORAN 2	Président
ACHACHE Habib	MCA	IMSI UNIV ORAN 2	Encadreur
ADJELOUA Abdelaziz	MCB	IMSI UNIV ORAN 2	Examinateur

*Année universitaire : 2022/2023*

## *Dédicace*

À ma précieuse famille,

À mes amis fidèles,

et À tous ceux qui ont contribué,

je vous offre humblement ce travail en gage de gratitude et  
d'amitié.

*Mohamed El Amine*

*Je dédie cet ouvrage*

À mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur  
tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

À mes chers frères, pour leurs appuis et leurs encouragements,

À ma chère sœur pour leur encouragement permanent , et leur soutien  
moral

À toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours  
universitaire,

À tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite  
plus de succès.

À tous ceux que j'aime

*Abdelkader*

# **Remerciements**

*Tout d'abord, nous remercions Allah pour nous avoir accordé la force, la persévérance et la clarté d'esprit nécessaires pour accomplir cette tâche.*

*Nous adressons nos sincères remerciements à notre superviseur, **M. ACHACHE Habib**, pour sa précieuse guidance, son dévouement constant et ses conseils éclairés qui ont grandement enrichi notre travail.*

*Nos remerciements vont également aux membres du jury, **M.ADJLOUA Abdelaziz** et **Mme. ABDI Ghezail**, pour leur temps, leur expertise et leurs précieuses contributions à l'évaluation de ce travail.*

*Enfin, nous remercions chaleureusement toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont joué un rôle dans notre parcours académique et la réalisation de ce travail. Votre soutien et votre encouragement ont été inestimables.*

## ملخص :

الدراسة الرقمية باستخدام طريقة العناصر المحددة تهدف إلى تحليل تطور منحنى القوة-الانفعال لنموذجين هندسيين غير ، وتكوينات مختلفة ، مع مراعاة عدة متغيرات مثل مجموعات مختلفة ، متضررين ومتضررين مستمدان من نموذج مرجعي . بالإضافة إلى تغير معامل كثافة التوتر للنموذج المتضرر ، وألياف مختلفة

## ***Résumé :***

Notre étude numérique par la méthode des éléments finis consiste à analyser l'évolution de la courbe force-déplacement de deux modèles géométrique non endommagé et endommagé inspiré d'un modèle référentiel tenant compte de plusieurs paramètres tel que différent combinaison, différent configuration et différent fibres ainsi la variation du facteur d'intensité de la contrainte pour le modèle endommagé.

## ***Summary :***

The digital study using the finite element method aims to analyze the evolution of the force-displacement curve of two geometric models, one undamaged and one damaged, inspired by a reference model, taking into account various parameters such as different combinations, configurations, and fibers, as well as the variation of the stress intensity factor for the damaged model

*Sommaire*

<b>Introduction général .....</b>	<b>01</b>
<b>chapitre I : Généralités sur les matériaux composites.....</b>	<b>03</b>
I.1. Introduction.....	04
I.2. Définition .....	04
I.3. Constituants Des Matériaux Composites.....	05
I.3.1. Les renforts .....	05
I.3.1.1. Principaux renforts .....	06
I.3.1.2. Renforts et propriétés mécaniques .....	09
I.3.1.3. Renforts dans les matériaux composites.....	10
I.3.2. Les matrices .....	10
I.3.2.1. Les matrices thermodurcissables .....	11
I.3.2.2. Les matrices thermoplastiques.....	13
I.3.3. Les charges et additifs .....	14
I.3.3.1. Les charges .....	15
I.3.3.2. Les additifs .....	15
I.4. Classification des matériaux composites.....	15
I.4.1. Classification selon leurs performances et leurs couts .....	15
I.4.2. Classification selon la forme des composants .....	16
I.4.3. Classification selon la nature des composants .....	16
I.5. Les structures des composites .....	17
I.5.1. Structure de renfort .....	17
I.5.2. Structure globale .....	18
I.6. La mise en œuvre des composites .....	19
I.6.1. Moulages sans pression .....	19
I.6.1.1. Moulage au contact .....	19
I.6.1.2. Moulage par projection simultanée .....	20

I.6.2. Moulage sous vide .....	21
I.6.3. Moulage par compression .....	21
I.6.3.1. Moulage par injection de résine .....	21
I.6.3.2. Moulage par compression à froid (a) .....	21
I.6.3.3. Moulage par compression à chaud (b) .....	22
I.6.3.4. Moulage par injection .....	22
I.6.4. Moulage en continu .....	22
I.6.5. Moulage par pultrusion .....	23
I.6.6. Moulage par centrifugation .....	23
I.6.7. Moulage par enroulement filamentaire.....	24
I.7. Domaines d'application.....	25
I.8. Les Avantages et les inconvénients .....	25
I.8.1. Les avantages .....	25
I.8.2. Les inconvénients .....	26
<b>Chapitre II : Endommagement Des Volumes Élémentaires Représentatifs (VER) En</b>	
<b>Matériaux Composites.....</b>	<b>27</b>
II.1. Introduction.....	28
II.2. Définition d'un Volume Élémentaire Représentatif .....	28
II.3. L'homogénéisation des matériaux composites.....	33
II.3.1. Différentes modèles d'homogénéisation utilisées pour définir le comportement macroscopique des matériaux composites .....	34
II.4. Mécanique de la rupture .....	36
II.4.1. Modes de rupture .....	37
II.4.2. L'endommagement des matériaux composites .....	37
II.5. Critères d'endommagements des composites.....	40
II.5.1. Définition .....	40
II.5.2. Principes généraux .....	41

II.5.3. Critère de la contrainte maximale .....	41
II.5.4. Critère de la déformation maximale .....	42
II.5.5. Critères de rupture interactifs .....	42
II.5.6. Critères phénoménologiques .....	42
II.6. Facteur d'intensité des contraintes .....	44
II.6.1. Singularité des contraintes en mode I et mode II .....	45
II.6.2. Singularité des contraintes en mode III .....	45
II.6.3. Ténacité .....	46
II.7. Comportement mécanique des matériaux composites.....	46
II.7.1. Introduction .....	46
II.7.2. Le champ de contraintes.....	47
II.7.3. Le champ de déformations.....	48
II.7.4. Les équations de compatibilité .....	49
II.7.5. La relation contraintes – déformations .....	49
<b>CHAPITRE III : Comportement en endommagement d'un VER composite sous une charge statique.....</b>	<b>51</b>
III.1. Introduction.....	52
III.2. Modèle référentielle.....	52
III.2. Modèle géométrique .....	54
III.3. Maillage.....	55
III.5. Résultats et discussions.....	56
III.5.1. Modèle Non endommagé.....	56
III.5.1.1. Configuration Organisé .....	56
III.5.1. 2.Configuration non organisé (aléatoire) .....	58
III.5.1. 3.Configuration Organisé (Symétriques) .....	59
III.5.1.4. L'effet des différentes modèles retenus sur la courbe force-déplacement .....	62

III.5.2. Modèle endommagé.....	63
III.5.2.1. Configuration Organisée.....	63
III.5.2.1.1. Comparaison entre le facteur d'intensité de contraintes $K_I$ pour Crack-1 et Crack-2 de la combinaison 123.....	64
III.5.2.1.2. L'effet des différentes combinaisons sur le facteur d'intensité de contraintes $K_I$ .....	65
III.5.2.2. Configuration non organisé (aléatoire) endommagé.....	66
III.5.2.2.1. Comparaison entre le facteur d'intensité de contraintes $K_I$ pour Crack-1 et Crack-2 de la combinaison non organisée (aléatoire ) endommagé .....	66
III.5.2.3. Configuration organisé (Symétriques) endommagé.....	67
III.5.2.3.1. Comparaison entre le facteur d'intensité de contraintes $K_I$ pour Crack-1 des quatre combinaisons organisées (symétrique) endommagé .....	68
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>69</b>



*Liste des figures*

**Figure de chapitre I**

<b>Figure I.1</b> : Composition d'un matériau composite.....	05
<b>Figure I.2</b> : Principaux matériaux de renforts.....	06
<b>Figure I.3</b> : Fibre de verre.....	06
<b>Figure I.4</b> : Fibre de carbone.....	07
<b>Figure I.5</b> : Fibres d'aramide.....	08
<b>Figure I.6</b> : (a) fibres longues, (b) fibres courtes, (c) particules.....	10
<b>Figure I.7</b> : Les matrices thermodurcissables .....	11
<b>Figure I.8</b> : Exemples de tissus.....	18
<b>Figure I.9</b> : Exemples de stratifiés.....	18
<b>Figure I.10</b> : Matériau sandwich.....	19
<b>Figure I.11</b> : Moulage au contact .....	20
<b>Figure I.12</b> : Moulage par projection simultanée .....	20
<b>Figure I.13</b> : Moulage par injection de résine.....	21
<b>Figure I.14</b> : Moulage par compression à chaud(b).....	22
<b>Figure I.15</b> : Moulage en continu .....	23
<b>Figure I.16</b> : Moulage par pultrusion .....	23
<b>Figure I.17</b> : Moulage par centrifugation.....	24
<b>Figure I.18</b> : Moulage par enroulement filamentaire .....	24

Figure de chapitre II

<b>Figure II.1</b> : Exemples des VERs d'une microstructure hétérogène.....	30
<b>Figure II.2</b> : Modélisation de l'élément de volume representative.....	31
<b>Figure II.3</b> : Variation des propriétés effectives moyennes et de l'erreur en fonction de la taille de VER.....	32
<b>Figure II.4</b> : Détermination du VER ,(a) valeurs moyennes et intervalles de confiance sur valeur moyenne de module d'élasticité. (b) module de cisaillement, en fonction de la taille du domaine.....	33
<b>Figure II.5</b> : Séparation des échelles.....	34
<b>Figure II.6</b> : modèle d'homogénéisation semi-analytiques.....	35
<b>Figure II.7</b> : Modes de rupture.....	37
<b>Figure II.8</b> : Mécanisme de rupture d'un stratifié.....	38
<b>Figure II.9</b> : Rupture des fibres.....	40
<b>Figure II.10</b> : Rupture transverse de la matrice.....	40
<b>Figure II.11</b> : Rupture longitudinale de la matrice.....	40
<b>Figure II.12</b> : Rupture de l'interface fibre/matrice.....	40
<b>Figure II.13</b> : Rupture de l'interface entre les plis.....	40
<b>Figure II.14</b> : Quatre modes de rupture du critère Hashin : (A) Traction des fibres, (B) Compression des fibres, (C) Traction/cisaillement de la matrice et (D) Compression de la matrice .....	43
<b>Figure II.15</b> : Coordonnées polaires en pointe de fissure.....	44
<b>Figure II.16</b> : Définition des contraintes et déformations.....	47
<b>Figure II.17</b> : La direction des contraintes.....	48

Figure de chapitre III

<b>Figure III.1</b> : Modèle référentiel .....	53
<b>Figure III.2</b> : Modèle géométrique .....	55
<b>Figure III.3</b> : Maillage du modèle .....	55
<b>Figure III.4</b> : Configuration organisé des fibres .....	56
<b>Figure III.5</b> :Variation de la force en fonction du déplacement pour le cas du chargement suivant l'axe des X et pour les trois différentes combinaisons (3,1,2-2,3,1-1,2,3) .....	56
<b>Figure III.6</b> : Variation de la force en fonction du déplacement pour le cas du chargement des Y et pour les trois différentes combinaisons (312 ; 231 ; 123).....	57
<b>Figure III. 7</b> : Variation de la force en fonction du déplacement pour le cas du chargement des Z et pour les trois différentes combinaisons (312 ; 231 ; 123).....	57
<b>Figure III.8</b> : Configuration non organisé (aléatoire) des fibres .....	58
<b>Figure III. 9</b> : Variation de la force en fonction du déplacement pour les cas du chargement suivant les trois axes (X, Y et) Z et pour une combinaison aléatoire .....	59
<b>Figure III.10</b> : Configuration Organisé (Symétriques) des fibres .....	59
<b>Figure III.11</b> : Variation de la force en fonction du déplacement pour le cas du chargement suivant l'axe des X et pour les trois différentes combinaisons symétriques (123-123, 123-321, 213-312 et 321-123) .....	60
<b>Figure III. 12</b> : Variation de la force en fonction du déplacement pour le cas du chargement suivant l'axe des Y et pour les trois différentes combinaisons symétriques (123-123, 123-321, 213-312 et 321-123) .....	61
<b>Figure III. 13</b> : Variation de la force en fonction du déplacement pour le cas du chargement suivant l'axe des Z et pour les trois différentes combinaisons symétriques (123-123, 123-321, 213-312 et 321-123) .....	61
<b>Figure III. 14</b> : Variation de la force en fonction du déplacement pour les trois cas retenues (symétrique 213-312, non organisé et organisé 231) .....	62
<b>Figure III. 15</b> : Variation de la force en fonction du déplacement pour le cas du chargement suivant l'axe des Y et pour les trois différentes combinaisons organisés (123 ; 231 ; 312) .....	62
<b>Figure III. 16</b> : Variation des facteurs d'intensité de contraintes KI, KII et KIII en fonction de la largeur du volume élémentaire représentatif hybride dans le cas du chargement suivant l'axe des Y pour la combinaison organisés (123) et pour les deux fonds de fissure .....	63

<b>Figure III. 17 :</b> Variation des facteurs d'intensité de contraintes KI en fonction de la largeur du volume élémentaire représentatif hybride dans le cas du chargement suivant l'axe des Y pour la combinaison organisés (123) et pour les deux fonds de fissure .....	64
<b>Figure III. 18:</b> Variation des facteurs d'intensité de contraintes KI en fonction de la largeur du volume élémentaire représentatif hybride dans le cas du chargement suivant l'axe des Y pour les trois combinaisons organisés (312 ; 231 ; 123) et pour un fond de fissure .....	65
<b>Figure III. 19:</b> Variation de la force en fonction du déplacement pour le cas du chargement suivant l'axe des Y et pour la combinaison non organisés (aléatoire) endommagé .....	65
<b>Figure III. 20:</b> Variation des facteurs d'intensité de contraintes KI en fonction de la largeur du volume élémentaire représentatif hybride dans le cas du chargement suivant l'axe des Y pour la combinaison non organisé (aléatoire) endommagé et pour les deux fonds de fissure .....	66
<b>Figure III. 21 :</b> Variation de la force en fonction du déplacement pour le cas du chargement suivant l'axe des Y et pour les quatre différentes combinaisons organisés (123-123 ; 123-321 ; 231-312 ; 321-123) .....	67
<b>Figure III. 22 :</b> Variation des facteurs d'intensité de contraintes KI en fonction de la largeur du volume élémentaire représentatif hybride dans le cas du chargement suivant l'axe des Y pour les quatre combinaisons organisés symétriques (123-123 ; 123-321 ; 231-312 ; 321-123) et pour un fond de fissure .....	67

*Liste des tableaux*

**Chapitre I**

<b>Tableau I.1</b> : Propriétés des différentes fibres de renforcement .....	09
<b>Tableau I.2</b> : Les avantages et les inconvénients du les résines polyesters .....	12
<b>Tableau I.3</b> : Les avantages et les inconvénients du les résines époxydes .....	12
<b>Tableau I.4</b> : Propriétés des différentes matrices .....	14

**Chapitre II**

<b>Tableau II.1</b> : Définitions de VER proposées par les scientifiques .....	29
--	----

**Chapitre III**

<b>Tableau III.1</b> : Propriétés mécaniques des matériaux.....	55
---	----

### *Symbole & Notations générales*

2D : Deux dimensions

3D : Trois dimensions

[. ] : Symbole de matrice

{. } : Symbole de vecteur

KUBC : Conditions aux limites cinématiques

SUBC : Conditions aux limites statique

PBC : Conditions aux limites périodique

VER : Volume élémentaire représentatif

$\sigma_{ij}$  : Tenseur de contrainte

$\varepsilon_{ij}$  : Tenseur de déformation

$\sigma_0$  : Contrainte uniforme appliquée

$\omega_{ij}$  : Tenseur de rotation antisymétrique

E : Module de Young

$\mu$ : Module de cisaillement

$\nu$ : Coefficient de Poisson

d : la taille caractéristique des hétérogénéités

L : la taille caractéristique de la structure macroscopique

l:la taille caractéristique du volume élémentaire représentatif

K : Facteur d'Intensité de Contrainte

Kc : Facteur d'Intensité de Contrainte critique

KI , KII , KIII : Facteurs d'intensité de contrainte en mode I, II et III

Y : Coefficient de correction

u : Déplacement

v : Déplacement selon X2

r,  $\theta$  : Coordonnées polaires

$\nu$  : Coefficient de Poisson

## *Symbole & Notations générales*

---

$V_x$  : Fraction volumique

$V_f$  : Fraction volumique de renfort

$V_m$  : Fraction volumique de matrice

$(\phi)$  : Fonction scalaire

$X^+, Y^+, Z^+, X^-, Y^-, Z^-$  : sont les contraintes ultimes (ou résistances limites) en traction, en compression respectivement

$f_m$  : Fraction volumique de la matrice

$f_i$  : Fraction volumique de l'inclusion

$[C]$  : la matrice de rigidité

$[S]$  : la matrice de souplesse ou de flexibilité.



***Introduction  
Générale***



### **Introduction général**

L'évolution de l'ingénierie moderne a suscité un besoin croissant de matériaux capables de combiner simultanément des caractéristiques apparemment contradictoires, telles que rigidité, résistance mécanique, ténacité élevée et légèreté. Cependant, la réalité est que dans le monde des matériaux, aucun élément simple ne peut satisfaire pleinement ces exigences exigeantes. Pour répondre à ce défi complexe, nous sommes inévitablement conduits à explorer l'univers des matériaux composites.


Les matériaux composites, résultant de l'ingénieuse fusion de différentes phases, ont révolutionné l'industrie grâce à leur capacité à associer ces propriétés tant convoitées. Leur utilité s'étend des confins de l'aérospatiale aux pistes automobiles, des mers profondes de la construction navale à bien d'autres horizons encore. Leur polyvalence les a propulsés au rang de choix privilégié pour une multitude d'applications.

Ce mémoire de fin d'études s'engage à plonger dans les profondeurs de trois aspects cruciaux des matériaux composites. Dans un premier temps, nous entamerons un voyage au cœur de la connaissance des matériaux composites en vous exposant leurs fondements, leur composition, ainsi que leurs avantages et leurs limitations.

Ensuite, nous explorerons les arcanes de l'endommagement des Volumes Élémentaires Représentatifs (VER) en matériaux composites, en mettant en lumière les modes d'endommagement fréquemment rencontrés et en évaluant les conséquences qui en découlent.

Le point central de notre étude réside dans l'exploration du comportement en cas d'endommagement d'un VER composite exposé à une charge statique. Nous nous attacherons à comprendre comment ces matériaux réagissent lorsqu'ils sont soumis à des contraintes statiques, en mettant en évidence les facteurs clés qui influencent leur comportement. De plus, nous explorerons les méthodes de caractérisation et d'analyse qui s'avèrent pertinentes dans ce contexte.

L'objectif ultime de ce mémoire est de contribuer à une compréhension plus approfondie des matériaux composites, de leurs propriétés mécaniques et de leur réaction face à des charges statiques. En ce faisant, nous espérons fournir des informations inestimables non seulement pour les chercheurs, mais également pour les ingénieurs qui évoluent dans ce domaine en constante évolution.



***Chapitre I : Généralités***  
*sur les matériaux*  
*composites*

### **I.1. Introduction**

Les matériaux composites continuent d'être l'objet de recherches approfondies et de développements dans le domaine industriel, et leur utilisation a un impact significatif sur notre monde moderne. Les chercheurs s'efforcent d'améliorer les propriétés des matériaux composites en explorant de nouvelles techniques de fabrication, de nouveaux renforts et de nouvelles matrices pour optimiser leurs performances dans diverses applications. De plus, avec l'évolution des besoins et des défis technologiques actuels, les recherches visent à rendre les matériaux composites plus durables, résistants à les divers phénomènes , recyclables et respectueux de l'environnement.

Dans l'industrie, les matériaux composites sont devenus essentiels, notamment dans le secteurs de l'aérospatiale, de l'automobile, du quelques ingénieries et bien d'autres. Leur légèreté combinée à leur résistance et à leur flexibilité de conception a permis de réaliser des avancées notables dans une fabrication plus efficaces sur le plan énergétique, de structures plus résistantes et de composants plus performants. De plus, l'utilisation de matériaux composites a contribué à la réduction du poids des produits, à l'amélioration de leur durée de vie et à la création de solutions innovantes répondant aux défis de notre époque [1].

### **I.2. Définition**

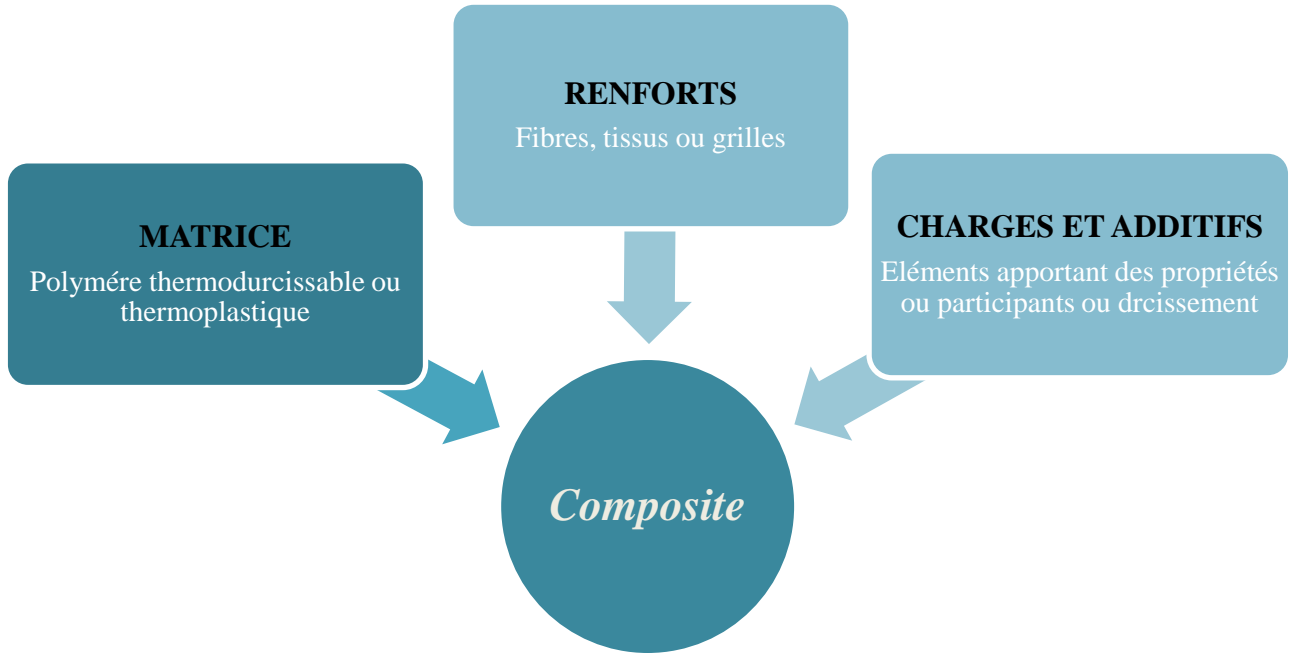
Un composite est un matériau hétérogène, formé d'au moins deux constituants qui occupent des phases différentes : un renfort et une matrice. Le renfort, généralement sous forme de fibres ou de particules, apporte la résistance et la rigidité au composite, tandis que la matrice, souvent une résine polymère, assure la cohésion et transfère les charges entre les renforts. Ces constituants peuvent également être modifiés par l'ajoute d'additifs pour améliorer certaines propriétés spécifiques du composite.

Cette définition met en évidence l'importance des éléments constitutifs d'un matériau composite, à savoir le renfort et la matrice. Le renfort, tel que des fibres ou des particules, confère au composite des propriétés de résistance et de rigidité, tandis que la matrice, souvent une résine polymère, assure la cohésion globale du matériau et facilite le transfert des charges entre les renforts. De plus, cette définition mentionne également l'utilisation d'additifs pour améliorer certaines propriétés spécifiques du composite, ce qui souligne l'importance des modifications et des ajustements pour obtenir les performances souhaitées [2].

### I.3. Les constituants

De manière générale, les principaux composants des matériaux composites sont :

- ❖ Le renfort.
- ❖ La matrice
- ❖ Charges et additifs.



