



Ministère de l'Enseignement Supérieure et de
La Recherche Scientifique



Université d'Oran-2- Mohamed Ben Ahmed
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle
Département de Maintenance en Electromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie industrielle

Spécialité : Maintenance – Fiabilité – Qualité

Thème

**Analyse numérique d'un comportement mécanique d'un ver en
Matériaux composites en présence d'un défaut sous une charge
statique**

Présenté et soutenu publiquement par :

BARBARA Sofiane

AZOUZ Mohammed

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	Examineur

2022-2023

REMERCIEMENTS

Nous remercions ALLAH tout puissant de nous avoir accordé volonté et patience dans l'accomplissement de ce travail.

Nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre professeur encadrant de mémoire de fin d'études : Mr « ACHACH Habib » pour ces précieux conseils et ses aides durant les études et la réalisation de ce travail.

Nous tenons aussi remercier les membres du jury Mr ADJELOUA Abdelaziz et Mm ABDI Ghezail qui ont fait l'honneur d'accepter de juger notre travail. Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail, comme preuve de respect, de gratitude, et de reconnaissance à :

*Nos chers parents : Qui n'ont jamais cessé de nous encourager et nous conseiller
Ils nous ont beaucoup aidé tout au long de notre chemin, grâce à leur amour, leur
dénouement, leur compréhension et leur patience sans jamais nous quitter des
yeux ni baisser les bras et leur soutien moral et matériel, on ne saurait jamais
traduire ce qu'on ressent vraiment envers eux.*

*Nos frères et sœurs : Pour leur indulgence en notre faveur qu'ils touchent ici
l'affection la plus intime qu'on ressent à leur égard.*

Nos amis et collègues : Pour leur compagnie et bons moments passés ensemble.

ملخص:

الهدف من هذه الرسالة هو دراسة تحليل تطور الضرر وتوزيع ضغوط Von Mises في مركب هجين VER (حجم أولي تمثيلي). يتكون هذا المركب من مصفوفة إيبوكسي متطابقة ، ولكن مع ألياف تقوية مختلفة ، وهي ألياف ألفا والألياف الزجاجية ، حددنا العديد من المعلمات كعوامل مهمة. على وجه الخصوص ، كنا مهتمين بزوايا الشق وكذلك ترتيب الألياف على كل جانب من جوانب الشق. قمنا بفحص تأثير هذه المعلمات على الضرر المركب وعلى توزيع الإجهاد. Von Mises.

باستخدام طريقة العناصر المحدودة وبرنامج Abaqes 6.14 ، تمكنا من الحصول على نتائج دقيقة حول تطور الضرر وتوزيع الضغوط في VER المركب الهجين. توفر هذه النتائج معلومات أساسية لفهم السلوك الميكانيكي لهذه المادة المركبة بشكل أفضل ويمكن أن تكون بمثابة أساس لتحسين تصميمها واستخدامها في تطبيقات مختلفة

Résumé :

L'objectif de ce mémoire est d'étudier l'analyse de l'évolution de l'endommagement et de la distribution des contraintes de Von Mises dans un composite hybride VER (volume élémentaire représentatif). Ce composite est constitué d'une matrice époxy identique, mais avec des fibres de renfort différentes, à savoir la fibre alpha et la fibre de verre, nous avons identifié plusieurs paramètres comme des facteurs importants. En particulier, nous nous sommes intéressés à l'angle de la fissure ainsi qu'à la disposition des fibres de chaque côté de la fente. Nous avons examiné l'effet de ces paramètres sur l'endommagement du composite et sur la distribution des contraintes de Von Mises

En utilisant la méthode des éléments finis et le logiciel Abaqes 6.14, nous avons pu obtenir des résultats précis sur l'évolution des dommages et la distribution des contraintes dans le composite hybride VER. Ces résultats fournissent des informations essentielles pour mieux comprendre le comportement mécanique de ce matériau composite et peuvent servir de, base pour améliorer sa conception et son utilisation dans différentes applications.

Abstract:

The objective of this thesis is to study the analysis of the evolution of the damage and the distribution of the Von Misses stresses in a hybrid composite VER (representative elementary volume). This composite is made of an identical epoxy matrix, but with different reinforcing fibers, namely alpha fiber and glass fiber, we have identified several parameters as important factors. In particular, we were interested in the angle of the crack as well as the arrangement of the fibers on each side of the crack. We examined the effect of these parameters on composite damage and on the Von Misses stress distribution.

By using the finite element method and the Abaqes 6.14 software, we were able to obtain precise results on the evolution of the damage and the distribution of the stresses in the hybrid composite VER. These results provide essential information to better understand the mechanical behavior of this composite material and can serve as a basis for improving its design and use in different applications.

Table des matières

Table des matières

Introduction générale	1
CHAPITRE I : Généralités sur les matériaux composites	4
I.1.Introduction	4
I.2.Définition	4
I.3.Classification des matériaux composites	4
I.3.1.Classification en fonction des natures des matrices	4
I.3.2.Classification selon la forme des constituants	5
I.3.3.Classification selon leurs performances et leurs couts	6
I.4. Les constituants des matériaux composites	7
I.4.1. Le renfort	7
I.4.2.La matrice	13
I.4.3.Les charges et les additif	14
I.4.4.L'interface	15
I.5. Structures des matériaux composites	16
I.5.1. Monocouches	16
I.5.2.Stratifiés	16
I.5.3.Sandwichs	18
I.6.Procédés d'élaborations	18
I.6.1.Moulage au contact	18
I.6.1.1.Principe	18
I.6.2. Moulage par projection simultanée	19
I.6.3. Moulage sous vide	20
I.6.4.Moulage par projection de résine	20
I.6.5.Moulage par centrifugation	21
I.7.Technologie de la mise en œuvre	22
I.8.Domaines d'utilisation des matériaux composites	23
I.9.Les avantages et les inconvénients des matériaux composites	24
I.9.1.Les avantages	24
I.9.2.Les inconvénients	24

Table des matières

Chapitre II: Endommagement Des Volumes élémentaire représentatifs En matériaux composites	26
II.1.Introduction	26
II.2.La définition d'un VER	26
II.3.Généralités sur la technique d'homogénéisation	31
II.4.Généralité sur la mécanique de la rupture	33
II.4.1.Définition La mécanique de la rupture	33
II.4.2.Types de rupture	34
II.4.3.Modes de rupture	34
II.5.Endommagement des matériaux composites	35
II.5.1.Mécanismes d'endommagement	36
II.5.2.Technique de détection l'endommagement	38
II.6. Comportement mécanique des matériaux composites	41
II.6.1. .Eléments sur la mécanique des matériaux	41
II.6.2.Conséquences sur l'étude du comportement mécanique des matériaux composites	46
Chapitre III : Comportement en Rupture d'un VER en Présence d'un Défaut.....	48
III.1.Introduction	48
III.2.Modèle géométrique	48
III.3.Maillage	49
III.4.Résultats et discussions	50
III.4.1.Variation du facteur d'intensité de contraintes K_I K_{II} K_{III}	50
III.4.2. L'effet l'angle d'orientation de la fissure sur FIC K_I	54
III.4.3. L'effet de la position des fibres par rapport à la fissure sur le FIC K_I	54
III.4.4.La distribution de la contrainte de Von Mises équivalente	56
Conclusion générale	59
Références Bibliographiques.....	61

Liste des figures

Figure I.1 : Classification des matériaux composites.....	5
Figure I.2 : Constituants d'un matériau composite.....	7
Figure I.3 : Types de renfort.....	8
Figure I.4 : Fibre de verre.....	9
Figure I.5 : Fibre de carbone.....	11
Figure I.6 : Fibre d'aramide.....	12
Figure I.7 : Organigramme des principaux matériaux des matrices.....	14
Figure I.8 : Composite monocouche.....	16
Figure I.9 : Composite stratifié.....	17
Figure I.10 : Exemples de stratifiés à base de plis unidirectionnels. Les nombres entre crochets désignent l'angle de chaque pli (en degrés) par rapport à une direction de référence....	17
Figure I.11 : Composite sandwich.....	18
Figure I.12 : Principe du moulage au contact.....	19
Figure I.13 : Principe du moulage par projection simultanée.....	19
Figure I.14 : Moulage sous vide.....	20
Figure I.15 : Principe de moulage par injection de résine.....	21
Figure I.16 : Principe de moulage par centrifugation.....	22
Figure I.17 : Organigramme de l'opération de moulage.....	23
Figure I.18 : Exemple d'application composite dans l'aéronautique, l'automobile, L'aérospatial et le bâtiment.....	24

Liste des figures

Figure II.1 : Variation du module d'Young effectif moyen et de l'erreur en fonction de la taille du <i>VER</i>	28
Figure II.2 : Vérification de l'indépendance des conditions aux limites avec l'augmentation du volume de contrôle.....	29
Figure II.3 : Valeurs moyennes et intervalles de confiance du module de compressibilité Kapp en fonction de la taille de <i>VER</i>	30
Figure II.4 : P Principe de l'approche d'homogénéisation des matériaux hétérogènes.....	33
Figure II.5 : Approche et principe de l'homogénéisation numérique.....	33
Figure II.6 : Exemple de <i>VER</i> d'une microstructure hétérogène.....	34
Figure II.7 : Mode I : ouverture.....	35
Figure II.8 : Mode II : glissement dans le plan.....	36
Figure II.9 : Mode III : glissement antiplan.....	36
Figure II.10 : Principaux endommagements rencontrés dans un matériau composite.....	37
Figure II.11 : Les différents modes de ruine d'un composite: (1) Décohésion interrassiale (2) Fissuration de la fibre (3) Fissuration longitudinale-et (4) Fissuration transversale- de la matrice.....	38
Figure II.12 : a) Schéma de projection des endommagements sur le plan.....	40
b) Image obtenu par rayons X.....	40
Figure II.13 : Schéma du montage de l'émission acoustique.....	41
Figure II.14 : Fonctionnement d'un réseau de Bragg.....	42
Figure II.14 : Fonctionnement d'un réseau de Bragg.....	43
Figure II.16 : Changement de base.....	46

Liste des figures

Figure III.1 : Modèle géométrique.....	49
Figure III.2 : Maillage.....	49
Figure III.3 : Variation des facteurs d'intensités de contraintes K_I , K_{II} et K_{III} en fonction de la largeur du VER pour les deux fonds de fissure et pour l'angle d'orientation de la fissure ($\alpha=0^\circ$) ainsi que les différentes positions des fibres par rapport à la fissure.....	51
Figure III.4 : Variation du facteur d'intensité de contraintes K_I en fonction de nombre des éléments analysés par rapport à la largeur du VER pour chaque orientation de la fissure ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=30^\circ$, $\alpha=45^\circ$, $\alpha=70^\circ$ et $\alpha=90^\circ$.) et pour différents matériaux considérés (Alfa-alfa/époxy, Alfa-verre/époxy, Verre-alfa/époxy et Verre-verre/époxy).....	53
Figure III.5: Variation du facteur d'intensité de contraintes K_I en fonction de la largeur du VER pour chaque matériaux considérés (Alfa-alfa/époxy, Alfa-verre/époxy, Verre-alfa/époxy et Verre-verre/époxy) et pour différents angles d'orientation de la fissure ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=30^\circ$, $\alpha=45^\circ$, $\alpha=70^\circ$ et $\alpha=90^\circ$.)	55
Figure III.6 : Variation de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction l'orientation de la fissure ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=30^\circ$, $\alpha=45^\circ$, $\alpha=70^\circ$ et $\alpha=90^\circ$.) suivant l'axe X pour les différentes positions des fibres alfa et verre.....	56
Figure III.7: Variation de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction l'orientation de la fissure ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=30^\circ$, $\alpha=45^\circ$, $\alpha=70^\circ$ et $\alpha=90^\circ$.) suivant l'axe Y pour les différentes positions des fibres alfa et verre.....	57
Figure III.8: Variation de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction l'orientation de la fissure ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=30^\circ$, $\alpha=45^\circ$, $\alpha=70^\circ$ et $\alpha=90^\circ$.) suivant l'axe Z pour les différentes positions des fibres alfa et verre.....	58

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Différents types de verres filable.....	9
Tableau I.2 : Caractéristiques mécaniques des verres types E, A, R, S et D.....	10
Tableau I.3 : Les caractéristiques moyennes des renforts.....	13
Tableau III.1 : Propriétés mécaniques des matériaux.....	48

Liste des symboles et abréviations

Liste des symboles et abréviations

f_m : Fraction volumique de la matrice

f_i : Fraction volumique de l'inclusion

x : Point matériel

u : Vecteur de déplacement

V : Domaine (où cellule)

∂V : Contour du domaine

δ_{ij} : Opérateur de Kronecker

$\langle \cdot \rangle$: Opérateur moyen

b_i : Les forces internes du corps solide

T_i : Les trois vecteurs associés aux trois plans perpendiculaires

$\sigma_{ij} = \sigma$: Tenseur de contrainte du second ordre symétrique

$\varepsilon_{ij} = \varepsilon$: Tenseur de déformation du second ordre symétrique

ω_{ij} : Tenseur de rotation antisymétrique

$\tilde{\sigma}_{ij}$ Et $\tilde{\varepsilon}_{ij}$: désigner les fluctuations micro-échelle

E : Module de Young

ν : Coefficient de Poisson

μ : Module de cisaillement

k_1, k_2 : Modules de compressibilités (Bulk) pour les deux phases (matrice + inclusion)

μ_1, μ_2 : Modules de cisaillement (Shear) pour les deux phases (matrice + inclusion)

f_1, f_2 : Fractions volumiques pour les deux phases. Les signes + et - : désignent les bornes respectivement supérieures et inférieures

Liste des symboles et abréviations

E_m et E_i : sont le tenseur élastique de la matrice et l'inclusion

l : La taille d'une cellule (carrée ou cubique)

r : La taille d'une particule (rayon)

r_1 et r_2 : Les tailles d'une ellipse

[.] : Symbole de matrice

{.} : Symbole de vecteur

VER : Volume Élémentaire Représentatif

PBC : Conditions aux limites périodiques

FIK : Facteur d'intensité de contrainte

Introduction générale

Le lancement des grands programmes technologiques (spatial, nucléaire, électronique, ..) et l'évolution du marché des matières premières ont amenés au constat que les matériaux traditionnels avaient atteint leurs limites. La recherche de performances techniques alliées au besoin d'optimisation, telle que la modification des fréquences naturelles de structures afin d'assurer leur sécurité en cas de vibrations dangereuses, et d'allègement a également motivé la conception et l'utilisation de matériaux spécifiques adaptés à la solution technologique des problèmes à résoudre. Ainsi des matériaux renforcés à hétérogénéité de structure maîtrisée appelés matériaux composites se sont développés.

Grâce à d'excellentes propriétés mécaniques spécifiques, légèreté, bonne résistance chimique et meilleure tenue en fatigue, l'utilisation des matériaux composites s'est rependue dans différents secteurs industriels, en particulier le secteur aéronautique. En outre, la progression rapide des techniques de mise en forme des matériaux composites a contribué largement à leurs croissances à l'échelle mondiale.

Généralement un matériau dit composite est un matériau multi-phasé qualifié d'une combinaison d'au moins deux éléments, qui sont fréquemment une matrice et des inclusions qu'on appelle aussi le renfort, ces derniers peuvent être des fibres, des particules ou encore des vides appelés également pores.

L'endommagement des matériaux est un domaine de recherche essentiel pour comprendre les processus de dégradation et de défaillance qui peuvent survenir lorsqu'un matériau est soumis à des contraintes mécaniques. L'analyse de l'endommagement à l'échelle du Volume Élémentaire Représentatif (VER) permet d'approfondir notre compréhension des mécanismes d'endommagement et de développer des stratégies pour améliorer la résistance et la durabilité des matériaux.

C'est dans ce cadre que s'est inscrit thème de master qu'étude l'analyse numérique d'un comportement mécanique d'un ver en matériaux composites en présence d'un défaut sous une charge statique.

Introduction générale

Pour mener à bien ce travail, nous avons jugé utile de diviser ce mémoire en trois chapitres:

Le premier chapitre présente de façon générale les matériaux composites, leurs constituants, les familles des composites et ses classifications, ainsi, le domaine d'utilisation, les avantages et les inconvénients.

Le second chapitre nous présente l'endommagement de VER En Matériaux Composites, commençant par définition de la notion du volume élémentaire représentatif, ainsi, la technique d'homogénéisation, la mécanique rupture et l'endommagement des composites, et le comportement mécanique.

Le troisième chapitre est consacré à une étude sur le Comportement en Rupture d'un VER en Présence d'un Défaut.



CHAPITRE I
GENERALITES SUR LES
MATERIAUX
COMPOSITES

CHAPITRE I : Généralités sur les matériaux composites**I.1.Introduction:**

Les matériaux composites sont des matériaux à très hautes performances mécaniques, qui peuvent être façonnés à volonté au gré du concepteur, de manière à obtenir les propriétés souhaitées en faisant un choix approprié des constituants. Ainsi, la possibilité de façonner à la carte les matériaux composites modifie considérablement l'approche conventionnelle du dimensionnement des structures habituellement utilisée pour les matériaux traditionnels. Les matériaux composites se développent aujourd'hui dans pratiquement tous les domaines et sont à l'origine de formidables challenges dans diverses réalisations de hautes technologies.

I.2.Définition:

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes. Leur association est complémentaire et permet d'aboutir à un matériau dont les performances recherchées seront supérieures à celles des composants pris séparément.[1] Un matériau composite est constitué dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue, appelée renfort ou matériau renforçant, est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue appelée matrice.[2]

I.3.Classification des matériaux composites :**I.3.1.Classification en fonction des natures des matrices:**

En fonction de la nature de matrice, les matériaux composites sont classés en trois grandes familles :

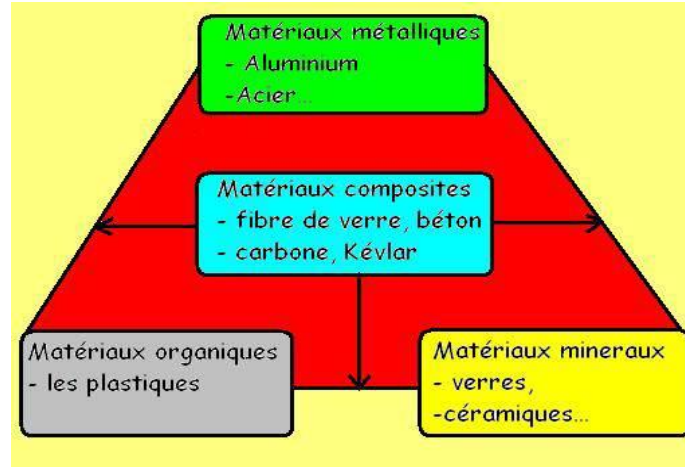


Figure I.1:Classification des matériaux composites

I.3.1.1. Les composites à matrices polymère ou organique (CMO) :

Telles que les polymères Organiques (résine thermodurcissable ou thermoplastique) ; qui constituent, de loin Les volumes les plus importants aujourd'hui à l'échelle industrielle. [3]

I.3.1.2. Les composites à matrices céramiques (CMC) :

Réservés aux applications de très haute Technicité et travaillant à haute température comme dans les domaines spatial, nucléaire et Militaire, ainsi que le freinage.[4]

I.3.1.3. Les composites à matrices métalliques (CMM) :

Ces matériaux peuvent aussi être Classés selon la nature du renfort. Les composites trouvent leurs principales applications dans le transport aérien, Maritime, ferroviaire, le bâtiment, l'aérospatial ainsi que les sports et loisirs, notamment grâce à leur bonne tenue mécanique comparable aux matériaux homogènes, plus résistants que l'acier et plus légers que l'aluminium. Les composites sont souvent désignés selon le type de renfort.

Ainsi, il existe des particules, des composites sandwichs, des composites à phases dispersée sou encore des composites fibreux. [3]

I.3.2. Classification selon la forme des constituants :

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

I.3.2.1.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 la 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.[5]

I.3.2.2.Composite à particules :

Les renforts se trouvent sous formes de particules. Les particules au contraire des fibres ne possèdent pas de dimensions précise ou privilégiée.

