



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE D'ORAN 2 MOHAMED BEN AHMED
INSTITUT DE MAINTENANCE ET DE SECURITE INDUSTRIEL

*DEPARTEMENT: ELECTROMECHANIQUE
OPTION : MFQ*

*MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLOME DE MASTER 2 EN MAINTENANCE FIABILITE ET
QUALITE*

THEME

**Analyse numérique du comportement
mécanique d'un cylindre en matériaux
composites sous un charge monotone**

Présentés Par :

- Chouder Zakaria
- Belhouchet Khaled

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Achache Habib	MCA	IMSI-UNIV ORAN 2	président
Adjloua Abdelaziz	MAA	IMSI-UNIV ORAN 2	Examineur
Abdi Ghezail	MCB	IMSI-UNIV ORAN 2	Encadreur

Année Universitaire : 2020/2021

RESUME

Suite à une alliance entre un renfort fibreux (verre, bore et graphite), et un liant (la résine époxy), le matériau composite offre de nouvelles possibilités dans le domaine de transport et de l'aéronautique. Avec sa densité extrêmement plus faible que celle du métal, ce matériau est caractérisé par de meilleures propriétés de résistance à la pression et à la corrosion. Au cours des dernières années, les progrès de la simulation numérique ont donné lieu à des développements significatifs dans l'étude des matériaux composites et leur modélisation mécanique. À l'heure actuelle, le contrôle du comportement mécanique des matériaux et structures composites, sous charges statiques est un domaine vaste et complexe de la recherche. La modélisation des phénomènes physiques variés caractéristiques du comportement d'un matériau composite en cours de déformation joue un rôle important dans la conception des structures. Notre étude a pour objectif d'analyser numériquement le facteur d'intensité de contraintes de trois tubes composites stratifiées croisé[+ α , - α] en présence d'une fissure longitudinale, en verre, en graphite et en bore avec une matrice époxy, en fonction de plusieurs paramètres tels que l'orientation des fibres et le matériau

ABSTRACT

Resulting from an alliance between a fibrous reinforcement (glass, boron and graphite), and a binder (epoxy resin), the composite material offers new possibilities in the field of transport and aeronautics. With its extremely lower density than metal, this material is characterized by better properties of resistance to pressure and corrosion. In recent years, advances in digital simulation have given rise to important developments in the study of composite materials and their mechanical modeling. At present, the control of the mechanical behavior of materials and composite structures, under static loads, is a vast and complex field of research. The modeling of the various physical phenomena characteristic of the behavior of a composite material during deformation plays an important role in the design of structures. Our study aims to numerically analyze the stress intensity factor of three cross-laminated composite tubes [+ α , - α] in the presence of a longitudinal crack, in epoxy matrix glass, graphite and boron, as a function of several parameters such as fiber orientation and material

REMERCIEMENT

Je remercie premièrement le Dieu tout puissant qui ne cesse de me protéger, merci seigneur de m'accorder ta bénédiction à travers ma soutenance

-J'exprime mes profondes gratitude et respectueuses reconnaissances à mon encadreur professionnel madame ABDI GHEZAIL pour sa bonne volonté d'accepter de m'encadrer, pour tout le temps qu'elle m'a accordée et pour tous les conseils qu'elle m'a prodigué.

-Je remercie aussi mon encadreur académique Dr ACHACHE HABIB pour ses directives précieuses, et pour la qualité de ses suivis durant toute la période de mon projet.

-Ma gratitude va également à l'endroit du staff administratif du Département DE MAINTENANCE INDUSTRIEL ainsi qu'aux enseignants du master professionnel dont nous constituons la première promotion.

DEDICACE

Je tiens à dédier ce mémoire : A ma très chère Mère et à mon cher Père, en témoignage et en gratitude de leurs dévouements, de leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconforts moraux, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affections sans limites.

- A mes chères frères lahcen et raid et ma chère sœur dina.
- A mes amis Salah, Abdou ,Hani, mouatez ,Nasro ,khairo et mouh... .
- A toute ma famille
- A tous mes chers collègues ...
- A notre encadreur Madame abdi

ghezail

- qui nous asoutenus pendant tout

le long de notre travail.

- A mon chère Ami et binôme KHALED pour tous les moments de joie et de peine qu'on a passé ensemble.
- A toute la promotion d'Électromécanique – 2021 ...
- A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ce travail ...

ZAKARIA...

DEDICACE

Je Dédie Ce Modeste Travail

A Ma Mère, Source Du Plus Grand Soutien, Pour Bonté, Et La Précieuse Tendresse, Je Te Témoigne Respectueusement Ma Reconnaissance, Mon Amour Et Ma Gratitude Pour Tout Ce Que Tu As Fait Pour Moi Depuis La Naissance.

Merci A Vous Et Que Dieu Vous Accorde Une Longue Vie.

- *A Mes Sœurs : Asma, Malak.*
- *A Mes Grands Peres.*
- *A tout la faille.*
- *A Mes Amis : Haithem, sofiane , Chiheb, hassoun ,wily .*
- *A Mon Binôme : Chouder Zakaria*

KHALED

sommaire

CHAPITRE I : Généralités sur les matériaux composites

I.1.Généralités sur les matériaux composites	01
I.1.1 Introduction	01
I.1.2.DEFINITION	01
I.1.3 Caractéristiques du matériaux composites.....	02
I.1.4 Domaines d'application.....	02
I.1.5.Constituants des matériaux composites	03
I.1.6. Les renforts	04
I.1.6.1 Différents types de renfort	04
I.1.6.2 Différentes natures de renfort.....	05
I.1.6.3.Les fibres	05
I.1.6.3.1.Les fibres de verre	05
I.1.6.3.1.1.Différents type de verres filables	06
I.1.6.3.2.Les fibres de carbone	06
I.1.6.3.2.1.Caractéristiques mécaniques des fibres de carbone	07
I.1.6.3.3.Fibre d'aramide.....	07
I.1.6.3.3.1.Caractéristiques mécaniques des fibres aramides	08
I.1.6.3.4.Les fibres céramiques	08
I.1.6.3.4.1.Caractéristiques mécaniques	09
I.1.6.3.5.Autres fibres	09
I.1.7.La matrice	10
I.1.7.1.LES RÉSINES	10
I.1.7.1.1.Les divers types de résines	10
I.1.7.1.1.1.Les résines thermodurcissables.....	11
I.1.7.1.1.2.Les résines thermoplastiques.....	14
I.1.7.1.1.3.Les résines thermostables	15
I.1.8.LES CHARGES ET ADDITIFS.....	16
I.1.8.1. Introduction	16
I.1.8.1.1.les charges	16
I.1.8.1.2.les additifs	16
I.1.8.1.3.l'interface	16
I.1.9.la mise en œuvre des matériaux composites	17
I.1.10.architecture des matériaux composites :.....	17
I.1.10.1.monocouche	18
I.1.10.2.stratifiés	18
I.1.10.3.sandwichs	18
I.1.11.conclusion	18

Chapitre II : Les dégradations des matériaux composites

II. Les dégradations des matériaux composites	23
II.1 les phénomènes physiques	24
II.1.1. Introduction	24
II.1.1.2 Les phénomènes physiques	24
II.1.2 - Dégradations suite à des sollicitations parallèles aux fibres	25
II.1.3. Dégradations suite à des sollicitations non parallèles aux fibres	25
II.1.3.1. A l'échelle des fibres	26
II.1.4. Modes de ruine d'un stratifié	27
II.1.4.1. Bilan	28
II.2. effets sur le comportement	28
II.2.1. Introduction.....	28
II.2.2. Etude expérimentale du comportement de stratifiés qui se dégradent	29
II.2.2.1. Empilement unidirectionnel	30
II.2.2.3. Empilement [45,-45]s	31
II.2.2.4. Bilan	32
Conclusion	33
II.2.3 facteurs d'intensité des contraintes par extrapolation du champ de déplacements	34
II.2.4. Position du problème.....	34
II.2.5. Mise en œuvre des méthodes d'extrapolation	36
II.2.6. Précision des méthodes proposées.....	37
II.2.7. Conclusion.....	41

Chapitre III : Analyse numérique d'un tube fissuré en matériaux composites

III.1 Introduction	43
III.2 Modèle géométrique	43
III.3 Modélisation Numérique	45
III.3.1 Méthode des éléments finis	45
III.4.1 Effet de l'orientation des fibres sur le facteur d'intensité de contrainte Cas des deux bords de la fissure.....	46
III.4.2 Effet du matériau sur le facteur d'intensité de contrainte	50
III.4.3 Contour de la fissure après déformation	51
III.4.1 Effet de l'orientation des fibres sur la contrainte équivalente de Von Mises.....	52
III.4.1 Effet du matériau sur la contrainte équivalente de Von Mises	53

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

CMP : Composites à Matrice plastique ;
MMO : Composites à Matrice Organique ;
CMM : Composites à Matrice Métallique ;
CMC : Composites à Matrice Céramique ;
HR : Fibres haute résistance ;
HM : Fibres haut module ;
TP : Matrices thermoplastiques ;
TD : Matrices thermodurcissables ;
UD : unidirectionnel ;
DSC : L'analyse calorimétrique différentielle ;
DMA : Avec l'analyse mécanique dynamique ;
PA : Polyamide ;
PET, PBT : Polytéréphtalate éthylénique et butylénique ;
PC: Polycarbonate ;
PPS : Polysulfure de phénylène ;
POM : Polyoxyméthylène ;
PSU : Polysulfurés ;
PP : Polypropylène ;
PAI : Polyamide-imide ;
PEI : Polyéther-imide ;
PES : Polyéther-sulfone ;
PEEK : Polyéther-éther-cétone ;
NMA : d'anhydride méthylnadique;
TO: Thermo-Oxydation ;
RO: Radio-Oxydation ;
Ea : énergie suffisante ;
x : direction
E : l'énergie d'activation ;
L'indice *f* : signifie que le paramètre se rapporte à un fibre ;
L'indice *m* : signifie que le paramètre se rapporte à une matrice ;
Sd : la zone endommagée ;
Se : la zone efficace de la résistance ;
S : le volume superficiel élémentaire ;
n : norme ;
T300 / 914 : composites a matrice thermodurcissable (époxy) ;
G-E / époxy : nano-composites (Graphite-E/ époxy) ;

Liste des figures

Figure I.1. Matériau composite.....	03
Figure I.2 : Différentes familles du renfort.....	05
Figure.I.3 : Observation micrographique de fibres.....	05
Figure I.4 : D'efférentes familles de matrice.....	10
Figure I.5 :Couche de composite.....	17
Figure I.6 :Constitution d'un stratifié.....	17
Figure II.7 :Matériaux sandwiches à âmes pleines	18
Figure II.8 : Structure d'un composite stratifié à base de plis unidirectionnels (Images Gilles Lubineau).....	23
Figure II.9 : Fibres rompues : (a) en traction (image de Zhao et Takeda, 2000), (b) en compression, avec formation de kink bands (image de Yerramalli et Waas, 2003)....	23
Figure II.10 : (a) Une décohésion fibre/matrice (image de Gamstedt et Sjögren, 1999) (b) répartition des décohésions (image de Sjögren et Berglund, 2000).....	24
Figure II.11: Une microfissure dans le plan du stratifié, entre deux plis à +/-45 Image de Lafarie-Frénot et Lagattu, 2000	25
Figure II.12: (a) Jonction entre plusieurs décohésions fibre/matrice (image de Sjögren et Berglund, 2000) (b) fissure transverse (image de Gilles Lubineau, 2001).....	26
Figure II.13: Radiographie d'un stratifié analogue à celui de la figure 6b, après un essai de traction	26
Figure II.14 : Apparition de délaminage local à l'extrémité de fissures transverses Image de Blazquez et al, 2009.....	26
Figure II.15 : Une plaque trouée en stratifié quasi-isotrope, rompue par délaminage sous chargement de traction (image de Hallett et Wisnom, 2008).....	27
Figure II.16: Les différentes dégradations mécaniques possibles dans un stratifié.....	28
Figure II.17: Essais de traction sur des stratifiés.....	29
Figure II.18 : Trois stratifiés de mêmes dimensions: (a) un [0]4 (unidirectionnel à 4 plis), (b) un [0/90]s, (c) un [+45/-45]s.....	29
Figure II.19 : Courbe effort-allongement mesurée sur le stratifié unidirectionnel.....	29

Figure II.20 : Eprouvette unidirectionnelle après rupture : on observe de nombreuses fibres rompues.....	30
Figure II. 21 : Modélisation des conditions aux limites appliquées sur une éprouvette dans le cas idéal d'une traction pure, (b) dans le cas « non idéal » où les extrémités sont serrées.....	30
Figure II.22 : Courbe effort-allongement mesurée sur un [0,90]s.....	30
Figure II.23 : (a) Radiographie des fissures transverses dans le stratifié, bien avant la rupture(image de Gilles Lubineau) ; (b) éprouvette rompue, où l'on distingue de nombreux délaminages et fissures transverses ainsi que des fibres rompues.....	31
Figure II.24 : Courbe effort-allongement mesurée sur un [45,-45]s.....	31
Figure II.25 : Eprouvette [45,-45]s rompue ; on distingue de nombreux délaminages et fissures transverses (les dégradations microscopiques sont, par définition, invisibles !)	32
Figure II.26 : Comparaison des courbes effort-allongement mesurées sur les trois stratifiés.....	32
Figure III.27 : Modèle géométrique.....	44
Figure III. 28: Conditions aux limites.....	44
Figure III.29: Maillage.....	46
Figure III.30: Variation du facteur d'intensité de contraintes K_I en fonction de l'orientation des fibres pour les deux fonds de fissure.....	47
Figure III.31: Variation du facteur d'intensité de contraintes K_{II} en fonction de l'orientation des fibres pour les deux fonds de fissure.....	47
Figure III.32 : Variation du facteur d'intensité de contraintes K_I et K_{II} en fonction de l'orientation des fibres pour le matériau composite verre/époxy.....	48
Figure III.33 : Variation du facteur d'intensité de contraintes K_I et K_{II} en fonction de l'orientation des fibres pour le matériau composite bore/époxy.....	49
Figure III.34 : Variation du facteur d'intensité de contraintes K_I et K_{II} en fonction de l'orientation des fibres pour le matériau composite graphite/époxy.....	50
Figure III.35 : Variation du facteur d'intensité de contraintes K_I en fonction de l'orientation des fibres pour les trois matériaux composite verre/époxy, bore/époxy et graphite/époxy..	51

Figure III.36: Contour de la fissure après déformation suivant les trois plans.....	51
Figure III.37: Variation de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction de l'orientation.....	52
Figure III.38: Variation de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction de l'orientation des fibres pour les trois matériaux.....	53

Liste des tableaux

Tableau I.1. Exemples de matériaux composites, pris au sens large.....	1
Tableau I.2 : Propriétés mécaniques des fibres FILABLE.....	6
Tableau I.3. Caractéristiques des fibres de carbone, comparées à celles des fibres de verre E.....	7
Tableau I.4. Caractéristiques mécaniques de monofilaments aramides.....	8
Tableau I.5. Caractéristiques mécaniques des fibres de bore, bore-carbure de bore et carbure de silicium.....	9
Tableau III.1 : Propriétés des trois composites stratifiés.....	43

Introduction générale

Les composites stratifiés à fibres longues de verre, graphite et de bore et à matrice époxy présentent d'excellentes propriétés mécaniques spécifiques. Dans les industries aérospatiale et aéronautique, ils ont pris une place importante dans certaines pièces de structures. Néanmoins, autant ces composites stratifiés peuvent avoir une résistance et une raideur très élevée dans le sens des fibres, autant, leur résistance sur les plis perpendiculaires au chargement est faible. La contrainte pour laquelle des fissures apparaissent étant plus faible dans la direction perpendiculaire que dans le sens des fibres, un réseau de fissures apparaît dans la couche 90°. Cette dégradation du composite a été étudiée par de nombreux auteurs.

Expérimentalement, il a été observé que les différents mécanismes d'endommagement dans les stratifiés croisés sont la fissuration transverse, le délaminage en pointe de fissure ou interlaminaire et la fissuration longitudinale [1].

L'ordre et la séquence d'apparition de ces endommagements dépendent principalement des paramètres suivants : la nature des constituants fibre/matrice, l'architecture de la plaque stratifiée, le processus de fabrication et de mise en forme ainsi que les différents types de sollicitations. La rupture finale du composite résulte de la propagation et de l'accumulation de ces trois types d'endommagement. Dans la littérature, ces endommagements ont généralement été étudiés de manière séparée : les études portent soit sur la propagation des fissures transverses par une méthode analytique ou numérique [4], soit sur un modèle analytique de délaminage [2].

Cependant quelques auteurs étudient le rôle des fissures transverses dans le déclenchement du délaminage entre les couches. Par exemple, Wang et Karihaloo [3] étudient le meilleur empilement (0°,45°,90°) pour réduire la concentration de contrainte en pointe de fissure et la constante de cisaillement en mode II à l'interface. En raison de l'hétérogénéité du matériau composite, des études probabilistes ont aussi été réalisées par deux approches : certains [5, 4] utilisent un critère probabiliste sur la répartition de contrainte critique alors que [6] utilise un critère de répartition aléatoire sur le taux de restitution d'énergie critique.

L'objectif de notre travail est d'évaluer le paramètre K (facteur d'intensité de contrainte) et le facteur G (taux de restitution d'énergie) de trois tubes, constituées du même époxyde et avec différentes fibres de renforcement (graphite, bore et verre) en variant l'orientation des fibres et le matériau.

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

Le premier chapitre présente une généralité sur les matériaux composites

Le deuxième chapitre, quant à lui, présente une généralité sur la dégradation des matériaux composites organiques et les modes de rupture.

Le troisième chapitre présente les matériaux de l'étude sous l'effet de plusieurs paramètres.

Enfin, notre travail se clôture par une conclusion générale en présentant un récapitulatif des principaux résultats apportés par ce projet.

Chapitre I

I.1. Généralité sur les matériaux composites [1] :

I.1.1 Introduction :

Le développement de nouveaux matériaux est soumis aux besoins des utilisateurs (constructeurs). Ceux-ci veulent toujours des matériaux plus performants, plus économiques et qui durent plus longtemps.

Les chercheurs sont le plus souvent amenés à optimiser les solutions déjà utilisées, mais dans certains cas, ils doivent complètement repenser le problème et envisager de " nouveaux matériaux

". En effet, on ne découvre plus de nouveaux matériaux, mais on crée plutôt des nouvelles associations de matériaux.

L'un des résultats de cette association est l'aboutissement à un matériau composite, qui fait le sujet de notre étude.

I.1.2. DEFINITION :

Dans un sens large, le mot "composite" signifie "constitué de deux ou plusieurs parties différentes". En fait, l'appellation matériau composite ou composite est utilisée dans un sens beaucoup plus restrictif, qui sera précisé tout au long de ce chapitre. Nous en donnons pour l'instant la définition générale suivante. Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Des exemples de matériaux composites pris au sens large sont donnés au tableau 1.1.

TABLEAU I.1. Exemples de matériaux composites, pris au sens large.

Type de composite	Constituants	Domaines d'application
1. <i>Composites à matrice organique</i> Papier, carton Panneaux de particules Panneaux de fibres Toiles enduites Matériaux d'étanchéité Pneumatiques Stratifiés Plastiques renforcés	Résine/charges/fibres cellulosiques Résine/copeaux de bois Résine/fibres de bois Résines souples/tissus Elastomères/bitume/textiles Caoutchouc/toile/acier Résine/charges/fibres de verre, de carbone, etc. Résines/microsphères	Imprimerie, emballage, etc. Menuiserie Bâtiment Sports, bâtiment Toiture, terrasse, etc. Automobile Domaines multiples
2. <i>Composites à matrice minérale</i> Béton Composite carbone-carbone Composite céramique	Ciment/sable/granulats Carbone/fibres de carbone Céramique/fibres céramiques	Génie civil Aviation, espace, sports, bio-médecine, etc. Pièces thermo-mécaniques
3. <i>Composites à matrice métallique</i>	Aluminium/fibres de bore Aluminium/fibres de carbone	Espace

On distingue deux types de composites: les composites grande diffusion et les composites haute performance.

- **Grande diffusion :**

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

- **Hautes performances :**

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

- drapage autoclave, enroulement filamentaire, RTM.
- beaucoup de procédés encore manuels.
- CMM, CMC.