**Figure I.1** : Composition d'un matériau composite

#### I.3.1. Les renforts

Les renforts jouent un rôle crucial dans les matériaux composites en améliorant leurs performances mécaniques et en conférant des propriétés spécifiques. Ils sont utilisés pour renforcer la matrice et lui apporter une résistance supplémentaire. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tridirectionnel ou plus) [3].

La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée dans l'organigramme suivant :

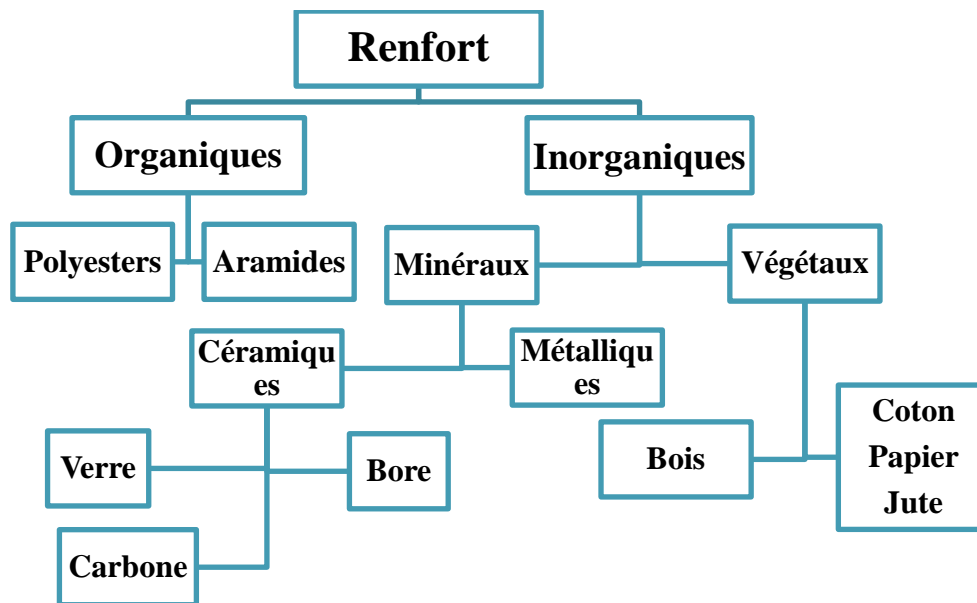


Figure I.2 : Principaux matériaux de renforts.

### I.3.1.1. Principaux renforts :

Parmi les différents types de renforts utilisés pour renforcer les structures, on trouve [4] :

#### ➤ Fibres de verre :

Les fibres de verre sont largement utilisées en raison de leur excellent rapport performance/prix. Cela signifie qu'elles offrent des performances remarquables tout en étant relativement abordables par rapport à d'autres renforts.

Les fibres de verre sont fabriquées à partir de sable (silice) et d'additifs tels que l'alumine, le carbonate de chaux, la magnésie et l'oxyde de bore.

On distingue trois types de fibres de verre:

- **Verre E** : pour les composites à grande diffusion.
- **Verre S** : pour les applications d'électricité.
- **Verre R** : pour les composites à haute performance.

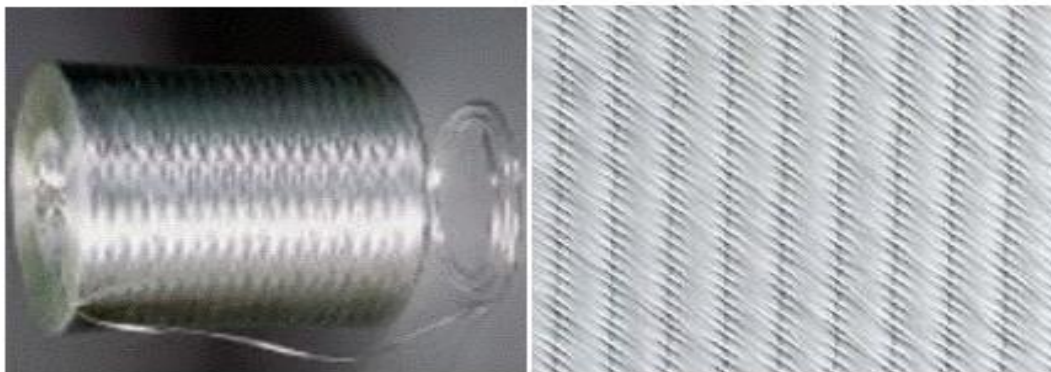


Figure I.3 : Fibre de verre.

- **Avantages de la fibre de verre :**

- Compatibilité avec les matrices organiques.
- Bonnes propriétés diélectriques.
- Faible coût.

- **Inconvénients de la fibre de verre :**

- Faible module d'élasticité (par rapport aux fibres de carbone et l'aramide).
- Vieillissement au contact de l'eau.

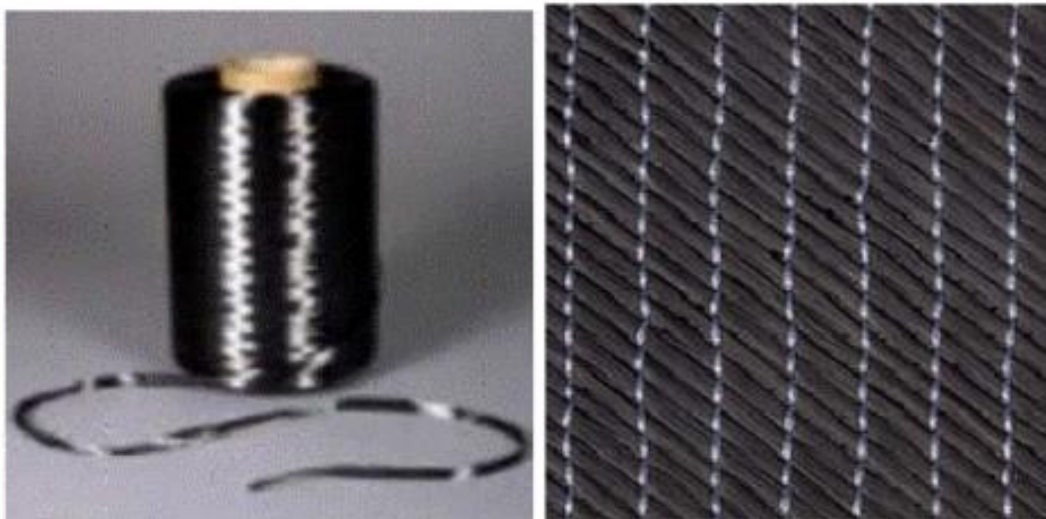
➤ **Fibres de carbone :**

Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques et sont élaborées à partir d'un polymère de base appelé précurseur.

Actuellement, les fibres utilisées comme précurseurs sont des fibres acryliques élaborées à partir du polyacrylonitrile (PAN). La qualité des fibres de carbone finales dépend fortement des qualités du précurseur.

Il existe deux types de fibres distincts :

- Les fibres de haute résistance (HR) sont capables de résister à une combustion entre 1000 et 1500°C.
- Les fibres à haut module (HM) sont conçues pour résister à des températures de combustion de 1800 à 2000 °C



**Figure I.4 :** Fibre de carbone

- **Avantages de la fibre de carbone :**
  - Bonnes propriétés mécaniques.
  - Dilatation thermique très faible .
  - Faible densité.
- **Inconvénients de la fibre de carbone :**
  - Prix très élevé.
  - Fragilité au choc.
  - Adhésion difficile avec les résines.

➤ **Fibres d'aramide**

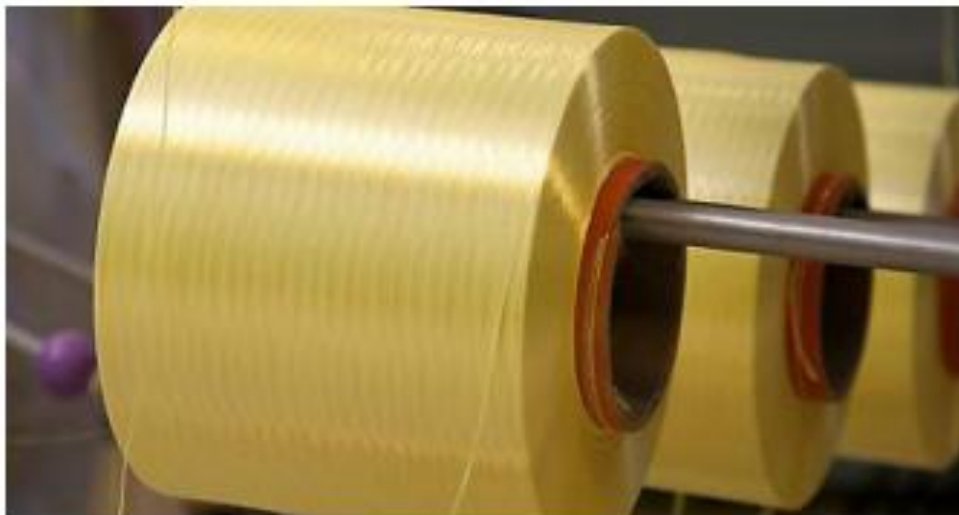
Les fibres d'aramide sont des fibres synthétiques à base de polyamidearomatiques dont les premières applications reviennent à l'année 1972.

Ces fibres sont généralement développées pour renforcer les pneumatiques.

Ils en existent deux types principaux :

- La fibre haute module Kevlar 49 et Twaron HM.
- La fibre standard Kevlar 29 et Twaron HM 50.

Les fibres d'aramide présentent la même particularité que les fibres de carbone. Elles ont un coefficient de dilatation linéique négatif dans le sens axial.



**Figure I.5** : Fibres d'aramide

➤ **Fibre céramiques :**

Ces fibres sont représentés généralement par les fibres de bore et de carbure de silicium (SiC) , qui sont considérées comme les plus coûteuses de toutes, principalement en raison de la complexité de leur fabrication ,qui coûte environ 1000 euros par kilogramme.

La méthode industrielle pour produire ces fibres implique la réduction du chlorure de bore à une température de 1100 °C, qui se dépose sur un fil de tungstène d'un diamètre compris entre 10 et 15 mm. Ce processus aboutit à l'obtention de fibres d'un diamètre compris entre 100 et 200 µm. Un procédé similaire est utilisé pour produire des fibres de carbure de silicium (SiC).

**I.3.1.2. Renforts et propriétés mécaniques :**

Les renforts assurent les performances mécaniques du matériau composite. Un grand nombre de fibres sont disponibles en fonction des propriétés et des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Ils se caractérisent par la nature des fibres qui les composent et leur présentation. Le tableau résume l'ensemble des fibres les plus couramment utilisées ainsi que leurs propriétés [5].

**Tableau I.1 :** Propriétés des différentes fibres de renforcement

Type de fibres	Densité	Module en traction GPA	Résistance à la rupture MPA	Allongement %	Coefficient de dilatation $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Fibre de verre	2.54	72	2800	2	7.2
Fibre de carbone HR	1.76	230	3290	1.4	3
Fibre de carbone HM	1.81	399	2450	0.5	-0.5
Fibre d'aramide	1.44	130	2340	2.8	-4
Fibre de bore	2.6	414	2900	0.8	4.5
Fibre de polyéthylène	0.97	119	2625	4	10
Fibr de basalte	2.8	89	4800	3.15	8
Fibre de sisal	1.4	15	770	2.2	4
Fibre de lin	1.49	10	800	3	4
Fibre de silicium	3.18	428	3100	0.72	5



### I.3.1.3. Renforts dans les matériaux composites

D'un point de vue général, on peut distinguer trois grands types de renforts [6] :

- Les fibres longues (i.e. longueur comparable aux dimensions de la pièce, (figure 6 (a)) ;
- Les fibres courtes (i.e. de longueur faible devant les dimensions de la pièce, (figure 6 (b)) ;
- Les particules, ou charges renforçantes (figure 6 (c)).

Tous ces renforts sont inclus au sein d'une matrice qui répartit les efforts entre eux et les protège des agressions extérieures, comme indiqué ci-dessus. En outre, lorsque les renforts sont des fibres, celles-ci peuvent être soit orientées dans une direction précise, soit disposées aléatoirement.

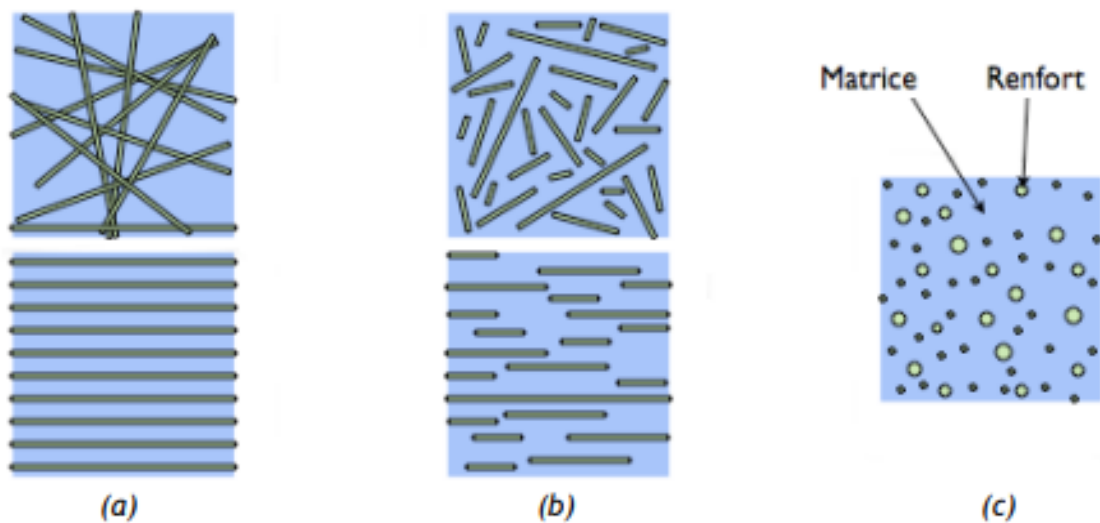


Figure I.6 : (a) fibres longues, (b) fibres courtes, (c) particules.

### I.3.2. Les matrices :

Les matrices jouent un rôle important dans la structure des pièces composites [2] :

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

Il existe différentes sortes de matrices que nous pouvons classer dans les catégories suivantes :

- les matrices thermodurcissables.
- les matrices thermoplastiques.
- les matrices métalliques.
- les matrices biodégradables.

### I.3.2.1. Les matrices thermodurcissables :

Les matrices thermodurcissables sont les plus couramment utilisées pour la fabrication de pièces en matériaux composites. Elles se répartissent en différentes familles dont chacune possède une composition chimique particulière. Parmi ces matrices on distingue principalement [7] :

- Les résines polyesters (usage courant),
- Les résines époxydes (tenue mécanique et chimique).
- Les résines vinylesters (tenue chimique).
- Les résines phénoliques (résistance au feu).
- Les résines polyuréthanes (densité et dureté variables).
- Les résines polyimides (tenue température > 250°C).



Figure I.7 : Les matrices thermodurcissables

#### ▪ Les résines polyesters :

Les résines polyesters insaturées viennent de très loin en tête dans la mise en œuvre des matériaux composites. Leur développement est le résultat :

- D'un faible coût de production,
- De leur diversité offrant de multiples possibilités,
- D'une adaptation à des procédés de fabrication faciles à mettre en œuvre et à automatiser.

D'où un développement industriel sans cesse croissant. Suivant leur module d'élasticité, les résines polyesters sont classées en : résines souples, résines semi-rigides et résines rigides. Les résines habituellement utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont du type rigide.

**Tableau I.2 :** Les avantages et les inconvénients du les résines polyesters

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bon accrochage sur la fibre de verre</li> <li>- Facilité de mise en œuvre</li> <li>- Assez bonne tenue chimique</li> <li>- Prix faible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Retrait important (6 à 7 % en volume)</li> <li>- Inflammable</li> <li>- Durée de conservation limitée</li> <li>- Temps de travail limité</li> </ul>

- **Les résines époxydes :**

Les matrices époxydes sont utilisées dans la fabrication de composites hautes performances. Elles sont obtenues par condensation de bisphénol A avec l'épichlorhydrine du glycérol en milieu basique.

**Tableau I.3 :** Les avantages et les inconvénients du les résines époxydes

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Densité 1.2 à 1.4</li> <li>- Retrait &lt; 1 %</li> <li>- Excellente propriété mécanique</li> <li>- Bonne résistance chimique aux bases et solvant</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cycle de moulage long</li> <li>- Nécessite des démoulants appropriés</li> <li>- Tenue thermique en continue limitée à 180 °C</li> </ul>

- **Les résines vinylesters:**

Elles sont considérées comme des variantes de polyesters, qui se produisent à partir d'acides acryliques, elles possèdent une bonne résistance à la fatigue et un excellent comportement à la corrosion, mais demeurent combustibles.

- **les résines phénoliques:**

Elles se caractérisent par une bonne tenue au feu sans fumée, elles restent fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à colorer et mettre en œuvre.

- **les résines polyuréthannes et polyurées:**

Dans la fabrication des pièces composites, il est utilisé surtout des formules, dont la faible viscosité permet un bon remplissage du moule, les constituants sont livrés à d'état de prépolymères liquides.

▪ **Les résines poly-imides :**

Ces résines sont surtout utilisées dans les composites à haute performance pour leurs stabilités à haute température (de l'ordre de 250°C), elles restent toutefois difficiles à mettre en œuvre, utilisées essentiellement dans les pièces de structure pour les réacteurs.

**I.3.2.2. les matrices thermoplastiques [8] :**

La famille des résines thermoplastiques est très vaste, et peut être séparée en plastique de grande diffusion et plastique technique. Les plastiques de grande diffusion sont mises en œuvre par injection pour obtenir des objets moulés, soit par extension pour obtenir des films, des plaques, des tubes, des profilés, etc

Les matrices thermoplastiques occupent une place de plus en plus importante dans la fabrication des matériaux composites. Elles plus facilement recyclables que les matrices thermodurcissables, leurs propriétés restent généralement plus faibles, exceptées pour quelques polymères très techniques et forcément plus onéreux .

Les principales résines thermoplastiques utilisées sont les suivants:

- polyamide: une bonne tenue au choc, bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures.
- polytéréphtalate éthylénique et butylique: bonne rigidité.
- polycarbonate: une bonne tenue au choc.
- polysulfures de phénylène: une résistance à l'hydrolyse.
- polyoxyméthylènes: une bonne tenue à la fatigue.
- polysulfurés: une bonne stabilité chimique.
- polypropylène: assez stable en température, mais combustible

Pour clore ce titre sur les matrices vous trouverez dans le tableau ci-dessous les propriétés comparées des différentes matrices thermoplastiques et thermodurcissables [9] :

Tableau I.4 : Propriétés des différentes matrices

Polymère	Densité	Résistance traction (MPa)	Module flexion (GPa)	Tenue chaleur en continue (°C)
Polyester	1.2	50-60	3	120
Vinylester	1.15	70-80	3.5	140
Phénolique	1.2	40-50	3	120-150
Epoxyde	1.1-1.4	50-90	3	120-200
Polyuréthane	1.1-1.5	20-50	1	100-200
Polyimide	1.3-1.4	30-40	4	250-300
Polypropylène	0.9	20-30	1-1.6	58-115
Polycarbonates	1.2	60-70	2.2-2.6	120
Polybutylène téréphtalate	1.3	45-55	2.2-2.5	80-110
Polyéthylène téréphtalate	1.3	55-75	2-2.2	105-120
Polyphénylène-oxydes	1-1.1	55-65	2.4-2.6	80-105
Polyacétals	1.4	60-70	7-9	95-105
Polysulfones aromatiques	1.5	55-90	2.3-2.6	150-200
Polyphénylène-sulfures	1.6	75	3.4	220
Polyamide-imide	1.3-1.4	195	4.9	275
Polyéther-imide	1.5	105	3	170
Polyéther-sulfone	1.6	85	2.6	180
Polyéther-éther-cétone	1.5	100	3.7	>240

### I.3.3. les charges et additifs [3]:

Les charges et additifs sont des matières d'origine minérale, végétale, synthétique ou organique se présentant sous forme pulvérulente ou fibreuse chimiquement pures et inertes vis-à-vis des résines. Mélangées à une résine, elles apportent de nouvelles propriétés et modifient les caractéristiques du produit fini.

**I.3.3.1. les charges :**

L'utilisation de charges dans les composites renforce leurs propriétés. Des matériaux tels que le carbone de calcium, le kaolin, la silice, le mica, l'hydrate d'alumine et les microbilles de verre sont couramment employés. Ces charges permettent d'améliorer la dureté, la résistance à la flexion et aux chocs, ainsi que de réduire la conductivité thermique. En outre, elles peuvent contribuer à une meilleure résistance au feu et à une diminution des coûts de production.

**I.3.3.2. Les additifs :**

Les additifs renforcent les matériaux composites en assurant une adhérence optimale entre les renforts et la matrice. Ils permettent des modifications spécifiques, améliorent les propriétés mécaniques. De plus, ils offrent des options de personnalisation esthétique et fonctionnelle, tels que l'ajout de pigments, d'agents anti-UV et d'isolants thermiques et acoustiques. Ils se trouvent en faible quantité (quelques % et moins) et interviennent comme :

- lubrifiants et agents de démoulage.
- pigments et colorants.
- agents anti-retraits.
- agents anti-ultraviolets.
- accélérateur.
- catalyseur.

**I.4. Classification des matériaux composites**

Les composites sont classés selon la forme ou la nature des composants, On les classe aussi selon leurs performances et leurs couts

**I.4.1. Classification selon leurs performances et leurs couts [4] :****❖ Composite de Grande Diffusion GD :**

Les plus courants proviennent du coulepe de fibre de verre E / poly stère, ou verre E/ techno polymère, avec un taux de renforcement voisin de 30%(en masse).

Ils représentent actuellement les plus gros volumes d'emploi avec un bon compromis performance/cout voisin du coût du matériau de base. Les matériaux dits de « grande diffusion GD » dont les propriétés mécaniques sont plutôt faibles mais d'un cout compatible avec une production en grande série.

**❖ Composite de Haute Performance HP :**

Leurs résistances mécaniques étant supérieures aux matériaux conventionnels, ils présentent des propriétés mécaniques spécifiques élevées et un coût unitaire important. Peu développés, issus surtout des associations de fibres longues de verre R, Carbone ou aramide (KEVLAR) avec des résines époxydes et des taux élevés de renfort supérieur à 50%. Ce sont les plus employés en aéronautique et dans le spatial.

**I.4.2. Classification selon la forme des composants :**

En fonction de la forme des constituants, les composites sont classés en deux grandes classes [10]:

**❖ Composites à fibres :**

Les renforts sont sous formes de fibres continues ou discontinues (coupées, courtes, etc.....). L'arrangement des fibres, leurs orientations 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. Le concepteur possède donc un type de matériaux dont il peut modifier et moduler à volonté les comportements mécanique et physique en agissant sur : la nature, la proportion des constituants et l'orientation des fibres.

**❖ Composite à particules :**

Les renforts se trouvent sous formes de particules. Les particules au contraire des fibres ne possèdent pas de dimensions précises ou privilégiées. Ils sont généralement utilisés 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, etc.

**I.4.3. Classification selon la nature des composants :**

Les matériaux composites dans ce cas sont classés en fonction de la nature des matrices. Ils sont associés divers renforts, seuls certains couples d'association ont un usage industriel et d'autres font toujours l'objet de recherche dans les laboratoires [10].

Parmi ces composites nous citerons :

**❖ Composites à matrices organique (résines et charges) (CMO):**

- Des fibres minérales : verre, Carbone, etc.
- Des fibres organique : Kevlar, polyamides, etc.
- Des fibres métalliques : bore, aluminium, etc.

**❖ Composites à matrices métallique (CMM) :**

- Des fibres minérales : carbone, carbure de silicium (SiC)

- Des fibres métalliques : bore
- Des fibres métallo-minérales : fibres de bore revêtues de SiC
- ❖ **Composites à matrices céramique (CMC) :**
- Des fibres métalliques : bore ;
- Des particules métalliques : cermets ;
- Des particules minérales : carbures, nitrures, etc .

### **I.5. Les structures des composites :**

La structure joue un rôle crucial dans les propriétés mécaniques, thermiques et chimiques du matériau composite. Elle détermine la résistance, la rigidité, la durabilité et d'autres caractéristiques essentielles du matériau, dans le contexte des matériaux composites, la structure fait référence à l'architecture ou à la disposition des différents composants du matériau composite.

La structure d'un matériau composite peut inclure des aspects tels que :

- Structure des fibres de renfort (unidirectionnelle, bidirectionnelle, tressée, etc.).
- Le type de matrice utilisée (polymère, céramique, métal).
- l'organisation des couches (stratifiée, sandwich).

