



Université ABBES LAGHROUR Khenchela

جامعة عباس لغرور خنشلة
Faculté de Sciences et Technologie
كلية العلوم و التكنولوجيا
Département de Génie Mécanique
قسم الهندسة الميكانيكية



Mémoire

De fin d'études Pour l'obtention du diplôme
MASTER (LMD)

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Génie des Matériaux

Thème

Étude de comportement mécanique des
plaques en matériaux composites
stratifiées

Réalisé par :

Dirigé par : Himeur Nabil

Rakkaoui abdel Halim

Membres de jury : khadraoui F
Mansouri k

Année universitaire : 2018-2019

Remerciements

Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer notre gratitude et notre remerciements pour le bon dieu, le tout puissant, de nos avoir donné autant de courage, pour atteindre ce but .et toutes les personnes qui ont contribué a sa réalisation.

*Nous tenons tout d abord à remercier Dr. **Himeur Nabil** enseignant à l'université de Khenchela, encadreur de ce mémoire pour ses conseils, son encouragement, sa patience, son aide précieuse.*

Et nous lui exprime ici notre attachement et notre profonde reconnaissance de nos avoir proposé un sujet de recherche très riche.

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail avec grand amour,
sincérité et fierté à*

*Mes cher parents, source de tendresse et de
noblesse et*

D affectation :

Ma Mère : Zina

Mon père : Youcef

A ma chérie : Amel L

*Surtout Pour tous les sacrifices et leur soutien
moral et matériel dont ils ont fait preuve*

Pour que je réussisse

Liste Des Figures

Chapitre I :

Fig. I.1 : Matériaux composites.....	5
Fig. I.2 : Les structures géométriques des composites	13
Fig. I.3: Exemples de renforts en verre.....	14
Fig. I.4 : Les constituants d'un béton armé	13
Fig. I.5: Fibre de verre.....	15
Fig. I.6: Fibre de carbone.....	16
Fig. I.7 : Fibre d'aramide.....	16
Fig. I.8 : les différents types de renfort.....	17
Fig. I.9 : les différents types de matrice.....	19
Fig. I.10 : Microsphères de verre observées par microscopie optique.....	22
Fig. I.11 Cycle d'injection : les différentes phases	25

Chapitre II

Fig. II.1 : Les constituants d'un composite stratifié.....	29
Fig. II. 2: Désignation d'un stratifié.....	31
Fig. II.3 : L'influence de l'Orientation des fibres (Essai de traction).....	32
Fig. II.4 : Schématisation des déformations dans le cas de la théorie classique des stratifiés.....	37

Chapitre III

Fig. III.1 représente une plaque sans troue.....	44
Fig. III.2 représente une plaque trouée.....	44
Fig. III.3 : Organigramme de calcul la matrice de rigidité (sous Matlab 7).....	47

Fig.III.4 : Organigramme de calcul les déplacements et tracer les graphes (sous Matlab 7).	48
Fig.III.5 : Les déplacements 1 ^{er} cas.....	53
Fig.III.6 : Les déplacements 2 ^{ème} cas.....	53
Fig.III.7 : Les déplacements 3 ^{ème} cas.....	54
Fig.III.8 : Les déplacements 4 ^{ème} cas.....	54
Fig.III.9 : Les déplacements 1 ^{er} & 2 & 3 & 4 ^{ème} cas.....	55
Fig.III.10 Présentation de l'interface ABAQUS.....	57
Fig.III.11 les dimensions de la plaque.....	58
Fig. III.12 la plaque avec un trou.....	58
Fig. III.13 résultat des déplacements selon ϵ_{xx}	59
Fig.III.14 les résultats des déplacements ϵ_{yy}	60
Fig.III.15 les résultats des déplacements ϵ_{zz}	60
Fig.III.16 les résultats des contraintes σ_{xx}	61
Fig.III.17 les résultats des contraintes σ_{yy}	62
Fig.III.18 les résultats des contraintes σ_{xy}	62
Fig.III.19 résultats des déplacements ϵ_{xx}	63
Fig.III.20 les résultats des déplacements ϵ_{yy}	63
Fig.III.21 les résultats des contraintes σ VM.....	64
Fig.III.22 les résultats des contraintes σ_{xx} de la plaque trouée.....	64
Fig.III.23 les résultats des contraintes σ_{yy} de la plaque trouée.....	65
Fig.III.24 les résultats des contraintes σ_{xy} de la plaque trouée.....	65
Fig.III.25 les résultats des déplacements ϵ_{xx} de la plaque trouée (2).....	66