Ils sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait, etc.[5]

I.3.3.Classification selon leurs performances et leurs couts:**I.3.3.1.Composite de Grande Diffusion GD :**

Les matériaux composites à grande diffusion offrent des avantages essentiels, qui sont : Optimisation des coûts par diminution des prix de revient, sa composition de polyester avec des fibres de verre longues ou courtes (sous forme de mat ou tissu) et la simplicité du principe des matériaux (moulage par contact, SMC et injection).[6]

I.3.3.2.Composite de Haute Performance HP :

Les matériaux composites à hautes performances sont utilisés dans le domaine d'aéronautique où le besoin d'une grande performance déduite des hautes valeurs ajoutées. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%. Ces composites sont élaborés par les procédures suivantes :

- drapage autoclave, enroulement filamentaire, RTM.
- beaucoup de procédés encore manuels.[7]

I.4. Les constituants des matériaux composites :

Les principaux constituants sont un renfort, une matrice, une interface et la charge

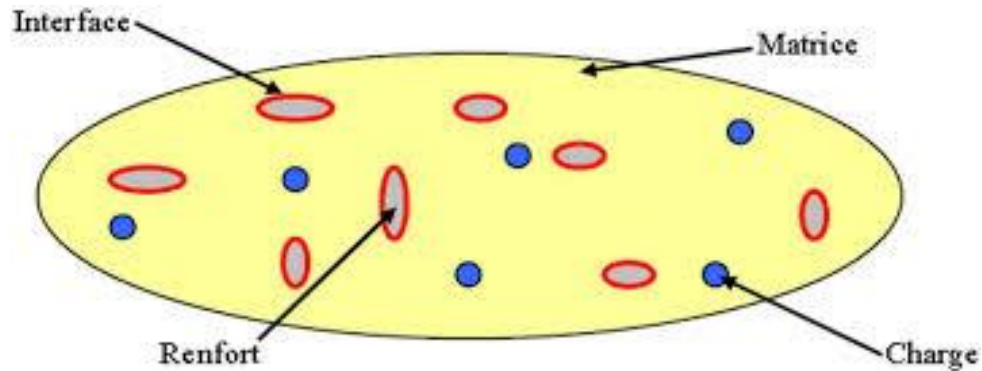


Figure I.2 : Constituants d'un matériau composite[8]

I.4.1. Le renfort :

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite et un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes :

- Linéique (fils, mèches)
- Tissus surfaciques (tissus, mats)
- Multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus). [9]

La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la figure I.3 :

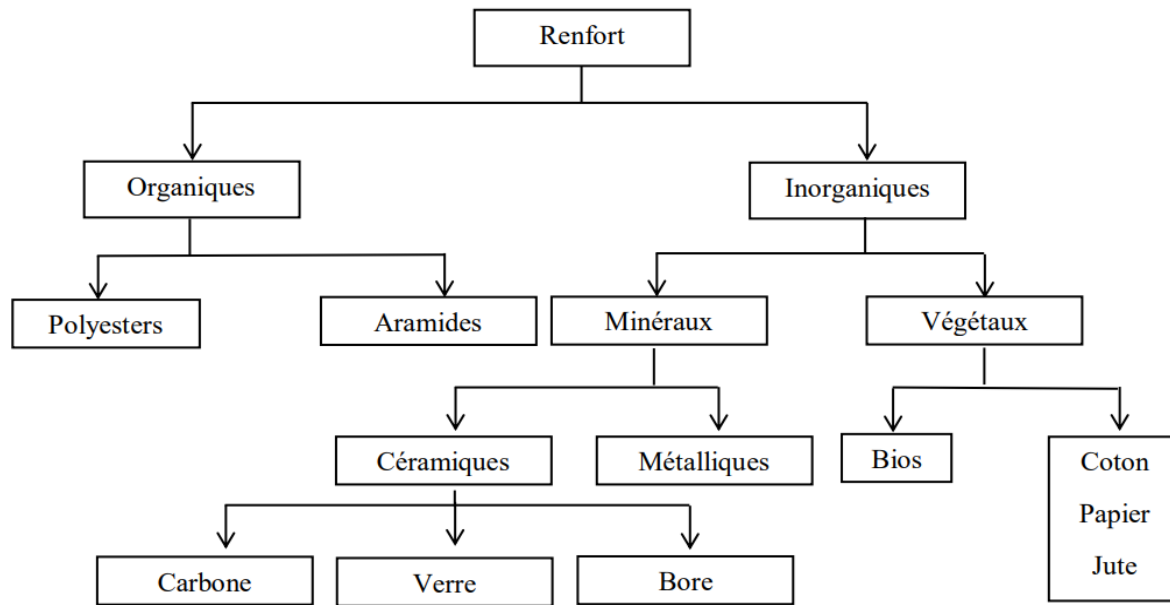


Figure I.3 : Types de renfort.[9]

I.4.1.1 Les principales fibres :

I.4.1.1.1 Fibre de verre :

Les fibres de verre sont très répandues dans des applications basses performances ainsi que des applications hautes performances telles que les réservoirs de propulseurs de fusée. Elles sont caractérisées par une résistance supérieure à celles des meilleurs aciers connus. Leurs avantages incluent prix compétitif du fait qu’elles sont élaborées à partir de silice, alumine, chaux, magnésie; produits peu coûteux. Les fibres de verre sont obtenues par une technique d’élaboration se déclinant en quatre (04) étapes principales. Pendant la première étape, appelée l’affinage, la composition est chauffée jusqu’à 1500.C pour que les bulles et impuretés disparaissent. Durant la deuxième étape, appelée l’étirage, il s’agit d’étirer à grande vitesse le verre en fusion qui se transforme alors en filament. Ce fil de verre se bobine ensuite autour d’une broche. La troisième étape est l’ensimage. Elle consiste à ajouter un revêtement protecteur pour permettre l’agglomération des filaments et faciliter leur intégration dans les polymères. Au cours de cette étape, les fils sont coupés ou bobinés selon le besoin. Enfin durant la dernière étape

appelée le séchage, les fils sont maintenus à des températures comprises entre 600 et 700 C°. [10]



Figure I.4 : Fibre de verre. [11]

Il existe différents types de verres : le verre E, C, D, R ou S, de différentes propriétés dues à la différence de la composition du mélange de préparation.

Les verres de type E constituent la presque totalité du tonnage de verre textile produit actuellement.

Tableau 1 : Différents types de verres filable. [12]

Type	Caractéristiques générales
E	à usage général ; bonnes propriétés électriques
D	hautes propriétés diélectriques
A	haute teneur en alcali
R, S	haute résistance mécanique

Tableau 2 : Caractéristiques mécaniques des verres types E, A, R, S et D[12]

Caractéristiques	Verre E	Verre A	Verre R ou S	Verre D
Masse volumique (kg/m ³)	2540	2460	2550	2160
Module d'Young (GPa)	72000	71000	86000	55000
Contrainte à la rupture(MPa)	3500	3100	4500	2500
Allongement à la rupture(%)	4.4	–	–	5.2

I.4.1.1.1. Les avantages et les inconvénients des fibres de verre :**I.4.1.1.1.1. Les avantages :**

- Haute résistance à la traction et à la compression.
- Faible coût par rapport à d'autres fibres.
- Haute résistance chimiques.
- Haute résistance au feu.

I.4.1.1.1.2. Les inconvénients :

- Module d'élasticité réduite.
- Haute densité.
- Sensibilité à l'abrasion.
- Sensibilité aux températures élevées.
- Faible résistance à la fatigue

I.4.1.2. Fibre 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 précurseurs utilisées sont des fibres acryliques élaborées à partir du polyacrylonitrile (PAN). La qualité des fibres de carbone finales dépend fortement des qualités du précurseur. [10]

Le principe d'élaboration est de faire subir aux fibres acryliques une décomposition thermique sans fusion des fibres aboutissant à une graphitassions. Le brai qui est un résidu de raffinerie issu du pétrole ou de la houille est également utilisé pour produire des fibres de carbone.



Figure I.5 : Fibre de carbone [11]

I.4.1.2.1. Les avantages et les inconvénients des fibres de carbone :

I.4.1.2.1.1. Les avantages :

- faible densité.
- Haute résistance à la traction.
- Haut module d'élasticité longitudinal.
- haute conductivité électrique.

I.4.1.2.1.2. Les inconvénients :

- Réduction de la résistance au choc.
- Faible résistance à la compression

I.4.1.3. Fibre d'aramide :

Souvent appelée KEVLAR, la fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques à liaisons amides dont les propriétés sont différentes des polyamides aliphatiques. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes [13]:

- Les fibres bas module (70 GPa): utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles.
- Les fibre haute module (130 GPa): utilisées pour les composites HP.



Figure I.6 : Fibre d'aramide. [12]

I.4.1.4.Fibre céramique :

Les matériaux composites de type céramiques sont souvent constitués de renforts et de matrice en céramique. Les fibres sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Ces fibres sont rencontrées dans des applications où la température est très élevée entre 500°C et 2 000°C. Ces matériaux sont utilisés notamment dans les parties chaudes des moteurs d'avions. Quelques exemples de fibres céramiques :

- fibres de Carbure de Silicium
- fibres de Bore
- fibres de Bore carbure de silicium

I.4.1.5.Fibre de bore :

Fibres de haut module et insensibles à l'oxydation à hautes températures, elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène. [14]

I.4.1.6.Fibre de silice (ou de quartz) :

Elles sont produites comme le verre, par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique dans les tuyères pour moteur de fusée. [14]

I.4.1.7. Fibres de polyéthylène de haut module :

Elles présentent une très bonne résistance à la traction mais une mauvaise mouillabilité. Pour des structures peu sollicités, on peut encore utiliser des fibres synthétiques courantes de polyamide ou polyester. [14]

I.4.1.2 les Caractéristiques des renforts :

Tableau (I-3) : Les caractéristiques moyennes des renforts.[14]

Renforts Caractéristiques	Verre E	Verre R	Carbone HM	Carbone HR	Kevlar	Bore	Silicate d'alumine	Polyéthylène
Diamètre du filament (μm)	16	10	6.5	7	12	100	10	/
Masse volumique (Kg/m^3)	2600	2500	1800	1750	1450	2600	2600	960
Module d'élasticité longitudinal (MPa)	74000	86000	390000	230000	130000	400000	200000	100000
Module de cisaillement (MPa)	30000	/	20000	50000	12000	/	/	/
Coefficient de poisson	0.25	0.2	0.35	0.3	0.4	/	/	/
Coefficient de dilatation thermique ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)* 10^5	0.5	0.3	0.08	0.02	-0.2	0.4	/	/
Contraintes de rupture - Traction (MPa)	2500	3200	2500	3200	2900	3400	3000	3000
Allongement à rupture(%)	3.5	4	0.6	1.3	2.3	0.8	1.5	/

I.4.2. La matrice :

La matrice constitue l'élément de liaison entre les divers éléments constitutifs et donne la forme voulue au produit réalisé. Elle assure également une protection chimique. Les matrices doivent présenter une bonne compatibilité avec le renfort. En outre, elles doivent avoir une masse volumique faible de manière à permettre aux matériaux composites de conserver ces caractéristiques mécaniques spécifiques élevées. [15]

On distingue deux grandes familles de matrice (Figure I.7)

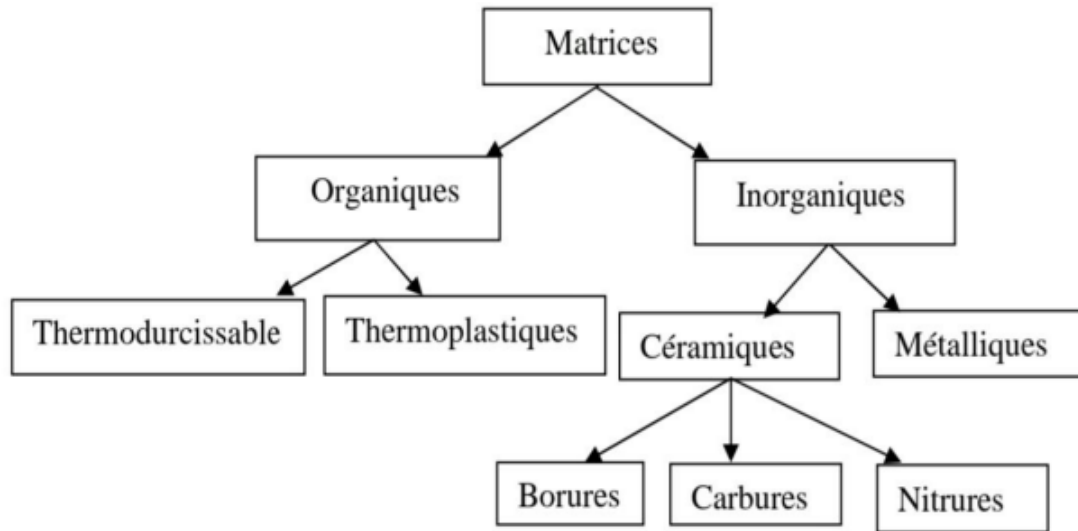


Figure I.7 : Organigramme des principaux matériaux des matrices

Il y a deux familles de résines organiques : les résinés thermoplastiques et les résinés thermodurcissables.

I.4.2.1. Résines thermodurcissables :

Les résines thermodurcissables sont des polymères, qui, après un traitement thermique ou physico-chimique (catalyseur, durcisseur), se transforment en des produits infusibles et insolubles. Ces résines ont donc la particularité de ne pouvoir être mises en forme qu'une seule fois. [10]

I.4.2.2 Résines thermoplastiques :

Les résines thermoplastiques sont des solides généralement solubles, formés de chaînes distinctes bien compactées, liées entre elles par des seules liaisons secondaires (force de van der Waals, liaisons d'hydrogène) et mis en forme par chauffage et refroidissement . [16]

I.4.3. Les charges et les additif :

Les charges et les additifs sont utilisés pour améliorer les caractéristiques mécaniques et physiques et pour faciliter la mise en œuvre.

I.4.3.1.Les charges:**I.4.3.1.1.Charges renforçantes**

L'objet de l'incorporation de charges renforçantes est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine. Ces charges peuvent être classées suivant leur forme géométrique en :

- Charges sphériques.
- Charges non sphériques.[5]

I.4.3.1.2.Charges non renforçantes :

Les charges non renforçantes ont pour rôle soit de diminuer le coût des résines en conservant les performances des résines, soit d'améliorer certaines propriétés des résines. Parmi ces classes on trouve :

- Charges de faible coût.
- Charges ignifugeantes.
- Charges conductrices et antistatiques. .[5]

I.4.3.2.Les additifs :

Les additifs, se trouvent en faible quantité et interviennent comme :

- Lubrifiants et agents de démoulage.
- Pigments et colorants.
- Agents anti-retraits.
- Agents anti-ultraviolets.

I.4.4.L'interface :

L'utilisation d'une couche interface permet d'assurer la compatibilité entre le renfort et la matrice. Qui se forme spontanément lorsque deux phase sont mises en présence l'un de l'autre au moment de l'élaboration du matériau et qui se maintient entre ces deux phases pendant toute la vie du matériau, l'interface n'est pas simplement une simple discontinuité entre les deux phases du matériau hétérogène ou leur juxtaposition. [1]

I.5. Structures des matériaux composites :

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

- Les monocouches
- Les stratifiées
- Les sandwiches

I.5.1. Monocouches :

Représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes.[17]

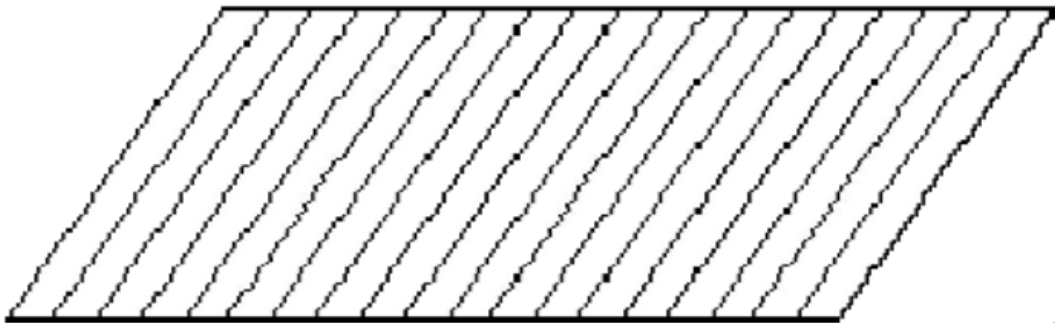
**Pli UD**

Figure I.8 : Composite monocouche.[17]

I.5.2.Stratifiés :

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié. Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques.[18]

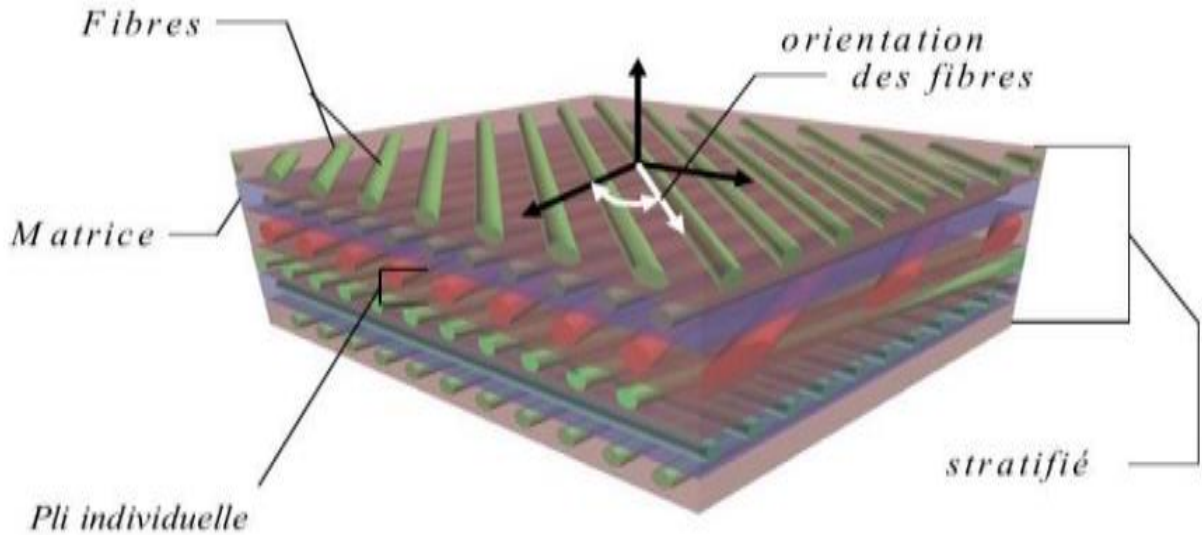


Figure I.9 : Composite stratifié.[19]

Notation " composite " : Un stratifié possédant l'empilement $(0, +45, +90, -45)_2s$ est un stratifié avec 4 couches dans les directions $0^\circ, -45^\circ, 90^\circ$ et $+45^\circ$, l'orientation 0° coïncidant avec la direction 1 du repère principal du composite. Ces plans seront répartis symétriquement par rapport au plan moyen du stratifié.

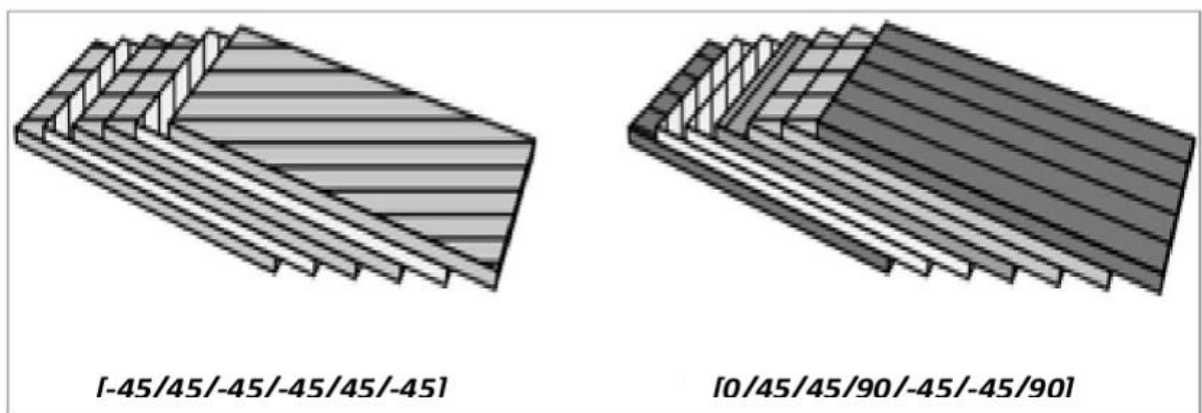


Figure I.10 : Exemples de stratifiés à base de plis unidirectionnels. Les nombres entre crochets désignent l'angle de chaque pli (en degrés) par rapport à une direction de référence.[1]

On pourra avoir des stratifiés de type :

1. Équilibre : stratifié comportant autant de couches orientées suivant la direction $+\theta$ que de couches orientées suivant la direction $-\theta$.