Voici une classification générale des structures des matériaux composites, en prenant en compte ces différents aspects :

#### **I.5.1. Structure de renfort :**

##### ❖ **Unidirectionnelle :**

Les fibres sont orientées dans une seule direction, parallèles les unes aux autres. Elles peuvent être sous forme de roving (fibres sans liaison particulière) ou de nappes (fibres reliées par un fil).

##### ❖ **Multidirectionnelle aléatoire :**

Les fibres sont coupées et broyées, sans arrangement particulier, ou agglomérées sous forme de mat à fibres courtes ou continues. Cette structure offre une rigidité et une résistance supérieures grâce aux fibres, qui sont environ 50 à 100 fois plus résistantes que les résines.



❖ **Orientée :**

Le tissu est composé de fils de chaîne et de trame (fibres bidirectionnelles) qui se croisent selon différents motifs tels que la toile, le sergé ou le satin. Cette structure est utilisée dans des applications spécifiques telles que l'aérospatiale et la défense.

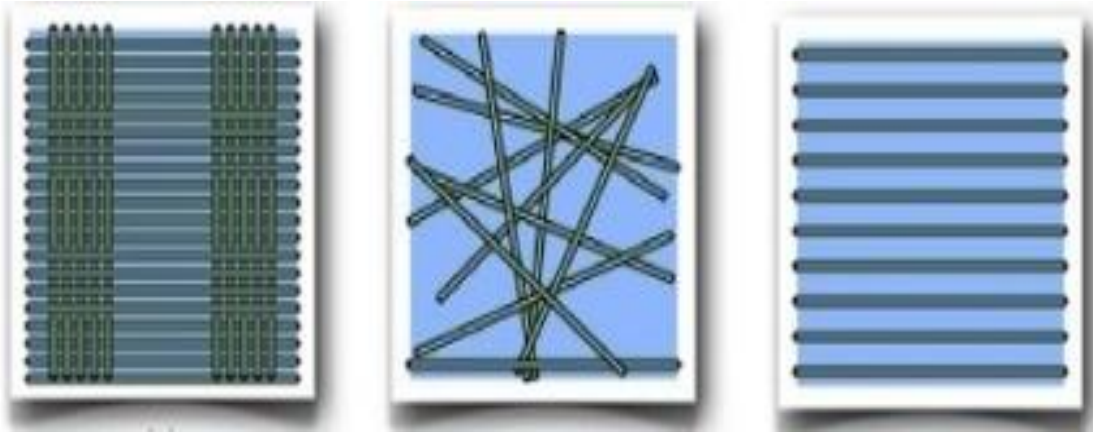


Figure I.8 : Exemples de tissus

### I.5.2. Structure globale [3] :

❖ **Les Monocouches:**

Les monocouche sont des couche élémentaire d'épaisseur constituée de plis identiques assemblés sans orientation spécifique. Un pli est une feuille quasi-bidimensionnelle de composites, composée de fibres et d'une matrice, pouvant être UD (non orienté), tissé (orienté) ou mat (aléatoire).

❖ **Stratifiée :**

La pièce composite est composée de plusieurs couches (ou plis) de matériaux composites, avec des orientations de renfort différentes dans chaque couche.

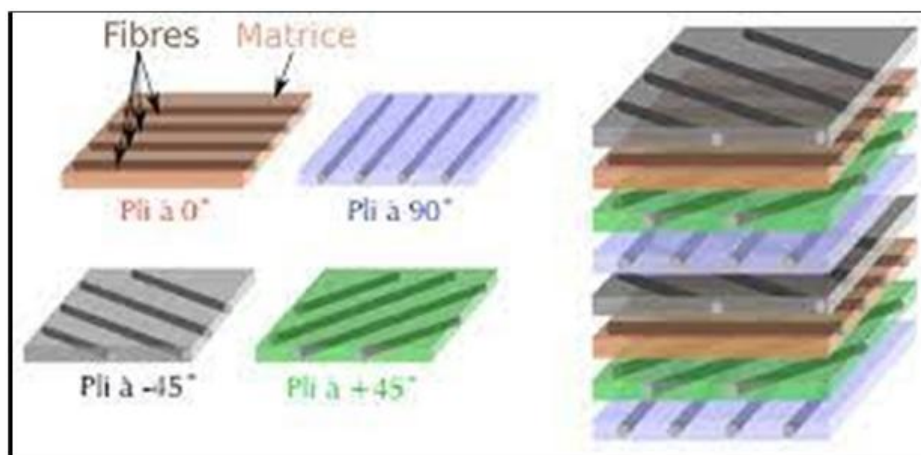


Figure I.9 : Exemples de stratifiés

### ❖ Sandwich :

La pièce composite est constituée de couches externes rigides (peaux) et d'un noyau léger (âme) entre elles.

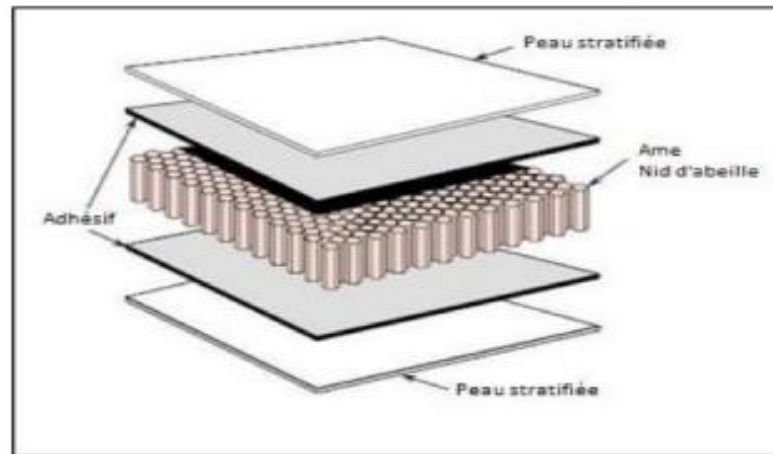


Figure I.10 : Matériau sandwich

## I.6. La mise en œuvre des composites :

Les procédés de mise en œuvre de matériaux composites nécessitent trois étapes indispensables [11]:

- ❖ Une étape d'association : l'imprégnation du renfort par la résine
- ❖ Une étape rhéologique de mise en forme de la pièce
- ❖ Une étape thermique de solidification du matériau : soit par
  - ✓ Refroidissement pour les matrices thermoplastiques
  - ✓ Polycondensation ou réticulation pour les matrices
  - ✓ Thermodurcissables (à température croissante)

### I.6.1. Moulages sans pression :

#### I.6.1.1. Moulage au contact :

Ce procédé offre une approche manuelle pour fabriquer des pièces en utilisant des résines thermodurcissables, sans nécessiter de pression et à température ambiante.

Le moulage est ensuite effectué selon les opérations suivantes [11]:

- Application d'une résine catalysée et accélérée sur le moule à l'aide d'un pinceau ou d'un rouleau.
- Disposition d'un renfort (mat, tissu, etc.) dans le moule, avec possibilité d'utiliser différents types de renforts pour différentes parties de la pièce, en les superposant.
- Imprégnation du renfort avec la matrice, suivie d'un ébullage avec un rouleau cannelé.

- Application des couches suivantes en utilisant la même technique, avec éventuellement l'ajout d'inserts tels que des tubes, des vis, des écrous, des armatures, etc.
- Démoulage après un temps de durcissement qui dépend de la résine et de la température (environ 10 heures).
- Polymérisation à température ambiante pendant plusieurs semaines, avec possibilité d'accélérer le processus par étuvage (par exemple, 5 à 10 heures à environ 80 °C).
- Finition de la pièce après la polymérisation, comprenant le retrait des bavures, le ponçage et éventuellement la peinture.

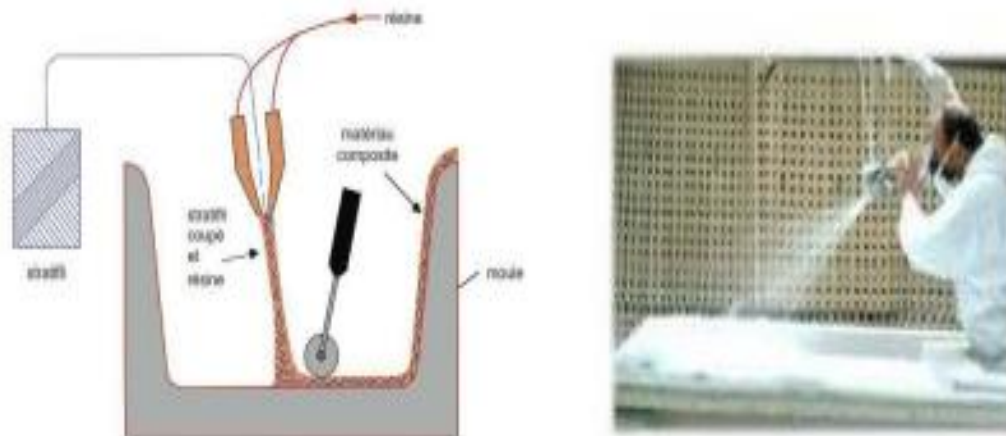


Figure I.11 : Moulage au contact

#### I.6.1.2. Moulage par projection simultanée :

Le moulage est réalisé en projetant simultanément des fibres coupées et de la résine catalysée sur un moule. Pour ce faire, un équipement comprenant une machine de découpe de fibres et un pistolet projetant la résine et les fibres coupées est utilisé, fonctionnant à l'aide de l'air comprimé. Une fois les fibres imprégnées de résine, une couche est compactée et débarrassée des bulles en utilisant un rouleau cannelé [1] .

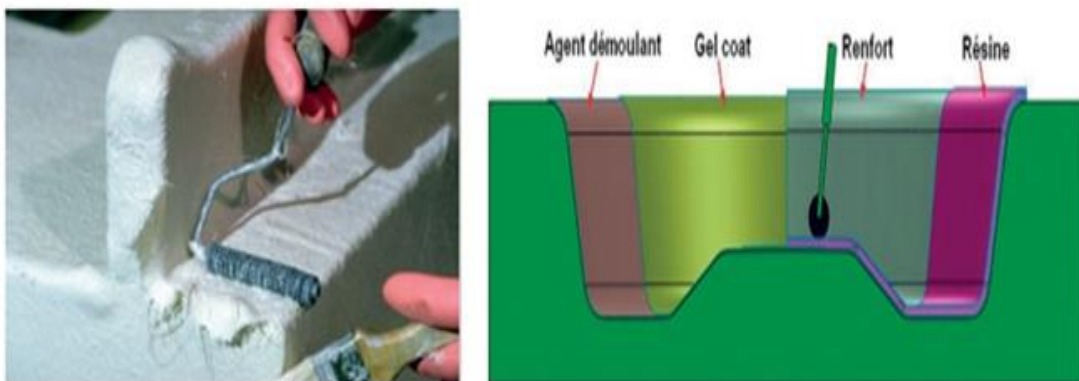


Figure I.12 : Moulage par projection simultanée

### I.6.2. Moulage sous vide :

Le moulage sous vide, également connu sous le nom de moulage par dépression ou "au sac", est un procédé utilisé pour former des pièces en matériaux composites. Ces matériaux peuvent être à base de thermoplastiques ou, plus couramment, de thermodurcissables.

Le processus est similaire au moulage au contact, mais après la stratification, une mise sous vide est réalisée à l'aide d'éléments drainants, d'une bâche étanche, de joints, de tuyaux et d'une pompe à vide. Le moulage sous vide est particulièrement adapté à la fabrication de pièces en petites et moyennes séries [4].

### I.6.3. Moulage par compression [12] :

#### I.6.3.1. Moulage par injection de résine :

Le moulage par injection sous pression consiste à imprégner un renfort avec de la résine dans un moule rigide et fermé. La manipulation automatique des résines permet d'obtenir des pièces à haute résistance mécanique avec une proportion élevée de renfort. Ce procédé convient pour des pièces complexes et profondes.

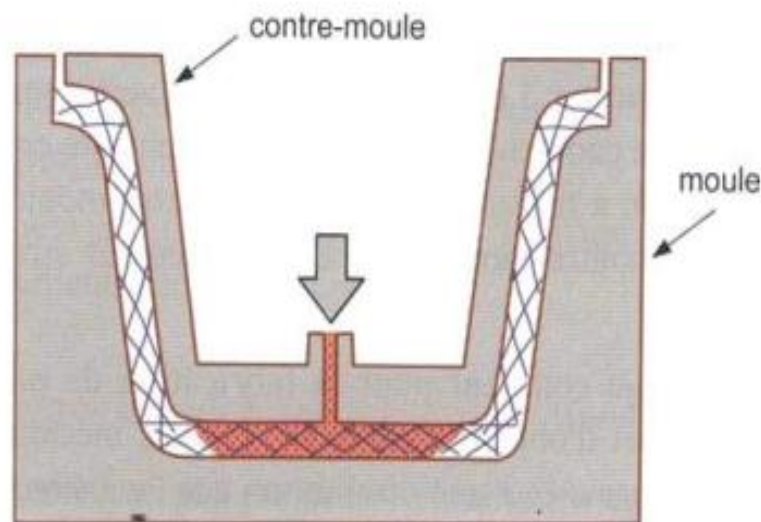


Figure I.13 : Moulage par injection de résine

#### I.6.3.2. Moulage par compression à froid (a) :

Ce moulage est réalisé à basse pression (<5 bars) sans chauffage du moule est maintenu à une température de 50 à 70 °C grâce à l'énergie générée lors du moulage. Le processus implique l'application d'un agent de démoulage et d'un gel-coatsur le moule et le contre-moule. L'ensemble est ensuite fermé et pressé. Ce procédé convient à la production de pièces en moyennes séries, avec un investissement moindre par rapport au moulage par compression à chaud

### I.6.3.3. Moulage par compression à chaud(b) :

Le moulage par compression à chaud nécessite l'utilisation d'une presse hydraulique et d'un moule métallique chauffé à une température de 80 à 150°C. Le renfort (mat à fils coupés, fils continus, tissus, préformes) est placé dans le moule, qui est ensuite fermé sous pression (10 à 50 bars). Ce procédé permet d'obtenir des proportions élevées de renfort, ce qui donne des pièces avec de bonnes caractéristiques mécaniques. La taille de la presse est adaptée aux dimensions des pièces à fabriquer.

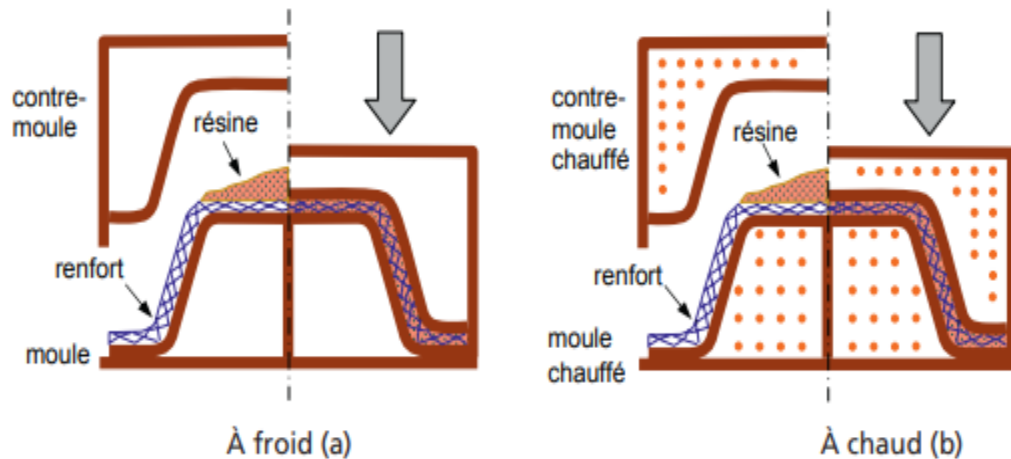


Figure I.14 : Moulage par compression à chaud(b).

### I.6.3.4. Moulage par injection :

Réaliser sur les presses conventionnelles utilisées pour l'injection des résines thermoplastiques, c'est la méthode la plus répandue des méthodes de mise en œuvre des composites et très adaptée à la production de pièces en très grande série.

### I.6.4. Moulage en continu :

Ce mode de moulage nous permet d'obtenir des plaques planes, panneaux, sandwiches, de panneaux ondulés pour toitures, etc. Il est séparé en plusieurs phases [1] :

1. Phases d'imprégnation des renforts : fibres, mâts ou tissus. La résine catalysée et le renforts sont acheminés sur un film de démoulage
2. Phase de mise en forme
3. Phase de polymérisation effectuée dans une étuve (60 à 150 °c) en forme de tunnel
4. Phase de refroidissement et découpage

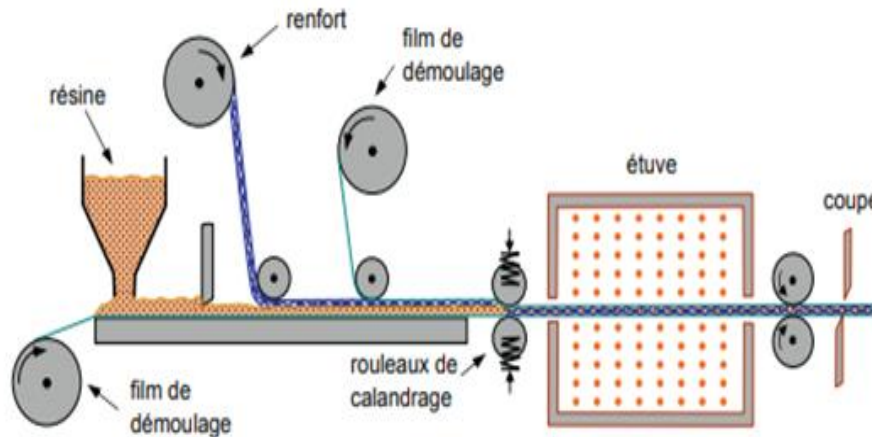


Figure I.15 : Moulage en continu

### I.6.5. Moulage par pultrusion :

Ce procédé nous permet de fabriquer de profilés rectilignes ou courbes à section constante, hautement renforcés dans la direction principale.

Les renforts fils, stratifiés, rubans, etc. Passent dans un bain de résine catalysée pour être imprégné puis ils traversent une filière chauffée où la mise en forme et la polymérisation de la résine se fait simultanément [7].

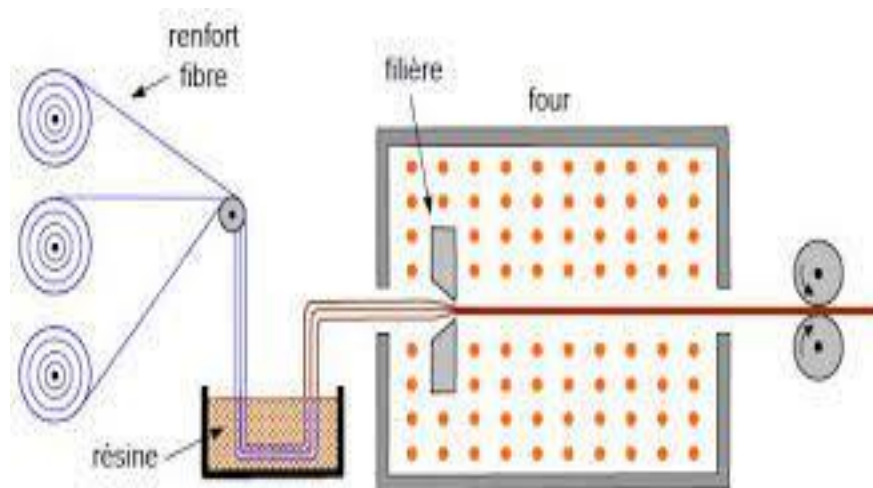


Figure I.16 : Moulage par pultrusion

### I.6.6. Moulage par centrifugation :

Le moulage par centrifugation est utilisé pour fabriquer des pièces de révolution telles que des tubes, des tuyaux et des cuves. Inspiré de la technique de fabrication des tuyaux en fonte ou en béton centrifugé, ce procédé implique la rotation rapide d'un moule enduit d'agent de démoulage à environ 2000 tours par minute.

La résine et les fibres sont introduites simultanément, parfois précédées d'une couche de gelcoat. Les renforts peuvent être sous forme de fibres coupées ou de stratif ils coupés, tandis que la résine est catalysée et accélérée, durcissant à froid [7].

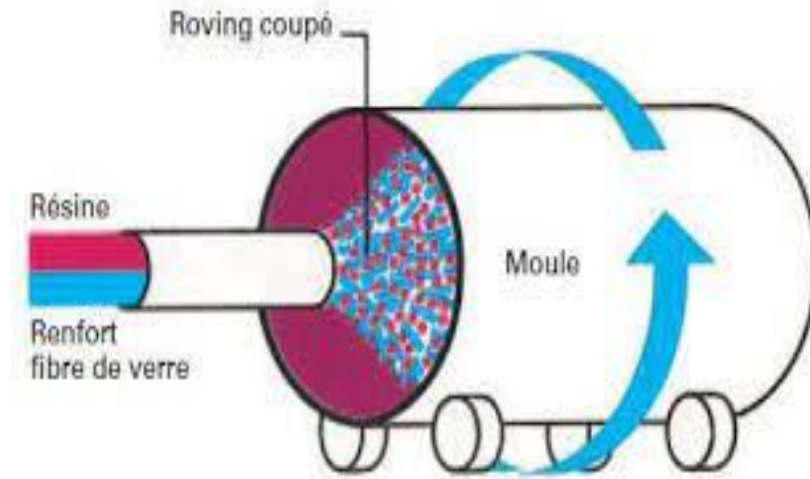


Figure I.17 : Moulage par centrifugation

### I.6.7. Moulage par enroulement filamentaire :

L'enroulement filamentaire est un procédé de moulage utilisé pour fabriquer des pièces de révolution creuses, telles que des cylindres ou des cônes, en utilisant des matériaux composites. Ce procédé est adapté aux productions massives et est couramment utilisé pour produire des pièces soumises à une pression interne élevée, comme des réservoirs et des tuyaux. L'enroulement filamentaire implique l'enroulement de fibres continues imprégnées de résine autour d'un mandrin en rotation, qui fait office de moule interne. Un système de guidage déplace les fibres de manière uniforme pendant la rotation du mandrin. Pour les matériaux thermodurcissables, les fibres continues sont préalablement imprégnées dans un bain de résine catalysée avant l'étape d'enroulement [3].

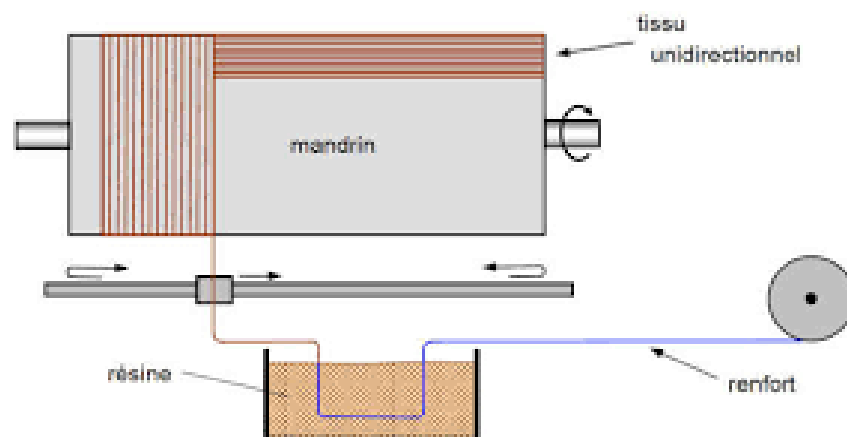


Figure I.18 : Moulage par enroulement filamentaire

### I.7. Domaines d'application :

Les matériaux composites fibres résine sont largement utilisés dans diverses industries et divers domaines. Dans l'industrie aérospatiale, ils sont utilisés dans la fabrication de structures légères et résistantes, telles que les avions et les satellites. Dans l'industrie automobile, ils sont employés pour réduire le poids des véhicules tout en maintenant leur solidité. Ils trouvent également des applications dans la construction navale, les sports de haute performance (comme les vélos et les raquettes), les équipements de sport, les équipements de protection (casques, gilets pare-balles), les éoliennes, etc. Malgré leur coût élevé, leur utilisation est justifiée par leurs performances mécaniques exceptionnelles et leur capacité à être optimisés pour des applications spécifiques [13].

