



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique



جامعة وهران 2 محمد بن أحمد

Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي

Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Electromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel

Spécialité : Maintenance – Fiabilité - Qualité

Thème

Comportement en rupture d'un VER hybride en matériaux composites sous une charge monotone

Présenté et soutenu publiquement par :

MANSOURI Khelil

KADRI Salih

Devant le jury composé de :

ABDI Ghezail	MCB	IMSI Université d'Oran2	Président
ADJELOUA Abdelaziz	MCB	IMSI Université d'Oran2	Examinateur
ACHACH Habib	MCA	IMSI Université d'Oran2	Encadreur

Année universitaire 2021/2022

Dédicace

Dédicace

Je dédie ce présent mémoire A mes chers parents qui ont toujours veillé sur moi, A ma famille, A Mena et Djawad et Messaoud. & A tous mes amis Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'achèvement de ce modeste travail.

Remerciements

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 et Mm ABDI 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

Résumé

الخلاصة: يهدف عملنا إلى التحليل باستخدام طريقة العناصر المحدودة، وتطور الضرر وكذلك توزيع إجهاد Von Mises على طول عرض REV المركب الهجين (الحجم الأولي التمثيلي) الذي يتكون من نفس مصفوفة الايبوكسي ومع مختلفة. تقوية الألياف (ألفا والزجاج) باستخدام كود حساب Abaqus 6.14. تم تسليط الضوء على عدة عوامل مثل طول الشق وترتيب الألياف فيما يتعلق بطرف الشق والمسافة بين الألياف المختلفة .

Abstract: Our work aims at analysing by the finite element method, the evolution of the damage as well as the distribution of the Von Mises stress along the width of a hybrid composite REV (Representative Elemental Volume) made of the same epoxy matrix and with different reinforcing fibers (Alfa and glass), using the Abaqus 6.14 calculation code. Several factors were highlighted such as the length of the crack, the arrangement of the fibers with respect to the crack bottom and the distance between the two different fibers.

Résumé : Notre travail vise à analyser par la méthode des éléments finis, l'évolution de l'endommagement ainsi que la distribution de la contrainte de Von Mises le long de la largeur d'un composite hybride VER (Volume Élémentaire Représentative) constitué d'une même matrice époxy et avec différentes fibres de renfort (Alfa et verre), en utilisant le code de calcul Abaqus 6.14. Plusieurs facteurs ont été mis en évidence tels que la longueur de la fissure, la disposition des fibres par rapport au fond de fissure et la distance entre les deux fibres différentes.

Tables des matières

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I Généralités Sur Les Matériaux Composite.....	3
I.1 Introduction.....	4
I.2 Historique.....	4
I.3 Définition.....	5
I.4. Constituants Des Matériaux Composites	5
I.4.1. Le renfort	5
I.4.3. Les charges.....	11
I.4.4. Les Additifs.....	12
I.4.5. L’interface.....	12
I.5. Classification Des Matériaux Composites.....	12
I.5.1. Classification Suivant La Forme Des Constituants.....	12
I.5.2. Classification Suivant La Nature Des Constituants.....	14
I.6. But d’utilisation Des Matériaux Composite.....	15
I.6.1 Des Avantages.....	15
I.6.2. Les Inconvénients.....	16
I.7. ARCHITECTURE D’UN MATERIAU COMPOSITE.	17
I.7.1. Composites tissés.....	18
I.7.2. Les stratifiés.	19
I.7.3. Les Sandwichs.	20
I.8. Mise En Œuvre Des Matériaux Composites.	21
I.8.1. Moulages sans pression.	21
I.8.2. Moulage sous vide.	23
I.8.3 Moulage par compression.	24
I.8.4. Moulage en continu.	27
I.8.5. Moulage Par Pultrusion.	29
I.8.6. Moulage par centrifugation.....	30
I.8.7. Moulage par enroulement filamentaire.	31
Chapitre II Endommagement Des Volumes Élémentaires Représentatifs En Matériaux Composites.....	36
II.1 Introduction	37
II.2 Le concept du Volume Élémentaire Représentatif (VER).....	37

Tables des matières

II.3 Remarques sur la notion de VER	46
II.4 Techniques d'Homogénéisation des Matériaux Composites.	47
II.4.1 Homogénéisation.	47
II.5 Concepts Fondamentaux De La Mécanique De La Rupture.	49
II.5.1 Aperçu historique sur la rupture.	49
II.5.1.1 Mécanismes De Rupture Dans Les Matériaux Composites.	53
II.6 Critères et matériaux composites.	59
II.7 Théorie de la contrainte maximale.	60
II.8 Critères interactifs ou énergétiques.	60
II.9 Critères tensoriels.	60
II.10 Critères phénoménologiques.	61
II.11 Formulation d'un critère de résistance pour le matériau étudié.	61
II.11.1 Critère de résistance en mode II.	62
II.11.2 Critère de résistance en mode I.	63
II.12 Comportement mécanique des matériaux composites.	64
II.12.1 Introduction.	64
II.12.2 Description des contraintes.	64
II.12.3 Description des déformations.	66
II.12.4 Equations de compatibilité.	67
II.13 Conséquences sur l'étude du comportement mécanique des matériaux composites.	70
Chapitre III Comportement des VER Hybrides fissurés en Matériaux Composite sous une Charge monotone.	72
III.1 Introduction.	73
III.2 Modèle géométrique.	73
III.3 Maillage	74
III.4 Résultats et discussions	75
III.4.1 Variation du facteur d'intensité de contraintes KI KII KIII.	75
III.4.2 Influence des différents types de composites hybrides REV sur le rapport KI/KIC.	77
III.4.3 Influence de la position longitudinale des différents types de fibres du composite REV sur le rapport KI/KIC.	80
III.4.4 La distribution de la contrainte de Von Mises équivalente le long de la largeur du VER	87

Tables des matières

III.4.4.1 Influence de la position longitudinale des différents types de fibres du composite REV sur la distribution de la contrainte équivalente de Von Mises.....	87
III.4.4.2 Influence du matériau composite hybride REV sur la distribution de la contrainte équivalente de Von Mises.....	89
Conclusion générale.....	92
Référence bibliographique.....	94

Nomenclature

Nomenclature

f_m : Fraction volumique de la matrice

f_i : Fraction volumique de l'inclusion

\mathbf{x} : Point matériel

\mathbf{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

E_m et E_i : sont les tenseur élastique de la matrice et l'inclusion l : La taille d'une cellule (carrée où cubique) r : La taille d'une particule (rayon)

\mathbf{r}_1 et \mathbf{r}_2 : Les tailles d'une ellipse

Nomenclature

[.] : Symbole de matrice

{.} : Symbole de vecteur

Σ

VER : Volume Élémentaire Représentatif

PBC : Conditions aux limites périodiques

Listes des figures

Liste des figures

Figure I.1 : Constituants d'un matériau composite

Figure I.2 : Les différents types de renfort de base

Figure I.3 : Différentes familles des matrices

Figure I.4 : Exemples de tissus (a) tissus plans équilibrés, (b) tissu plan non équilibré

Figure I.5 : Exemples de tissus tridimensionnels : (a) tissu tri-orthogonal, (b) tissu « 4D » (les renforts sont orientés selon les quatre diagonales d'un cube)

Figure I.6 : Exemples de stratifiés

Figure I.7 : Matériau sandwich

Figure I.8 : Principe du moulage au contact

Figure I.9 : Principe du moulage par projection simultanée

Figure I.10 : Moulage sous vide

Figure I.11 : Moulage par injection de résine

Figure I.12 : À froid

Figure I.13 : À chaud

Figure I.14 : Moulage par injection

Figure I.15 : Moulage en continu de plaques

Figure I.16 : Moulage en continu de panneaux ondulés

Figure I.17 : Moulage par pultrusion

Figure I.18 : Moulage par centrifugation

Figure I.19 : Principe de l'enroulement circonférentiel.

Listes des figures

Figure I.20 : Principe de l'enroulement hélicoïdal

Figure I.21 : Enroulement hélicoïdal continu

Figure I.22 : Enroulement polaire (Documentation Vetrotex).

Figure II.1 : schéma explicatif l'homogénéité statique.

Figure II.2 : Schéma illustratif de la taille de VER

Figure II.3 : Série de volumes de matériau analyses comme VER avec une fraction fixée (Zohdi, 2002)

Figure II.4 : (a) plusieurs cellules microstructurales de tailles différentes. (b) La convergence des propriétés apparentes aux valeurs effectives avec l'augmentation de la taille des cellules microstructurale pour différents types de conditions aux limites

Figure II.5 : Réponse de convergence en fonction du module de cisaillement μ d'un échantillon du matériau avec l'augmentation du nombre de particules

Figure II.6 : Variation du module d'Young effectif moyen et de l'erreur en fonction de la taille du VER (image adaptée par Kari et al. 2007)

Figure II.7 : Vérification de l'indépendance des conditions aux limites avec l'augmentation du volume de contrôle

Figure II.8 : Valeurs moyennes et intervalles de confiance du module de compressibilité k app en fonction de la taille du VER

Figure II.9 : Schéma de l'équivalent d'un matériau hétérogène périodique

Figure II.10 : Milieu hétérogène (a) .et milieu macroscopiquement (b) relies V.E.R

Figure II.11 : Volume élémentaire représentatif

Figure II.12 : Schématisation des trios modes de rupture

Figure II.13 : Surface de rupture associée à une faible adhérence fibre-matrice dans le cas d'un composite à fibres de carbone (Document ONERA)

Listes des figures

Figure II.14 : Surface de rupture associée à une bonne adhérence fibre-matrice dans le cas d'un composite à fibres de carbone (Document ONERA).

Figure III.1 : Modèle géométrique

Figure III.2 : Maillage

Figure III.3 : Variation des facteurs d'intensité de contraintes K_I , K_{II} et K_{III} en fonction de la largeur du VER des quatre VER (Alfa-Alfa/Epoxyde, Alfa-verre/Epoxy, verre-Alfa /Epoxy et verre-verre /Epoxy) et pour les différentes longueurs de la fissure et de l'inter-distance entre les deux fibres ($l=0.004\text{mm}$ et $d=0.04\text{mm}$)

Figure III.4 : Variation du rapport entre le facteur d'intensité de contrainte K_I et le facteur d'intensité de contrainte critique K_{IC} en fonction de la largeur du REV pour différents matériaux Alfa-Alfa/époxy, Alfa-Glass/époxy, Glass-Alfa/époxy et Glass-Glass/époxy et pour différentes longueurs de la fissure l et l'inter-distance d entre les deux fibres.

Figure III.5: Variation de la contrainte de Von Mises en fonction de la largeur du VER pour les quatre VER (Alfa-Alfa/Epoxyde, Alfa-verre/Epoxy, verre- Alfa /Epoxy et verre-verre /Epoxy) (a : $l=0.004\text{mm}$ et $d=0.04\text{mm}$; b : $l=0.004\text{mm}$ et $d=0.007\text{mm}$; c : $l=0.014\text{mm}$ et $d=0.04\text{mm}$; d : $l=0.014\text{mm}$ et $d=0.007\text{mm}$)

Figure III.6 : Variation de la contrainte de Von Mises équivalente en fonction de la largeur du REV des différents matériaux Alfa-Alfa/époxy, Alfa-Glass/époxy, Glass-Alfa/époxy et Glass-Glass/époxy et pour la longueur de la fissure $l=0.008\text{ mm}$ et différentes inter-distance d entre les deux fibres

Figure III.7 : Variation de la contrainte de Von Mises équivalente en fonction de la largeur du REV des différentes inter-distance d entre les deux fibres pour des différents matériaux Alfa-Alfa/époxy, Alfa-Glass/époxy, Glass-Alfa/époxy et pour la longueur de la fissure $l=0.008\text{ mm}$

Listes des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Caractéristiques mécaniques des fibres de verre

Tableau I.2 : Les avantages et les inconvénients du moulage sous vide

Tableau III.1 : Propriétés mécaniques des matériaux

Introduction générale

Introduction Générale

Introduction générale

Introduction générale

La technologie moderne a besoin de matériaux qui allient à la fois rigidité ; résistance mécanique, ténacité élevée et une grande légèreté. Aucun matériau simple ne permet de combiner ces caractéristiques physiques et, pour atteindre cet objectif il faut nécessairement utiliser un matériau composite. Le développement des matériaux composites est suscité par la volonté de combiner les qualités techniques au besoin d'allègement dans un même matériau. Qui, par la suite, doit s'ajuster aux solutions technologiques des problèmes à résoudre. Ces nouveaux matériaux combinent les propriétés physiques des différents matériaux utilisés pour leur fabrication. En général, les composites sont réalisés pour subir de nombreuses contraintes physiques qu'ils doivent supporter sans modification de leurs propriétés au cours de leur utilisation.

Les matériaux composites sont généralement des matériaux solides conçus par l'association de deux ou plusieurs matériaux aux caractéristiques complémentaires. Actuellement, ils connaissent un important essor dans de nombreux domaines d'activités. L'utilisation des matériaux composites croît de plus en plus dans différents secteurs technologiques (microélectronique, aéronautique, transports...).

Un matériau composite est constitué de l'assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles et de nature différente, Ils se complètent et permettent d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément ». Un matériau composite est constitué est appelée d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase continue est appelée la matrice. La phase discontinue présente usuellement des propriétés mécaniques (rigidités et résistances) supérieures à celle de la matrice et est notée renfort. Les propriétés des matériaux composites résultent des propriétés des matériaux le constituant de la distribution géométrique des renforts du taux volumique de renfort, de la nature des interfaces renfort de la matrice, du procédé de fabrication

Au cours de ces dernières années, plusieurs travaux de recherches ont été menés afin de mieux comprendre le comportement en rupture sous différents phénomènes (fissurations, impacts...etc.) des matériaux composites, afin de construire des structures plus tolérantes aux dommages.

Introduction générale

C'est dans ce cadre que s'est inscrit thème de master qu'étude le Comportement en rupture d'un REV hybride en matériaux composites sous une charge monotone

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

- Le premier chapitre présente une généralité sur mes matériaux composites. Nous présentons quelques définitions concernant ces matériaux, Nous présentons quelques définitions concernant ces matériaux, leurs Constituants, ses Classification, But D'utilisation
- Le deuxième chapitre, quant à lui, présente le volume élémentaire représentatifs (VER) et leur endommagement
- Le troisième chapitre est consacré à une étude sur le comportement de la rupture dans un matériaux composite que se compose de matrice et deux fibres.

Enfin, notre travail se conclut en présentant un conclusion générale apportés par ce travail.

Chapitre I
Généralités Sur Les Matériaux
Composite

Ch. I Généralités Sur Les Matériaux Composite

I.1 Introduction :

De nos jours, les matériaux composites ont connu un développement très remarquable car ils sont demandés dans de nombreux domaines industriels tels que l'industrie automobile, les navires, l'aviation, etc. Où les composites sont des matériaux importants par rapport aux autres matériaux traditionnels. Ils possèdent d'excellentes propriétés mécaniques et physiques telles que la légèreté, la résistance mécanique, la durabilité, un faible coût [1]. Malgré cette grande importance, ils présentent certains inconvénients tels que, manque d'adhérence et incompatibilité entre les deux propriétés hydrophobes et hydrophiles présentes dans la matrice polymérique et les renforcement car ces derniers sont hydrophiles tandis que les résines sont hydrophobes, ce qui conduit à une faible adhérence et affecte négativement l'efficacité mécanique du composite. Pour réduire ces problèmes, nous devons utiliser des méthodes qui nous permettent d'améliorer les liaisons entre les fibres et la matrice comme le traitement alcalin, le traitement avec des silanes ou encore avec d'autres produits chimiques ont permis d'améliorer la compatibilité des paille de blé avec la matrice polymérique.

I.2 Historique :

La combinaison de matériaux pour former un nouveau système de matériaux avec l'amélioration des propriétés des matériaux est un fait historique bien documenté. Par exemple, les anciens ouvriers égyptiens pendant leur mandat sous les pharaons utilisaient des pailles hachées dans des briques comme moyen d'améliorer leur intégrité structurelle même certains artisans de la Méditerranée et de l'Extrême-Orient utilisaient une forme de technologie composite pour mouler des œuvres d'art qui étaient fabriquées en superposant du papier découpé de différentes tailles pour produire les formes et les contours souhaités [2]. Les Chinois utilisaient des pailles hachées pour renforcer leurs briques et murs en terre crue. Les épées utilisées par les guerriers japonais étaient construites avec des couches de métaux. Les matériaux composites sont idéaux pour les structures qui nécessitent des rapports résistance / poids et rigidité / poids élevés [3]. La croissance rapide de la science et de la technologie composites s'est produite dans les années 1950 aux États-Unis et en Europe. L'industrie des composites a commencé à mûrir dans les années 1970 [4].

Ch. I Généralités Sur Les Matériaux Composite

I.3 Définition :

Au sens large, le mot « composite » signifie littéralement « constituer de deux ou plusieurs matériaux non miscibles ». Les matériaux composites se constituent d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue, appelée matrice. La phase discontinue et appelée le renfort ou matériau renforçant [5]. Le renfort apporte au matériau composite ses performances mécaniques, alors que la matrice a pour rôle de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de protéger les fibres vis-à-vis des agressions extérieures.

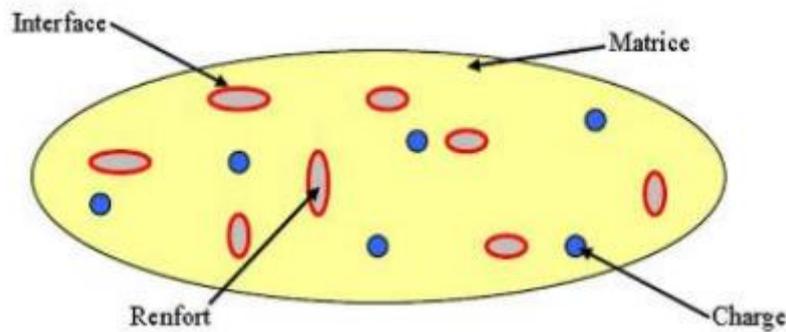


Figura I.1 : Constituants d'un matériau composite [6]

I.4. Constituants Des Matériaux Composites :

Un composite est un matériau composé de deux phases : le **renfort** et la **matrice**.

- Le renfort assure les propriétés mécaniques du matériau,
- La matrice assure la transmission des contraintes et garantit la géométrie de la pièce.

Entre le renfort et la matrice existe une zone de liaison appelée interface (interphase).

I.4.1. Le renfort :

Le renfort, souvent sous forme de fibres, sert au transfert des charges mécanique. Les fibres ont une forme remarquable dans la matrice qui possède des propriétés qui s'approchent de plus en plus de celles prévues par la théorie. Ces propriétés sont impressionnantes à cause de leur forme et des moyens de fabrication. La structure moléculaire d'une fibre est généralement alignée. Dans le sens de l'axe de fibre ce qui produit une structure forte dans cette direction. Les fibres sont donc fortes mais fines, ce qui leur confère une grande souplesse. On les commercialise essentiellement sous forme de fibres courtes ou fibres longues. Les fibres peuvent se présenter sous forme linéique, surfacique et multidirectionnelle [7].

Ch. I Généralités Sur Les Matériaux Composite

I.4.1.1. Différentes Types De Renfort :

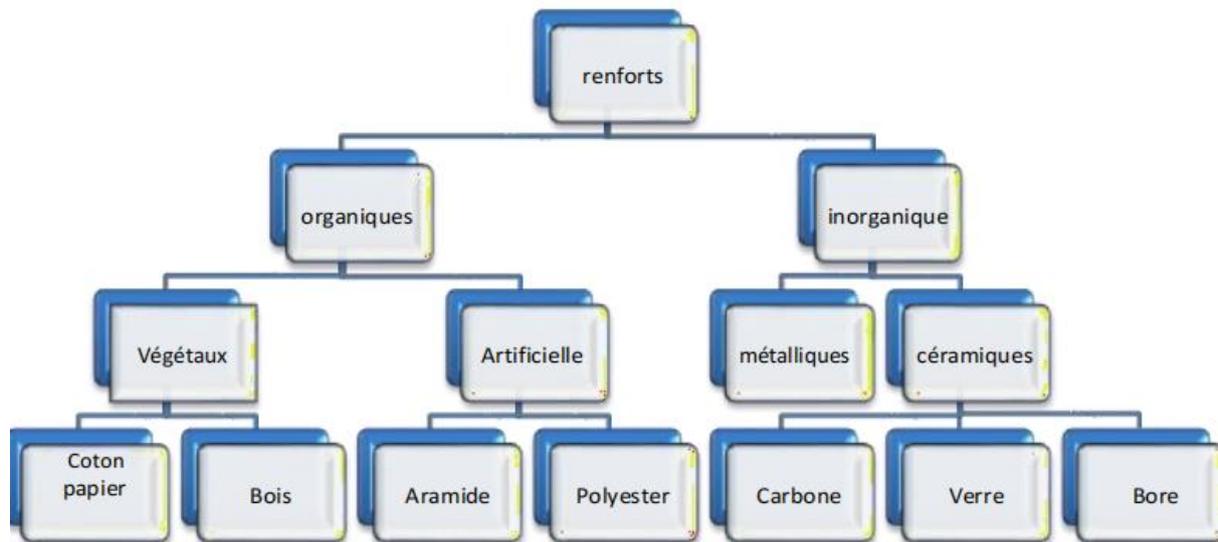


Figure I.2 Les différents types de renfort de base [8][9]

I.4.1.2. Renforts Organiques :

On cite particulièrement les fibres aramides qui ont des propriétés mécaniques élevées en traction comme les carbones mais leurs résistances à la compression est faible. La faible tenue mécanique en compression est généralement attribuée à une mauvaise adhérence des fibres à la matrice dans le matériau composite. Pour y remédier, des enzymages des fibres peuvent être utilisés. L'utilisation de composites à fibres hybrides permet également de remédier aux faiblesses des composites à fibres aramides. Des renforts hybrides de type verre-kevlar ou carbone-kevlar sont largement utilisés dans le domaine des loisirs (ski, raquette de tennis).

Quelques exemples de fibres aramides : KEVLAR (Dupont de Nemours, USA), TWARON (Akzo, Allemagne-Hollande), TECHNORA (Teijin, Japon) [10][9].

I.4.1.3. Renforts inorganiques :[12]

Les principaux matériaux inorganiques sont :

- **Les fibres de verre** : Elles sont en général fabriquées à partir de la fusion et de l'extrusion de silice associée à divers oxyde (alumine, alcalins, alcalinoterreux). On distingue différents types de fibre :
 - Verre E : le plus courant, il possède de bonnes propriétés diélectriques
 - Verre D : il est destiné aux applications de construction ou électronique, en raison de ses propriétés diélectriques supérieures aux autres fibres de verre

Ch. I Généralités Sur Les Matériaux Composite

- Verre C : il est très résistant chimiquement et est principalement utilisé pour les applications anticorrosion
- Verre R ou S : il est destiné pour les applications haute performance du fait de sa résistance en traction et son module d'élasticité supérieurs aux autres fibres de verre

Les fibres de verre sont fragiles et sensibles à l'abrasion. Pour cette raison, elles sont revêtues d'une résine ou ensimage qui a pour fonction de protéger les fibres mais qui favorise également l'adhésion de la matrice.

Les caractéristiques mécaniques des fibres de verre décrites ci/dessus sont résumées dans le Tableau 1.

Caractéristiques	Type E	Type D	Type C	Type R	Type S
Résistance en traction (MPa)	3500	2450	2800	4650	4650
Module en traction (GPa)	73,5	52,5	70	86,5	86,5
Allongement à la rupture (%)	4,5	4,5	4,0	5,3	5,3

Tableau I.1 : Caractéristiques mécaniques des fibres de verre [11]

- **Fibre de carbone :** Les fibres de carbone ont un haut module d'élasticité, de 200 à 800 GPa.

L'allongement ultime est de 0,3 à 2,5 %. Les fibres de carbone n'absorbent pas l'eau et elles résistent à plusieurs solutions chimiques. Elles présentent une résistance excellente à la fatigue, et une faible relaxation comparée à celle des aciers extensibles précontraints. La fibre de carbone est un conducteur électrique et, par conséquent, peut donner la corrosion galvanique si elle est en contact direct avec l'acier. Il faut signaler également le mauvais comportement au choc et à l'abrasion des stratifiés renforcés par des fibres de carbone. Les fibres de carbone se différencient par le taux de carbone plus ou moins élevé qui modifie les allongements et les contraintes à la rupture et les modules d'élasticité. On trouvera des fibres dites « à haute résistance » HR et des fibres « à haut module » HM ou même « à très haut module » THM, et des fibres intermédiaires [13].

Ch. I Généralités Sur Les Matériaux Composite

Les fibres de carbone sont, en général, classées selon leurs propriétés mécaniques, En particulier les propriétés en traction. En fonction de leur module de traction, les fibres de carbone peuvent être classées en 5 catégories suivantes :

- D'usage général ou pour applications thermiques (fibres UG) : $E < 200$ (GPa)
 - De haute résistance (fibres HR) : 200 (GPa) $< E < 250$ (GPa)
 - De module intermédiaire (fibres IM) : 250 (GPa) $< E < 350$ (GPa)
 - De haut module (fibres HM) : 350 (GPa) $< E < 550$ (GPa)
 - De très haut module (fibre THM) : $E > 550$ (GPa).
- **Fibre de bore** : Elles peuvent être noyées sans difficulté dans des matrices métalliques et également organiques. Pourtant leur fabrication ne se fait pas facilement. Le bore est dur, fragile, rigide et ne peut pas être étiré. Par conséquent la fabrication des fibres de bore se fait par dépôt en phase vapeur du bore sur un filament de tungstène. Les fibres de bore possèdent des propriétés élevées en traction mais il faut également noter leurs bonnes propriétés en compression [14]
- **Fibre de silice** : 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. [9]
- **Fibre de céramique** : [15] Diverses fibres de matériaux réfractaires ou céramiques (carbures, borures, nitrures, etc.) peuvent être élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Actuellement, les fibres obtenues par ce procédé, et faisant l'objet d'une production, sont :
- Les fibres de bore (B),
 - Les fibres de bore (B)-carbure de bore (B₄C),
 - Les fibres de carbure de silicium (SiC),
 - Les fibres de bore-carbure de silicium, appelées BorSiC.

Les fibres sont en réalité de gros filaments (diamètre de l'ordre de 100 µm), formés d'une âme (le fil support) en tungstène ou en carbone d'un diamètre d'environ 10 µm, recouverts :

- D'une couche de bore d'épaisseur environ 40 µm (fibres de bore),
- D'une couche de bore d'épaisseur 40 µm et d'une couche de carbure de bore de 4 µm d'épaisseur (fibres B-B₄C),
- D'une couche de carbure de silicium (fibres SiC),

Ch. I Généralités Sur Les Matériaux Composite

- D'une couche de bore et d'une couche de carbure de silicium (fibres BorSic).
- **Fibre métallique** : les fibres métalliques (acier, cuivre, aluminium) qui sont utilisées souvent avec des matrices métalliques sont appréciées pour diverses raisons telles que : leur prix de revient assez bas, leur haute capacité d'isolation thermique, leur bonne conductivité thermique et électrique, leur propriété d'isolation acoustique.[9]

I.4.2. La Matrice :

La matrice a pour rôle de lier les fibres renforts, répartir les contraintes sollicitées (résistance à la compression ou à la flexion), la tenue chimique de la structure et de donner la forme désirée au produit. Par définition, c'est un polymère ou une résine organique.[16] La maîtrise de l'élaboration de matériaux composites nécessite la connaissance des propriétés individuelles des constituants de base des matériaux. La matrice est facilement déformable et assure la protection chimique des fibres on peut retrouver les différentes familles des matrices dans l'organigramme présenté si dessous :

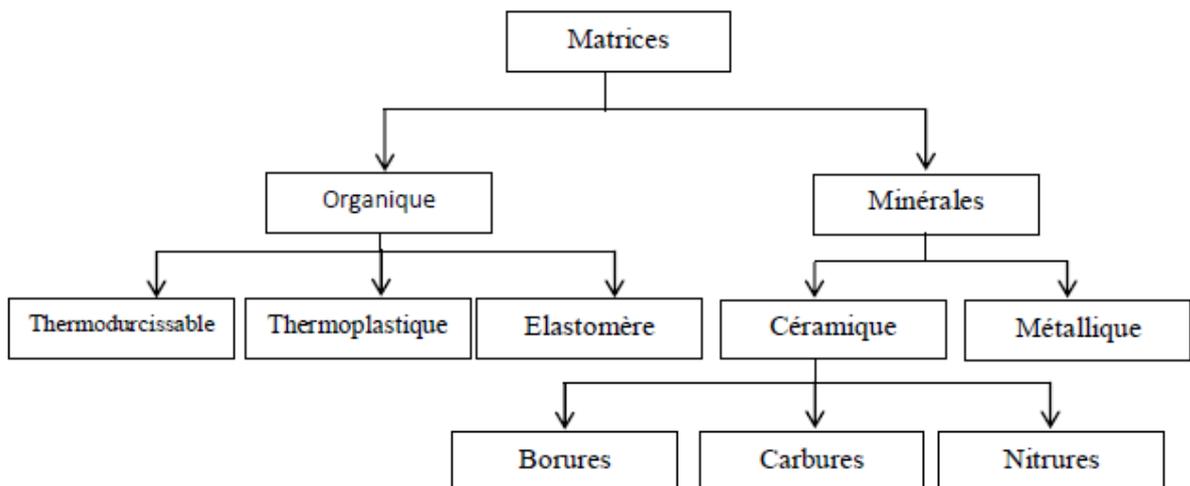


Figure I.3 : Différentes familles des matrices [16]

I.4.2.1. Matrices Organiques :

Ces matériaux possèdent de bonnes propriétés mécaniques et une faible masse volumique. Les résines les plus employées dans les matériaux composites sont les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques.[9]

Matrices thermodurcissables (TD) : Les résines thermodurcissables sont des polymères qui, après un traitement thermique ou physico-chimique (catalyseur, durcisseur), se transforment

Ch. I Généralités Sur Les Matériaux Composite

en des produits essentiellement infusibles et insolubles. Ces résines ont donc la particularité de ne pouvoir être mises en forme qu'une seule fois.[9]

Matrices thermoplastiques (TP) : Les résines thermoplastiques, en revanche, peuvent être alternativement ramollies par chauffage et durcies par refroidissement dans un intervalle de température spécifique du polymère étudié. De plus ces résines présentent l'aptitude à l'état fondu de se mouler facilement. Les élastomères sont caractérisés par une forte élasticité avec un module de Young très faible [17][9].

Les résines organiques de faible densité sont des isolants électriques et thermiques. Elles résistent à l'oxydation et à la corrosion, et permettent de réaliser des pièces de formes complexes, intégrant un maximum de fonctions [18][9].

La matrice constituant les matériaux composites de la présente étude, est une matrice thermoplastique (polystyrène et poly (méthacrylate de méthyle)).[9]

I.4.2.2. Matrice Céramique :

Pour les composites à matrice céramique (CMC), le matériau est utilisé pour des applications à très haute résistance. Les céramiques sont des matériaux fragiles. Avec les CMC, les renforts permettent d'avoir un matériau plus ductile. Les matrices les plus utilisées sont composées de carbone, de silicium de carbure (SiC), d'alumine ou de verre. Les renforts les plus utilisés sont les fibres de carbone et les fibres de silicium de carbure. Les applications des CMC sont entre autres les disques de freinage d'avion et de voiture.[9]

I.4.2.3. Matrice Métallique :

Les composites à matrice métallique ont été développés pour améliorer certaines caractéristiques des métaux ainsi que pour pallier certains inconvénients des composites à matrice organique (température d'utilisation limitée, vieillissement). Le renforcement des métaux et de leurs alliages par des fibres permet une amélioration de la rigidité, de la résistance mécanique et de la tenue à la fatigue à température ambiante (pour les métaux mous comme le plomb) mais également à température élevée (aluminium, titane). Les composites à matrice métallique actuellement étudiés ou utilisés en très faible quantité sont ceux à base d'aluminium, de magnésium ou de titane, renforcés par des fibres longues de carbone, de carbure de silicium, d'alumine ou de bore, par des fibres coupées ou des whiskeys de carbure de silicium. Ces matériaux présentent des caractéristiques mécaniques élevées et les conservent jusqu'à des températures importantes (400 °C pour l'aluminium). Ils ont une excellente tenue à

Ch. I Généralités Sur Les Matériaux Composite

l'environnement, sont insensibles aux rayons ultraviolets, présentent une bonne stabilité dimensionnelle, une bonne conductivité électrique et thermique.[19]

I.4.3. Les charges :

L'objet de la charge renforçant est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine, ou diminuer le coût des résines en conservant les performances des résines. En générales ces charges sont des microbilles ou des particules (poudre).[20]

Les principales charges utilisées sont :

- Microbille en (verre, carbone, époxyde, phénolique, polystyrène, etc. ...)
- Des poudres ou paillettes métalliques : (cuivre, fer, aluminium, etc. ...)
- Des particules de carbone (noir de carbone).