Fig.III.26	les résultats des déplacements ε_{yy} de la plaque trouée (2).....	66
Fig.III.27	les résultats des contraintes σ_{VM} de la plaque trouée (2).....	67
Fig.III.28	les résultats des contraintes σ_{xx} de la plaque trouée (2).....	67
Fig.III.29	les résultats des contraintes σ_{yy} de la plaque trouée (2).....	68
Fig.III.30	les résultats des contraintes σ_{xy} de la plaque trouée (2).....	68

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : exemple de matériaux composites, pris au sens large.....8

Tableau III.1 : les caractéristiques d'époxyde.....45

Tableau III.2 : les caractéristiques du verre.....45

Tableau.III.3 : les résultats de chaque cas.....52

Les symboles et notations

M_f : La teneur en masse de renfort.

M_m : La teneur en masse de matrice.

V_f : La teneur en volume de renfort.

V_m : La teneur en volume de matrice.

ρ_f : La masse volumique de fibre (renforts).

ρ_m : La masse volumique de matrice.

$[C]$: La matrice de rigidité.

$[s]$: La matrice de souplesse.

σ_{ij} : Les composantes du tenseur de contrainte.

ϵ_{ij} : Les composantes du tenseur de contrainte.

C_{ij} : Les coefficients de la matrice de rigidité.

s_{ij} : Les coefficients de la matrice de souplesse.

E_1 : Module d Young (module d élasticité) suivant l axe 1.

E_2 : Module d Young (module d élasticité) suivant l axe 2.

E_3 : Module d Young (module d élasticité) suivant l axe 3.

ν_{12} : Coefficient de poisson dans le plan (1,2).

ν_{13} : Coefficient de poisson dans le plan (1,3).

ν_{23} : Coefficient de poisson dans le plan (2,3).

G_{13} : Module de cisaillement dans le plan (1 ,3).

G_{12} : Module de cisaillement dans le plan (1 ,2).

G_{23} : Module de cisaillement dans le plan (2,3).

λ : Coefficient 1 de lamé.

μ : Coefficient 2 de lamé.

ϕ_{ij} : Matrice de changement de base du stratifié.

K : Rapport des déformations (coefficient du tissu).

σ_{11} : Contrainte normale suivant la direction x.

u_{11} : Déplacement suivant la direction x.

u_{22} : Déplacement suivant la direction y.

u_{33} : Déplacement suivant la direction z.

VM : Vos Mises

Table des matières

Résumé	
Abstract	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Les symboles et notations	
Introduction générale	1
 Chapitre I : Généralité sur les matériaux composites	
I.1.Introduction	3
I.2.Historique.....	4
I.3 Caractéristiques générales.....	4
I.4.Généralité sur les matériaux composites	5
I.5.Définition d'un matériau composite.....	5
I.6.constituants des matériaux composites.....	7
I.7.Classification des matériaux composites.....	10
I.7.1. Composites à fibres	10
I.7.2 Composites à particules	10
I.7.3 Avantages et inconvénients des matériaux composites.....	10
I.8.La microstructure des composites : renforts et matrice.....	12
I.8.1 Les renforts	12
I.9 Relation entre le pourcentage massique et volumique de fibre	18
I.9.1 La teneur en masse de renfort	18