Les domaines d'application des matériaux composites fibres résine comprennent :

- ✓ **Électricité et électronique** : les composites sont utilisés dans la fabrication de composants électriques et électroniques, tels que les cartes de circuit imprimé, les boîtiers et les pièces isolantes.
- ✓ **Bâtiment et travaux publics** : les composites sont utilisés dans la construction pour des éléments structurels légers et résistants, tels que les panneaux de façade, les profilés, les barres d'armature et les renforts.
- ✓ **Transports routiers, ferroviaires, maritimes, aériens et spatiaux** : les composites sont utilisés dans l'industrie des transports pour alléger les véhicules et les structures tout en maintenant leur résistance. Cela inclut les voitures, les trains, les navires, les avions civils et militaires, ainsi que les satellites.
- ✓ **Santé** : les composites sont utilisés dans l'instrumentation médicale, notamment pour la fabrication d'implants, de prothèses, de supports et de dispositifs médicaux.
- ✓ **Sports et loisirs** : les composites sont utilisés dans les équipements sportifs, tels que les skis, les raquettes de tennis, les planches à voile, les planches de surf et les clubs de golf, pour améliorer les performances et la durabilité.
- ✓ **Construction navale** : les composites sont utilisés dans la construction de bateaux et de navires pour leur légèreté, leur résistance à la corrosion et leur capacité à réduire la consommation de carburant.

### I.8. Les Avantages et les inconvénients [14] :

#### I.8.1. Les avantages :

- ✓ **Résistance élevée pour un poids réduit** : Les matériaux composites offrent une résistance



- ✓ mécanique exceptionnelle tout en étant légers, ce qui permet de réduire le poids des structures et des produits finaux.
- ✓ **Adaptabilité et personnalisation** : Les composites peuvent être optimisés pour chaque application spécifique, permettant aux concepteurs de placer le renfort exactement où il est nécessaire, offrant ainsi une grande flexibilité et une personnalisation des propriétés mécaniques.
- ✓ **Anisotropie contrôlable** : Les composites offrent une anisotropie aisément contrôlable, ce qui signifie que leurs propriétés peuvent être ajustées dans différentes directions pour répondre aux sollicitations spécifiques.
- ✓ **Résistance à la corrosion et aux produits chimiques** : Les composites sont souvent résistants à la corrosion et aux produits chimiques, ce qui les rend adaptés à des environnements agressifs.
- ✓ **Durabilité et longévité** : Les composites sont généralement résistants à la fatigue et à l'usure, ce qui leur confère une durée de vie prolongée par rapport à d'autres matériaux.
- ✓ **Absorption des vibrations** : Les composites ont la capacité d'absorber les vibrations, ce qui peut améliorer le confort et la sécurité dans de nombreuses applications.

### I.8.2. Les inconvénients :

- **Coût élevé** : Les matériaux composites sont souvent plus coûteux à fabriquer que les matériaux traditionnels, en raison des processus de production complexes et des matériaux spécialisés nécessaires.
- **Difficulté de réparation** : En cas de dommages ou de dégradation, les réparations des matériaux composites peuvent être complexes et coûteuses, nécessitant des compétences et des techniques spécialisées.
- **Sensibilité à l'impact** : Les composites peuvent être sensibles aux impacts violents, ce qui peut entraîner des déformations, des fissures ou des délaminations.
- **Recyclage difficile** : La nature complexe des matériaux composites rend leur recyclage difficile et coûteux, ce qui pose des défis en termes de durabilité et de gestion des déchets.
- **Limitations de taille** : La fabrication de pièces composites de grande taille peut être plus complexe et nécessiter des équipements spéciaux, ce qui peut limiter leur utilisation dans certains domaines.
- **Variabilité des propriétés** : Les propriétés des composites peuvent varier en fonction des processus de fabrication, ce qui peut rendre difficile la reproduction précise des performances dans la production en série.



**Chapitre II :**

*Endommagement Des Volumes  
Elémentaires Représentatifs  
(VER) En matériaux  
Composites*

## **II.1. Introduction :**

À une échelle plus restreinte, le Volume Élémentaire Représentatif émerge en tant qu'outil essentiel pour décrypter les caractéristiques et les comportements des matériaux composites. Cette approche consiste à sélectionner un volume spécifique du matériau pour analyser comment il réagit mécaniquement. En d'autres termes, en comprenant comment ce petit volume se comporte, nous pouvons obtenir des aperçus cruciaux sur le comportement global du matériau.

L'intérêt du VER est particulièrement évident lorsque nous traitons de matériaux complexes tels que les composites. Ces matériaux sont formés par la combinaison de différentes substances, créant ainsi des structures aux propriétés variées. Le VER sert de fenêtre pour plonger dans cette complexité. En saisissant les réponses mécaniques d'un petit échantillon, nous sommes capables d'extrapoler et de prédire comment l'ensemble du matériau réagira dans différentes situations.

Au cœur de cette méthode se trouve l'objectif fondamental : prédire avec précision le comportement global du matériau à partir de cette petite portion représentative. Pour ce faire, diverses méthodes numériques, telles que l'analyse par éléments finis, sont mises à contribution. L'application du VER ne se limite pas à la simple prédiction du comportement. Il permet également de déduire des propriétés essentielles du matériau, comme le module de Young ou le module de cisaillement. De plus, en étudiant les défaillances et les anomalies dans ce petit échantillon, nous pouvons mieux comprendre comment le matériau peut se comporter en conditions réelles

## **II.2. Définition d'un Volume Élémentaire Représentatif :**

Le VER est généralement considéré comme un volume d'un corps hétérogène suffisamment petit du point de vue macroscopique, tout en étant suffisamment grand pour contenir un nombre suffisant d'inhomogénéités pour être représentatif

En raison des lacunes des estimations directes ainsi que du développement rapide des techniques informatiques au cours des dernières décennies, il est désormais admis que des simulations numériques sont nécessaires pour obtenir des réponses mécaniques plus précises. Dans le cadre de l'approche numérique, la notion de VER ainsi que sa définition quantitative revêtent une importance capitale.

Le concept de RVE a évolué au fil du temps grâce aux contributions de nombreux chercheurs dans le domaine. Certains des premiers travaux et développements liés au concept de RVE ont été réalisés par des scientifiques tels que **Hill (1963) [16]** et **Hashin (1983) [17]**, qui ont jeté les bases théoriques pour comprendre les propriétés effectives des matériaux composites. Cependant, il est important de noter que le concept de VER est devenu plus précis et a été adapté à diverses situations au fil des années grâce aux travaux de nombreux chercheurs.

:"Le VER est une région de taille finie, dans un matériau ou un ensemble de matériaux, à partir de laquelle les réponses statistiques (c'est-à-dire les valeurs moyennes et les écart-types) des propriétés des matériaux ou des champs de contrainte à l'intérieur du matériau peuvent être obtenues de manière représentative." Cette définition souligne l'importance du VER en tant que région de taille finie, mais suffisamment représentative pour permettre l'obtention de réponses statistiques pertinentes pour les propriétés des matériaux ou les champs de contrainte.

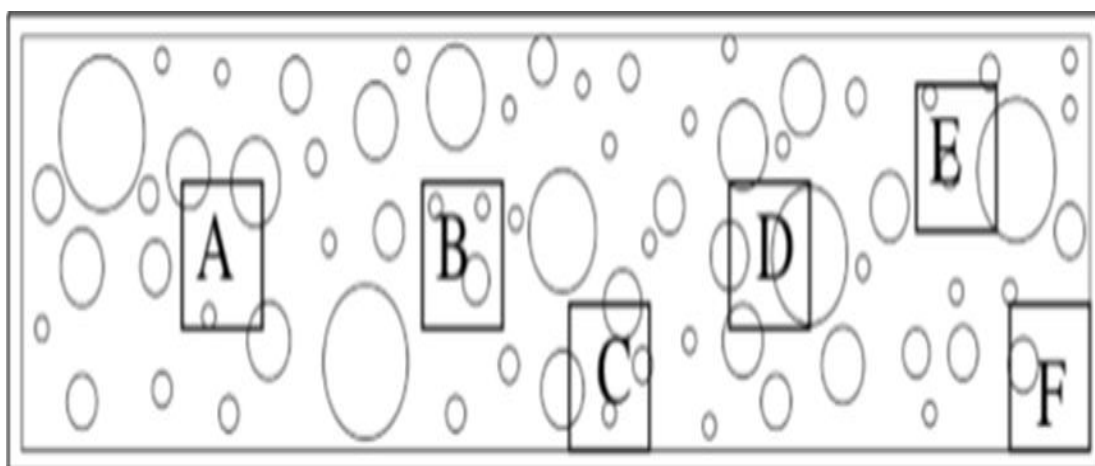
Certaines définitions d'un VER, utilisées par des scientifiques à des fins différentes, peuvent être trouvées dans **Stroeven et al. (2004)[18]** et **Gitman et al. (2007)[19]**, par exemple :

**Tableau II.1** Définitions de VER proposées par les scientifiques :

<b>Références</b>	<b>Définitions</b>
<b>Sab (1992)[20]</b>	C'est un volume suffisamment grand pour que la détermination des propriétés effectives à partir de ce volume ne dépende pas du type De conditions aux limite utilisées.
<b>Drugan et Willis(1996)[21]</b>	C'est le plus petit élément de volume de matériau du composite pour lequel la représentation constitutive macroscopique spatialement constante (module global) est un modèle suffisamment précis pour représenter la réponse constitutive moyenne.
<b>Terada et Kikuchi(1998)[22]</b>	C'est un volume cubique suffisamment grand par rapport à la microstructure et suffisamment petit par rapport à l'échelle macroscopique.

<b>Evesque (2000)[23]</b>	Le VER doit être assez grand par rapport à la taille des grains afin de définir les quantités globales telles que la contrainte ou la déformation, mais cette dimension devrait être également assez petite pour ne pas cacher l'hétérogénéité macroscopique.
<b>Kanit et al. (2003)[24]</b>	Une définition purement statistique et numérique. La taille est liée aux paramètres morphologiques, mécaniques et statistiques de la microstructure; comme la fraction volumique, le contraste, les propriétés mécaniques (élasticités et plasticités) et l'erreur absolue.

Il est à noter que le VER est un paramètre qui est d'importance primordiale pour l'étude numérique des matériaux hétérogènes. Il est de nature élémentaire parce qu'il est considéré comme un point matériel du milieu équivalent et représentatif parce qu'il est possible de déterminer un seul comportement macroscopique unique pour ce volume. Par conséquent, à des fins pratiques, elles sont inutiles. En d'autres termes, si l'on souhaite prendre en compte, par exemple, les propriétés des matériaux composites, les définitions du RVE ne fournissent pas d'informations sur la taille de l'échantillon à considérer.



**Figure II.1** Exemples des VERs d'une microstructure hétérogène,[19]

Dans le cas de l'homogénéisation élastique linéaire, Terada et al., 2000[22] se sont basés sur les travaux de Hill, 1963[16] qui a alors justifié que « la relation entre la déformation moyenne

et la contrainte est la même pour les deux types de conditions aux limites » lorsque la taille de l'hétérogénéité est suffisamment grande. Statistiquement, on s'attendre à ce qu'il y ait une certaine valeur où les propriétés effectives obtenues à partir de ces deux conditions aux limites sont presque réciproques. Afin d'introduire a priori l'homogénéité statistique dans les milieux, on fait souvent l'hypothèse de la périodicité locale de la géométrie microstructurale. Ensuite, l'élément volumique est choisi de manière à obtenir une seule inclusion dans une phase matricielle et est donc appelé cellule unitaire de taille avec le moins d'hétérogénéités (figure II.2).

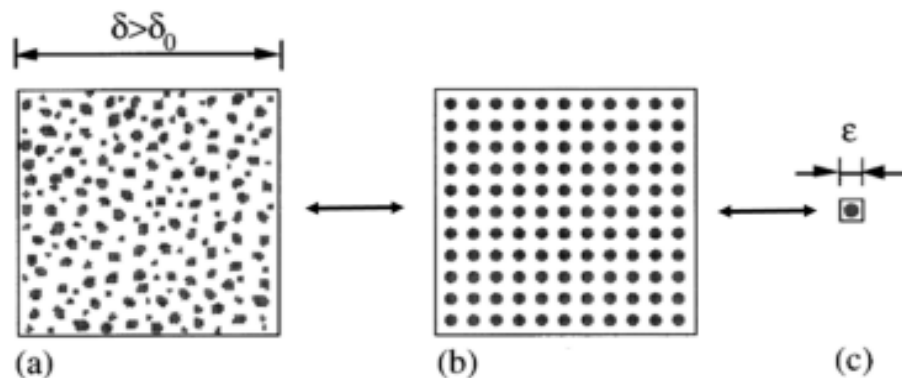


Figure II.2 Modélisation de l'élément de volume représentative. [22].

Pour les milieux aléatoires, la notion de RVE a du sens uniquement si l'erreur statistique de la propriété effective analysée est supposée.

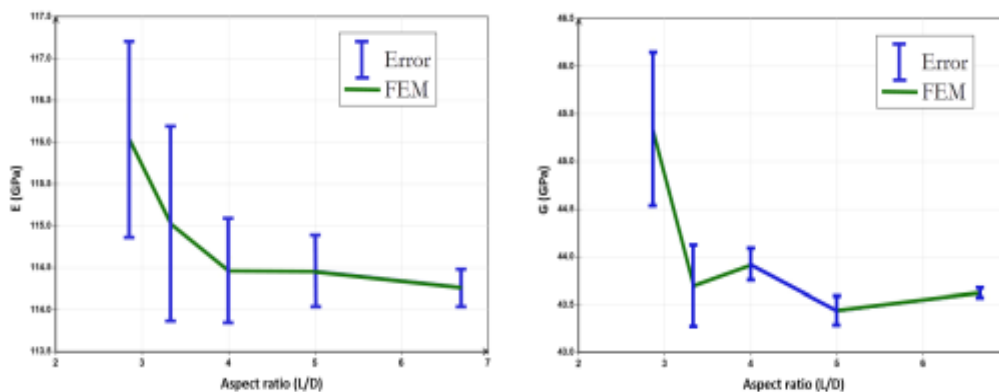
En d'autres termes, la définition quantitative du RVE, qui implique généralement des informations sur la microstructure, doit être établie de manière à ce que les propriétés effectives soient déterminées avec une tolérance d'erreur donnée par rapport à la réponse du corps réel.

Dans le cas des milieux périodiques, la définition du VER est unique - il s'agit simplement de la cellule unitaire périodique. En revanche, pour les matériaux composites aléatoires, la formulation d'une définition quantitative du VER n'est pas une tâche facile - la taille du VER dépend fortement de la microstructure des milieux considérés [17].

De nombreuses tentatives ont été faites pour quantifier la taille du RVE sur la base de l'analyse statistique et numérique. (Gusev (1997)[25] a utilisé des simulations Monte-Carlo (MC) pour la génération de réalisations statistiquement indépendantes de composites élastiques périodiques constitués de sphères désordonnées non superposées. La dispersion des résultats, c'est-à-dire les propriétés moyennes, a été étudiée. Dans Stroeven et al.

(2004)[18], des calculs statistiques d'expériences numériques sont réalisés afin de quantifier la taille du RVE pour des composites constitués de particules dans un matériau matriciel. Plusieurs critères ainsi que des outils statistiques, notamment la distribution de Student-t, ont été pris en compte afin de quantifier la taille du RVE. **Gitmanet al. (2007)[19]** ont proposé la quantification du RVE sur la base du simple critère statistique du chi-carré, tandis que **Grufman et al. (2007)[26]** ont formulé la méthodologie basée sur le test de bonne adéquation de **Kolmogorov[27]**.

L'évaluation de la taille du RVE en tenant compte des informations sur la microstructure ainsi que l'estimation des propriétés effectives basées sur la taille du RVE déterminée ont été largement étudiées par (**Povirk, 1995**)[28], (**Zeman & Sejnoha, 2001**)[29], (**Graham & Yang, 2003**)[30], (**Du & Ostoja-Starzewski, 2006**)[31]. **Kanit et al. (2003)[24]** ont proposé une méthode de détermination numérique de la taille du RVE sur la base du descripteur microstructural, à savoir la portée intégrale (la définition de la portée intégrale peut être trouvée dans **Lantuéjoul, (2002)[32]**). Les auteurs ont affirmé que la taille du RVE "doit être considérée comme une fonction de cinq paramètres : la propriété physique, le contraste des propriétés, les fractions volumiques des composants, la précision relative souhaitée pour l'estimation de la propriété effective et le nombre de réalisations de la microstructure associées aux calculs que l'on est prêt à effectuer". La validation de la méthodologie concernant deux matériaux de l'industrie alimentaire a été réalisée par **Kanit et al. (2003)[24]**. Ils se sont concentrés sur la détermination du RVE pour un composite anisotrope avec une forte fraction volumique de fibres. Trois propriétés différentes (fraction d'aire des fibres, fonction de corrélation par paire, conductivité thermique effective) ont été prises en compte pour établir la taille du RVE.



**Figure II.3.** Variation des propriétés effectives moyennes et de l'erreur en fonction de la taille de VER [24].

Un problème distinct se pose lors de l'exécution de calculs numériques sur le RVE. Même si le RVE est généralement nettement plus petit que le matériau réel, dans de nombreux cas, les calculs restent souvent extrêmement volumineux. Cela résulte du fait que le RVE doit contenir un grand nombre d'hétérogénéités pour être représentatif. De plus, la réponse du RVE doit être indépendante du type de conditions aux limites prescrites (Sab, 1992)[20], ce qui justifie également la grande taille du RVE. Certaines études ont été menées dans le but de réduire le temps CPU : Zohdi et al. (2001)[33] ont proposé une méthode de partition régulière du domaine global en sous-domaines non superposés.

Dans Kanit et al. (2003)[24], il a été montré que les propriétés effectives peuvent être évaluées non seulement par des simulations numériques sur de grands échantillons, mais aussi en considérant des volumes plutôt plus petits avec un nombre suffisant de réalisations.

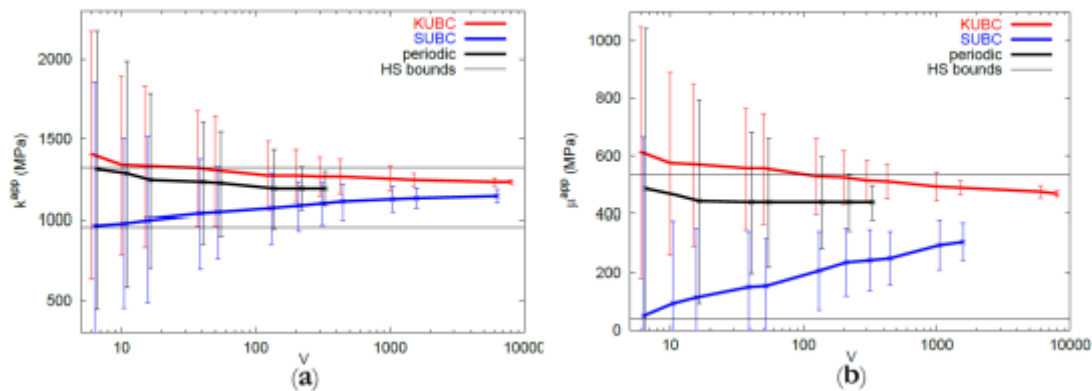


Figure II.4 : Détermination du VER ,(a) valeurs moyennes et intervalles de confiance sur valeur moyenne de module d'élasticité. (b) module de cisaillement, en fonction de la taille du domaine [24]

Enfin, il est important de noter que même si le VER est généralement beaucoup plus petit que le matériau réel, les calculs sont souvent encore extrêmement volumineux en raison de la nécessité de contenir un grand nombre d'hétérogénéités pour être représentatif, et pour être élémentaire, le volume doit être petit devant la structure. Deux conditions doivent guider et piloter le choix de l'échelle et les dimensions de VER:

- ❖ ne pas descendre à un niveau plus fin.
- ❖ ne pas monter jusqu'à l'échelle macroscopique.

### II.3. L'homogénéisation des Matériaux Composites :

L'homogénéisation a pour but de réaliser une transition d'échelles depuis le microscopique jusqu'au macroscopique où le matériau hétérogène pourra être considéré comme homogène. Les différentes échelles doivent respecter un principe de séparation, (figure II.5).



Pour le choix de l'échelle microscopique, il est nécessaire de prendre en compte la taille caractéristique  $d$  des hétérogénéités, la dimension caractéristique  $l$  du volume élémentaire représentatif, doit être bien supérieure à celle des hétérogénéités pour pouvoir le considérer représentatif de la microstructure. Toutefois, il faut aussi que cette dimension macroscopique soit bien plus petite que celle de la structure (de taille  $L$ ), pour ensuite pouvoir traiter la structure comme un milieu homogène.

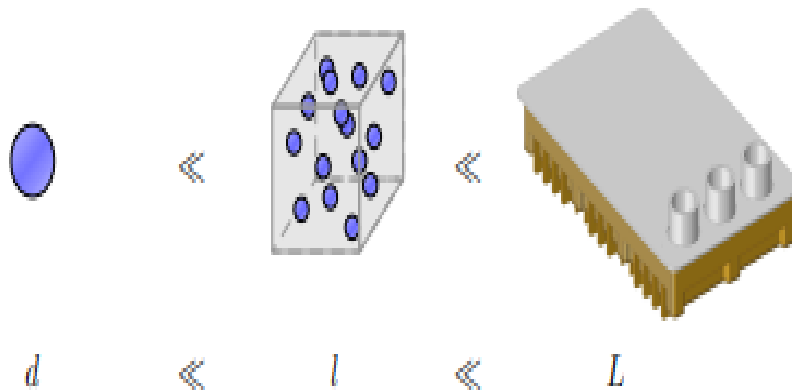


Figure II.5 : Séparation des échelles.

### II.3.1. Différentes modèles d'homogénéisation utilisées pour définir le comportement macroscopique des matériaux composites :

Les premiers travaux introduisant des méthodes d'homogénéisations spatiales basées sur des études analytiques ou semi-analytiques à l'échelle microscopique ont été menés par Eshelby[34], Hashin[17], Hill [24], Mori et Tanaka [35], permettant de définir un comportement macroscopique entre des quantités moyennes "effectives".

Les travaux d'Eshelby[34] ont servi de base au modèle de Mori et Tanaka [35], et au schéma auto-cohérent introduit par Hill [16].

Mori et Tanaka[35] ont proposé une méthode de calcul de la contrainte moyenne et de l'énergie élastique stockée dans la matrice d'un matériau contenant une fraction volumique d'inclusions. Benveniste [36] a interprété ce modèle ; le renfort est noyé dans un milieu infini ayant les propriétés de la matrice, alors le volume élémentaire représentatif (VER) est soumis à l'infini à la déformation moyenne de la matrice dans le composite.

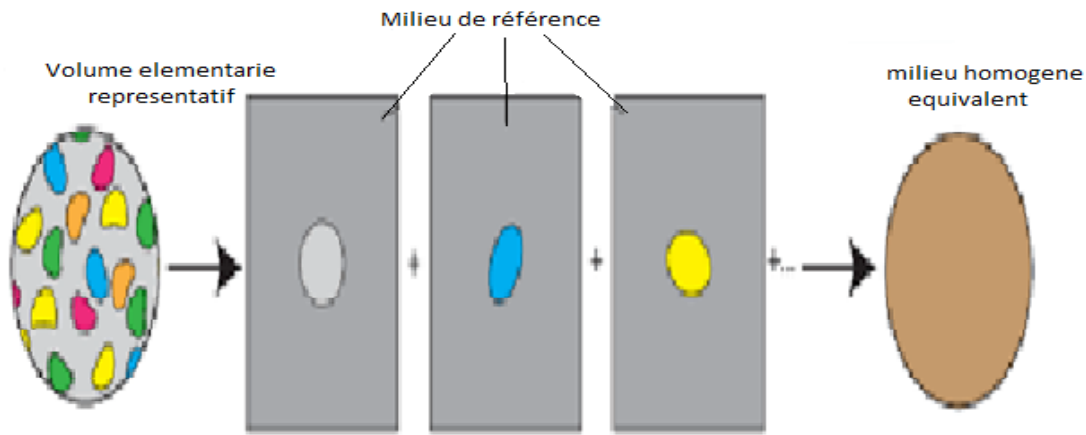


Figure II.6 : modèle d'homogénéisation semi-analytiques

L'approche micromécanique permet de donner un comportement global des matériaux composites à partir des caractéristiques de leurs constituants et cela par l'analyse d'un volume élémentaire représentative (VER) suivant les modèles (**Aboudi [37]**; **Nemat-Nasser et Hori [38]**), mais aussi permet d'étudier les divers mécanismes tels que l'initiation et la propagation des dommages.