I.4.4. Les Additifs :

Ils sont nécessaires pour assurer une adhérence suffisante entre le renfort fibreux et la matrice, et de modifier l'aspect ou les caractéristiques de la matière à laquelle ils sont ajoutés [21].

Les additifs se trouvent en faible quantité (quelques % et moins) et interviennent comme :

- Lubrifiants et agents de démoulage.
- Pigment set colorants.
- Agents anti-retraits.
- Agents anti-ultraviolets.
- Accelerator.
- Catalyseur.

I.4.5. L'interface :

En plus de ces fibres et de la matrice, il faut rajouter : une interface qui assure la compatibilité renfort/matrice, qui transmet les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement relatif. Bonne adhérence en couche fine.

Des produits chimiques entrent aussi dans la composition du composite, l'interphase etc. ... qui peuvent jouer sur le comportement mécanique, mais n'interviennent pratiquement jamais dans le calcul de structure composite [21].

Ch. I Généralités Sur Les Matériaux Composite

I.5. Classification Des Matériaux Composites :

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

I.5.1. Classification Suivant La Forme Des Constituants :

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

I.5.1.1. Composites à Fibres :

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

Le concepteur possède donc là un type de matériau dont il peut modifier et moduler à volonté les comportements mécanique et physique en jouant sur :

- La nature des constituants,
- La proportion des constituants,
- L'orientation des fibres,

Suivant le cahier des charges imposées.

L'importance des matériaux composites à fibres justifie une étude exhaustive de leurs comportements mécaniques. En conséquence, le présent ouvrage sera essentiellement consacré par la suite à l'étude de ce type de matériaux. [15]

I.5.1.2. Composites à particules :

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

Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait, etc. Dans de nombreux cas, les particules sont simplement utilisées comme charges pour réduire le coût du matériau, sans en diminuer les caractéristiques.

Ch. I Généralités Sur Les Matériaux Composite

Le choix de l'association matrice-particules dépend des propriétés souhaitées. Par exemple, des inclusions de plomb dans des alliages de cuivre augmenteront leur facilité d'usinage. Des particules de métaux fragiles tel le tungstène, le chrome et le molybdène, incorporées dans des métaux ductiles, augmenteront leurs propriétés à températures élevées, tout en conservant le caractère ductile à température ambiante.

Les cermets sont également des exemples de composites métal-céramique à particules, adaptés à des utilisations à températures élevées. Par exemple, les cermets à base d'oxydes sont utilisés pour les outils de coupe à vitesse élevée, et pour les protections à hautes températures.

Également, des particules d'élastomère peuvent être incorporées dans des matrices polymères fragiles, de manière à améliorer leurs propriétés à la rupture et au choc, par diminution de la sensibilité à la fissuration.

Ainsi, les composites à particules recouvrent un domaine étendu dont le développement s'accroît sans cesse. Toutefois, compte tenu de leurs diversités, ce type de matériaux ne sera pas étudié dans le cadre de cet ouvrage. [15]

I.5.2. Classification Suivant La Nature Des Constituants :

Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés suivant des composites à matrice organique, à matrice métallique ou à matrice minérale. Divers renforts sont associés à ces matrices. Seuls certains couples d'associations ont actuellement un usage industriel, d'autres faisant l'objet d'un développement dans les laboratoires de recherche. Parmi ces composites, nous pouvons citer :

1. Composites à matrice organique (résine, charges), avec :

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

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

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

Ch. I Généralités Sur Les Matériaux Composite

3. Composites à matrice minérale (céramique), avec :

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

Les matériaux composites à matrice organique ne peuvent être utilisés que dans le domaine des températures ne dépassant pas 200 à 300 °C, alors que les matériaux composites à matrices métallique ou minérale sont utilisés au-delà :

Jusqu'à 600 °C pour une matrice métallique, jusqu'à 1000 °C pour une matrice céramique [15]

I.6. But D'utilisation Des Matériaux Composite :

Le développement des matériaux composites est lié à leurs caractéristiques : qui peut présent :

I.6.1 Des Avantages :

- **Facilité de mise en forme :** le matériau durcit et prend un aspect de surface définitif alors qu'il est positionné sur le moule. Il est ainsi possible de réaliser en une seule opération des formes qui auraient nécessité plusieurs étapes en utilisant d'autres matériaux (exemple : découpe, formage, soudure, polissage pour des tôles métalliques). La réalisation de pièces par moulage au contact nécessite un matériel d'application peu onéreux. La réalisation des moules pour ce procédé est également simple et permet donc une grande liberté dans la création des formes qui est notamment mise en œuvre dans les applications liées à la carrosserie (voitures, camions, bateaux, ferroviaire, ...). [27]
- **Légèreté :** pour des propriétés mécaniques équivalentes, l'utilisation de matériau composite à la place de métaux permet un gain de poids de près de 50 %. Cette propriété est notamment mise à profit dans le secteur automobile. [27]
- **Adaptabilité :** les caractéristiques mécaniques du composite peuvent être ajustées en jouant globalement sur le taux de fibres mais aussi localement en adaptant la quantité et le positionnement des fibres dans des zones soumises à de plus fortes contraintes mécaniques. [27]
- **Résistance à la corrosion ou à l'oxydation :** à cause de leur composition chimique à base de résine organique, les composites sont peu sensibles à la corrosion et sont très résistants aux attaques chimiques. Cette caractéristique leur donne un avantage important par rapport aux métaux pour la réalisation de réservoirs et d'équipements destinés à un usage extérieur ou en zone humide. [27]

Ch. I Généralités Sur Les Matériaux Composite

- **Isolation électrique et thermique :** le bon niveau d'isolation que procurent les matériaux composites pourrait conduire à une utilisation plus importante dans le bâtiment. Toutefois, leur emploi massif est freiné à cause de coûts élevés par rapport aux matériaux de construction traditionnels. Les composites présentent également quelques inconvénients qui limitent leurs applications :
 - La tenue en température et au feu est limitée,
 - Les résines dégagent des vapeurs de solvant notamment en phase de fabrication,
 - La fin de vie de matériaux composés d'un mélange quasi indissociable de résine organique et de fibres de verre pose des problèmes de recyclage. Il faut noter par ailleurs que les résines courantes sont fabriquées à partir de dérivés du pétrole et consomment donc une matière non renouvelable,
 - Les caractéristiques mécaniques dépendent du positionnement des fibres et ne sont donc pas homogènes dans toutes les directions,
 - Les composites sont difficilement usinables avec précision [27]

I.6.2. Les Inconvénients :

Bien que les avantages des matériaux composites soient impressionnants, ces matériaux ne sont pas une solution miracle pour toutes les applications. Des inconvénients ou des problèmes existent et peuvent empêcher leur usage. Les inconvénients les plus courants sont les suivants :

- **Coût :** Les matériaux composites hautes performances ont été développés principalement pour répondre aux besoins de la communauté aérospatiale où le coût élevé peut être toléré en échange de matériaux plus performants. Par conséquent, le transfert de la technologie des composites aux produits de grande consommation est lent, à quelques exceptions comme les équipements de sports où la performance prime également sur le coût. [27]
- **Conception et analyse :** Les matériaux composites sont souvent à la fois hétérogènes et anisotropes. Ces deux caractéristiques sont différentes des celles de la plupart des matériaux conventionnels. Elles nécessitent de nouvelles approches, généralement plus compliquées, pour la conception et l'analyse des structures. L'hétérogénéité impose l'analyse selon au moins deux points de vue. La micromécanique examine l'interaction des constituants à l'échelle microscopique. La macro-mécanique suppose que le composite est homogène et s'intéresse aux propriétés apparentes du matériau.

Ch. I Généralités Sur Les Matériaux Composite

Les matériaux anisotropes nécessitent plus de propriétés mécaniques que les matériaux isotropes pour établir les relations contrainte-déformation (les lois de comportement). Ces propriétés sont déterminées selon les directions principales du pli élémentaire (directions parallèle et perpendiculaire à l'orientation des fibres).

Pour les stratifiés composites, les rigidités sont déterminées à l'aide de la théorie classique des stratifiés. La rupture des stratifiés composites se produit de plusieurs façons très complexes. Il est donc difficile d'établir une théorie de résistance qui tienne compte de tous les modes de rupture et de leurs interactions. Par conséquent, la détermination des résistances est plus compliquée et nécessite des vérifications expérimentales. De plus, la résistance d'un stratifié peut être influencée par les contraintes inters laminaires au voisinage des bords libres. La séquence d'empilement du stratifié doit être soigneusement déterminée afin de minimiser ces contraintes. [27]

- **Assemblage** : Les matériaux composites sont généralement plus fragiles que les matériaux métalliques conventionnels. Par conséquent, la redistribution des contraintes autour des sites de concentration telle que le trou est moins efficace. La résistance et la rigidité d'un stratifié ne peuvent pas toujours être entièrement transférés par un joint. Le trou est donc souvent renforcé par des inserts métalliques ou par l'augmentation de l'épaisseur du stratifié dans la partie trouée. De tels renforcements entraînent du poids supplémentaire pour la structure. Le problème d'assemblage est donc critique pour le succès de l'emploi des matériaux composites.
- **Tolérance aux dommages** : Un des points faibles les plus importants des matériaux composites est la tolérance aux dommages. Des dommages de diverses natures peuvent se produire dans la vie d'une structure, par exemple l'impact, soit en service ou pendant la maintenance, est inévitable. En règle générale, plus un matériau est ductile, plus il est capable de tolérer l'impact car la ductilité fournit la capacité d'absorber de l'énergie. Par conséquent, les structures métalliques ont tendance de se déformer plutôt que de se fracturer sous l'impact. Le caractère fragile des matériaux composites ne permet pas, par contre, de subir l'impact sans avoir d'endommagement. Les dommages sont souvent des fissurations internes de la matrice, indétectables sur la surface de la structure. Ce type de dommages diminue considérablement la résistance en compression de la pièce endommagée. Les dommages des fibres diminuent la résistance en compression ainsi qu'en traction. Les outils pour évaluer la tolérance aux dommages des structures sont le programme d'inspection, l'analyse de la résistance résiduelle, et l'analyse de la propagation des dommages.[27]

Ch. I Généralités Sur Les Matériaux Composite

I.7. ARCHITECTURE D'UN MATERIAU COMPOSITE :

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

- Les tissus ;
- Les stratifiées ;
- Les sandwichs ;

I.7.1. Composites tissés :

Dans ces structures, les fibres sont tressées ou alignées en « câbles » nommés torons ou simplement fils, comptant chacun quelques centaines ou milliers de fibres. Ces fils sont ensuite tissés selon des motifs plus ou moins sophistiqués. Une fois la mise en forme terminée, la matrice est présente à deux niveaux : au sein des fils (I.e. entre les fibres), et au sein du tissu (I.e. entre les fils), Les motifs du tissu peuvent être extrêmement variés. De nombreux tissus sont plans (figure 1.4) et ne comportent qu'une couche de fils ; l'épaisseur de la pièce est alors obtenue en cousant plusieurs couches entre elles, ou encore en les empilant pour former un stratifié (décrit ci-dessous). Les tissus de la figure 1.4 (a) sont équilibrés, c'est-à-dire qu'ils comportent autant de fils dans les deux directions de tissage. Ils possèdent donc la même résistance et la même rigidité dans ces deux directions, mais il faut bien noter qu'ils n'ont pas pour autant un comportement isotrope : ils résistent a priori mieux en traction dans la direction des fils qu'en traction à 45° ou en cisaillement. En outre, il est possible de faire varier la proportion de fils dans les deux directions pour jouer sur cette anisotropie, lorsque le chargement appliqué à la pièce le justifie : les tissus ainsi obtenus sont dits non équilibrés (voir figure 1.4(b)) [26][9].

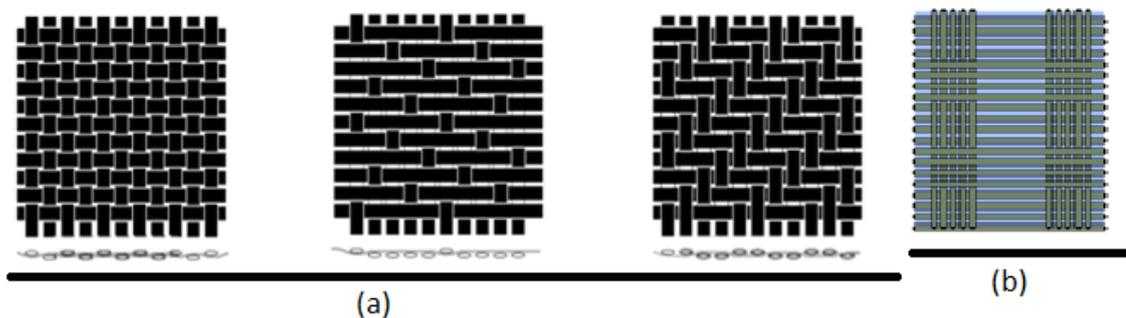


Figure I.4 : Exemples de tissus (a) tissus plans équilibrés, (b) tissu plan non équilibré [26][9]

D'autres tissus sont tridimensionnels et possèdent des fils dans plusieurs directions non coplanaires (figure 1.5). Ces tissus permettent de réaliser directement des pièces d'épaisseur

Ch. I Généralités Sur Les Matériaux Composite

variable et, par rapport aux assemblages de tissus plans, résistent mieux à l'arrachement, moyennant une fabrication plus complexe [26][9].

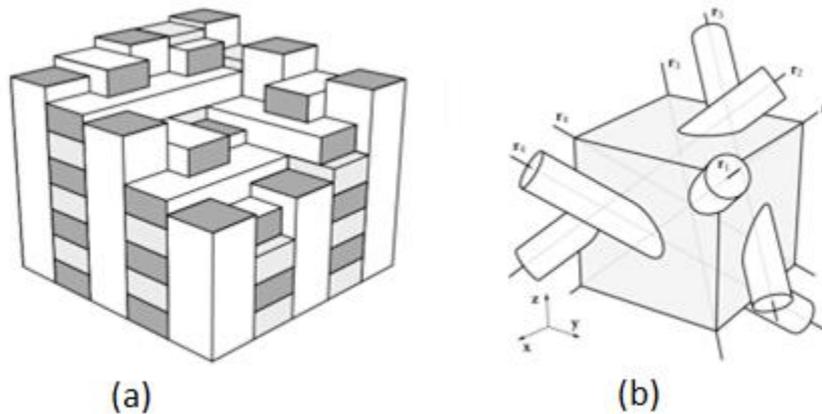


Figure I.5 : Exemples de tissus tridimensionnels : (a) tissu tri-orthogonal, (b) tissu « 4D »
(les renforts sont orientés selon les quatre diagonales d'un cube) [26] [9]

I.7.2. Les stratifiés :

Les stratifiés sont constitués de couches composites successives appelées plis. Ces plis composites peuvent être de même renfort et orientés dans des directions différentes, ou de renforts différents dans le cas d'un stratifié hybride.

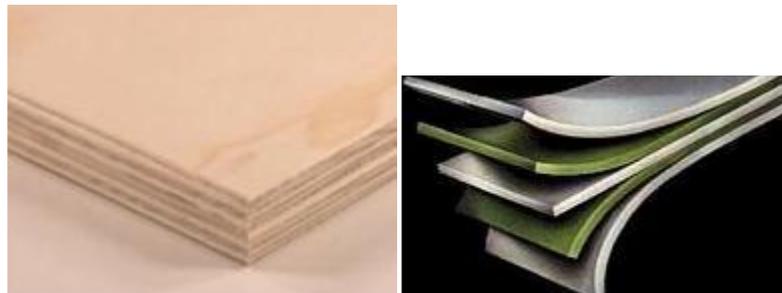


Figure 1.6 : Exemples de stratifiés [24]

En général, le renfort de chaque pli du stratifié se caractérise par sa nature (carbone, lin, verre, etc.) et sa présentation (fils, mat, tissu). Les architectures de stratifiés en termes de disposition des couches sont aussi très variées (orientation des renforts, empilement symétrique ou antisymétrique, répétition de séquence, etc.). Le choix de renfort et d'architecture du stratifié dépendra donc de l'utilisation du matériau composite en l'adaptant au mieux au champ des contraintes imposé [25] :

Ch. I Généralités Sur Les Matériaux Composite

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

Les stratifiés hybrides permettent d'avoir de meilleures performances en utilisant au mieux les propriétés des diverses fibres disponibles. Parmi les différents hybrides, on peut distinguer :

- Des hybrides inter-plis, constitués d'une suite de couches, chacune de renfort différent.
- Des hybrides intra-couches, constitués par une séquence de couches. Dans une couche, des fibres différentes sont combinées, par exemple, par le tissage, pour former le renfort de la couche.[23]

I.7.3. Les Sandwichs :

Le principe de la technique sandwich consiste à appliquer sur une âme (constituée d'un matériau ou d'une structure légère possédant de bonnes propriétés en compression) deux peaux (possédant de bonnes caractéristiques en traction). L'objectif d'un tel procédé est de constituer une structure permettant de concilier légèreté et rigidité. Il faut que l'épaisseur de l'âme soit très élevée par rapport à celle des peaux.

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

Les types d'âmes sont : âmes pleines (en bois cellulaire, diverses mousses cellulaires, mousses syntactiques, etc.) âmes creuses (alliages métalliques légers, papier kraft, papier polyamide, etc.), âmes mixtes. Les peaux sont le plus souvent des stratifiés (verre, carbone, kevlar, etc.) ou des feuilles en alliages légers.

Ch. I Généralités Sur Les Matériaux Composite

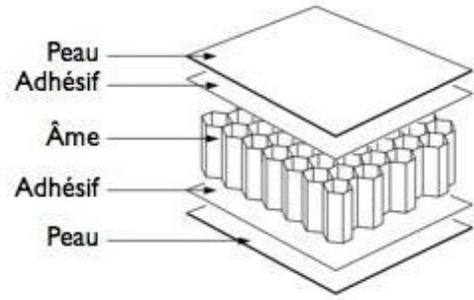
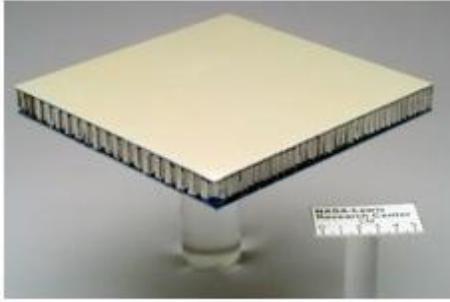


Figure I.7 : Matériau sandwich

Pour que les structures sandwich jouent pleinement leur rôle, il est nécessaire de veiller à avoir une solidarisation parfaite de l'ensemble âme-peaux, de manière à répartir les efforts entre âme et peaux. L'assemblage est réalisé par un collage à l'aide de résines compatibles avec les matériaux en présence.[23]

I.8. Mise En Œuvre Des Matériaux Composites :

I.8.1. Moulages sans pression :

Les méthodes de moulage à froid et sans intervention d'une presse sont les méthodes les plus simples à mettre en œuvre. Elles nécessitent un minimum d'équipement et par conséquent d'amortissement. Cette facilité a été à l'origine du succès des matériaux composites à fibres de verre, dans l'industrie et l'artisanat.

Ces méthodes permettent la réalisation de pièces en petites et moyennes séries, sans restriction de formes et dimensions. Bien que la proportion de fibres puisse varier, elle reste toutefois limitée. Les pièces comportent une seule face lisse, reproduisant l'aspect du moule. Enfin, la qualité de la pièce moulée dépend dans une large mesure du savoir-faire du mouleur.[15]

I.8.1.1. Moulage au contact :

Avant moulage, le moule est revêtu d'un agent de démoulage, puis généralement d'une fine couche de résine de surface, souvent colorée, dénommée "gel Coat".

Ch. I Généralités Sur Les Matériaux Composite

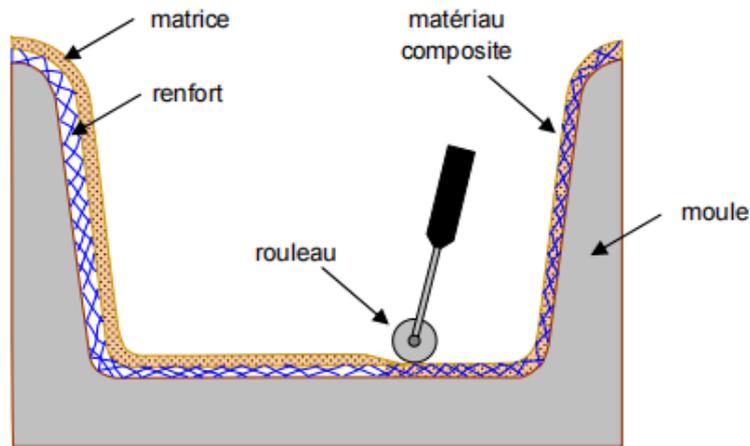


Figure I.8. Principe du moulage au contact.[15]

Le moulage est ensuite effectué selon les opérations suivantes :[15]

- 1- Le moule est enduit avec de la résine catalysée et accélérée, au pinceau ou au rouleau.
- 2- Le renfort : mat, tissu, etc., est disposé dans le moule. Divers types de renforts peuvent être utilisés suivant les différentes parties de la pièce. Les renforts doivent alors se superposer.
- 3- Le renfort est ensuite imprégné avec la matrice, puis un ébullage est effectué avec un rouleau cannelé.
- 4- Après gélification de la première couche, les couches suivantes sont appliquées, en utilisant la même technique. Des inserts peuvent être mis entre ces couches : tubes, vis, écrous, armatures, etc.
- 5- Le démoulage est ensuite effectué après un temps qui dépend de la résinée de la température (de l'ordre de 10 heures).
- 6- La polymérisation est ensuite effectuée en milieu ambiant pendant plusieurs semaines. Cette polymérisation peut éventuellement être accélérée par étuvage (par exemple 5 à 10 heures, aux environs de 80 °C).
- 7- Après polymérisation, on procède à la finition de la pièce : ébarbage, ponçage, éventuellement peinture, etc.

I.8.1.2. Moulage par projection simultanée :

Le moulage est effectué par projection simultanée de fibres coupées et résine catalysée sur un moule. L'équipement à projeter est constitué d'une machine à couper le stratifil et d'un pistolet projetant la résine et les fibres coupées, l'ensemble fonctionnant par air comprimé. La couche

Ch. I Généralités Sur Les Matériaux Composite

de fibres imprégnées de résine est ensuite compactée et débarrassée des bulles au rouleau cannelé.

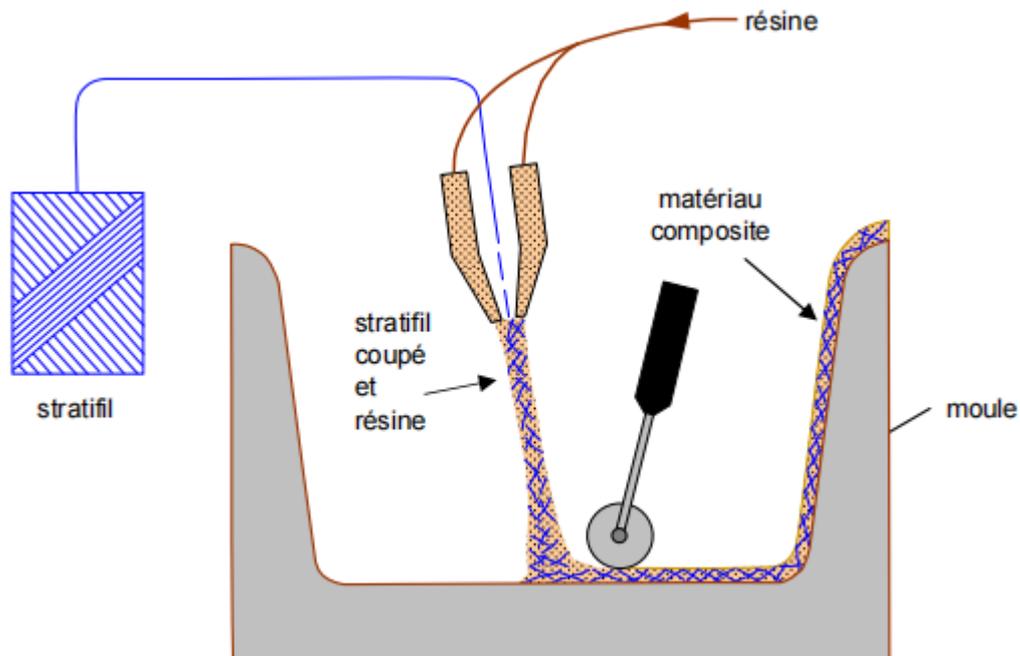


Figure I.9. Principe du moulage par projection simultanée.[15]

Le moulage par projection permet d'obtenir de grandes séries de pièces, avec un bas prix de revient. Le renfort est toutefois limité à des fibres coupées, et les caractéristiques mécaniques du matériau restent moyennes.

Il est possible d'obtenir deux faces lisses en utilisant un moule et contre-moule, chargés séparément, puis accolés. Ce procédé réserve également la possibilité d'interposer une couche de tissu entre les deux, et permet alors d'obtenir des pièces ayant de meilleures caractéristiques mécaniques.[15]

I.8.2. Moulage sous vide :

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

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

Ch. I Généralités Sur Les Matériaux Composite

La résine peut également être injectée par l'aspiration consécutive au vide.[30][29]

Le tableau suivant représente les avantages et les inconvénients du moulage sous vide :

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

Tableau (I-2) : Les avantages et les inconvénients du moulage sous vide. [29]

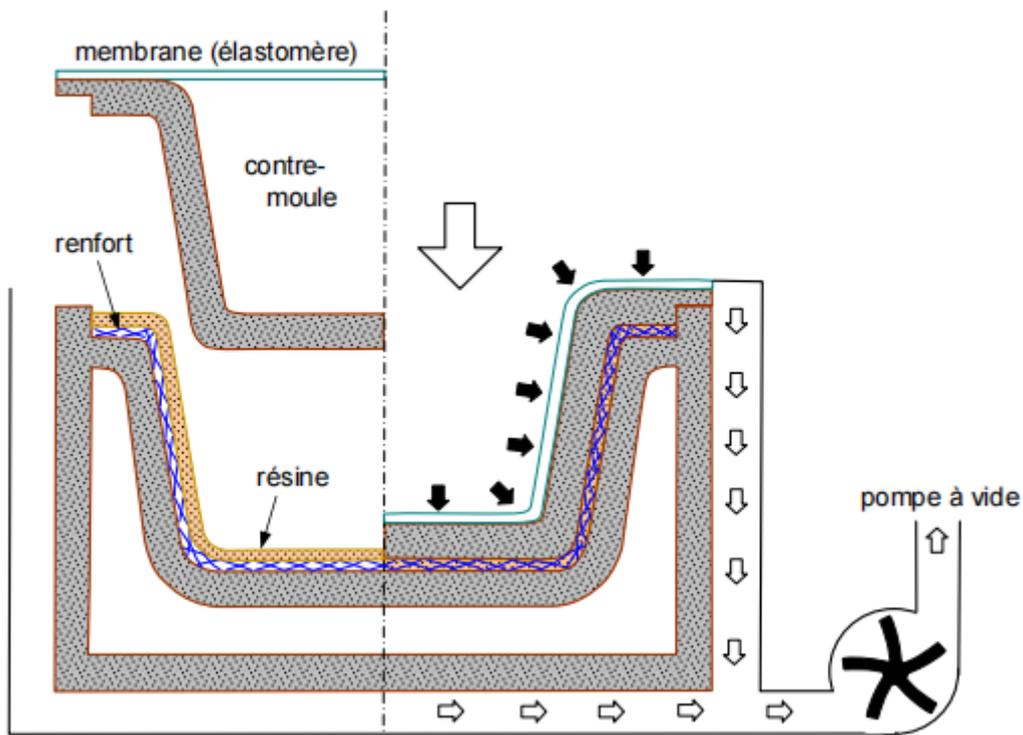


Figure I.10. Moulage sous vide.[15]

I.8.3 Moulage par compression :

I.8.3.1. Moulage par injection de résine :

Le moulage par injection de résine consiste à imprégner un renfort placé à l'intérieur d'un ensemble moule et contre-moule très rigide et fermé. L'alimentation des résines est réalisée

Ch. I Généralités Sur Les Matériaux Composite

par le vide ou par l'injection de la résine. Cette méthode permet d'atteindre des taux volumiques élevés des fibres, d'où l'obtention de pièces à caractéristiques mécaniques élevées.

Ce procédé de moulage convient à la réalisation de pièces profondes et de formes complexes [28].

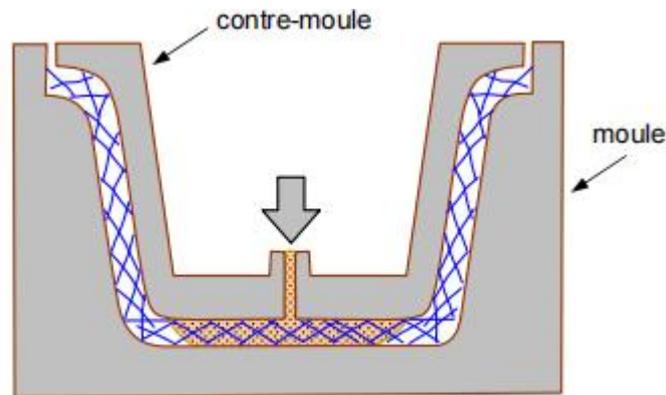


Figure I.11. Moulage par injection de résine [15].

I.8.3.2. Moulage par compression à froid :

Le moulage est effectué à basse pression (< 5 bars) sans chauffage du moule, en utilisant l'exotherme de polymérisation de la résine. L'énergie calorifique accumulée par le moulage des pièces est alors suffisante pour maintenir le moule à des températures de 50 à 70 °C, en fonctionnement permanent.

Moule et contre-moule sont enduits d'agent de démoulage et de gel-Coat. Puis le renfort et la matrice sont déposés sur le moule. L'ensemble moule/contre-moule est fermé, puis pressé. Le temps de polymérisation est lié au type de résine, au catalyseur et à la température atteinte par le moule en régime continu de production.