I.1.3 Caractéristiques du matériaux composites [2] :

Les propriétés des matériaux composites dépendent de beaucoup de facteurs et sont différentes selon les divers types de matériaux composites. Ces propriétés résultent :

- des propriétés, de la nature et de la quantité des matériaux constitutifs.
- des constituants, de la géométrie et de la distribution du renfort
- de leurs interactions, de la nature de l'interface matrice -renfort, etc.

Les principales caractéristiques des pièces fabriquées en matériaux composites sont :

- le gain de masse,
- la bonne tenue en fatigue (durée de vie augmentée),
- l'absence de corrosion,
- l'absence de plasticité (leur limite élastique correspond à la limite de rupture)
- le vieillissement sous l'action de l'humidité et de la chaleur,
- l'insensibilité à certains produits chimiques courants (solvants, peinture, huiles, pétroles,...),
- tenue aux impacts et aux chocs très moyenne,
- très forte anisotropie .

I.1.4 Domaines d'application [3] :

Les excellentes performances mécaniques des matériaux composites fibres - résine en terme de caractéristiques spécifiques en font des matériaux attrayants pour l'utilisation dans les structures. En outre, l'intérêt de ces matériaux réside dans leur anisotropie aisément contrôlable par le concepteur qui peut ainsi ajuster la rigidité et la résistance en fonction des sollicitations extérieures. Ainsi l'immense avantage des matériaux composites est de pouvoir être optimisés pour chaque application : on peut placer le renfort exactement où il est nécessaire. Cette optimisation résulte en une grande performance de ces matériaux, qui sont souvent de loin les plus légers pour une résistance mécanique spécifiée. Cependant ils restent très chers à fabriquer! D'où leurs domaines d'application :

- électricité et électronique,
- bâtiment et travaux publics,

- transports routiers, ferroviaires, maritimes, aériens et spatiaux (notamment militaire),
 - santé (instrumentation médicale),
 - sports et loisirs (skis, raquette de tennis, planche à voile, surf, club de golf, aviron,...).
- Ainsi on note que les matériaux composites sont surtout utilisés pour des applications où une haute performance est recherchée et où le prix n'est pas le facteur primordial.

1.1.5. Constituants des matériaux composites [4] :

Les matériaux composites sont constitués principalement :

- D'un renfort.
- D'une matrice à laquelle sont ajoutés, dans certains composites des charges,
- D'une interface.

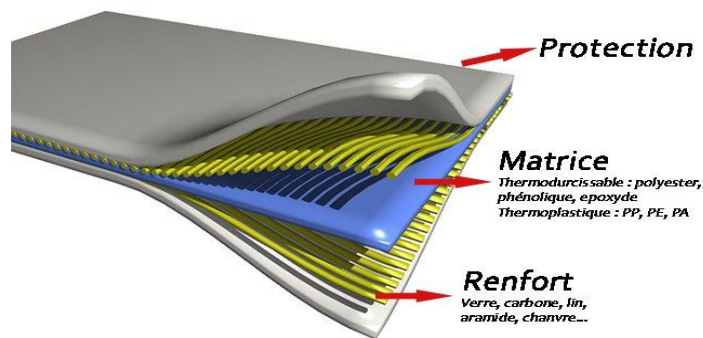


FIGURE I.1. Matériau composite

I.1.6. Les renforts [5]:

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique à la traction et la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme filamentaire (des fibres organiques ou inorganiques).

I.1.6.1 Différents types de renfort :

Les renforts les plus utilisés se présentent sous forme de fibres ou formes dérivées et constituent une fraction volumique de matériau composite généralement comprise entre 0.3 et 0.7.

Les renforts fibres se présentent sous diverses formes commerciales.

- Sous forme de roving (fils, mèches, etc. ...): le roving est un assemblage de fils de bases parallèles groupés sans torsion.

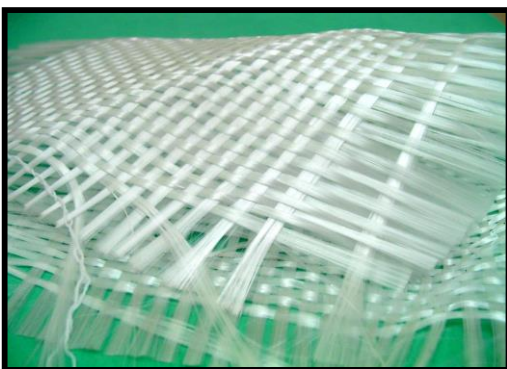
- Sous forme de tissus (tissus taffetas, toiles, serge, etc. ...): le tissu est formé par l'entrecroisement perpendiculaire des roving.

Les tissus de roving peuvent peser jusqu'à 800 g/m².

- Sous forme de mat (à fil coupé, à fil continu): le mat est un matelas de fils coupés ou continu à ensimage plastique, agglomérés par un liant à solubilité rapide ou lente dans la résine.



a – Roving de verre



b – Tissu de verre



c – Mat de verre

11.6.2 Différentes natures de renfort [5]:

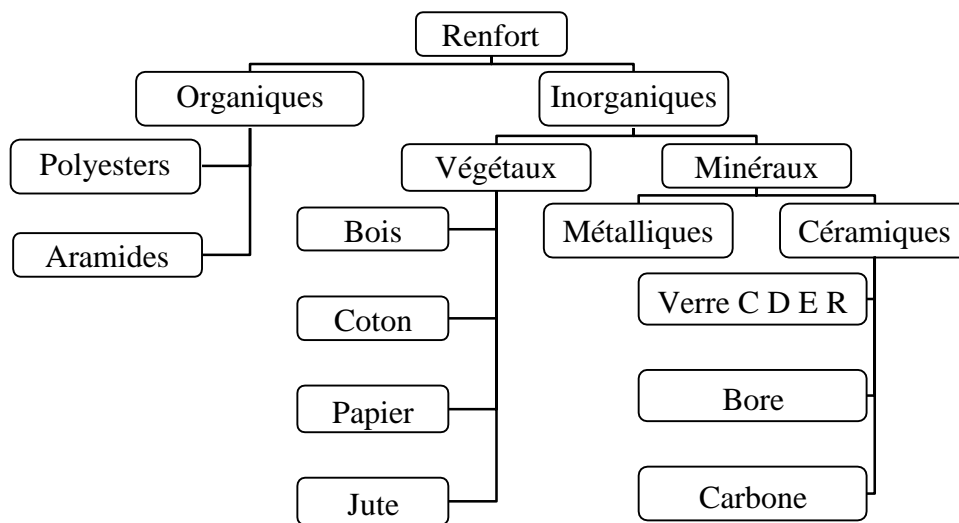


Figure I.2 : Différentes familles du renfort.

1.1.6.3. Les fibres [6] :

Les fibres utilisées se présentent soit sous forme continues (fibres longues), soit sous forme discontinues (fibres courtes)

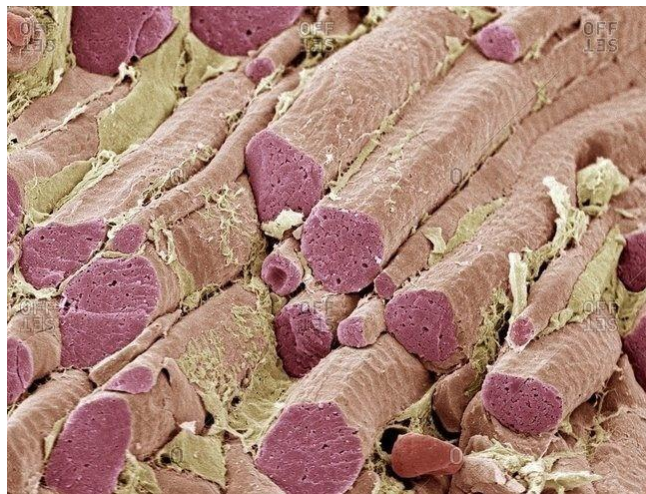


Figure I.3 : Observation micrographique de fibres

1.1.6.3.1. Les fibres de verre :

Le verre sous forme massive est caractérisé par une très grande fragilité, attribuée à une sensibilité élevée à la fissuration. Par contre, élaboré sous forme de fibres de faibles diamètres (quelques dizaines de micromètres), le verre perd ce caractère et possède alors de bonnes caractéristiques mécaniques. Les fibres de verre sont élaborées à partir d'un verre filable, appelé verre textile, composé de silice, alumine, chaux, magnésie, etc. Ces produits peu coûteux, associés à des procédés assez simples d'élaboration, confèrent aux fibres de verre un excellent rapport performances/prix, qui les place de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans les matériaux composites.

I.1.6.3.1.1. Différents type de verres filables [7] :

- le verre D, à hautes propriétés diélectriques, pour la construction de matériel électronique de télécommunications, en particulier les radomes;
- le verre C, résistant aux agents chimiques pour les couches superficielles des structures particulièrement exposées sur le plan chimique;
- les verres R et S, à caractéristiques mécaniques élevées pour la réalisation de structures à hautes performances mécaniques.

tableau I.2 : Propriétés mécaniques des fibres FILABLE

fibre	Module en traction(GPa)	σ_r (MPa) en traction	Allongement à la rupture en %	E_L (MPa) Longitudinal e	Diamètre du filament élémentaire μm
Verre E	73.5	3400	4.8	73000	3-30
Verre R S	86.5	4650	5.4	86000	3-30
Verre C	70	2800	4.0	70000	12
Verre A	72	3100	4.8	130000	12
Verre D	52.2	2450	4.5	130000	1.45

I.1.6.3.2. Les fibres de carbone [8] :

La fibre de carbone se compose de fibres extrêmement fines, d'environ cinq à dix micromètres de diamètre, et est composée principalement d'atomes de carbone. Ceux-ci sont agglomérés dans des cristaux microscopiques qui sont alignés plus ou moins parallèlement à l'axe long de la fibre. L'alignement des cristaux rend la fibre extrêmement résistante pour sa taille. Plusieurs milliers de fibres de carbone sont enroulées ensemble pour former un fil, qui peut être employé tel quel ou tissé.

Ce matériau est caractérisé par sa faible densité (1,7 à 1,9), sa résistance élevée à la traction et à la compression, sa flexibilité, sa bonne conductivité électrique et thermique, sa tenue en température et son inertie chimique (sauf à l'oxydation).

Sa principale utilisation est de servir de renfort dans les matériaux composites, ce qui permet d'obtenir des pièces ayant de bonnes propriétés mécaniques tout en étant nettement plus légères que les pièces métalliques

I.1.6.3.2.1. Caractéristiques mécaniques des fibres de carbone :

Les fibres de carbone possèdent de très bonnes caractéristiques mécaniques, d'autant plus que leur masse volumique est faible (généralement inférieure à $2\,000\text{ kg/m}^3$). Le tableau 3 compare les caractéristiques des fibres de carbone à celles des fibres de verre E. En outre, il faut noter que les fibres de carbone ont une excellente tenue en température, en atmosphère non oxydante. En effet, leurs caractéristiques mécaniques sont maintenues jusqu'à $1\,500\text{ °C}$ environ. Cette propriété a conduit à développer des composites fibres de carbone/matrice de carbone, à haute tenue thermique, utilisés dans les tuyères de fusée, les plaquettes de freins (camions, formule 1, avions), les éléments de fours, etc. Ces matériaux, revêtus d'une couche protectrice anti-oxydante, trouvent également des applications en atmosphère oxydante dans le domaine spatial : bords d'attaque, tuiles, etc.

TABLEAU I.3. Caractéristiques des fibres de carbone, comparées à celles des fibres de verre E.

Caractéristiques	Verre E	Carbone HR	Carbone HM	Carbone THM	Carbone HM (brai)
Masse volumique (kg/m^3)	2 600	1 750	1 810	1 950	2 000
Diamètre (μm)	10à20	5 à 7	5 à 7	5 à 7	12
Module d'Young E_f (GPa)	73	230	400	600	280
Module spécifique $E_f / (\text{MNm/kg})$	28	130	210	310	140
Contrainte à la rupture f_u (MPa)	3 400	3 000– 4 000	2 800	2 000	2 000– 2 400
Contrainte spécifique $f_u / (\text{kNm/kg})$	1 300	1 710– 2 290	1 550	1 030	1 000– 1 200
Prix de revient rapporté aux fibres de verre E	1*	10–15	30–50	200–400	50–100

I.1.6.3.3. Fibre d'aramide [9] :

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

- Les fibres bas module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles ;
- Les fibres haut module : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances

I.1.6.3.3.1. Caractéristiques mécaniques des fibres aramides :

Les caractéristiques mécaniques des fibres aramides sont reportées dans le tableau 4 pour des monofilaments. Sur fils multifilaments, les caractéristiques sont généralement plus faibles. Le tableau montre une contrainte spécifique à la rupture élevée, du même ordre de grandeur que les fibres de carbone haute résistance HR (tableau «3»), toutefois avec un prix de revient 4 à 6 fois moindre. Néanmoins, leur utilisation est limitée par diverses faiblesses des matériaux composites à fibres aramides :

- résistances faibles à la compression, à la flexion, au flambement;
- sensibilité au cisaillement interlaminaire.

Ces faiblesses sont généralement attribuées à une mauvaise adhérence fibre-matrice. Pour y remédier, des ensimages adaptés sont développés. Des composites hybrides (verre-Kevlar, carbone-Kevlar) sont également utilisés.

TABLEAU I.4. Caractéristiques mécaniques de monofilaments aramides.

Caractéristiques	Kevlar 29	Kevlar 49	Kevlar 149	Twaron	Technora
Masse volumique ρ (kg/m ³)	1 440	1 450	1 470	1 440	1 390
Diamètre (μm)	12	12	12	12	12
Module d'Young E_f (GPa)	60	120	160	60	90
Module spécifique E_f/ρ (MNm/kg)	42	83	110	42	65
Contrainte à la rupture σ_{fu} (MPa)	3 000	3 000	2 400	2 600	2 800
Contrainte spécifique σ_{fu}/ρ (kNm/kg)	2 080	2 070	1 630	1 800	2 010
Allongement à la rupture (%)	3,6	1,9	1,5	3	4

I.1.6.3.4. Les fibres céramiques [10] :

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.

I.1.6.3.4.1. Caractéristiques mécaniques :

Les caractéristiques mécaniques des diverses fibres sont assez voisines (par exemple, **tableau 5**). Ces caractéristiques sont maintenues jusqu'à des températures pouvant aller de 500 à 1 000 °C.

Du fait d'un prix de revient élevé, l'utilisation de ces fibres est limitée. Actuellement, les fibres SiC et BorSiC sont essentiellement utilisées avec des matrices métalliques (aluminium, par exemple) ou des matrices céramiques, conduisant à des matériaux composites de coûts très élevés, utilisés pour les aubes de compresseur, les turbines, etc.

TABLEAU I.5. Caractéristiques mécaniques des fibres de bore, bore-carbure de bore et carbure de silicium.

Caractéristiques		Bore	Bore + B ₄ C	SiC
Masse volumique	(kg/m ³)	2 600	2 600	3 000
Diamètre	(µm)	100–150	100–150	100–150
Module d'Young	E_f (GPa)	430	430	410
Module spécifique	$E_f /$ (MNm/kg)	165	165	140
Contrainte à la rupture	f_u (MPa)	3 800	4 000	3 900
Contrainte spécifique	$f_u /$ (kNm/kg)	1 460	1 540	1 300

I.1.6.3.5. Autres fibres [11] :

Il existe diverses autres fibres utilisées pour des applications particulières. Ces fibres sont généralement à faibles module et contrainte à la rupture, excepté les fibres métalliques. Généralement, leur utilisation est réservée à une recherche de :

- produits à bas prix de revient,
- produits à haute isolation thermique,
- produits à bonne conductibilité thermique ou électrique,
- produits à haute absorption acoustique,
- etc.

Parmi ces fibres nous avons:

Les fibres d'origine végétale, telles que le bois utilisé sous forme de fibres orientées, le sisal, le jute, le lin, etc.

Les fibres synthétiques, telles les fibres polyester (tergal, dacron, térylène, etc.), les fibres polyamides, les fibres polyéthylène, les fibres polypropylène, etc.

Les fibres métalliques, comme les fibres d'acier, de cuivre, d'aluminium. Ces fibres sont utilisées avec des matrices métalliques pour leurs bonnes conductibilités thermique et électrique et leurs caractéristiques thermomécaniques élevées.

I.1.7.La matrice [12] :

La matrice est l'élément qui lie et maintient les fibres du renfort fibreux entre elles, ainsi que de répartir les efforts (résistance à la compression ou à la flexion) et assure la protection chimique des fibres. Généralement, c'est un polymère ou une résine organique .

On peut retrouver dans l'organigramme ci-dessous , les différentes natures de matrices :

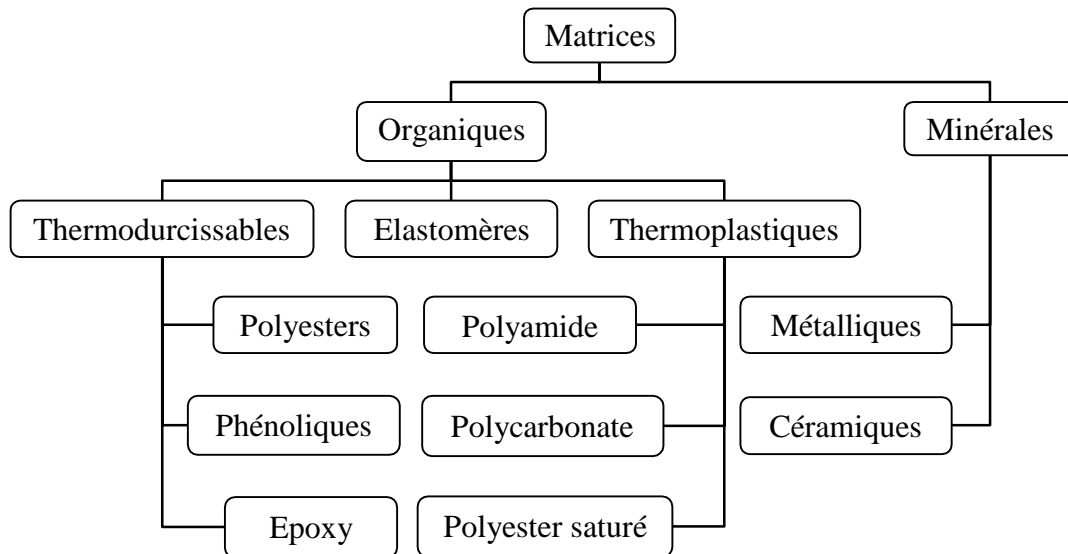


Figure I.4 : Différentes familles de matrice.

I.1.7.1.LES RÉSINES [13] :

I.1.7.1.1.Les divers types de résines :

Les résines utilisées dans les matériaux composites ont pour rôle de transférer les sollicitations mécaniques aux fibres et de les protéger de l'environnement extérieur. Les résines doivent donc être assez déformables et présenter une bonne compatibilité avec les fibres. En outre, elles doivent avoir une masse volumique faible de manière à conserver aux matériaux composites des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées.

Compte tenu de ces contraintes, les résines utilisées sont des polymères, modifiés par différents adjuvants et additifs : agents de démoulage, stabilisants, pigments, etc. Les résines sont livrées en solution, sous forme de polymères non réticulés en suspension dans des solvants qui empêchent le pontage entre les macromolécules prépolymérisées. Sous l'action de la chaleur, des liaisons se développent entre les chaînes du prépolymère pour constituer un polymère réticulé suivant une structure tridimensionnelle. Deux grandes familles de résines polymères existent : les résines thermoplastiques et les résines thermo-durcissables. Ces deux types de résine possèdent la faculté de pouvoir être moulés ou mis en forme, pour donner soit un produit fini, soit un produit semi-fini dont la forme peut être modifiée.

Les résines thermoplastiques, dont la fabrication atteint de loin le plus gros tonnage du fait d'un faible coût, possèdent la propriété de pouvoir être mises en forme plusieurs fois par chauffages et refroidissements successifs. Ces résines peuvent donc être récupérées et facilement recyclées.

Par contre, **les résines thermodurcissables** ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. En effet, après polymérisation par apport de chaleur en présence d'un catalyseur, ces résines conduisent à une structure géométrique qui ne peut être détruite que par un apport important d'énergie thermique. Ainsi, les résines thermodurcissables possèdent des propriétés mécaniques et surtout thermo-mécaniques plus élevées que les résines thermoplastiques.