**Ponte-Castaneda[39]** a proposé une méthode d'homogénéisation du second ordre pour déterminer la loi de comportement effectif de matériaux composites non linéaires poreux et renforcés.

Le modèle de **Mori et Tanaka [35]** est adapté aux matériaux composites avec une fraction volumique d'inclusion modérée.

Le modèle **Halpin et al. [40]** initialement développé pour les composites de fibres continues et qui a été dérivé du modèle auto-cohérent de **Hermans [41]** et **Hill [16]**. Ce modèle permet de prédire les constantes élastiques pour les composites alignés à fibres courtes.

**Zohdi et al [33]**, ont travaillé sur le calcul géométrique linéaire de l'homogénéisation et éventuellement sur des microstructures matériellement non- linéaires. **Döbert[42]** a travaillé sur les matériaux renforcés de fibres, y compris la délamination à de petites couches. **Larsson et Runesson[43]** ont travaillé sur des problèmes généraux en 2D avec des conditions aux limites de Dirichlet remplies uniquement dans l'intégrale.

Il existe plusieurs méthodes d'homogénéisation, parmi les théories d'homogénéisation les plus utilisées : déformation homogène au contour (KUBC) 1, contrainte homogène au contour (SUBC)2 et homogénéisation périodique (PBC)3, en petites perturbations et grandes déformations [24].

Les problèmes (KUBC), (SUBC) et (PBC) nécessitent une résolution numérique, dans la plupart des cas, faisant appel à des techniques de discrétisation par la méthode des éléments finis.

Afin d'appréhender la modélisation du comportement de ces matériaux, il est nécessaire de préciser les différentes échelles de travail. On définit généralement trois échelles :

- ❖ L'échelle macroscopique : le matériau de la structure en composite est considéré dans ce cas comme homogène équivalent. C'est l'échelle du V.E.R. qui doit être suffisamment grand pour contenir statistiquement toutes les hétérogénéités de la microstructure. Les critères de rupture macroscopique sont utilisés pour la définition de la formation du copeau et pour déterminer l'endommagement induit dans la pièce usinée (critère de **Tsai-Hill**, contrainte maximale, etc.).

- ❖ L'échelle mésoscopique : qui ne voit pas les hétérogénéités les plus fines mais distingue des éléments de taille intermédiaire considérés eux aussi comme des entités homogènes. Pour les composites stratifiés, il s'agit de l'échelle de la couche unidirectionnelle. Les critères de rupture mésoscopique sont appliqués à l'échelle du pli. Ces critères considèrent le pli comme un matériau homogène anisotrope ayant des propriétés à rupture mésoscopique. Toutefois, il existe des critères de rupture qui ont été spécifiquement conçus pour les plis unidirectionnels élémentaires. à titre d'exemple on trouve les critères de **Hashin** et de **Puck** qui modélisent séparément les mécanismes de rupture de la fibre et de la matrice.

- ❖ L'échelle microscopique : qui voit les hétérogénéités les plus fines existantes dans le matériau. C'est l'échelle du renfort à laquelle les phénomènes d'endommagement s'amorcent les constituants du matériau composite tels que la fibre, la matrice et l'interface fibre\matrice sont traités séparément

#### **II.4. Mécanique de la rupture :**

La mécanique de la rupture a pour objet l'étude le comportement mécanique d'un matériau en présence de fissures macroscopiques. Cela revient notamment à déterminer le champ des contraintes et des déformations au voisinage de la pointe d'une fissure. L'étude de ces champs mécaniques permettant ensuite de juger de la stabilité ou non d'une fissure. Il est également possible, comme nous le verrons par la suite, d'aborder la mécanique de la rupture à travers une étude énergétique du solide fissuré.

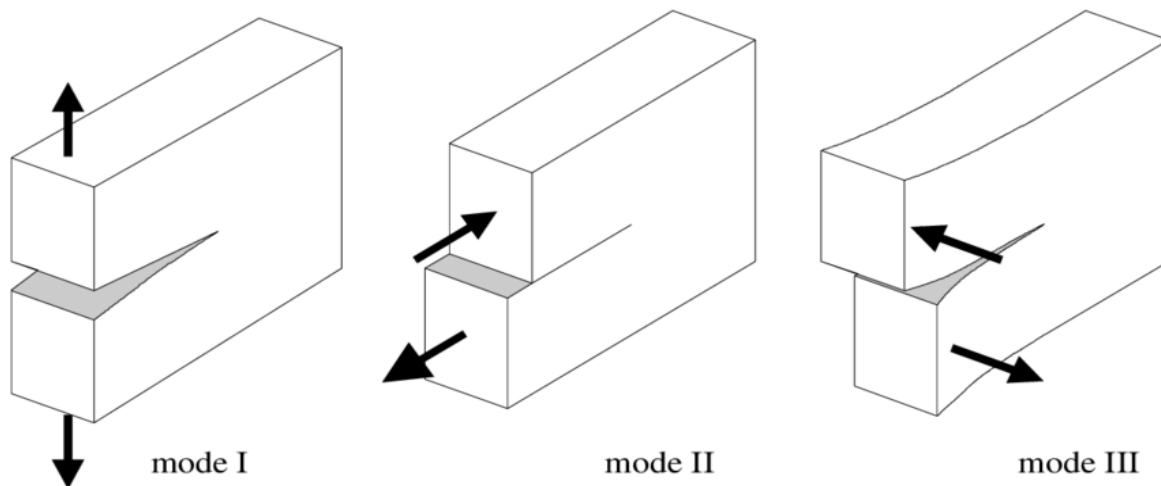
#### II.4.1. Modes de rupture :

La fissuration se manifeste par la séparation irréversible d'un milieu continu en deux parties, appelées lèvres de la fissure, ce qui introduit une discontinuité au sens des déplacements. Les mouvements possibles des lèvres de chaque fissure sont des combinaisons de trois modes indépendants[44] : Figure II.7 : Modes de rupture- Mode I : ouverture (ou clivage) ; - Mode II : cisaillement plan ; - Mode III : cisaillement anti-plan. Le mode I est le plus dangereux pour l'extension d'une fissure ; cependant, une fois amorcée et pour des sollicitations mixtes ou des géométries complexes, la fissure a tendance à bifurquer, et reste donc rarement rectiligne (2D) ou plane (3D).

Figure II.7. Modes de rupture [44].

- **Mode I** : ouverture (ou clivage) ;
- **Mode II** : cisaillement plan ;
- **Mode III** : cisaillement anti-plan.

Le mode I est le plus dangereux pour l'extension d'une fissure ; cependant, une fois amorcée et pour des sollicitations mixtes ou des géométries complexes, la fissure a



tendance à bifurquer, et reste donc rarement rectiligne (2D) ou plane (3D).

#### II.4.2. L'endommagement des matériaux composites :

L'inhomogénéité et l'anisotropie des matériaux composites rendent leurs mécanismes d'endommagement plus nombreux et plus complexes. Au sein d'une structure composite, on peut voir apparaître endommagement constitué de micro-décohésion et de micro-fissures, ruptures de pli, ruptures des fibres et des matrices, décohésion de l'interface, glissement et frottement des fibres dans la matrice... fig (II.8).

Les mécanismes d'endommagement sont nombreux et difficiles à décrire, particulièrement la propagation des délaminages et des ruptures de pli.

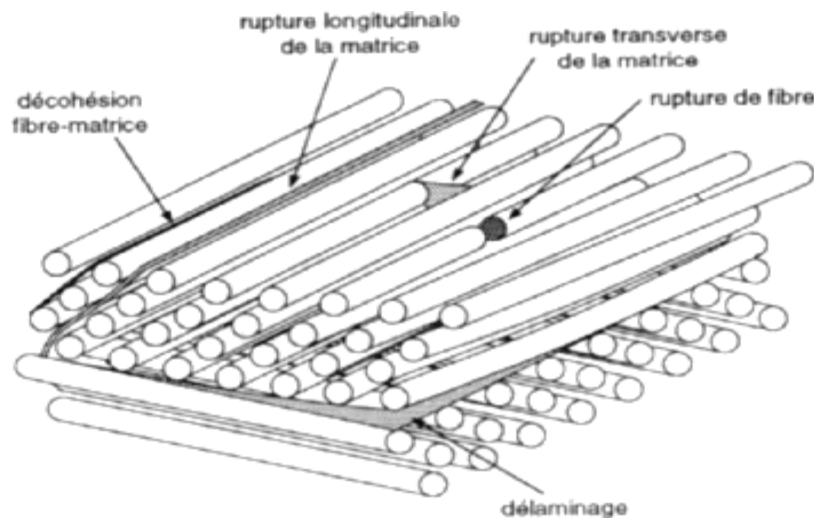


Figure II.8 : Mécanisme de rupture d'un stratifié.

Plusieurs mécanismes interviennent et contribuent au travail de rupture. Ces mécanismes qui mettent en jeu les propriétés physiques et mécaniques de chaque constituant soulignent dès à présent le rôle déterminant joué par la liaison fibre/matrice. Dans cette optique, il faut considérer le matériau comme un système hétérogène constitué d'au moins deux phases homogènes que sont les fibres et la matrice. De plus, ces deux phases sont géométriquement réparties ainsi : les fibres sont continues, parallèles entre elles et séparées les unes des autres par de la matrice. Par ailleurs, les deux constituants présentent un comportement mécanique de type élastique linéaire. On définit alors de façon générale les constantes suivantes :  $E_x$  (module d'Young),  $v_x$  (fraction volumique),  $\sigma_x$  (contrainte de rupture). Les indices  $x = c, f$  et  $m$  feront respectivement référence aux propriétés du composite, des fibres et de la matrice.

Les propriétés physiques du matériau composite vierge sont obtenues à partir de celles de chacun des constituants par l'intermédiaire de la loi des mélanges sachant que  $V_f + V_m = 1$  (si le volume occupé par la porosité est négligeable)[45].

Owen [46] montre que les micromécanismes d'endommagement sont les responsables de la rupture en fatigue sur des polyesters renforcés par des fibres continues et réparties aléatoirement. Il présente 3 stades d'endommagement :

- Rupture d'interface (« debonding »).
- Rupture de la matrice.
- Coalescence des fissures entraînant la rupture brutale.

Il note le rôle initiateur des fibres perpendiculaires à la direction de charge (phénomène souvent repris par plusieurs auteurs). **Dally et Carillo**[47] ont travaillé sur des thermoplastiques renforcés à fibres courtes de verre de différentes longueurs. Les « fibres plus courtes » ont un meilleur comportement en fatigue que celui des « fibres longues ». Ceci s'explique par les différents mécanismes d'endommagement conduisant à la ruine du matériau. Dans le cas des « fibres longues », les fissures sont concentrées dans les régions riches en fibres et se propageant en suivant les interfaces tout autour des paquets de fibres existant. Ces fissures s'arrêtent et ne parviennent pas à traverser les zones riches en matrice.

Les premières fissures s'amorcent et se propagent dans les paquets de fibres perpendiculaires à la direction de charge.

Pour les fibres courtes, les mécanismes sont différents. Les fibres sont réparties uniformément sans former de paquets ni de zones riches en matrice. De nombreuses microfissures se créent perpendiculairement à la charge ; celles-ci ne concernent qu'un petit nombre de fibres et sont aléatoirement réparties dans le volume.

on mis en évidence que la rupture d'interface était encore le mécanisme de base, mais que la fissure ne se propageait pas dans la matrice. La ruine totale provient de la coalescence des microfissures [47].

D'autres études montrent l'importance des bouts de fibres dans la création des microfissures. Ces études suggèrent que dans les composites à fibres courtes, toutes les extrémités de fibre sont des sites néfastes à la tenue en fatigue même lors de très faibles sollicitations.

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

- Rupture des fibres fig(II.9)
- Rupture transverse de la matrice fig (II.10)
- Rupture longitudinale de la matrice fig (II.11)
- Rupture de l'interface fibre-matrice fig (II.12)
- Rupture de l'interface entre les plis fig (II.13)

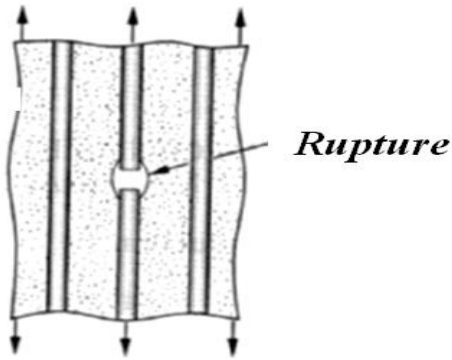


Figure II-9 : Rupture des fibres

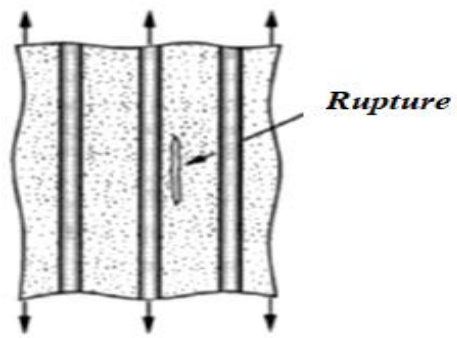


Figure II-10 : Rupture transverse de la matrice

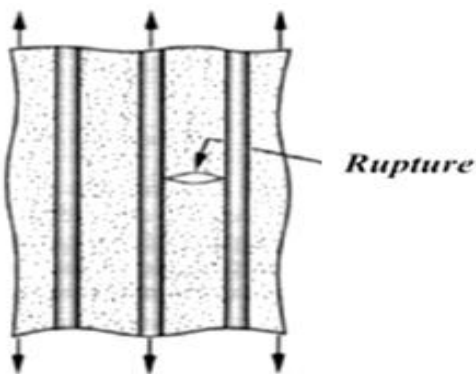


Figure II.11: Rupture de longitudinale de la matrice.

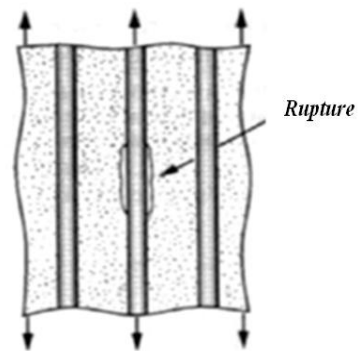


Figure II.12 : Rupture de l'interface fibre/matrice

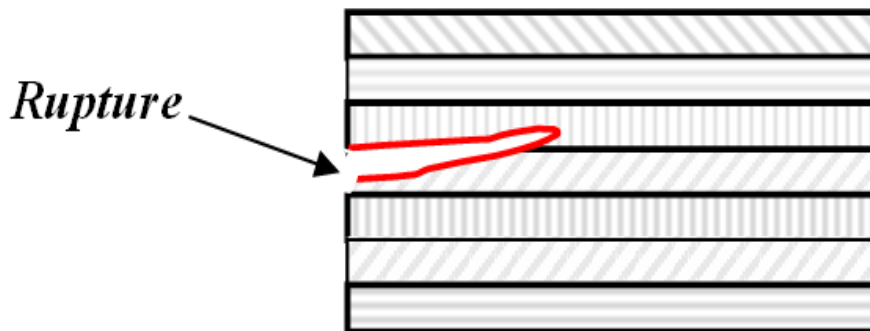


Figure II.13 : Rupture de l'interface entre les plis.

## II.5. Critères d'endommagements des composites:

### II.5.1. Définition :

Un critère de rupture est une expression mathématique reliant les contraintes régnant dans le matériau aux contraintes ultimes pouvant être supportées par ce dernière Lorsque le critère n'est pas satisfait , il y a ruine local du matériau [48].

L'objectif essentiel des critères de rupture est l'évaluation de la résistance mécanique développé par des matériaux, elle correspond à une dégradation irréversible obtenue soit par rupture réelle du matériau soit à la limite du domaine élastique (micro rupture dans la matrice, rupture des fibres, décohésion fibres-matrice...). On distingue :

- Les critères en contraintes maximales et en déformations maximales,
- Les critères interactifs (critères énergétiques).
- Les critères phénoménologiques.

### **II.5.2. Principes généraux :**

Un critère de résistance ou de rupture est caractérisé par la connaissance d'une fonction scalaire( $\theta$ ) dépendant du tenseur de contraintes  $[\sigma]$  .Il n'y a pas rupture du matériau tant que les contraintes régnant dans ce dernier ne dépassent pas les contraintes ultimes, lorsque l'inégalité est atteinte c'est-à-dire  $\theta(\sigma)=1$  nous obtenons l'enveloppe de rupture ou la surface limite [49].

Une telle approche de la rupture ne fait pas appel aux mécanismes intimes et évolutifs de la rupture, elle ne tient compte ni de l'endommagement occasionné par un chargement, ni de la dégradation de certains renforts ,ni de la fatigue subit par le matériau lors de chargement répété . Notons que deux difficultés sont inhérentes à cette approche. La première réside dans le choix de la fonction  $\theta$ , la seconde dans la détermination des paramètres liés à la fonction ces derniers ne peuvent être fixes que par des essais.

Le nombre d'essai croit avec le nombre de paramètres. Ajoutons qu'expérimentalement chaque paramètre doit être le résultat de plusieurs essais pour être acceptable.

### **II.5.3. Critère de la contrainte maximale :**

Il est appliqué dans le cas d'une contrainte plane  $\sigma_L, \sigma_T, \sigma_{LT}$  dans les axes principaux. Il s'écrit sous la forme de six inégalités, fonction des contraintes de rupture en traction, compression et en cisaillement données par l'équation [50] :

$$\begin{aligned} -X^- < \sigma_L < X^+ \\ -Y^- < \sigma_T < Y^+ \\ -S < \sigma_{LT} < S \end{aligned}$$

Il suffit qu'une seule inégalité ne soit pas vérifiée, pour que la rupture se produise.



#### II.5.4. Critère de la déformation maximale :

Le critère de la déformation maximale ressemble en forme au critère de la contrainte maximale. Connaissant les déformations limites en compressions, en traction et en cisaillement du matériau, le critère s'écrit par l'équation [51] :

$$-X_{\epsilon}^{-} < \epsilon_L < X_{\epsilon}^{+}$$

$$-Y_{\epsilon}^{-} < \epsilon_T < Y_{\epsilon}^{+}$$

$$-S < \gamma_{LT} < S_{\epsilon}$$

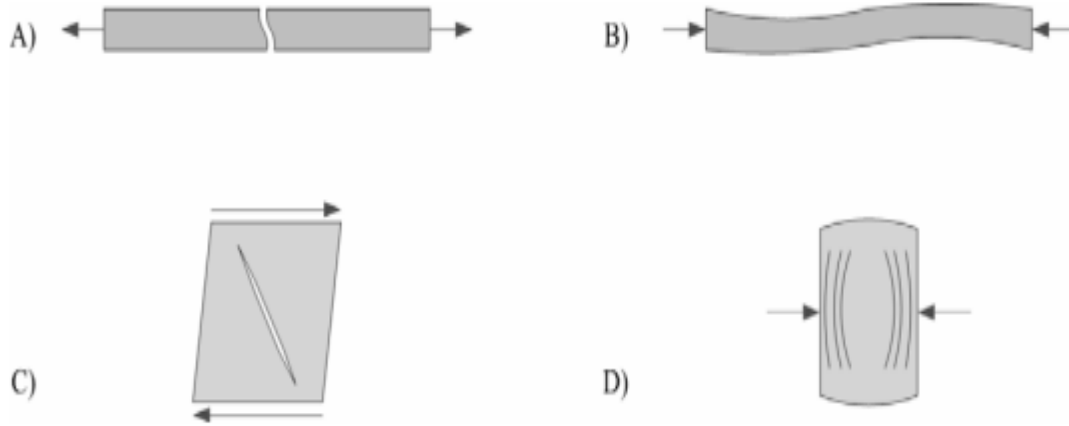
**N.B :**

$X^{+}, Y^{+}, Z^{+}$ ,  $X^{-}, Y^{-}, Z^{-}$  : sont les contraintes ultimes (ou résistances limites) en traction , respectivement en compression, dans les trois dimensions de symétrie matérielle du matériau

#### II.5.5. Critères de rupture interactifs :

Ces sont aussi appelés critères énergétiques car le critère de Von-Mises concerne les matériaux isotropes travaillant dans le domaine élastique, dont les plus connus sont les critères de Tsai Wu ou Tsai Hill (TSAI, 1992) utilisé pour les matériaux isotropes, est relié à l'énergie de déformation emmagasinée par unité de volume du matériau déformé. N'oublions pas de signaler que les critères classiques comme la contrainte maximale et la déformation maximale ne permettent pas prendre l'interaction entre les contraintes ou déformation dans les axes des matériaux [53]. Le critère de Von-Mises postule que le matériau résiste à un état de contrainte isotrope, mais se plastifie lorsque l'énergie de distorsion par unité de volume atteint un seuil critique [54].

**II.5.6. Critères phénoménologiques :** Les critères phénoménologiques cherchent au contraire à mettre en relation un critère par mode de rupture. Le critère le plus ancien est celui d'Hashin (HASHIN, 1980). Il s'applique aux composites unidirectionnels [55]. Ce modèle est implanté dans de nombreux logiciels industriels de calcul, notamment dans Abaqus. Il est couramment utilisé chez Airbus dans les simulations de choc sur des stratifiés. Le critère Hashin permet de déterminer quatre modes d'endommagement induits par des critères tensoriels de Rang 2, ces modes sont illustrés sur la figure II.14 . Chaque mode est représenté par sa propre variable de rupture [53].



**Figure II.14** : Quatre modes de rupture du critère Hashin : (A) Traction des fibres, (B) Compression des fibres, (C) Traction/cisaillement de la matrice et (D) Compression de la matrice

- Mode de rupture des fibres dans la direction longitudinale en traction ( $\sigma_{11} > 0$ )

$$f_{L,T} = \left( \frac{\sigma_{11}}{X_{f,T}} \right)^2 + \alpha \left( \frac{\tau_{12}}{S_L} \right)^2 \geq 1$$

- Mode de rupture des fibres dans la direction longitudinale en compression ( $\sigma_{11} < 0$ )

$$f_{L,C} = -\frac{\sigma_{11}}{X_{f,C}} \geq 1$$

- Mode de rupture des fibres dans la direction transverse en traction ( $\sigma_{22} > 0$ )

$$f_{T,T} = \left( \frac{\sigma_{22}}{X_{f,T}} \right)^2 + \alpha \left( \frac{\tau_{12}}{S_L} \right)^2 \geq 1$$

- Mode de rupture des fibres dans la direction transverse en compression ( $\sigma_{22} < 0$ )

$$f_{T,C} = \left( \frac{\sigma_{22}}{2S_L} \right)^2 + \left[ \left( \frac{Y_{f,C}}{2S_L} \right)^2 - 1 \right] \left( \frac{\sigma_{22}}{Y_{f,C}} \right) + \left( \frac{\tau_{12}}{S_L} \right)^2 \geq 1$$

Ce critère permet de déterminer la rupture des fibres dans les deux directions longitudinale et transversale qui apparaît dans les couches du composite, et il est utilisé en tant que critère d'initiation de rupture. Les valeurs des contraintes maximales ont été déterminées expérimentalement par des essais de traction, de cisaillement et de compression [56].

## II.6. Facteur d'intensité des contraintes :

En 1957, **George Irwin [48]** a découvert que les contraintes autour d'une fissure pouvaient être exprimées proportionnellement à un paramètre appelé facteur d'intensité des contraintes.

Le facteur d'intensité des contraintes (FIC)  $K$  est le seul paramètre significatif, qui permet de connaître l'état de contrainte et de déformation en toute pointe de fissure [49].

Irwin montre que le champ de contraintes, au voisinage de la pointe de la fissure, est décrit par un paramètre appelé "facteur d'intensité de contrainte", noté  $K$ . Ce concept est généralement utilisé avec l'hypothèse que le matériau est homogène, et dans un régime élastique linéaire isotrope.

La rupture survient lorsque  $K$  atteint une valeur critique  $K_c$  caractéristique du matériau et appelée "ténacité". Irwin a postulé que la condition  $K \geq K_c$  représentait un critère de rupture.