Ce procédé de moulage est adapté à la fabrication de pièces de moyennes séries (4 à 12 pièces par heure). L'investissement (matériel et moule) est moins important que le procédé de compression à chaud. La presse basse pression est simplifiée. Les moules peuvent être réalisés par le transformateur en matériaux composites. Les pièces possèdent un bel aspect de surface sur chaque face. La productivité est inférieure au moulage à la presse à chaud. [15]

Ch. I Généralités Sur Les Matériaux Composite

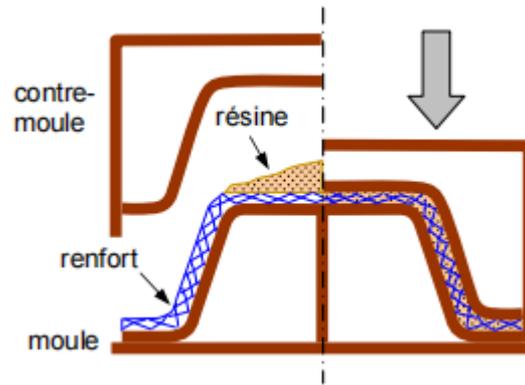


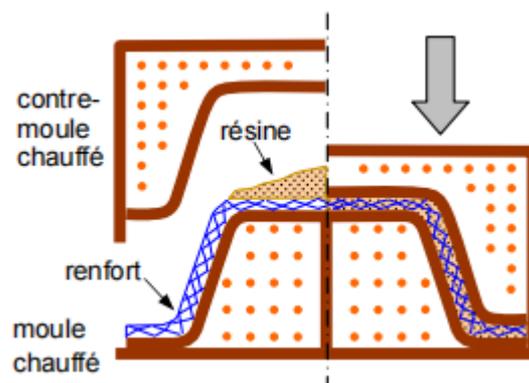
Figure I.12. À froid [15].

I.8.3.3. Moulage par compression à chaud :

Cette technique permet d'obtenir des pièces en grandes séries au moyen de presses hydrauliques et de moules métalliques chauffants.

Le renfort, constitué par du mat à fils coupés ou à fils continus, par des tissus ou par des préformes, est déposé sur le moule chauffant, enduit au préalable d'un agent de démoulage. Puis la résine catalysée est coulée en vrac sur le renfort. Le moule est fermé suivant un cycle déterminé par descente et pressage du contremoule. Le temps de pressage est lié au temps de polymérisation de la résine, fonction de la réactivité de la résine et de l'épaisseur de la pièce. Le moule est ensuite ouvert, et la pièce éjectée.

Ce procédé de moulage permet d'obtenir des proportions importantes de renfort, et par conséquent des pièces de bonnes caractéristiques mécaniques. Les dimensions des pièces sont fonction de l'importance de la presse. La pression de moulage est de l'ordre de 10 à 50 bars, la température des moules de l'ordre de 80 à 150 °C. Les cadences de fabrication peuvent atteindre 15 à 30 pièces par heure. Elles nécessitent un investissement important en matériel, presse et moule [15].



Ch. I Généralités Sur Les Matériaux Composite

Figure I.12. À chaud [15].

I.8.3.4. Moulage par injection :

La méthode de moulage par injection est la méthode la plus répandue des méthodes de mise en œuvre des thermoplastiques armés (les autres méthodes étant l'extrusion, l'extrusion soufflage, le thermoformage, etc.).

Le moulage par injection est réalisé sur les presses conventionnelles utilisées pour l'injection des résines thermoplastiques.

Des granulés comportant la résine et le renfort (fibres courtes, billes, etc.) ou des mats préimprégnés sont extrudés par une vis d'Archimède. La matrice est fluidifiée par chauffage et injectée sous pression élevée dans un moule chauffé, où a lieu la polymérisation.

Le type de matériaux obtenus est plus généralement appelé "plastiques renforcés" que matériaux composites. En effet, compte tenu de la nature des renforts (fibres courtes, sphères, etc.), la contrainte à la rupture et le module d'Young des résines sont multipliés par un facteur de l'ordre de 2 à 4. Cette technique est adaptée à la production de pièces en très grandes séries [15].

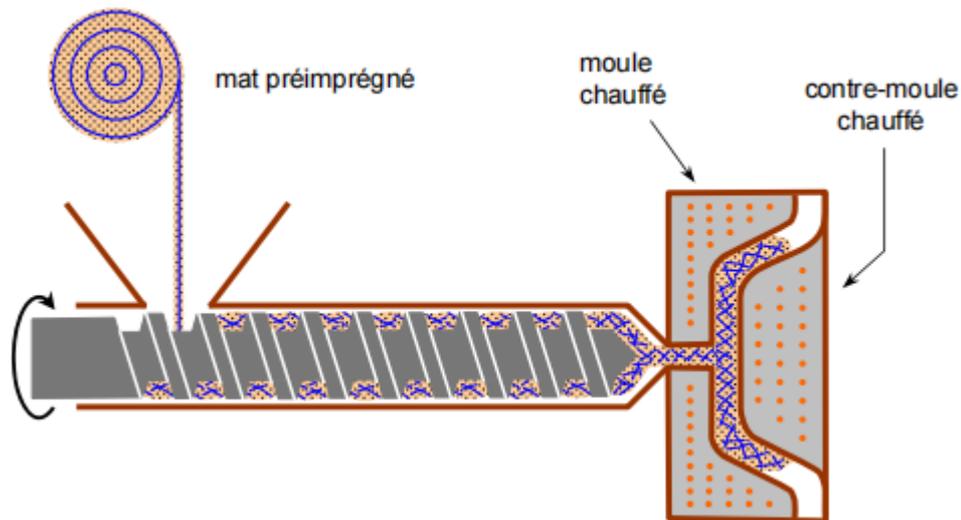


Figure I.13. Moulage par injection [15].

I.8.4. Moulage en continu :

Le moulage en continu permet la fabrication de plaques planes, panneaux, sandwichs (figure 1.13), de panneaux ondulés pour toitures (figure 1.14), plaques nervurées, etc.

Ch. I Généralités Sur Les Matériaux Composite

Schématiquement, ce procédé peut être séparé en plusieurs phases.

- 1- Une phase d'imprégnation des renforts : fibres, mats ou tissus. La résine catalysée et le renfort sont véhiculés sur un film de démoulage (cellophane, mylar, polyéthylène, etc.).
- 2- Une phase de mise en forme.
- 3- Une phase de polymérisation, effectuée dans une étuve (60 à 150 °C) en forme de tunnel, dont la longueur est fonction de la température et de la résine (15 à 50 m de long).
- 4- Une phase de refroidissement et découpage.

Dans le cas de la fabrication de plaques planes (figure 1.13), la mise en forme est simplement réalisée par une mise à l'épaisseur de la plaque, par pressage entre des rouleaux de calandrage.

Dans le cas de panneaux ondulés, la mise en forme intervient au cours de la polymérisation (figure 1.14), par l'intermédiaire de rouleaux mobiles.

Le procédé de moulage en continu peut être entièrement automatisé, et permet alors d'élaborer des plaques ou panneaux en continu. Il nécessite toutefois un investissement très important en matériel [15].

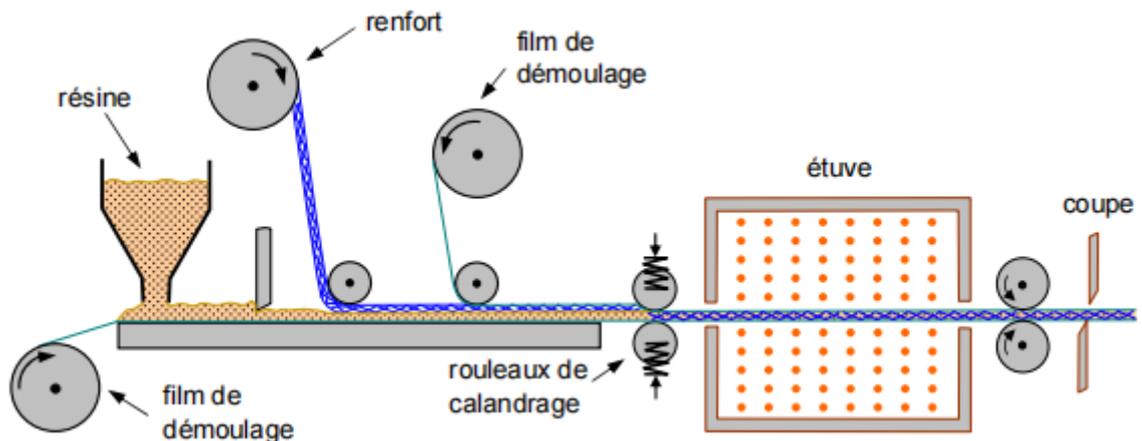


Figure I.13. Moulage en continu de plaques [15].

Ch. I Généralités Sur Les Matériaux Composite

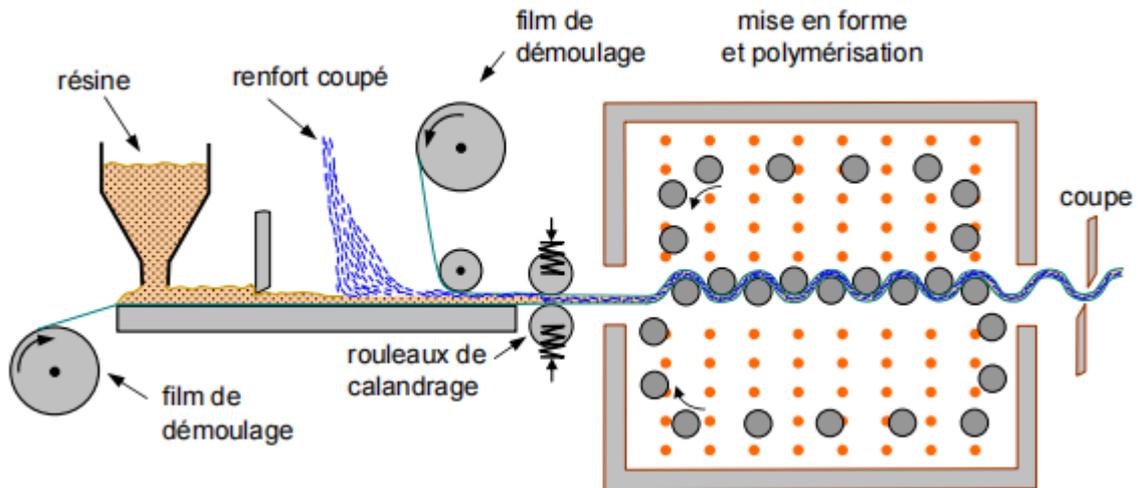


Figure I.14. Moulage en continu de panneaux ondulés [15].

I.8.5. Moulage Par Pultrusion :

Le procédé de moulage par pultrusion sert pour la fabrication de profilés, rectilignes ou courbes, à section constante, hautement renforcés dans la direction principale.

Dans cette technique (figure 1.15), les renforts : fils, stratifils, rubans, etc., passent dans un bain de résine catalysée où ils sont imprégnés. Ils traversent ensuite une filière chauffée dans laquelle ont lieu simultanément mise en forme du profilé et polymérisation de la résine. Ce procédé est applicable aux résines thermoplastiques et thermodurcissables.

Les profilés obtenus ont des caractéristiques mécaniques élevées, compte tenu de la possibilité d'obtenir des proportions de renfort élevées jusqu'à 80 % en volume. Le procédé est adapté aux productions d'assez grandes séries (vitesse de défilement jusqu'à 20 m/h). Il nécessite un investissement important de matériel. Exemples de fabrication : cannes à pêche, profilés divers, raidisseurs, etc. [15]

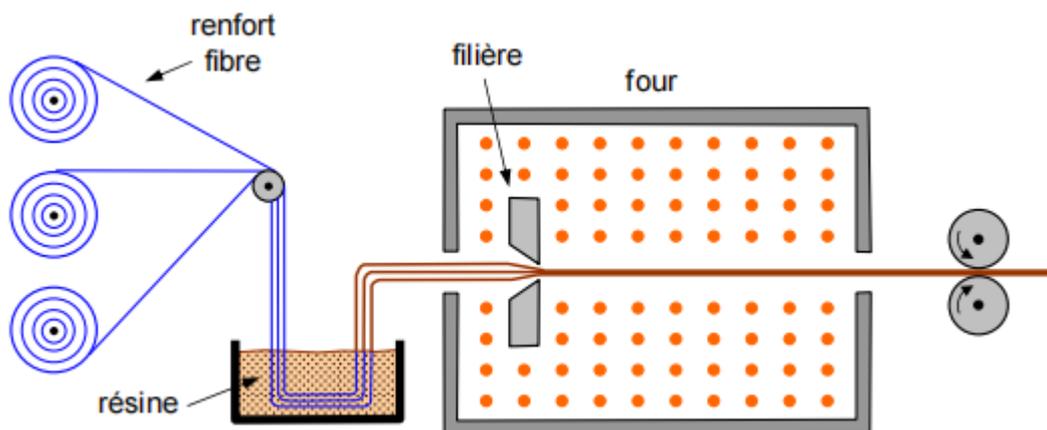


Figure I.15. Moulage par pultrusion [15].

Ch. I Généralités Sur Les Matériaux Composite

I.8.6. Moulage par centrifugation :

Cette technique est réservée au moulage de pièces de révolution, en particulier tubes, tuyaux, cuves, etc. Elle est une extrapolation (figure 1.16) de la technique de fabrication des tuyaux en fonte ou en béton centrifugé.

Le moule de révolution, enduit d'agent de démoulage, est mis en rotation (à environ 2 000 tours/min). Après dépôt éventuel de gel Coat, on introduit simultanément en continu :

- Le renfort : fibres coupées ou stratifil coupé ;
- La résine catalysée et accélérée (résines époxydes, polyesters, etc.) durcissant à froid.

L'imprégnation du renfort par la résine est réalisée sous l'effet de la centrifugation. La stratification s'effectue par passages successifs de la buse d'alimentation en résine et renfort. La polymérisation est effectuée à température ambiante, ou éventuellement accélérée dans une étuve.

Un renfort sous forme de rouleau (mat, tissu, etc.) peut être introduit éventuellement en discontinu avant rotation du moule. La résine est introduite ensuite lors de la centrifugation.

Après polymérisation, la pièce cylindrique est extraite du moule, le retrait des résines permettant le démoulage. Cette technique permet d'obtenir un bel aspect de surface à l'extérieur, avec un diamètre et une épaisseur des pièces bien calibrés. Ce processus d'élaboration nécessite un matériel de grande précision et un très bon équilibrage du moule [15].

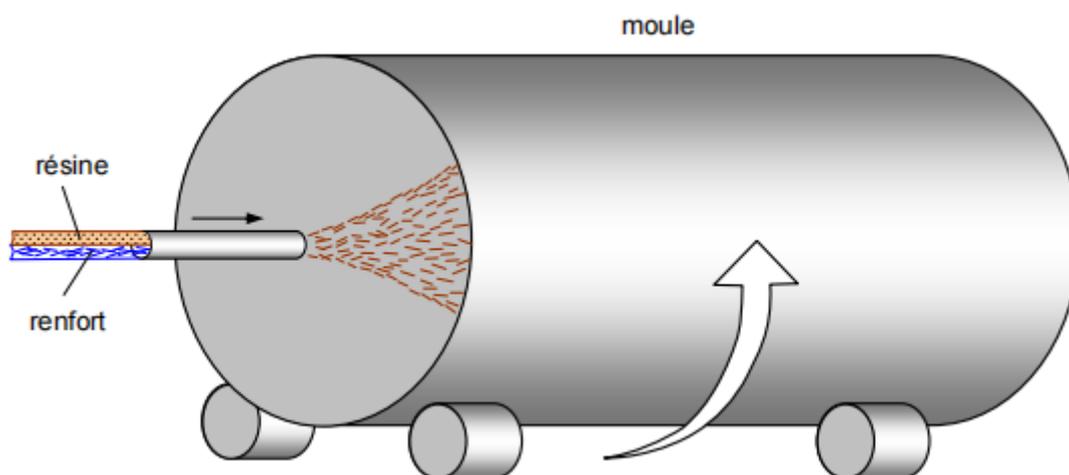


Figure I.16. Moulage par centrifugation [15].

Ch. I Généralités Sur Les Matériaux Composite

I.8.7. Moulage par enroulement filamentaire :

I.8.7.1. Principe :

Le renfort (fil continu, ruban, etc.) imprégné de résine catalysée est enroulé avec une légère tension, sur un mandrin cylindrique ou de révolution en rotation.

Ce type de moulage est bien adapté aux surfaces cylindriques et sphériques, et permet une conception avancée des pièces. Les stratifiés obtenus peuvent comporter des proportions élevées de renfort (jusqu'à 80 % en volume), permettant donc d'obtenir de hautes caractéristiques mécaniques. L'investissement en matériel est très important.

Suivant les mouvements relatifs du mandrin et du système d'approvisionnement en renfort, divers types d'enroulements (et par conséquent de stratifications) sont obtenus. On distingue : l'enroulement circonférentiel, l'enroulement hélicoïdal, l'enroulement polaire.

I.8.7.2. Enroulement circonférentiel :

Le bobinage est effectué à 90° par rapport à l'axe du mandrin et confère une résistance tangentielle élevée. Pour obtenir une résistance longitudinale satisfaisante, il est nécessaire d'intercaler des couches de tissus unidirectionnels dans le sens axial du mandrin.

Ce type d'enroulement est assez peu utilisé.

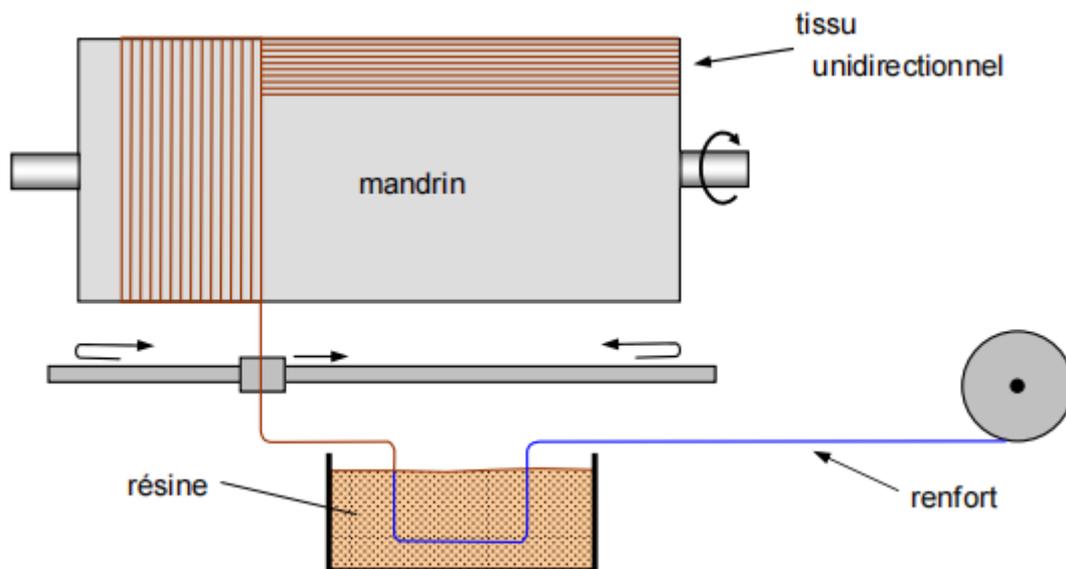


Figure I.17. Principe de l'enroulement circonférentiel.

I.8.7.3. Enroulement hélicoïdal :

➤ Enroulement discontinu :

Ch. I Généralités Sur Les Matériaux Composite

La direction d'enroulement des fils est inclinée par rapport à l'axe du mandrin d'un angle dont la valeur est déterminée par le mouvement relatif du guide-fils par rapport à la rotation du mandrin (figure 3.12). La valeur de l'angle est choisie en fonction du rapport souhaité entre la résistance tangentielle et la résistance transversale. La nappe de fils est régulièrement répartie et stratifiée sur toute la surface du mandrin par des mouvements alternatifs du guide-fils parallèlement à l'axe du mandrin. Ce type d'enroulement donne une grande liberté pour la disposition angulaire des fils. Il permet en particulier de réaliser des couches successives avec des angles différents.

Ce procédé d'enroulement a de nombreuses applications pour la fabrication de pièces de grandes dimensions comme des conteneurs, la fabrication d'enveloppes de fusées, de torpilles, de tubes de forage pétrolier, de bouteilles de gaz, etc.

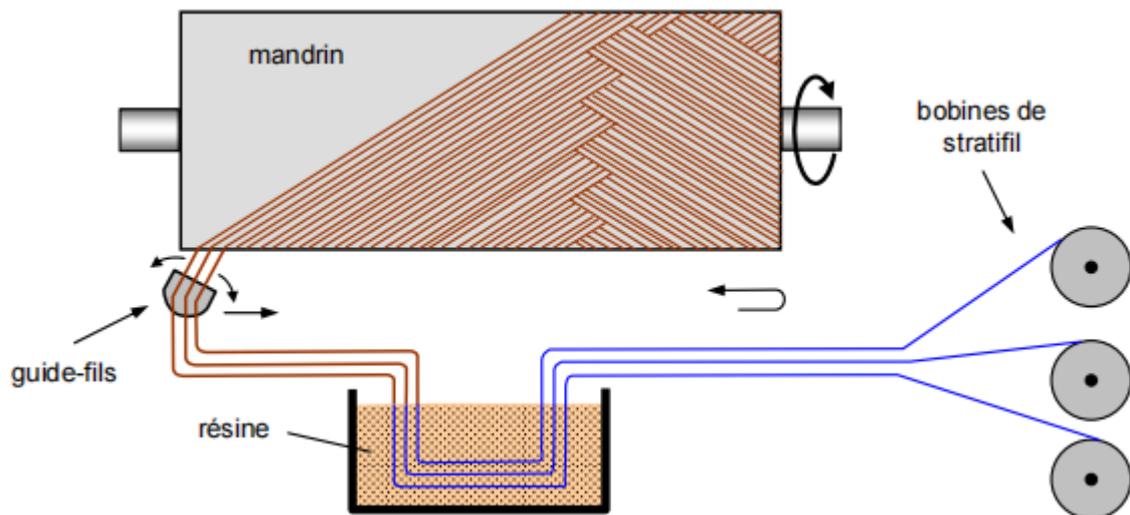


FIGURE 1.18. Principe de l'enroulement hélicoïdal.

➤ Enroulement continu :

L'enroulement continu (figure 1.19) permet la fabrication industrielle de tubes et tuyaux hautes performances de divers diamètres et grandes longueurs.

Ch. I Généralités Sur Les Matériaux Composite

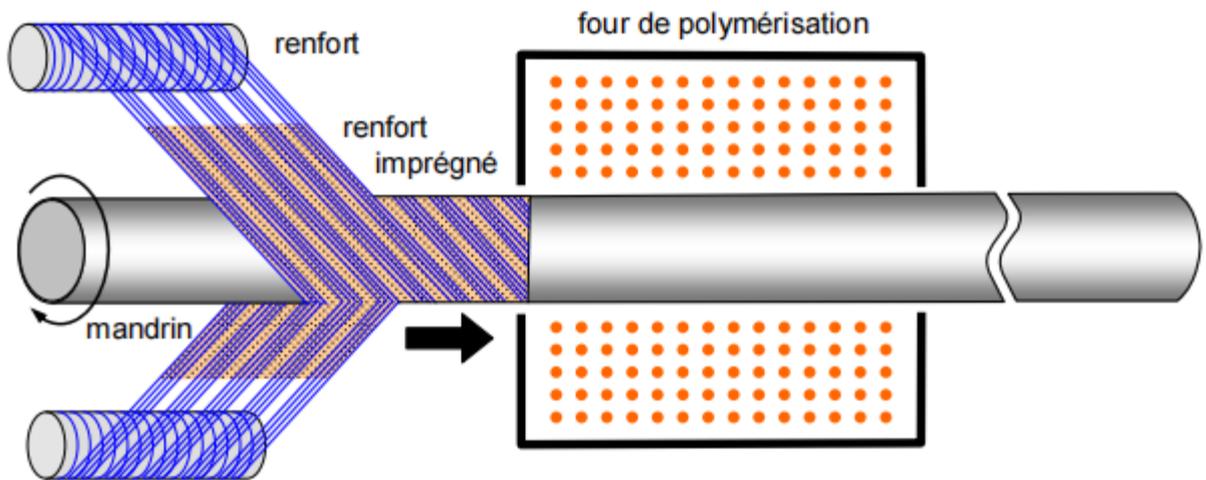


Figure I.19. Enroulement hélicoïdal continu.

I.8.7.4. Enroulement polaire :

L'enroulement polaire permet de fabriquer des pièces à extrémités sphériques sans discontinuité de l'enroulement (figure 1.20). Dans ce type d'enroulement, le mandrin doit posséder trois degrés de liberté en rotation, permettant de commander 3 rotations simultanées ou non.

Cette technologie sert à fabriquer des réservoirs haute pression, des réservoirs de moteurs de fusée, des équipements spatiaux, etc.

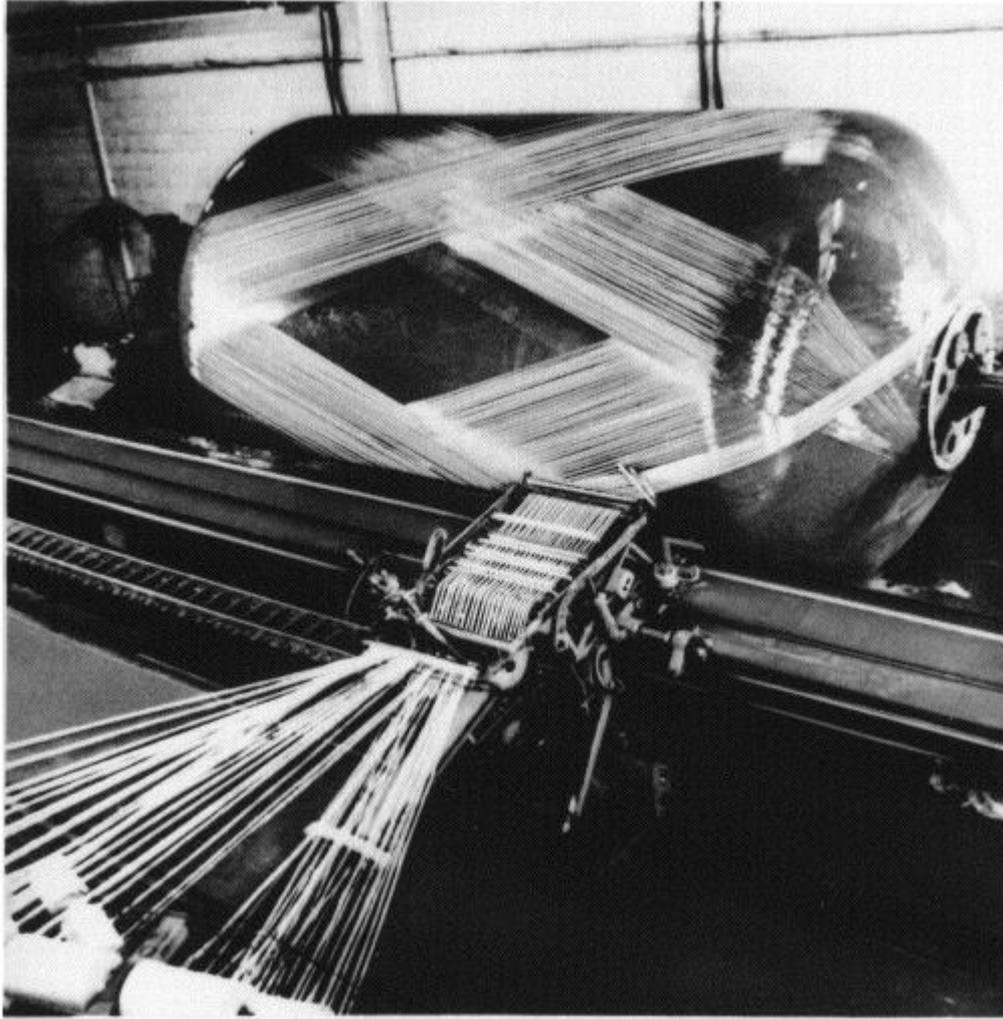


Figure I.20. Enroulement polaire.

I.8.7.5. Mandrins :

Les mandrins pour l'enroulement filamentaire doivent permettre le démoulage. Ils peuvent être :

- En métal, en bois, etc., monobloc ou en plusieurs éléments démontables ;
- En matériau à bas point de fusion ;
- En matériau soluble : par exemple grains de sable agglomérés dans un liant soluble dans l'eau ;
- En élastomère gonflable.

I.8.7.6. Applications :

Les applications de l'enroulement filamentaire ont été dégagées dans les paragraphes précédents. D'une manière générale, ce processus de mise en œuvre est utilisé pour fabriquer des pièces ayant une symétrie de révolution : tuyaux, tubes, réservoirs, bouteilles de gaz,

Ch. I Généralités Sur Les Matériaux Composite

enveloppes cylindriques, etc. Des pièces de grandes dimensions peuvent être réalisées : conteneurs, silos, etc. Les dimensions des pièces sont limitées par le type de machine utilisée. L'intérêt de l'enroulement filamentaire réside également dans la possibilité d'une automatisation assistée par ordinateur.

Le procédé d'enroulement filamentaire est également applicable à des pièces sans symétrie de révolution : pales d'hélicoptères et de turbines, réservoirs à sections rectangulaires, etc.

Chapitre II

Endommagement Des Volumes Élémentaires Représentatifs En Matériaux Composites.

CH II Endommagement Des Volumes Élémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

II.1 Introduction :

Les fibres vues à l'échelle microscopique, utilisées pour le renforcement de matrice polymère sont généralement des fibres continues et discontinues, les premières (Bore, Verre, Kevlar...) dont les coûts des matières premières, les méthodes de mise en œuvre et les faibles capacités de production, font que ces composites ont des prix de revient plus élevés se limitant aux applications de hautes performances telles que l'aéronautique et l'aérospatiale. L'écart entre les propriétés de ces fibres ainsi que les polymères non renforcés sont comblés par les fibres discontinues. Très longtemps, les propriétés des polymères ont été modifiées en utilisant des renforts pour optimiser les propriétés mécaniques. Les matériaux polymères renforcés par des fibres synthétiques, comme les fibres d'aramide, les fibres de carbone ou les fibres de verre sont très utilisés dans divers domaines d'application.

II.2 Le concept du Volume Élémentaire Représentatif (VER) :

Le Volume Élémentaire Représentatif (VER) est un concept introduit par [31], et il est largement utilisé dans l'étude des matériaux hétérogènes. Plusieurs définitions quantitatives de cet élément (VER), détaillant ces caractéristiques et les méthodes de sa détermination, sont trouvées dans la littérature. Différentes définitions du VER sont traduites par l'évaluation de leurs importances de leurs estimations des propriétés effectives du composite. Les définitions donnant la spécificité de cet élément sont énumérées ci-dessous.

Hill (1963) [31], a défini le VER comme un échantillon d'un matériau hétérogène qui remplit les deux conditions suivantes :

- i) Contiennent tous les éléments qui caractérisent la microstructure du matériau hétérogène à l'étude ;
- ii) contiennent un nombre suffisant de ces composants de sorte que les propriétés moyennes correspondant au VER sont indépendantes des conditions aux limites appliquées, à condition que les produits soient homogènes macroscopiquement.

Le VER doit être choisi suffisamment grand par rapport à la taille de la microstructure, mais il est le plus petit élément de volume du matériau composite à partir duquel le module macroscopique représentatif reste constant. Il est un modèle suffisamment précis pour représenter la réponse moyenne du comportement du matériau [32].

CH II Endommagement Des Volumes Élémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

Le VER est défini comme le volume minimal de l'échantillon à l'échelle du laboratoire, de sorte que les résultats obtenus avec cet échantillon puissent encore être considérés comme représentatifs d'un continuum [33].

Un VER est le volume de matière minimale, contenant suffisamment de mécanismes de déformation. L'augmentation de ce volume ne devrait conduire ni à des changements d'équations d'évolution pour les différents champs de valeurs, ni à des changements de description de ces mécanismes [34].

Le VER est un échantillon de matière à utiliser pour déterminer les propriétés effectives du modèle macroscopique homogénéisé. Le VER doit être suffisamment grand pour contenir suffisamment d'informations sur la microstructure afin d'être représentatif, mais il doit être beaucoup plus petit que le corps macroscopique [35].