Du fait de ces caractéristiques plus élevées, les résines thermodurcissables sont les plus employées actuellement dans la mise en œuvre des matériaux composites. Cependant, l'amélioration des caractéristiques des résines thermoplastiques conduit à une utilisation qui ne cesse de croître.

Deux autres classes de résines à usages spécifiques sont également utilisées, ce sont :

- les résines thermoplastiques qui peuvent résister en service continu à des températures de l'ordre de 200 °C et plus,
- les élastomères dont le renforcement par différentes fibres conduit à diverses applications dans le domaine de l'automobile.

I.1.7.1.1.1. Les résines thermodurcissables

Les principales résines thermodurcissables utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont par ordre décroissant en tonnage :

- les résines polyesters insaturées : polyesters condensés, vinylesters, dérivés allyliques, etc.,
- les résines de condensation : phénoliques, aminoplastes, furaniques, etc.,
- les résines époxydes.

Les résines polyesters

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

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

D'où un développement industriel sans cesse croissant.

Suivant leur module d'élasticité, les résines polyesters sont classées en : résines souples, résines semi-rigides et résines rigides. Les résines habituellement utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont du type rigide, et nous retiendrons pour ces résines durcies les caractéristiques suivantes :

Masse volumique	→	1 200 kg/m ³
Module d'élasticité en traction	→	2,8 à 3,5 GPa
Module d'élasticité en flexion	→	3 à 4,5 GPa
Contrainte à la rupture en traction	→	50 à 80 MPa
Contrainte à la rupture en flexion	→	90 à 130 MPa
Allongement à la rupture en traction	→	2 à 5%
Allongement à la rupture en flexion	→	7 à 9%
Résistance en compression	→	90 à 200 MPa
Résistance au cisaillement	→	10 à 20 MPa
Température de fléchissement sous charge (1,8 MPa)		60 à 100 °C

Parmi les avantages des polyesters insaturés, nous retiendrons :

- une bonne rigidité résultant d'un module d'élasticité assez élevé,
- une bonne stabilité dimensionnelle,
- une bonne mouillabilité des fibres et des tissus,
- la facilité de mise en œuvre,
- une bonne tenue chimique,
- un faible coût de production,
- une bonne résistance chimique aux hydrocarbures (essence, fuel, etc.) à température ambiante, etc.

Parmi les inconvénients, nous noterons :

- une tenue médiocre en température : inférieure à 120 °C en service continu,
- une sensibilité à la fissuration, essentiellement dans le cas de chocs,
- un retrait important de l'ordre de 8 à 10 %,
- un mauvais comportement à la vapeur, à l'eau bouillante avec risque d'hydrolyse, d'où la nécessité de recouvrir les matériaux composites à résines polyesters d'une couche de "gel-coat" de manière à les rendre étanches,
- une dégradation à la lumière par les rayons ultraviolets,
- une inflammabilité.

Les résines de condensation :

Les résines de condensation comportent les résines phénoliques, les ami-noplastes et les résines furaniques.

Les *résines phénoliques* sont les plus anciennes des résines thermodur-cissables dont la plus connue est la bakélite. Les caractéristiques de ces résines sont les suivantes :

Masse volumique	1 200 kg/m ³	
Module d'élasticité en flexion	3 GPa	
Contrainte à la rupture en traction	40	MPa
Allongement à la rupture en traction	2,5 %	
Contrainte à la rupture en flexion	90	MPa
Résistance à la compression	250	MPa
Température de fléchissement sous charge	120 °C	

Parmi les avantages, nous citerons :

- une excellente stabilité dimensionnelle,
- une bonne tenue à la chaleur et au fluage,
- une bonne résistance aux agents chimiques,
- un faible retrait,
- de bonnes caractéristiques mécaniques,
- un faible coût.

Parmi les inconvénients, nous noterons :

- une mise en œuvre sous pression, donc à faibles cadences,
- les couleurs foncées des résines,
- une non adaptation à des utilisations alimentaires.

Les résines phénoliques seront donc utilisées dans le cas de pièces nécessitant une tenue élevée en température ou une bonne résistance aux agents chimiques.

Les caractéristiques des *résines aminoplastes* sont voisines de celles des résines phénoliques. Aux avantages de ces résines, il faut ajouter :

- la possibilité d'utilisations alimentaires,
- la possibilité de colorer les résines.

Les *résines furaniques* sont assez peu utilisées en France à cause de leur coût, trois fois plus élevé que les résines polyesters. Parmi leurs avantages :

- un durcissement plus rapide que les résines phénoliques,
- une grande inertie vis-à-vis des agents chimiques corrosifs.

Cette dernière caractéristique conduit à utiliser les résines furaniques dans le cas de matériaux devant résister aux produits chimiques : citernes, tuyaux, bacs, etc.

Les résines époxydes :

Les résines les plus utilisées après les résines polyesters insaturées sont les résines époxydes. Elles ne représentent cependant que de l'ordre de 5 % du marché composite, à cause de leur prix élevé (de l'ordre de cinq fois plus que celui des résines polyesters).

Du fait de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, les résines époxydes, généralement utilisées sans charges, sont les matrices des composites à hautes performances (constructions aéronautiques, espace, missiles, etc.).

Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes sont les suivantes :

Masse volumique	1 100 à 1 500 kg/m ³	
Module d'élasticité en traction	3 à 5 GPa	
Contrainte à la rupture en traction	60 à 80	MPa
Contrainte à la rupture en flexion	100 à 150	MPa
Allongement à la rupture	2 à 5%	
Résistance au cisaillement	30 à 50	MPa
Température de fléchissement sous charge	290 °C	

Les résines époxydes conduisent donc à un ensemble de performances élevées. Toutefois, pour bénéficier réellement de ces performances, il est nécessaire d'avoir des durées de transformation et surtout de recuisson très longues (de plusieurs heures à plusieurs dizaines d'heures), à des températures relativement élevées (50 à 100 °C).

Parmi les avantages des résines époxydes, nous retiendrons :

- de bonnes propriétés mécaniques (en traction, flexion, compression, choc, fluage, etc.) supérieures à celles des polyesters,
- une bonne tenue aux températures élevées : jusqu'à 150 °C à 190 °C en continu;
- une excellente résistance chimique,
- un faible retrait au moulage (de 0,5 à 1 %),
- une très bonne mouillabilité des renforts,
- une excellente adhérence aux matériaux métalliques.

Parmi les inconvénients, nous citerons :

- un temps de polymérisation long,
- un coût élevé,
- la nécessité de prendre des précautions lors de la mise en œuvre,
- une sensibilité à la fissuration.

I.1.7.1.1.2. Les résines thermoplastiques

La famille des résines thermoplastiques (on parle de "plastiques") est très vaste, et peut être séparée en plastiques de grande diffusion et plastiques techniques (ou technopolymères).

Les plastiques de grande diffusion sont mis en œuvre soit par injection pour obtenir des objets moulés, soit par extrusion pour obtenir des films, des plaques, des tubes, des profilés, etc. Les plastiques techniques sont généralement mis en œuvre par injection.

Parmi les résines thermoplastiques, nous citerons : le polychlorure de vinyle (PVC), le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène, le polyamide, le polycarbonate, etc. L'intérêt des thermoplastiques réside dans leur faible coût, résultant à la fois de matières premières disponibles et des procédés de fabrication (injection, extrusion). Toutefois, ce faible coût est lié à des propriétés mécaniques et thermomécaniques faibles. Nous donnons ci-après quelques caractéristiques pour le polypropylène et le polyamide.

	Polypropylène	Polyamide
Masse volumique (kg/m ³)	900	1 140
Contrainte à la rupture (MPa)	20–35	60–85
Module d'élasticité (GPa)	1,1–1,4	1,2–2,5
Température de fléchissement sous charge (°C)	50–60	65–100

Les divers thermoplastiques peuvent être renforcés par des fibres et font partie alors des matériaux composites. Cependant, dans le domaine des composites, les résines thermoplastiques ont un développement limité, du fait de la nécessité de faire appel à des transformations à hautes températures de produits solides.

1.1.7.1.1.3. Les résines thermostables :

Les résines thermostables se distinguent des autres résines, précédemment considérées, essentiellement par leurs performances thermiques qui conservent leurs propriétés mécaniques pour des températures plus élevées que 200°C. Dans la pratique nous retrouvons pour ces résines les deux grandes familles des résines thermoplastiques et thermodurcissables.

Les résines thermostables sont développées surtout dans les domaines de l'aviation et de l'espace, où les laboratoires cherchent à mettre au point de nouvelles résines. Parmi les résines thermostables, les résines bismaléimides et polyimides sont les plus utilisées.

Les résines bismaléimides sont des résines dont le réseau est élaboré à des températures de 180 à 200°C. Les procédés de moulage sont identiques à ceux des composites à matrice thermodurcissable de type polyester ou époxyde.

Les résines polyimides sont apparues sur le marché vers 1970. Ce sont des résines à haute résistance thermique, mais de prix très élevé. Ces résines permettent d'obtenir des composites de résistance supérieure, à 250 °C, à la résistance de l'aluminium.

I.1.8.LES CHARGES ET ADDITIFS [14] :

I.1.8.1. Introduction :

Différents produits peuvent être incorporés à la résine pour lui conférer des caractéristiques particulières ou en réduire le coût. La quantité des produits ajoutés peut varier de :

- quelques dizaines de % dans le cas de *charges*,
- à quelques % et moins dans le cas d'*additifs*.

L'addition de ces produits a pour fonction soit d'améliorer les caractéristiques mécaniques et physiques du produit fini, soit d'en faciliter la mise en œuvre.

I.1.8.1.1.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.

Engénérales ces charges sont des microbilles ou des particules (poudre).

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.1.8.1.2.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.

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

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

I.1.8.1.3.L'interface :

En plus de ces fibres et 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 entre aussi dans la composition du composite, l'interphase etc.

... qui peut jouer sur le comportement mécanique, mais n'interviennent pratiquement jamais dans le calcul de structure composite.

I1.9.LA MISE EN ŒUVRE DES MATERIAUX COMPOSITES :

Généralement le choix d'un procédé de moulage se fait en fonction de certains paramètres à savoir:

- Imprégnation du renfort par le système résineux.
- Mise en forme à la géométrie de la pièce.

Durcissement du système :

- soit par polycondensation et réticulation pour les matrices thermodurcissables,
- soit par simple refroidissement pour les matières thermoplastiques.

Les procédés les plus importants sont :

- Moulage par contact
- Moulage par projection simultanée
- Injection thermodurcissable BMC
- Compression thermodurcissable SMC
- Enroulement filamentaire (ou bobinage)

I.1.10.ARCHITECTURE DES MATERIAUX COMPOSITES [16] :

I.1.10.1.Monocouche:

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres continue, à fibres courtes, fibres tissus et mat.

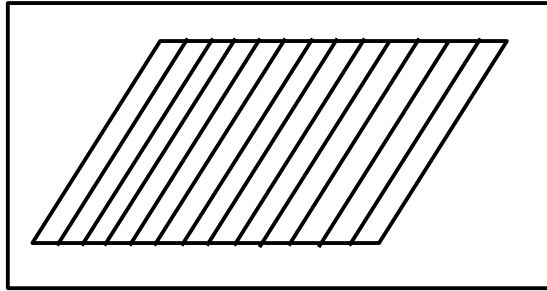


Figure I.5 :Couche de composite

I.1.10.2.Stratifiés :

Les stratifiés sont constitués de couches successives (appelées parfois plis) de renforts (fils, stratifiles, mat, tissus, etc.) imprégnés de résines.

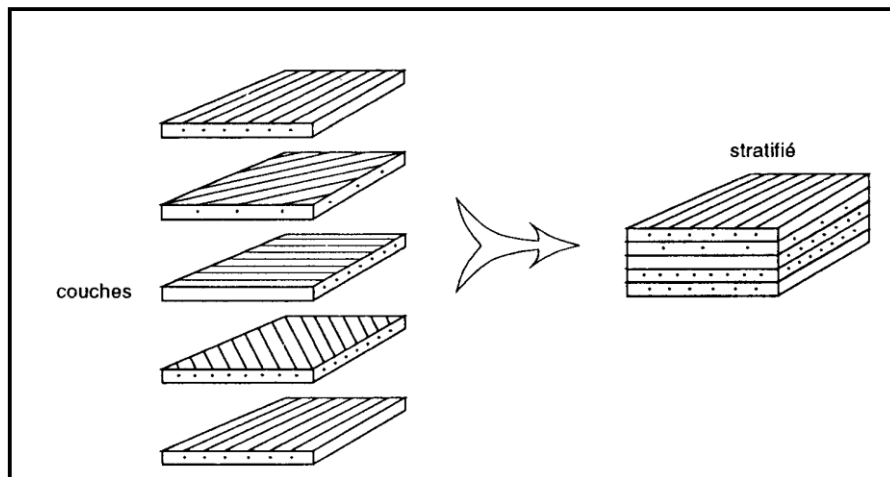


figure I.6 :Constitution d'un stratifié

I.1.10.3.Sandwichs :

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

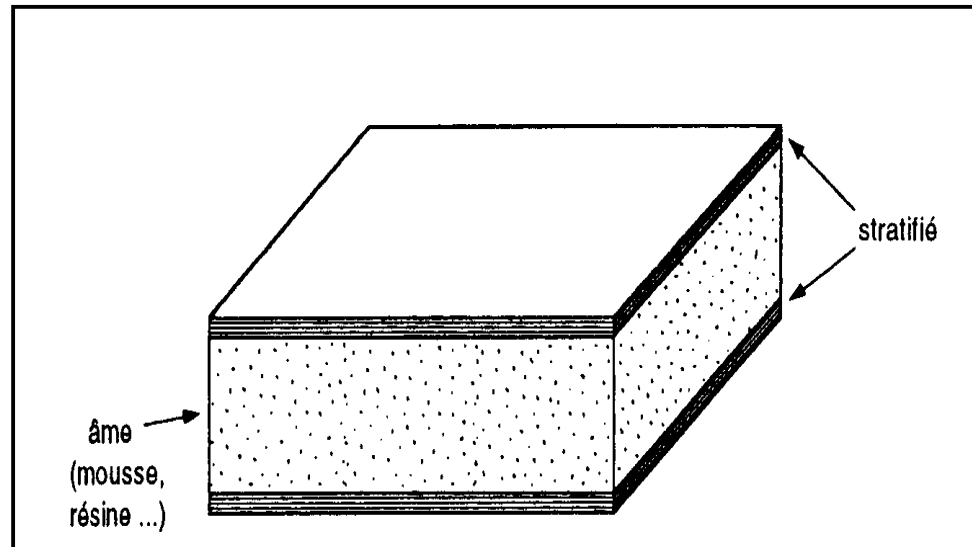


Figure I.7 :Matériaux sandwichs à âmes pleines

I.1.11.Conclusion :

Le choix d'une association entre un renfort et une matrice est très délicat.

En effet, un composite ne peut remplir pleinement sa fonction mécanique que si les charges appliquées au matériau peuvent être transmises de la matrice à la fibre.

En raison de cette interaction, un matériau composite présente une certaine tolérance à l'endommagement.

Plusieurs mécanismes interviennent et contribuent au travail de rupture : fissuration matricielle, décohésion inter faciale6URYEG.

Ces mécanismes qui mettent en jeu les propriétés physiques et mécaniques de chaque constituant soulignent dès à présent le rôle déterminant joué par la liaison fibre/matrice

Chapitre II

II. Les dégradations des matériaux composites [17] :

II.1 les phénomènes physiques :

Les composites, comme tout matériau, peuvent se dégrader sous l'action du chargement qui leur est appliqué. Cette ressource décrit les phénomènes physiques correspondant aux dégradations mécaniques d'une pièce composite, des premiers dommages jusqu'à la rupture. L'exemple retenu est celui d'un stratifié de type « aéronautique ».

II.1.1. Introduction :

Les nouveaux usages des matériaux composites demandent une confiance accrue envers ces matériaux. En effet, longtemps cantonnés à des pièces faiblement sollicitées, les composites sont maintenant largement utilisés sur des structures vitales, notamment en aéronautique (figure 1). Compte tenu des impératifs de sécurité auxquels sont soumises ces structures, le concepteur doit avoir une idée précise des dégradations susceptibles de se produire en leur sein, et ce jusqu'à la ruine (c'est-à-dire la perte des fonctions de rigidité et de résistance mécanique) de la structure.

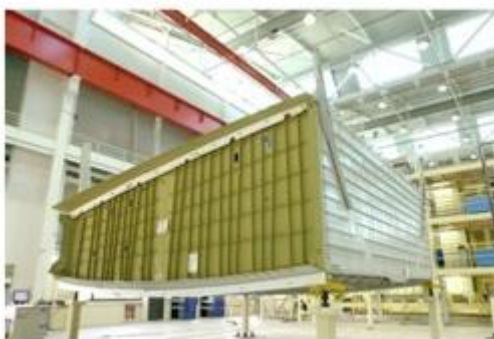


Figure II. 7 : Le caisson central de voilure de l'A380, réalisé en composites (Image Airbus)
 Cette ressource est consacrée aux dégradations mécaniques que l'on peut observer dans une catégorie très courante de structures composites : les stratifiés à base de plis unidirectionnels, et plus particulièrement ceux qui sont formés de fibres continues (souvent de verre ou de carbone) dans une matrice organique, voir figure 2.

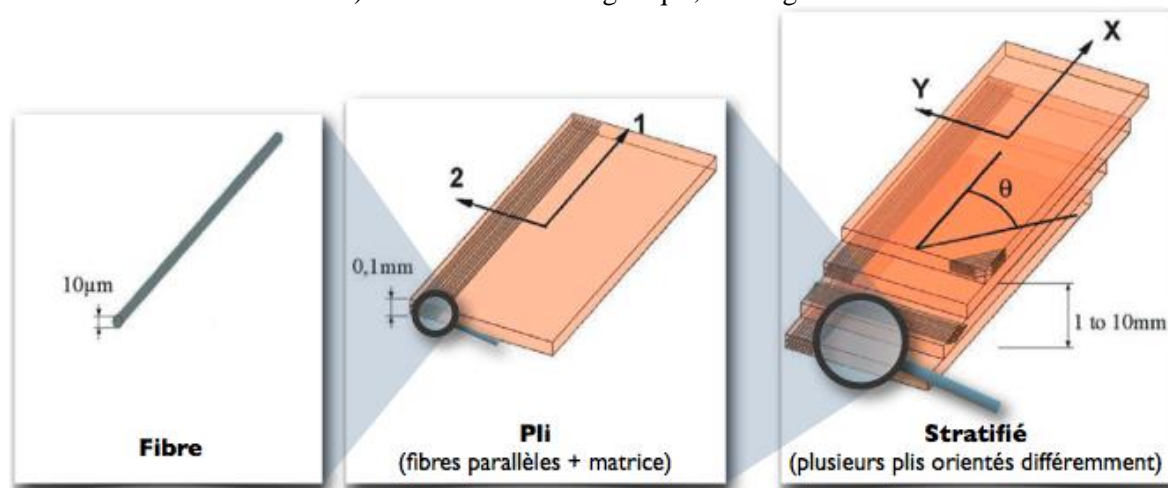


Figure II. 8 : Structure d'un composite stratifié à base de plis unidirectionnels (Images Gilles Lubineau)

Nous nous limitons ici aux dégradations purement mécaniques survenant à température ambiante. Cependant, à haute température ou lors de cycles thermiques, bien d'autres phénomènes non mentionnés ici peuvent entrer en jeu (fatigue thermique, oxydation, fluage...).

II.1.1.2 Les phénomènes physiques :

Comme tous les matériaux, les composites stratifiés ont tendance à se dégrader suivant deux grands principes :

Les dégradations s'initient à l'échelle microscopique, puis se regroupent et s'étendent aux échelles supérieures ;

- Les dégradations se produisent de façon préférentielle dans les interfaces du matériau, qui sont généralement moins résistantes que la matière environnante.

Cependant, les stratifiés à fibres longues présentent deux particularités notables, qui influent sur l'allure de leurs dégradations. La première de ces particularités est de posséder tout un réseau d'interfaces structuré sur plusieurs niveaux (entre les fibres et la matrice ainsi qu'entre les plis) (*voir ressource « Matériaux composites et structures composites »*). Ces interfaces sont particulièrement sujettes aux dégradations puisque, étant situées entre des constituants ayant des propriétés mécaniques très différentes, elles subissent des concentrations de contrainte considérables. Il en résulte que dans les composites stratifiés, les dégradations ont tendance à « suivre » le réseau d'interfaces, et leur allure est donc relativement invariante : on observe sensiblement les mêmes phénomènes sous chargement statique, en fatigue, et même sous des impacts légers.