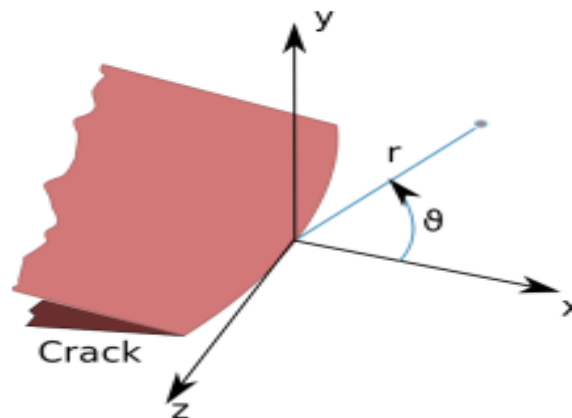


Figure II.15 : Coordonnées polaires en pointe de fissure

Le facteur d'intensité de contrainte s'exprime sous la forme :

$$K = Y\sigma_0\sqrt{\pi a}$$

Où  $a$  est la longueur initiale de la fissure,  $\sigma_0$  est la contrainte uniforme appliquée et  $Y$  est un facteur géométrique (Coefficient de correction).

En élasticité linéaire, la distribution des contraintes  $\sigma_{ij}$  à proximité de la pointe de fissure s'exprime en coordonnées polaires sous la forme :

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + O(1)$$

Où  $K$  est le facteur d'intensité des contraintes (habituellement exprimé en  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ) et  $f_{ij}$  est une quantité sans dimension qui varie avec la géométrie.

### II.6.1. Singularité des contraintes en mode I et mode II :

La singularité est de type  $1/\sqrt{r}$ . On la démontre comme suit [50] : Considérons une fissure droite en situation de déformation plane. Cherchons la forme asymptotique des contraintes au voisinage de sa pointe. Pour cela, définissons classiquement un repère  $(O, X_1, X_2)$  avec  $O$  confondu avec la pointe et  $OX_1$  située dans le prolongement de la fissure, et les coordonnées polaires  $(r, \theta)$  correspondants.

On trouve l'expression asymptotique des contraintes:

$$\sigma_{rr} = \frac{K_I}{4\sqrt{2\pi r}} \left( 5 \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right) + \frac{K_{II}}{4\sqrt{2\pi r}} \left( -5 \sin \frac{\theta}{2} + 3 \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{K_I}{4\sqrt{2\pi r}} \left( 3 \cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{3\theta}{2} \right) + \frac{K_{II}}{4\sqrt{2\pi r}} \left( -3 \sin \frac{\theta}{2} - 3 \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{K_I}{4\sqrt{2\pi r}} \left( \sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \frac{K_{II}}{4\sqrt{2\pi r}} \left( \cos \frac{\theta}{2} + 3 \cos \frac{3\theta}{2} \right)$$

Les coefficients  $K_I$  et  $K_{II}$  sont des facteurs d'intensité de contrainte de mode I et II respectivement.

### II.6.2. Singularité des contraintes en mode III :

L'expression asymptotique des contraintes est donnée par :

$$\sigma_{13} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2}$$

$$\sigma_{32} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2}$$

$K_{III}$  est le facteur d'intensité en mode III.

Le déplacement correspondant est donnée par:

$$u_3 = \frac{2K_{III}}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2}$$

### **II.6.3. Ténacité :**

On appelle communément « ténacité » le facteur d'intensité des contraintes critique au-delà duquel la rupture se produit. Les valeurs de ténacité peuvent être déterminées expérimentalement à l'aide d'éprouvettes préfissurées [51].

En mode I, pour le cas des déformations planes, la ténacité se note  $K_{Ic}$  (généralement exprimée en  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ).

Le  $K_{Ic}$  est un paramètre qui peut être utilisé en conception lorsque la tolérance aux dommages fait partie du cahier des charges (ponts, bâtiments, aéronautique, etc.)[52].

La notion se généralise (« critère en G ») en reliant la ténacité aux facteurs d'intensité des contraintes pour les trois modes :

$$K_c^2 = K_I^2 + K_{II}^2 + \frac{E'}{2\mu} K_{III}^2$$

Ou  $K_C$  est la ténacité,  $E' = E / (1-\nu^2)$  en déformations planes et  $E' = E$  en contraintes planes.

La notation  $K_C$  est souvent utilisée pour décrire le facteur d'intensité des contraintes critique en contraintes planes.

## **II.7. Comportement mécanique des matériaux composites :**

### **II.7.1. Introduction :**

L'étude du comportement mécanique d'un matériau conduit souvent à prendre en compte la détérioration progressive qui mène à sa rupture macroscopique. Cet endommagement peut trouver son origine dans le développement de défauts, présents dès l'étape d'élaboration ou induits par des sollicitations diverses lors de son utilisation. L'évolution du comportement mécanique d'un matériau, depuis son état initial jusqu'à sa rupture, est décrite par la théorie de l'endommagement [48].

L'utilisation des matériaux composites étant récente et malgré l'effort de recherche entrepris, leur tenue à long terme soulève de nombreuses questions tant fondamentales que technologiques. En effet, à cause des hétérogénéités et de leur anisotropie, la nature des endommagements ainsi que les mécanismes à l'origine de leur apparition et de leur progression sont très différents des mécanismes rencontrés dans les matériaux plus conventionnels. Ainsi, suivant l'échelle considérée, les endommagements tels que la rupture

du renfort, la fissuration matricielle ou encore le délaminage peuvent être à l'origine de la ruine prématurée d'une structure [54].

Les lois de comportement, régissant les champs des déformations et des contraintes dans un milieu donné, définissent le fonctionnement mécanique caractéristique de ce milieu. Ces lois, exprimées à travers des axiomes, capturent de manière approfondie les phénomènes observés et éclairent sur la nature des interactions mécaniques à l'œuvre [1]

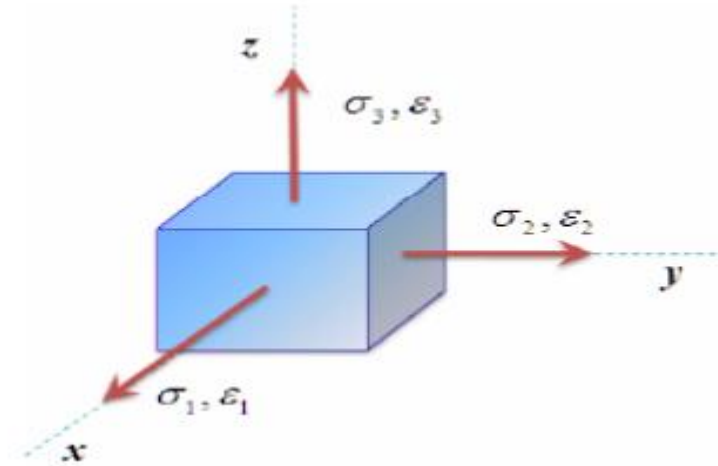


Figure II.16 : Définition des contraintes et déformations

### II.7.2 Le champ de contraintes:

L'état de contrainte est défini par la relation suivante :

$$[\sigma_{ij}] = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

$\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$  avec  $j \neq i$  donc :  $\sigma_{12} = \sigma_{21}$  ;  $\sigma_{13} = \sigma_{31}$  ;  $\sigma_{23} = \sigma_{32}$

Ou i indique la direction de la contrainte et j indique la direction de la normale

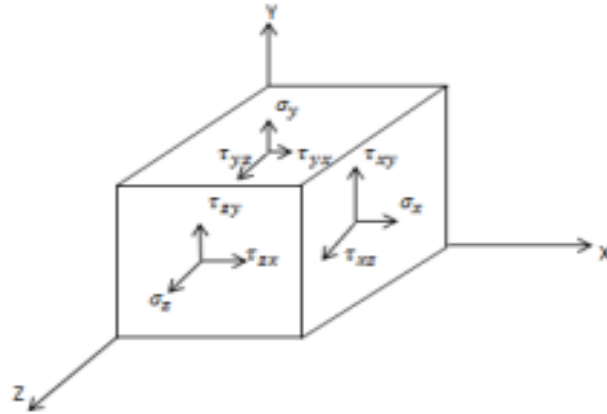


Figure II.17 : La direction des contraintes

A l'équilibre on aura le tenseur de contrainte suivant :

$$[\sigma_{ij}] = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ Sym & & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

### II.7.3. Le champ de déformations :

L'état de déformation est défini de façon similaire à l'état de contrainte :

$$[\epsilon_{ij}] = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ Sym & & \epsilon_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} \\ & \epsilon_{22} & \gamma_{23} \\ Sym & & \epsilon_{33} \end{bmatrix}$$

$\epsilon_{ij} \rightarrow i=j$  : déformation normale.  $\epsilon_{ij} \rightarrow i \neq j$  : Déformation angulaire.

La déformation linéaire et angulaire sont définies par :

$$\begin{cases} \epsilon_{ii} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \\ \gamma_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \end{cases}$$

### II.7.4. Les équations de compatibilité :

Les équations de compatibilité sont comme suit :

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{ij}}{\partial^2 x_j^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{ij}}{\partial^2 x_i^2} - 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} = 0 \quad i \neq j$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{ii}}{\partial x_j \partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( -\frac{\partial \varepsilon_{jk}}{\partial x_i} + \frac{\partial \varepsilon_{ik}}{\partial x_j} + \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial x_k} \right) \quad i \neq j \neq k$$

La relation entre les contraintes et les déformations est donnée par la loi de Hooke

généralisée :

$$\{\sigma\} = [C] \times \{\varepsilon\}$$

Où  $\{\sigma\} = \{\sigma_{11} \sigma_{11} \quad \sigma_{22} \sigma_{33} \quad \sigma_{23} \sigma_{31} \quad \sigma_{12} \sigma_{32} \quad \sigma_{13} \sigma_{21}\}^T$

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_{11} \varepsilon_{11} \quad \varepsilon_{22} \varepsilon_{33} \quad \varepsilon_{23} \varepsilon_{31} \quad \varepsilon_{12} \varepsilon_{32} \quad \varepsilon_{13} \varepsilon_{21}\}^T$$

Et [C] est la matrice de rigidité donnée par la relation suivante :

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1131} & C_{1112} & C_{1132} & C_{1113} & C_{1121} \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2231} & C_{2212} & C_{2232} & C_{2213} & C_{2221} \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & C_{3323} & C_{3331} & C_{3312} & C_{3332} & C_{3313} & C_{3321} \\ \vdots & & & & & & & & \vdots \\ \vdots & & & & & & & & \vdots \\ \vdots & & & & \ddots & & & & \vdots \\ \vdots & & & & & & & & \vdots \\ \vdots & & & & & & & & \vdots \\ C_{2111} & C_{2122} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & C_{2121} \end{bmatrix}$$

Et inversement :

$$\{\varepsilon\} = [C]^{-1} \{\sigma\} = [S] \{\sigma\}$$

Où [S] = [C]<sup>-1</sup> est la matrice de souplesse ou de flexibilité.

A l'équilibre :



$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{11} = \sigma_1 \\ \sigma_{22} = \sigma_2 \\ \sigma_{33} = \sigma_3 \\ \sigma_{23} = \sigma_{32} = \sigma_4 \\ \sigma_{13} = \sigma_{31} = \sigma_5 \\ \sigma_{12} = \sigma_{21} = \sigma_6 \end{array} \right. \quad \text{Et} \quad \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{11} = \varepsilon_1 \\ \varepsilon_{22} = \varepsilon_2 \\ \varepsilon_{33} = \varepsilon_3 \\ 2\varepsilon_{23} = 2\varepsilon_{32} = \gamma_{23} = \gamma_{32} = \varepsilon_4 \\ 2\varepsilon_{13} = 2\varepsilon_{31} = \gamma_{13} = \gamma_{31} = \varepsilon_5 \\ 2\varepsilon_{12} = 2\varepsilon_{21} = \gamma_{12} = \gamma_{21} = \varepsilon_6 \end{array} \right.$$

La loi de Hooke généralisée sera donc :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{array} \right\} = \left[ \begin{array}{cccccc} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{array} \right] \times \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{array} \right\}$$



***CHAPITRE III :***

*Comportement en  
endommagement d'un VER  
composite sous une charge  
statique*

### **III.1. Introduction**

Le VER est un modèle représentatif qui capture les caractéristiques essentielles de la microstructure d'un matériau composite. Il permet d'obtenir des propriétés macroscopiques effectives à partir des propriétés des composants individuels. Cependant, lorsqu'un matériau composite est soumis à des charges et contraintes, des processus d'endommagement peuvent se produire au niveau du VER, affectant ainsi les propriétés globales du matériau.

Nous étudions spécifiquement le comportement en endommagement d'un VER composite soumis à une charge statique. Nous examinons comment les mécanismes d'endommagement identifiés dans le chapitre précédent se manifestent et évoluent sous l'influence d'une charge appliquée de manière statique. Nous analysons les différentes étapes du processus d'endommagement, de l'initiation à la propagation des défauts, et nous évaluons les conséquences de cet endommagement sur les propriétés mécaniques globales du matériau composite.

Nous abordons également la méthode numérique utilisée pour étudier le comportement en endommagement des VER composites sous une charge statique. Ces approches permettent de mieux comprendre les phénomènes qui se produisent à l'échelle microscopique et de prédire le comportement global du matériau en présence d'une charge statique.

### **III.2. Modèle référentielle**

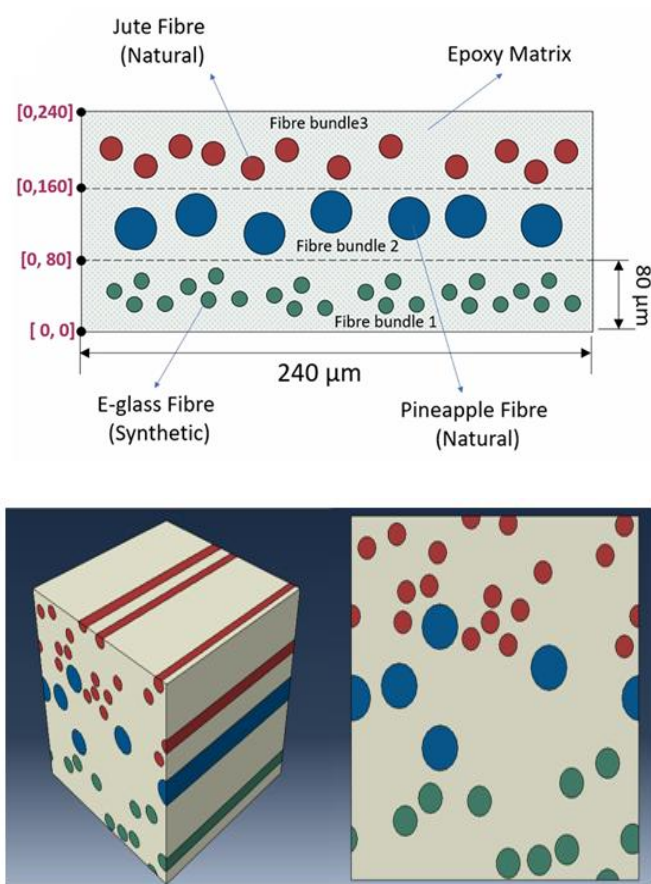
Le discours que je vais présenter est extrait d'une vidéo qui aborde le concept des composites hybrides. Les composites hybrides sont des matériaux fabriqués en combinant deux types ou plus de fibres différentes dans une matrice commune. Dans cette approche, plusieurs brins ou faisceaux de fibres sont disposés en couches superposées, intégrés à un milieu de matrice. Cela donne au composite hybride son aspect stratifié.

Les exemples de composites à base de fibres naturelles mentionnés dans la vidéo incluent le jute, le koi, le bambou, le chanvre et le sisal, chacun avec ses propres propriétés distinctes. La modélisation de ces matériaux peut être abordée selon différentes échelles. Certains considèrent une approche à l'échelle mésoscopique, tandis que d'autres la voient comme une approche à l'échelle laminaire ou macroscopique. Cependant, le discours se concentre sur une approche à l'échelle microscopique.

L'approche microscopique consiste à tenir compte des différents diamètres des fibres et de leurs positions respectives. Au lieu de modéliser les fibres comme un système homogénéisé, chaque fibre est traitée individuellement, avec ses propriétés uniques. Le modèle de simulation présenté dans la vidéo concerne un composite hybride de fibres synthétiques et naturelles, utilisant du jute, de l'ananas et des fibres de verre synthétique.

Le modèle visuel dans Abaqus montre différentes catégories représentant les différents types de fibres. Les dimensions du modèle sont spécifiées avec une épaisseur de 80 micromètres pour chaque faisceau, une largeur de 240 micromètres sur l'axe x et une hauteur totale de 240 micromètres sur l'axe y. Les fibres sont positionnées selon les coordonnées spécifiées pour chaque faisceau (voir fig.1).

Étant donné que ce modèle représente un composite hybride de fibres synthétiques et naturelles, les propriétés correspondantes à chaque type de fibre sont prises en compte lors de la simulation.[61]



**Figure III.1 : Modèle référentiel [61]**

### **III.3. Modèle géométrique**

Nous travaillons sur un modèle géométrique de dimensions 12.5 \* 12.5 \* 12.5 pour un composite hybride REV à matrice Epoxy. Ce composite est composé de trois types de fibres : jute, alfa et verre nous utilisons un schéma de codage où jute est représenté par 1, alfa par 2 et verre par 3 avec un diamètre commun  $d = 15 \mu\text{m}$ . Nous avons 10 fibres de chaque type. Avec une charge appliquée de 24MPa sur référence pinot.

#### **Objectif de l'étude : Analyse du FIC dans différentes configurations**

Notre objectif principal est analyser l'évolution de la courbe force-déplacement de deux modèles géométrique non endommagé et endommagé inspiré d'un modèle référentiel et d'étudier l'évolution du facteur d'intensité de contraintes (FIC) dans trois configurations différentes : une configuration aléatoire, une configuration organisée et une configurations symétriques.

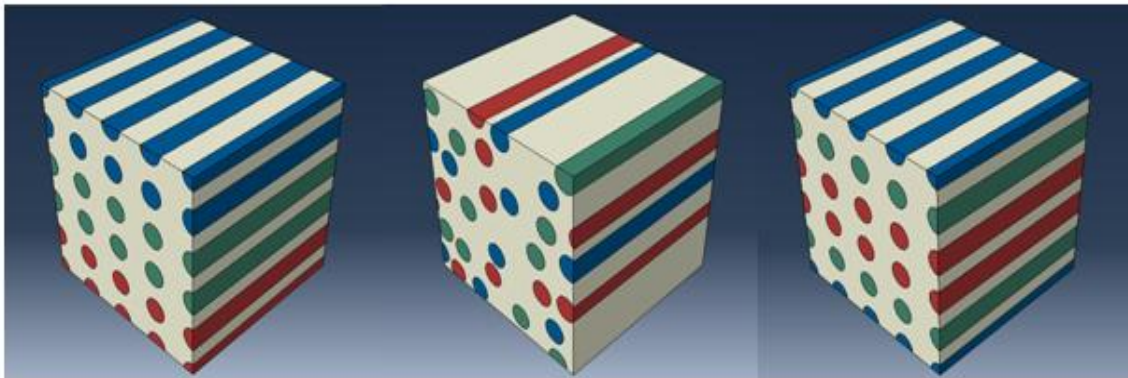
- ❖ **Configuration aléatoire** : Dans cette configuration, les fibres sont disposées de manière aléatoire dans le composite. Notre objectif est d'analyser comment cette disposition aléatoire des fibres influence le facteur d'intensité de contraintes (FIC) et les propriétés mécaniques du composite.
- ❖ **Configuration organisée** : Dans cette configuration, nous examinons trois cas différents de disposition organisée des fibres. Chaque cas représente une séquence spécifique des types de fibres :

- Cas 1 : 11 22 33
- Cas 2 : 33 11 22
- Cas 3 : 22 33 11

Nous étudions comment chaque disposition organisée des fibres affecte le FIC et les propriétés mécaniques du composite

- ❖ **Configurations symétriques** : Dans les configurations symétriques, nous avons quatre cas différents
- Cas 1 : 123-123
  - Cas 2 : 123-321
  - Cas 3 : 231-123
  - Cas 4 : 213-312

Nous analyserons comment ces configurations symétriques influencent le FIC et les propriétés mécaniques du composite



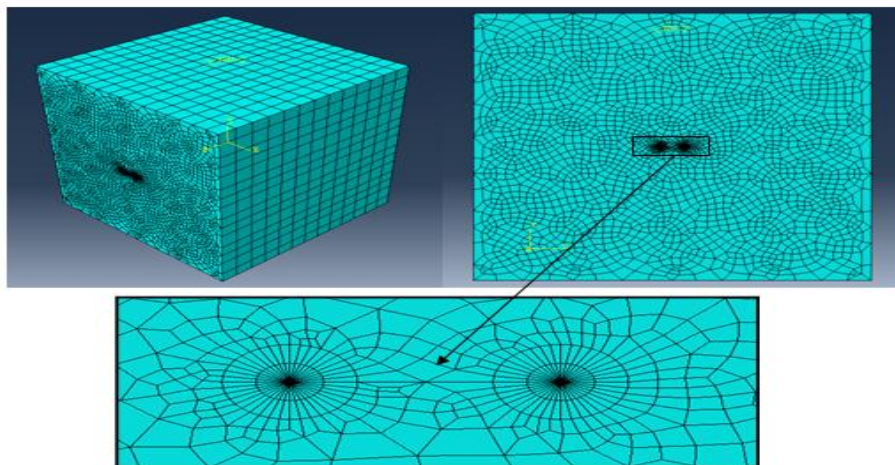
**Figure III.2 :** Modèle géométrique

Propriétés Constituants	Module de Young [Gpa]	Coefficient de Poisson	Couleurs
<b>Alfa</b>	12	0.3	<span style="color: green;">■</span>
<b>Glass</b>	73	0.21	<span style="color: red;">■</span>
<b>Jute</b>	35	0.35	<span style="color: blue;">■</span>
<b>Epoxy</b>	4.5	0.4	<span style="color: white;">■</span>

**Tableau III. 1 :** Propriétés mécaniques des matériaux

### III.4. Maillage

Pour simuler le comportement linéaire en traction et l'influence du déplacement longitudinal des fibres alfa et de verre par rapport au fond de fissure ainsi que la longueur de la fissure, nous avons utilisé un code de calcul « Abaqus » la version 6.14 pour l'analyse des structures composites par la méthode des éléments finis. Ce code présente un système complet, intégrant non seulement les fonctions de calcul proprement dit, mais également des fonctions de construction de modèles (préprocesseur) et de traitement des résultats (post-processeur) [62]



**Figure III.3 :** Maillage du modèle

### III.5. Résultats et discussions

#### III.5.1 Modèle Non endommagé

##### III.5.1.1. Configuration Organisé

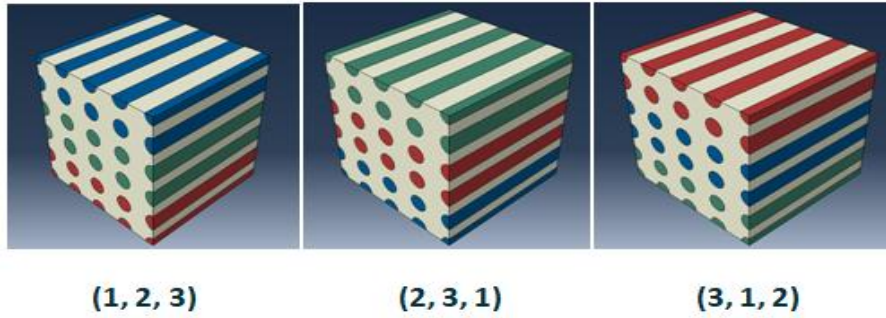


Figure III.4 : Configuration organisée des fibres

➤ Chargement sur l'axe des X

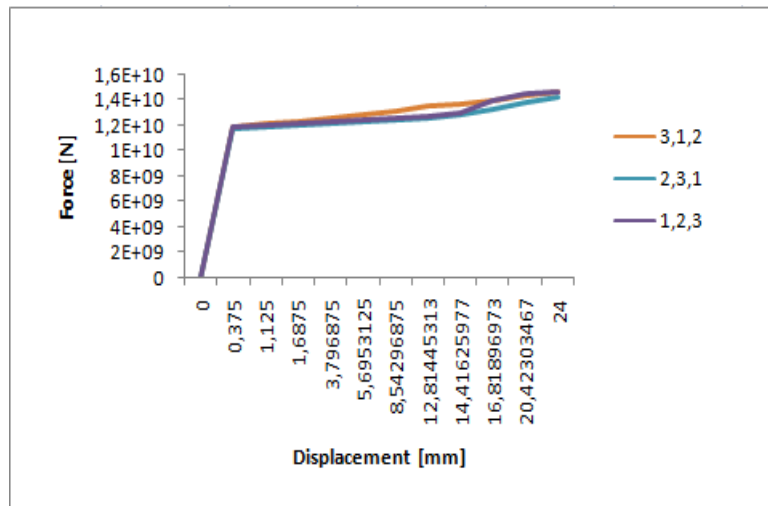


Figure III.5 : Variation de la force en fonction du déplacement pour le cas du chargement suivant l'axe des X et pour les trois différentes combinaisons (3,1,2-2,3,1-1,2,3).