Hashin, (1983) [35], indique que le VER doit être grand par rapport à la taille et l'espacement de cette microstructure typique présent à l'intérieur. Il établit également le concept d'homogénéité statistique des matériaux hétérogènes et la nécessité de son existence à la détermination de l'élément de volume représentatif. Il est défini statistiquement microstructure homogène, comme celui dans lequel ses caractéristiques microstructurales sont les mêmes dans tout élément de volume analysé, indépendamment de leur emplacement. En se appuyant sur la figure I.3, s'il y a une homogénéité statistique, les caractéristiques de la microstructure des volumes V_1 , V_2 et V_3 sont égaux [36].

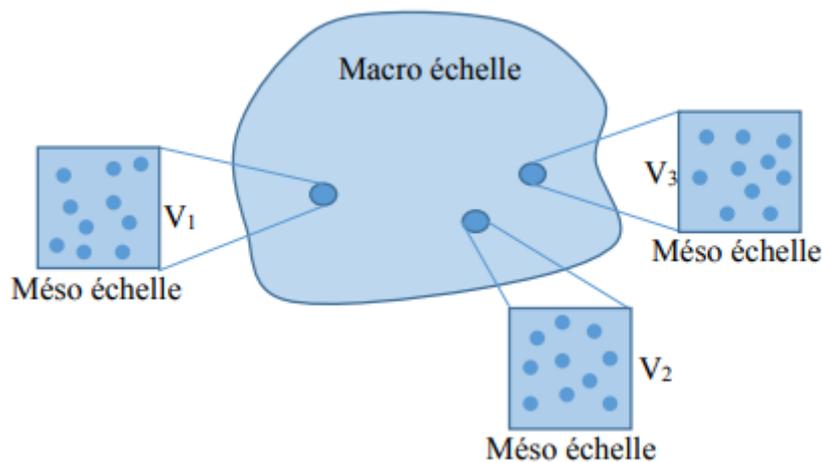


Figure II.1 : schéma explicatif l'homogénéité statique.

Les définitions précédentes suggèrent que le VER devrait avoir une représentation suffisante des micro-constituants du matériau analysé. Par conséquent, doit être grande par rapport à la

CH II Endommagement Des Volumes Élémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

taille caractéristique de cette particule dans la microstructure, mais en même temps doit être faible par rapport aux dimensions des structures à l'échelle macroscopique, parce que dans le même sera tenu compte des détails de la microstructure d'être l'analyse de l'ordinateur portatif. En résumé, il doit satisfaire à la relation $L_1 \gg L_2 \gg L_3$ (figure 2.1)

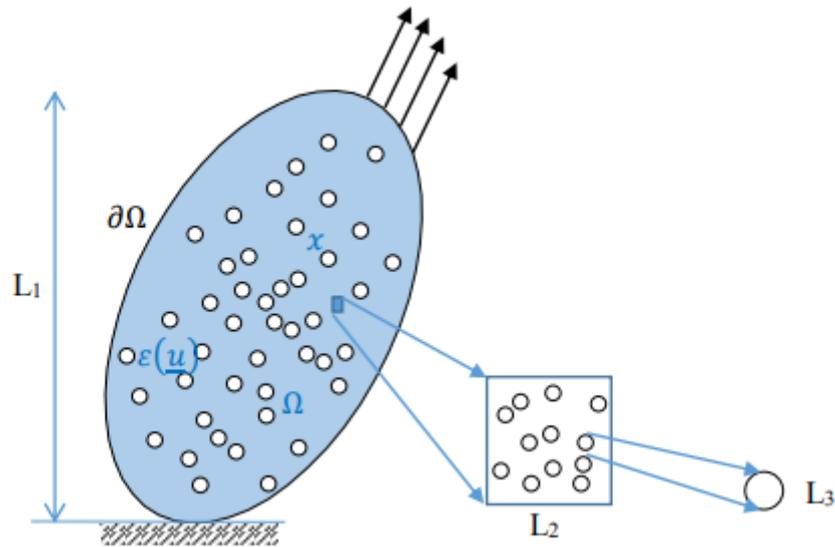


Figure II.2 : Schéma illustratif de la taille de VER [37]

Malgré la controverse concernant l'utilisation de l'un ou l'autre critère [38], les deux ont été utilisés avec succès [39][40], et on vérifie que la taille de VER est influencée par des facteurs tels que le degré de dispersion de la fraction du volume des micro-constituants de celui-ci, à la différence des propriétés mécaniques, des biens qui soit homogénéisation, entre autres

La détermination de la taille de VER est effectuée en résolvant des problèmes des échantillons de valeurs micro-constituants dans lequel on vérifie la réponse moyenne des variables de champ [37]. Habituellement, il va augmenter le nombre d'échantillons dans les micro-constituants, en gardant les fractions de volume constant (figure 2.3)

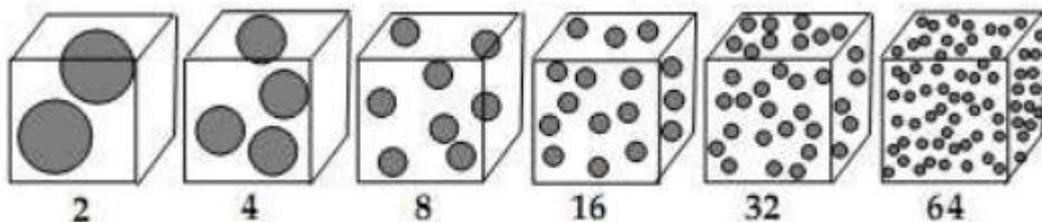


Figure II.3 : Série de volumes de matériau analyses comme VER avec une fraction fixée [37]

CH II Endommagement Des Volumes Elémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

Selon les définitions précédentes, le VER sera considéré comme un échantillon représentatif d'un matériau dans lequel une des propriétés homogénéisées sont indépendants des conditions aux limites (figure II.3) [41][42][43][44] [45][39][46] puis celui pour lequel il est établi l'homogénéité statistique (figure II.4)

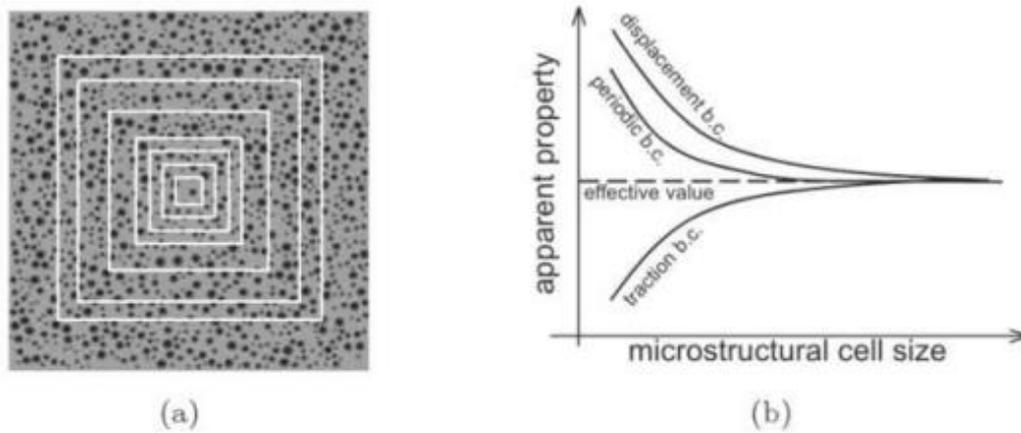


Figure II.4 : (a) plusieurs cellules microstructurales de tailles différentes. (b) La convergence des propriétés apparentes aux valeurs effectives avec l'augmentation de la taille des cellules microstructurale pour différents types de conditions aux limites

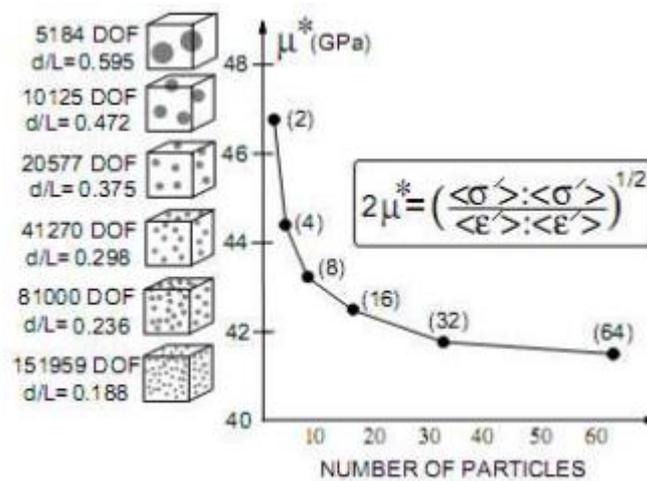


Figure II.5 : Réponse de convergence en fonction du module de cisaillement μ d'un échantillon du matériau avec l'augmentation du nombre de particules

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

CH II Endommagement Des Volumes Élémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

nombre d'hétérogénéités. [40] 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, [47] 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 [48] 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 été déterminé à partir de la variation d'une propriété effective. [49] ont introduit une définition du VER qui découlait de la définition de [40]. 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.

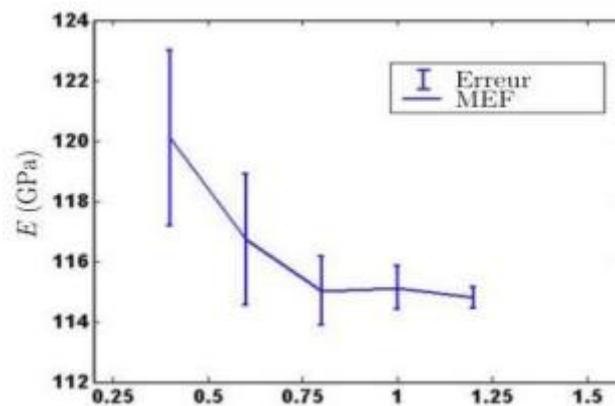


Figure II.6 : Variation du module d'Young effectif moyen et de l'erreur en fonction de la taille du VER [47].

Dans le cas de l'homogénéisation élastique linéaire, [39] 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 2.6, 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.

CH II Endommagement Des Volumes Élémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

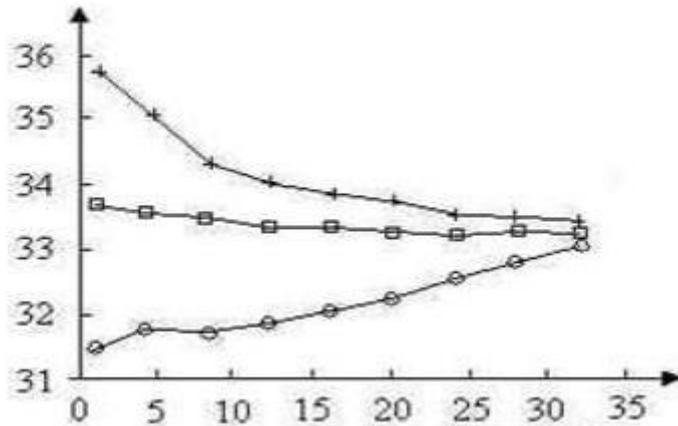


Figure II.7 : Vérification de l'indépendance des conditions aux limites avec l'augmentation du volume de contrôle [39].

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 [40], dont la méthodologie peut être résumée ci-dessous :

1. Générer différentes réalisations des échantillons pour 4-5 tailles différentes.
2. Soumettre chaque échantillon à des conditions de chargements et enregistrer les propriétés effectives obtenues
3. Calculer la valeur moyenne et la variance de la propriété effective pour les tailles de volume considérées.
4. μ 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
5. 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.

CH II Endommagement Des Volumes Élémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

Les résultats 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 Voronia 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 [39] 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

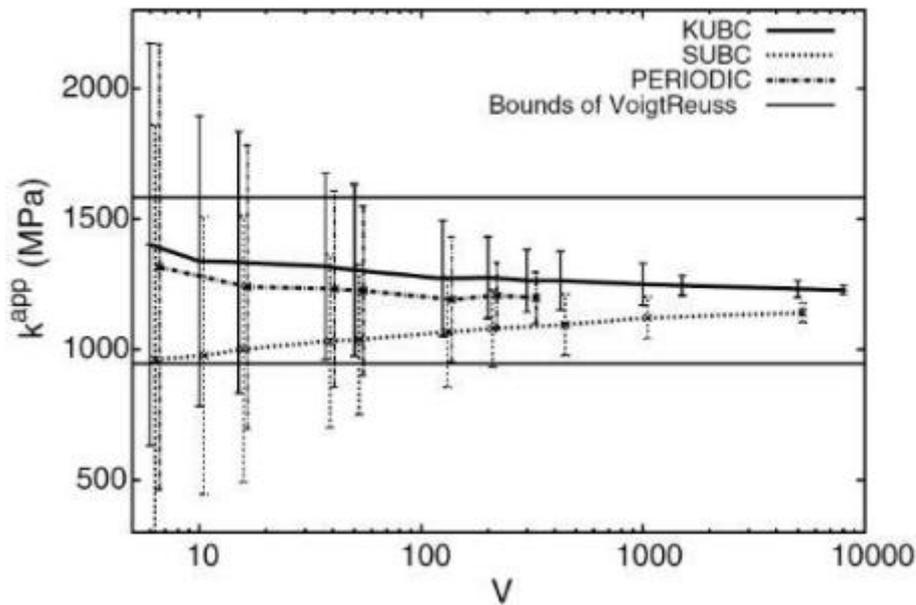


Figure II.8 : Valeurs moyennes et intervalles de confiance du module de compressibilité k_{app} en fonction de la taille du VER [40].

Il convient de rappeler que les résultats présentés par [40] sont compatibles dans le cas des bornes de Hashin-Strikman [50] et les estimations auto cohérentes de Christensen-Lo [51] 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. [52] 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 granulats devient indépendante de la taille du volume analysé et atteint une valeur constante.

La fraction volumique de granulats a été dérivée à partir de différentes zones d'images bidimensionnelles d'un béton asphaltique. Dans l'analyse expérimentale de [53], il s'agit

CH II Endommagement Des Volumes Élémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

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. [54] 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 [40] [47][55]. 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 [56]. Pourtant, ces conditions périodiques n'impliquent aucune restriction sur la géométrie de la microstructure du VE étudié [57], en plus ces conditions donnent une meilleure estimation des propriétés apparentes par rapport aux conditions homogènes [40][58].

L'approche de calcul d'homogénéisation, ainsi que la plupart des autres techniques d'homogénéisation, sont basées sur le concept d'un volume élémentaire représentatif (VER). Un VER est un modèle des matériaux de microstructure à utiliser pour obtenir la réponse du continuum macroscopique homogénéisée correspondant à un point matériel macroscopique.

CH II Endommagement Des Volumes Élémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

Ainsi, le choix approprié du VER détermine en grande partie la précision de la modélisation d'un matériau hétérogène.

L'Homogénéisation en matériaux composites dans le cas des structures périodiques est basée sur la théorie des développements asymptotiques et a été introduit dans les années 70. Parmi certains de leurs précurseurs sont [60][59]. Les principales considérations de ce type d'homogénéisation sont :

1. L'existence d'une périodicité dans la microstructure de la matière, qui, a priori, une méthode consiste à imposer la condition d'homogénéité statistique de celle-ci [39],
2. le déplacement total d'un matériau micro-hétérogénéité peut être représenté par un développement asymptotique, comprenant le déplacement de toutes les échelles [62]. Dans le cas des matériaux hétérogènes avec des milieux périodiques, la modélisation de ce type est équivalente à une structure de base d'une morphologie de cellule unitaire simple, qui joue le rôle d'un élément de volume représentatif du matériau (figure 2.9). Cette caractéristique réduit de manière significative le temps et l'effort de calcul dans l'analyse

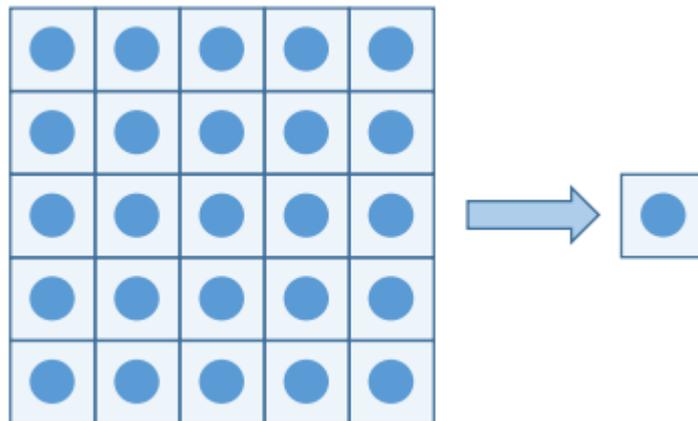


Figure II.9 : Schéma de l'équivalent d'un matériau hétérogène périodique

II.3 Remarques sur la notion de VER :

Le VER est difficile à définir car il est fonction, en particulier, de la propriété étudiée. Différents critères sont fréquemment employés pour dimensionner le VER dans le cas des propriétés thermomécaniques. Un VER doit être tel que :

- Ses propriétés moyennes n'évoluent plus lorsque ses dimensions augmentent ;
- Son comportement moyen est indépendant des conditions aux limites appliquées ;

CH II Endommagement Des Volumes Élémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

- Son comportement moyen est identique pour différentes réalisations (différents tirages aléatoires de la microstructure).

Cette approche conduit à analyser l'évolution des propriétés apparentes de VE de taille croissante et de tester différentes conditions aux limites. Fixer la taille du VER en choisissant un VE satisfaisant toutes ces conditions peut s'avérer difficile et conduire à des VER de grande dimension [63].

Une alternative est de mettre en œuvre une approche statistique en réalisant plusieurs VE de plus petites dimensions et en postulant que le comportement effectif du milieu hétérogène étudié peut être estimé en effectuant une moyenne statistique des comportements apparents de l'ensemble de ces réalisations. Une telle approche a été entreprise par [64].

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.

II.4 Techniques d'Homogénéisation des Matériaux Composites :

II.4.1 Homogénéisation :

Dans la réalité, il est illusoire de vouloir connaître la densité de probabilité d'un champ (contrainte, masse volumique, déformation, etc.) en chaque point x de la structure. L'évolution spatiale de cette dernière traduit l'ordre régnant dans le matériau et cette densité de probabilité est considérée comme définie par la loi conjointe de sa variable aléatoire sur n points $[p(x_1), p(x_2) ; \dots \dots \dots p(x_n)]$ par exemple pour la masse volumique]. On parle ainsi d'une description à 1, 2... n points [65]. Un autre point de vue consiste à apprécier loi de probabilité au point x par ses divers moments probabilistes : moment d'ordre 1 ou espérance, moments d'ordre 2 centré ou variance, etc. suivant le degré de connaissance de ces moments (1, 2,3,.. n) on parle de degré d'homogénéité du matériau [65]. On se contente en général du degré 1 qui est celui relatif à la moyenne ou à l'espérance mathématique qui introduit la notion classique d'homogénéité du matériau composite, ou du matériau statistiquement homogène. Cette notion d'homogénéité est liée à la possibilité de définir dans le matériau un volume élémentaire représentatif (V. E. R.) sur lequel moyenne spatiale du champ considéré coïncide avec la moyenne probabilité du même champ au point x . x est un point particulier de VER., en générale le centre géométrique, et ce volume élémentaire représentatif est indépendant du point x : le V.E.R. est une sorte de masque que l'on peut poser en 'importe quel point du matériau. Cette

CH II Endommagement Des Volumes Élémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

notion d'homogénéité fait donc appel à la notion générale d' périodicité qui consiste à remplacer les moyennes probabilistes par les moyennes spatiales (ou autre suivant la théorie) sur le V.E.R. le lien entre les milieux aléatoires et les milieux périodiques (milieux totalement ordonnés dans lesquels le V.E.R. est la période) a été réalisé par Kroner en 1980 [66].

Le volume élémentaire représentatif (V.E.R.) joue pour les matériaux hétérogènes le rôle classique de l'élément de volume de la mécanique des milieux continus. Afin de traduire la notion d'homogénéité d'une grandeur ou de la valeur efficace de cette grandeur ; on distingue classiquement deux échelles :

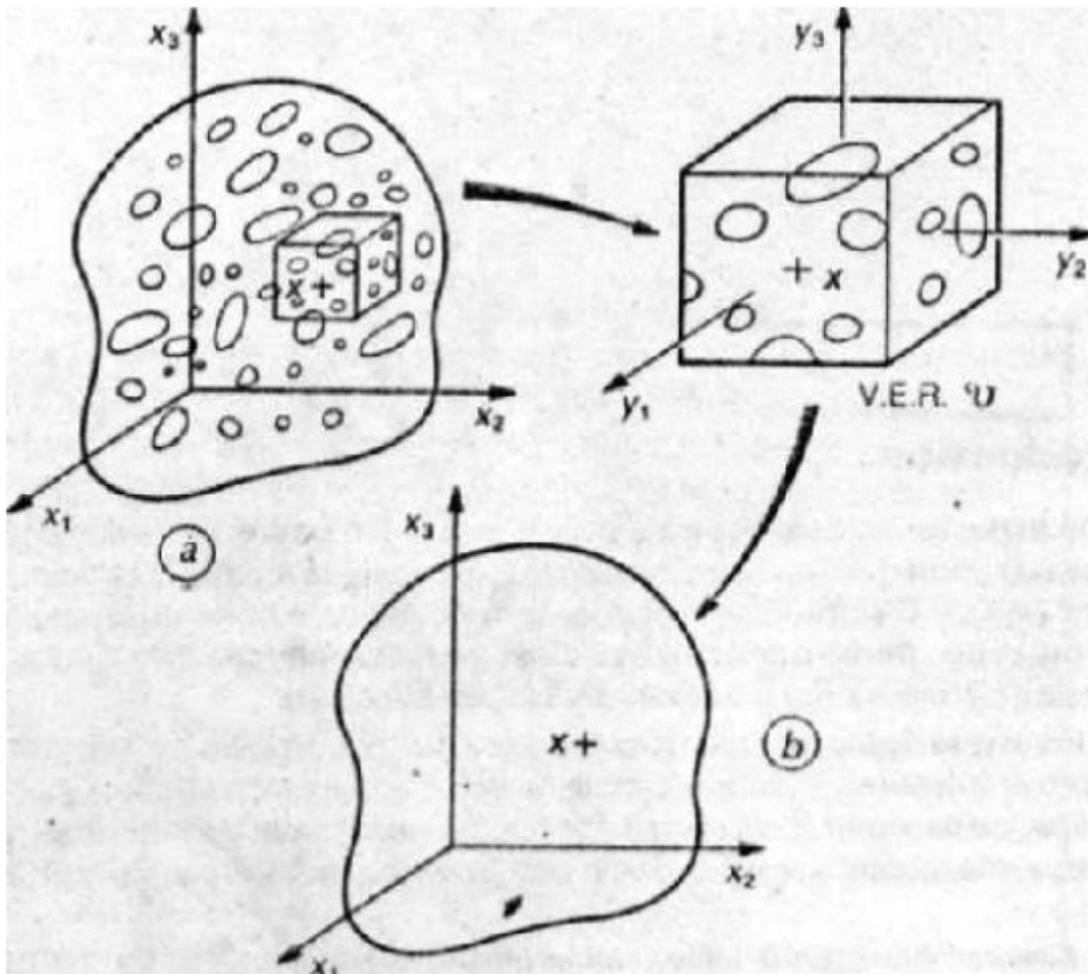


Figure II.10 : Milieu hétérogène (a) .et milieu macroscopiquement (b) relies V.E.R

- L'échelle macroscopique (notée x) qui est un point particulier du V.E.R.
- L'échelle microscopique (notée y) qui décrit.

CH II Endommagement Des Volumes Élémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

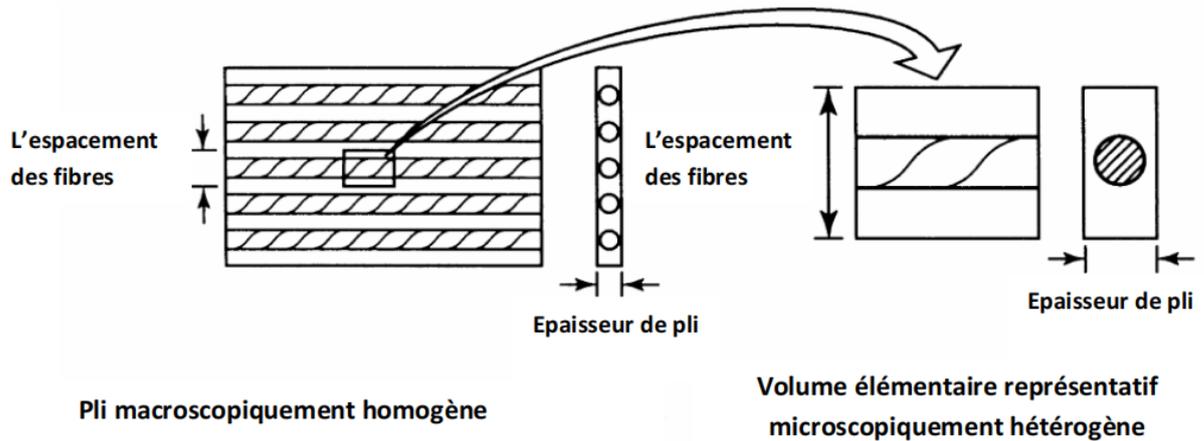


Figure II.11 : Volume élémentaire représentatif

Le milieu composite est relié au milieu homogène ou macroscopiquement homogène (Figure 2.11) par le choix ou la modélisation du V.E.R. qui définit en premier lieu les différentes théories de l'homogénéisation. Il est important de souligner que le V.E.R. ne présente aucun caractère aléatoire et n'est pas nécessairement un prélèvement du milieu composite. Les modèles de V.E.R. les plus couramment rencontrés sont :

- Des assemblages de sphères ou de cylindre à base hexagonale ou circulaire qui respectent les pourcentages volumiques de chaque phase ;
- Des milieux infinis qui sont intéressants pour les faibles concentrations de particules et sont connus sous le nom de modèles auto-cohérents (self-consistent) [67] ;
- Des cellules ou périodes de base dans le cas de milieux à structure périodique (stratifiés, tissus, etc.) [68].

Les milieux périodiques méritent une attention particulière, non seulement à cause de leur application en construction (milieux à haute performance) mais aussi à cause des méthodes mises en œuvre pour les étudier. En effet, lorsque les développements possèdent un caractère très rigoureux [69], même s'ils n'apportent pas de résultats nouveaux, ils sont très efficaces dans la justification des diverses approximations rencontrées.

La notion générale d'ergodicité va se traduire sur le V.E.R., pour les contraintes et les déformations, par les égalités suivantes :

$$\begin{cases} E[\sigma_{ij}(x)] = \overline{\sigma_{ij}}(x) \\ E[\varepsilon_{ij}(x)] = \overline{\varepsilon_{ij}}(x) \end{cases}$$

Dans lesquelles les moyennes $\overline{\sigma_{ij}}$ et $\overline{\varepsilon_{ij}}$ sont définies par :

CH II Endommagement Des Volumes Élémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{\sigma}_{ij}(\mathbf{x}) = \frac{1}{V} \int_V \sigma_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) d\mathbf{y} : \text{Contraintes macroscopiques} \\ \overline{\varepsilon}_{ij}(\mathbf{x}) = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) d\mathbf{y} : \text{Déformations macroscopiques} \end{array} \right.$$

II.5 Concepts Fondamentaux De La Mécanique De La Rupture :

II.5.1 Aperçu historique sur la rupture :

Eviter la rupture n'est pas en soi une idée nouvelle : les concepteurs des structures de l'Égypte des pharaons ou ceux de l'empire romain nous ont laissé des édifices que l'on peut encore contempler (pyramides, ponts ...). Les matériaux utilisés avant la révolution industrielle étaient cependant limités pour l'essentiel au bois de construction, à la pierre ou à la brique et au mortier. La brique et le mortier sont relativement fragiles lorsqu'ils sont utilisés en traction. Pour ces raisons, toutes ces structures anciennes (pyramides, ponts romains...) qui ont su résister au temps, étaient chargées en compression - en fait, toutes les structures de l'époque précédant la révolution industrielle étaient conçues pour des chargements en compression. Il a fallu attendre la révolution industrielle au début du 19^e siècle, avec l'utilisation de l'acier, pour pouvoir enfin concevoir des structures capables de résister à des charges de traction. La comparaison des anciens ponts romains avec les ponts modernes de structure métallique montre bien que les premiers étaient effectivement chargés en compression alors que les seconds le sont plutôt en traction.

L'utilisation de nouveaux matériaux ductiles (acier et autres alliages métalliques) pour des chargements en traction conduisit cependant à quelques problèmes. Des ruptures se produisaient parfois pour des niveaux de charges bien inférieurs à la limite d'élasticité.

Dans un premier temps, ces risques de rupture ont été réduits en sur dimensionnant les structures. Mais cette solution devint insatisfaisante compte tenu des nécessités d'une part d'alléger de plus en plus les structures, et d'autre part de réduire les coûts. La recherche en mécanique de la rupture devait donc être développée.

Les premiers essais de rupture ont été menés par Léonard de Vinci (1452-1519) bien avant la révolution industrielle : il a montré que la résistance à la traction d'un fil de fer variait inversement avec la longueur de ce fil. Ce résultat suggérait déjà que les défauts contenus dans le matériau contrôlaient la résistance de celui-ci : plus le volume est important (fil de fer long) plus la probabilité de présence de fissure est importante.

Cette interprétation qualitative fût précisée plus tard en 1920 par Griffith qui établit une relation directe entre la taille du défaut et la contrainte de rupture. S'appuyant sur les travaux d'Ingles,

CH II Endommagement Des Volumes Élémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

Griffith appliqua l'analyse des contraintes autour d'un trou elliptique à la propagation instable d'une fissure. Il formula ainsi à partir du premier principe de la thermodynamique, une théorie de la rupture : un défaut devient instable et conduit à la rupture lorsque la variation d'énergie liée à une propagation du défaut atteint l'énergie spécifique du matériau. Cette théorie prédit correctement la relation entre la contrainte de rupture et la taille du défaut dans les matériaux fragiles. Cependant, dans les matériaux ductiles et notamment dans les alliages métalliques, l'avancée d'un défaut s'accompagne d'une importante dissipation d'énergie due à la plastification qui se développe à l'extrémité d'une fissure, énergie dont la théorie de Griffith ne tient pas compte (puisqu'elle ne considère que l'énergie de création de surface). Il a fallu attendre les travaux d'Irwin en 1948 pour que l'approche de Griffith soit applicable aux matériaux ductiles : Irwin inclut dans le bilan énergétique, l'énergie due à la plastification.

La mécanique de la rupture passa du stade de curiosité scientifique à celui d'une discipline scientifique largement utilisée dans l'ingénierie de la construction, après l'expérience des bateaux de la liberté. Le principe de conception de ces bateaux avec une coque entièrement soudée remporta un grand succès jusqu'au jour où l'un de ces navires se fissa en deux parties dans les eaux froides entre la Sibérie et l'Alaska. Une dizaine d'autres navires sur les 2700 en service, subirent ensuite le même sort. Les analyses des causes de rupture montraient que celles-ci provenaient de la combinaison de trois paramètres :

- Les joints de soudures contenaient des fissures,
- La plupart de ces fissures qui conduisaient à la rupture, se développaient à partir de zones de forte concentration de contrainte,
- L'acier de construction utilisé pour ces bateaux, qui convenait pour les assemblages par rivetage (puisqu'il n'y avait pas de risque pour une fissure de traverser toute la coque), avait une faible ténacité.

Dès l'instant où la cause des ruptures était clairement identifiée, des plaques en acier de meilleure ténacité furent fixées près des zones de forte concentration des contraintes pour arrêter la propagation des fissures. On développa ensuite des aciers de forte ténacité et on améliora le procédé de soudage ; c'est dans ces années après-guerre qu'un groupe de chercheurs dirigé par Irwin étudia en détail le problème de la rupture au laboratoire national de recherche de la marine américaine.