La seconde particularité des stratifiés à fibres longues, due elle aussi à leur structure, est l'anisotropie de leur comportement mécanique (*voir ressource « Modélisation du comportement des composites : l'élasticité anisotrope »*). On observe donc des phénomènes différents dans chaque pli, selon que celui-ci est sollicité parallèlement aux fibres ou non.

II.1.2 - Dégradations suite à des sollicitations parallèles aux fibres [18] :

Le cas le plus simple est celui des plis sollicités parallèlement aux fibres, puisque la seule dégradation notable susceptible d'y survenir est la (figure 3). Cette rupture survient à des niveaux de chargement élevés, se produit brutalement, et est généralement un phénomène instable conduisant à la ruine du stratifié : dès que quelques fibres rompent, le chargement se reporte sur les autres qui cassent à leur tour, et le stratifié perd très rapidement l'essentiel de sa rigidité dans la direction concernée.

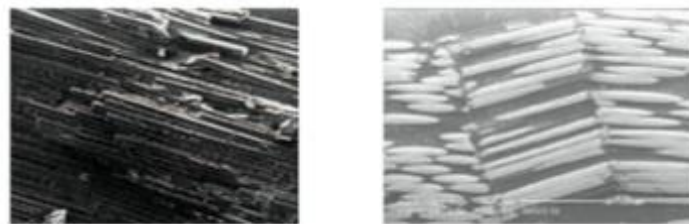


Figure II.9 : Fibres rompues : (a) en traction (image de Zhao et Takeda, 2000), (b) en compression, avec formation de kink bands (image de Yerramalli et Waas, 2003).

La rupture de fibres survient le plus souvent en traction (figure 3a). Elle peut aussi survenir en compression, selon un mécanisme différent (figure 3b) : les fibres rompent alors par flambage, à des niveaux de chargement 2 à 3 fois plus faibles qu'en traction, et on observe les « doubles pliures » visibles sur la figure 3b, nommées *kink bands*.

II.1.3. Dégradations suite à des sollicitations non parallèles aux fibres [19] :

Le cas des sollicitations non parallèles aux fibres, telles que des sollicitations perpendiculaires et/ou avec cisaillement, est très différent : les dégradations apparaissent à des niveaux de chargement très faibles, s'étendent progressivement, et peuvent croître pendant très longtemps

sans forcément entraîner la ruine du stratifié. Le mécanisme mis en jeu est beaucoup plus complexe que précédemment, et les phénomènes peuvent être observés à au moins deux échelles : celle des fibres et celle du pli.

II.1.3.1. A l'échelle des fibres [20] :

Dans un pli sollicité en traction/compression transverse ou en cisaillement, le premier stade est souvent l'apparition de décohésions entre les fibres et la matrice (figure 4), facilitées par les concentrations de contrainte qui affectent l'interface. Ces décohésions sont réparties de façon plus ou moins homogène au sein des plis, et leur nombre augmente progressivement avec l'intensité du chargement.

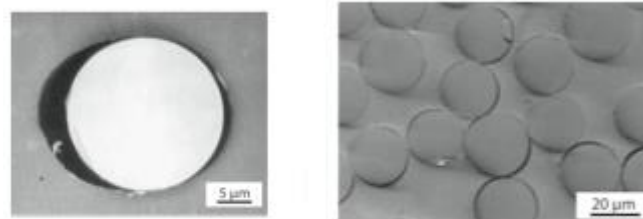


Figure II.10 : (a) Une décohésion fibre/matrice (image de Gamstedt et Sjögren, 1999)
(b) répartition des décohésions (image de Sjögren et Berglund, 2000).

Simultanément, des micro-délaminaçes peuvent apparaître dans les interfaces entre les plis ; il s'agit de fissures microscopiques parallèles au plan du stratifié (figure 10). Ces microfissures sont d'autant plus nombreuses que l'écart angulaire entre les deux plis est important. Là encore, leur répartition est à peu près homogène (cette fois dans l'interface) et leur nombre augmente progressivement.

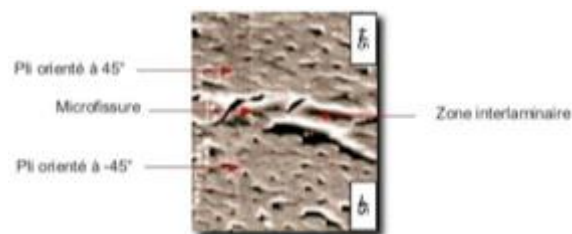


Figure II. 11: Une microfissure dans le plan du stratifié, entre deux plis à +/-45
Image de Lafarie-Frénot et Lagattu, 2000

En règle générale, ces phénomènes sont presque indétectables, et se produisent à des niveaux de chargements tellement faibles qu'ils sont quasiment inévitables pour le concepteur. Pour la plupart des applications, ils ne posent aucun problème. Cependant, si l'intensité du chargement (ou le nombre de cycles) continue à augmenter, des phénomènes plus sévères peuvent apparaître.

II.1.3.1.A l'échelle des fibres

A des niveaux de chargement plus élevés, les fissures microscopiques peuvent croître et se rejoindre jusqu'à former des dégradations plus étendues. Ces dégradations peuvent être de deux types.

Premièrement, les décohésions entre fibres et matrices peuvent se rejoindre pour former des fissures dans l'épaisseur du pli ; passé un certain niveau de chargement, ce phénomène est instable, et les fissures se propagent rapidement jusqu'à traverser toute la largeur et toute l'épaisseur du pli (elles sont stoppées par les interfaces entre plis).

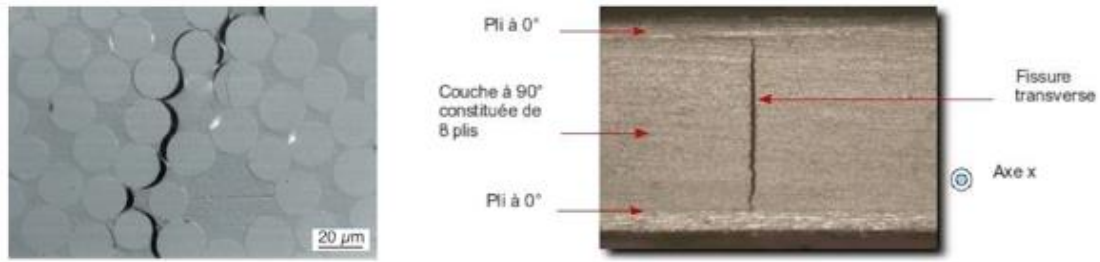


Figure II. 12: (a) Jonction entre plusieurs décohésions fibre/matrice (image de Sjögren et Berglund, 2000) (b) fissure transverse (image de Gilles Lubineau, 2001).

Ce phénomène affecte typiquement les plis à 90° (c'est-à-dire les plis perpendiculaires au chargement) et se nomme fissuration transverse. Il peut ainsi apparaître tout une série de fissures transverses (figure 7) ; tant que les plis à 0° restent intacts, le stratifié continue à supporter la charge. Cependant, la fissuration transverse entraîne une redistribution du chargement vers les plis non fissurés, et cette redistribution peut parfois mener à la ruine.

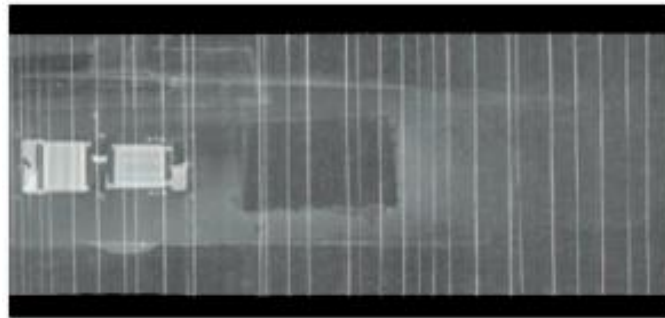


Figure II. 13: Radiographie d'un stratifié analogue à celui de la figure 6b, après un essai de traction ;

Les raies blanches indiquent la présence de fissures dans le pli à 90° (image de Gilles Lubineau, 2002).

Deuxièmement, les fissures ainsi créées ont tendance à poursuivre leur chemin dans les interfaces entre plis, et ces derniers commencent donc à se décoller les uns des autres : c'est le délaminage (figure 8). En effet, les interfaces, naturellement moins résistantes et déjà affaiblies par le délaminage microscopique, subissent des concentrations de contraintes aux extrémités des fissures transverses.

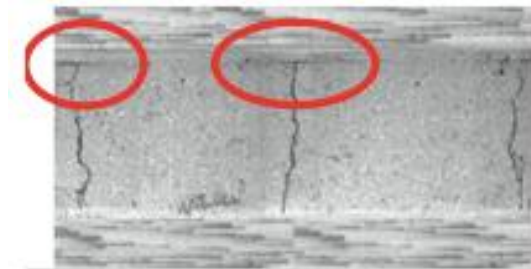


Figure II.14 : Apparition de délaminage local à l'extrémité de fissures transverses
Image de Blazquez et al, 2009

Le délaminage peut s'étendre sur des surfaces considérables (figure 9). Il provoque alors la ruine du stratifié car les efforts ne peuvent alors plus se répartir entre les plis, et l'ensemble n'a alors plus aucune cohésion.



Figure II. 15 : Une plaque trouée en stratifié quasi-isotrope, rompue par délaminage sous chargement de traction (image de Hallett et Wisnom, 2008).

II.1.4. Modes de ruine d'un stratifié [21] :

Nous avons vu dans le paragraphe précédent que si l'on s'en tient aux phénomènes purement mécaniques, il existe deux principaux modes de ruine des stratifiés :

- La ruine par rupture de fibres, qui affecte essentiellement les plis sollicités parallèlement aux fibres ;
- La *ruine* par délaminage, qui affecte essentiellement les plis sollicités transversalement et/ou en cisaillement (ou, plus exactement, les interfaces adjacentes à ces plis).

De ces deux modes de ruine, le délaminage est probablement celui qui pose le plus de problèmes aux concepteurs. En effet, il peut survenir à des niveaux de chargement relativement faibles, et la sensibilité d'un stratifié au délaminage est difficile à estimer a priori : elle dépend énormément de la conception et de la fabrication du stratifié. Par exemple, l'expérience montre que le délaminage est plus précoce lorsque la pièce comporte de nombreux bords libres (trous pour passage de boulons ou rivets, raccords entre stratifiés différents...) ou lorsque des malfaçons ont été commises, notamment dans les procédés manuels (oubli d'un morceau de film protecteur, mauvaise adhérence entre deux plis...) (*voir ressource « Quelques procédés de mise en forme des composites »*). Il subsiste néanmoins beaucoup d'incertitudes, et la prévention du délaminage passe encore par le surdimensionnement.

Notons que cette ressource ne considère que les fonctions mécaniques : la plupart des applications nécessitent de prendre en compte d'autres considérations. Par exemple, dans le cas d'un réservoir ou de toute autre structure devant assurer une fonction d'étanchéité, on n'admet naturellement aucune fissure, même inoffensive pour la tenue mécanique. De même, les microfissures peuvent favoriser la pénétration de l'oxygène de l'air au sein du stratifié ; si celui-ci travaille à une température suffisamment élevée, l'oxydation qui en découle peut provoquer un vieillissement accéléré du composite, et réduire fortement la durée de vie de la structure. Ainsi, selon la nature des fonctions que doit remplir le composite, les niveaux de chargement admissibles ne seront pas les mêmes.

II.1.4.1. Bilan

La figure 10 récapitule les différentes dégradations mécaniques susceptibles de se produire dans un stratifié.

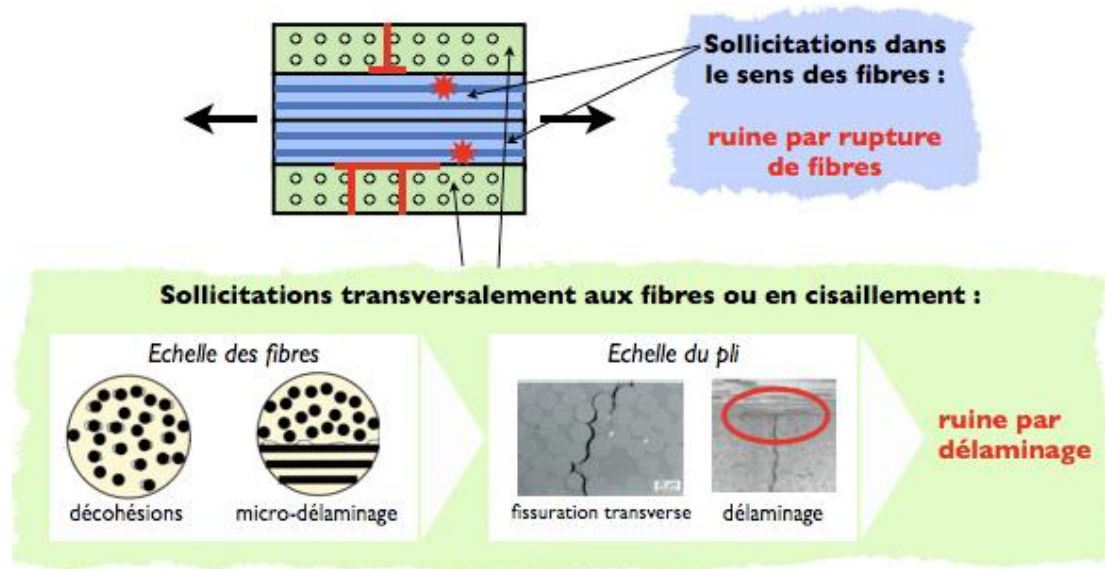


Figure II.16: Les différentes dégradations mécaniques possibles dans un stratifié.

Les dégradations des matériaux composites [22] :

II.2. effets sur le comportement :

Les matériaux composites peuvent se dégrader de diverses façons sous l'action de leur environnement, et ces dégradations affectent naturellement leur comportement mécanique. Cette ressource présente le lien entre le comportement mesuré sur un stratifié et les dégradations que l'on peut y observer.

II.2.1. Introduction

Dans la ressource « *Les dégradations des matériaux composites : les phénomènes physiques* », nous avons vu que les matériaux composites soumis à des chargements mécaniques peuvent être le siège de divers phénomènes physiques correspondant à des dégradations, tels que la fissuration ou le délaminage. Nous nous intéressons maintenant à l'effet de ces phénomènes physiques sur le comportement mécanique « macroscopique » du stratifié, c'est-à-dire la relation entre les efforts qu'on lui applique et la façon dont il se déforme.

Le lien entre phénomènes et comportement peut être établi expérimentalement : il s'agit d'effectuer des essais mécaniques sur des éprouvettes stratifiées et de relever la courbe effort-déplacement tout en observant, par des techniques adaptées, l'éprouvette à divers instants de l'essai. Il est alors possible d'identifier les différents phénomènes se produisant au sein de l'éprouvette puis de caractériser, pour chacun d'entre eux, leur influence sur sa réponse.

II.2.2. Etude expérimentale du comportement de stratifiés qui se dégradent

Dans ce qui suit, nous considérons diverses éprouvettes stratifiées soumises à des essais de traction (figure 1). Tout au long de chaque essai, nous imposons un allongement variable à la zone utile de l'éprouvette et nous mesurons l'effort de traction exercé.

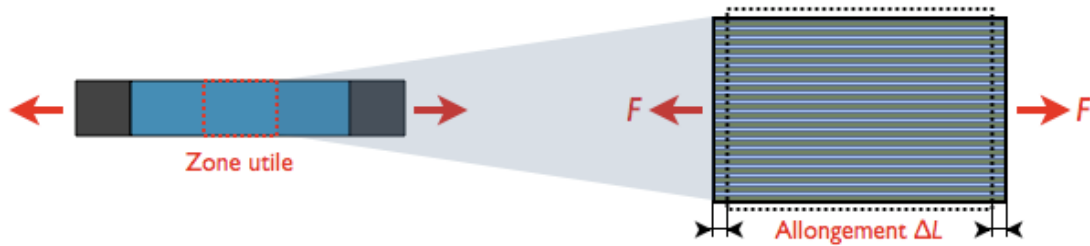
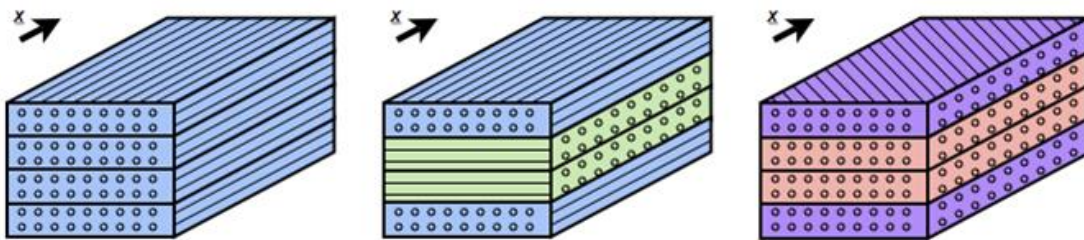


Figure II.17: Essais de traction sur des stratifiés.

Pour cette étude, nous préférons raisonner en termes d'efforts et d'allongements de la zone utile plutôt qu'en termes de contraintes et de déformations d'un élément de volume. En effet, l'étude du comportement élastique des stratifiés

nous montre que le champ de contraintes n'est pas homogène dans l'épaisseur d'un stratifié : la contrainte varie fortement d'un pli à l'autre, et ce, même en traction. Il en va naturellement de même lorsque le stratifié se dégrade, et la définition d'une « contrainte moyenne » à l'échelle du stratifié n'aurait donc guère de sens d'un point de vue physique.

Figure II.18 : Trois stratifiés de mêmes dimensions: (a) un $[0]_4$ (unidirectionnel à 4 plis), (b) un $[0/90]_s$, (c) un $[+45/-45]_s$.

Nous étudions trois empilements successifs : un stratifié formé de quatre plis à 0° (figure 2a), un autre formé de deux plis à 0° et deux plis à 90° (figure 2b), et un troisième formé de plis à $\pm 45^\circ$ (figure 2c). Comme expliqué dans la ressource « *Modélisation du comportement des composites : les poutres stratifiées* », ces empilements sont choisis symétriques et équilibrés afin d'éviter les couplages entre traction et flexion. De plus, pour faciliter la comparaison des résultats, les zones utiles des trois éprouvettes ont les mêmes dimensions, et sont constituées de quatre plis d'épaisseurs et de matériaux identiques ; seule l'orientation des plis change d'une éprouvette à l'autre.

II.2.2.1,Empilement unidirectionnel

Le premier stratifié testé possède un empilement unidirectionnel $[0]_4$ (figure 2a) ; sa courbe effort-allongement jusqu'à la rupture est donnée figure 3.

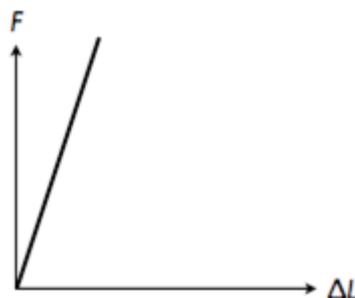


Figure II.19 : Courbe effort-allongement mesurée sur le stratifié unidirectionnel.

On constate que l'allongement reste proportionnel à l'effort jusqu'à la rupture, qui survient brutalement ; le comportement est donc de type « élastique fragile ». L'examen de l'éprouvette rompue (figure 4) montre que le principal mécanisme activé est la rupture de fibres, ce qui est tout à fait compréhensible car les fibres supportent l'essentiel de la charge.



Figure II.20 : Eprouvette unidirectionnelle après rupture : on observe de nombreuses fibres rompues.

Notons que la réalisation de cet essai est difficile en pratique. En effet, pour solliciter l'éprouvette en traction pure, il faudrait la laisser libre de se contracter transversalement par effet de Poisson (figure 5a). Or, lors des essais de traction, les éprouvettes sont généralement serrées dans des talons, ce qui empêche cette contraction (figure 5b). Lors de la mise en charge, l'éprouvette subit donc non seulement une traction longitudinale, mais également une traction transversale au niveau des talons. Il est donc fréquent d'observer des fissures transverses au voisinage des talons. De plus, la résistance transversale d'un composite unidirectionnel étant bien plus faible que sa résistance longitudinale, ces phénomènes surviennent bien avant les ruptures de fibres.