La figure III. 5 montra la variation de la force en fonction du déplacement pour le cas du chargement suivant l'axe des X et pour les trois différentes combinaisons du matériau composite hybride (3,1,2-2,3,1-1,2,3). On constate que les trois volumes élémentaires représentatif (VER) hybride ont la même allure des courbes et atteignent la même valeur maximale de la limite élastique. On note que les trois combinaisons considérées n'influent presque pas sur la résistance du matériau dans le cas où le chargement est suivant l'axe des X

➤ Chargement sur l'axe des Y

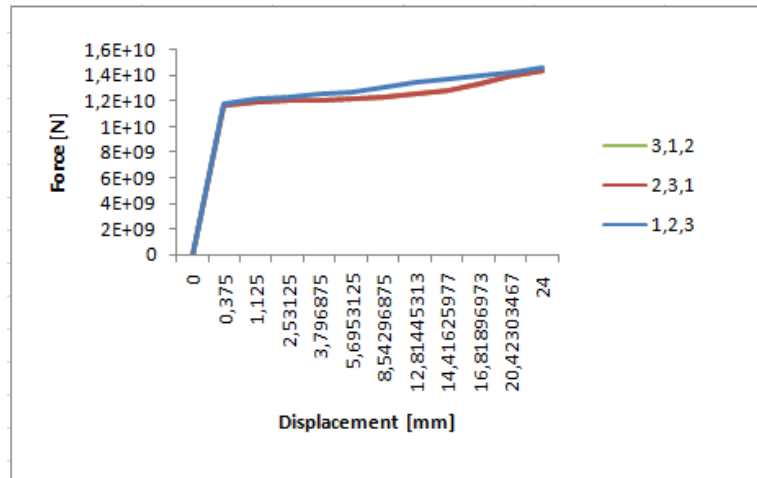


Figure III.6 : Variation de la force en fonction du déplacement pour le cas du chargement des Y et pour les trois différentes combinaisons (312 ; 231 ; 123).

La figure III.6 montra la variation de la force en fonction du déplacement pour le cas de chargement suivant l'axe des Y et pour les trois différentes combinaisons du matériau composite hybride (312 ; 131 ; 123). On constate que les trois volumes élémentaires représentatif (VER) hybride ont la même allure des courbes et atteignent la même valeur maximale de la limite élastique. On note que les trois combinaisons considérées n'influent presque pas sur la résistance du matériau dans le cas où le chargement est suivant l'axe des Y.

➤ Chargement sur l'axe des Z

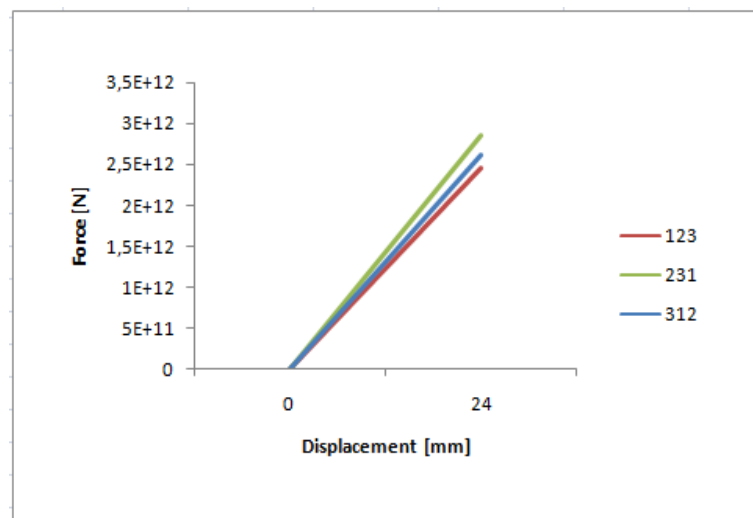
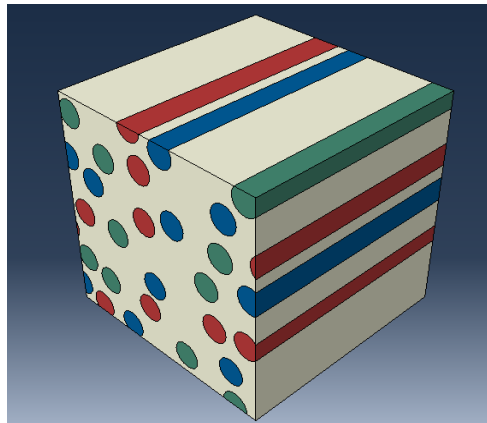


Figure III.7 : Variation de la force en fonction du déplacement pour le cas du chargement des Z et pour les trois différentes combinaisons (312 ; 231 ; 123).



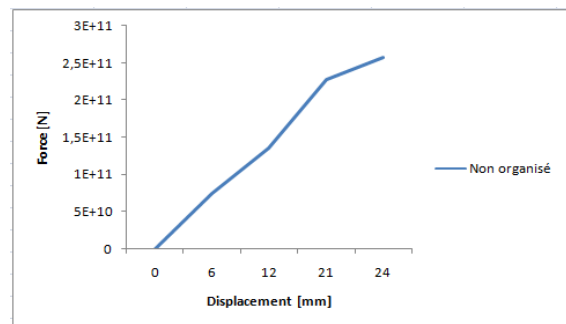
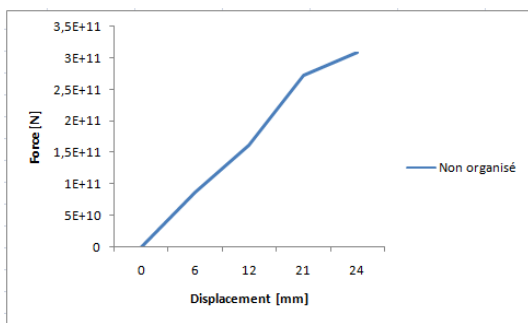
La figure III. 7 montre la variation de la force en fonction du déplacement pour le cas du chargement suivant l'axe des Z et pour les trois différentes combinaisons du matériau composite hybride (312 ; 231 ; 123). On constate que les trois volumes élémentaires représentatif (VER) hybride restent dans la zone élastique et cela signifie que les matériaux hybrides changés suivant l'axe des Z donnent et bonne résistance. On note que la combinaison (231) considérée possède une bonne résistance comparativement aux deux autres (123 ; 312).

**III.5.1.2. Configuration non organisé (aléatoire)**

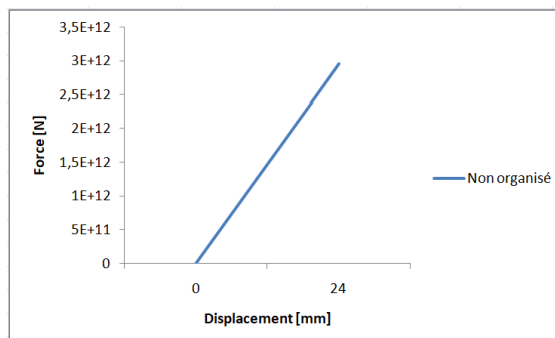


**Figure III.8 :** Configuration non organisé (aléatoire) des fibres

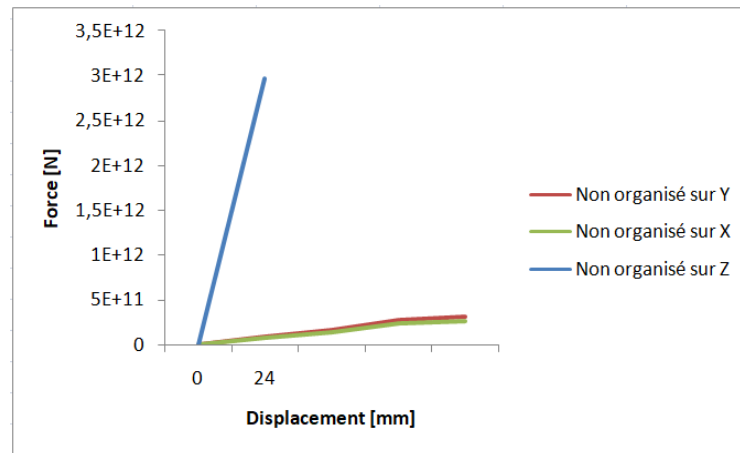
➤ Chargement sur l'axe des Y Chargement sur l'axe des X



➤ Chargement sur l'axe des Z



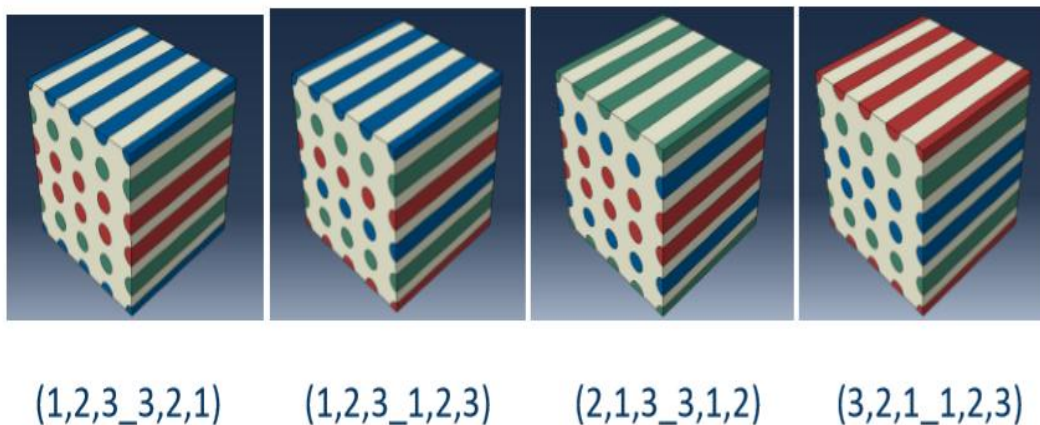
➤ Chargement sur l'axe des X, Y et Z



**Figure III. 9 :** Variation de la force en fonction du déplacement pour les cas du chargement suivant les trois axes (X, Y et) Z et pour une combinaison aléatoire.

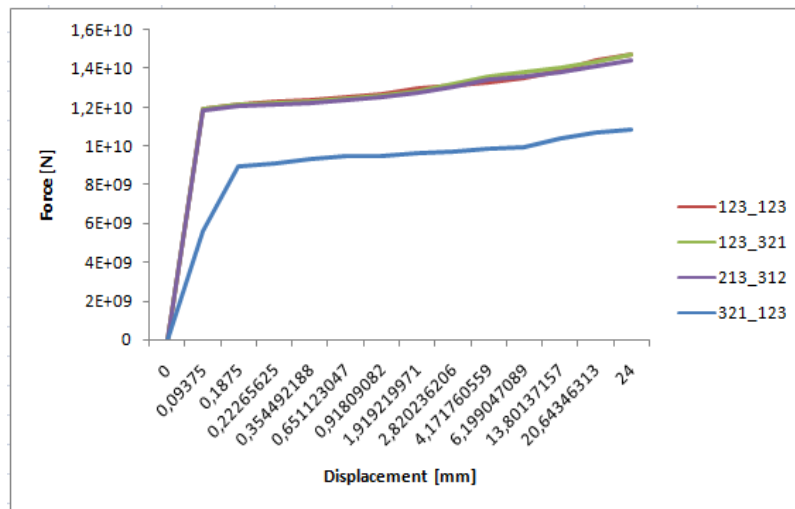
La figure III. 9 montre la variation de la force en fonction du déplacement pour le cas du chargement suivant l'axe des X, Y et Z et pour une combinaisons aléatoire des fibres du matériau composite hybride. On constate que le volume élémentaire représentatif (VER) hybride changés suivant l'axe des Z possède une bonne résistance comparativement aux deux autres axes X et Y.

**III.5.1.3. Configuration Organisé (Symétriques)**



**Figure III.10 :** Configuration Organisé (Symétriques) des fibres

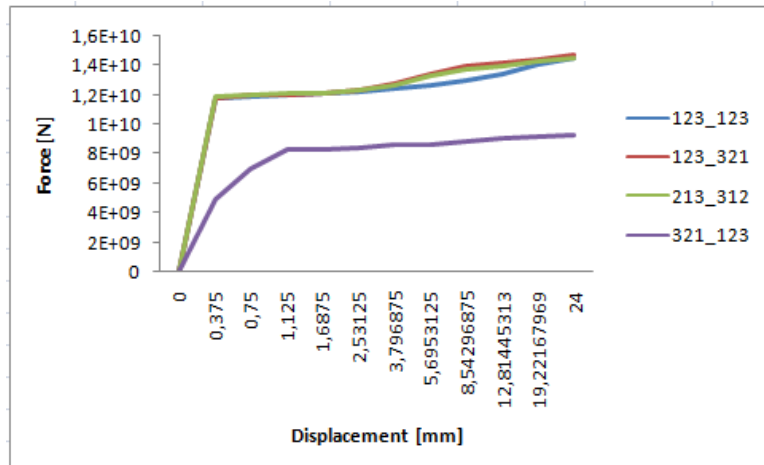
➤ Chargement sur l'axe des X



**Figure III.11** : Variation de la force en fonction du déplacement pour le cas du chargement suivant l'axe des X et pour les différentes combinaisons symétriques (123-123, 123-321, 213-312 et 321-123).

La figure III. 11 montre la variation de la force en fonction du déplacement pour le cas du chargement suivant l'axe des X et pour les quatre différentes combinaisons du matériau composite hybride (123-123, 123-321, 213-312 et 321-123). On constate que les quatre volumes élémentaires représentatif (VER) hybride ont la même allure des courbes. On note que les courbes des trois différentes combinaisons du matériau composite hybride (123-123, 123-321, 213-312) sont confondues et possèdent une résistance plus élevée comparativement au volume élémentaire représentatif (VER) hybride de la combinaison (321-123) dans le cas où le chargement est suivant l'axe des X.

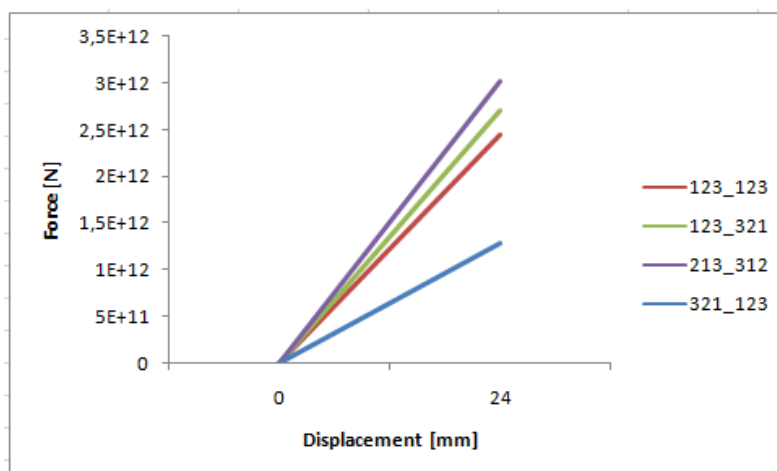
➤ Chargement sur l'axe des Y



**Figure III. 12 :** Variation de la force en fonction du déplacement pour le cas du chargement suivant l'axe des Y et pour les différentes combinaisons symétriques (123-123, 123-321, 213-312 et 321-123).

La figure III. 12 montre la variation de la force en fonction du déplacement pour le cas du chargement suivant l'axe des Y et pour les quatre différentes combinaisons du matériau composite hybride (123-123, 123-321, 213-312 et 321-123). On constate que les quatre volumes élémentaires représentatif (VER) hybride ont la même allure des courbes. On note que les courbes des trois différentes combinaisons du matériau composite hybride (123-123, 123-321, 213-312) sont confondues et possèdent une résistance plus élevée comparativement au volume élémentaire représentatif (VER) hybride de la combinaison (321-123) dans le cas où le chargement est suivant l'axe des Y.

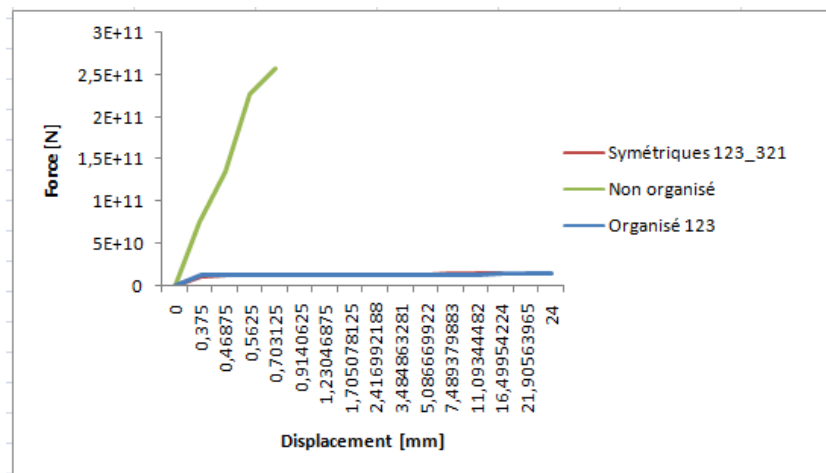
➤ Chargement sur l'axe des Z



**Figure III. 13 :** Variation de la force en fonction du déplacement pour le cas du chargement suivant l'axe des Z et pour les différentes combinaisons symétriques (123-123, 123-321, 213-312 et 321-123).

La figure III. 13 montre la variation de la force en fonction du déplacement pour le cas du chargement suivant l'axe des X et pour les quatre différentes combinaisons du matériau composite hybride (123-123, 123-321, 213-312 et 321-123). On constate que les quatre volumes élémentaires représentatif (VER) hybride n'ont pas dépassé la limite élastique. Le chargement suivant l'axe des Y conduit à des résistance beaucoup plus élevés et cela quel que soit les différentes combinaisons considérées. On constate que le volume élémentaire représentatif (VER) hybride de la combinaison (321-123) atteint une résistance faible par rapport aux trois autres différentes combinaisons du matériau composite hybride (123-123, 123-321, 213-312).

#### III.5.1.4. L'effet des différents modèles retenus sur la courbe force-déplacement



**Figure III. 14 :** Variation de la force en fonction du déplacement pour les trois cas retenues (symétrique 213-312, non organisé et organisé 231)

La figure III. 14 montre la variation de la force en fonction du déplacement pour les trois cas retenues (symétrique 213-312, non organisé et organisé 231) du modèle non endommagé. On constate que la configuration non organisée présente une résistance beaucoup plus élevée comparativement aux deux configurations organisée et organisée symétrique suivant l'axe des Y.

### III.5.2. Modèle endommagé

#### III.5.2.1. Configuration Organisée

- Chargement sur l'axe des Y

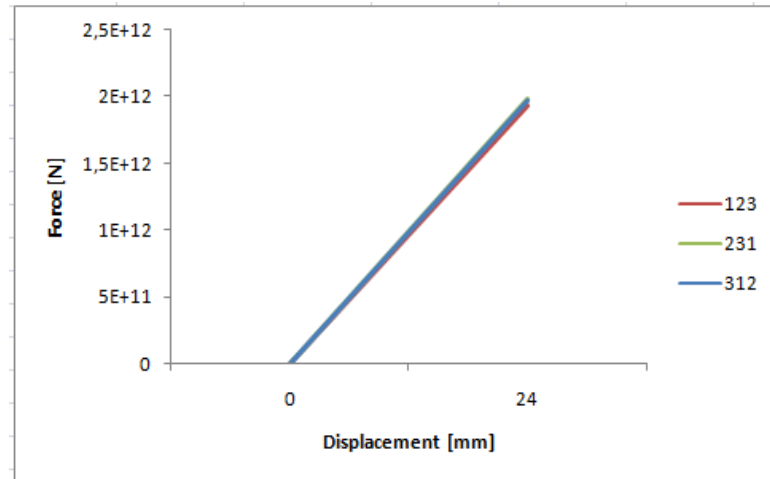
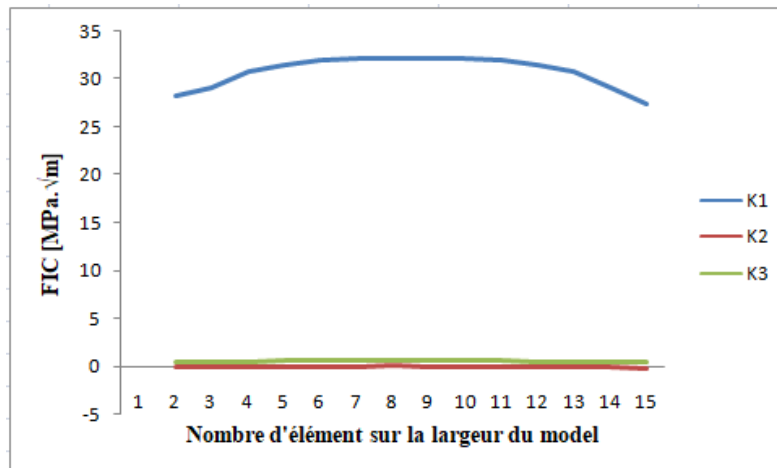


Figure III. 15 : Variation de la force en fonction du déplacement pour le cas du chargement suivant l'axe des Y et pour les trois différentes combinaisons organisées (123 ; 231 ; 312).

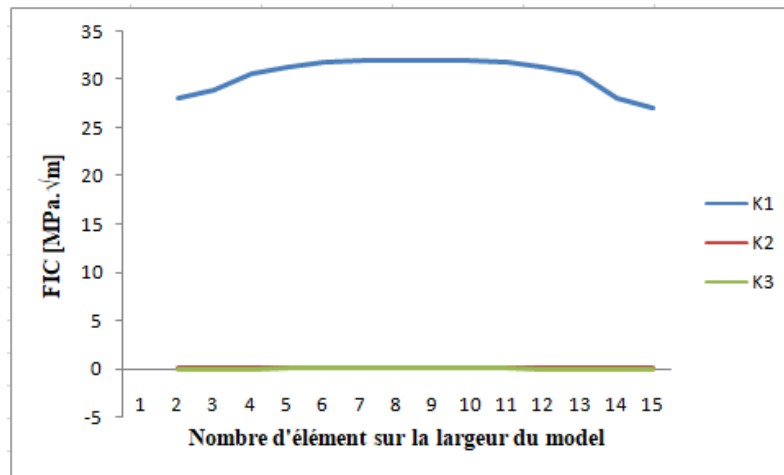
La figure III. 15 montre la variation de la force en fonction du déplacement pour le cas du chargement suivant l'axe des Y et pour les trois différentes combinaisons du matériau composite hybride (312 ; 231 ; 123). On constate que les trois volumes élémentaires représentatif (VER) hybride restent dans la zone élastique et cela signifie que les matériaux hybrides chargés suivant l'axe des Y donnent une bonne résistance.

- Combinaison 123

- Crack-1



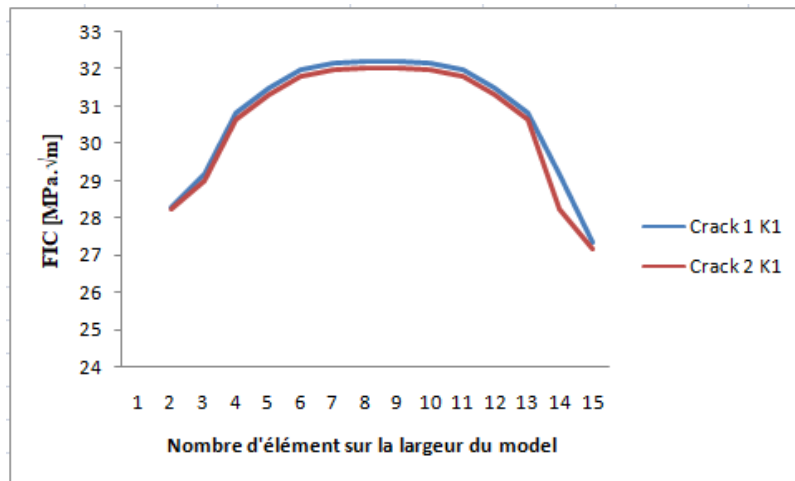
- Crack-2



**Figure III. 16:** Variation des facteurs d'intensité de contraintes  $K_I$ ,  $K_{II}$  et  $K_{III}$  en fonction de la largeur du volume élémentaire représentatif hybride dans le cas du chargement suivant l'axe des Y pour la combinaison organisés (123) et pour les deux fonds de fissure.