Irwin considéra que les outils fondamentaux pour étudier la rupture existaient et proposa en 1948, une extension de l'approche de Griffith aux matériaux ductiles en y incluant le terme de

CH II Endommagement Des Volumes Élémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

dissipation d'énergie due à l'écoulement plastique près des extrémités d'une fissure. Il développa ensuite en 1956 le concept de taux de restitution d'énergie à partir toujours de la théorie de Griffith mais sous une forme facilement exploitable par les concepteurs de structures. En 1957, s'appuyant sur les travaux de Westergaard sur l'analyse des champs de déplacements et de contraintes élastiques près de l'extrémité d'une fissure sous chargement donné, Irwin montra que ces déplacements et ces contraintes pouvaient être décrits à l'aide d'un paramètre unique défini en liaison avec le taux de restitution d'énergie. Ce paramètre issu de la mécanique linéaire de la rupture, est le facteur d'intensité des contraintes (FIC).

Les nouveaux concepts de la mécanique de la rupture furent ensuite utilisés pour montrer que la plupart des ruptures dans les fuselages d'avions étaient dues à des fissures de fatigue qui atteignaient une taille critique (accidents avions Comet en 1954).

Ces fissures prenaient naissance près des hublots dans les coins qui constituent des zones de forte concentration des contraintes. Les ruptures qui se produisaient dans les essieux d'engins roulants ou encore dans les rotors des turbines à vapeur furent aussi expliquées grâce à l'application de ces nouveaux concepts. Le concept de FIC fut également utilisé par Paris et Erdogan pour décrire la propagation des fissures de fatigue : les courbes de propagation de ces fissures remplacèrent peu à peu les courbes d'endurance ; ce qui permit une meilleure prédiction des durées de vie des structures.

La période entre 1960 et 1980 vit une intensification des recherches sur la rupture avec deux écoles concurrentes. D'un côté, les tenants de l'approche par la mécanique linéaire de la rupture et de l'autre, les partisans de la plastification développée à l'extrémité d'une fissure. La mécanique linéaire de la rupture cesse d'être valable lorsqu'une plastification importante précède la rupture. Pour tenir compte de l'effet de cette plastification sur les champs de contraintes et de déplacements à l'extrémité d'une fissure, plusieurs auteurs (Irwin, Dugdale et Barenblatt ...) proposèrent une « correction de zone plastique » : la taille de la fissure est alors augmentée de cette zone plastique pour retrouver les champs de contraintes élastiques décrits par le FIC.

Wells, un des représentants de la deuxième école, proposa en 1961 le déplacement à fond de fissure - ou CTOD « Crack Tip Opening Dis placement » - comme paramètre alternatif dans le cas de plastification importante (comme par exemple, pour les matériaux très ductiles), à la mécanique linéaire de la rupture et plus précisément au concept de FIC. Plus tard, Hutchinson, Rice et Rosengren (HRR) développèrent un nouveau paramètre appelé intégrale J pour mieux

CH II Endommagement Des Volumes Élémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

décrire la répartition des contraintes dans les zones plastifiées (champ HRR). Begley et Landes caractérisèrent la ténacité à l'aide du paramètre J et développèrent une procédure standard pour l'utilisation de cette intégrale dans des cas pratiques. Shih et Hutchinson proposèrent également une méthodologie pour utiliser l'intégrale J non seulement pour décrire la ténacité mais aussi pour la relier à la taille du défaut et au champ des contraintes appliquées. Shih établit par la suite la relation existante entre l'intégrale J et le CTOD.

Si les recherches en mécanique de la rupture sont restées centrées entre 1960 et 1980 sur l'effet de la plastification, elles se sont ensuite orientées vers l'étude des comportements viscoplastique et/ou viscoélastique. Le premier type de comportement se rencontre à température élevée, lorsque les phénomènes de fluage deviennent importants, alors que le second type caractérise les matériaux polymères - de plus en plus utilisés dans l'industrie. L'apparition des nouveaux matériaux composites nécessita également l'utilisation des concepts de la mécanique linéaire de la rupture pour la description du comportement de ces matériaux.

Plus récemment, de nouvelles approches tentent de relier le comportement local à l'échelle microscopique au comportement global lors de la rupture d'un matériau. Ces approches micro-macro deviennent parfois nécessaires lorsqu'on atteint les limites d'utilisation des approches plus classique [71].

II.5.1 Mécanismes De Rupture Dans Les Matériaux Composites :

II.5.2.1 Définition :

Le mécanisme de rupture est un processus mécanique produisant au sein d'un matériau une discontinuité locale de matière appelée fissure. Il est usuel de parler d'initiation de la rupture et de propagation de la rupture. Par rapport au facteur temps.

On distingue deux types de rupture :

- Rupture fragile : la rupture fragile est caractérisée par l'absence de déformation plastique macroscopique, et donc par la propagation très rapide possible des fissures (consommation d'énergie faible).
- Rupture ductile : la rupture ductile semble liée essentiellement à la présence d'inclusion ou de précipités. Dans ce mode de rupture, la déformation plastique macroscopique est en général importante (consommation d'énergie grande).[72]

CH II Endommagement Des Volumes Elémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

II.5.2.2 MODE DE RUPTURE :

Si on considère une fissure dans un plan, on distingue selon la direction de sollicitation trois modes de déplacement des lèvres de la fissure. Ces modes indiqués sur la figure IV.2 correspondent à différentes cinématiques de déplacement des lèvres de la fissure :

- **Mode I ou mode d'ouverture** ; le champ de déplacement relatif des lèvres de la fissure est défini par :

$$u_1 = 0, \quad u_2(x_1) \neq 0, \quad u_3 = 0$$

- **Mode II ou mode de cisaillement plan** ; le champ de déplacement relatif des Lèvres de la fissure est défini par :

$$u_1(x_1) \neq 0, \quad u_2 = 0, \quad u_3 = 0$$

- **Mode III ou mode de cisaillement antiplan** ; le champ de déplacement relatif des lèvres de la fissure est défini par :

$$u_1 = 0, \quad u_2 = 0, \quad u_3(x_1) \neq 0$$

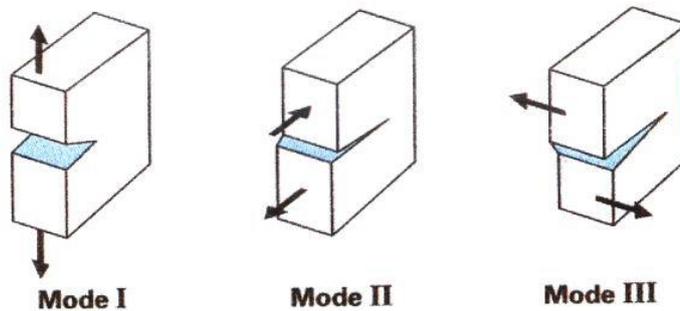


Figure II.12 : Schématisation des trois modes de rupture.

Les modes I et II correspondent à des sollicitations planes, ce qui n'est pas le cas du mode III.

Le mode I conduit à une discontinuité des déplacements selon la direction \vec{x} :

$$u_2(r, -\pi) = -u_2(r, \pi) \quad ; \text{ Alors que dans le mode II, la discontinuité est selon la direction } \vec{x} :$$

$$u_1(r, -\pi) = -u_1(r, \pi) .$$

Les modes II et III se produisent lorsque les fissures sont soumises à des contraintes cycliques de cisaillement. Cependant, l'expérience montre que les fissures qui s'amorcent sous ces modes

CH II Endommagement Des Volumes Élémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

de sollicitations, ont tendance très rapidement à se propager perpendiculairement à la direction de sollicitation, c'est-à-dire en mode d'ouverture qui est le plus endommageant.

Les fissures en service ne se présentent pas toujours dans la configuration schématisée sur la figure IV.2. Lorsqu'elles sont suffisamment longues, elles traversent en général les structures minces telles des plaques, par exemple. Dans les structures plus épaisses, elles peuvent être de coin ou de surface. La figure IV.3 montre par exemple les différentes configurations de fissures que l'on peut observer au voisinage d'une entaille circulaire. Une fissure traversante avec un front bien défini est généralement traitée comme un problème bi dimensionnel. Pour les fissures de coin ou de surface, on a recours à des calculs tri dimensionnels pour déterminer les champs de contraintes et de déplacements [72].

II.5.2.3 Observation des mécanismes de rupture :

Le suivi des mécanismes de rupture peut être effectué par diverses techniques dont nous donnons quelques éléments dans ce paragraphe [15].

II.5.2.3.1 Observation par microscopie :

La technique la plus simple à mettre en œuvre est l'observation à l'aide d'un binoculaire ou d'un microscope optique, permettant éventuellement une observation continue des phénomènes de rupture au cours des essais. L'observation est ponctuelle et la profondeur de champ limitée. La microscopie électronique à balayage augmente cette profondeur, tout en permettant d'atteindre des grossissements élevés. Les figures 12.18 et 12.19 montrent les micrographies obtenues dans le cas de la fissuration transverse de composites présentant une faible adhérence fibre-matrice (fig. II.14) et une adhérence élevée (fig. II.15) [15].

CH II Endommagement Des Volumes Élémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

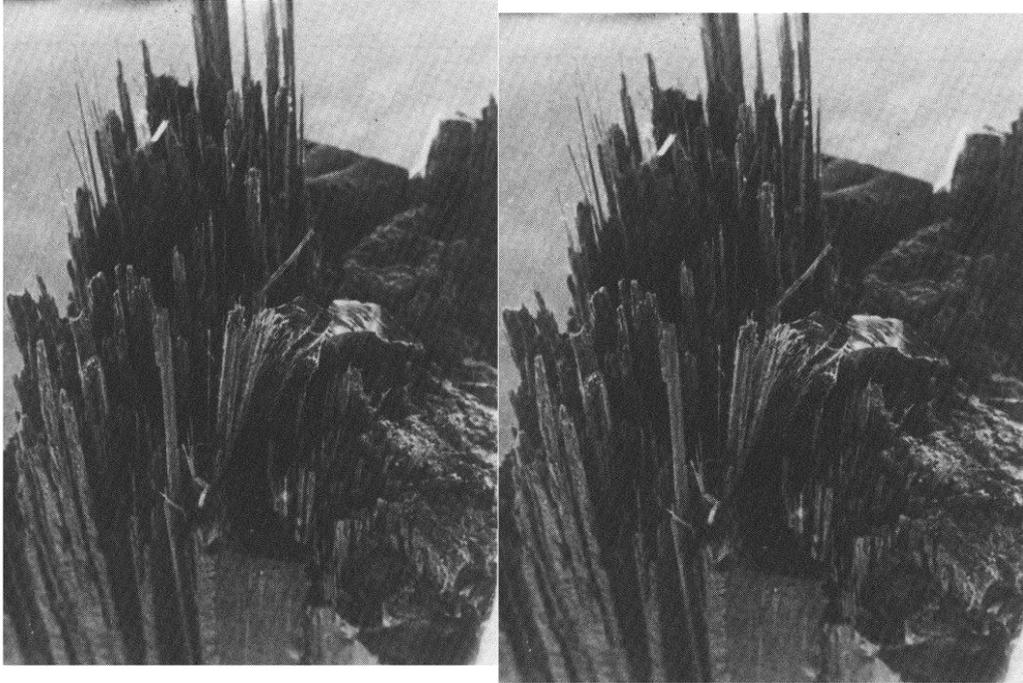


FIGURE 2.14. Surface de rupture associée à une faible adhérence fibre-matrice dans le cas d'un composite à fibres de carbone (Document ONERA) [15].

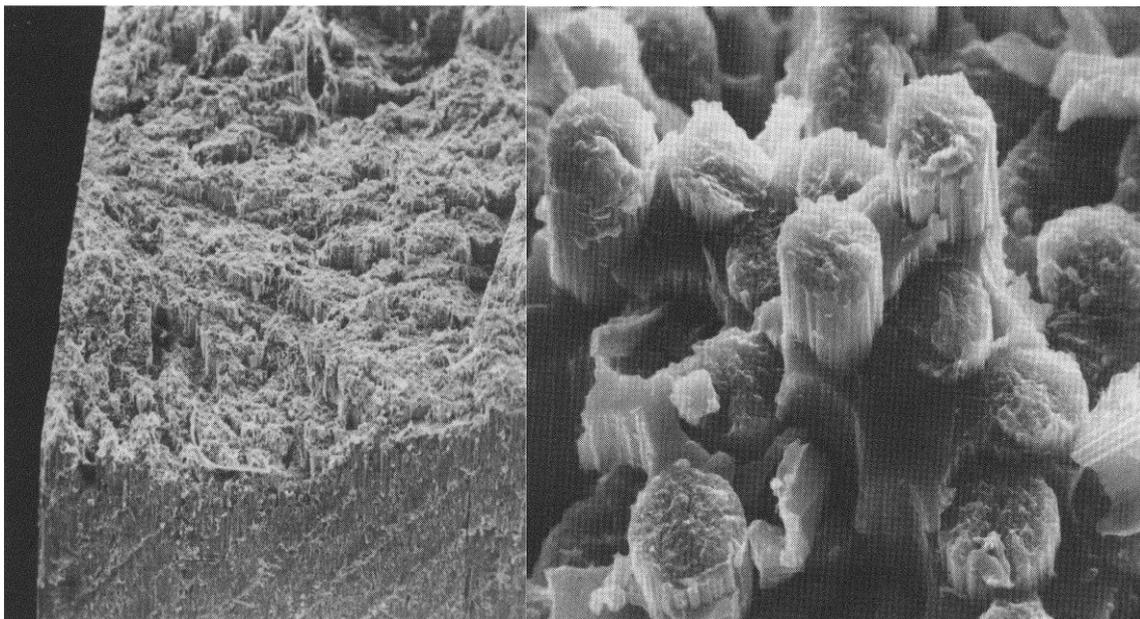


Figure II.15 : Surface de rupture associée à une bonne adhérence fibre-matrice dans le cas d'un composite à fibres de carbone (Document ONERA).

II.5.2.3.2 Visualisation par radiographie :

La technique de visualisation par radiographie X consiste à imprégner l'éprouvette fissurée à l'aide d'un opacifiant (type iodure de zinc) et à faire ensuite une radiographie X de l'éprouvette. La radiographie donne une image 2D de l'état de fissuration (figure 12.20). Il est cependant

CH II Endommagement Des Volumes Élémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

aisé de localiser les dommages dans l'épaisseur du stratifié lorsque l'on connaît l'orientation des couches. La radiographie permet une visualisation très fine des fissures, et en particulier des fissures transverses à l'épaisseur de l'éprouvette. Il faut noter qu'il est nécessaire pour chaque radiographie de démonter l'éprouvette, puis de la remonter sur la machine d'essai pour poursuivre l'essai. Il en résulte un alourdissement considérable des essais.

Il est également possible d'observer l'état de fissuration d'une éprouvette par radiographie à l'aide d'un scanner médical. L'analyse des variations de densité permet alors d'accéder à des informations en trois dimensions [15].

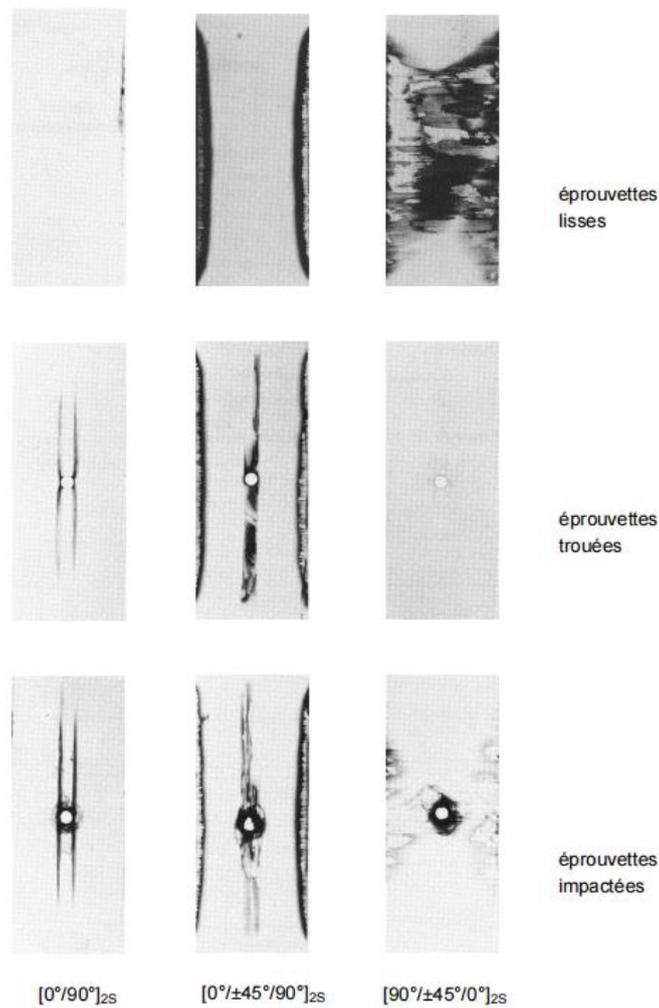


Figure II.16 : Visualisation par radiographie X de l'état de fissuration de composites à fibres de carbone après fatigue (105 cycles ; $R = 0,1$) dans le cas de diverses éprouvettes : lisses, trouées (trou de diamètre 5,6 mm), impactées (projectiles de diamètre 5,56 mm à une vitesse de 1 000 m/s) et de divers empilements : $[0^\circ/90^\circ]_{2S}$, $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{2S}$, $[90^\circ/\pm 45^\circ/0^\circ]_{2S}$ (Document ONERA).

CH II Endommagement Des Volumes Elémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

II.5.2.3.3 : Analyse par émission acoustique :

Les techniques précédentes ne permettent que des observations en temps différé. Elles sont par ailleurs lourdes à mettre en œuvre du fait des montages et démontages des éprouvettes, nécessaires aux observations de l'état de fissuration.

Par contre, l'émission acoustique est un processus physique qui permet d'accéder, en temps réel, à des informations sur les mécanismes de rupture mis en jeu.

Lorsqu'un mécanisme de rupture se produit au sein d'un matériau, il se crée localement une discontinuité du champ des déplacements et des contraintes. Cette discontinuité appelée événement devient la source d'une onde de déformation qui se propage dans le matériau. À la surface du matériau, un capteur adapté traduit l'onde reçue (figure 12.21) en un signal électrique qui est ensuite amplifié, puis analysé. Les capteurs sont des capteurs piézoélectriques développés spécifiquement pour l'émission acoustique, de manière à avoir une sensibilité élevée. Le domaine des fréquences étudiées s'échelonne généralement de 50 kHz à 1 MHz.

La figure 12.22 donne des exemples de signaux d'émission acoustique.

La technique d'émission acoustique consiste à extraire de ces signaux des informations en relation avec les mécanismes de rupture. Les analyses des signaux utilisées sont :

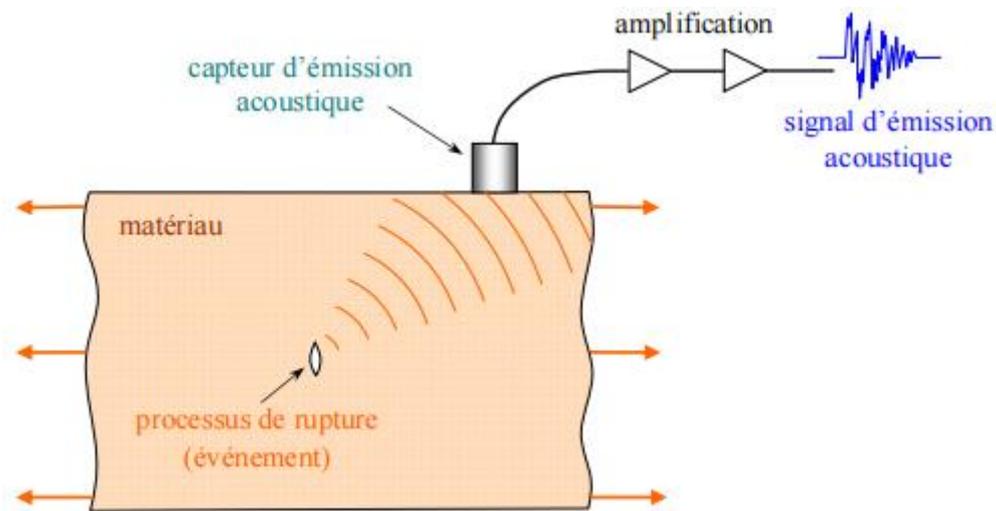


Figure 2.17 : Processus d'émission acoustique.

CH II Endommagement Des Volumes Elémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

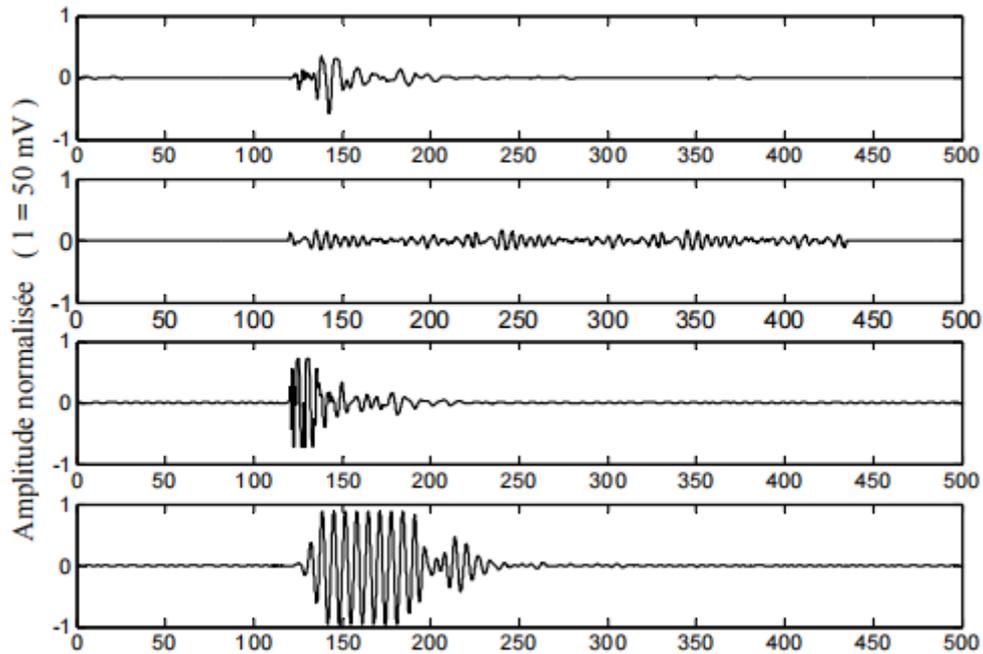


Figure II.18 : Signaux d'émission acoustique enregistrés lors d'essais de flexion sur des composites époxyde-fibres de verre unidirectionnel

- Le comptage des signaux qui permet de déterminer l'initiation de l'endommagement et d'obtenir des informations sur son activité ;
- La localisation de l'endommagement en mesurant les temps d'arrivée des signaux à plusieurs capteurs convenablement répartis ;
- L'analyse en fréquence des signaux ;
- L'analyse en amplitude, qui consiste à associer à chaque signal son amplitude crête, puis à relever au cours d'un essai l'évolution de la distribution statistique des amplitudes.

Les techniques d'enregistrement et d'analyse des signaux d'émission acoustique sont aujourd'hui grandement facilitées par les outils numériques dont dispose l'ingénieur [15].

II.6 Critères et matériaux composites :

Des critères de rupture des matériaux composites sont obtenus dans la littérature à partir d'approches méso-scopiques ou basées sur la micromécanique.

Dans l'approche par la micromécanique, les critères sont établis par rapport aux propriétés mécaniques des constituants du matériau et par l'application de méthodes d'analyse limite. Cependant, ces modèles sont restreints par l'ignorance de la nature de l'interface fibre/matrice

CH II Endommagement Des Volumes Élémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

et du procédé de transformation du composite. Nous proposons de se référer au rapport de Chevalier [73] pour de plus amples informations sur les critères micromécaniques.

Les critères des systèmes composites sont majoritairement formulés pour des composites à fibres unidirectionnelles. La fibre est considérée méso-scopiquement homogène et les modèles sont constitués par une fonction du premier degré des composantes du tenseur des contraintes, dépendant d'un certain nombre de paramètres du matériau (déterminés expérimentalement).

II.7 Théorie de la contrainte maximale :

La valeur la plus défavorable conduit donc un mode de rupture du composite, en fonction de l'angle α : une rupture par traction des fibres pour de faibles valeurs de, une rupture par cisaillement de la matrice pour des valeurs intermédiaires de ou une rupture par traction de la matrice pour des angles α proches de la matrice.

$$|\sigma_x| \leq \frac{\sigma_c}{\cos^2 \alpha}, |\sigma_x| \leq \frac{\sigma_m}{\sin^2 \alpha}, |\sigma_x| \leq \frac{\tau_m}{\cos \alpha \sin \alpha}$$

II.8 Critères interactifs ou énergétiques :

Dès 1928, Von Mises a proposé un critère de plasticité pour les matériaux anisotropes sous la forme d'une expression quadratique du tenseur des contraintes. Les constantes F_{ij} du tenseur des contraintes sont des caractéristiques des propriétés de résistance et d'anisotropie du matériau. Dans le cas de plaques ou de coques, le nombre de constantes de la matrice de fragilité $\{F\}$ est réduit en raison des propriétés de symétrie du matériau et de la nécessité d'obtenir d'une fonction $f(\sigma)$ convexe. La formulation du critère prend alors la forme suivante :

$$\frac{\sigma_{11}^2}{X^2} + \frac{\sigma_{22}^2}{X^2} - \frac{K}{XY} \sigma_{11} \sigma_{22} + \frac{\sigma_{12}^2}{S^2} = 1$$

En contraintes planes, Chevalier [73] montre que les critères énergétiques sont relativement pessimistes lorsque la contrainte de cisaillement est importante.

II.9 Critères tensoriels :

Hoffman [74] propose un critère inspiré du critère de Tsai-Hill. La formulation du critère se base sur une généralisation du critère de Hill en tenant compte des différences de comportement des matériaux en compression et en traction. Ota [75] extrapole le critère énergétique de Hill en ajoutant des termes linéaires et en étudiant le comportement plastique dissymétrique des métaux en traction et en compression. Tsai et Wu ont systématisé le critère énergétique de Hill

CH II Endommagement Des Volumes Élémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

en exprimant un critère présenté sous forme quadratique dans l'espace des contraintes. Cette condition est sensible au signe des contraintes normales et aux effets des contraintes isotropes. La représentation de cette fonction limite dans l'espace des contraintes est une ellipsoïde. Le nombre de constantes peut être réduit au regard des propriétés symétriques du matériau. Ainsi, dans le cas d'un matériau orthotrope, l'expression suivante est utilisée :

$$\begin{aligned} F_3 \sigma_{33} + F_1 (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + F_3 \sigma_{33}^2 + 2F_{31} (\sigma_{33}\sigma_{11} + \sigma_{33}\sigma_{22}) + \dots \\ \dots + F_{11} (\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + 2\sigma_{21}) + 2F_{12} (\sigma_{11}\sigma_{22} - \sigma_{21}) + \dots \\ \dots + F_{14} (\sigma_{32}^2 + \sigma_{13}^2) = 1 \end{aligned}$$

Dans le cas de composites en compression et sous pression de confinement, Böehler et Raclin [76] admettent que la ruine du matériau en compression est causée par deux mécanismes différents suivant l'orientation du renfort. Dans le cas du mode II, ou mode parallèle, le critère est une généralisation de la loi de frottement de Coulomb, prenant en considération l'anisotropie du matériau et l'influence de la pression de confinement p .

$$\begin{aligned} (\sigma_n - p) \cos \Phi \sin \Phi = (1 + a_0 p + a_1 p^2) (\sigma_n \cos^2 \Phi + p \sin^2 \Phi) \operatorname{tg} \Phi_0 + \dots \\ \dots + (1 + a_2 p + a_3 p^2) c_0 \end{aligned}$$

Avec Φ l'angle de frottement à $p=0$

c_0 La résistance au cisaillement dans le plan des couches

Des consta a_i du matériau

II.10 Critères phénoménologiques :

Dans le but de cerner au plus près les phénomènes de rupture, l'intervention des mécanismes de dégradation dans la formulation de critères est préconisée par certains auteurs. La démarche adoptée est identique à celle du critère de la contrainte maximale, avec une analyse plus développée des différents phénomènes. Hashin propose un critère pour les composites unidirectionnels qui est basé sur les quatre modes principaux de rupture du matériau : rupture de la fibre en traction, rupture de la fibre en compression, rupture en traction de la matrice et rupture en compression de la matrice.

II.11 Formulation d'un critère de résistance pour le matériau étudié :

En fonction des modes de rupture observés lors des différents essais de traction et compression, nous proposons l'utilisation d'un critère basé sur le critère de Böehler-Raclin. Le critère doit prendre en compte l'anisotropie des résistances. La rupture se produit selon deux modes

CH II Endommagement Des Volumes Élémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

définis, suivant l'orientation des fibres. Le critère utilisé est constitué de deux branches en fonction des modes de rupture I et II.