2. Symétrique : stratifié comportant des couches disposées symétriquement par rapport à un plan moyen.

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

I.5.3.Sandwichs :

Matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou cœur) de forte épaisseur et faible résistance. L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une grande légèreté en flexion et c'est un excellent isolant thermique.

$$10 \leq e_c / e_p \leq 100$$

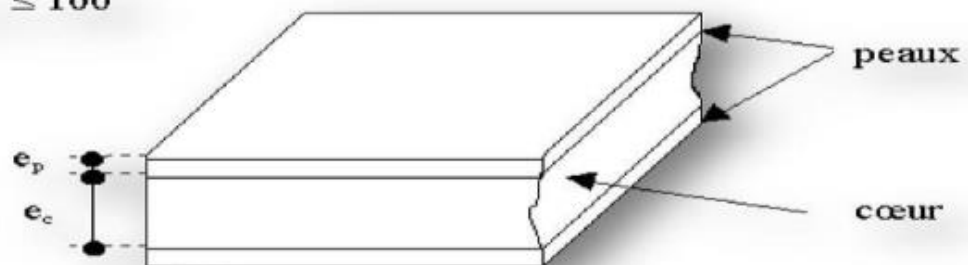


Figure I.11 : Composite sandwichs. [20]

I.6.Procédés d'élaborations :

La plupart des méthodes de mise en œuvre consistent à élaborer les pièces en matériaux composites par couches successives comportant matrice et renfort.[5]

I.6.1.Moulage au contact:

I.6.1.1.Principe :

Procédé manuel pour la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression. Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détournée. [21]

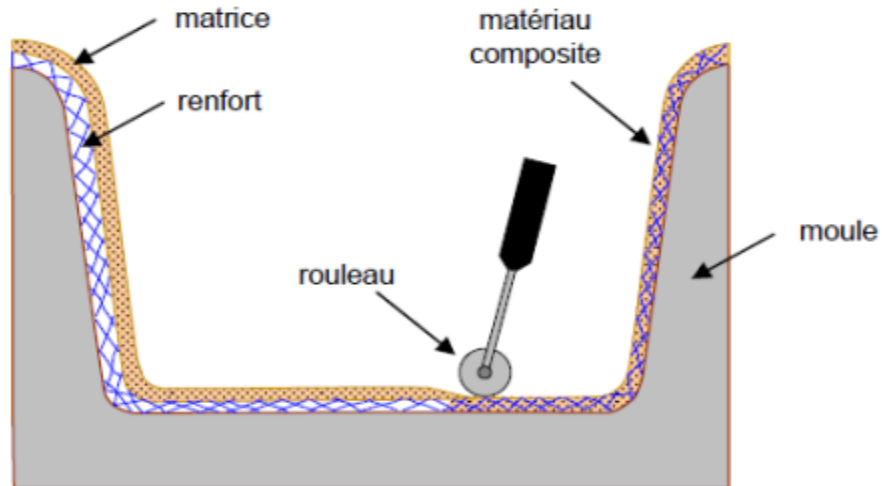


Figure I.12 : Principe du moulage au contact .[5]

I.6.2. Moulage par projection simultanée :

I.6.2.1.Principe :

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

- Un dispositif de coupe - projection du renfort (fibre).
- Un ou deux pistolets projetant simultanément la résine.[21]

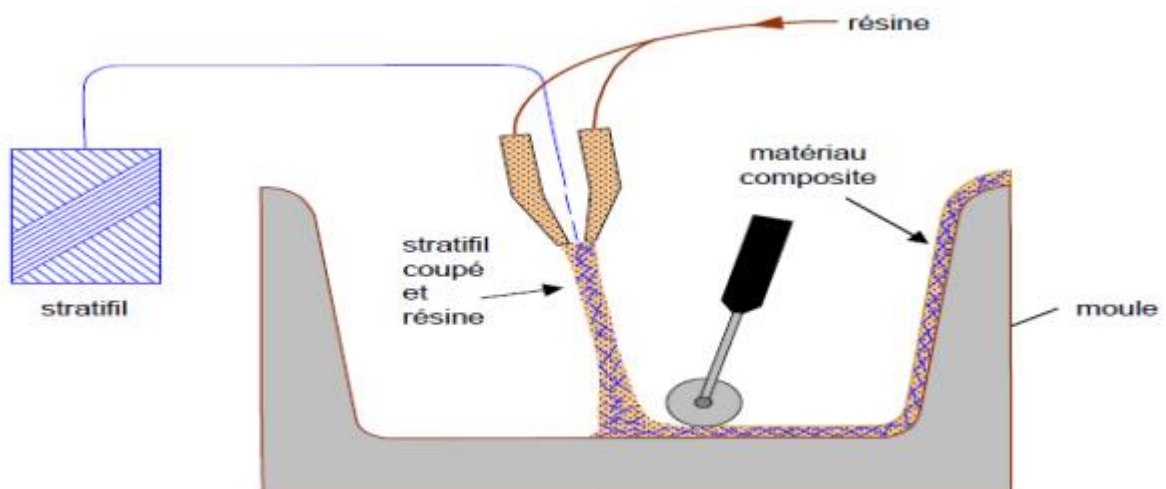


Figure I.13: Principe du moulage par projection simultanée.[5]

I.6.3. Moulage sous vide:

I.6.3.1.Principe :

Le moulage sous vide s’effectue entre moule et contre moule rigide, semi-rigide ou souple suivant la technologie de mis en œuvre.

Le renfort est placé à l’intérieur du moule ; la résine catalysée est versée sur le renfort. On utilise la pression qui s’exerce sur le moule lors de la mise sous vide pour répartir la résine et imprégner le renfort.

La résine peut également être injectée par l’aspiration consécutive au vide. [21]

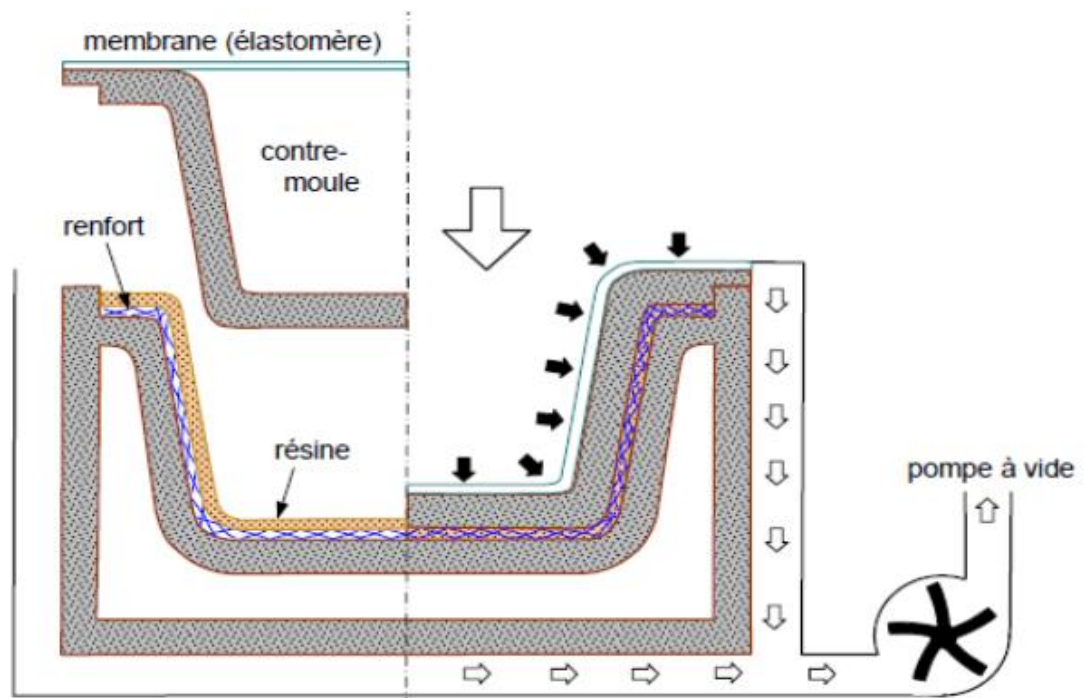


Figure I.14: Moulage sous vide.[5]

I.6.4.Moulage par projection de résine :

I.6.4.1.Principe :

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

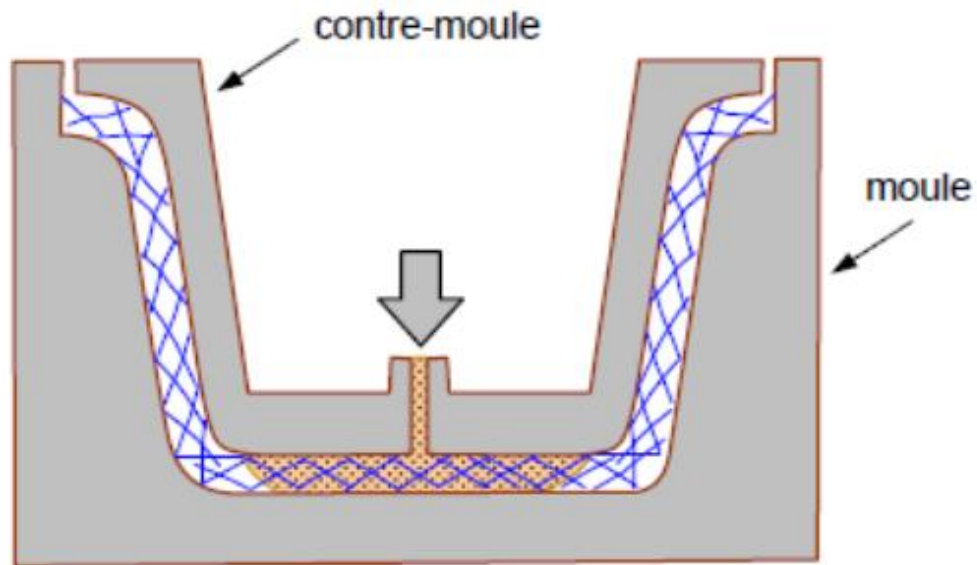


Figure I.15 : Principe de moulage par injection de résine.[5]

I.6.5.Moulage par centrifugation:

I.6.5.1.Principe :

Procédé de moulage limité aux enveloppes cylindriques. Le renfort (fibres longues coupées) et la résine sont déposés dans un moule cylindrique chauffé tournant à grande Vitesse.[21]

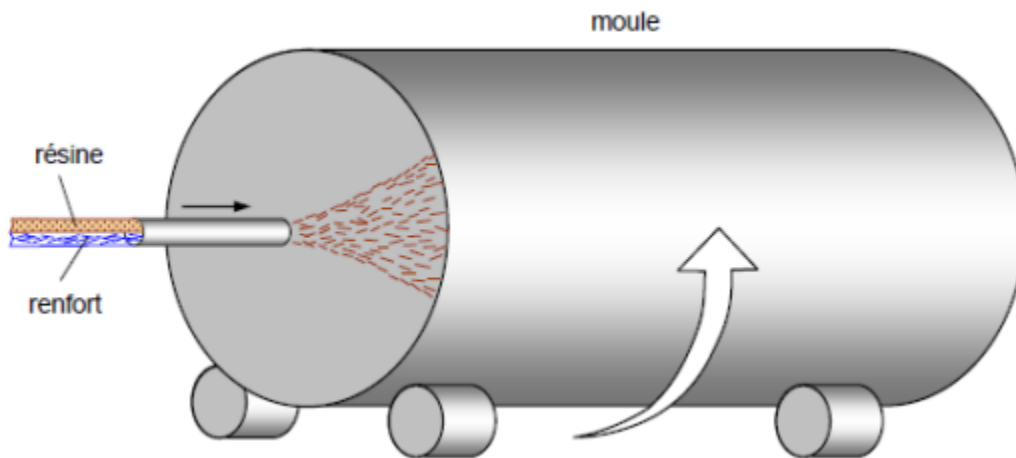


Figure I.16 : Principe de moulage par centrifugation.[5]

I.7. Technologie de la mise en œuvre :

Trois opérations sont indispensables :

1. Imprégnation du renfort par le système résineux.
2. Mise en forme à la géométrie de la pièce.
3. Durcissement du système :
 - soit par polycondensation et réticulation pour les matrices thermodurcissables.
 - soit par simple refroidissement pour les matières thermoplastiques.

Il existe différentes techniques, mais la plus utilisée est par moulage.

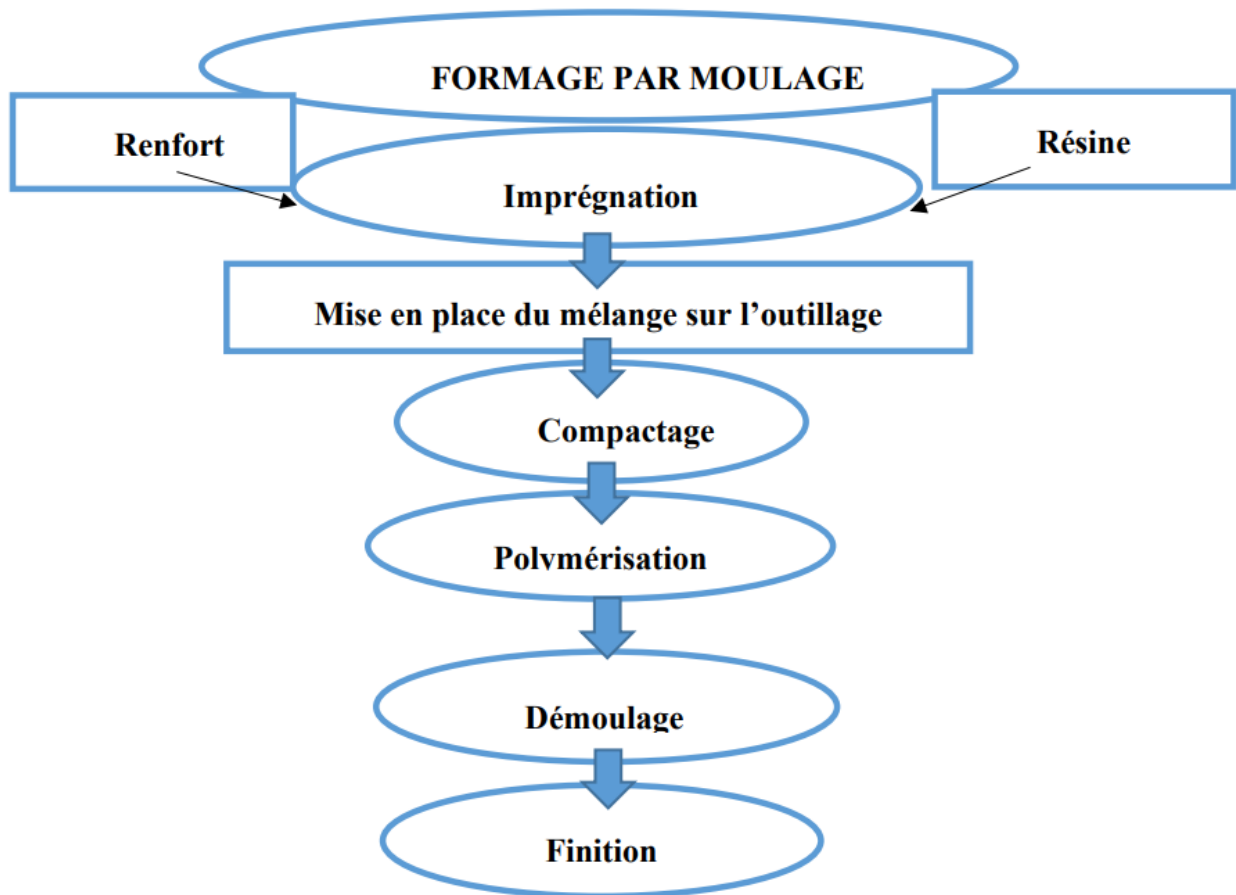


Figure I.17 : Organigramme de l'opération de moulage. [22]

I.8. Domaines d'utilisation des matériaux composites

Les matériaux composites de nos jours prennent une place prépondérante dans différents domaines de par leur simplicité d'élaboration, leur légèreté ainsi que leurs caractéristiques mécaniques. Contrairement aux matériaux classiques qui présentent des caractéristiques mécaniques intrinsèques, les matériaux composites peuvent répondre aux exigences des différents types de contraintes à partir d'une élaboration et d'un choix judicieux de matrice et renfort, et ceci, dans différents domaines. [22]

Les matériaux composites ont été introduits progressivement dans les automobiles, à la suite des matériaux polymères dont certains sont utilisés comme matrices.

De nos jours, les matériaux composites ont pris une place importante dans divers domaines : aéronautique, transport, bâtiment, loisirs, etc. Du point de vue écologique, les fibres naturelles utilisées comme renforts dans les composites prennent une place croissante et sont de nouveau d'actualité.



Figure I.18 : Exemple d'application composite dans l'aéronautique, l'automobile, L'aérospatial et le bâtiment. [23]

I.9. Les avantages et les inconvénients des matériaux composites :**I.9.1. Les avantages :**

Les composites sont préférés à d'autres matériaux parce qu'ils offrent des atouts liés à :

- Leur légèreté.
- Leur résistance à la corrosion et aussi à la fatigue.
- Leur insensibilité aux produits comme les graisses, les liquides hydrauliques, les peintures et les solvants.
- Leur possibilité de prendre plusieurs formes, d'intégrer des accessoires et permettre la réduction de bruit. Inconvénients qui freinent leur diffusion :
- Les coûts des matières premières et des procédés de fabrication.
- La gestion des déchets engendrés et la réglementation de plus en plus stricte.
- L'industrie des matériaux composites doit donc aujourd'hui relever certains défis tels que:
- La maîtrise des émanations de produits organiques volatiles, par exemple le styrène.
- La maîtrise des procédés de transformations et des performances des matériaux qui sous-entend une très bonne connaissance des constituants mis en place
- La mise en place de technologies et des filières pour la gestion des déchets en fin de vie qui est la partie la plus difficile à satisfaire en raison du caractère thermostable de la plupart des composites.[24]

I.9.2. Les inconvénients:

- Mauvaise isolation acoustique (n'amortissent pas).
- La tenue au feu n'est pas bonne pour certaines catégories d'âmes.
- Les risques de flambement sont plus élevés que pour les structures classiques. [25]

CHAPITRE II
ENDOMMAGEMENT DES
VOLUMES ELEMENTAIRES
REPRESENTATIFS EN MATERIAUX
COMPOSITES

Chapitre II: Endommagement Des Volumes élémentaire représentatifs En matériaux composites

II.1.Introduction :

L'étude de l'endommagement des matériaux à l'échelle du Volume Élémentaire Représentatif (VER) revêt une importance cruciale pour comprendre la dégradation des propriétés mécaniques et la durabilité des matériaux. L'endommagement fait référence aux changements structurels et fonctionnels d'un matériau qui surviennent lorsqu'il est soumis à des sollicitations externes.

Lorsqu'un matériau est sollicité mécaniquement, des contraintes internes se développent à l'intérieur de celui-ci, provoquant des déformations. Au niveau du VER, ces contraintes peuvent entraîner divers mécanismes d'endommagement, tels que la fissuration, la déformation plastique, la décohérence des interfaces, la rupture de phases, etc.

II.2.La définition d'un VER :

La définition d'un VER est une étape importante des méthodes d'homogénéisation numériques. De manière générale, un VER est défini comme le modèle contenant le minimum d'hétérogénéités (ex. des sphères d'un composite formé de particules sphériques distribuées dans une matrice) pour obtenir les propriétés effectives du matériau contenant un plus grand nombre d'hétérogénéités. [26] ont donné une définition rigoureuse du VER en effectuant une étude statistique qui a permis d'obtenir les propriétés effectives avec une précision choisie en effectuant un nombre suffisant d'analyses avec des modèles différents à chaque essai (réalisations). Par exemple, [27] ont utilisé la notion du VER pour obtenir les propriétés effectives d'un composite avec une distribution aléatoire de renforts sphériques et élastiques dans une matrice élastique. Ils ont utilisé l'algorithme d'addition séquentielle aléatoire RSA (28) pour générer des modèles de tailles différentes qui représentaient la microstructure. Pour déterminer le module d'Young effectif d'un composite avec une fraction volumique de renforts de 30%, ils ont effectué 5 réalisations pour 5 tailles différentes de modèles. Les résultats de cette analyse sont présentés à la figure I.8 où on note que le module d'Young effectif ne varie plus significativement lorsque la taille du VER est augmentée au-delà de la troisième taille. Ce VER a

CHAPITRE II : Endommagement Des Volumes Elémentaires Représentatifs En Matériaux composites.

été déterminé à partir de la variation d'une propriété effective. [29] ont introduit une définition du VER qui découlait de la définition de [26]. Ils ont défini que la taille du VER est celle où l'augmentation de la taille (nombre d'hétérogénéités) ne fait plus varier la réponse transitoire sous un chargement donné et ce, pour une précision choisie.

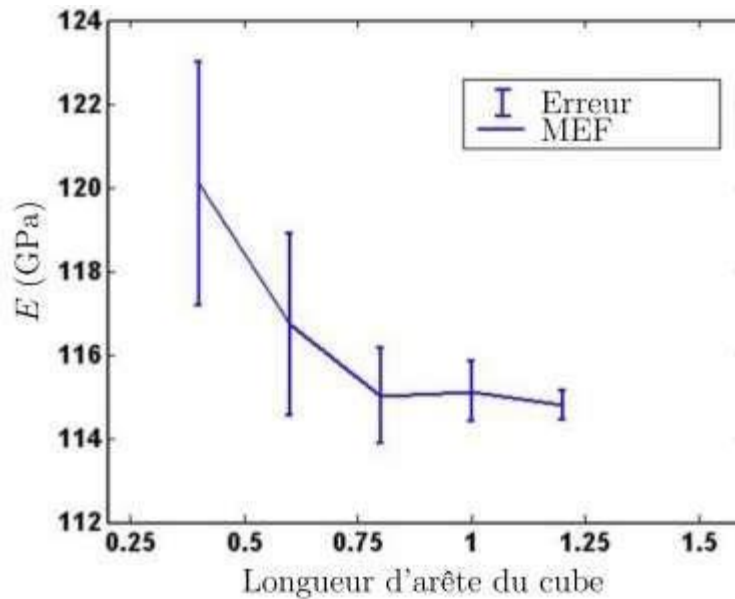


Figure II.1 : Variation du module d'Young effectif moyen et de l'erreur en fonction de la taille du VER .image adaptée par[30]

Dans le cas de l'homogénéisation élastique linéaire, [31] ont utilisé le critère d'indépendance des conditions aux limites proposées par les études de Hill, les études sur la taille du VER d'un composite à base de bore et de silicium, en fonction d'une réponse élastique constante obtenue à partir des valeurs moyennes de contrainte et de déformation. Les volumes de contrôle sont générés par le procédé de traitement d'image à partir de la structure réelle. On peut voir dans les résultats présentés dans la figure I.9, que l'indépendance relative des conditions aux limites appliquées est atteinte, pour une taille d'échantillon d'environ 33 fois plus grande que la taille moyenne des micro-constituants.

CHAPITRE II : Endommagement Des Volumes Elémentaires Représentatifs En Matériaux composites.

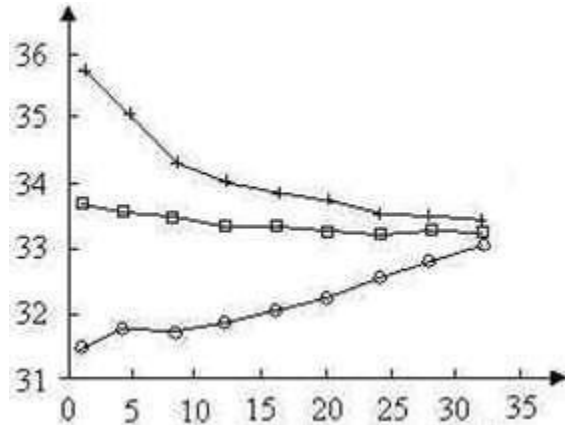


Figure II.2 : Vérification de l'indépendance des conditions aux limites avec l'augmentation du volume de contrôle. [31]

Notons que ces définitions de VER ont toutes été mises en place pour des considérations mécaniques, plus globalement physiques. Toutefois, la taille du VER n'est pas nécessairement unique pour un matériau composite, car il est sensible aux propriétés considérées (mécaniques, physiques...).