I.9.2 La teneur en volume de renfort	18
I.9.3 Les matrice	18
I.10 Résines thermodurcissable	19
I.11 Résines thermoplastiques	22
I.12 Additifs	22
I.13 Tolérance aux dommages.....	22
I.14 Domaine d'utilisations des matériaux composites	23
I.16 Conclusion.....	26
I.17 Références bibliographiques.....	27

Chapitre II : La théorie classiques des stratifiés

II.1 Introduction	28
II.2 Généralité.....	28
II.3 Stratifiés.....	29
II.4 Désignation des structures stratifiées.....	30
II.5 Loi de comportement des stratifiés.....	32
II.6 Caractéristiques du mélange renfort-matrice.....	32
II.7 Calcul des tenseurs du stratifié	33
II.8 Calcul des tenseurs du stratifié (comportement en membrane et en flexion).....	34
II.9 Matrice de rigidité	34
II.10 Mise en équation d'un laminé	34
II.11 Source de simplification	35

II.12 Expression du champ des déformations.....	37
II.13 champ des contraintes	40
II.14 conclusion	42
II.15 Références bibliographiques.....	43

Chapitre III : Application numérique et simulation numérique

III.1 Principe	44
III.2 Présentation des Modélisations	44
III.3 Cas d'étude	45
III.4 Paramètre des matériaux.....	45
III.5 Calcule la matrice de rigidité	46
III.6 Organigramme de calcul de la matrice de rigidité (sous Matlab 7)	46
III.7 Organigramme de calcul les déplacements et tracer les graphes (sous Matlab 7)	48
III.8 Les Résultats d'après le calcul	49
III.8.1 Calcule les déplacements	49
III.9 Les graphes d'après les résultats au tableau	52
III.10 Interprétation des résultats	55
III.11 La simulation numérique.....	55
III.11.1 Introduction	55
III.12 Présentation du logiciel.	56
III.13 Démarches et étapes de simulation	57
III.14 Notre étude	57
III.15 Les étapes de la simulation	58

SOMMAIRE

III.16 Les résultats de la simulation	59
III.17 Conclusion	69
III.18Références bibliographiques.....	70

Introduction générale

Introduction générale

De nos jours, les industriels sont de plus en plus intéressés pour intégrer des pièces composites à leurs réalisations, il s'agit notamment des industries du transport, les accessoires de sports et plus particulièrement de l'aéronautique. En effet, ces matériaux présentent de nombreux avantages, notamment celui de permettre une diminution de la masse des pièces lorsqu'ils sont correctement exploités.

Cela est dû au fait que ces matériaux sont trois à quatre fois plus légers que les alliages d'aluminium, à résistance équivalente.

Actuellement, la tendance dans les matériaux composites à haute performance est de produire des pièces de structure de dimensions croissantes avec des formes de plus en plus complexes. Les renforts fibreux sont l'un des constituants essentiels d'un matériau composite. Ces renforts contribuent directement aux propriétés physiques et mécaniques du matériau composite.

Un matériau composite est constitué de différentes phases nommées renforts et matrice, les renforts se présentent sous forme de fibres continues ou discontinues, le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La matrice assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques.

L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de renforcer les propriétés mécaniques de la structure, les composites renforcés par des fibres courtes ont été développés en grande partie pour combler l'écart de propriété entre les stratifiés (des fibres continues) utilisés comme structures primaires par l'industrie aéronautique et aérospatiale et matériaux non renforcés utilisés principalement dans les applications non porteuses.

À certains égards, les fibres courtes couplent les avantages de chacun de ces matériaux, le premier chapitre est consacré, à l'étude bibliographique sur les matériaux composites (définition, caractéristiques générales, classification, avantages et inconvénients....).