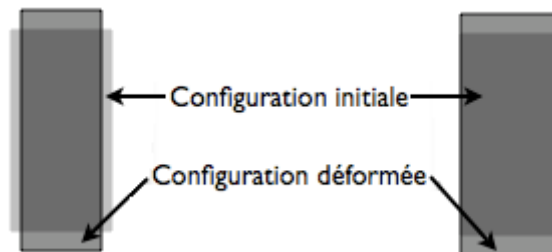


Figure II.21 : Modélisation des conditions aux limites appliquées sur une éprouvette : (a) dans le cas idéal d'une traction pure, (b) dans le cas « non idéal » où les extrémités sont serrées.

II.2.2.2. Empilement [0,90]_s

Nous effectuons maintenant un essai similaire sur un stratifié [0,90]_s (figure 2b). La courbe effort-allongement est donnée figure 6.



Figure II.22 : Courbe effort-allongement mesurée sur un [0,90]_s.

L'allongement est là encore proportionnel à l'effort, sauf en bout de courbe où on observe une très légère inflexion traduisant des dégradations mécaniques. L'effort mesuré lors de la rupture est environ deux fois moins élevé que précédemment, tout comme la raideur de l'éprouvette ; cela n'est pas surprenant car l'éprouvette compte deux fois moins de plis à 0° que précédemment (rappelons que les plis à 0° supportent l'essentiel de la charge : la contrainte y est typiquement 10 fois plus élevée que dans les plis à 90°).

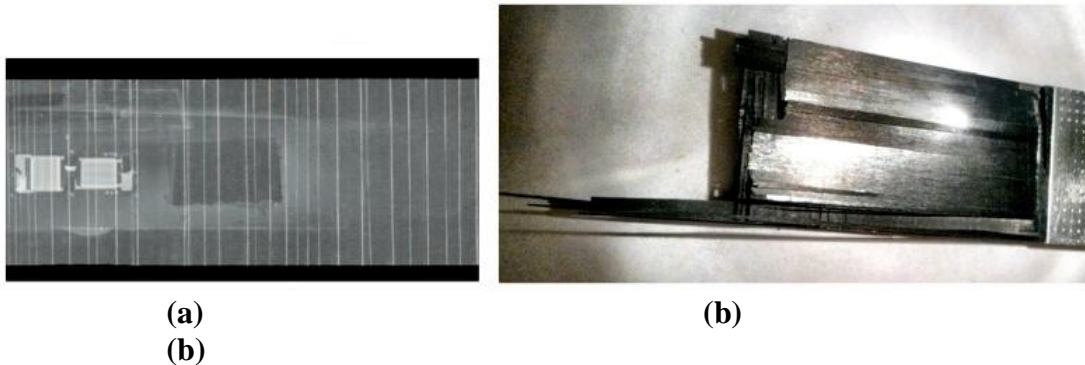


Figure II.23 : (a) Radiographie des fissures transverses dans le stratifié, bien avant la rupture (image de Gilles Lubineau) ; (b) éprouvette rompue, où l'on distingue de nombreux délaminages et fissures transverses ainsi que des fibres rompues.

La phénoménologie est cette fois plus complexe. En effectuant des radiographies de l'éprouvette en cours d'essai, bien avant la rupture, on observe des fissures transverses dans les plis à 90° , de plus en plus nombreuses; des débuts de délaminage entre les plis à 0° et ceux à 90° peuvent également être observés.

Ces phénomènes n'ont qu'une faible influence sur la raideur de l'éprouvette puisque celle-ci provient essentiellement des plis à 0° qui, eux, restent intacts jusqu'à la rupture. L'examen de l'éprouvette rompue montre que les délaminages atteignent souvent une étendue significative, même si le tout dernier mécanisme activé est encore une fois la rupture de fibres

II.2.2.3. Empilement [45,-45]s :

Nous terminons par un essai sur un [45,-45]s (figure 2c), dont la courbe effort-allongement est donnée figure 8.

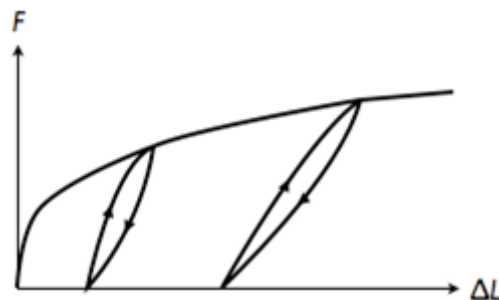


Figure II.24 : Courbe effort-allongement mesurée sur un [45,-45]s.

La réponse est très différente de celles obtenues ci-dessus : au-dessus d'un seuil très bas (quelques centièmes des efforts à rupture précédemment mesurés), la courbe s'infléchit fortement. En effectuant des décharges au cours de l'essai, on voit apparaître un allongement permanent, qui persiste en l'absence d'effort de traction, et une diminution progressive de la raideur apparente du stratifié, tout ceci à des niveaux d'efforts très faibles.

L'examen de l'éprouvette par diverses techniques d'imagerie montre qu'il ne se produit aucun phénomène « visible » : ni fissuration, ni délaminage, ni rupture de fibres. Ces dégradations sont donc exclusivement dues à des phénomènes microscopiques :

décohésions fibre-matrice et micro-délaminages. En poursuivant l'essai au-delà de ce qui est représenté sur la figure 23, on voit ensuite apparaître des fissures et des débuts de délaminage ; selon la qualité de fabrication de l'éprouvette, la fissuration peut être instable et mener très vite à la rupture (figure 24), ou être stable, auquel cas l'éprouvette peut admettre un allongement très important avant de rompre.

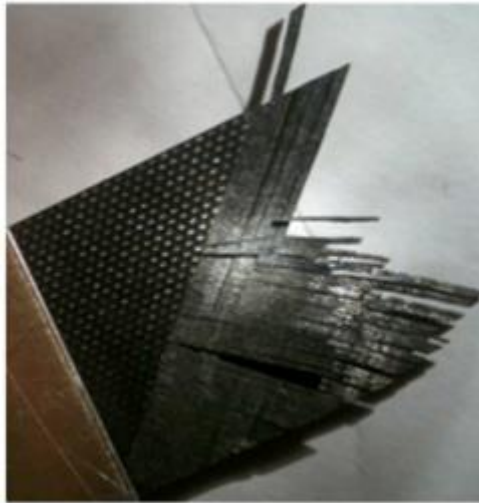


Figure II.25 : Epreuve [45,-45]_s rompue ; on distingue de nombreux délaminages et fissures transverses
(les dégradations microscopiques sont, par définition, invisibles !)

II.2.2.4. Bilan

La figure 10 regroupe les trois courbes effort-déplacement présentées ci-dessus, mises à la même échelle.

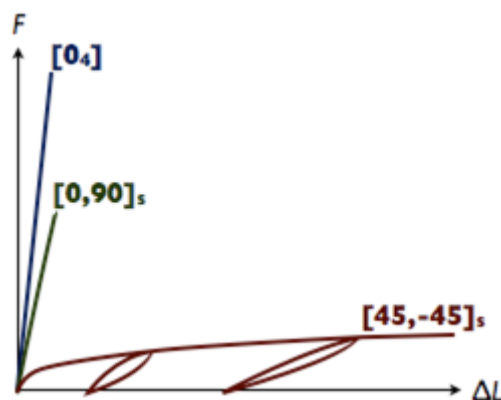


Figure II.26 : Comparaison des courbes effort-allongement mesurées sur les trois stratifiés.

On constate que le comportement mécanique « macroscopique » du stratifié dépend en premier lieu du nombre de plis à 0° ; ceux-ci, comme l'expliquent les ressources précédentes, apportent l'essentiel de la rigidité et de la résistance mécanique du stratifié. Nous pouvons maintenant compléter ces observations :

- En présence de plis à 0° , le stratifié possède un comportement « élastique fragile », avec une rigidité et une résistance proportionnelles au nombre de plis à 0° ;

- En l'absence de plis à 0° , le stratifié est peu rigide et peu résistant et, très vite, présente des déformations permanentes et une diminution de sa rigidité apparente.

De nombreuses règles de conception utilisées dans l'industrie découlent directement de ce type d'observations.

Ainsi, une conséquence des remarques ci-dessus est qu'un stratifié destiné à supporter de fortes sollicitations mécaniques doit impérativement posséder des plis orientés parallèlement aux sollicitations.

Si, au stade de la conception, il subsiste la moindre incertitude sur la direction des sollicitations que subira le stratifié tout au cours de son cycle de vie (ce qui est généralement le cas !), il est donc nécessaire de « prévoir le pire » en disposant des renforts dans « toutes » les directions du plan (le plus souvent tous les 45°) ; cette règle, largement utilisée dans l'industrie aéronautique, permet d'assurer un minimum de robustesse vis-à-vis des sollicitations imprévues.

II.2.3. Calcul des facteurs d'intensité des contraintes par extrapolation du champ de déplacements [23] :

Résumé :

On décrit ici une méthode de calcul de $K1$, $K2$ et $K3$ en 2D (plan et axisymétrique) et 3D par extrapolation des sauts de déplacements sur les lèvres de la fissure. Elle est utilisable à l'aide de la commande `POST_K1_K2_K3`, aussi bien pour une fissure maillée (éléments finis classiques) que pour une fissure non maillée (éléments finis enrichis : méthode X-FEM).

Si la fissure est maillée, elle doit nécessairement être plane ; si la fissure n'est pas maillée (méthode X-FEM), elle peut être non plane (mais suffisamment régulière). Dans les deux cas, la méthode n'est applicable que pour des matériaux élastiques linéaires, homogènes et isotropes.

La méthode utilisée est théoriquement moins précise que le calcul à partir de la forme bilinéaire du taux de restitution de l'énergie et des déplacements singuliers [R7.02.01 et R7.02.05] (opérateur `CALC_G`). Elle permet cependant d'obtenir facilement des valeurs relativement fiables des facteurs d'intensité des contraintes. La comparaison des différentes méthodes de calcul est utile pour estimer la précision des résultats obtenus.

La précision des résultats de la méthode d'extrapolation des sauts de déplacement est nettement améliorée si le maillage est quadratique. Pour une fissure maillée, il est recommandé d'utiliser des éléments dits de « Barsoum » en fond de fissure (éléments dont les nœuds milieux sont situés au quart des arêtes). Pour une fissure non maillée, il est recommandé d'enrichir plusieurs couches d'éléments autour du fond de fissure.

II.2.4. Position du problème

La méthode de calcul des facteurs d'intensité des contraintes par extrapolation du déplacement est basée sur le développement asymptotique du champ de déplacement en fond de fissure.

En 2D, dans un milieu élastique, linéaire, isotrope et homogène, les champs de contraintes et de déplacement sont connus analytiquement pour les modes d'ouverture de la fissure (caractérisé par K_1), de glissement plan (K_2) et de glissement antiplan (K_3), cf. [bib1] et [bib2]. Dans le cas général en 3D, on peut montrer que le comportement asymptotique des déplacements et des contraintes est la somme des solutions correspondants aux modes 1 et 2 (en déformations planes) et au mode 3 (antiplan), et de quatre autres solutions particulières, mais qui sont plus régulières que les précédentes [bib3].

Dans tous les cas, la singularité est donc la même et on peut écrire les relations suivantes dans le plan normal au fond de fissure, en un point M :

$$\begin{aligned}
 K_1(M) &= \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{E}{r} [U_i] \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \right) \\
 K_2(M) &= \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{E}{r} [U_i] \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \right) \\
 K_3(M) &= \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{E}{r} [U_i] \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \right)
 \end{aligned}$$

avec :

\mathbf{t}, \mathbf{n} dans le plan de la fissure en M ,

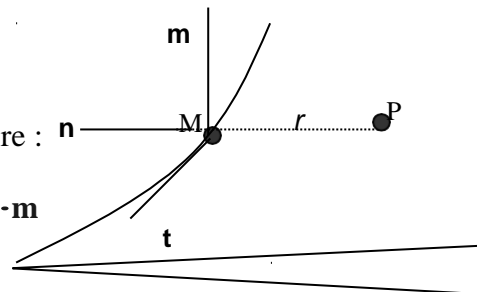
\mathbf{t} vecteur tangent au fond de fissure en M ,

\mathbf{n} vecteur normal au fond de fissure en M ,

\mathbf{m} vecteur normal au plan de la fissure en M ,

$[U]$ saut de déplacement entre les lèvres de fissure :

$$[U] = (U^{\text{lèvre supérieure}} - U^{\text{lèvre inférieure}}) \cdot \mathbf{m}$$



$r = \|\mathbf{MP}\|$ où P est un point du plan normal au fond de fissure en M , situé sur une des lèvres

Si la fissure n'est pas plane, les trois vecteurs sont définis localement au point M du fond considéré. Les relations précédentes fournissent donc une méthode pour identifier numériquement K_1 , K_2 et K_3 . A partir des facteurs d'intensité des contraintes, la formule d'Irwin permet ensuite de calculer le taux de restitution de l'énergie G :

$$G = \frac{1}{E} (K_1^2 + K_2^2) \quad \text{en contraintes planes}$$

$$G = \frac{1}{E} (K_1 + K_2) \quad \text{en déformations planes (3D)}$$

Remarques :

- On peut constater que les signes de K_2 et K_3 dépendent de l'orientation de \mathbf{t} et \mathbf{n} . Ceci n'est pas trop gênant dans la mesure où les critères de rupture ou de fatigue n'utilisent que les valeurs absolues de K_2 et K_3 .
- On peut également donner des expressions en fonction des champs de contraintes, mais les valeurs des vecteurs contraintes sur les lèvres de la fissure sont moins précises que les déplacements (car issues d'un transport des points de Gauss aux nœuds).
- L'expression des champs asymptotiques est valide pour les fissures non planes (fissures courbes par exemple), mais celles-ci doivent quand même être suffisamment régulières. L'utilisateur doit veiller à minima à ce qu'une normale puisse être définie en tout point du fond.
- La méthode utilisée ici est théoriquement moins précise que le calcul à partir de la forme bilinéaire du taux de restitution de l'énergie et des déplacements singuliers [R7.02.01 et R7.02.05] (opérateur $CALC_G$). Elle permet cependant d'obtenir facilement des valeurs relativement fiables des facteurs d'intensité des contraintes. La comparaison des différentes méthodes de calcul est toujours utile pour estimer la précision des résultats obtenus.

II.2.5. Mise en œuvre des méthodes d'extrapolation :

Les méthodes d'extrapolation des déplacements sont mises en œuvre dans l'opérateur $POST_K1_K2_K3$, à partir du champ de déplacement calculé sur toute la structure. Les définitions des facteurs d'intensité des contraintes ne sont vraies qu'asymptotiquement ; l'extrapolation se fait donc en se restreignant au voisinage du fond de fissure limité par une distance maximale d_{max} au fond. d_{max} est le paramètre $ABSC_CURV_MAXI$ de l'opérateur. Dans le cas d'une fissure maillée $ABSC_CURV_MAXI$ est facultatif. S'il n'est pas noté, d_{max} est calculé automatiquement dans $POST_K1_K2_K3$ et vaut quatre fois la taille maximale des mailles connectées aux nœuds du fond.

Le principe général du calcul est le suivant :

Boucle sur les nœuds du fond de fissure (point courant : M)

Définition du plan normal à la fissure et au fond de fissure, au point M (plan de normale \mathbf{t})

Identification des nœuds des deux lèvres qui appartiennent à \mathbb{Z} : P_i^{sup} et P_i^{inf}

Boucle sur ces nœuds :

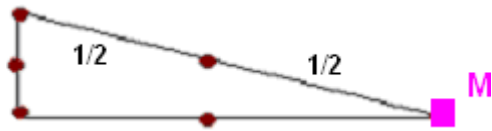
Si $r_i^{sup} = \|MP_i^{sup}\| \leq d_{max}$: extraction du déplacement en P_i^{sup}

Si $r_i^{inf} = \|MP_i^{inf}\| \leq d_{max}$: extraction du déplacement en P_i^{inf}

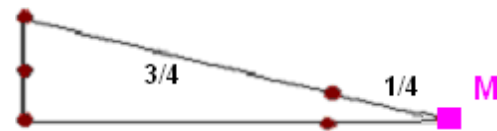
Calcul du saut de déplacement dans les trois directions Extrapolation du saut de déplacement

Trois méthodes d'extrapolation sont programmées. Elles sont illustrées dans ce paragraphe pour une fissure maillée (maillage quadratique), avec ou sans éléments

de type « Barsoum ». Les éléments de Barsoum sont tels que les nœuds non sommets sur les côtés des éléments quadratiques touchant le fond de fissure sont déplacés au quart du côté [bib4]. Ils permettent de mieux capter la singularité du champ de contraintes en fond de fissure

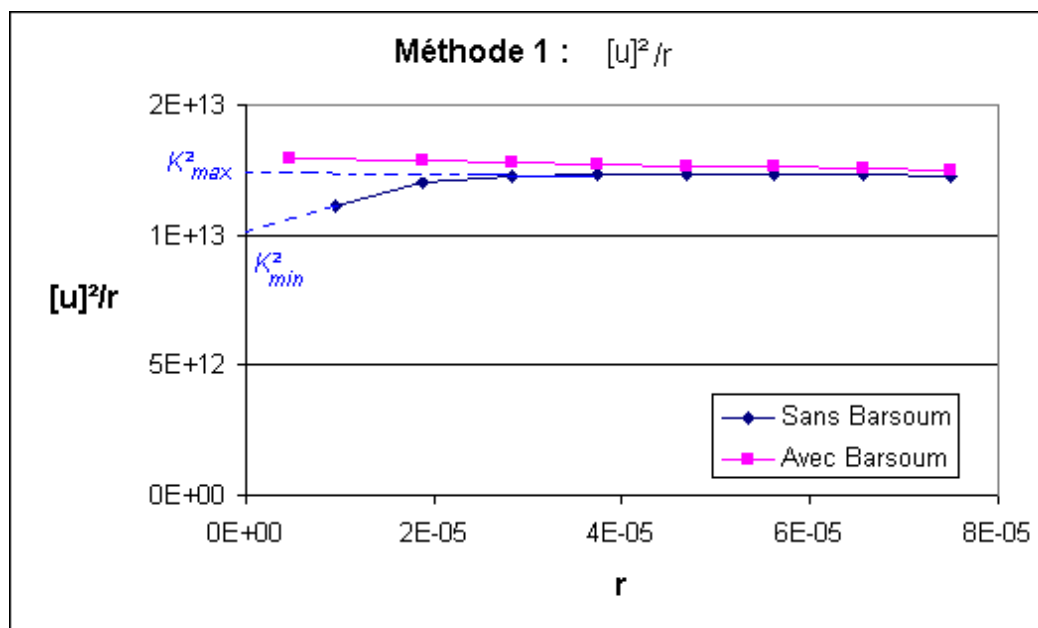


Élément fini classique
(M étant un nœud du fond de fissure)

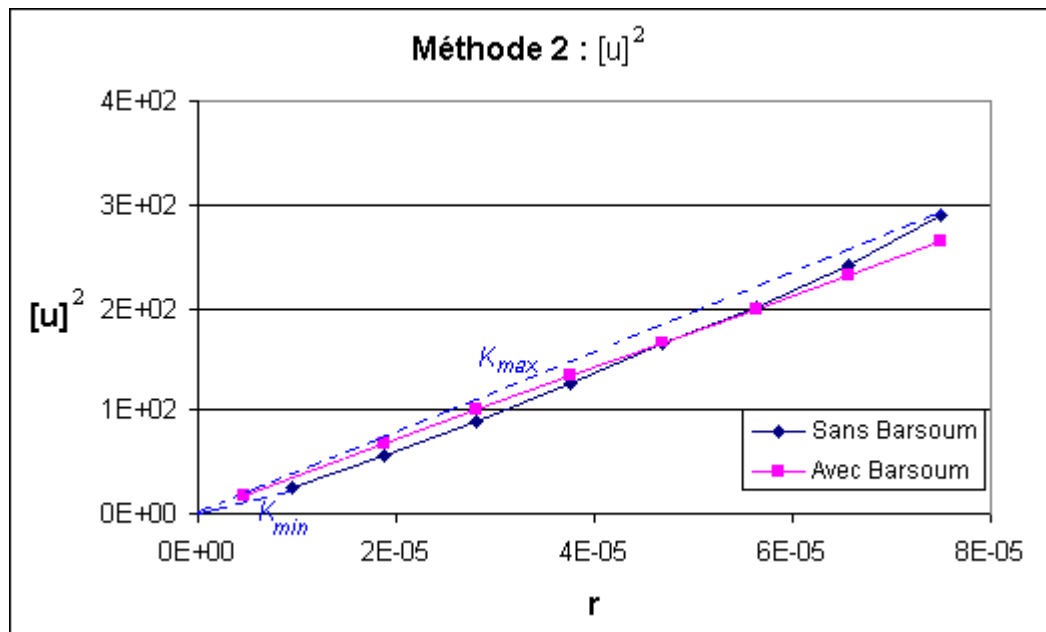


Élément fini de type Barsoum

Méthode 27 : on calcule le saut du champ de déplacements au carré et on le divise par r . Différentes valeurs de K^2 sont obtenues (à un facteur multiplicatif près) par extrapolation en $r = 0$ des segments de droites ainsi obtenus. Si la solution était parfaite (champ asymptotique analytique partout), on devrait obtenir une droite. En réalité, on obtient presque une droite avec un maillage de type « Barsoum », et une courbe non droite sinon :



Méthode 2 : on trace le saut du champ de déplacements au carré en fonction de r . Les approximations de K sont (toujours à un facteur multiplicatif près) égales à la racine de la pente des segments reliant l'origine aux différents points de la courbe.