Du point de vue (termes) numérique et statique, de nombreuses méthodes ont été proposées dans la littérature pour analyser la taille du VER numériquement. Elles utilisent normalement plusieurs réalisations de l'échantillon à méso-micro échelle, suivi par une simulation numérique par éléments finis de ces échantillons et une procédure statistique pour analyser les résultats. Un exemple typique est fourni par les travaux de [26], dont la méthodologie peut être résumée ci-dessous :

- (i) Générer différentes réalisations des échantillons pour 4-5 tailles différentes.
- (ii) Soumettre chaque échantillon à des conditions de chargements et enregistrer les propriétés effectives obtenus.
- (iii) Calculer la valeur moyenne et la variance de la propriété effective pour les tailles de volume considérées.

Définir la précision souhaitée pour l'estimation de la propriété effective et un certain nombre de réalisation, utiliser le modèle pour définir la taille finale du VER. Les résultats

CHAPITRE II : Endommagement Des Volumes Elémentaires Représentatifs En Matériaux composites.

obtenus de la propriété homogénéisés (module de compressibilité k) en fonction de la taille du volume sont présentés dans la figure I.10. Dans ce cas, il y a une certaine indépendance dans les conditions aux limites que pour un volume de contrôle que le volume de la cellule de Voronoï considérée. Bien que dans ce cas, ils ont été comparés à des volumes et non à la taille des particules par rapport à la taille de volume contrôle sur le côté utilisé, comme cela avait été montré par [31] que les deux le critère d'indépendance dans les conditions aux limites, que le critère d'homogénéité statistique peut être utilisée pour déterminer le VER.

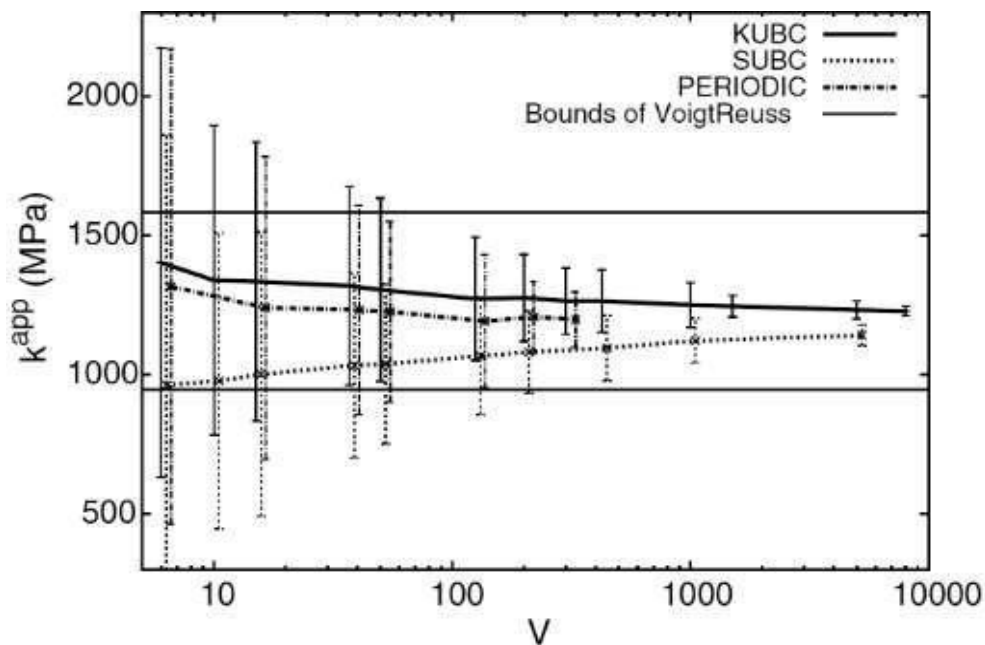


Figure II.3 : Valeurs moyennes et intervalles de confiance du module de compressibilité k_{app} en fonction de la taille du VER. [26].

Il convient de rappeler que les résultats présentés par [26] sont compatibles dans le cas des bornes de Hashin-Strikman [32] et les estimations auto cohérentes de Christensen-Lo [33] pour la détermination du VER dans de nombreuses tailles d'échantillons.

Du point de vue expérimental, de nombreuses tentatives ont été faites pour déterminer la taille du VER expérimentalement. [34] présentent un fond théorique sur les besoins statistiques pour un VER. Une technique d'analyse d'image en utilisant la tomographie par rayons X a été employée pour déterminer le VER en mesurant le volume auquel la fraction volumique totale des granules devient indépendante de la taille du volume analysé et atteint une valeur constante. La

CHAPITRE II : Endommagement Des Volumes Elémentaires Représentatifs En Matériaux composites.

fraction volumique de granulats a été dérivée à partir de différentes zones d'images bidimensionnelles d'un béton asphaltique.

Dans l'analyse expérimentale de [35], il s'agit souvent de la sélection d'une géométrie particulière de l'échantillon pour les essais et de l'analyse d'image de l'échantillon après les essais. Afin d'obtenir des résultats significatifs, un nombre suffisant de particules ou un volume suffisant de matériau doit être inclus à la fois dans l'analyse expérimentale et de l'image.

Enfin, l'estimation de la taille du VER peut également être effectuée de manière analytique. [36] emploient une équation constitutive non-locale explicite pour estimer le VER du matériau élastique. Ils considèrent les champs de déformations moyennes qui varient avec la position, et déterminent à quelle longueur d'onde cette variation entraînera l'apparition d'un terme non-local dans l'équation constitutive. Sur la base de cela, ils estiment la taille minimale du VER.

En définitive, la taille du VER est, bien entendu, fonction du milieu étudié (morphologie, fractions volumiques, répartition spatiale des différentes phases, etc.), des propriétés de ses constituants, ainsi que du contraste de propriétés entre ses constituants et, aussi, de ce que l'on cherche à modéliser : comportement thermique, mécanique élastique ou non linéaire. En plus de ces paramètres, l'obtention du volume élémentaire représentatif VER dépend aussi des conditions aux limites CAL. En théorie, un VER est suffisamment grand pour que son comportement moyen ne dépende pas des CAL utilisées pour son chargement. En pratique, on observe que les résultats obtenus sur des volumes élémentaires VE diffèrent selon les CAL, mais que ces résultats convergent lorsque la taille du VE étudié augmente et se rapproche de celle du VER [26 ; 30]. Il existe plusieurs conditions aux limites utiliser pour analyser le VER, les plus utilisés sont les conditions aux limites périodiques (PBC) (ou mixtes), ces PBC sont ainsi largement utilisées pour analyser le comportement apparent de VE. Il est possible de générer des microstructures aléatoires par domaine en imposant une condition de périodicité géométrique afin de pouvoir se placer dans ce cas [37]. Pourtant, ces conditions périodiques n'impliquent aucune restriction sur la géométrie de la microstructure du VE étudié [38], en plus ces conditions donnent une meilleure estimation des propriétés apparentes par rapport aux conditions homogènes [39 ; 26].

II.3.Généralités sur la technique d'homogénéisation :

L'approche d'homogénéisation consiste à définir le comportement d'un matériau hétérogène à partir de la connaissance des comportements (thermique, mécanique, électrique et autres) de ses différents composants élémentaires. Le matériau hétérogène peut être remplacé par un milieu homogène équivalent qui a les mêmes propriétés effectives calculées. Le calcul des contraintes moyennes ou effectives ainsi que les déformations moyennes ou effectives du milieu homogène équivalent est l'analyse de niveau globale. Le terme « homogénéisation » est le processus dont lequel sont calculées les propriétés effectives [40].

Un autre terme utilisé est la « localisation » pour déterminer la déformation et la contrainte locale ; ils peuvent être calculés en employant le rapport entre la contrainte moyenne et locale obtenue de l'analyse locale [41].

Les figures (I.4) et (I.5), montrent la description de l'approche d'homogénéisation et les éléments nécessaires pour le passage Micro-Macro et pour l'analyse multi-échelle. On note bien que la méthode d'homogénéisation consiste à substituer un matériau hétérogène par un matériau homogène, dit matériau homogène équivalent (MITE), qui répond globalement à un chargement quelconque de la même façon. Bien sûr, ces méthodes s'appliquent à de nombreux problèmes de la physique et de mécanique tels que la conduction thermique, l'élasticité linéaire, la plasticité, la viscoplasticité, l'électromagnétisme, etc.

CHAPITRE II : Endommagement Des Volumes Elémentaires Représentatifs En Matériaux composites.

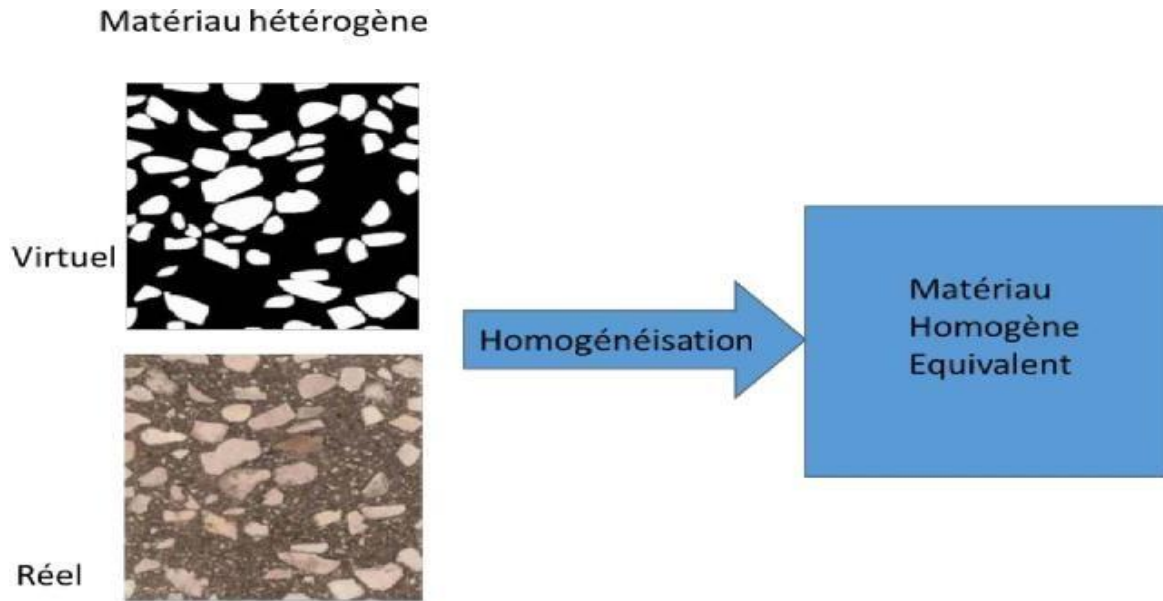


Figure II.4 : Principe de l'approche d'homogénéisation des matériaux hétérogènes. [42]

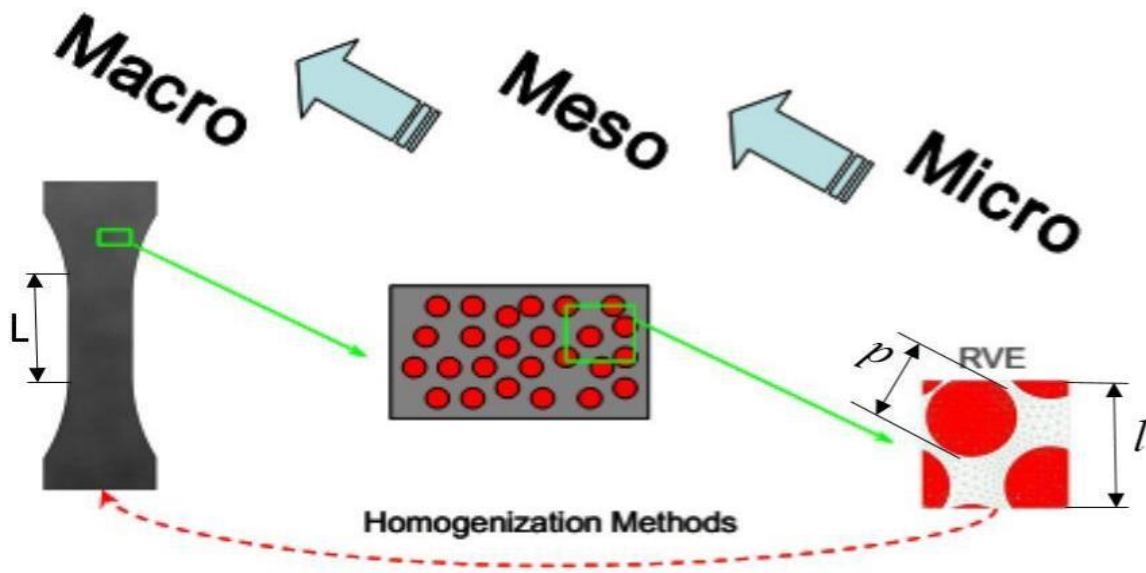


Figure II.5 : Approche et principe de l'homogénéisation numérique. [41]

Ce volume est appelé volume élémentaire représentatif (VER), qui est décrit selon les conditions d'échelles suivantes, figure I-5 : Si "d" est la taille caractéristique des hétérogénéités, et "L" la taille caractéristique de la structure macroscopique considérée, alors la taille caractéristique l du volume élémentaire représentatif (VER) est soumise à deux conditions :

CHAPITRE II : Endommagement Des Volumes Elémentaires Représentatifs En Matériaux composites.

- $l \ll L$: c'est la condition pour qu'on puisse traiter le matériau comme un milieu continu et y déterminer des champs continus de contraintes et de déformations.
- $l \gg d$: c'est la condition nécessaire pour pouvoir affecter au volume élémentaire représentatif un comportement macroscopique homogène malgré son hétérogénéité méso/microscopique.

La figure (II.6) montre des exemples de volume élémentaire représentatif dans une microstructure à 2-phases. Dans le même exemple de microstructure, on distingue différentes situations, dites réalisations, pour représenter la taille d'un volume élémentaire représentatif. La différence entre ces exemples de réalisations concerne le nombre d'hétérogénéités dans le volume, la morphologie, la disposition des hétérogénéités et finalement leurs distributions et leurs natures.

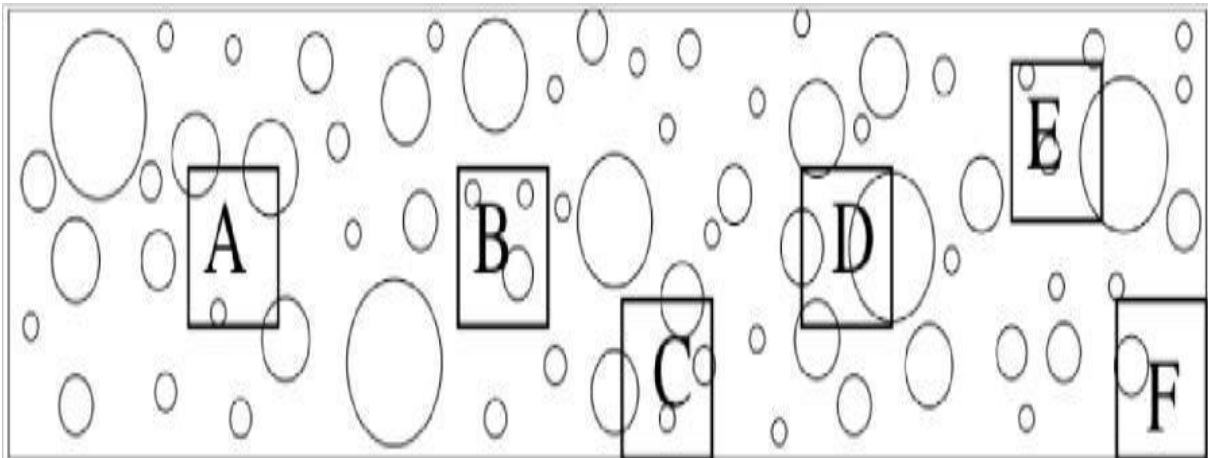


Figure II.6 : Exemple de VER d'une microstructure hétérogène. [41]

II.4.Généralité sur la mécanique de la rupture :

II.4.1.Définition La mécanique de la rupture :

La mécanique de la rupture est une étude qui met en jeu les paramètres habituels de la mécanique à partir d'une discontinuité existante: fissure ou défaut. Elle permet dans certains cas de prévoir, en fonction des dimensions d'une fissure et de l'état de chargement, la vitesse de propagation de la fissure et la dimension à partir de laquelle cette fissure peut entraîner une rupture brutale. Cette dimension, appelée couramment taille critique du défaut caractérise la

CHAPITRE II : Endommagement Des Volumes Elémentaires Représentatifs En Matériaux composites.

nocivité du défaut, c'est-à-dire la dimension de la fissure à partir de laquelle la structure mécanique n'est plus apte à l'emploi du fait de la perte de performance engendrée. [43]

II.4.2.Types de rupture :

On distingue deux types de rupture :

II.4.2.1.Rupture fragile : la rupture fragile est caractérisée par l'absence de déformation plastique macroscopique, et donc par la propagation très rapide possible des fissures. [44]

II.4.2.2.Rupture ductile : la rupture ductile liée essentiellement à la présence d'inclusion. Dans ce mode de rupture, la déformation plastique macroscopique est importante. [44]

II.4.3.Modes de rupture :

Trois modes de rupture principaux sont considérés :

II.4.3.1.Mode I : ou mode d'ouverture est caractérisé par un chargement et un Déplacement des surfaces de la fissure perpendiculaire au plan de fissuration, il est considéré comme étant le plus fréquente n mécanique de la rupture pour beaucoup de matériaux.

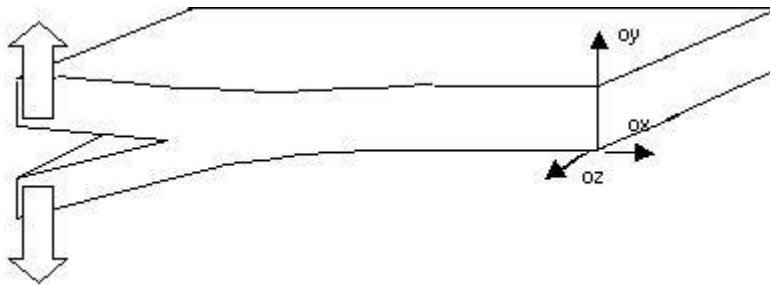


Figure.II.7 : Mode I : ouverture

II.4.3.2.Mode II : glissement dans le plan les surfaces de la fissure se déplacent Dans le même plan et dans une direction perpendiculaire au front de la fissure

CHAPITRE II : Endommagement Des Volumes Elémentaires Représentatifs En Matériaux composites.

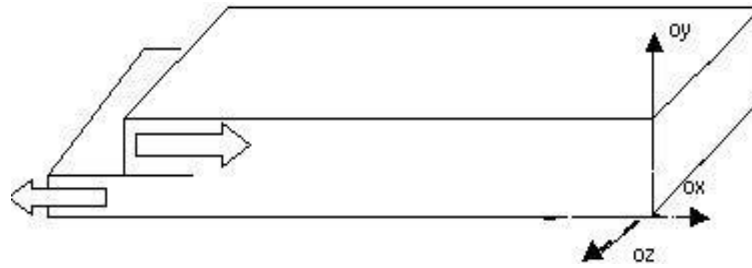


Figure.II.8_: Mode II : glissement dans le plan

II.4.3.3.Mode III : glissement anti plan : les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction parallèle au front de la fissure.

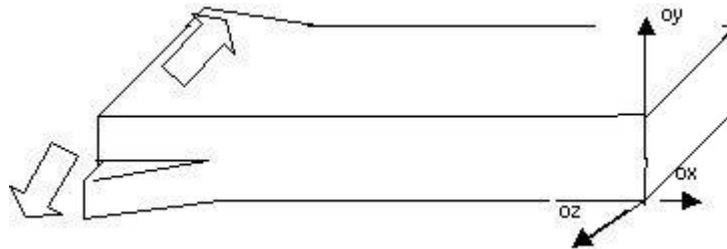


Figure.II.9_: Mode III : glissement antiplan.

II.5.Endommagement des matériaux composites :

L'endommagement d'un matériau est un processus irréversible qui conduit à l'apparition de défauts locaux. Contrairement aux matériaux métalliques, pour lesquels l'endommagement dépend du chargement imposé, les composites présentent toujours les mêmes endommagements. Du fait de l'hétérogénéité de leur structure, il n'existe pas de mécanisme unique mais plusieurs types de dégradations différentes par leur nature et leur mode de développement. Ces dégradations apparaissent à différentes échelles (Figure 19). Ainsi, on distingue [45] :

- A l'échelle microscopique apparaissent des ruptures d'adhérence entre les fibres et la matrice (décohésion fibres/matrice) ou de porosité,
- A l'échelle mésoscopique, ou échelle du pli, on observe des fissures intra/laminaires transverses (perpendiculaires à la direction de sollicitation) ou longitudinales (dans la direction

CHAPITRE II : Endommagement Des Volumes Elémentaires Représentatifs En Matériaux composites.

de l'application de l'effort) et des ruptures de fibres au stade ultime de la ruine du matériau.