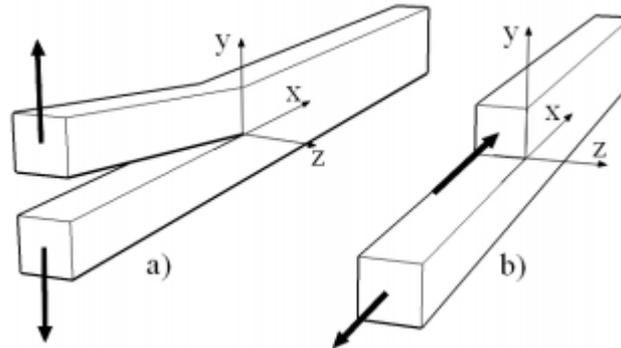


Figure II.19 – Mode de rupture, a) Mode I : ouverture de la fissure, b) Mode II : glissement dans le plan

II.11.1 Critère de résistance en mode II :

Le critère est exprimé par une relation entre la contrainte tangentielle au plan de rupture σ_{23} , la contrainte normale σ_{33} et la pression de confinement p , dans le cas d'une rupture de mode II (généralisation de la loi de frottement de Coulomb) :

$$\sigma_{23} = (1 + a_0 p + a_1 p^2) \sigma_{33} \operatorname{tg} \Phi_0 + (1 + a_2 p + a_3 p^2) c_0$$

Avec Φ_0 l'angle de frottement pour $p=0$

c_0 La résistance de cisaillement simple

a_i Les constantes matérielles (influence de p)

Les contraintes σ_{23} et σ_{33} peuvent s'exprimer en fonction de la surcharge axiale $\sigma_n - p$, de la pression de confinement et de l'orientation Φ :

$$\sigma_{23} = (\sigma_n - p) \sin \Phi \cos \Phi$$

$$\sigma_{33} = p \sin^2 \Phi + \sigma_n \cos^2 \Phi$$

Le critère s'exprime donc de la manière suivante :

$$\begin{aligned} (\sigma_n - p) \cos \Phi \sin \Phi &= (1 + a_0 p + a_1 p^2) (\sigma_n \cos^2 \Phi + p \sin^2 \Phi) \operatorname{tg} \Phi_0 + \dots \\ &\dots + (1 + a_2 p + a_3 p^2) c_0 \end{aligned}$$

CH II Endommagement Des Volumes Élémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

Les valeurs des deux constantes $\tan \Phi_0$ et C_0 peuvent être déterminées à partir de divers essais de traction et compression avec orientation des fibres de renfort. Dans le cas où la valeur de la pression de confinement est nulle, le critère de résistance s'écrit de la manière suivante :

$$\sigma_n \cos \Phi (\sin \Phi - \cos \Phi \tan \Phi_0) = c_0$$

II.11.2 Critère de résistance en mode I :

Le critère de résistance dans le cas d'une rupture en mode I est basé sur le critère de Tsai-Wu, qui tient compte des différences entre résistance en traction et résistance en compression, tout en restant applicable aux matériaux anisotropes. L'application de ce critère aux essais de compression axiale σ_n dans la direction Φ avec la pression de confinement p conduit à l'expression suivante :

$$\begin{aligned} & \sigma_n (F_1 \sin^2 \Phi + F_3 \cos^2 \Phi) + p [F_1 (1 + \cos^2 \Phi) + F_3 \sin^2 \Phi] + \dots \\ & \dots + \sigma_n^2 [F_{11} \sin^4 \Phi + F_{33} \cos^4 \Phi + (F_{44} + 2F_{31}) \sin^2 \Phi \cos^2 \Phi] + \dots \\ & \dots + p^2 [F_{11} (1 + \cos^4 \Phi) + F_{33} \sin^4 \Phi + (F_{44} + 2F_{31}) \sin^2 \Phi \cos^2 \Phi + \dots \\ & \dots + 2F_{12} \cos^2 \Phi + 2F_{31} \sin^2 \Phi] + \sigma_n p [(F_{11} + F_{33} - F_{44}) \sin^2 \Phi \cos^2 \Phi + \dots \\ & \dots + F_{31} (\cos^2 \Phi + \sin^4 \Phi + \cos^2 \Phi) + F_{12} \sin^2 \Phi] = 1 \end{aligned}$$

Dans cette expression, sept constantes F_i et F_{ij} des matrices de fragilités apparaissent. Dans un cas uniaxial avec $p=0$, cette relation se simplifie. Il ne reste que six coefficients dont deux sont liés :

$$\begin{aligned} & \sigma_n^2 [F_{11} \sin^4 \Phi + F_{33} \cos^4 \Phi + \cos^2 \Phi \sin^2 \Phi (2F_{31} + F_{44})] + \dots \\ & \dots + \sigma_n (F_1 \sin^2 \Phi + F_3 \cos^2 \Phi) = 1 \end{aligned}$$

Avec différents essais de traction ou de compression orientée, il est possible de déterminer les cinq constantes :

$$\begin{aligned} F_3 &= \frac{1}{X} - \frac{1}{X'}, & F_{33} &= \frac{1}{XX'}, \\ F_1 &= \frac{1}{Y} - \frac{1}{Y'}, & F_{11} &= \frac{1}{YY'}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (2F_{31} + F_{44}) &= \frac{1}{0.1875} \left[\frac{1}{M^2} - \frac{0.0625}{YY'} - \frac{0.5625}{XX'} + \frac{0.25}{M'} \left(\frac{1}{Y} - \frac{1}{Y'} \right) + \dots \right. \\ & \quad \left. \dots + \frac{0.75}{M'} \left(\frac{1}{X} - \frac{1}{X'} \right) \right] \end{aligned}$$

Avec

CH II Endommagement Des Volumes Elémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

X	La résistance en traction pour $\Phi = 0$
X'	La résistance en compression pour $\Phi = 0$
Y	La résistance en traction pour $\Phi = 90^\circ$
Y'	La résistance en compression pour $\Phi = 90^\circ$
M'	La résistance en compression pour $\Phi = 30^\circ$

II.12 Comportement mécanique des matériaux composites :

II.12.1 Introduction :

Les champs des déformations et des contraintes dans un milieu sont liés par des lois appelées lois de comportement, caractérisant le comportement mécanique du milieu. Ces lois sont décrites espar des axiomes qui permettent de rendre compte au mieux des phénomènes observés.

II.12.2 Description des contraintes :

Illustration des contraintes par un cube élémentaire (Figure 1.4)

Notation :

Le champ de contraintes à l'un point M d'un solide est un tenseur d'ordre 2, symétrique, représenté par la matrice :

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

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

CH II Endommagement Des Volumes Élémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

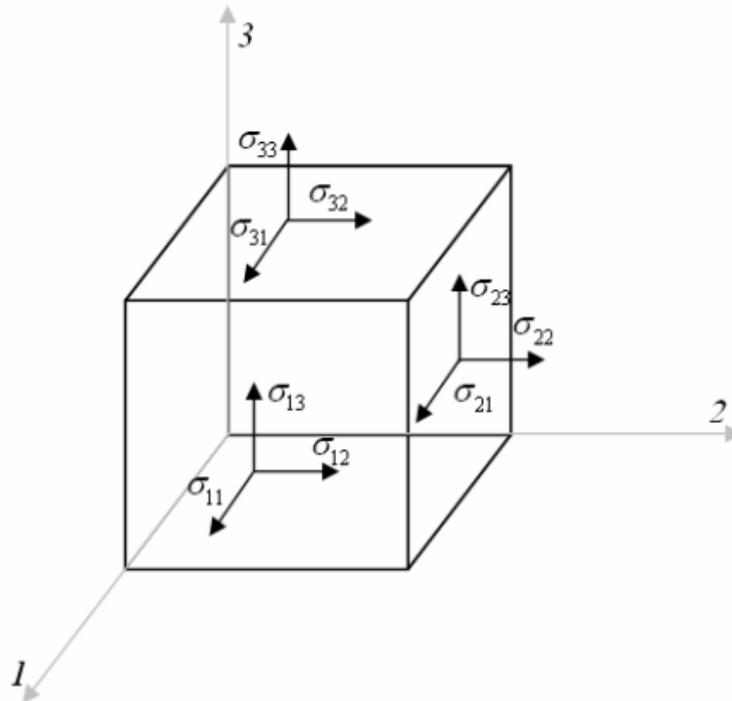


Figure II.20 : Composantes des vecteurs contraintes dans un système d'axes (1, 2,3)

- 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 :

CH II Endommagement Des Volumes Élémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

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

II.12.3 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 :

CH II Endommagement Des Volumes Élémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

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

II.12.4 Equations de compatibilité :

Les équations traduisent qu'il existe un lien entre déplacements et déformations, et

Entre les déformations elles-mêmes.

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

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

Les équations constituent les six relations de compatibilité.

II.12.5 Relation contrainte – déformation :

II.12.5.1 Matrice de rigidité :

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

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

Ou sous forme condensée :

$$\sigma = c\varepsilon$$

10.1

Cette loi, généralement appelée loi de Hooke généralisée, introduit la matrice de rigidité c ,

CH II Endommagement Des Volumes Élémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

Symétrique. Le comportement linéaire d'un matériau est donc décrit dans le cas général à l'aide de

21 coefficients indépendants, ici les 21 constantes de rigidité c_{ij} .

II.12.5.2 Matrice de flexibilité :

La relation d'élasticité peut être écrite sous forme inverse, suivante :

$$\varepsilon = s\sigma$$

11.1

En introduisant la matrice inverse de la matrice de rigidité. La matrice s est appelée matrice de souplesse, et s'écrit dans le cas général :

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

Avec : $s = c^{-1}$

Les coefficients s_{ij} sont appelés constants de flexibilité ou constantes de souplesse.

II.12.5.3 Changement de base :

Soit c la matrice de rigidité exprimée dans une base :

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

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 :

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

CH II Endommagement Des Volumes Elémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

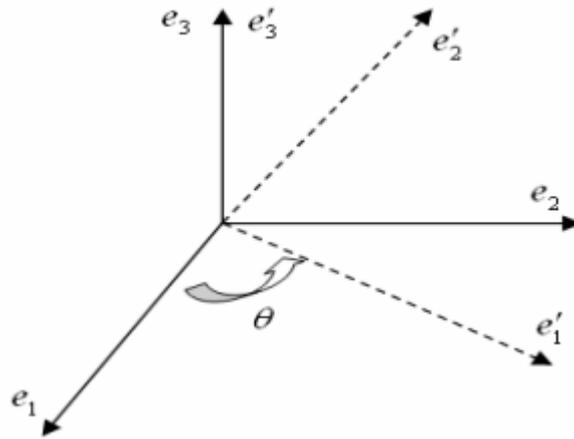


Figure II.21 : Changement de base

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 :

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

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

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

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 :

CH II Endommagement Des Volumes Elémentaires Représentatifs En Matériaux Composites

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

II.13 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 sandwiches. 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 :

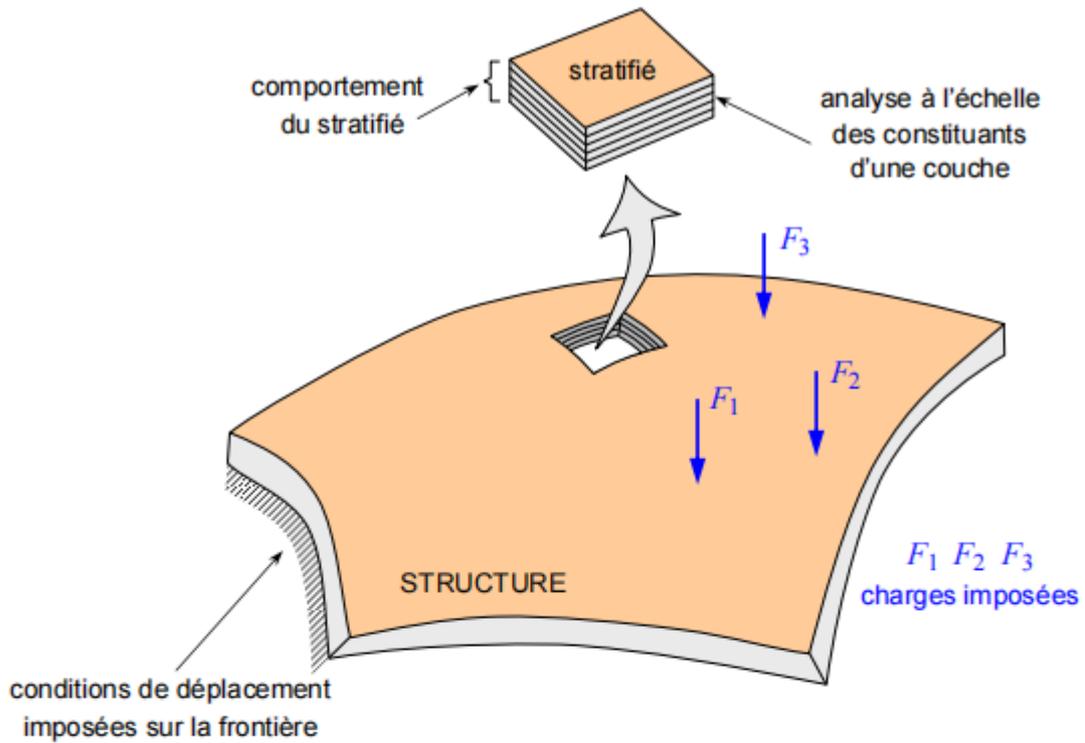
- L'étude du comportement mécanique de chaque couche, parfois appelé comportement micromécanique ou microscopique du matériau composite. Cette étude est assez souvent désignée par microanalyse du matériau composite.
- L'étude du comportement global du matériau constitué de plusieurs couches, et désigné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

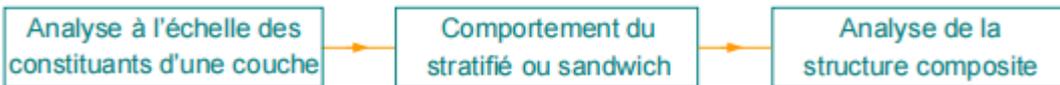
L'analyse du comportement mécanique d'une structure en matériau composite est schématisée sur la figure 3.28 [15].

CH II Endommagement Des Volumes Élémentaires Représentatifs En Matériaux Composites



Pour caractériser le comportement mécanique de la structure composite il est nécessaire de connaître le champ des contraintes et celui des déplacements en tout point de la structure

Processus d'étude



Analyse à l'échelle des constituants

Analyse des propriétés élastiques et du comportement à la rupture d'une couche en fonction des constituants

Comportement du stratifié ou sandwich

Étude des propriétés élastiques et du comportement à la rupture du matériau stratifié ou sandwich en fonction des couches

Figure II.28. Schéma d'étude du comportement mécanique d'une structure en matériau composite [15]

Chapitre III

Comportement des VER

Hybrides fissurés en

Matériaux Composite sous

une Charge monotone

Ch. III Comportement Des VER Hybrides Fissurés En Matériaux Composite Sous Une Charge Monotone

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 (RVE) [77], [78] ou de cellule unitaire répétée (RUC), [79], [80] 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 REV (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 [81] en utilisant le code de calcul Abaqus 6.14 [82]. Plusieurs facteurs ont été mis en évidence tels que la longueur de la fissure, la disposition des fibres par rapport au fond de fissure et la distance entre les deux fibres différentes. Dans le premier cas, la première fibre placée est la fibre Alfa et la fibre de verre dans le second.

III.2 Modèle géométrique

Notre modèle géométrique est un composite hybride REV de dimensions $0.08 * 0.04 * 0.04$ mm³ à matrice Epoxy, composé de deux fibres Alfa et Verre de diamètre $d = 0.006$ mm, soumis à une charge de traction appliquée de 1MPa et en présence d'une fissure de longueur variable.

Ch. III Comportement Des VER Hybrides Fissurés En Matériaux Composite Sous Une Charge Monotone

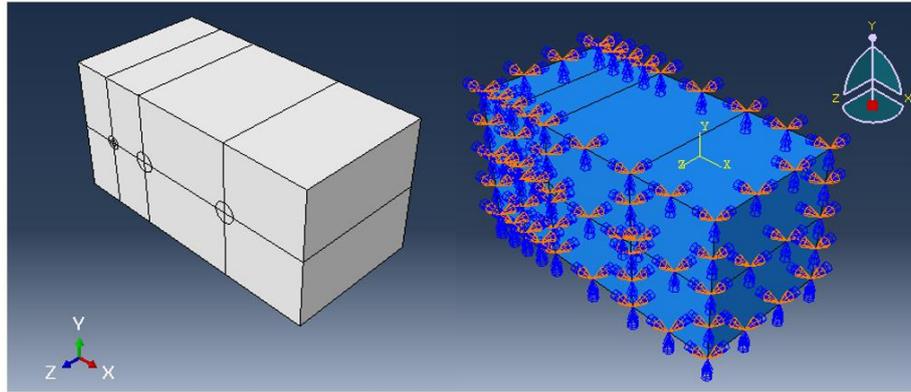


Figure III.1 : Modèle géométrique

Tableau 1 : Propriétés mécaniques des matériaux

	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

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 » 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) [82].

Ch. III Comportement Des VER Hybrides Fissurés En Matériaux Composite Sous Une Charge Monotone

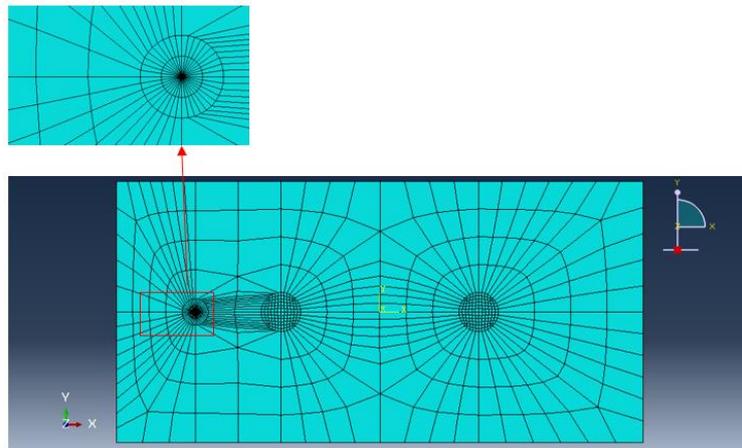
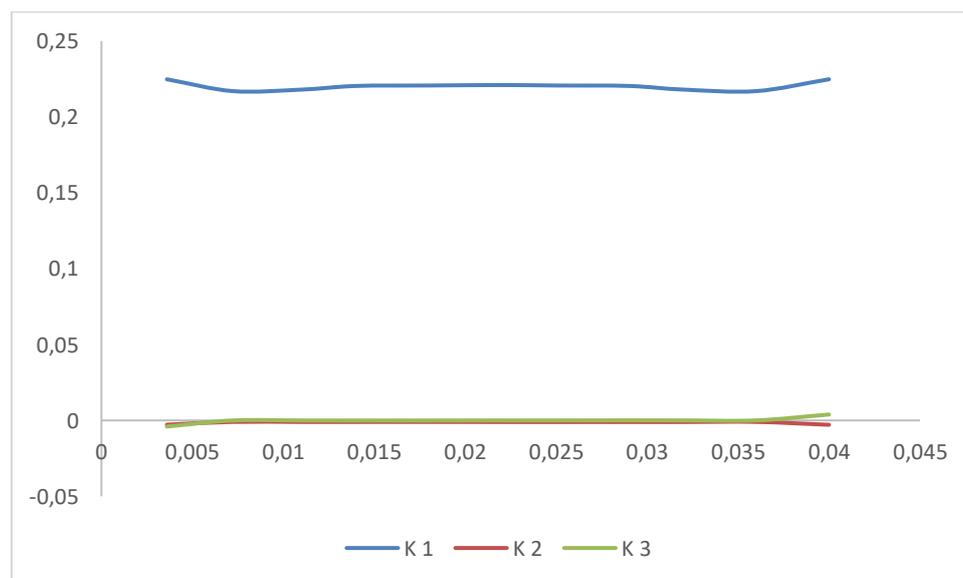


Figure III.2 : Maillage

III.4 Résultats et discussions

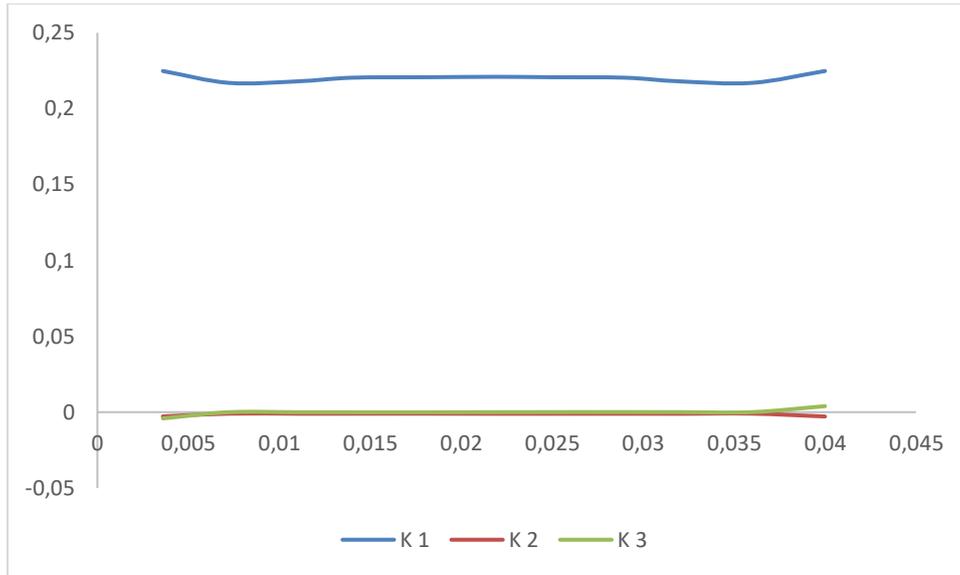
III.4.1 Variation du facteur d'intensité de contraintes K_I K_{II} K_{III} :

Les figures III.3 (a, b, c et d) illustrent la variation des facteurs d'intensité de contraintes K_I , K_{II} et K_{III} en fonction de la largeur du VER des quatre matériaux composites (Alfa-Alfa/Epoxyde, Alfa-Glass/ Epoxy, Verre-Verre /Epoxy et Verre-Alfa /Epoxy). On constate que la propagation de la fissure s'effectue en mode I pur et ce en fonction de la force appliquée sur le composite. Le facteur d'intensité de contrainte K_I est significativement plus élevé que les deux autres modes. Dans notre étude le mode pur I est prépondérant et c'est le seul paramètre à prendre en compte et on néglige les deux modes de glissement K_{II} et K_{III} .

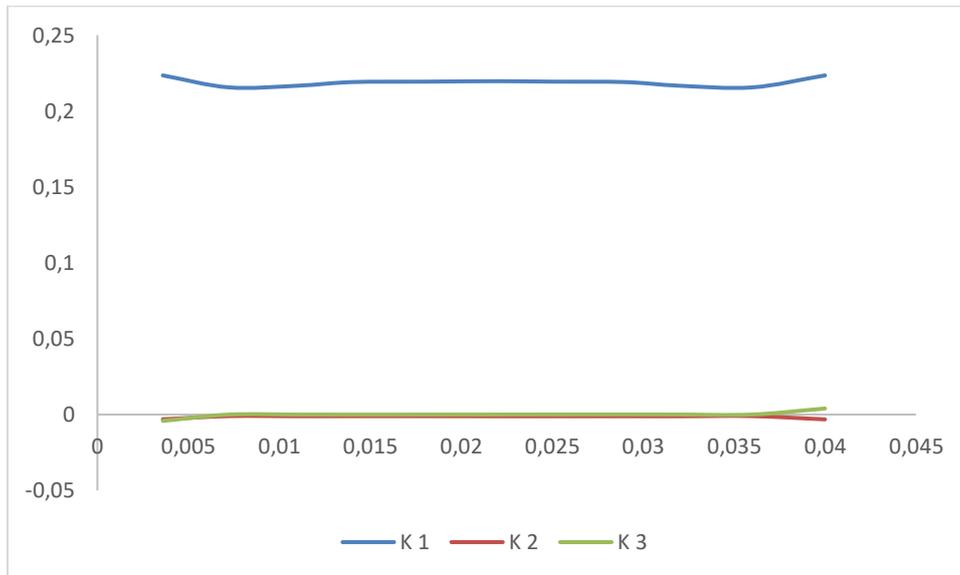


a) Alfa-Alfa/Epoxyde ($l=0.004\text{mm}$ et $d=0.04\text{mm}$)

Ch. III Comportement Des VER Hybrides Fissurés En Matériaux Composite Sous Une Charge Monotone

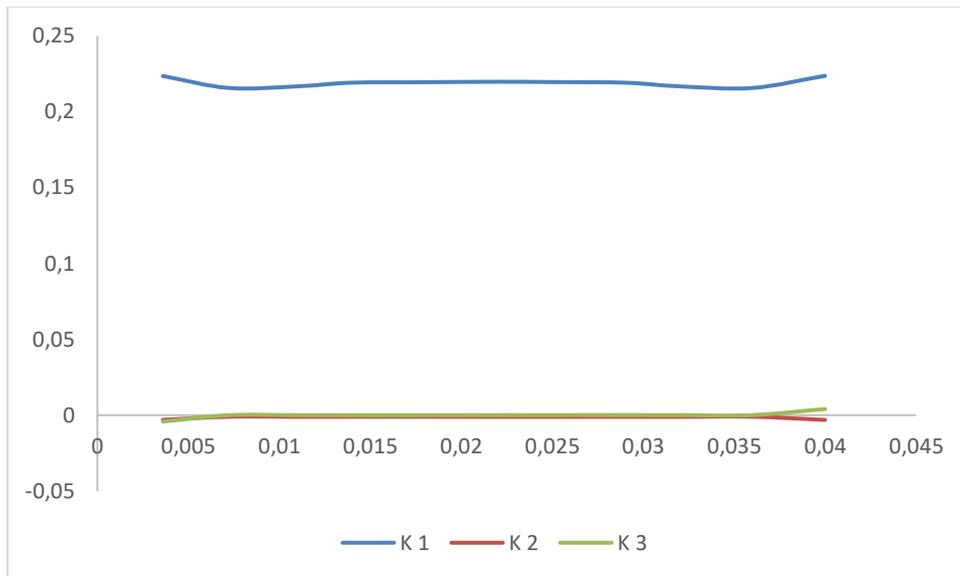


b) Alpha-Verre/Epoxyde ($l=0.004\text{mm}$ et $d=0.04\text{mm}$)



c) Verre-Alpha/Epoxyde ($l=0.004\text{mm}$ et $d=0.04\text{mm}$)

Ch. III Comportement Des VER Hybrides Fissurés En Matériaux Composite Sous Une Charge Monotone

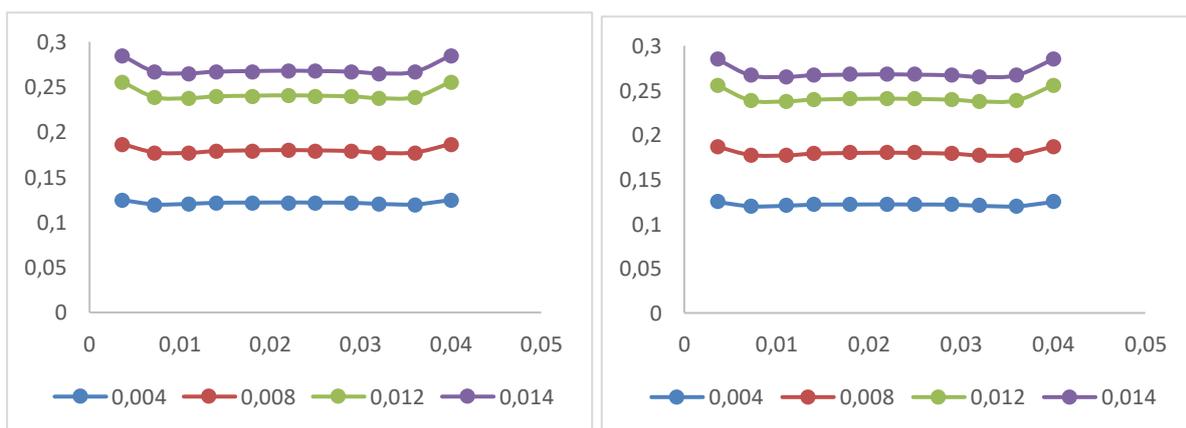


d) Verre-Verre /Epoxyde (l=0.004mm et d=0.04mm)

Figure III.3 : Variation des facteurs d'intensité de contraintes K_I , K_{II} et K_{III} en fonction de la largeur du VER des quatre VER (Alfa-Alfa/Epoxyde, Alfa-verre/Epoxy, verre- Alfa /Epoxy et verre-verre /Epoxy) et pour les différentes longueurs de la fissure et de l'inter-distance entre les deux fibres (l=0.004mm et d=0.04mm)

III.4.2 Influence des différents types de composites hybrides REV sur le rapport K_I/K_{Ic}

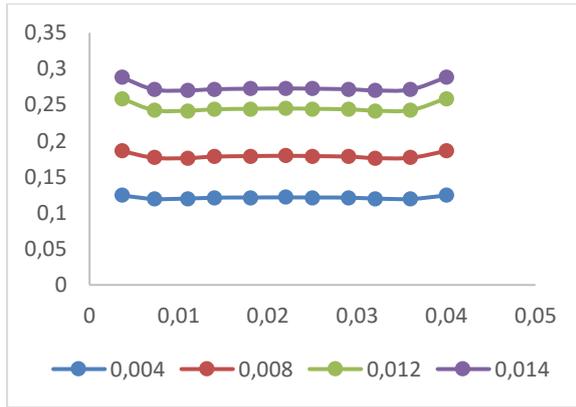
Pour voir l'influence de la position des différentes fibres sur le rapport des facteurs d'intensités de contraintes par rapport au bord de la fissure, on a fixé la longueur de la fissure tout en changeant l'inter-distance entre les deux fibres pour les quatre VER.



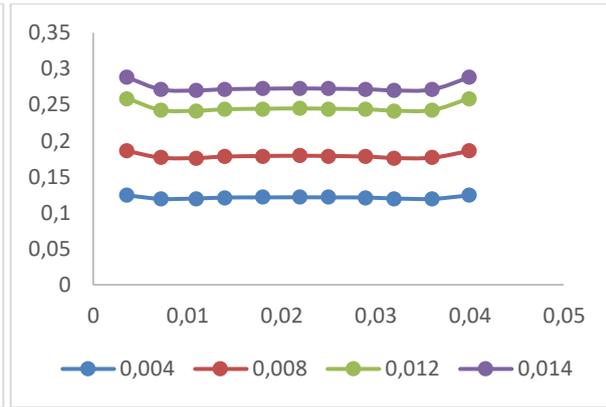
A₁) Alfa-Alfa/Epoxy d(d=0.03)

A₂) Alfa-Verre/Epoxy (d=0,03mm)

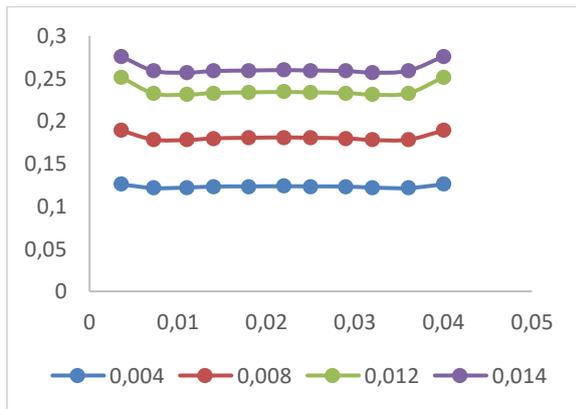
Ch. III Comportement Des VER Hybrides Fissurés En Matériaux Composite Sous Une Charge Monotone



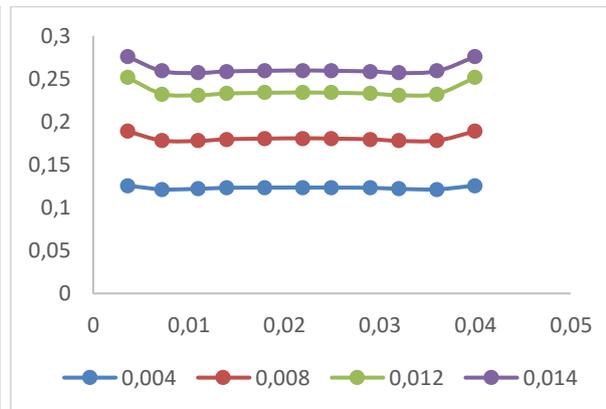
A3) Verre-Alfa/Epoxy (d=0,03mm)



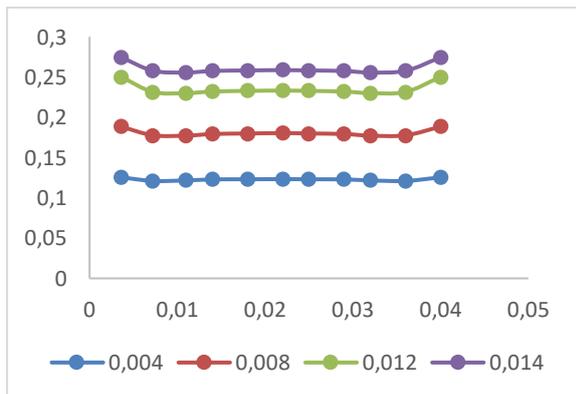
A4) Verre-Verre/Epoxy (d=0,03mm)



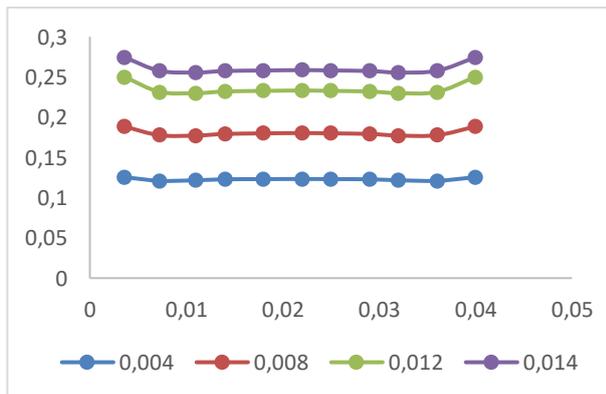
B1) Alfa-Alfa/Epoxy (d=0,02mm)



B2) Alfa-Verre/Epoxy (d=0,02mm)



B3) Verre-Alfa/Epoxy (d=0,02mm)



B4) Verre-Verre/Epoxy (d=0,02mm)

Ch. III Comportement Des VER Hybrides Fissurés En Matériaux Composite Sous Une Charge Monotone

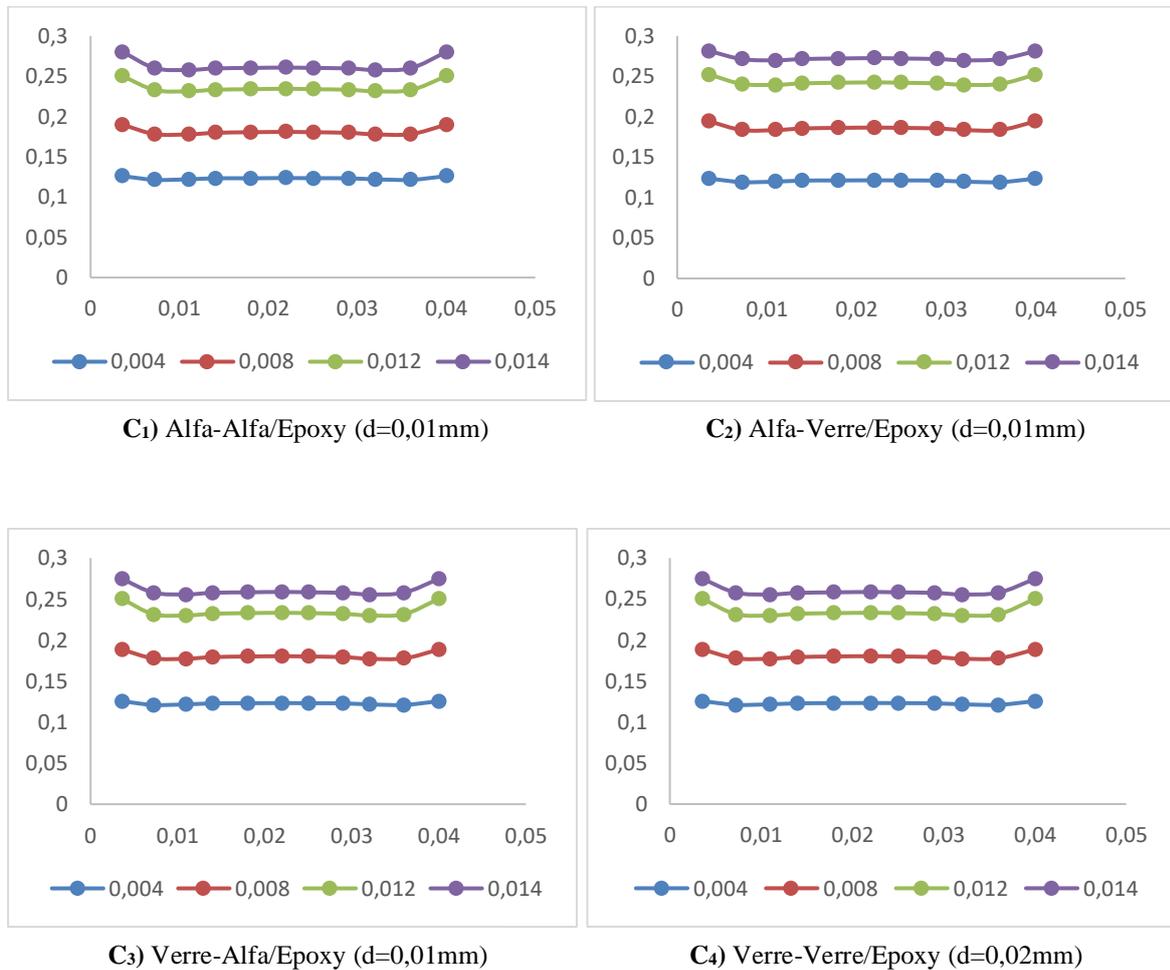


Figure III.4 : Variation du rapport entre le facteur d'intensité de contrainte K_I et le facteur d'intensité de contrainte critique K_{IC} en fonction de la largeur du REV des différents matériaux Alfa-Alfa/époxy, Alfa-Glass/époxy, Glass-Alfa/époxy et Glass-Glass/époxy et pour différentes longueurs de la fissure l et l'inter-distance d entre les deux fibres.