Méthode 3 : on identifie le facteur d'intensité de contrainte K à partir du saut de déplacement $[U]$ par une méthode des moindres carrés. Le recalage se fait sur un segment de longueur d_{max} , où d_{max} est le paramètre fixé dans l'opérande ABSC_CURV_MAXI de l'opérateur POST_K1_K2_K3 ou dans le cas d'une fissure maillée, si ABSC_CURV_MAXI n'est pas indiquée, d_{max} vaut quatre fois la taille maximale des mailles connectées aux nœuds du fond :

$$K \text{ minimise } \int J(k) = \frac{1}{2} \int_0^{d_{max}} ([U(r)] - k\sqrt{r})^2 dr$$

II.2.6. Précision des méthodes proposées

La méthode d'extrapolation des sauts de déplacement a été validée sur des tests dont les solutions analytiques sont connues. On en présente ci-dessous certains résultats, en 2D et en 3D, pour une fissure maillée ou non. On compare également les résultats à la méthode théoriquement plus précise fondée sur le calcul du taux de restitution de l'énergie et sur les fonctions singulières (opérateur CALC_G : méthode thêta).

Test SSLP313 : 2D C_PLAN (fissure maillée)

Il s'agit d'une fissure inclinée dans un milieu infini soumise à un champ de contraintes uniforme dans une direction (solution de référence analytique en contraintes planes, exacte en milieu infini). La fissure s'ouvre en mode mixte ($K1$ et $K2$) [V3.02.313].

Pour le test, la fissure est maillée dans une plaque assez grande. Le maillage quadratique est très fin. Les résultats sont les suivants :

Solution de référence (solution analytique)

$K1$	$K2$	G
3.58E+06	2.69E+06	1.00E+02

Calcul avec la méthode θ (*CALC_G*)

	<i>K1</i>	<i>K2</i>	<i>G</i>
CALC_G sans nœud au quart	3.60E+06	2.70E+06	1.01E+02
<i>Ecart / réf.</i>	0.8 %	0.2 %	1.1 %
CALC_G avec nœuds au quart	3.60E+06	2.70E+06	1.01E+02
<i>Ecart / réf.</i>	0.8 %	0.2 %	1.2 %

POST_K1_K2_K3 : maillage sans nœud d'arêtes au quart

méthode	<i>K1_{max}</i>	<i>K1_{min}</i>	<i>K2_{max}</i>	<i>K2_{min}</i>	<i>G_{max}</i>	<i>G_{min}</i>	Écart <i>G_{max}</i> / réf.	Écart <i>G_{min}</i> / réf.
1	3.54E+06	3.19E+06	2.63E+06	1.92E+06	9.73E+01	6.94E+01	-3,33%	-30,70%
2	3.51E+06	3.33E+06	2.61E+06	2.25E+06	9.57E+01	8.08E+01	-4,50%	-19,32%
3	3.50E+06		2.59E+06		9.47E+01		-5,47%	

POST_K1_K2_K3 : maillage avec nœuds d'arêtes au quart

méthode	<i>K1_{max}</i>	<i>K1_{min}</i>	<i>K2_{max}</i>	<i>K2_{min}</i>	<i>G_{max}</i>	<i>G_{min}</i>	Écart <i>G_{max}</i> / réf.	Écart <i>G_{min}</i> / réf.
1	3.61E+06	3.60E+06	2.70E+06	2.69E+06	1.01E+02	1.01E+02	1,29%	1,07%
2	3.60E+06	3.53E+06	2.69E+06	2.65E+06	1.01E+02	9.75E+01	1,02%	-2,67%
3	3.56E+06		2.66E+06		9.88E+01		-1,42%	

Sur ce test on constate que le maillage de type « Barsoum » est indispensable si on veut des résultats précis. Avec « Barsoum » la méthode 1 est plus stable. Elle fournit des valeurs de *G* (à partir de *K1* et *K2*) à environ 1% de la solution analytique. Les méthodes 2 et 3 conduisent à des erreurs de 1 à 2,5 %. On note que dans ce cas, la méthode par extrapolation des déplacements est aussi précise que la méthode θ .

Par contre, avec un maillage normal, les résultats de la méthode par extrapolation varient beaucoup (entre -3% et -30% de la solution). Il en est de même avec des éléments linéaires. Dans le cas d'un maillage sans éléments de « Barsoum », la méthode 3 est la plus précise.

Test SLV134 : 3D (fissure maillée)

Il s'agit d'une fissure plane en forme de disque dans un milieu infini 3D soumise à un champ de contraintes uniforme dans une direction (solution de référence analytique connue sous le nom de

« penny shape crack »). La fissure s'ouvre en mode 1 pur, et le KI est constant le long du fond de fissure [V3.04.134].

Pour ce test, la fissure est maillée dans un bloc parallélépipède. Le maillage est relativement grossier.

Solution de référence analytique :

KI	G local
$1,59 \cdot 10^6$	11,59

Calcul avec la méthode thêta (CALC_G)

	G
CALC G avec nœuds au quart	11.75
<i>Ecart / réf.</i>	1.3 %

POST_K1_K2_K3 : maillage sans nœuds d'arêtes au quart

méthode	KI_{max}	KI_{min}	G_{max}	G_{min}	Écart G_{max} / réf.	Écart G_{min} /réf.
1	1.56E+06	1.45E+06	1.11E+01	9.63E+00	-4,32%	-16,91%
2	1.53E+06	1.49E+06	1.06E+01	1.01E+01	-8,35%	-13,08%
3	1.52E+06		1.05E+01		-9,51%	

POST_K1_K2_K3: maillage avec nœuds d'arêtes au quart

méthode	KI_{max}	KI_{min}	G_{max}	G_{min}	Écart G_{max} / réf.	Écart G_{min} / réf.
1	1.61E+06	1.59E+06	1.18E+01	1.16E+01	1,32%	-0,06%
2	1.59E+06	1.53E+06	1.15E+01	1.07E+01	-0,42%	-7,87%
3	1.55E+06		1.10E+01		-5,16%	

Sur ce test on constate encore que le maillage de type « Barsoum » est indispensable si on veut des résultats précis. Avec « Barsoum » la méthode 1 est la plus stable, avec un écart à la solution de référence inférieur à 1,5 % pour G . Le maillage est relativement grossier, ce qui explique pourquoi la méthode thêta est plus précise.

Test SSLV134 : 3D (fissure non maillée)

Le cas considéré est le même que celui du paragraphe précédent, mais cette fois-ci la fissure n'est pas maillée. Elle est définie directement dans le fichier de commande, en utilisant la méthode X-FEM [R7.02.12]. Le maillage n'étant pas régulier vis-à-vis de la fissure, les valeurs de K et de G calculées varient le long du fond de fissure. Pour la comparaison ci-dessous, on retient la valeur

correspondant à un point particulier choisi arbitrairement (milieu du fond de fissure représenté).

Le maillage est **linéaire** et relativement **grossier**. Dans la méthode X-FEM, l'utilisateur peut choisir la zone sur laquelle les éléments autour du fond de fissure sont enrichis avec les déplacements asymptotiques (mots clé RAYON_ENRI et NB_COUCHES de DEFI_FISS_XFEM). Cet enrichissement vise à améliorer la précision du calcul. On compare ici les résultats obtenus avec un enrichissement limité aux seuls éléments contenant le fond de fissure et avec un enrichissement sur quatre couches d'éléments autour du fond de fissure.

Calcul avec la méthode θ (CALC_G – lissage par défaut de type LEGENDRE de degré 5)

	G
CALC G avec enrichissement sur une couche	11.42
<i>Écart / réf.</i>	-1.4 %
CALC G avec enrichissement sur quatre couches	11.61
<i>Écart / réf.</i>	0.2 %

POST_K1_K2_K3 : enrichissement sur une seule couche

méthode	KI_{max}	KI_{min}	G_{max}	G_{min}	Écart G_{max} / réf.	Écart G_{min} / réf.
1	1.65E+06	1.43E+06	12.4	9.34	6,99%	-19,41%
2	1.52E+06	1.44E+06	10.5	9.45	-9,41%	-18,46%
3	1.47E+06		9.81		-15,35%	

POST_K1_K2_K3 : enrichissement sur quatre couches

méthode	KI_{max}	KI_{min}	G_{max}	G_{min}	Écart G_{max} / réf.	Écart G_{min} / réf.
1	1.58E+06	1.58E+06	11.3	11.3	-2,51%	-2,51%
2	1.55E+06	1.47E+06	10.9	9.88	-5,95%	-14,65%
3	1.51E+06		10.4		-10,26%	

Sur ce test, on constate qu'il est indispensable d'enrichir sur plusieurs couches d'éléments autour du fond de fissure pour avoir des résultats satisfaisants. À noter que le maillage utilisé ici est linéaire et relativement grossier : avec un maillage plus fin, les résultats sont significativement améliorés. Une étude de convergence sur un cas similaire est présentée dans.

Avec un enrichissement sur quatre couches, la méthode 1 est celle qui conduit aux résultats les plus précis. L'abscisse curviligne maximale correspond, dans les deux cas, à la distance de quatre éléments environ. La méthode θ est quant à elle ici moins sensible au paramètre d'enrichissement.

II.2.7. Conclusion

Les résultats obtenus avec la méthode d'extrapolation du déplacement sont dans l'ensemble satisfaisants, avec moins de 5% d'erreur du G , surtout si les éléments du fond de fissure sont de type Barsoum (cas fissure maillée) ou si plusieurs couches d'éléments sont enrichis autour du fond (cas fissure non maillée, méthode X-FEM). Dans les deux cas, il s'agit de capter au mieux le comportement asymptotique du déplacement.

Il faut en effet remarquer que l'expression asymptotique des déplacements n'est valable que pour r tendant vers 0. C'est pourquoi il faut veiller à ne pas choisir un domaine d'extrapolation trop grand (distance d_{max} de l'opérateur POST_K1_K2_K3 de l'ordre de 4 à 5 éléments).

Sur les tests présentés pour une fissure maillée, la méthode 1 donne les résultats les plus précis et les plus stables, que ce soit en 2D ou en 3D, s'il y a des éléments de Barsoum. Si le maillage ne comporte pas d'éléments de Barsoum, on conseille alors d'utiliser les résultats de la méthode 3. Pour une fissure non maillée, la méthode 1 semble aussi la plus précise.

Sur une étude pour laquelle on ne connaît pas de solution de référence, il est possible d'estimer a posteriori la qualité du calcul. En effet, POST_K1_K2_K3 fournit systématiquement pour les deux premières méthodes les valeurs maximum et les valeurs minimum (sur l'ensemble des points calculés) des facteurs d'intensité des contraintes, ainsi que la valeur de G recalculée par la formule d'Irwin. La méthode 3 ne fournit quant à elle qu'une seule valeur pour chaque facteur d'intensité de contrainte. Cette méthode est une moyenne pondérée des facteurs d'intensité des contraintes extrapolés en chaque nœud.

Un résultat peut être considéré comme satisfaisant si les 5 valeurs ainsi fournies (min et max des méthodes 1 et 2, et méthode 3) sont proches. On peut également recommander de comparer les résultats obtenus avec cette méthode avec ceux issus du calcul du taux de restitution de l'énergie et des fonctions singulières (opérateur CALC_G).

Chapitre III

III.1 Introduction :

Les composites stratifiés à fibres longues de verre, graphite et de bore et à matrice époxy présentent d'excellentes propriétés mécaniques spécifiques. Dans les industries aérospatiale et aéronautique, ils ont pris une place importante dans certaines pièces de structures. Néanmoins, autant ces composites stratifiés peuvent avoir une résistance et une raideur très élevée dans le sens des fibres, autant, leur résistance sur les plis perpendiculaires au chargement est faible. La contrainte pour laquelle des fissures apparaissent étant plus faible dans la direction perpendiculaire que dans le sens des fibres, un réseau de fissures apparaît dans la couche 90°. Cette dégradation du composite a été étudiée par de nombreux auteurs.

L'objectif de notre travail est d'évaluer le paramètre K (facteur d'intensité de contrainte) et le facteur G (taux de restitution d'énergie) de trois tubes, constituées du même époxyde et avec différentes fibres de renforcement (graphite, bore et verre) en variant l'orientation des fibres, dont les caractéristiques mécaniques des matériaux composites stratifiés sont indiquées dans le tableau III.1 [24] .

Propriétés	Verre/Epoxyde	Bore/Epoxyde	Graphite/Epoxy
E_{11} (GPa)	50	208	134
E_{22} (GPa)	14.5	25.4	10.3
E_{33} (GPa)	14.5	25.4	10.3
G_{12} (GPa)	2.56	7.2	5.5
G_{13} (GPa)	2.56	7.2	5.5
G_{23} (GPa)	2.24	4.9	3.2
ν_{12}	0.33	0.1677	0.33
ν_{13}	0.33	0.1677	0.33
ν_{23}	0.33	0.035	0.53

Tableau III.1 : Propriétés des trois composites stratifiés.

III.2 Modèle géométrique :

Le modèle géométrique choisi est un tube composite stratifié en présence d'une fissure longitudinale d'une longueur égale à 10 mm, celui-ci est soumis à une pression appliquée de 100 MPa à l'intérieur, l'autre face étant fixe (voir Figure 3.2). L'objectif de notre travail est d'évaluer le paramètre K (facteur d'intensité de contrainte) et le facteur G (taux de restitution d'énergie) de trois tubes, constituées du même époxyde et avec différentes fibres de renforcement (graphite, bore et verre) en variant l'orientation des fibres.