- A l'échelle macroscopique, on observe le phénomène de délaminage qui correspond à une séparation locale entre deux couches liée à une concentration importante des contraintes en cisaillement s'amorçant généralement aux bords libres de la structure.

Ces endommagements ne sont pas présents uniformément dans la structure. Ils dépendent du type de sollicitation, mais aussi de l'orientation et de la proportion des renforts. Sandhu s'est d'ailleurs intéressé à la détermination de la part de chacune des sollicitations uni axiales élémentaires (longitudinale, transversale, cisaillement) dans l'endommagement d'un stratifié. Pour les orientations fortes (entre 0 et 10°), ce sont les contraintes longitudinales qui contribuent fortement à la dégradation alors que pour les orientations faibles (70/90°), ce sont les contraintes transversales qui participent davantage. Il a également remarqué que dans les structures $\pm 45^\circ$ ce sont les contraintes en cisaillement qui contribuent fortement à la dégradation. [45]

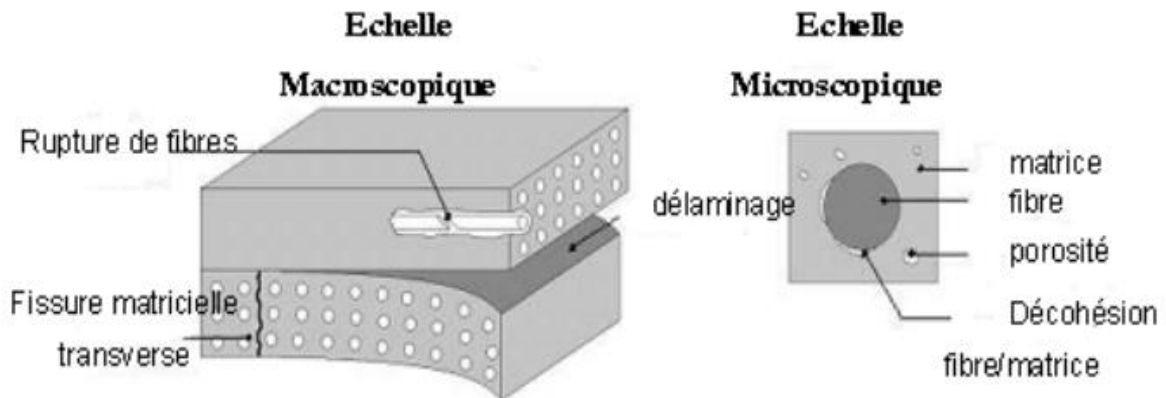


Figure.II.10: Principaux endommagements rencontrés dans un matériau composite.[45]

II.5.1.Mécanismes d'endommagement :

II.5.1.1.Décohésion fibre/matrice :

Ce mécanisme est le plus répandu dans la littérature. Il dépend de la nature des éléments constituant le composite, la qualité d'adhésion entre eux et le type d'ensimage utilisé. C'est à ce niveau que la liaison entre les fibres et la matrice doit posséder de bonnes propriétés pour permettre la déviation de la fissuration. [46]

CHAPITRE II : Endommagement Des Volumes Elémentaires Représentatifs En Matériaux composites.

II.5.1.2.Fissuration de la matrice :

Cet endommagement est plus marqué lorsqu'il s'agit des défauts de fabrications (exemple : les microporosités). Les microfissures engendrées se propagent à la direction de la plus grande contrainte principale et leurs coalescences constituent des fissures de tailles variables. [47]

II.5.1.3.Fissuration des fibres :

Ce phénomène apparait juste avant la rupture totale du matériau lorsque tous les autres endommagements sont saturés. Ce type de fissuration est classé parmi les plus critiques car il conduit à une perte importante de la rigidité et donc la rupture de la structure. [48]

II.5.1.4.Délaminage et pseudo-délaminage :

Ce type d'endommagement est souvent rencontré dans les matériaux stratifiés. Il est caractérisé par un décollement local entre deux plis suite à une sollicitation. Sa direction de propagation est dictée par l'orientation des fibres et elle devient facile dans le cas où la direction d'orientation des fibres entre deux plis successifs est différente. [48]

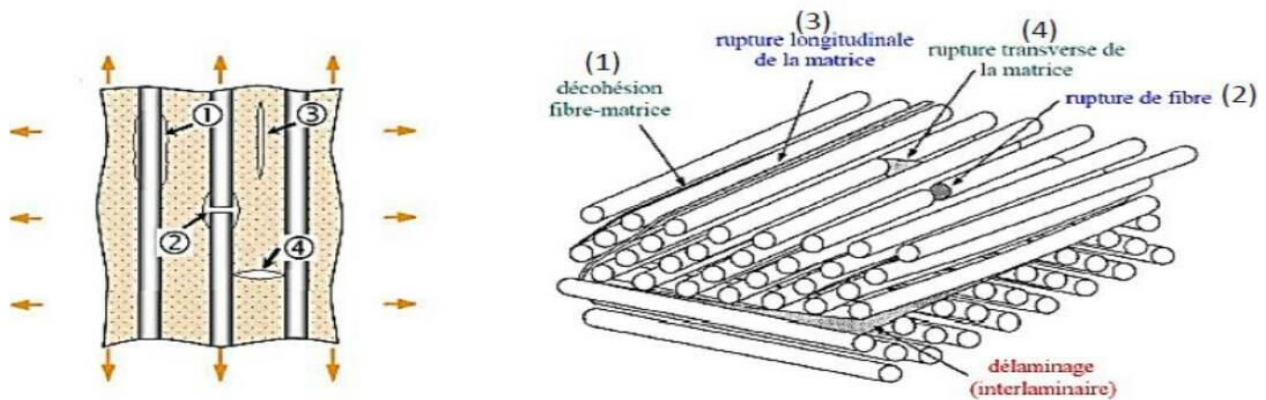


Figure.II.11: Les différents modes de ruine d'un composite: (1) Décohésion interrassiale (2) Fissuration de la fibre (3) Fissuration longitudinale-et (4) Fissuration transversale- de la matrice. [1]

CHAPITRE II : Endommagement Des Volumes Elémentaires Représentatifs En Matériaux composites.

II.5.2. Technique de détection l'endommagement :

Les méthodes de détection et quantification de l'endommagement d'un stratifié composite sont multiples. Elles peuvent être parfois couplées. On distingue en général les méthodes de caractérisation directes, qui permettent de suivre l'endommagement en l'observant directement et les méthodes de caractérisations indirectes.

II.5.2.1. Méthodes directes de caractérisation :

II.5.2.1.1. Microscopie optique :

Il s'agit de la méthode de caractérisation de l'endommagement la plus simple, basée sur son observation directe à l'aide d'un microscope optique. Cette observation peut être faite après l'essai. Pour cela, il est nécessaire de démonter l'éprouvette. Elle peut être également effectuée in-situ, c'est-à-dire sans interrompre l'essai. Pour cela, une caméra munie d'un microscope optique à faible grossissement est utilisée. Cette dernière méthode peut être affinée par la première. Cette technique présente cependant l'inconvénient de ne donner qu'une représentation 2D des endommagements. [45]

II.5.2.1.2. Radiographie X :

La radiographie aux rayons X est en général utilisée pour visualiser directement les fissures transverses et évaluer les surfaces de délaminages. Afin de faire apparaître ceux-ci, il est nécessaire d'utiliser un opacifiant aux rayons X. Ce dernier est déposé sur les bords libres de l'éprouvette et pénètre par capillarité dans les endommagements. [49]

CHAPITRE II : Endommagement Des Volumes Elémentaires Représentatifs En Matériaux composites.

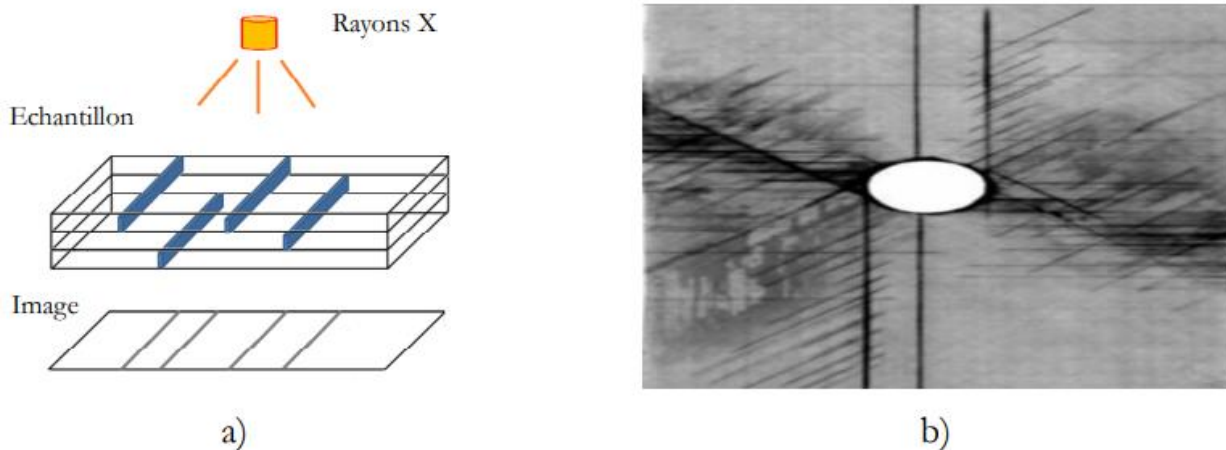


Figure.II.12: a) Schéma de projection des endommagements sur le plan.

b) Image obtenu par rayons X. [50]

II.5.2.1.3. Autres techniques de caractérisation directe :

La thermographie infrarouge est une méthode d'observation optique sans contact, permettant de faire une observation des endommagements en temps réel lors d'essais mécaniques. Le matériau observé est soumis à une sollicitation thermique via une source de chaleur (lampes halogènes). Cette source transmet un flux thermique à l'échantillon, les ondes se propagent à l'intérieur de celui-ci et sont réfléchies en atteignant les bords libres de l'éprouvette. Les ondes réfléchies donnent alors accès à la température de surface du matériau. La présence d'un dommage crée un milieu hétérogène et modifie son indice. Lorsque les ondes arrivent dans ce milieu, elles sont perturbées et un gradient de température est généré dans le matériau. Les deux milieux (sain et endommagé) présentent ainsi une conductivité thermique et une émissivité différentes, qui sont détectées par le capteur infrarouge de la caméra. Rossignol et al. ont ainsi étudié les endommagements par rupture de fibres et délaminage sur des composites fibres de carbone / résine époxy. La shearo graphie est une technique analogue à la thermographie infrarouge. Elle est basée sur un système d'interférométrie entre deux images : l'une correspondant au matériau sous sollicitation et l'autre au matériau non sollicité. [51]

II.5.2.2. Méthodes indirectes de caractérisation :

II.5.2.2.1. Emission acoustique :

L'émission acoustique est une technique qui nous permet d'entendre des sons créés par des

CHAPITRE II : Endommagement Des Volumes Elémentaires Représentatifs En Matériaux composites.

événements se produisant dans les matériaux (notamment des endommagements). Par exemple, lorsqu'une fissure est créée, une certaine énergie est libérée sous la forme d'une onde élastique. Cette technique nous permet d'enregistrer ces ondes en temps réel. Pour capter ces ondes, on utilise deux (ou plus) capteurs piézoélectriques qui convertissent l'énergie mécanique en signaux électriques. Un gel couplant est utilisé pour assurer la transmission des ondes entre le matériau et le capteur piézoélectrique. Un ordinateur pourvu d'une carte d'acquisition spécifique est chargé d'enregistrer et de traiter les données via un logiciel déterminé (AEW in dans notre cas). [52].

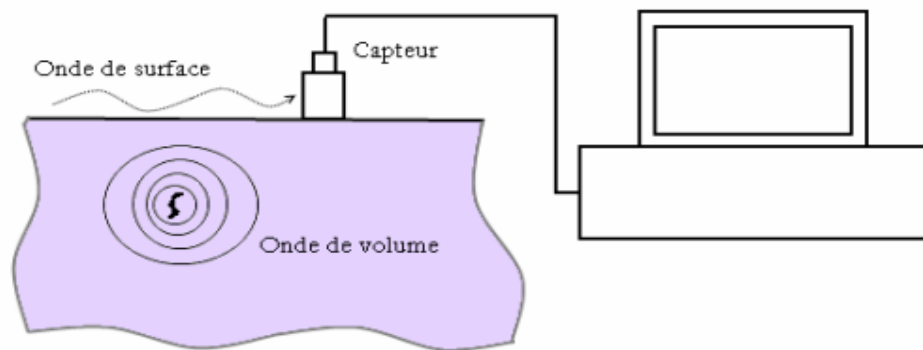


Figure.II.13 : Schéma du montage de l'émission acoustique.

II.5.2.2.2.Fibres optiques à réseaux de Bragg :

Les fibres optiques peuvent être intégrées directement dans la structure. Cette intégration est facilitée car leur géométrie est proche de celles des renforts fibres de carbone. Elle doit cependant être effectuée parallèlement aux renforts pour ne pas trop modifier les contraintes locales et altérer les performances et la durabilité de la structure [53] .

Le réseau de Bragg correspond à une modulation de l'indice de réfraction quasi sinusoïdale au cœur de la fibre. Lorsqu'une lumière est injectée dans le réseau, elle est transmise pour toutes les longueurs d'onde exceptée pour la longueur d'onde dite de Bragg caractéristique définie par $\lambda_B = 2n\eta$ (avec n l'indice effectif et η le pas du réseau. Cette loi est la loi de Bragg. L'onde respectant cette loi est réfléchie (Figure II.14).

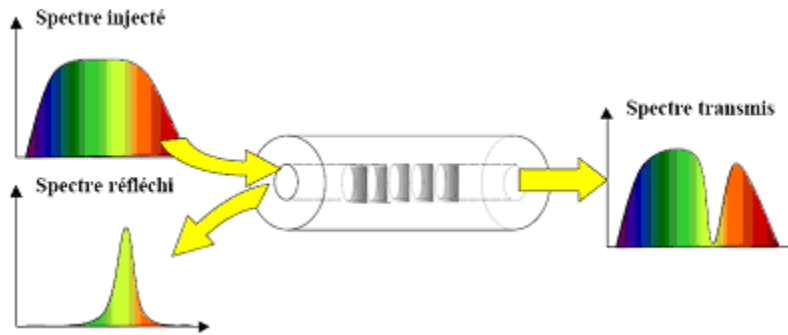


Figure.II.14: Fonctionnement d'un réseau de Bragg. [53]

II.6. Comportement mécanique des matériaux composites :

L'étude du comportement mécanique des matériaux a pour but de connaître leur réponse à une sollicitation donnée. L'architecture des structures de matériaux composites facilite l'étude du comportement mécanique. Elle comporte deux phases : l'une, micromécanique, l'autre, macromécanique.

La connaissance de la rupture des matériaux par l'étude des phénomènes d'amorçage et de propagation des fissures est nécessaire à la compréhension du comportement mécanique des composites. Etant donné que les zones de concentration de contraintes, en particulier les entailles, sont les principales causes d'amorçage des fissures, il est important de procéder à l'étude de la distribution des contraintes au voisinage de l'entaille, à l'analyse de la variation du facteur de concentration de contraintes pour expliquer le phénomène d'amorçage, et de quantifier, enfin, le facteur d'intensité de contraintes. [54]

II.6.1. Eléments sur la mécanique des matériaux :

II.6.1.1. Description des contraintes :

Illustration des contraintes par un cube élémentaire (Figure 15) Notation : Le champ de contraintes à l'un point M d'un solide est un tenseur d'ordre 2, symétrique, représenté par la matrice :

$$\sigma(M) = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{13} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

CHAPITRE II : Endommagement Des Volumes Elémentaires Représentatifs En Matériaux composites.

Comme $\sigma (M)$ est symétrique, $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ pour tout $i \neq j$.

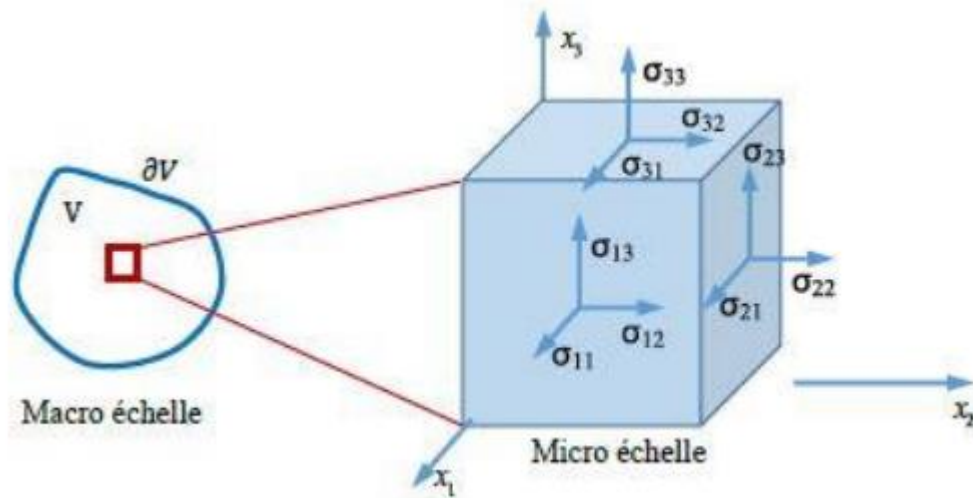


Figure.II.15 : Les composantes du tenseur des contraintes $\sigma(x)$

- Contraintes principales : Il existe un repère dans lequel $\sigma (M)$ est de la forme :

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

Les contraintes dans ce repère sont les contraintes principales. Elles correspondent aux valeurs propres de la matrice (M).

Notation pour l'ingénieur : On peut noter les 6 variables du tenseur des contraintes sous la forme :

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix}_R = \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix}$$

CHAPITRE II : Endommagement Des Volumes Elémentaires Représentatifs En Matériaux composites.

II.6.1.2. Description des déformations :

Comme dans le cas des contraintes, le champ de déformations au point M d'un solide est donc un tenseur d'ordre 2 symétriques notés (M). Il y a donc 6 grandeurs représentant les déformations (3 translations et 3 rotations).

$$\varepsilon(M) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix}_R$$

Avec les composantes du tenseur des déformations se réduisent alors à :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

- Déformations principales :

Il existe un repère dans lequel $\varepsilon(M)$ est de forme :

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix}_{R_{pr}}$$

Les déformations dans ce repère sont les déformations principales.

Elles correspondent aux Valeurs propres de la matrice $\varepsilon(M)$.

Notation pour l'ingénieur :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix}_R = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} = 2\varepsilon_{23} \\ \gamma_{13} = 2\varepsilon_{13} \\ \gamma_{12} = 2\varepsilon_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{yz} = 2\varepsilon_{yz} \\ \gamma_{xz} = 2\varepsilon_{xz} \\ \gamma_{xy} = 2\varepsilon_{xy} \end{pmatrix}$$

CHAPITRE II : Endommagement Des Volumes Elémentaires Représentatifs En Matériaux composites.

II.6.1.3. Matrice de rigidité :

Pour caractériser le comportement mécanique des matériaux composites d'un milieu, on utilise les champs de déformations et des contraintes dans un milieu qui sont liés par les lois de comportement. Pour rendre compte au mieux des phénomènes observés, il y a des axiomes qui décrivent ces lois de comportement. L'expérience donne une réalité que nombreux milieux solides déformables ont un comportement élastique linéaire, sous l'effet d'une température donnée .[55]

La relation d'élasticité peut s'écrire sous forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix}$$

Ou sous forme condensée :

$$\sigma = c\epsilon$$

Cette loi, généralement appelée loi de Hooke généralisée.

II.6.1.4. Changement de base :

Soit c la matrice de rigidité exprimée dans une base :

$$(\bar{e}) = (\bar{e}_1, \bar{e}_2, \bar{e}_3) \text{ et } c' = [c'_{ik}]$$

La matrice de rigidité exprimée dans la base :

$$(\bar{e}') = (\bar{e}'_1, \bar{e}'_2, \bar{e}'_3)$$

Ces matrices relient les contraintes et déformations exprimées dans les bases respectives :

CHAPITRE II : Endommagement Des Volumes Elémentaires Représentatifs En Matériaux composites.

- dans la base (\vec{e}) : $\sigma = c \varepsilon$
- dans la base (\vec{e}') : $\sigma' = c' \varepsilon'$

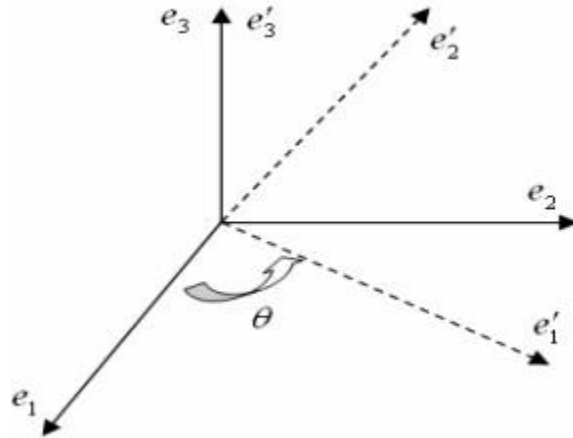


Figure II.16 : Changement de base

La matrice de changement de base pour une rotation d'angle θ de l'axe 3 s'écrit :

$$T = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 0 & 0 & 0 & sc \\ s^2 & c^2 & 0 & 0 & 0 & -sc \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c & -s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s & c & 0 \\ -2sc & 2sc & 0 & 0 & 0 & c^2 - s^2 \end{bmatrix}$$

Avec : $s = \sin \theta$ et $c = \cos \theta$

Pour obtenir la relation de passage inverse,

remplacer θ par $-\theta$ La relation de changement de base (1.16), il vient :

CHAPITRE II : Endommagement Des Volumes Elémentaires Représentatifs En Matériaux composites.

$$\sigma' = T\sigma = Tc\varepsilon$$

$$\varepsilon' = T\varepsilon \Rightarrow \varepsilon = T^{-1}\varepsilon'$$

$$\text{donc : } \sigma' = TcT^{-1}\varepsilon'$$

L'identification des expressions (1.15) et (1.19) conduite alors à la relation de changement de bases matrices de rigidité :

$$c = TcT^{-1}$$

Par un raisonnement analogue, on trouve de même la relation de changement de base des matrices souplesse :

$$s' = TsT^{-1}$$

II.6.2. Conséquences sur l'étude du comportement mécanique des matériaux composites :

L'étude de la mise en œuvre des matériaux composites a montré l'importance des stratifiés et des matériaux sandwichs. L'architecture de ces matériaux nous permet maintenant de dégager les grandes lignes de l'étude de leur comportement mécanique. Cette étude comportera deux phases :

1. L'étude du comportement mécanique de chaque couche, parfois appelé comportement micromécanique ou microscopique du matériau composite. Cette étude est assez souvent désignée par microanalyse du matériau composite.
2. L'étude du comportement global du matériau constitué de plusieurs couches, et désigné généralement par comportement macroscopique du matériau composite ou comportement du stratifié.