Les figures 4(A₁, A₂, A₃ et A₄), 4(B₁, B₂, B₃ et B₄) et 4(C₁, C₂, C₃ et C₄) montrent la variation du rapport du facteur d'intensité de contraintes K_I sur le facteur d'intensité de contraintes critique K_{IC} en fonction de la largeur du volume élémentaire représentatif (VER) composite pour les différentes inter-distances en les deux fibres ($d=0.03\text{mm}$, $d=0.02\text{mm}$ et $d=0.01\text{mm}$) et pour les différents volumes élémentaires représentatifs (VER) composites (Alfa-Alfa/Epoxy, Alfa-Glass/Epoxy, Glass-Alfa/Epoxy et Glass-Glass/Epoxy) pour les différentes longueurs de la fissure ($l=0.004\text{mm}$, $l=0.005\text{mm}$, $l=0.006\text{mm}$ et $l=0.007\text{mm}$). On constate que les courbes du rapport K_I/K_{IC} ont la même forme et présentent une symétrie par rapport au milieu de la largeur du VER. On note aussi que quelle que soit l'inter-distance en deux les fibres et les

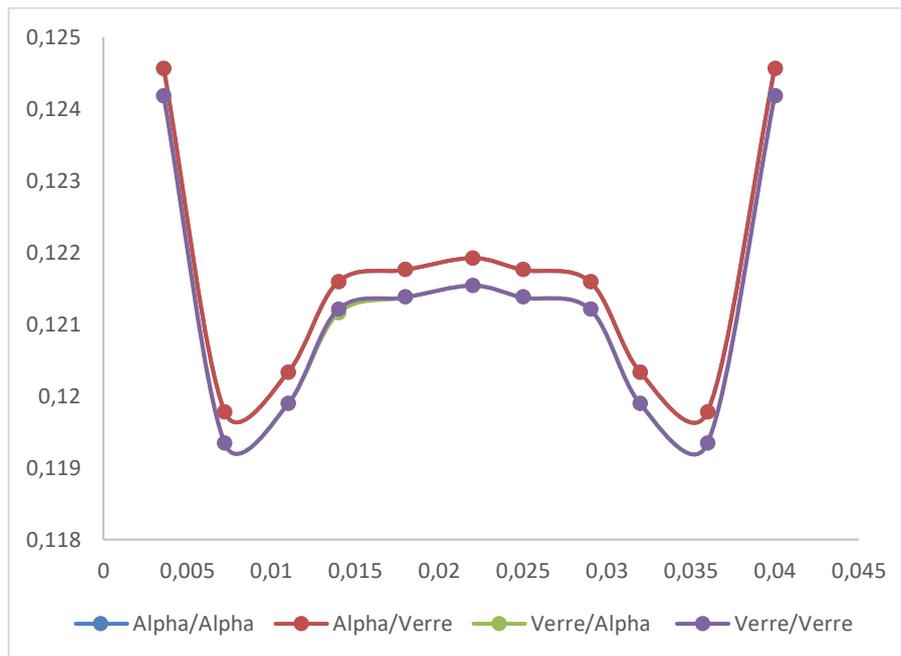
Ch. III Comportement Des VER Hybrides Fissurés En Matériaux Composite Sous Une Charge Monotone

différents volumes élémentaires représentatifs (VER) composites, le rapport K_I/K_{IC} ne change presque pas de valeurs cela signifie que les différents inter-distance entre les fibres influent pas sur le VER composite hybride. On remarque aussi qu'au fur et à mesure que la longueur de la fissure augmente le rapport K_I/K_{IC} augmente et cela quel que soit le volume élémentaire représentatif hybride composite et l'inter-distance « d » entre les deux fibres.

III.4.3 Influence de la position longitudinale des différents types de fibres du composite REV sur le rapport K_I/K_{IC}

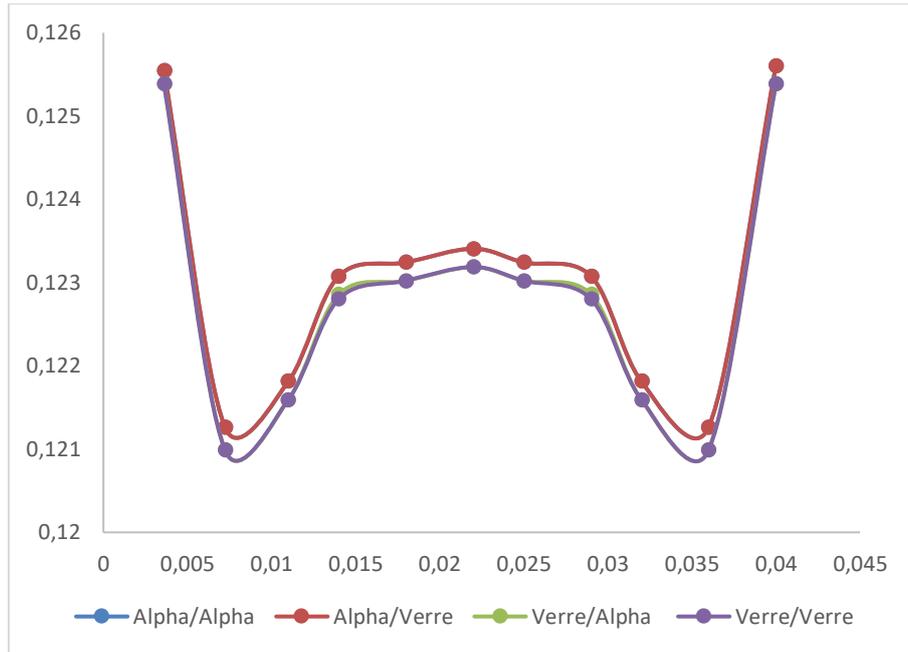
Pour voir l'influence de la position longitudinale des différents types de fibres, on a fixé la longueur de la fissure « I » tout en changeant l'inter-distance « d » entre les deux fibres pour les quatre VER.

*Cas I=0.004 mm

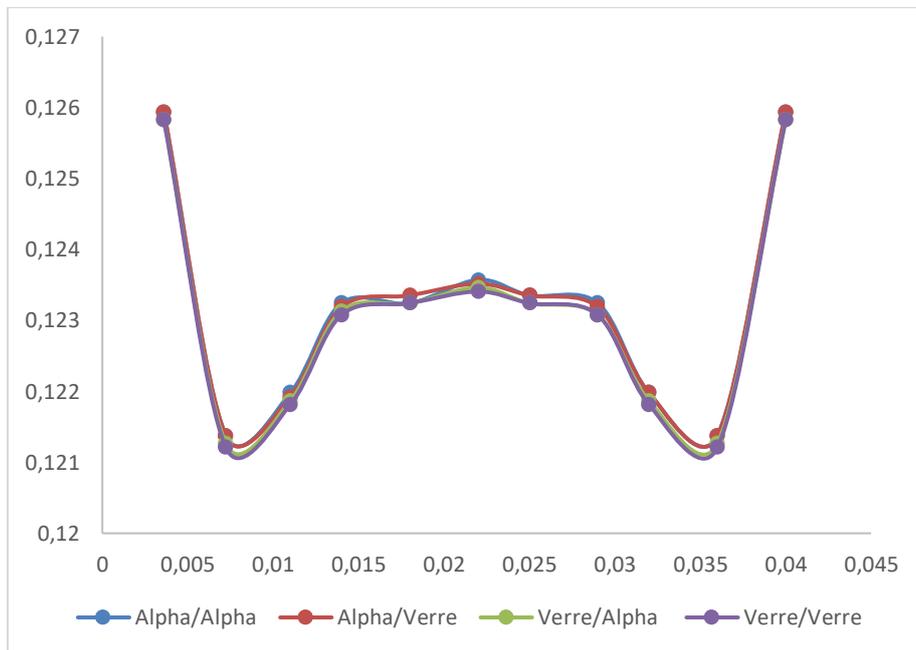


A1) d=0.03 mm.

Ch. III Comportement Des VER Hybrides Fissurés En Matériaux Composite Sous Une Charge Monotone



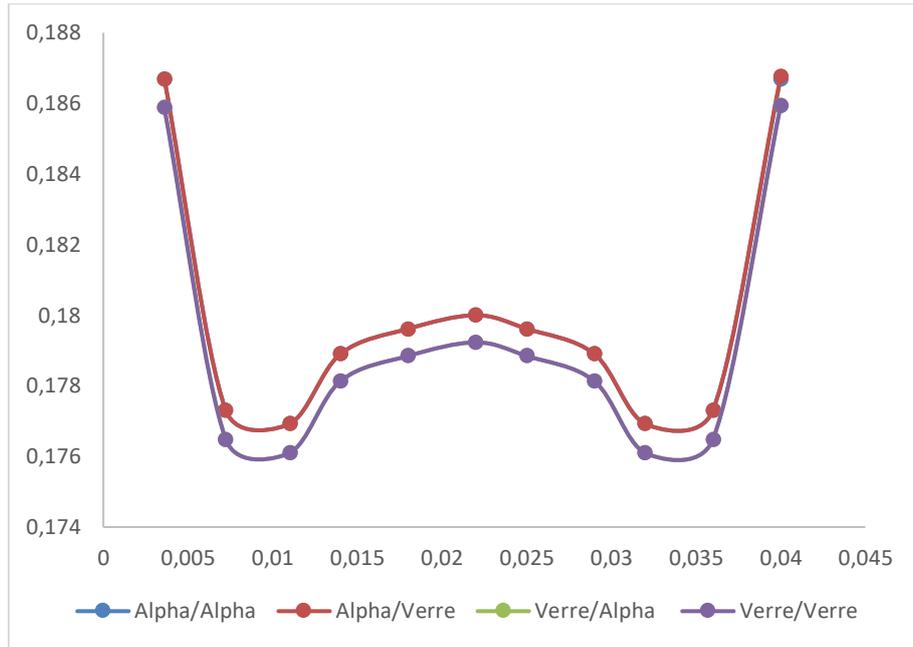
A₂) d=0.02 mm.



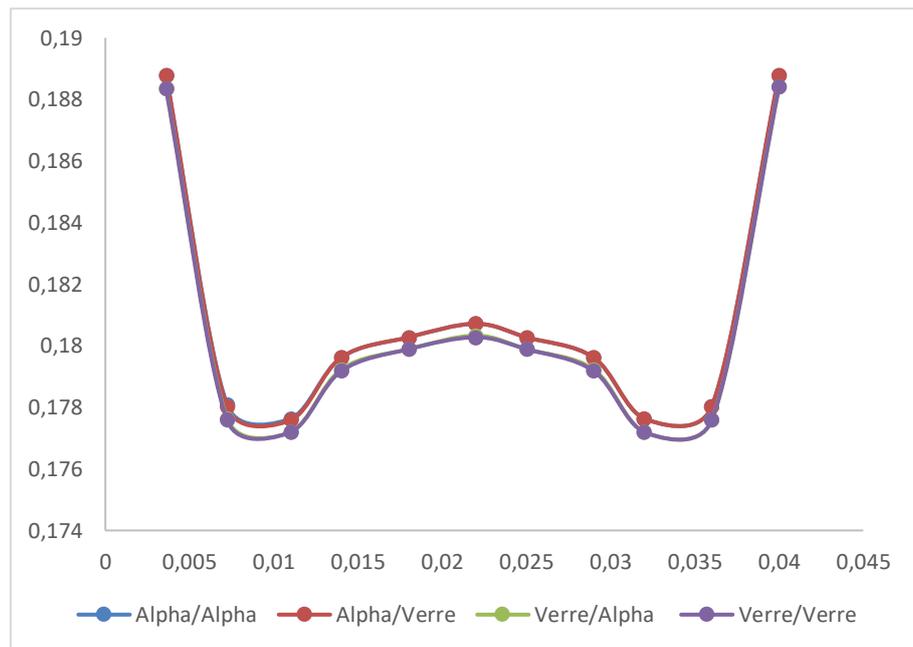
A₃) d=0.01 mm.

*Cas I=0.008 mm

Ch. III Comportement Des VER Hybrides Fissurés En Matériaux Composite Sous Une Charge Monotone

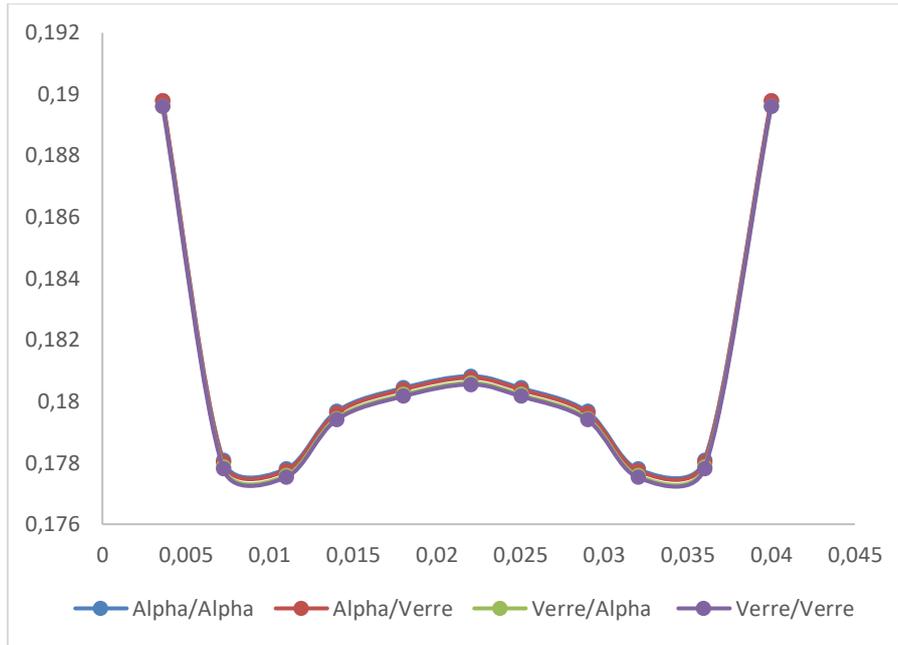


B1) d=0.03 mm.



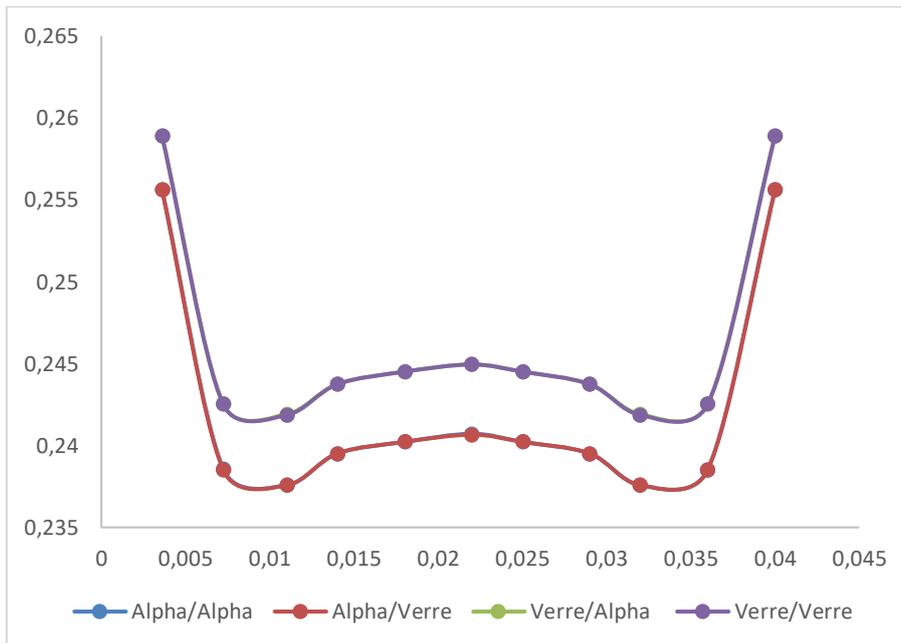
B2) d=0.02 mm.

Ch. III Comportement Des VER Hybrides Fissurés En Matériaux Composite Sous Une Charge Monotone



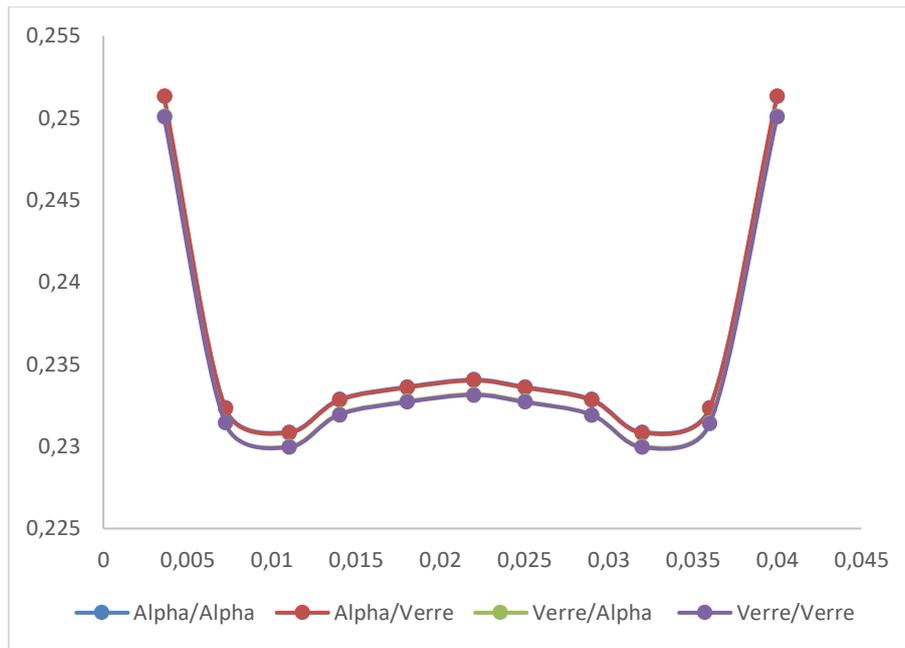
B3) d=0.01 mm.

***Cas I=0.012 mm**

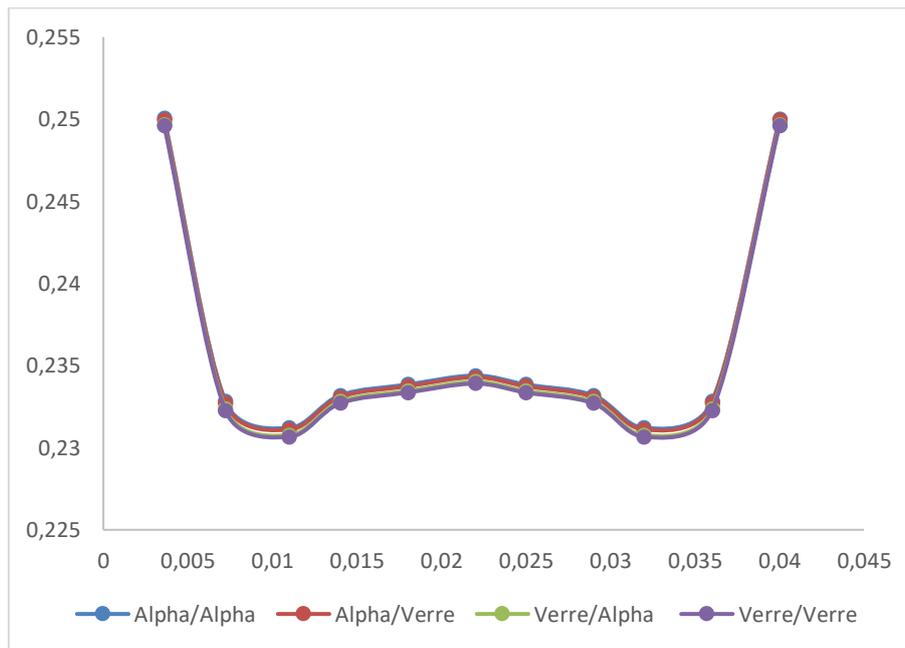


C1) d =0.03 mm.

Ch. III Comportement Des VER Hybrides Fissurés En Matériaux Composite Sous Une Charge Monotone



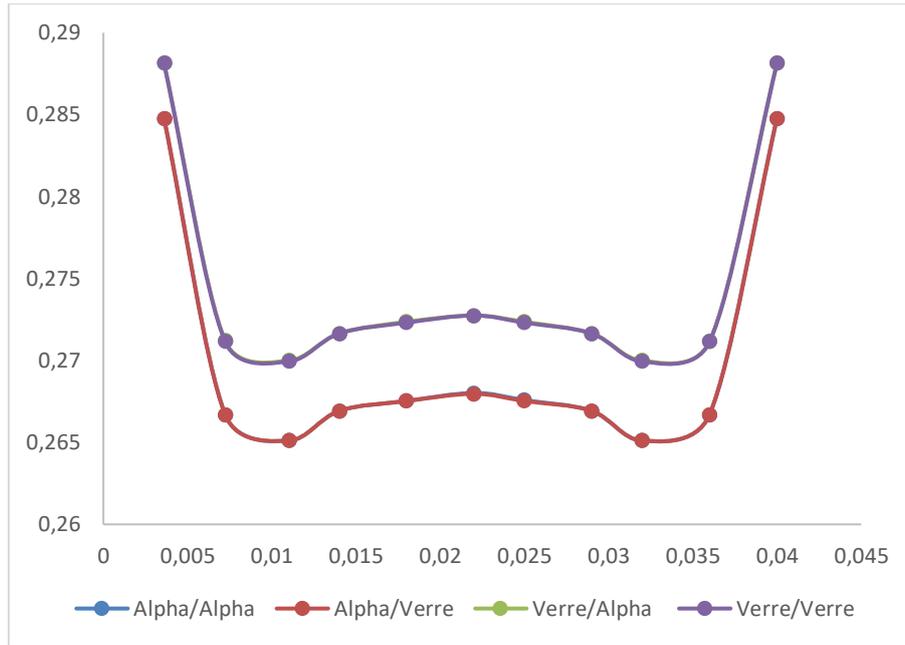
C2) d=0.02 mm.



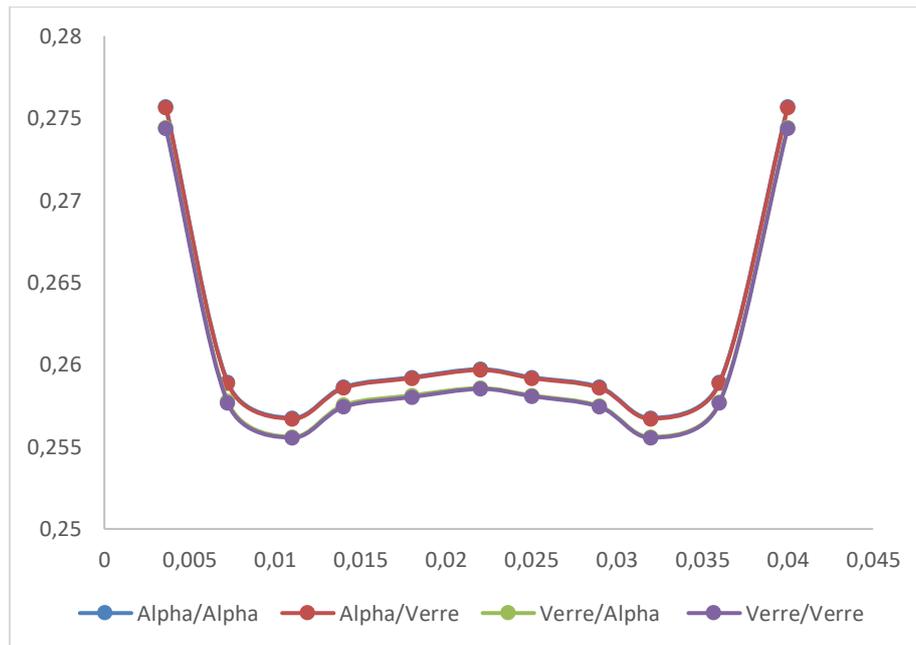
C3) d=0.01 mm

*Cas I=0.014 mm

Ch. III Comportement Des VER Hybrides Fissurés En Matériaux Composite Sous Une Charge Monotone

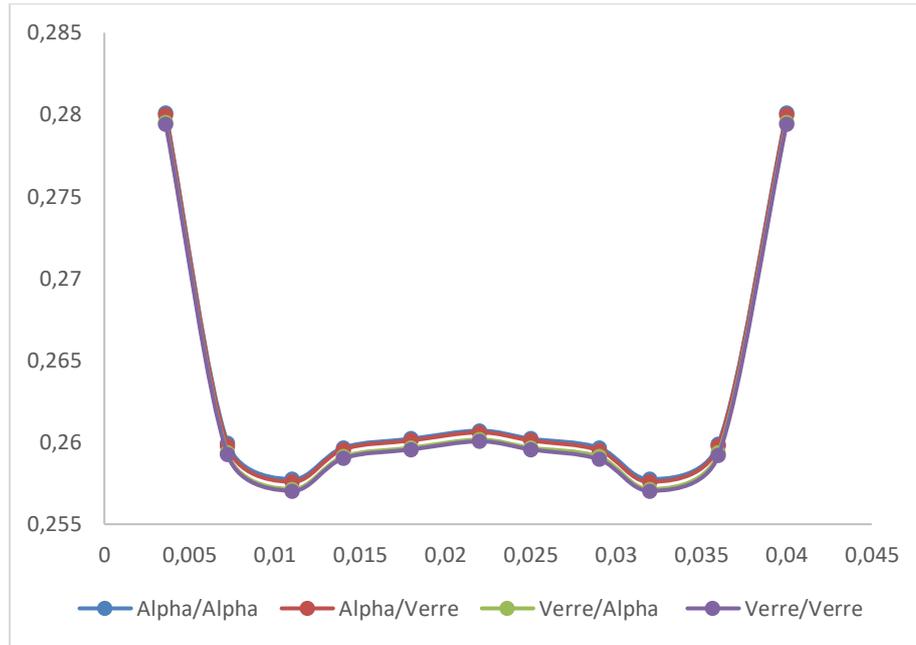


D1) d=0.03 mm.



D2) d=0.02 mm.

Ch. III Comportement Des VER Hybrides Fissurés En Matériaux Composite Sous Une Charge Monotone



D_2) $d=0.01$ mm.

Figure III.5 : Variation du rapport entre le facteur d'intensité de contrainte K_I et le facteur d'intensité de contrainte critique K_{IC} en fonction de la largeur du REV des différents matériaux Alfa-Alfa/époxy, Alfa-Glass/époxy, Glass-Alfa/époxy et Glass-Glass/époxy et pour différentes longueurs de la fissure l et l'inter-distance d entre les deux fibres.

Les figures 5(A₁, B₁ et C₁), 5(A₂, B₂ et C₂), 5(A₃, B₃ et C₃) et 5(A₄, B₄ et C₄) montrent la variation du rapport du facteur d'intensité de contraintes K_I sur le facteur d'intensité de contraintes critique K_{IC} en fonction de la largeur du volume élémentaire représentatif (VER) composite des différentes inter-distances entre les deux fibres ($d=0.03$ mm, $d=0.02$ mm et $d=0.01$ mm) et pour les différentes longueurs de la fissure ($l=0.004$ mm, $l=0.005$ mm, $l=0.006$ mm et $l=0.007$ mm) des quatre volumes élémentaires représentatifs (VER) composites (Alfa-Alfa/Epoxy, Alfa-Glass/Epoxy, Glass-Alfa/Epoxy et Glass-Glass/Epoxy). Il est à noter que quelle que soit la longueur de la fissure, l'inter-distance entre les deux fibres et les différents volumes élémentaires représentatifs (VER) composites, les courbes du rapport K_I / K_{IC} ont la même forme et présentent une symétrie par rapport au milieu de la largeur du VER et donc l'analyse pourra être effectuée sur la moitié de la largeur de délaminage. D'après les résultats numériques obtenus par la méthode des éléments finis, on peut dire que :

Quelle que soit la longueur de la fissure et l'inter-distance entre les deux fibres les volumes élémentaires représentatifs (VER) composites, dont la même fibre du côté du bord de la fissure

Ch. III Comportement Des VER Hybrides Fissurés En Matériaux Composite Sous Une Charge Monotone

(Alfa-Alfa/Epoxy, Alfa-Glass/Epoxy) ou (Glass-Alfa /Epoxy et Glass-Glass/Epoxy), possèdent des courbes confondues.