Les figures III.16 illustrent la variation des facteurs d'intensité de contraintes  $K_I$ ,  $K_{II}$  et  $K_{III}$  en fonction de la largeur du VER des trois différentes combinaisons du matériau composite hybride (312 ; 231 ; 123) pour les deux fonds de fissure. On constate que la propagation de la fissure s'effectue en mode I pur et ce en fonction de la force appliquée sur le composite. Le facteur d'intensité de contrainte  $K_I$  est significativement plus élevé que les deux autres modes. Dans notre étude le mode pur I est prépondérant et c'est le seul paramètre à prendre en compte et on néglige les deux modes de glissement  $K_{II}$  et  $K_{III}$ .

### III.5.2.1.1. Comparaison entre le facteur d'intensité de contraintes $K_I$ pour Crack-1 et Crack-2 de la combinaison 123

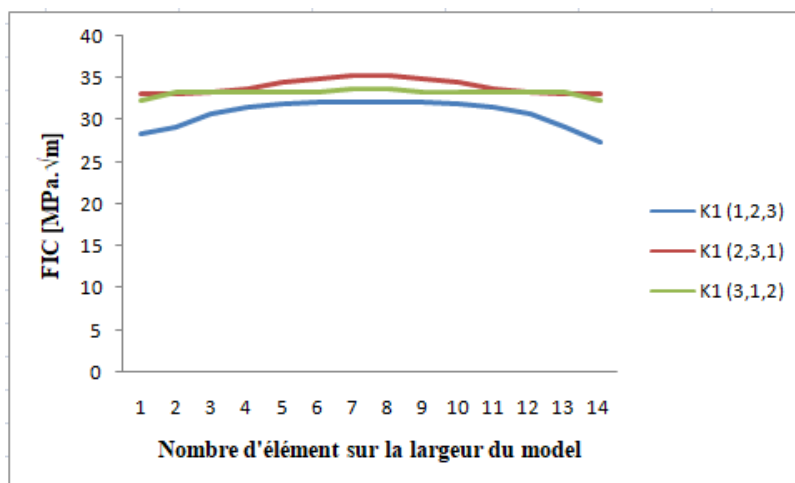


**Figure III. 17 :** Variation des facteurs d'intensité de contraintes  $K_I$  en fonction de la largeur du volume élémentaire représentatif hybride dans le cas du chargement suivant l'axe des Y pour la combinaison organisés (123) et pour les deux fonds de fissure.

Les figures III.17 montrent la variation des facteurs d'intensité de contraintes  $K_I$  en fonction de la largeur du VER de la combinaison (123) du matériau composite hybride pour les deux fonds de fissure. On constate que le facteur d'intensité de contraintes  $K_I$  des deux fonds de fissure se superposent avec une légère variation.

### III.5.2.1.2. L'effet des différentes combinaisons sur le facteur d'intensité de contraintes $K_I$

- Crack-1 pour tous les modèles organisés



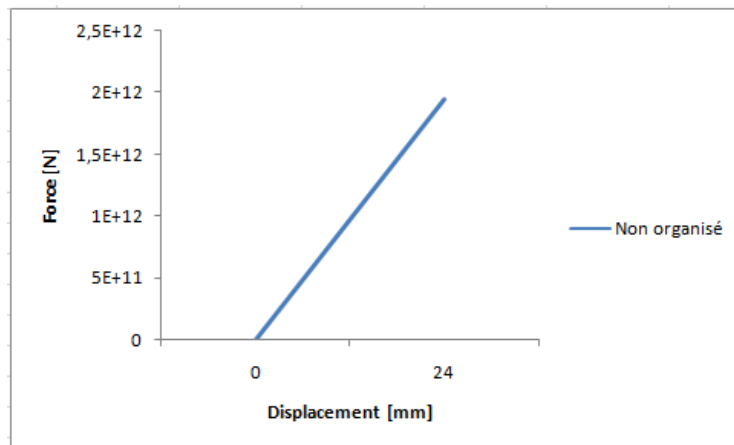
**Figure III. 18 :** Variation des facteurs d'intensité de contraintes  $K_I$  en fonction de la largeur du volume élémentaire représentatif hybride dans le cas du chargement suivant l'axe des Y pour les trois combinaisons organisés (312 ; 231 ; 123) et pour un fond de fissure.



Les figures III.18 montrent la variation des facteurs d'intensité de contraintes  $K_I$  en fonction de la largeur du VER des trois différentes combinaisons du matériau composite hybride (312 ; 231 ; 123) pour un fond de fissure. On constate que le facteur d'intensité de contrainte  $K_I$  de la combinaison 123 est légèrement inférieur aux deux autres combinaisons (312 ; 231).

### III.5.2.2. Configuration non organisé (aléatoire) endommagé

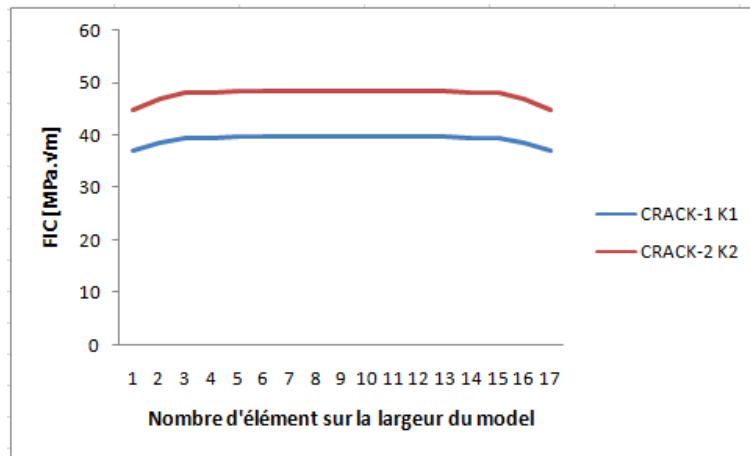
- Chargement sur l'axe des Y



**Figure III. 19 :** Variation de la force en fonction du déplacement pour le cas du chargement suivant l'axe des Y et pour la combinaison non organisés (aléatoire) endommagé.

La figure III. 19 montre la variation de la force en fonction du déplacement pour le cas du chargement suivant l'axe des Y et pour la combinaison non organisés (aléatoire) endommagé. On constate que l'allure de la courbe représentée est de la forme d'une fonction linéaire ce veut dire que notre matériau composite (volume élémentaires représentatif VER) hybride restent dans la zone avec le chargement considéré.

#### III.5.2.2.1. Comparaison entre le facteur d'intensité de contraintes $K_I$ pour Crack-1 et Crack-2 de la combinaison non organisée (aléatoire) endommagé.

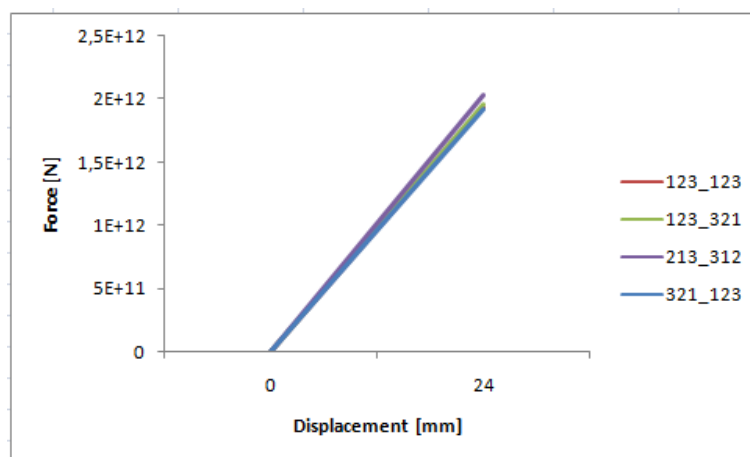


**Figure III. 20 :** Variation des facteurs d'intensité de contraintes  $K_I$  en fonction de la largeur du volume élémentaire représentatif hybride dans le cas du chargement suivant l'axe des Y pour la combinaison non organisé (aléatoire) endommagé et pour les deux fonds de fissure.

Les figures III.20 montrent la variation des facteurs d'intensité de contraintes  $K_I$  en fonction de la largeur du VER de la combinaison non organisé (aléatoire) endommagé et pour les deux fonds de fissure du matériau composite hybride. On constate que le facteur d'intensité de contraintes  $K_I$  des deux fonds de fissure présente une variation remarquable et cela est dus probablement à la distribution aléatoire des fibres.

### III.5.2.3. Configuration organisé (Symétriques) endommagé :

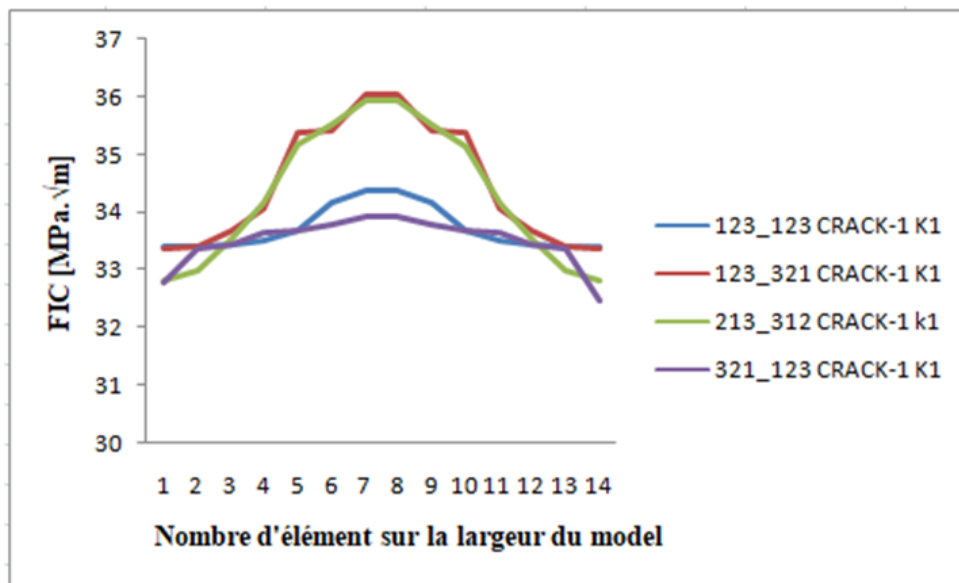
- Chargement sur l'axe des Y



**Figure III. 21 :** Variation de la force en fonction du déplacement pour le cas du chargement suivant l'axe des Y et pour les quatre différentes combinaisons organisés (123-123 ; 123-321 ; 231-312 ; 321-123).


La figure III. 21 montre la variation de la force en fonction du déplacement pour le cas du chargement suivant l'axe des Y et pour les quatre différentes combinaisons organisés (123-123 ; 123-321 ; 231-312 ; 321-123) du matériau composite hybride. On constate que les quatre volumes élémentaires représentatif (VER) hybride restent dans la zone élastique et cela signifie que les matériaux hybrides changés suivant l'axe des Y donnent une bonne résistance

**III.5.2.3.1. Comparaison entre le facteur d'intensité de contraintes  $K_I$  pour Crack-1 des quatre combinaisons organisées (symétrique) endommagé.**



**Figure III. 22 :** Variation des facteurs d'intensité de contraintes  $K_I$  en fonction de la largeur du volume élémentaire représentatif hybride dans le cas du chargement suivant l'axe des Y pour les quatre combinaisons organisés symétriques (123-123 ; 123-321 ; 231-312 ; 321-123) et pour un fond de fissure.

Les figures III.22 montrent la variation des facteurs d'intensité de contraintes  $K_I$  en fonction de la largeur du VER des quatre différentes combinaisons du matériau composite hybride (123-123 ; 123-321 ; 231-312 ; 321-123) et pour un fond de fissure. On constate que le facteur d'intensité de contrainte  $K_I$  de la combinaison 321-123 possède le facteur d'intensité de contrainte minimum.



***Conclusion  
Générale***

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale

Cette étude numérique par la méthode des éléments finis nous a menée à tirer les conclusions suivantes :

➤ **Modèle Non endommagé**

- Les combinaisons considérées de la configuration organisée n'influent presque pas sur la résistance du matériau dans le cas où le chargement est suivant l'axe des X et suivant l'axe des Y. Par contre les trois volumes élémentaires représentatif (VER) hybride restent dans la zone élastique et cela signifie que les matériaux hybrides changés suivant l'axe des Z donnent une bonne résistance.
- Le volume élémentaire représentatif (VER) hybride de la configuration aléatoire changés suivant l'axe des Z possède une bonne résistance comparativement aux deux autres axes X et Y.
- Les quatre volumes élémentaires représentatif (VER) hybride de la configuration organisée symétrique ont la même allure des courbes. On note que les courbes des trois différentes combinaisons du matériau composite hybride (123-123, 123-321, 213-312) sont confondues et possèdent une résistance plus élevée comparativement au volume élémentaire représentatif (VER) hybride de la combinaison (321-123) dans le cas où le chargement est suivant l'axe des X et l'axe des Y. Par contre le chargement suivant l'axe des Z conduit à des résistances beaucoup plus élevées et cela quel que soit les différentes combinaisons considérées. On constate que le volume élémentaire représentatif (VER) hybride de la combinaison (321-123) atteint une résistance faible par rapport aux trois autres différentes combinaisons du matériau composite hybride (123-123, 123-321, 213-312).

➤ **Modèle endommagé**

- On constate que les trois volumes élémentaires représentatif (VER) hybride restent dans la zone élastique et cela signifie que les matériaux hybrides changés suivant l'axe des Y donnent une bonne résistance.
- La propagation de la fissure s'effectue en mode I pur et ce en fonction de la force appliquée sur le composite. Le facteur d'intensité de contrainte  $K_I$  est significativement plus élevé que les deux autres modes. Dans notre étude le mode pur I est prépondérant et c'est le seul paramètre à prendre en compte et on néglige les deux modes de glissement  $K_{II}$  et  $K_{III}$ .
- Le facteur d'intensité de contrainte  $K_I$  de la combinaison 123 de la configuration organisée endommagée est légèrement inférieur aux deux autres combinaisons (312 ; 231). Par contre le facteur d'intensité de contraintes  $K_I$  des deux fonds de fissure de la configuration aléatoire endommagée présente une

## Conclusion générale

---

variation remarquable et cela est dus probablement à la distribution aléatoire des fibres.

- On note que le facteur d'intensité de contrainte  $K_I$  de configuration organisée symétrique de la combinaison 321-123 possède le facteur d'intensité de contrainte minimum.



***Bibliographies***

- [1] Gornet L. Généralité sur les matériaux composites. ECN, Centre Nantes, 2011.
- [2] Lionel GENDRE materiaux-composites-et-structures-composites-ensps université PARIS-SACLAY Edité le 17/05/2011
- [3] Jean-M Berthelot Comportement mécanique et analyse des structure 5<sup>e</sup> édition 2012 Lavoisier Paris IBBN : 978-2-7430-14507
- [4] BILLOET J.L., « Introduction aux matériaux composites à hautes performances », Teknea ENSAM 1992.
- [5] Marc Marzano - Action Composite Pascal Celle – GNFA un DOSSIER PÉDAGOGIQUE sur Les matériaux composites
- [6] Joel Cugnoni, « Identification par recalage modal et fréquentiel des propriétés constitutives de coques en matériaux composites », Thèse, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, 2005.
- [7] Rigal J-C. Negrier A, Présentation des matériaux composites. Plastiques et composites, Technique de l'ingénieur, 1991.
- [8] Les composites à matrices thermoplastiques TPFL. Shappe Techniques. 2001
- [9] JP Trotignon, J Verdu, A Dobraczynsky, M Piperaud Matières plastiques. Structures, propriétés, mise en oeuvre, normalisation Edition Nathan
- [10] BERBAIN F., CHEVALIER A., « Mise en oeuvre des plastiques renforcés », Technique de l'ingénieur, traité A 9 III, article 3250.
- [11] Zaidi A. Etude du comportement de matériaux composites à matrice polymère en fatigue (effet du vieillissement). Mémoire de Magistère, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
- [12] Guy Zanella Transformation des matériaux composites. Procédés industriels grande série, « Injection des BMC et SMC ».. Publication Vetrotex. 1994
- [13] Daniel Gay, Matériaux Composites 4<sup>e</sup>me Edition, Hermès 2009
- [14] Maurice Reyne Solutions composites.. Edition JEC Publications. 2006



- [15] Valentin Preault Préault. Méthodes d'homogénéisation pour la modélisation électromagnétique de matériaux composites. Université Paris Sud - Paris XI, 2013. Français
- [16] Hill, R. (1963). Elastic properties of reinforced solids: some theoretical principles. *J. Mech. Phys. Solids*, 11, 357–372.
- [17] HASHIN (Z) – analysis of composite materials. A survey (analyse des matériaux composites tout d'horizon). *J. Applied Mechanics (USA)* vol. 50 1983 p 481-505 4 fig. bibl. (177 réf). ASME New York
- [18] Stroeven, M. (2010). On the existence of representative volumes for softening quasi-brittle materials-A failure zone averaging scheme *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 199, 3028-3038.
- [19] Gitman, I., Askes, H., Sluys, L., 2007. Representative volume: Existence and size determination. *engineering fracture mechanics* 74, 2518-2534.
- [20] Sab, K., 1992. On the homogenization and the simulation of random materials. *European Journal of Mechanics. A. Solids* 11, 585-607.
- [21] Drugan, W.J., Willis, J.R., (1996). A micromechanics-based nonlocal constitutive equation and estimates of representative volume element size for elastic composites. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 44, 497-524.
- [22] Terada, K., Kikuchi, N., 1998. Characterization of the mechanical behavior of solidfluid mixture by homogenization method. *Comput. Methods. Appl. Engrg* 153, 223-257.
- [23] Evesque, P., 2000. Fluctuations, correlation and representative elementary volume (REV) in granular materials. *Poudre and grains* 11, 6-17.
- [24] Kanit, T., Forest, S., Galliet, I., Mounoury, V., Jeulin, D., 2003. Determination of the size of the representative volume element for random composites: Statistical and numerical approach. *Int. J. SolidsStruct.* 40, 3647-3679.
- [25] Hashin, Z.S. (1963). A variational approach to the theory of elastic behavior of multiphase materials. *J. MechPhysSolids* Vol. 11, p. 127–140.
- [26] Grufman, F Ellyin - *Composites Science and Technology*, 2007 – Elsevier.

- [27] M. SALMI, F. AUSLENDER, M. BORNERT et AL.: Various estimates of Representative Volume Element sizes based on a statistical analysis of the apparent behavior of random linear composites. *Comptes Rendus Mécanique*, 340(4–5):230–246, avril 2012.
- [28] G L Povirk 1998 and S Jia Modelling the effects of reinforcement distribution on the elastic properties of composite materials.
- [29] J Zeman and M Šejnoha 2007 From random microstructures to representative volume elements
- [30] S Graham, N Yang Representative volumes of materials based on microstructural statistics
- [31] Ostoja-Starzewski, M.: Material spatial randomness: from statistical to representative volume element. *Probab. Eng. Mech.* 21(2), 112-132
- [32] C. Lantuejoul, “Geostatistical Simulation Models and Algorithms,” Springer Verlag, Berlin, 2002, p.256.
- [33] Zohdi, I.I., Wriggers, P., (2005). Introduction to Computational Micromechanics. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- [34] P.J. Withers , W.M. Stobbs , O.B. Pedersen The application of the Eshelby method of internal stress determination to short fibre metal matrix composites.
- [35] Mori, T., Tanaka, K., (1973). Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. *Acta Metallurgica* 21, 571-574.
- [36] Y. Benveniste. A new approach to the application of mori-tanaka’s theory in composite materials. *Mechanics of Materials*, 6 : 147-157, 1987.
- [37] J. Aboudi. *Mechanics of Composite Materials - A Unified Micromechanical Approach*, Elsevier, Amsterdam, 328 p, (1991).
- [38] S. Nemat-Nasser and M. Hori. *Micromechanics: overall properties of heterogeneous solids*. 2nd edition. Elsevier, Amsterdam, 810 p, (1999).
- [39] P. Ponte-Castaneda. The effective mechanical properties of nonlinear isotropic composites. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 39(1) : 45–71, 1991.

- [40] J. C. Halpin and J. L. Kardos. Halpin-Tsai equations: A review, *Polymer Engineering and Science*, vol. 16, pp. 344-352, (1976).
- [41] J. J. Hermans. The elastic properties of fiber reinforced materials when the fibers are aligned, *Proc. Kon. Ned. Akad. v. Wetensch. B.*, vol. 65, pp. 1-9, (1967).
- [42] C. Döbert. Meso-Makromechanische Modellierung von Faserverbundwerkstoffen mit Schädigung, Ph.D. thesis, Institut für Baumechanik und Numerische Mechanik, Universität Hannover, (2001).
- [43] F. Larsson et K. Runesson. A mixed least-squares formulation for rve computations, To be published in *Int. J. Num. Meth. Eng.*, (2004).
- [44] D. Lebaillif, Thèse doctorat "Fissuration en fatigue des structures mécano-soudées soumises à un environnement mécanique complexe," 2006, Blaise Pascal – Clermont Ferrand II, 2006.
- [45] Boelher, J.P., & Raclin, J. 1985. Failure criteria for glass.fiber reinforced composite under confining pressure. *Journal of Structural Mechanics*, 13, 371–393.
- [46] Owen J, Patton JF, Manning KR, Case D. Serum lactate deshydrogenase and platelet count predict survival in thrombotic thrombocytopenic purpura. *Am J Hematol* 1994;47:94–9
- [47] J. M. Dally et D. H. Carillo, «Fatigue Behavior of Glass-Fiber Fortified Thermoplastics,» *Polymer Engineering and science*, vol. 9, n°16, p. 434, 1969.
- [48] S. Djekrif, A. Mihoubi, Etude comparative de la résistance du matériau composite Kevlar 49/époxyde, Mémoire d'Ingéniorat en Construction Mécanique, Université de Constantine 1, 2001.
- [49] SEHOUL MOHAMED (Etude du comportement mécanique des plaques Composite en utilisant des théories de déformations de cisaillement non- polynomiales) thèse de doctorat ; Université Djilali Liabes de Sidi Bel Abbés
- [50] ]Boelher, J.P., & Raclin, J. 1985. Failure criteria for glass.fiber reinforced composite under confining pressure. *Journal of Structural Mechanics*, 13, 371–393.
- [51] Chevalier, Y. 1991. Critères de rupture : Approche macroscopique. *Techniques de l'ingénieur. Plastiques et composites* ISSN 1762-8776, no A7755, A7755.1–A7755.16.R

- [52] J. RENARD : Fatigue des matériaux composites renforcés de fibres continues, juillet 2010.
- [53] Zeddour Mohamed Brahim Zahera, « PREDICTION DES MECANISMES D'ENDOMMAGEMENT DANS UN MATÉRIAU COMPOSITE » Thèse de Doctorat, USTO-MB (2017/2018).
- [54] Gbèssiho Raphaël Kinvi-Dossou. Étude de la résistance à l'impact et de l'endommagement des composites stratifiés à matrice Elium acrylique : caractérisation expérimentale et modélisation numérique multi-échelle. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Université de Lorraine, 2018. Français.
- [55] Irwin, G.R., "Analysis of Stresses and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 24, pp. 361-364, 1957.
- [56] Westergaard, H.M., "Bearing Pressures and Cracks," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 6, pp. A49-53, 1939.
- [57] Alan T. ZEHNDER Ph.D. Lecture Notes on Fracture Mechanics. Department of Theoretical and Applied Mechanics, Cornell University, Ithaca, NY 14853, 2009.
- [58] Pierre-Olivier BOUCHARD. Contribution à la modélisation numérique en mécanique de la rupture et structures multi-matériaux. Thèse de doctorat, École nationale supérieure des mines de paris, 2000.
- [59] M. (Michael) Janssen, Fracture mechanics, London, 2nd, 2004, 41 p. (ISBN 0-203-59686-2, OCLC 57491375 (<https://worldcat.org/fr/title/57491375>) (<https://www.worldcat.org/oclc/57491375>))
- [60] Qi B. (2006) Simulation numérique du comportement mécanique de composites à particules. Rapport de stage de master 2, École Centrale Paris, CEA.
- [61] [https://youtube.com/watch?v=1rdbKix\\_biw&si=rpMdn8F2eJJ81dY9](https://youtube.com/watch?v=1rdbKix_biw&si=rpMdn8F2eJJ81dY9)
- [62] ABAQUS Finite Element Program, ABAQUS/Standard 6.14.1. Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc. Pawtucket, USA, 2014