Ces deux études étant effectuées, le comportement mécanique global d'une structure en composite sera ensuite analysé en adaptant les outils classiques du calcul des structures au comportement macroscopique des matériaux composites. L'analyse des structures simples (poutres et plaques) peut généralement être abordée par une méthode analytique, alors que l'étude de structures complexes nécessite l'utilisation de la méthode des éléments finis. [1]

CHAPITRE III

COMPORTEMENT EN RUPTURE
D'UN VER EN PRESENCE D'UN
DEFAULT

Chapitre III : Comportement en Rupture d'un VER en Présence d'un Défaut.

III.1.Introduction :

Les fibres utilisées pour le renforcement de la matrice polymère sont généralement des fibres continues et discontinues, les premières (bore, verre, Kevlar...) dont les coûts des matières premières, les modes de mise en œuvre et les faibles capacités de production, font que ces composites ont des prix de revient plus élevés étant limités à des applications performantes telles que l'aéronautique et l'aérospatiale, l'écart entre les propriétés de ces fibres ainsi que les polymères non renforcés est comblé par les fibres discontinues, Depuis très longtemps, les propriétés des polymères ont été modifiées à l'aide de renforts pour optimiser les propriétés mécaniques, L'analyse micromécanique par éléments finis, utilisant les concepts de volume élémentaire représentatif (VER) [56], [57] ou de cellule unitaire répétée (RUC) [58], [59] peut être effectuée pour évaluer le champ de contraintes hétérogènes des composites, prédire plus précisément les propriétés effectives et caractériser le rendement microscopique et le comportement à l'endommagement par rapport aux méthodes analytiques.

Notre travail vise à analyser par la méthode des éléments finis, l'évolution de l'endommagement d'un composite hybride VER (Volume Élémentaire Représentative) constitué d'une même matrice époxy et avec différentes fibres de renfort (Alfa et verre), dont les caractéristiques mécaniques des matériaux sont présentées dans le tableau 1[60] en utilisant le code de calcul Abaqus6.14 [61]. Plusieurs facteurs ont été mis en évidence tels la disposition des fibres par rapport au fond de fissure et son orientation.

Propriétés Constituants	Densité [g/m ³]	Module de Young [GPa]	Coefficient de Poisson
Alfa	1.4	12	0.3
Glass	2.6	27	0.3
Epoxy		5	0.33

Tableau III.1 : Propriétés mécaniques des matériaux

III.2.Modèle géométrique :

- Notre modèle géométrique est un composite hybride de dimensions: longueur $L = 0.08$ mm, largeur $l = 0.04$, et hauteur $h = 0.04$ et de diamètre des fibres $d = 0.006$ mm, et en

présence d'une fissure de longueur = 0.004 mm.

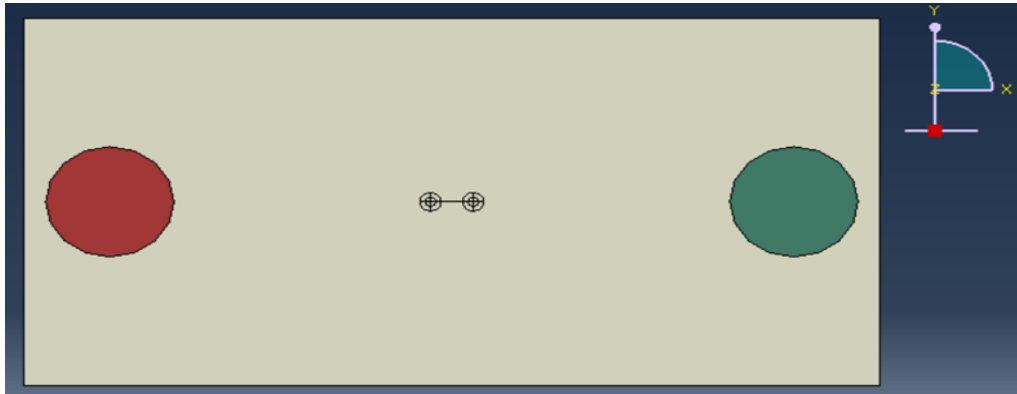


Figure III.1 : Modèle géométrique

III.3.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). [61]

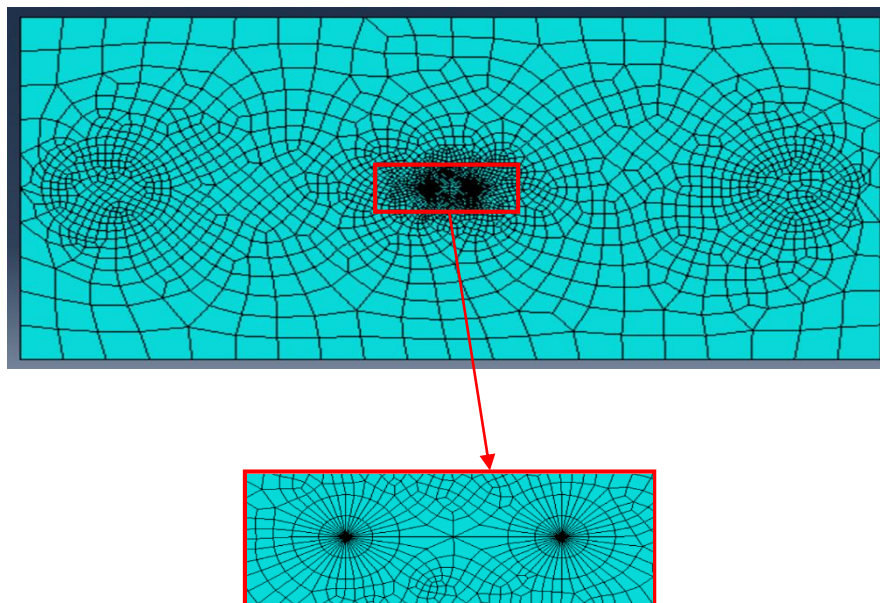


Figure III.2 : Maillage

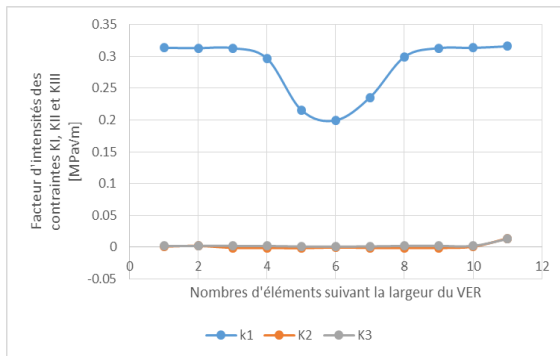
III.4. Résultats et discussions :

III.4.1. Variation du facteur d'intensité de contraintes K_I K_{II} K_{III} :

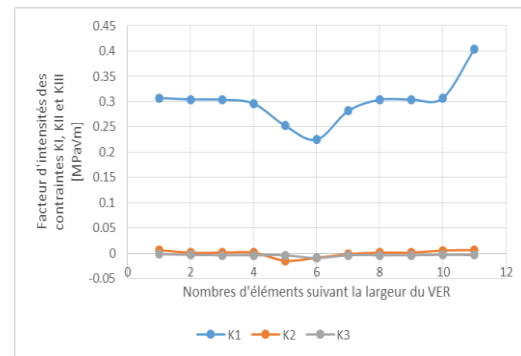
Pour mieux voir les modes de ruptures, on a pris en considération les trois facteurs d'intensités de contraintes des deux fonds de fissures respectivement A et B (de droite et celui du gauche) et pour les quatre volumes élémentaires représentatifs considérés (alfa-alfa/époxyde, alfa-verre/époxyde, verre-alfa/époxyde et verre-verre /époxyde).

*Fond de fissure A

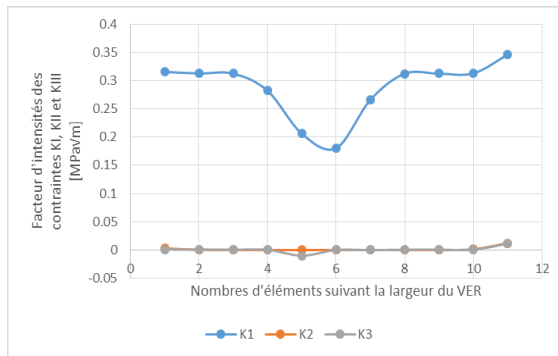
*Fond de fissure B



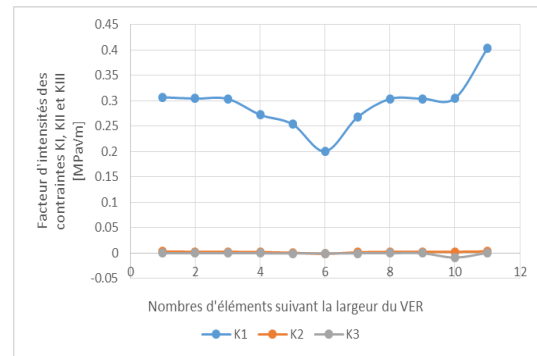
A₁) alfa-alfa ($\alpha=0^\circ$)



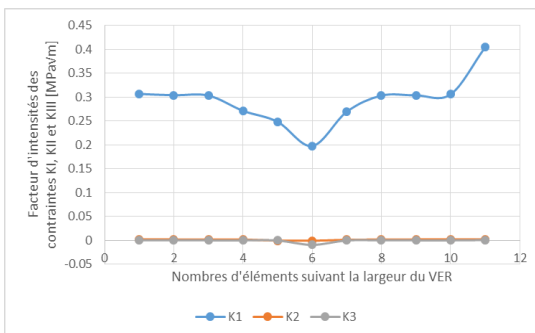
B₁) alfa-alfa ($\alpha=0^\circ$)



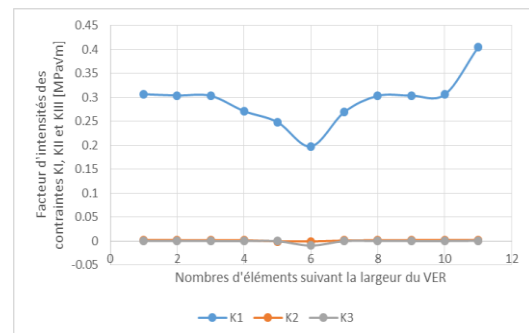
A₂) alfa-verre ($\alpha=0^\circ$)



B₂) alfa-verre ($\alpha=0^\circ$)

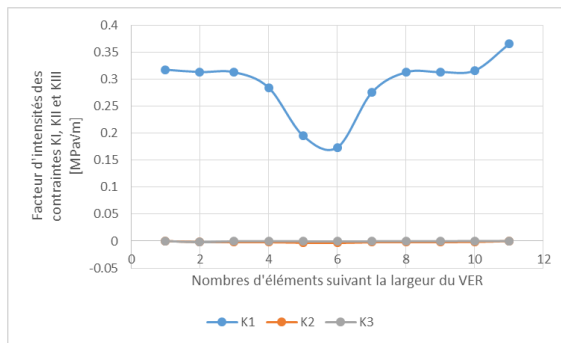


A₃) verre-verre ($\alpha=0^\circ$)

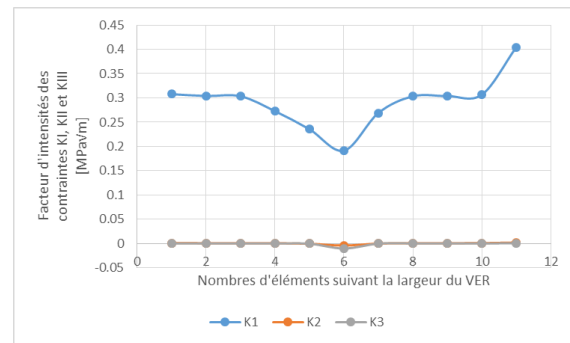


B₃) verre-verre ($\alpha=0^\circ$)

Chapitre III : Comportement en Rupture d'un VER en Présence d'un Défaut



A4) verre-alfa($\alpha=0^\circ$)

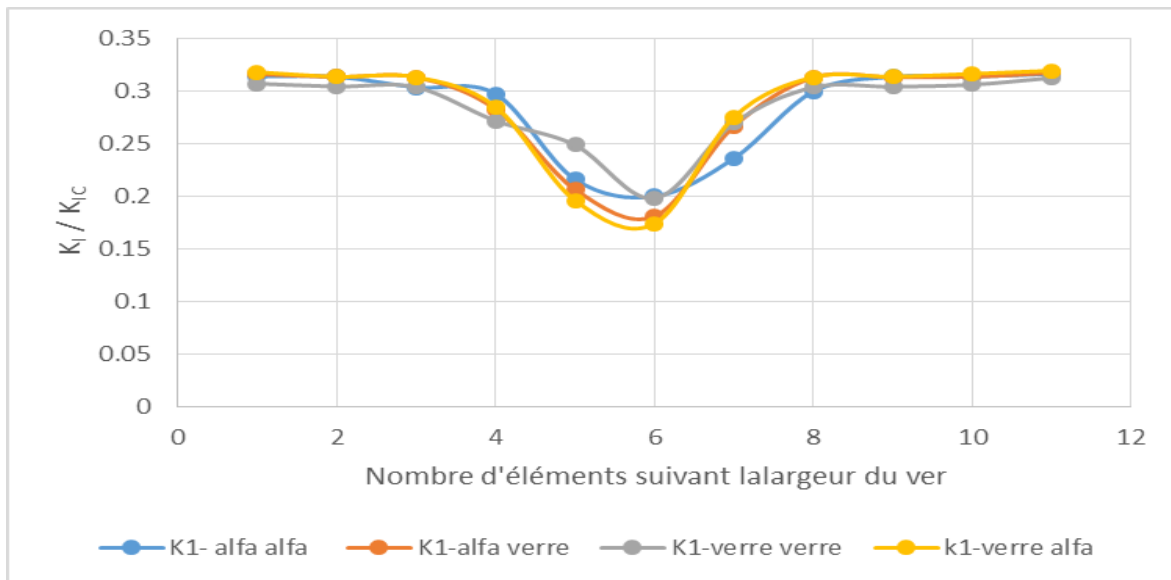


B4) verre-alfa($\alpha=0^\circ$)

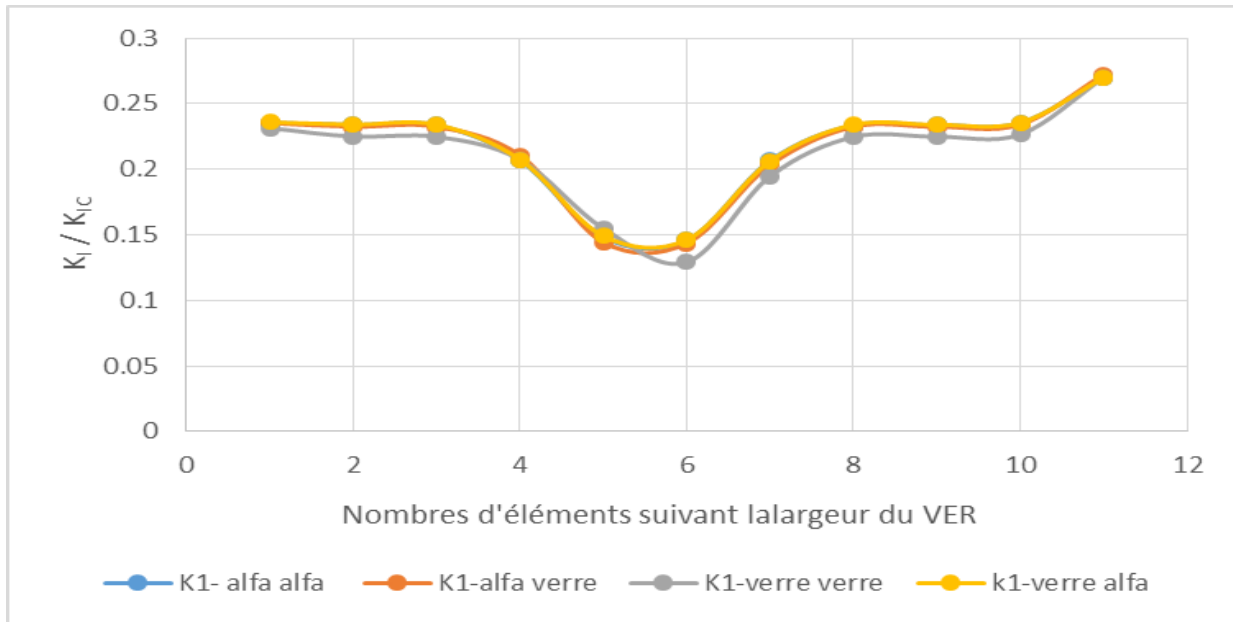
Figure III.3 : Variation des facteurs d'intensités de contraintes K_I , K_{II} et K_{III} en fonction de la largeur du VER pour les deux fonds de fissure et pour l'angle d'orientation de la fissure ($\alpha=0^\circ$) ainsi que les différentes positions des fibres par rapport à la fissure.

Les figures 3(A₁, B₁, A₂, B₂, A₃, B₃, A₄ et B₄) montrent Variation des facteurs d'intensités de contraintes K_I , K_{II} et K_{III} en fonction de la largeur du VER pour les deux fonds de fissure et pour l'angle d'orientation de la fissure ($\alpha=0^\circ$) ainsi que les différentes positions des fibres par rapport à la fissure. On constate que quelque soit la position des fibres par rapport à la fissure le facteur d'intensité de contraintes K_I est nettement supérieur aux deux autres K_{II} et K_{III} cela conduit au mode d'ouverture I.