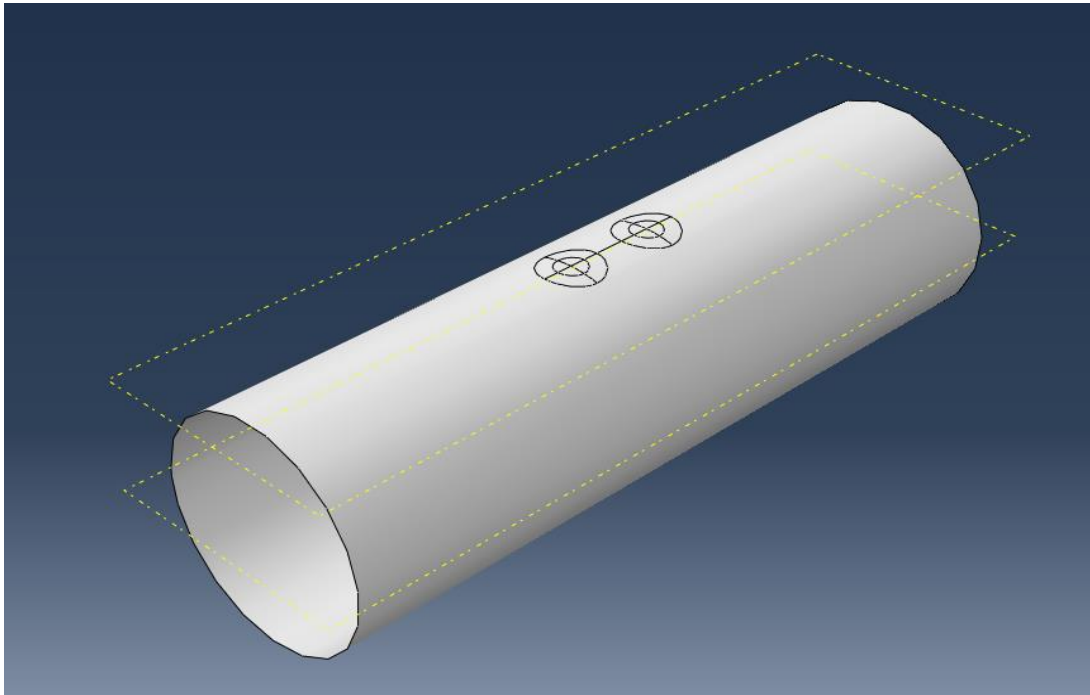


Figure III.27 : Modèle géométrique

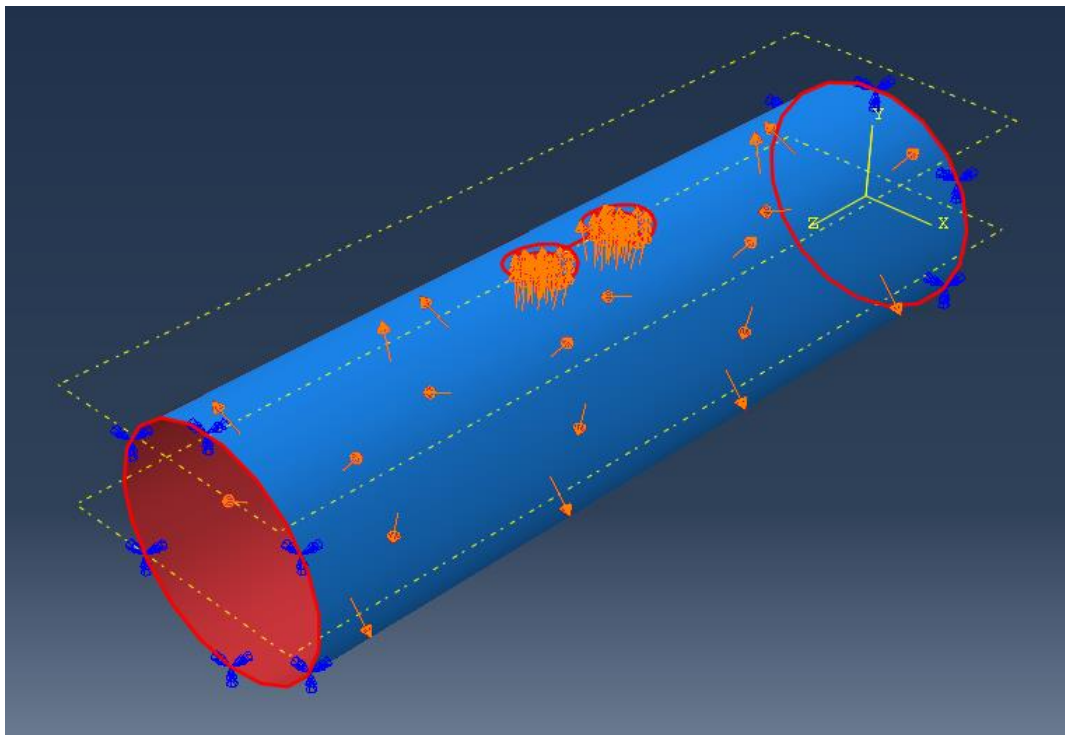


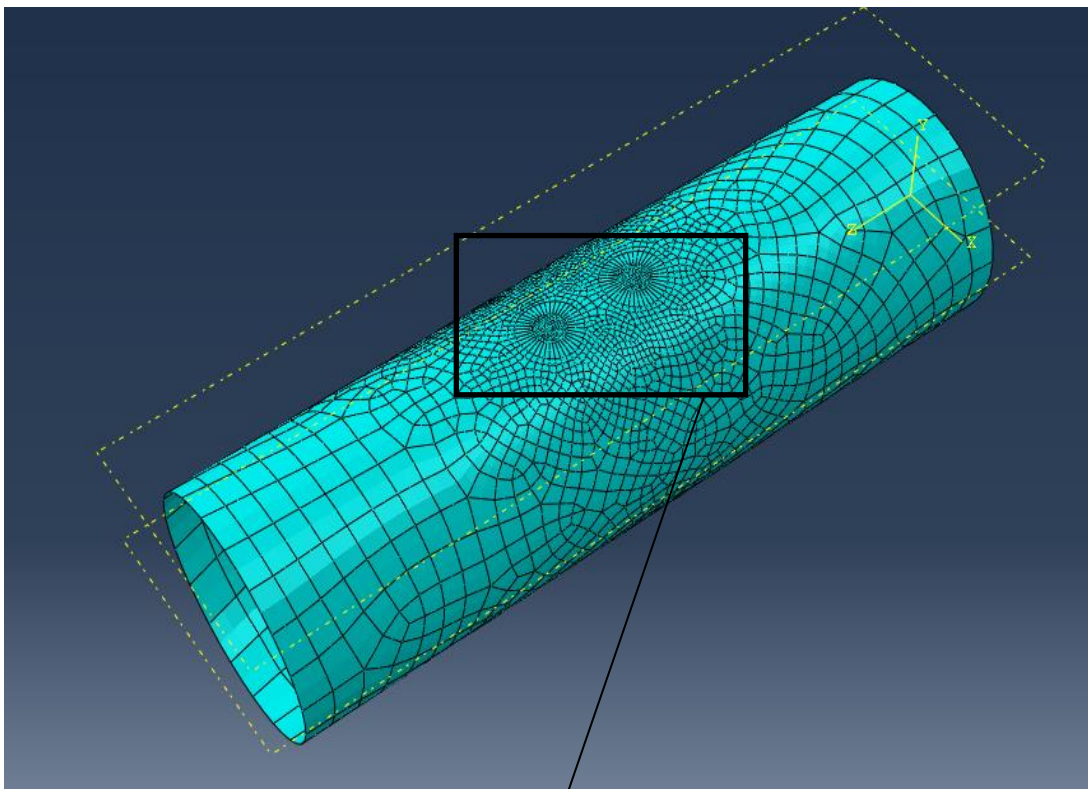
Figure III.28: Conditions aux limites

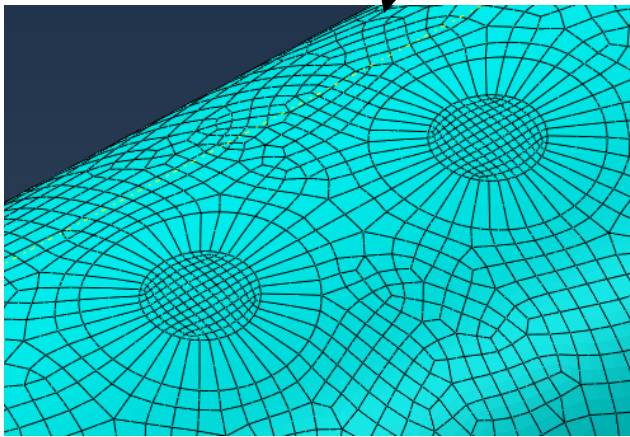
III.3 Modélisation Numérique :

Pour simuler le comportement linéaire en traction et l'influence d'orientation des fibres ainsi que les autres paramètres, nous avons utilisé un code de calcul « Abaqus » 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 dites, également des fonctions de construction du modèle (pré processeur) et de traitement des résultats (post-processeur) [25] .

III.3.1 Méthode des éléments finis :

Cette méthode est une extension des techniques d'analyse des structures bidimensionnelles et tridimensionnelles, telles que les poutres et les coques, elle est considérée aussi comme l'un des outils les plus efficaces et les plus favorables pour la simulation numérique, et s'applique aux problèmes de mécanique des milieux continus présentant une linéarité ou une non linéarité de la mécanique du solide (élasticité, plasticité...etc.)





Détaille :

Maillage raffiné au
niveau des deux bords
de la fissure

Figure III.29: Maillage

L'objectif est de savoir comment mailler le domaine pour avoir des résultats satisfaisants. Sachant qu'un maillage trop fin donne une bonne précision du résultat mais avec un temps de calcul long, alors qu'un maillage grossier fait perdre en précision mais réduit le temps de calcul. La démarche adoptée est d'utiliser dans cette analyse un maillage « raisonnable » tout en affinant les régions jugées critiques (entailles et délaminage). Le maillage doit être affiné jusqu'à l'obtention de résultats voisins. Un bon maillage est constitué d'un nombre optimal d'éléments, c'est-à-dire, capable de nous fournir des résultats précis en un temps de calcul raisonnable. Pour bien mener cette étude, on a choisi un élément coque quadrilatéral de type quadratique (Figures 29).

Pour bien mener cette étude, nous avons choisi un élément coque quadrilatéral de type quadratique.

III.4 Résultats et discussions

III.4.1 Effet de l'orientation des fibres sur le facteur d'intensité de contrainte :

- Cas des deux bords de la fissure

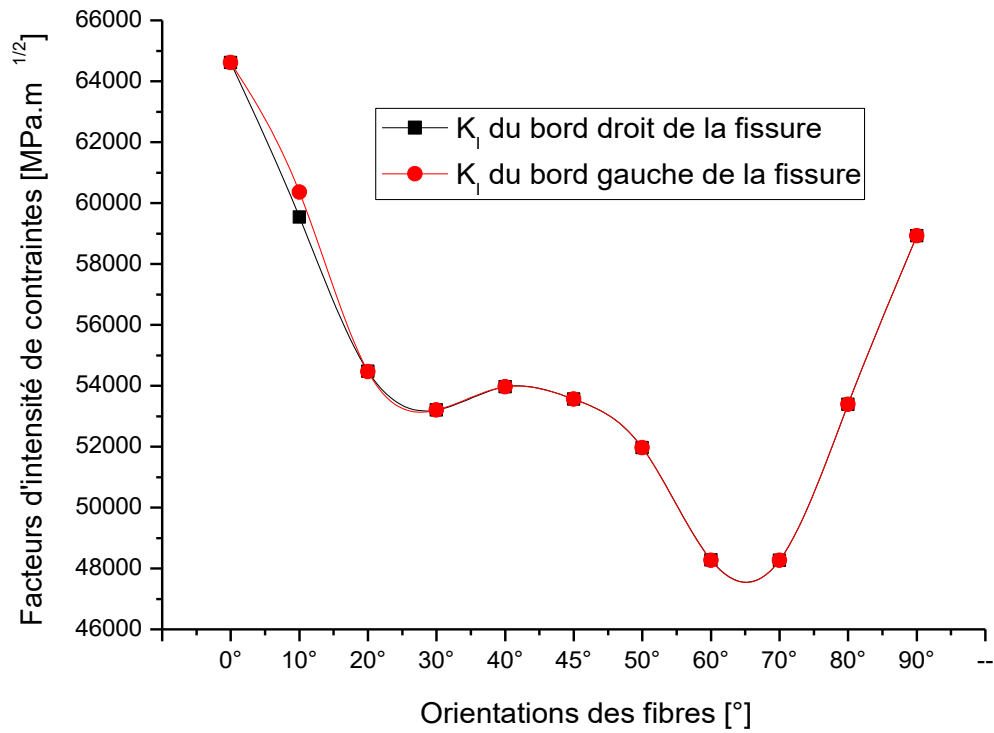


Figure III.30: Variation du facteur d'intensité de contraintes K_I en fonction de l'orientation des fibres pour les deux fonds de fissure.

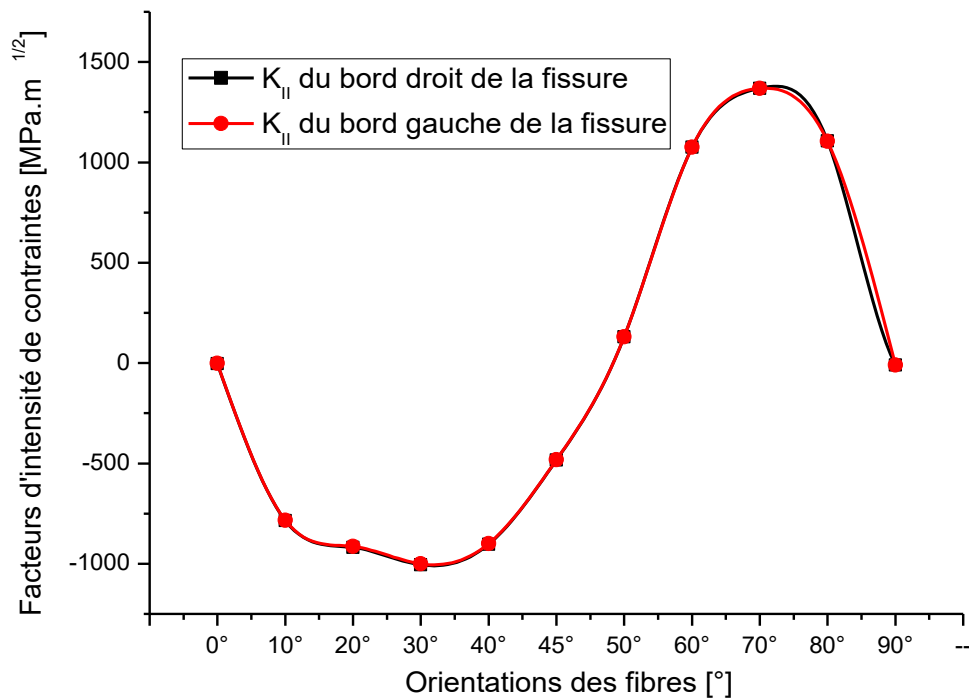


Figure III.31: Variation du facteur d'intensité de contraintes K_{II} en fonction de l'orientation des fibres pour les deux fonds de fissure.

Les figures 30 et 31 illustrent la variation du facteur d'intensité de contraintes K_I et K_{II} en fonction de l'angle d'orientation des fibres pour les deux fonds de fissure. La fissure de longueur 10 mm est initiée au milieu du tube stratifié en position longitudinale, c'est-à-dire la fissure est parallèle à la longueur du tube. Les résultats obtenus nous montrent clairement que les deux courbes sont parfaitement identiques. Pour cette raison, on détermine numériquement par la méthode des éléments finis le facteur d'intensité de contraintes et le taux de restitution d'énergie que pour l'un des deux fonds de fissure et les résultats obtenus par la suite sont déterminés uniquement pour le fond de fissure de droit.

- **Cas des différents modes d'ouvertures de la fissure**

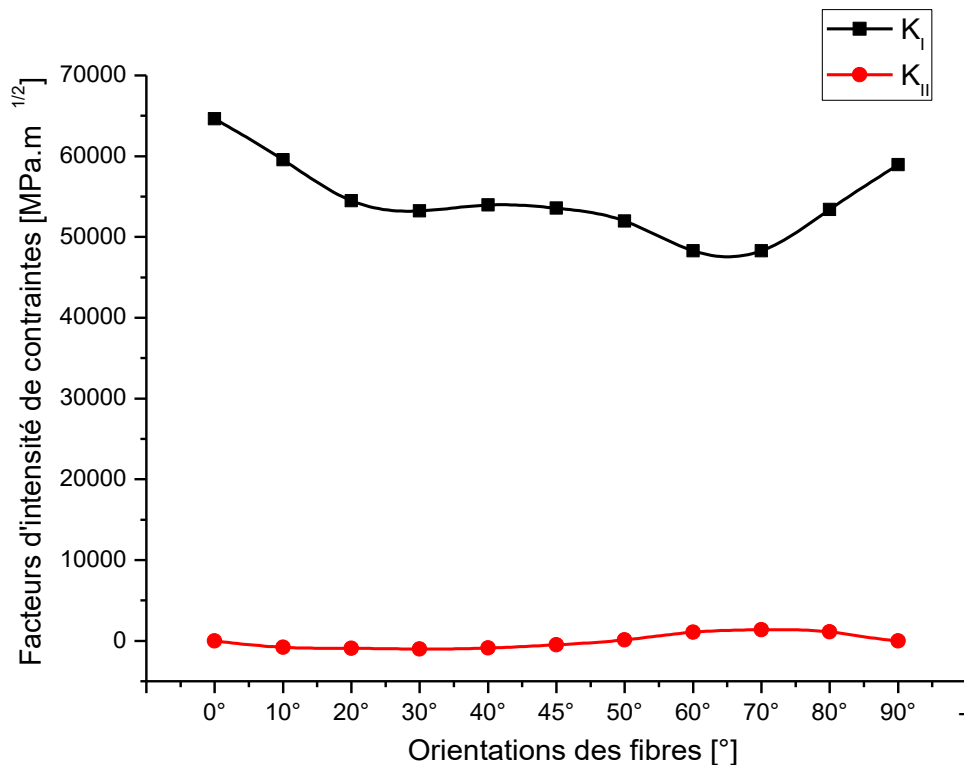


Figure III.32 : Variation du facteur d'intensité de contraintes K_I et K_{II} en fonction de l'orientation des fibres pour le matériau composite verre/époxy.

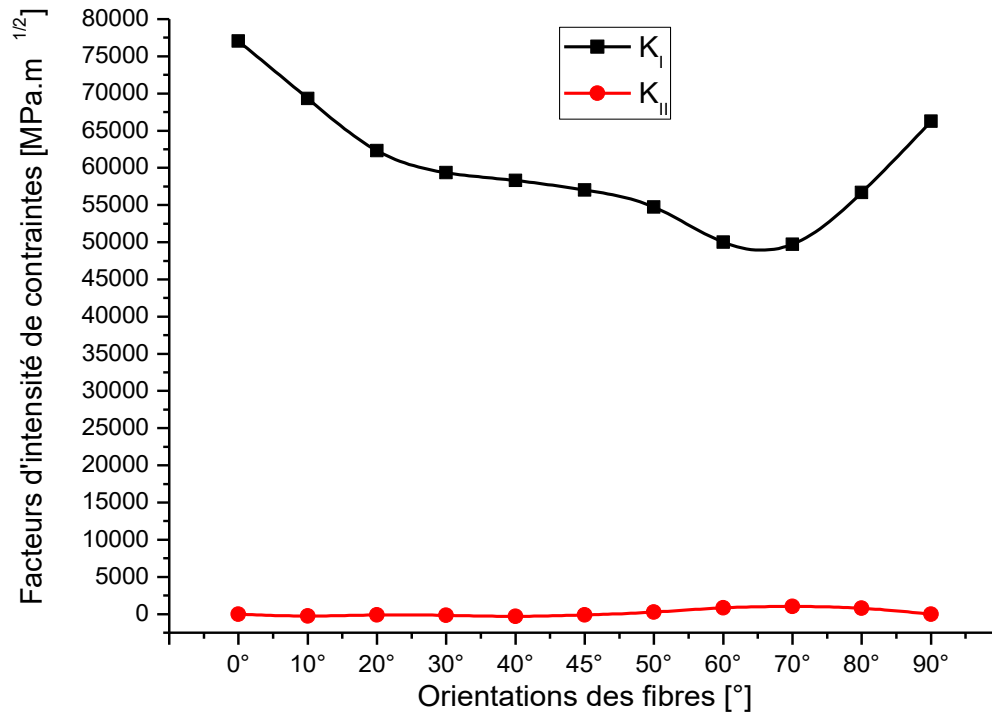


Figure III.33 : Variation du facteur d'intensité de contraintes K_I et K_{II} en fonction de l'orientation des fibres pour le matériau composite bore/époxy.

Les figures 32, 33 et 34 montrent la variation des facteurs d'intensité de contrainte K_I , et K_{II} en fonction de l'orientation des fibres des trois matériaux composites verre / époxy, bore/ époxy et graphite/ époxy. Il est à noter que l'ouverture de la fissure initiée du tube composite stratifié croisé est réalisée en mode I et ce en fonction de la force appliquée au composite. K_I facteur d'intensité de contrainte est beaucoup plus élevé que les deux autres modes de rupture. Dans notre étude le mode pur I est prédominant et c'est le seul paramètre à considérer et les deux les modes de glissement K_{II} et K_{III} sont négligés.

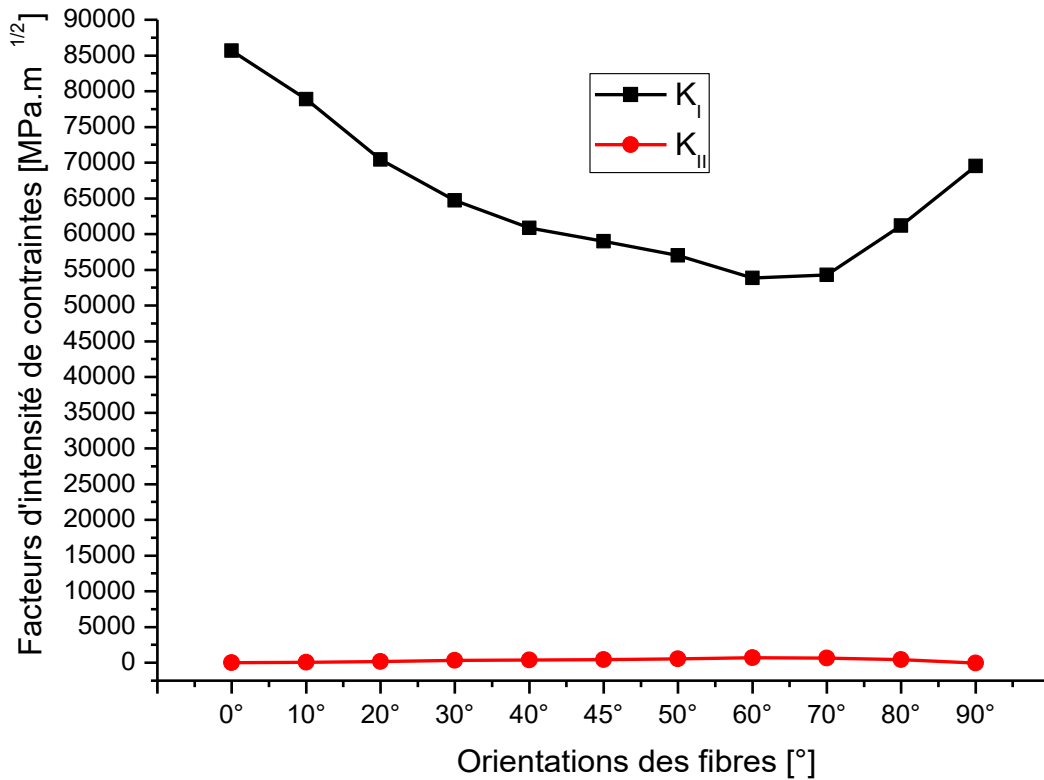


Figure III.34 : Variation du facteur d'intensité de contraintes K_I et K_{II} en fonction de l'orientation des fibres pour le matériau composite graphite/époxy.

III.4.2 Effet du matériau sur le facteur d'intensité de contrainte :

La figure 34 montre la variation du facteur d'intensité de contrainte K_I des trois matériaux composite verre/époxyde, bore/époxyde et graphite/époxyde en fonction de l'orientation des fibres. On remarque que quel que soit l'angle d'orientation des fibres le facteur d'intensité de contrainte K_I diminue proportionnellement à l'angle allant de 0° jusqu'à 60° puis il croit de nouveau avec l'augmentation de l'angle dans l'intervalle $[60^\circ, 90^\circ]$. On observe que quel que soit l'angle de l'orientation des fibres le facteur d'intensité de contrainte K_I diminue avec l'accroissement de l'angle d'orientation des fibres en passant par trois extremums qui correspondent respectivement aux angles $\alpha = 30^\circ$, $\alpha = 45^\circ$ et $\alpha = 70^\circ$. Le facteur d'intensité de contrainte K_I atteint une valeur minimale pour les angles d'orientation des fibres dans l'intervalle $[60^\circ, 70^\circ]$ et ceci quelle que soit le type du matériau. On observe que le matériau composite

verre/époxyde se comporte mieux que les deux autres matériaux composites bore/époxyde et graphite/époxyde.