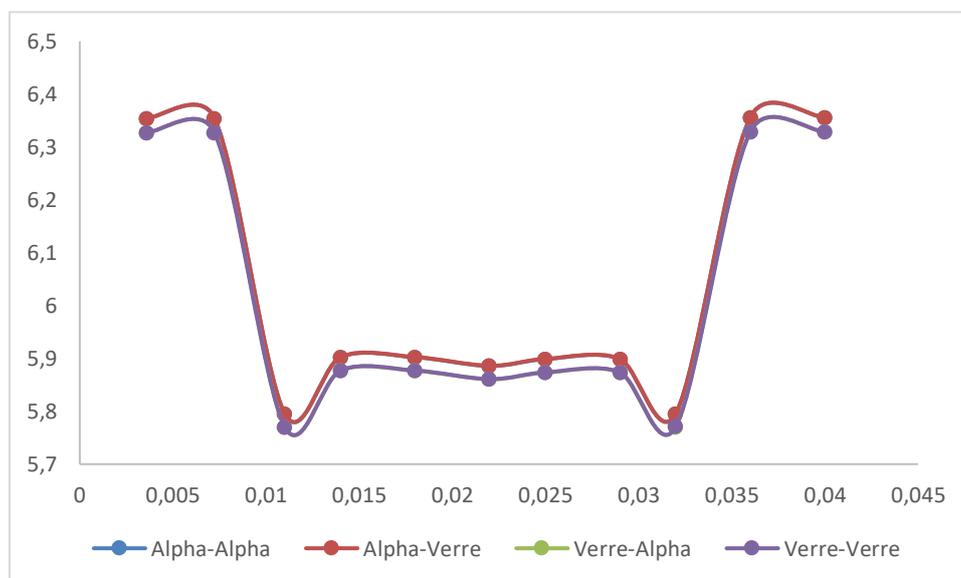
Les volumes élémentaires représentatifs (VER) composites Alfa-Alfa/Epoxy et Alfa-Glass/Epoxy se comportent mieux que les VER Glass-Alfa /Epoxy et Glass-Glass/Epoxy du point de vue résistance.

Au fur et à mesure que les deux fibres se rapprochent entre elles, les quatre courbes des différents VER deviennent confondues (les courbes A₁, B₁ et C₁ ; A₂, B₂ et C₂ ; A₃, B₃ et C₃) et cela quelle que soit l'inter-distance en deux les fibres.

Le rapport des facteurs d'intensités de contraintes augmente avec l'augmentation de la longueur de la fissure (les courbes A₁, A₂ et A₃ ; B₁, B₂ et B₃ ; C₁, C₂, et C₃).

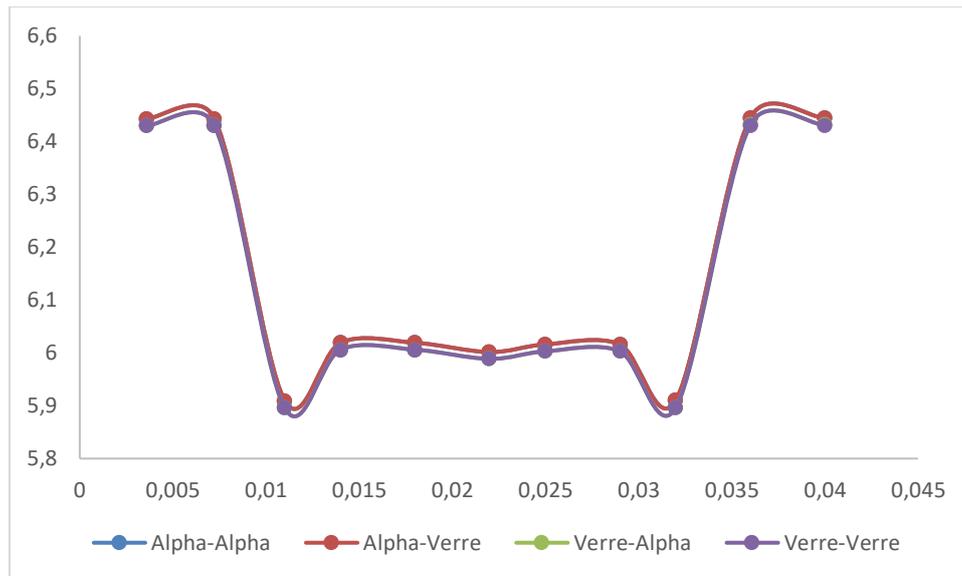
III.4.4 La distribution de la contrainte de Von Mises équivalente le long de la largeur du VER :

III.4.4.1 Influence de la position longitudinale des différents types de fibres du composite REV sur la distribution de la contrainte équivalente de Von Mises.

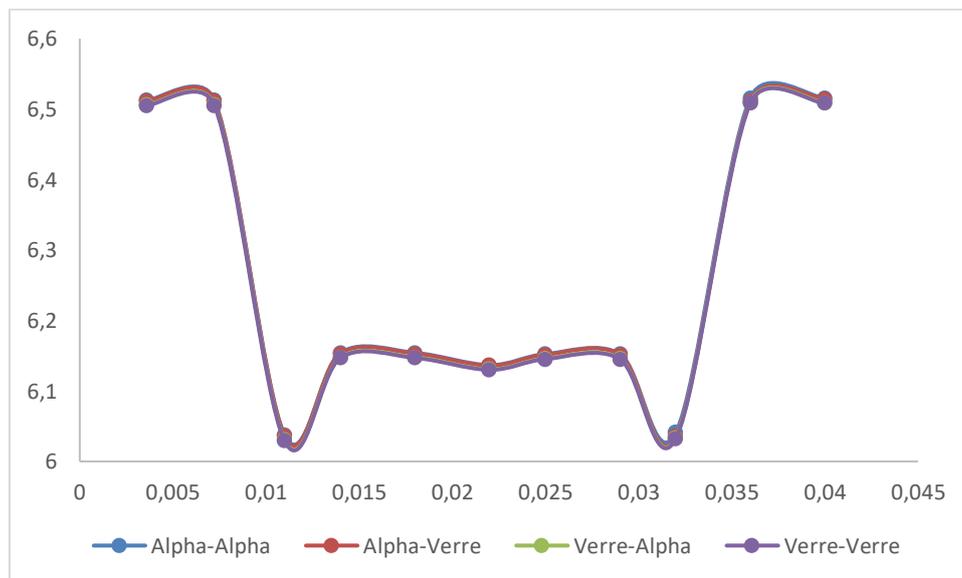


A₁ l=0.008mm(d=0.03mm)

Ch. III Comportement Des VER Hybrides Fissurés En Matériaux Composite Sous Une Charge Monotone



A₂ l=0.008mm(d=0.02mm)



A₃ l=0.008mm(d=0.01mm)

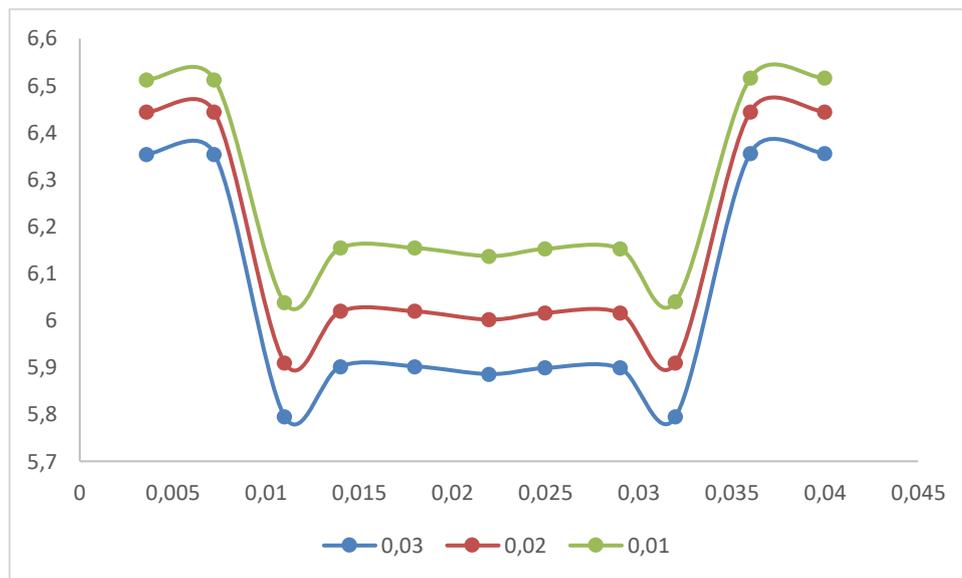
Figure III.6 : Variation de la contrainte de Von Mises équivalente en fonction de la largeur du REV des différents matériaux Alfa-Alfa/époxy, Alfa-Glass/époxy, Glass-Alfa/époxy et Glass-Glass/époxy et pour la longueur de la fissure $l=0.008$ mm et différentes inter-distance d entre les deux fibres.

La figure III.6 (A₁, A₂ et A₃) montrent la variation de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction de la largeur du VER des différents matériaux Alfa-Alfa/époxy, Alfa-Glass/époxy, Glass-Alfa/époxy et Glass-Glass/époxy et pour la longueur de la fissure $l=0.008$ mm et différentes inter-distance d entre les deux fibres. Il est à noter que quelle que soit la longueur de la fissure, l'inter-distance en deux les fibres et les différents volumes élémentaires

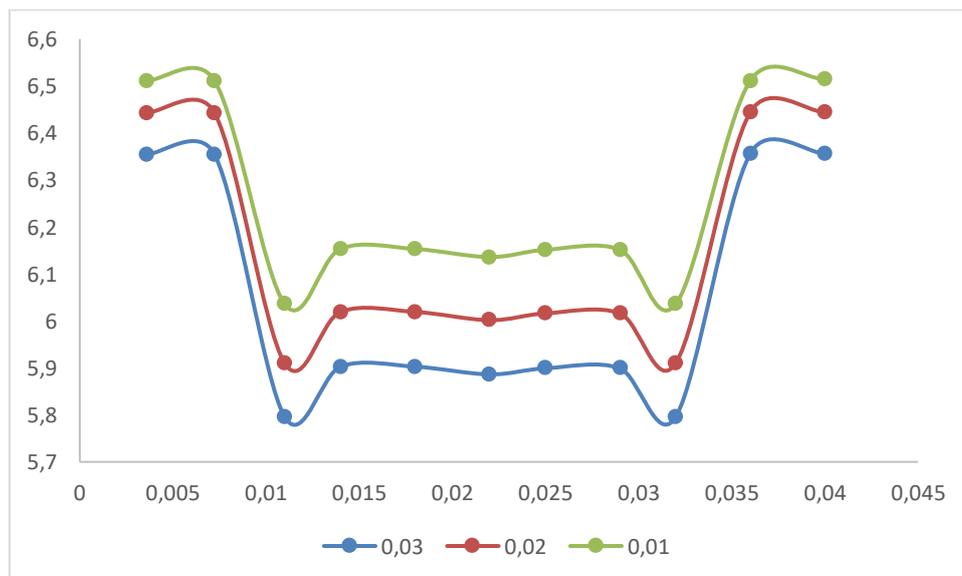
Ch. III Comportement Des VER Hybrides Fissurés En Matériaux Composite Sous Une Charge Monotone

représentatifs (VER) composites, les courbes de la distribution des contraintes ont la même forme et présentent une symétrie par rapport au milieu de la largeur du VER. On note que les résultats numériques obtenus par la méthode des éléments finis, conclut les remarques citées dans la figure III.5.

III.4.4.2 Influence du matériau composite hybride REV sur la distribution de la contrainte équivalente de Von Mises.

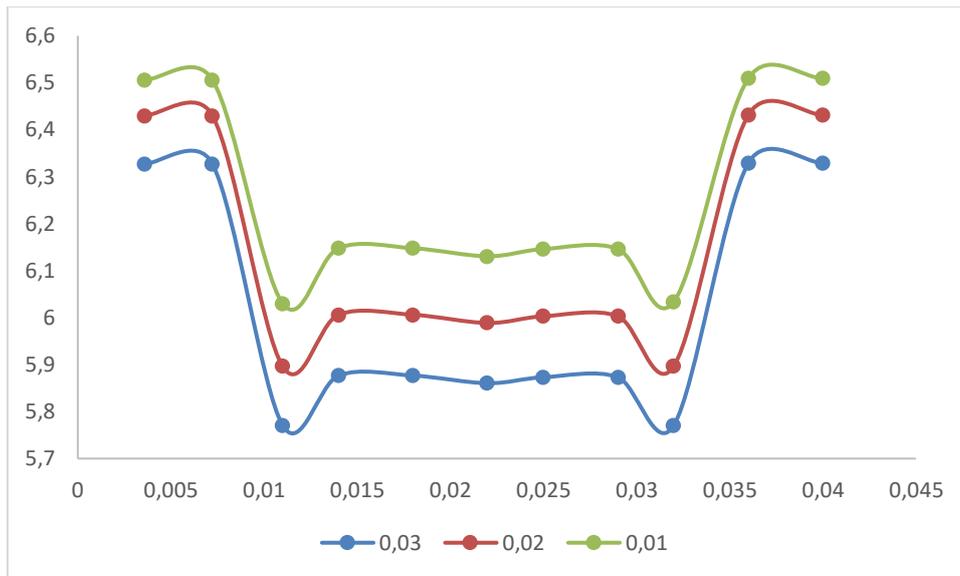


A) Alpha-Alpha/Epoxy (l=0.008mm)

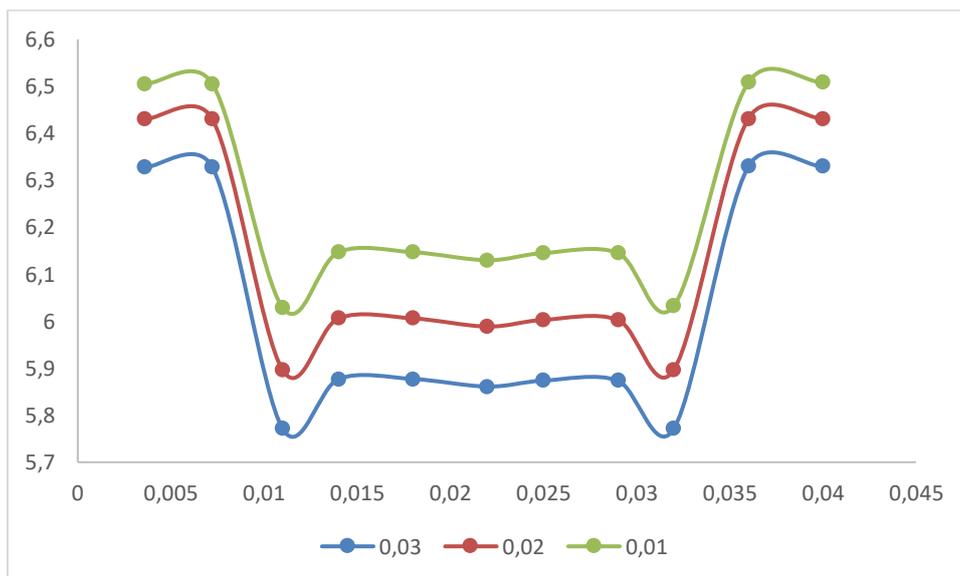


B) Alpha-Verre/Epoxy (l=0.008mm)

Ch. III Comportement Des VER Hybrides Fissurés En Matériaux Composite Sous Une Charge Monotone



C) Verre-Alpha/Epoxy (l=0.008mm)



D) Verre-Verre/Epoxy (l=0.008mm)

Figure III.7 : Variation de la contrainte de Von Mises équivalente en fonction de la largeur du REV des différentes inter-distance d entre les deux fibres pour des différents matériaux Alfa-Alfa/époxy, Alfa-Glass/époxy, Glass-Alfa/époxy et pour la longueur de la fissure l=0.008 mm.

La figure III.7 (A, B, C et D) montrent la Variation de la contrainte de Von Mises équivalente en fonction de la largeur du REV des différentes inter-distance d entre les deux fibres pour des différents matériaux Alfa-Alfa/époxy, Alfa-Glass/époxy, Glass-Alfa/époxy et pour la longueur de la fissure l=0.008 mm. On constate que l'inter-distance entre les deux fibres d=0.01 mm

Ch. III Comportement Des VER Hybrides Fissurés En Matériaux Composite Sous Une Charge Monotone

possède la contrainte équivalente de Von Mises maximale et cela quelque soit le type de matériau hybride VER

Conclusion générale

Conclusion Générale

Conclusion générale :

Cette étude nous a mené à tirer la conclusion suivante :

- La propagation de la fissure s'effectue en mode I pur et ce en fonction de la force appliquée sur le composite. Le facteur d'intensité de contrainte K_I est significativement plus élevé que les deux autres modes.

- Que quelle que soit l'inter-distance en deux les fibres et les différents volumes élémentaires représentatifs (VER) composites, le rapport K_I/K_{IC} ne change presque pas de valeurs cela signifie que les différents inter-distance entre les fibres influent pas sur le VER composite hybride.

- Qu'au fur et à mesure que la longueur de la fissure augmente le rapport K_I/K_{IC} augmente et cela quel que soit le volume élémentaire représentatif hybride composite et l'inter-distance « d » entre les deux fibres.

- Quelle que soit la longueur de la fissure et l'inter-distance entre les deux fibres les volumes élémentaires représentatifs (VER) composites, dont la même fibre du côté du bord de la fissure (Alfa-Alfa/Epoxy, Alfa-Glass/Epoxy) ou (Glass-Alfa /Epoxy et Glass-Glass/Epoxy), possèdent des courbes confondues.

- Les volumes élémentaires représentatifs (VER) composites Alfa-Alfa/Epoxy et Alfa-Glass/Epoxy se comportent mieux que les VER Glass-Alfa /Epoxy et Glass-Glass/Epoxy du point de vue résistance.

- Au fur et à mesure que les deux fibres se rapprochent entre elles, les quatre courbes des différents VER deviennent confondues (les courbes A1, B1 et C1 ; A2, B2 et C2 ; A3, B3 et C3) et cela quelle que soit l'inter-distance en deux les fibres.

- Le rapport des facteurs d'intensités de contraintes augmente avec l'augmentation de la longueur de la fissure (les courbes A1, A2 et A3 ; B1, B2 et B3 ; C1, C2, et C3).

- L'inter-distance entre les deux fibres $d=0.01$ mm possède la contrainte équivalente de Von Mises maximale et cela quel que soit le type de matériau hybride VER.

***Références
Bibliographiques***

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] Y. Ledru, « étude de la porosité dans les matériaux composites stratifiés aéronautiques », Institut National Polytechnique de Toulouse, 2009, p5.
- [2] Vinson, J. R., and R. L. Sierakowski. "Introduction to Composite Materials." The behavior of structures composed of composite materials. Springer, Dordrecht, 1987. 1-27.
- [3] Ye, Jianqiao. Laminated composite plates and shells: 3D modelling. Springer Science & Business Media, 2002.
- [4] Balasubramanian, M. Composite materials and processing. Boca Raton: CRC press, 2014
- [5] J.M. Berthelot. Composite Materials: Mechanical Behavior and Structural Analysis. Springer New York. 1999
- [06] R.M. Jones. Mechanics of composite materials, Mc Graw-Hill Company, 1975
- [7] M.Laarej, «Etude par spectroscopie RAMN et modélisation d'un Résine composite RTM», thèse de doctorat, Université AboubakrBelkaid_tlemcen,2010.
- [8] E. J. Jules, « Couplages entre propriétés thermiques, réactivité chimique et viscosité des matériaux composites thermodurcissables en relation avec les conditions de leur élaboration fondée sur l'hystérésis Diélectrique », Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, 2001.
- [9] GHEBRID Nassima, « Etude des problèmes de conduction thermique dans un matériau composite à matrice polymère pigmenté de dioxyde de Titane », UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF 1, janvier 2018.
- [10] L. Gornet, « Généralités sur les matériaux composites », Engineering School, École Centrale de Nantes. 2008.
- [11] Renard J, élaboration, microstructure et comportement des matériaux composites à matrice polymère Lavoisier, 2005
- [12] Cédric THOMAS, « Etude des mécanismes d'endommagement des composites fibres de carbone / matrice polyamide : application à la réalisation de réservoirs de stockage de gaz sous haute pression de type IV », l'École nationale supérieure des mines de Paris, 2011.

Références Bibliographiques

- [13] Chatain, M. (2001) “Matériaux composites : présentation générale”, AM 5 000, Technique de l’ingénieur, Traité Plastiques et Composites, Vol. AM 6.
- [14] M.Laarej, «Etude par spectroscopie RAMN et modélisation d'un Résine composite RTM», thèse de doctorat, Université AboubakrBelkaid_tlemcen,2010.
- [15] Jean-Marie Berthelot, « Mécanique des Matériaux et Structures Composites », Institut Supérieur des Matériaux Le Mans, France
- [16] Abderrezak Gharbi, « ANALYSE DES FISSURATIONS DES MATÉRIAUX COMPOSITES ET DÉTERMINATION DE LEUR DÉLAMINAGE UTILISANT DES CAPTEURS PIÉZO -ÉLECTRIQUES », UNIVERSITE MENTOURI- CONSTANTINE, 2005.
- [17] N. Bourgois, « Caractérisation et modélisation micromécanique du comportement et de l’endommagement d’un composite à matrice métallique : Al/SiCp», Thèse de Doctorat de l’Ecole Centrale de Paris, 1993.
- [18] E. J. Jules, « Couplages entre propriétés thermiques, réactivité chimique et viscosité des matériaux composites thermodurcissables en relation avec les conditions de leur élaboration fondée sur l’hystérésis Diélectrique », Thèse de doctorat de l’Ecole Nationale Supérieure d’Arts et Métiers, Paris, 2001.
- [19] TaqiyeddineMOUMENE, « Polycopie de Cours Les composites », Université Ibn Khaldoun- Tiaret.
- [20] CHENNOUFICHihabeddine, « Étude expérimentale des propriétés mécaniques d’un matériau composite renforcé par des verres longs avec différentes orientation », Université Mohamed Khider de Biskra, Juillet 2019.
- [21] Berthelot, J.-M., Matériaux composites : comportement mécanique et analyse des structures1999 : Paris.
- [22]. Berthelot, J.-M., Matériaux composites : comportement mécanique et analyse des structures 1999 : Paris.

Références Bibliographiques

- [23] Anh Vu NGUYEN, « Matériaux composites à renfort végétal pour l'amélioration des performances de systèmes robotiques », UNIVERSITÉ BLAISE PASCAL – CLERMONT II, octobre 2015.
- [24] Lionel Gendre, Matériaux composites et structures composites. <http://www.si.ens-cachan.fr>, Sciences de l'ingénieur, 2011.
- [25] J.M. Berthelot. Composite Materials: Mechanical Behavior and Structural Analysis. Springer New York. 1999.
- [26] L. GENDRE, « Matériaux composites et structures composites », cour présentée à L'université de Paris SACLAY, 2011.
- [27] BENDIFALLAH Mourad, « Travail de recherche sur les matériaux à mémoire viscoélastiques parfaitement élastiques pour une nouvelle Prothèse Totale de Hanche. », UNIVERSITÉ DE BATNA, 2012
- [28] A.V. NGUYEN, Matériaux composites à renfort végétal pour l'amélioration des performances des systèmes robotique », thèse de doctorat, université ne blaise pas calclermontII,2015.
- [29] ZEGHIB N, « Contribution à l'étude du comportement d'un matériau composite à base de fibres de carbone pour la réalisation de prothèses orthopédiques (ONAAPH Annaba) », UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2019.
- [30] CARMA « Glossaire des matériaux composites » Actualisation octobre 2006.
- [29] ZEGHIB N, « Contribution à l'étude du comportement d'un matériau composite à base de fibres de carbone pour la réalisation de prothèses orthopédiques (ONAAPH Annaba) », UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2019.
- [30] CARMA « Glossaire des matériaux composites » Actualisation octobre 2006.
- [31] Hill, R. (1963). Elastic properties of reinforced solids: some theoretical principles. J. Mech. Phys. Solids, 11, 357–372.

Références Bibliographiques

- [32] 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.
- [33] Van Mier, J.G.M. (1997). *Fracture processes of concrete*. CRC Press, Inc., USA., Vinh Phu Nguyen, V.P., Lloberas-Valls, O., Stroeven, M. (2010). On the existence of representative volumes for softening quasi-brittle materials-A failure zone averaging scheme *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 199, 3028-3038.
- [34] Vinh Phu Nguyen, V.P., Lloberas-Valls, O., Stroeven, M. (2010). On the existence of representative volumes for softening quasi-brittle materials-A failure zone averaging scheme *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 199, 3028-3038.
- [35] Hashin, Z.S. (1963). A variational approach to the theory of elastic behavior of multiphase materials. *J. Mech Phys Solids* Vol. 11, p. 127–140.
- [36] Hollister, SJ, Kikuchi, N, (1992). A comparison of homogenization and standard mechanics analyses for periodic porous composites, 10, 73-95
- [37] Zohdi, I.I. (2002). *An Introduction to Computational Micromechanics*
- [38] Aidun, J.B., Lo, D.C.S., Trucano, T.G., Fye, R.M., (1999). *Representative Volume Size: A Comparison of Statistical Continuum Mechanics and Statistical Physics*, Sandia National Laboratories Albuquerque, New Mexico.
- [39] Terada, K., Hori, M., Kyoya, T. and Kikuchi, N., (2000). Simulation of the multi-scale convergence in computational homogenization approaches, *Int. J. Solids. Struct.* (37) 2285–2133.
- [40] 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,
- [41] Huet, C. (1999). Coupled size and boundary condition effects in viscoelastic heterogeneous and composite bodies. *Mechanics of Materials* 31.12, 787-829.
- [42] Huet, C. (1990). Application of variational concepts to size effects in elastic heterogeneous bodies. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 38, 813–813.

Références Bibliographiques

- [43] Ostoja-Starzewski, M. (1998). Random field models of heterogeneous materials." *International Journal of Solids and Structures* 35.19, 2429-2455.
- [44] Ostoja-Starzewski, M. (1999). Scale effects in materials with random distributions of needles and cracks. *Mechanics of Materials* 31.12, 883-893.
- [45] Pecullan, S., Gibiansky, L. V., and Torquato, S. (1999). Scale effects on the elastic behavior of periodic and hierarchical two-dimensional composites. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 47.7, 1509-1542.
- [46] Kouznetsova, V., Brekelmans, W. A. M., and Baaijens, F. P. T. (2001). An approach to micromacro modeling of heterogeneous materials. *Comput. Mech.*, 27, 37–48
- [47] 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.
- [48] Wang J.S. (1998). Random Sequential Adsorption, Series Expansion and Monte Carlo Simulation, *Physics A*, 254, 179–184.
- [49] 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
- [50] Hashin, Z., Shtrikman, S., (1963). A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 11, 127-140.
- [51] Christensen, R.M. (1979a). *Mechanics of Composite Materials*. New York: Wiley.
- [52] Romero, P., Masad, E. (2001). Relationship between the Representative Volume Element and Mechanical Properties of Asphalt Concrete
- [53] Al-Raoush, R., Papadopoulos, A. (2010). Representative elementary volume analysis of porous media using X-ray computed tomography. *Original Research*, 200, 69-77
- [54] 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.

Références Bibliographiques

- [55] Qi B. (2006) Simulation numérique du comportement mécanique de composites à particules. Rapport de stage de master 2, École Centrale Paris, CEA.
- [56] Segurado, J. and Llorca, J., (2002). Computational micromechanics of composites: The effect of particle spatial distribution. *Mechanics of Materials* 38, 873–883
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] Sanchez Palencia, E., (1980). *Non-homogeneous Media and Vibration Theory, Lecture Notes in Physics*. (127) Springer Verlag, Heidelberg.
- [60] Babushka, I. (1976). Solution interface problem by homogenization Parts I, II. *SIAM J Math. Anal.* 7, 603-645.
- [61] Hollister, SJ, Kikuchi, N, (1992). A comparison of homogenization and standard mechanics analyses for periodic porous composites, 10, 73-95
- [62] Hollister, SJ, Kikuchi, N, (1992). A comparison of homogenization and standard mechanics analyses for periodic porous composites, 10, 73-95
- [63] Forest S. Milieux continus généralisés et matériaux hétérogènes. Habilitation à diriger les recherches, École Nationale Supérieure des Mines de Paris (2004).
- [64] Kanit T., Forest S., Galliet I., Mounoury V. et Jeulin D. Determination of the size of the representative volume element for random composites: statistical and numerical approach. *International Journal of Solids and Structures* 40 (2003) pages 3647-3679.
- [65] KRONER (E)– bond for effective elastic moduli of disordered materials (Bornes des modules d'élasticité des matériaux désordonnés). *J. Mechanics and physics of solids (GB)* vol. 25, 1977, p 137-55, bibl. (14réf) pergamon press oxiford.

Références Bibliographiques

- [66] KRONER(E) –effective elastic moduli of periodic and random media: a unification (module d'élasticité effectifs des milieu périodique et aléatoires : une unification). Mechanics research communications (USA) vol. 7 n° 5 1980 p. 323-27 bibl.(5réf.) pergamn press New York
- [67] HASHIN (Z) – analysis of composite materials. A survey (analyse des matériaux composites tout d'horizon). J. Applied Mecahnics (USA) vol. 50 1983 p 481-505 4 fig. bibl. (177 réf). ASME New York
- [68] SUQUET (P) – méthode d'homogénéisation en mécanique des solides. 15 congrès du groupe France de Rhéologie (G.F.R) dans comportements rhéologiques et structure des matériaux. Presses de l'Ecole National des Ponts et Chaussées Paris. 1980 p 87-128 2 fig. bibl (32 réf)
- [69] DUVAUT (G). – Analyse fonctionnelle en mécanique des milieux continus, application à l'étude des matériaux composites élastiques à structure périodique. Homogénéisation . théoetical and appied mechanics. Etide par par W.T. koiter p 119-22,bibl.(41réf) 1976 North Holland publishing company Amsterdam
- [70] BENSOUSSAN (A)-LIONS (J.L) PAPANICOLAOU (G) –Asymptotic analysis for periodic structures (Analyse asymptotique des structures périodiques) 700 p bibl. (172 réf) 1978 North Holland publishing company Amsterdam (USA Elsevier North Holland New York)
- [71] Abderrahim ZEGHLOUL, « Concepts Fondamentaux De La Mécanique De La Rupture », université de lorraine, 2016
- [72] DJEBLOUN Youcef, « Etude Bibliogrphiae, Chapitre III : Mécanique linéaire élastique de la rupture », Université de Biskra
- [73] Chevalier, Y. 1991. Critères de rupture : Approche macroscopique. Techniques de l'ingénieur. Plastiques et composites ISSN 1762-8776, noA7755, A7755.1–A7755.16.
- [74] Hoffman, O. 1967. The brittle strength of orthotropic materials. Jounral of Composite Material, 1, 200–206.

Références Bibliographiques

- [75] Ota, T., Shindo, A., & Fukuoka, H. 1959. A consideration on anisotropic yield criterion. In: Proceeding of the 9th Japan National congress for applied mechanics.
- [76] Boelher, J.P., & Raclin, J. 1985. Failure criteria for glass. fiber reinforced composite under confining pressure. *Journal of Structural Mechanics*, 13, 371–393.
- [77] D. GAY : *Matériaux composites*, volume 5. Lavoisier, Paris, 2005.
- [78] 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.
- [79] P. COGNARD : Résistance chimique et à la corrosion des composites, juin 2004.
- [80] J. RENARD : Fatigue des matériaux composites renforcés de fibres continues, juillet 2010.
- [81] Zeddour Mohamed Brahim Zahera, « PREDICTION DES MECANISMES D'ENDOMMAGEMENT DANS UN MATÉRIAU COMPOSITE » Thèse de Doctorat, USTO-MB (2017/2018).
- [82] ABAQUS Finite Element Program, ABAQUS/Standard 6.14.1. Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc. Pawtuket, USA, 2014.