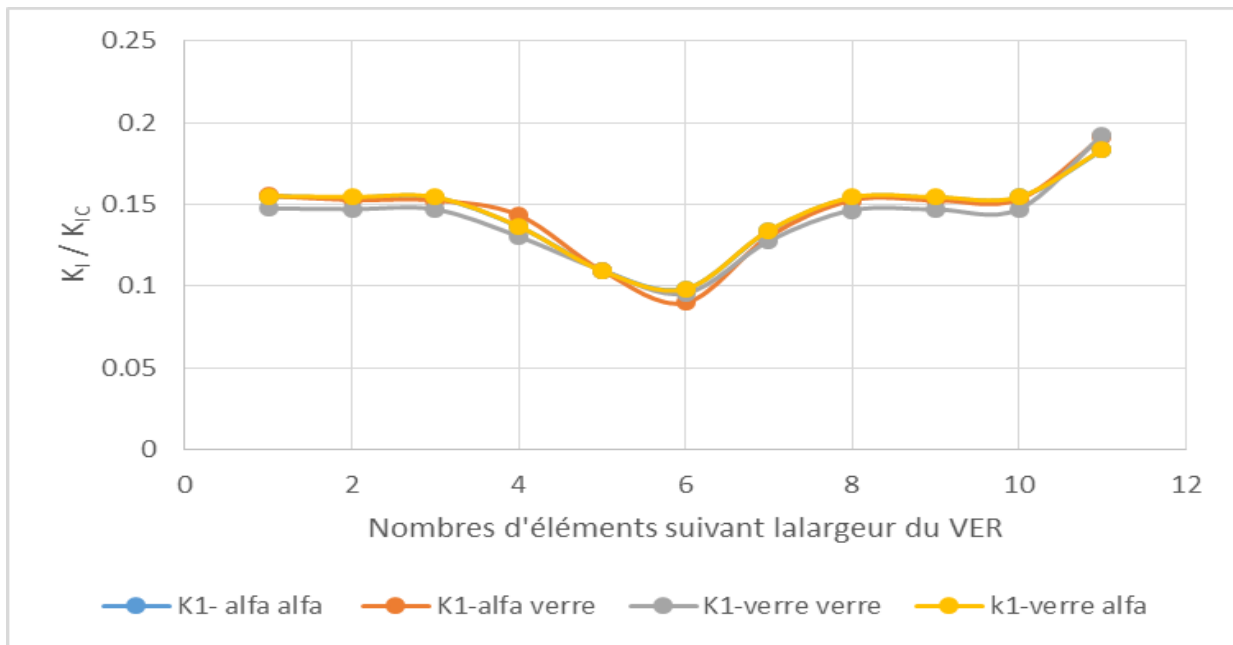
III.4.2.L'effet l'angle d'orientation de la fissure sur FIC K_I



C₁: ($\alpha=0^\circ$)

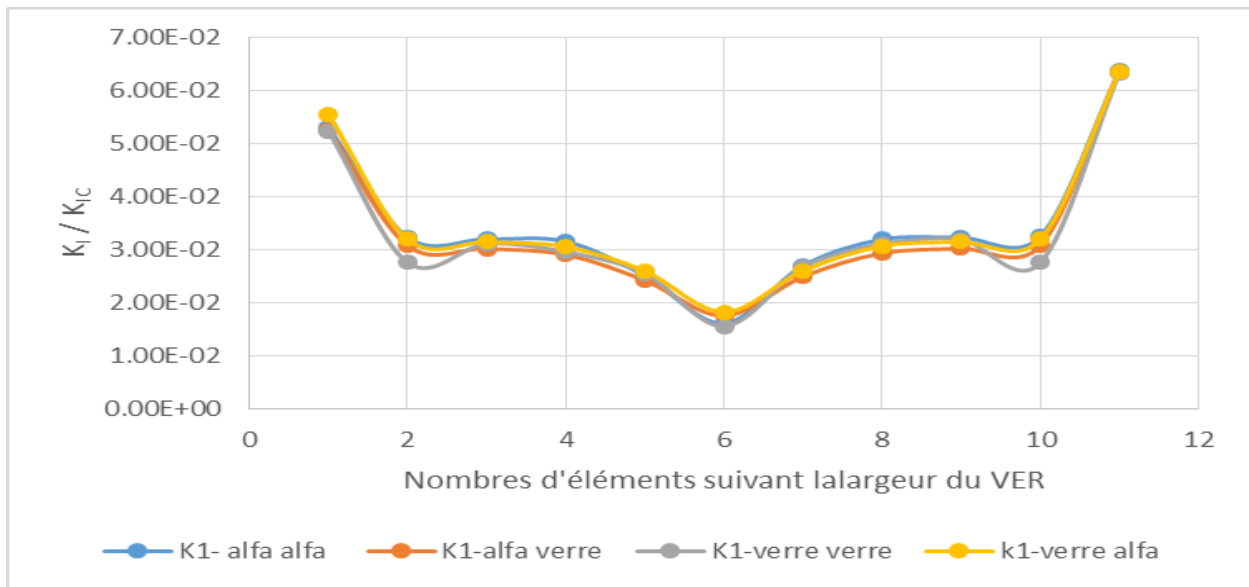


C₂: ($\alpha=30^\circ$)

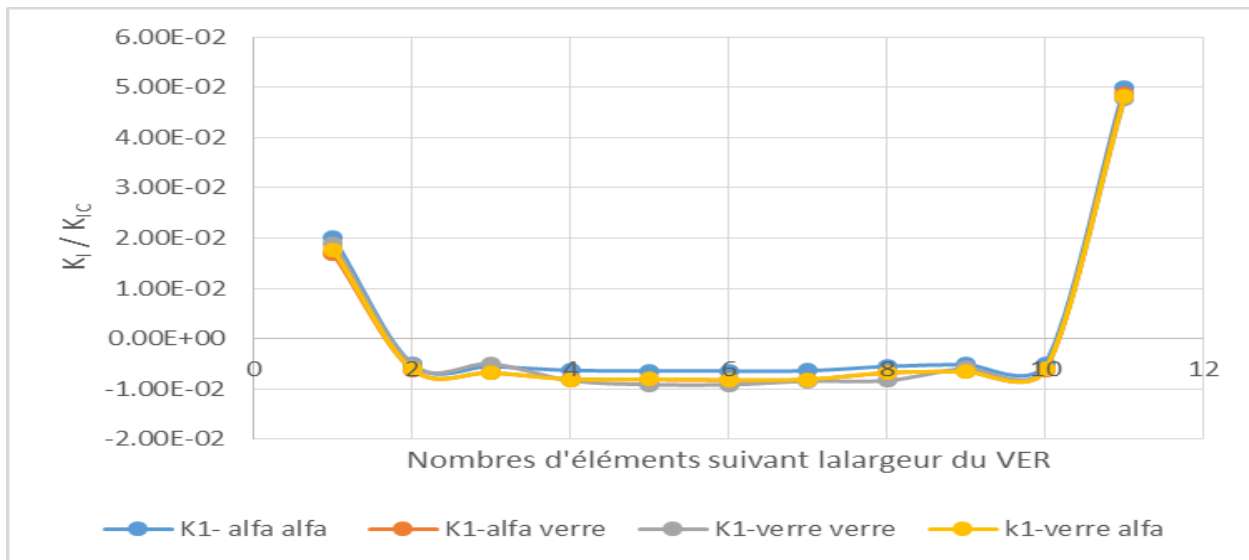


C₃: ($\alpha=45^\circ$)

Chapitre III : Comportement en Rupture d'un VER en Présence d'un Défaut



C₄: ($\alpha=70^\circ$)



C₅: ($\alpha=90^\circ$)

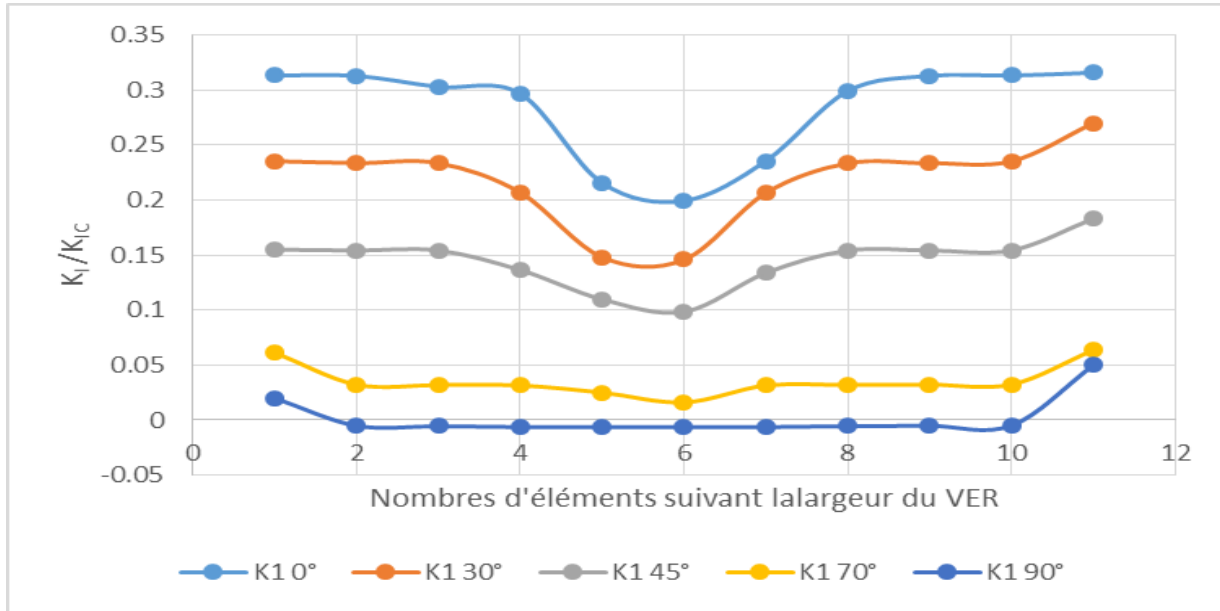
Figure III.4 : Variation du facteur d'intensité de contraintes K_I en fonction de nombre des éléments analysés par rapport à la largeur du VER pour chaque orientation de la fissure ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=30^\circ$, $\alpha=45^\circ$, $\alpha=70^\circ$ et $\alpha=90^\circ$.) et pour différents matériaux considérés (Alfa-alfa/époxy, Alfa-verre/époxy, Verre-alfa/époxy et Verre-verre/époxy).

Les figures 4(C₁, C₂, C₃, C₄ et C₅) montrent la variation du facteur d'intensité de contraintes K_I en fonction de nombres des éléments analysés par rapport à la largeur du VER pour chaque orientation de la fissure ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=30^\circ$, $\alpha=45^\circ$, $\alpha=70^\circ$ et $\alpha=90^\circ$.) et pour différentes positions des fibres par rapport à la fissure. On constate que quel que soit l'orientation de la fissure les courbes

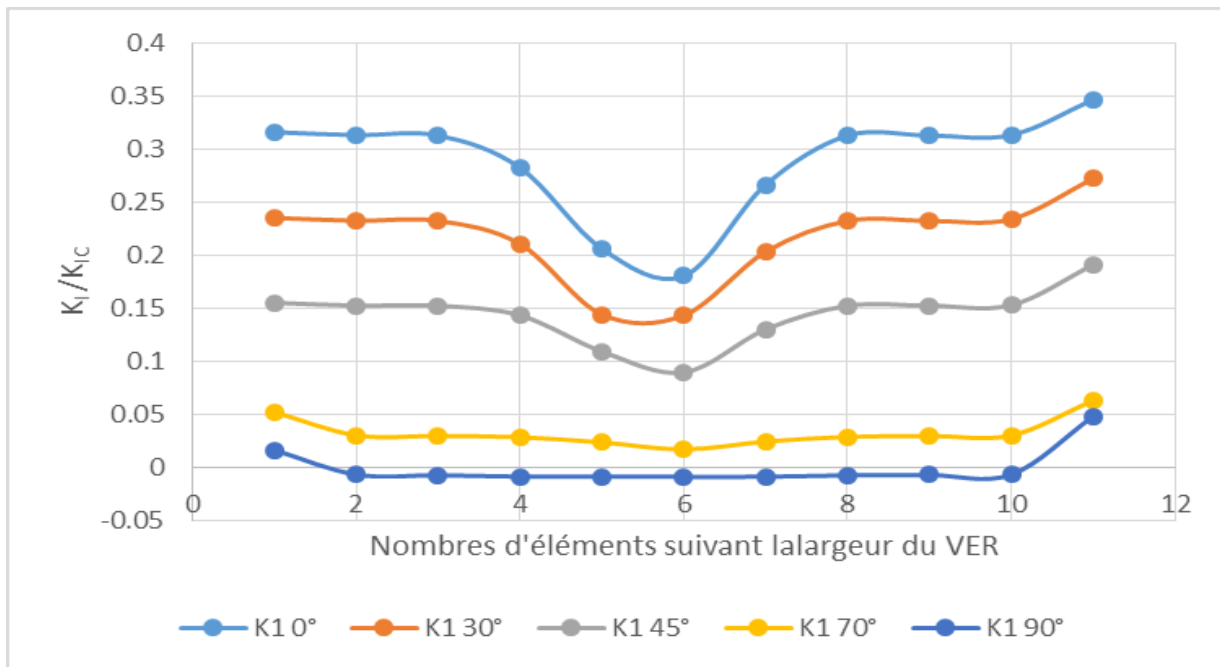
Chapitre III : Comportement en Rupture d'un VER en Présence d'un Défaut

sont symétriques est confondus. On constate aussi qu'au fur et à mesure que l'angle α augmente le facteur d'intensité de contrainte diminue jusqu'à atteindre la valeur négligeable.

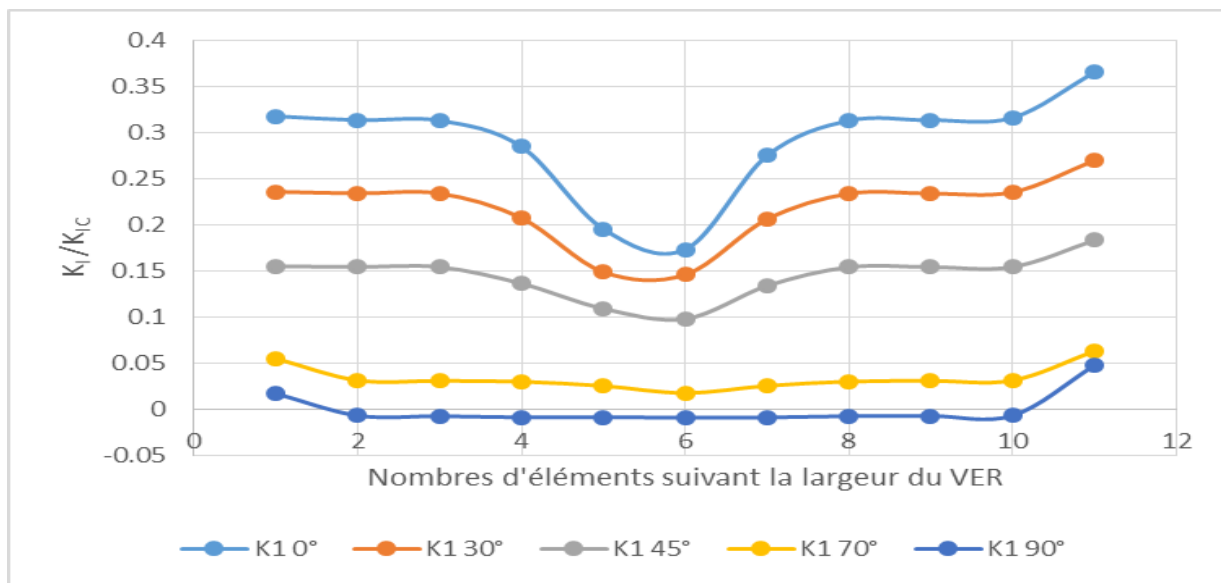
III.4. 3.L'effet de la position des fibres par rapport à la fissure sur le FIC KI :



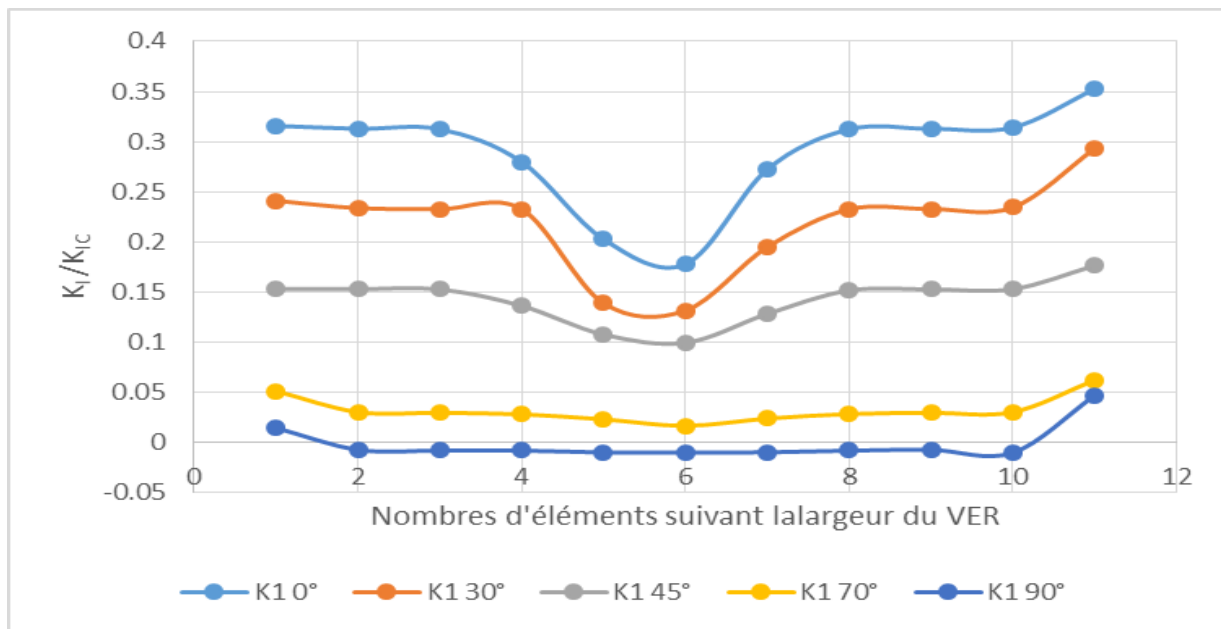
D₁ : Alfa-alfa/époxy



D₂ : Alfa-verre/époxy



D₃ : Verre-alfa/époxy



D₄ : Verre-verre/époxy

Figure III.5: Variation du facteur d'intensité de contraintes K_I en fonction de la largeur du VER pour chaque matériaux considérés (Alfa-alfa/époxy, Alfa-verre/époxy, Verre-alfa/époxy et Verre-verre/époxy) et pour différents angles d'orientation de la fissure ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=30^\circ$, $\alpha=45^\circ$, $\alpha=70^\circ$ et $\alpha=90^\circ$.)

Les figures 5(D₁, D₂, D₃ et D₄) montrent la variation du facteur d'intensité de contraintes K_I en fonction de la largeur du VER pour chaque matériaux considérés (Alfa-alfa/époxy, Alfa-verre/époxy, Verre-alfa/époxy et Verre-verre/époxy) et pour différents angles d'orientation de la fissure ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=30^\circ$, $\alpha=45^\circ$, $\alpha=70^\circ$ et $\alpha=90^\circ$). On constate que quel que soit le matériau

Chapitre III : Comportement en Rupture d'un VER en Présence d'un Défaut

considéré les courbes sont symétriques. On constate aussi qu'au fur et à mesure que l'angle α augmente le facteur d'intensité de contrainte diminue jusqu'à atteindre la valeur négative.

III.4.4. La distribution de la contrainte de Von Mises équivalente :

- Suivant l'axe des X :

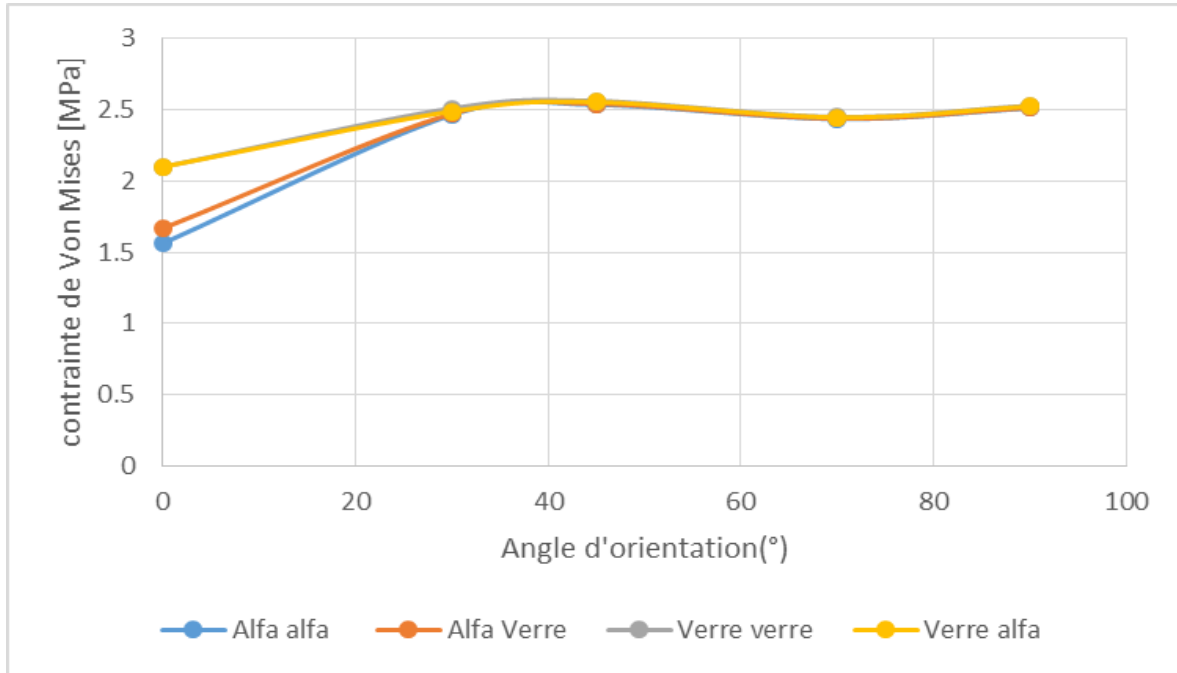


Figure III.6 : Variation de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction l'orientation de la fissure ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=30^\circ$, $\alpha=45^\circ$, $\alpha=70^\circ$ et $\alpha=90^\circ$,) suivant l'axe X pour les différentes positions des fibres alfa et verre

La figure 6 montre la variation de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction de l'orientation de la fissure ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=30^\circ$, $\alpha=45^\circ$, $\alpha=70^\circ$ et $\alpha=90^\circ$,) suivant l'axe X pour les différentes positions des fibres alfa et verre. On constate une légère augmentation de la contrainte Von Mises entre 0° et 30° et cela que quel que soit la nature du matériau considéré. Au-delà de 30° l'orientation de la fissure n'a aucune influence sur la contrainte équivalente de Von Mises puisque toute les courbes sont confondues.