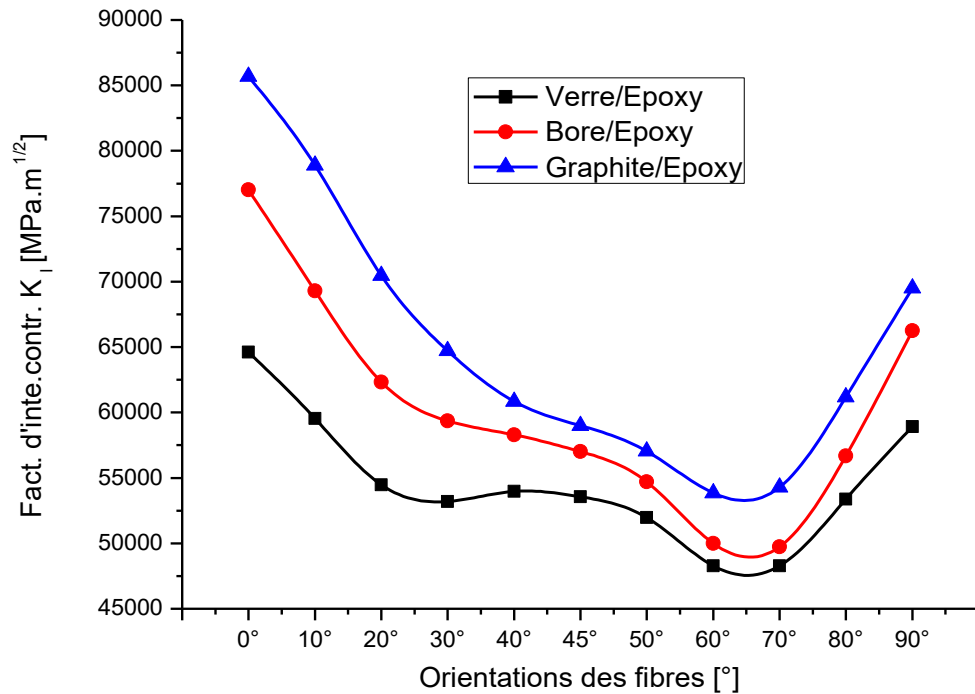


Figure III.35 : Variation du facteur d'intensité de contraintes K_I en fonction de l'orientation des fibres pour les trois matériaux composite verre/époxy, bore/époxy et graphite/époxy.

III.4.3 Contour de la fissure après déformation :

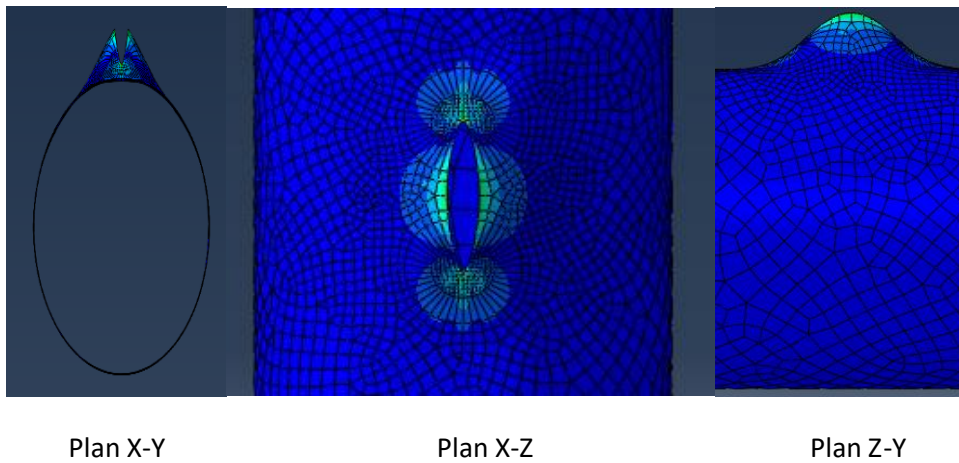
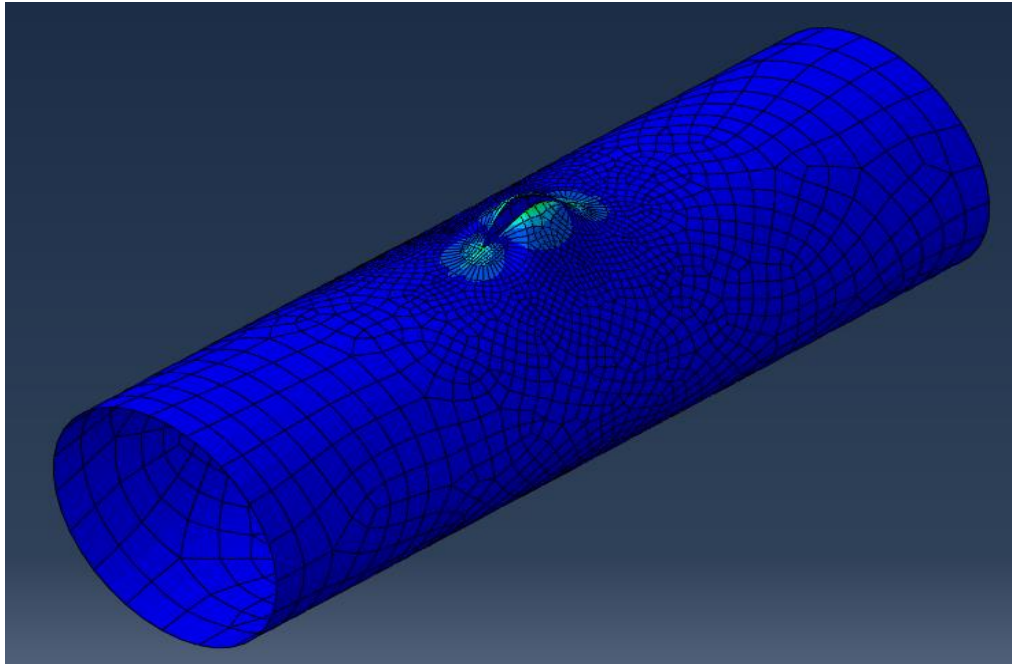


Figure III.36: Contour de la fissure après déformation suivant les trois plans.

La figure 36 illustre l'amplitude et la distribution de la contrainte équivalente sur le contour du composite stratifié croisé 45° . L'ouverture de la fissure est présentée suivant les trois plan (XY, XZ et ZY)

III.4.1 Effet de l'orientation des fibres sur la contrainte équivalente de Von Mises :

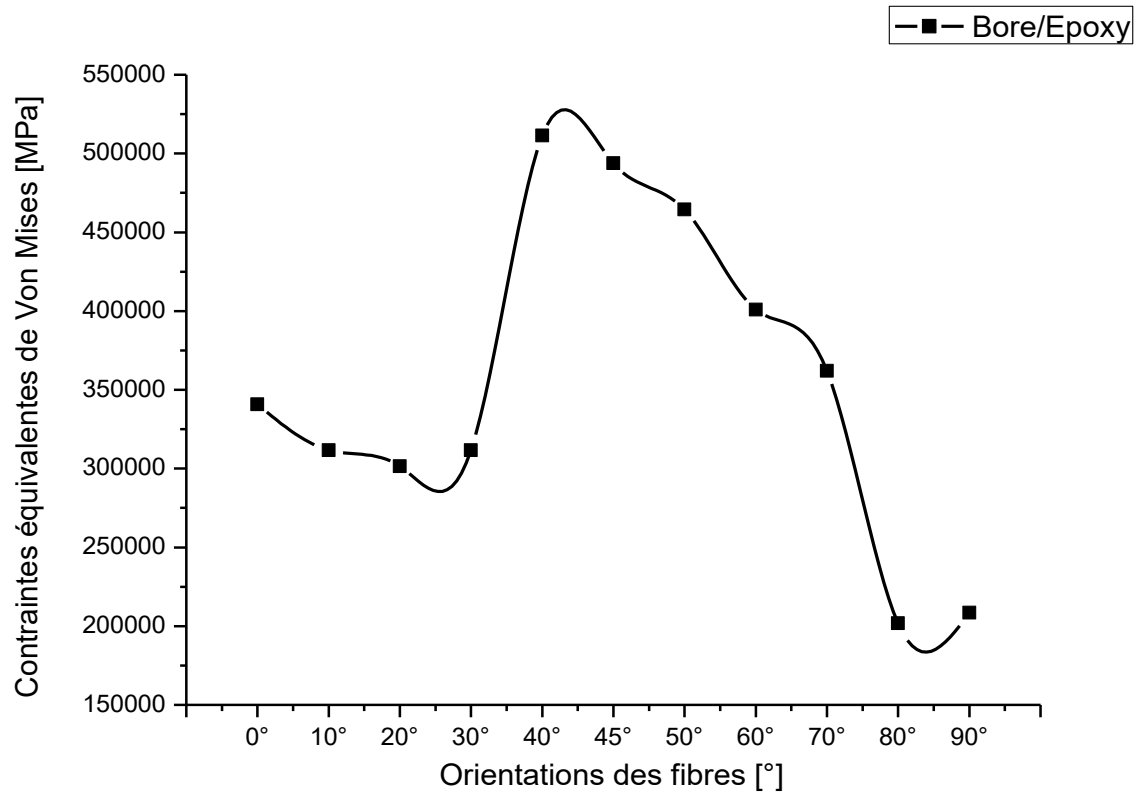


Figure III.37: Variation de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction de l'orientation des fibres pour le matériau bore/époxy

La figure 37 montre la variation de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction de l'orientation des fibres pour le matériau bore/époxy. On constate que l'orientation des fibres a un effet significatif sur la contrainte équivalente de Von Mises

III.4.1 Effet du matériau sur la contrainte équivalente de Von Mises :

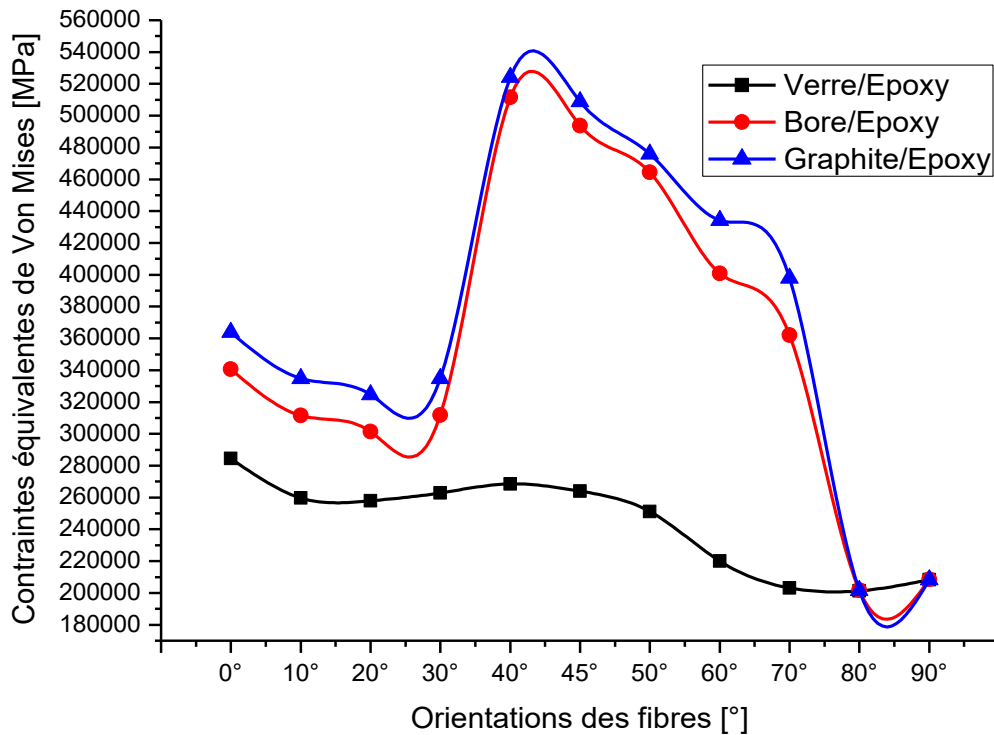


Figure III.38: Variation de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction de l'orientation des fibres pour les trois matériaux.

La figure 38 montre la variation de la contrainte équivalente de Von Mises des trois matériaux composite verre/époxyde, bore/époxyde et graphite/époxyde en fonction de l'orientation des fibres.

On constate que l'orientation des fibres a un effet significatif sur la contrainte équivalente de Von Mises et cela que quel que soit le type de matériau le facteur d'intensité de contrainte K_I diminue proportionnellement à l'angle allant de 0° jusqu'à 30° puis il croit de nouveau avec l'augmentation de l'angle dans l'intervalle $[30^\circ, 40^\circ]$ en suite il diminue proportionnellement à l'angle allant de 40° jusqu'à 90° . On observe que quel que soit l'angle de l'orientation des fibres le facteur d'intensité de contrainte K_I diminue avec l'accroissement de l'angle d'orientation des fibres en passant par trois extremums qui correspondent respectivement aux angles $\alpha = 30^\circ$, $\alpha = 40^\circ$ et $\alpha = 70^\circ$. Le facteur d'intensité de contrainte K_I atteint une valeur minimale pour les angles d'orientation des fibres dans l'intervalle $[80^\circ, 90^\circ]$ et ceci quelle que soit le type du matériau. On observe que le matériau composite verre/époxyde se comporte mieux que les deux autres matériaux composites bore/époxyde et graphite/époxyde.

Conclusion générale

Conclusion Générale :

Lors de ce travail, nous avons étudié le comportement mécanique de trois composites stratifiés sollicités à une pression statique. Nous avons choisi ces trois matériaux parce que leurs propriétés mécaniques sont disponibles dans la littérature : Carbone/Epoxy, Bore/Epoxy et Verre/Epoxy. Notre étude numérique a pour but d'analyser le facteur d'intensité de contrainte et le taux de restitution d'énergie sous l'effet de plusieurs facteurs tel que, les différents matériaux composites de la structure et l'orientation des fibres croisés.

Cette étude nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- L'orientation des fibres a un effet significatif sur le facteur d'intensité de contrainte K_I .
- Que quel que soit l'angle de l'orientation des fibres le facteur d'intensité de contrainte K_I diminue avec l'accroissement de l'angle d'orientation des fibres en passant par trois extremums qui correspondent respectivement aux angles $\alpha = 30^\circ$, $\alpha = 45^\circ$ et $\alpha = 70^\circ$.
- Le facteur d'intensité de contrainte K_I atteint une valeur minimale pour les angles d'orientation des fibres dans l'intervalle $[60^\circ, 70^\circ]$ et ceci quelle que soit le type du matériau.
- Le matériau composite verre/époxyde se comporte mieux que les deux autres matériaux composites bore/époxyde et graphite/époxyde.
- Quel que soit l'orientation des fibres des plaques stratifiées à empilement croisés, le matériau composite étudié l'allure des courbes présentent trois pics, correspondant aux trois orientations, 40° , 45° , 50° et 60° ce qui est dangereux pour la structure parce qu'elles conduisent à des contraintes maximales.
- L'orientation des fibres a un effet significatif sur la contrainte équivalente de Von Mises et cela que quel que soit le type de matériau.
- Le facteur d'intensité de contrainte K_I diminue proportionnellement à l'angle allant de 0° jusqu'à 30° puis il croit de nouveau avec l'augmentation de l'angle dans l'intervalle $[30^\circ, 40^\circ]$ en suite il diminue proportionnellement à l'angle allant de 40° jusqu'à 90° .
- Que quel que soit l'angle de l'orientation des fibres le facteur d'intensité de contrainte K_I diminue avec l'accroissement de l'angle d'orientation des fibres en

passant par trois extremums qui correspondent respectivement aux angles $\alpha = 30^\circ$, $\alpha = 40^\circ$ et $\alpha = 70^\circ$.

- Le facteur d'intensité de contrainte K_I atteint une valeur minimale pour les angles d'orientation des fibres dans l'intervalle $[80^\circ, 90^\circ]$ et ceci quelle que soit le type du matériau. On observe que le matériau composite verre/époxyde se comporte mieux que les deux autres matériaux composites bore/époxyde et graphite/époxyde.

- [1] T. Bai, D. D. Pollard, Spacing of fractures in a multilayered fracture saturation, *International Journal of Fracture* 100(4), 23–24, 1999.
- [2] J.-M. Berthelot, J.-F. Le Corre. Statistical analysis of the progression of transverse cracking and delamination in cross-ply laminates, *Composites Science and Technology* 60(3), 2659–2669, 2000.
- [3] J.-L. Rebière, M.-N. Maâtallah, D. Gamby, Analysis of damage mode transition in a cross-ply laminate under uniaxial loading, *Composites structures* 55, 115-126, 2002.
- [4] J. Wang, B. L. Karihaloo, Matrix crack-induced delamination in composite laminates under transverse loading, *Composites structures* 38 661-666, 1997
- [5] P. W. Manders, T.-W. CHOU, F. R. Jones, J. W. Rock, Statistical analysis of multiple fracture in 0/90/0 glass fibre/epoxy laminates. *J Mater Sci* 18, 2876-2889, 1983.
- [6] Jean Paul Bailon et Jean Marie Dorlot, *Des Matériaux*, 3^{ème} Edition, Ecole de Montréal, 2000.
- [7] Daniel Gay, *Matériaux Composites* 4^{ème} Edition, Hermès 2009.
- [8] Maurice Reyne *Technologie des composites* Edition HERMES, Paris, 1990.
- [9] Michaël Trovalet. Sur un modèle micro pour le calcul des structures en composites stratifiés (2010) - <https://tel.archives->
- [10] Maurice Reyne *Technologie des composites* Edition HERMES, Paris, 1990.
- [11] Jean Marie Berthelot, *Mécanique des Matériaux et structures composites*, le Mans, Novembre 2010.
- [12] Dr Errouane Lahouaria, *Construction des Navires*, septembre 2016
- [13] <http://www.upsti.fr/>
- [14] Daniel Gay, *Matériaux Composites* 4^{ème} Edition, Hermès 2009.
- [15] Kyong Y. Rhee, Chang H. Chi, 1999 "Determination of Fracture Toughness, Gc of Graphite/Epoxy
- [16] Maurice Reyne *Technologie des composites* Edition HERMES, Paris, 1990.
- [17] Jean Marie Berthelot, *Mécanique des Matériaux et structures composites*, le Mans, Novembre 2010.
- [18] M. Mezzo Aghiles, *Mémoire de Master, Etude d'une sollicitation Hors axes d'un composite unidirectionnelle (verre e/époxyde) : cas de la traction*, 2012.
- [19] Michel Dequatremare Thierry Devers, *charge et additifs IUT*, Dunod, paris, 2012
- [20] Ibrahim Mohamed Haisam, *Elaboration des matériaux composites modèles uni filamentaire à fibres longues et matrice silice sil-gel et caractérisations micromécaniques de l'interface*, Thèse de doctorat Lyon 1997.

- [21] F. Balluffier et A. Lemason, Analyse de défaillance pièces plastiques, élastomères ou composites. Guide pratique centre technique des industries Mécanique (CETIM) 1999.
- [22] Y. Pizzo, C. Lallemand, A. Kacem, A. Kaiss, J. Gerardin, Z. Acem, P. Boulet, and B. Porterie, “Steady and transient pyrolysis of thick clear PMMA slabs”
- [23] J. Li, J. Gong, and S. I. Stoliarov, “Development of pyrolysis models for charring polymers,” Polym. Degrad. Stab 2015.
- [24] S. I. Stoliarov, S. Crowley, R. E. Lyon, and G. T. Linteris, “Prediction of the burning rates of non charring polymers
- [25] C. W. Lautenberger, “A generalized pyrolysis model for combustible solids,” University of California, Berkeley, PhD Thesis, 2007.
- [26] B. K. Kandola, P. Luangtriratana, S. Duquesne, and S. Bourbigot, “The effects of thermophysical properties and environmental conditions on fire performance of intumescent coatings on glass fibre-reinforced epoxy composites,” Materials., vol. 8, no. 8, pp. 5216–5237, 2015.
- [27] A. P. Mouritz and Z. Mathys, “mechanical properties of marine polymer composites,” Compos. Struct., vol. 47, no. 1, pp. 643–653, 1999.
- [28] <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr>
- [29] Dae-Cheol Seo, Jung-Ju Lee “Fatigue crack growth behavior of cracked aluminum plate repair ed with composite patch” Korea, Composite Structures publication 57 (2002) 323–330
- [30] ABAQUS FiniteElement Program, ABAQUS/Standard 6.14.1. Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc. Pawtuket, USA, 2014.