- Suivant l'axe des Y :

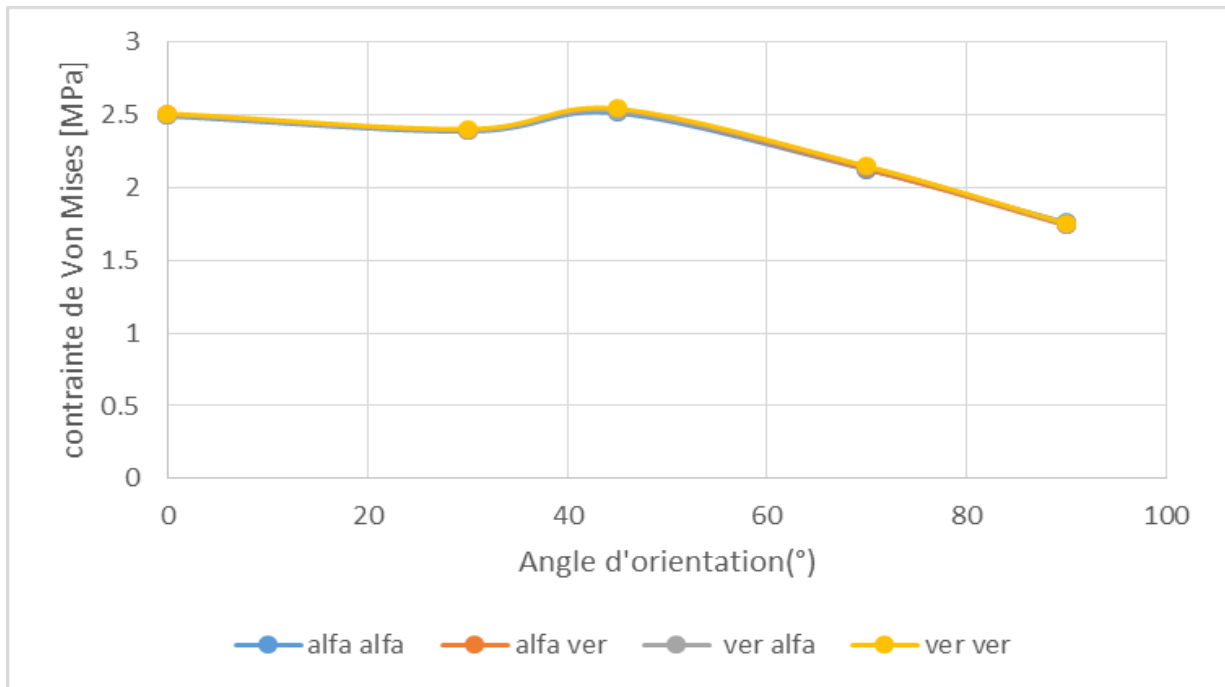


Figure III.7: Variation de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction l'orientation de la fissure ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=30^\circ$, $\alpha=45^\circ$, $\alpha=70^\circ$ et $\alpha=90^\circ$,) suivant l'axe Y pour les différentes positions des fibres alfa et verre

La figure 7 montre la variation de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction de l'orientation de la fissure ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=30^\circ$, $\alpha=45^\circ$, $\alpha=70^\circ$ et $\alpha=90^\circ$,) suivant l'axe Y pour les différentes positions des fibres alfa et verre. Les courbes sont confondues l'orientation de la fissure n'a aucune influence sur la contrainte équivalente de Von Mises. On constate une contrainte maximale pour l'orientation 0° et 45° et minimale pour l'orientation de la fissure 90° et cela que quel que soit la nature du matériau considéré.

- Suivant l'axe des Z :

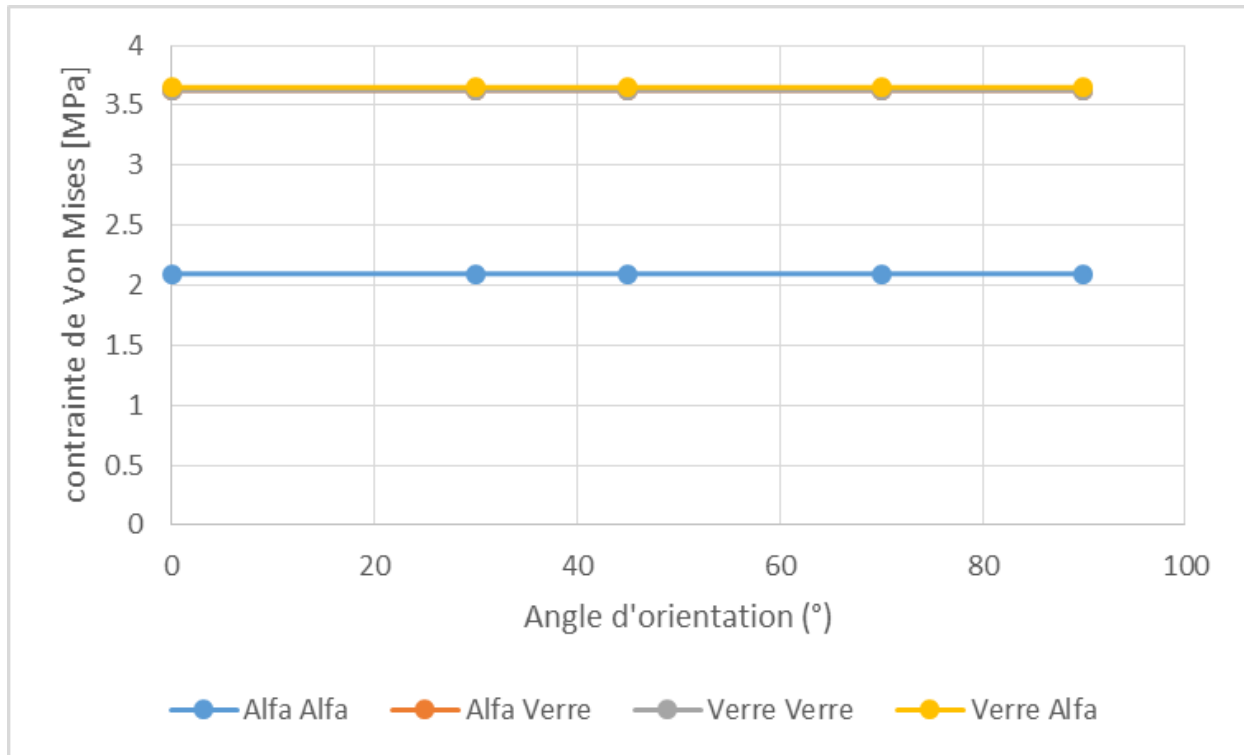


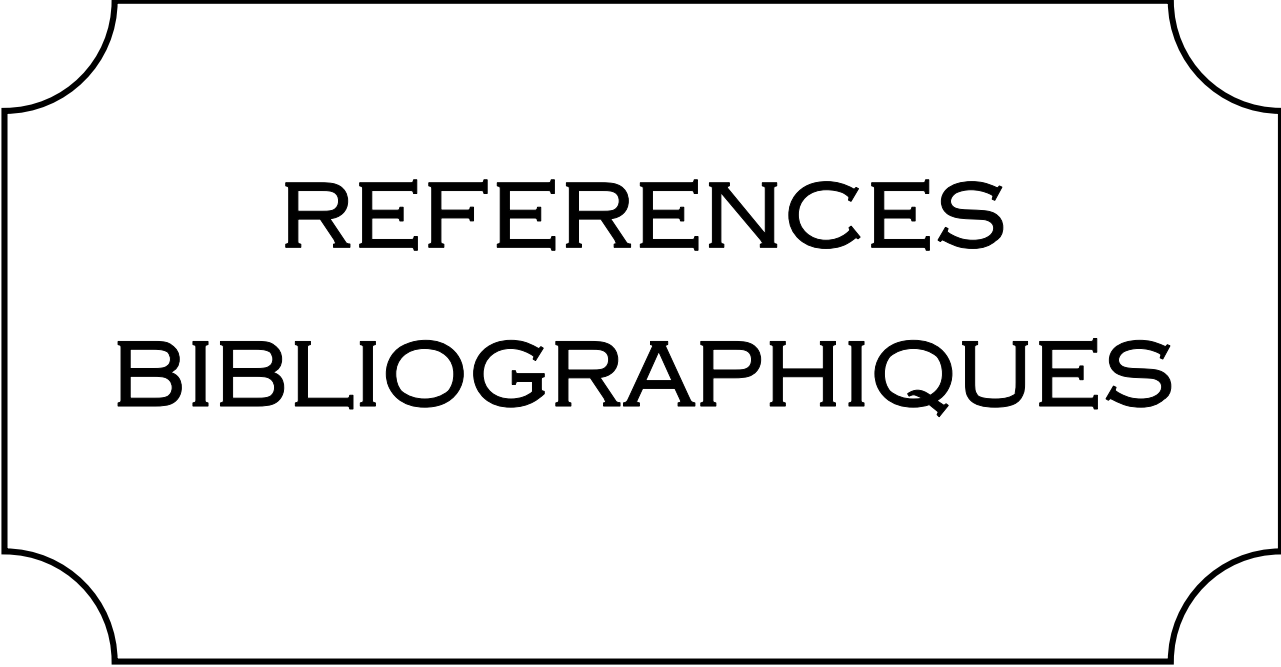
Figure III.8: Variation de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction l'orientation de la fissure ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=30^\circ$, $\alpha=45^\circ$, $\alpha=70^\circ$ et $\alpha=90^\circ$.) suivant l'axe Z pour les différentes positions des fibres alfa et verre

La figure 8 montre la variation de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction de l'orientation de la fissure ($\alpha=0^\circ$, $\alpha=30^\circ$, $\alpha=45^\circ$, $\alpha=70^\circ$ et $\alpha=90^\circ$.) suivant l'axe Z pour les différentes positions des fibres alfa et verre. Les courbes des trois matériaux alfa-verre/époxy, verre-alfa/époxy et verre-verre/époxy sont confondues et constantes, l'orientation de la fissure n'a aucune influence sur la contrainte équivalente de Von Mises et elles marquent la même valeur. On constate une contrainte minimale et constante pour le matériau alfa-alfa/époxy.

Conclusion générale

Cette étude nous a mené à tirer les conclusions suivantes :

- Quelle que soit la position des fibres par rapport à la fissure, le facteur d'intensité de contrainte K_I est nettement supérieur aux facteurs K_{II} et K_{III} . Cela indique que le mode de rupture prédominant est le mode d'ouverture I.
- Quelle que soit l'orientation de la fissure, les courbes sont symétriques et se superposent. Il est remarqué que plus l'angle α augmente, plus le facteur d'Intensité de contrainte diminue, atteignant éventuellement une valeur négligeable
- Que quel que soit le matériau considéré, les courbes obtenues sont symétriques, Cela suggère que le comportement du facteur d'Intensité de contrainte est similaire pour tous les matériaux testés dans cette étude. Cela signifie que les matériaux considérés n'ont aucun effet sur le facteur d'intensité de contrainte.
- Suivant l'axe des X, la variation de l'orientation de la fissure (α) entre 0° et 30° a un effet légèrement accru sur la contrainte équivalente de Von Mises, indépendamment de la nature du matériau. Cela signifie que la contrainte maximale subie par le matériau augmente légèrement lorsque l'orientation de la fissure passe de 0° à 30° . Cependant, au-delà de 30° , l'orientation de la fissure n'a plus d'influence significative sur la contrainte équivalente de Von Mises correspondante, car toutes les courbes se superposent.
- Suivant l'axe des Y, les courbes correspondant à chaque orientation de la fissure se superposent. Quel que soit l'angle d'orientation de la fissure, la contrainte équivalente de Von Mises reste la même, En examinant les valeurs de contrainte équivalente, on constate qu'il y a une contrainte maximale pour les orientations de fissure de 0° et 45° , tandis qu'il y a une contrainte minimale pour l'orientation de la fissure à 90° . Quel que soit la nature du matériau considéré, que ce soit les fibres alfa ou le verre.
- Suivant l'axe des Z, l'orientation de la fissure n'a pas d'Influence significative sur la contrainte équivalente de Von Mises pour les matériaux alfa-verre/époxy, verre-alfa/époxy et verre-verre/époxy. Ces courbes de contrainte restent confondues et Constantes, indiquant que l'orientation de la fissure ne modifie pas la valeur de la contrainte équivalente de Von Mises, Cependant, Il est important de noter qu'il existe une contrainte minimale et constante pour le matériau alfa-alfa/époxy, indépendamment de l'orientation de la fissure. Cela suggère que ce matériau présente mauvaise résistance.



REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] BERTHELOT.J.-M, « Matériaux composites: Comportement mécanique et analyse Des structures »,1999.
- [2] Diagnostic Et Analyse Quantitative Des Défaillances Et Des Usures Des Sabots De Frein En Matériau Composite C/c Des Wagons Sntf Benbrinis I. Redjel B.pages 10-17.
- [3] Mohamed El Hadi BOURAHLI, Caractérisation d'un composite verre / époxy. Thèse doctorat, UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF 1, 2014.
- [4] Toufik ACHOUR, « Étude des techniques de réparation des structures composite endommagées », Université de Mentouri Constantine année 2010/2011.
- [5] Guesmi Abdelhamid . « Caractérisation d'un matériau composite stratifié à fibres de verre mat et tresse en flexion trois points statique» ,mémoire de master. UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA ,2016.
- [5] Jean-M Berthelot comportement mécanique et analyse des structure 5^oédition 2012 Lavoisier Paris IBBN : 978-2-7430-14507.
- [7] Nadia Bahlouli « Cours Matériaux composites /DES Mécanique avancée et stratégie industrielle » IOST-ULP.
- [8] J.AUCHER, "Étude comparative du comportement de composites à matrice thermoplastique ou thermodurcissable ", Institut National des Sciences appliquées de Rouen, Thèse soutenue le 8 décembre 2009.
- [9] A. BOUDENNE, "Etude expérimentale et théorique des propriétés thermo physiques d'matériaux composites à matrice polymère," Université PARIS XII, 2003.
- [10] Laurent Gornet."Généralités sur les matériaux composites". Ecole d'ingénieur. 2008.
- [11]"GLOSSAIRE DES MATERIAUX COMPOSITES," Centre d'animation régional en matériaux avances, 2006.
- [12] AEROSPATIALE, Matériaux composites : dans le grande mutation des structures plaquette interne, 1986.

Références Bibliographiques

- [13] Christiane el Hage ,« Modélisation du comportement élastique en dommageable de matériaux composites à renfort tridimensionnel », Thèse , université de technologie de Compiègne, France,2006.
- [14] «Glossaire des matériaux composites» - carma –Actualisation octobre 2006.
- [15] : Pierre JACQUINET « Utilisation de matériaux composites » Ed. HERMES.1991
- [16] V. Reynaud, G. Subra, M. Calderini, « Les matériaux composites », ENSCM, 1993
- [17] Y.PERROT, “Influence des propriétés de la matrice sur le comportement mécanique de matériaux composites verre/polyester utilisée en construction navale de plaisance — Cas des résines polyester limitant les émissions de styrène”, Thèse de Doctorat de l’Université de Bretagne Sud, Octobre 2006.
- [18] A. R. Blythe, ”Electrical resistivity measurements of polymer materials”, Poly Test,4 195-209, 1984.
- [19] P.NIMDUM, “dimensionnement en fatigue des structures ferroviaires en composites épais”, Thèse de Doctorat de l’école des mines de paris, Mars 2009.
- [20] Hadadi. Manel, ”Etude numérique avec comparaison expérimentale des propriétés thermo physiques des matériaux composites à matrice polymère”, Mémoire de magistère, Université de Ferhat Abbas, Sétif, Algérie.
- [21] CARMA « Glossaire des matériaux composites » Actualisation octobre 2006
- [22] M.ELAFANI, “ L’influence des nano composites Sio₂ sur les caractéristiques des matériaux”, Mémoire du projet de fin d’étude , Ecole Militaire Polytechnique, Alger. Algérie. 2018.
- [23] A. R. Blythe, ”Electrical resistivity measurements of polymer materials”, Poly Test,4 195-209, 1984.
- [24] I. rtsng d’élaboration caractérisation mécanique et h grothermiquedunstrati fié renforcé par des fibres naturelles », Mémoire de Magister, université de M’Hamed AtsGr, Boumerdes ,2014.

Références Bibliographiques

- [25] M. Haddadi, « étude numérique avec comparaison expérimental des propriétés thermoplastique des matériaux composites à matrice polymère », Mémoire de master, Université Al Hadj Lakhdar, Batna, 2011, p91F.
- [26] 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. *Methods in applied mechanics and engineering*, Vol. 195, p. 3960–3982,
- [27] Kanit, T., N’Guyen, F., Forest, S. Jeulin, D., Reed, M., Singleton, S. (2006). Apparent and effective physical properties of heterogeneous materials: Representativity of samples of two materials from food industry. *Int. Journal of Solids and Structures*. Vol. 40, p. 3647–3679.
- [28] Wang J.S. (1998). Random Sequential Adsorption, Series Expansion and Monte Carlo Simulation, *Physics A*, 254, 179–184.
- [29] Khan, K.A., Muliana, A.H. (2011). Effective thermal properties of viscoelastic composites having field-dependent constituent properties. *Acta Mech.* 209(1-2), 153-178
- [30] Kari, S., Berger, S., Gabbert, H., (2007). Numerical evaluation of effective material properties of randomly distributed short cylindrical fiber composites. *Computational Materials Science* 39, 198–204.
- [31] Terada, K., Hori, M., Kyoya, T. and Kikuchi, N., (2000). Simulation of the multiscale convergence in computational homogenization approaches, *Int. J. Solids. Struct.* (37) 2285– 2133.
- [32] Hashin, Z., Shtrikman, S., (1963). A variational approach to the theory of the elastic behavior of multiphase materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 11, 127-140.
- [33] Christensen, R.M. (1979a). *Mechanics of Composite Materials*. New York: Wiley.
- [34] Romero, P., Masad, E. (2001). Relationship between the Representative Volume Element and Mechanical Properties of Asphalt Concrete.
- [35] Al-Raoush, R., Papadopoulos, A. (2010). Representative elementary volume analysis of porous media using X-ray computed tomography. *Original Research*, 200, 69-77.

Références Bibliographiques

- [36] 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.
- [37] Segurado, J. and Llorca, J., (2006). Computational micromechanics of composites: The effect of particle spatial distribution. *Mechanics of Materials* 38, 873–883
- [38] Özdemir, I., Brekelmans, W. & Geers, M. (2008). FE2 computational homogenization for the thermo-mechanical analysis of heterogeneous solids. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 198, 602-613.
- [39] Hazanov, S., Huet, C., (1994). Order relationships for boundary conditions effect in heterogeneous bodies smaller than the representative volume. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 42, 1995-2011.
- [40] J. Chaboche, P. Suquet, *Endommagement, interfaces. Ecole d'été méthodes d'homogénéisation en mécanique des matériaux. La Londe-les-Maures, 1998.*
- [41] I. Gitman, H. Askes, L. Sluys, Representative volume : Existence and size determination, *Engineering fracture mechanics* 74,2518-2534 , 2007.
- [42] J.W. Ju, L.Z. Sun, Effective elasto plastic behavior of metal matrix composites containing randomly located aligned spheroidal inhomogeneities, Part I : Micromechanics based formulation, *International Journal of Solids and Structures* 38, 183-201, 2001.
- [43] Baker, A., and Jones, R. *Bonded repair of aircraft structures. Martinus Nijhoff Publishers, 1988.*
- [44] DJEBLOUN Youcef, « Etude Bibliographique, Chapitre III : Mécanique linéaire élastique de la rupture », Université de Biskra.
- [45] MERCIER J. pris en compte du vieillissement et de L'endommagement dans le dimensionnement de structures en matériaux composites, Thèse de doctorat, 2006, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [46] M. Shirinbayan, « Étude du comportement mécanique et de l'endommagement de divers matériaux composites smc soumis à des chargements de type dynamique, fatigue et dynamique post-fatigue », ENSAM centre de Paris, 2017

Références Bibliographiques

- [47] B. Esmaillelou, J. Fitoussi, A. Lucas, et A. Tcharkhtchi, « Multi-scale experimental analysis of the tension-tension fatigue behavior of a short glass fiber reinforced polyamide composite », *Procedia Engineering*, vol. 10, p. 2117-2122, 2011.
- [48] K.-Y. Hour et H. Sehitoglu, « Damage Development in a Short Fiber Reinforced Composite », *Journal of Composite Materials*, vol. 27, no 8, p. 782-805, août 1993.
- [49] BERTIN M, *Fatigue thermomécanique de multicouches polymères/composites*, Thèse de doctorat, 2011, Université de Poitiers.
- [50] Wisnom MR, Hallett SR. *Composites : Part A The role of delamination in strength , failure mechanism and hole size effect in open hole tensile tests on quasi-isotropic laminates. Composites Part A 2009.*
- [51] ROSSIGNOL J. PASTOR M.L. THIONNET A. *Detection d'endommagement dans les composites à l'aide d'une technologie utilisant des micro-onde et pour thermographie infrarouge. Matériaux 2010 . Nante, France, 2010.*
- [52] Eitzen D., Wadley HN. *Acoustic emission: Establishing the fundamentals. Journal of Research of the National Bureau Of Standards 1984.*
- [53] BUGAUD M., FERDINAND P., DEWYNTER/MARTY V, *Capteurs à fibres optiques pour les composites plastiques " perspectives pour les l'allègement des véhicules" , Congrès SIA « Allègement du véhicule », 1997, Paris, France.*
- [54] N. Mahmoudi, *Etude et modélisation du comportement mécanique des matériaux composites*, Thèse de doctorat, UNIVERSITE DE MOSTAGANEM , 2010.
- [55] O.O. Ochoa and J.N. Reddy., *KFinite element analysis of composite laminates* L Kuluer Academic Publishers, SMIA 7, 1992.
- [56] D. GAY : *Matériaux composites*, volume 5. Lavoisier, Paris, 2005.
- [57] W. A.M. BREKELMANS et M. G. D. GEERS: *Computational homogenization for heat conduction in heterogeneous solids. International Journal for Numerical Methods in Engineering*, pages 185–204, 2008.
- [58] P. COGNARD : *Résistance chimique et à la corrosion des composites*, juin 2004.

Références Bibliographiques

- [59] J. RENARD : Fatigue des matériaux composites renforcés de fibres continues, juillet 2010.
- [60] Zeddour Mohamed Brahim Zahera, « PREDICTION DES MECANISMES D'ENDOMMAGEMENT DANS UN MATÉRIAU COMPOSITE » Thèse de Doctorat, USTO-MB (2017/2018).
- [61] ABAQUS Finite Element Program, ABAQUS/Standard 6.14.1. Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc. Pawtuket, USA, 2014.