Le deuxième chapitre présente une étude analytique sur le comportement des matériaux composites en utilisant la théorie classique des stratifiés pour déterminer les contraintes et les déplacements et enfin on termine notre étude par un troisième chapitre consacré à une étude expérimentale de l'essai de traction sur deux plaques en matériaux composites la première plaque est une plaque simple et la deuxième plaque est une plaque trouée, on utilise logiciel

ABAQUS pour déterminer les résultats et on faire une comparaison sur l'étude analytiques avec l'étude expérimentale.

Notre objectif est de faire une comparaison entre l'étude analytique et l'étude numérique d une plaque en matériaux composites.

Enfin une conclusion générale et perspective.

Chapitre I

Généralité sur les matériaux composites

I.1 Introduction

Actuellement le besoin industriel à pousser les ingénieurs et les chercheurs dans le monde entier à remplacer les matériaux classiques par des matériaux nouveaux capables de résister à des conditions extrêmes.

Les matériaux traditionnels tels que le verre, le carbone, le bore..., répondant à ces conditions par une manière très fragiles, un petit défaut suffit pour amorcer la rupture totale de la structure. Pour pouvoir réaliser des structures suffisamment tolérantes aux dommages, les chercheurs ont mis énormément d'efforts pour concevoir des matériaux de construction présentent une bonne rigidité, une haute résistance mécanique, une ténacité élevée, bon comportement à la fatigue, une grande légèreté, et la possibilité de concevoir le matériau selon la nécessité. Et dans ce même contexte l'ingénieur désire, dans un grand nombre de situation, concevoir des structures présentant un rapport performance /masse, le plus élevé possible.

Aucun matériau classique ne permet de combiner ces caractéristiques, Et pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire d'utiliser des matériaux renforcés par des fibres qui sont liées entre elles par une résine [1].

Donc, Les matériaux composites sont la naissance de ces recherches et développements qui présentent un intérêt très important dans les domaines industriels modernes tels que : la mécanique, l'aéronautique, l'Aérospatial, l'industrie automobile, les constructions navales, le génie civil, et le sport...et qui possèdent des propriétés mécaniques élevées spécifiques à leur emploi [2].

L'utilisation des matériaux composites dans la réalisation des structures offre aux concepteurs des possibilités nouvelles, car les composites structuraux ont de très bons

Rapports rigidité/densité et résistance/densité [3].

I.2 Historique

Historiquement, le concept de renforcement à base de fibre, est très ancien ; il a été utilisé par les Egyptiens dans la construction, par l'introduction de la paille dans de l'argile.

En 1942, le premier bateau à base de fibres de verre a vu le jour, et les plastiques renforcés ont fait leur apparition dans les applications aéronautiques et les composants électriques. Les fibres de carbone et de bore à haute résistance étaient introduites au début des années 60, et ont été utilisées dans les composites à haute performances en 1968. Quant aux composites à matrices métalliques, tels que le bore/aluminium, ils ont été introduits dans les années 70. Par la suite, il y a eu le développement des fibres de Kevlar (aramide) en 1973. A la fin des années 70, les applications des matériaux composites ont pris des plus d'ampleur, et ont touché les constructions aéronautique et automobile, les équipements sportifs et l'industrie biomédicale.

Les années 80 par contre ont été marquées par une augmentation spectaculaire de l'utilisation des fibres à haute performances. Actuellement, l'accent est mis sur le développement des composites destinés aux applications à hautes températures, tels que les composites à matrice métallique, à matrice céramique et carbone/carbone [4].

I.3 Caractéristiques générales

Un matériau composite consiste dans le cas le plus générale d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. Dans le cas de plusieurs discontinues de natures différentes, le composite est dit hybride. La phase discontinue est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue. La phase continue est appelée la matrice.

La phase discontinues appelée le renfort ou matériau renforçant (Fig. I.1). Une exception importante à la description précédente est le cas de polymères modifiés par des élastomères, pour lesquels une matrice polymère rigide est chargée avec des particules élastomère, pour ce type de matériau, les caractéristiques statiques du polymère (module d'Young, contrainte à la rupture, etc.) ne sont pas pratiquement pas modifiées par injection de particules élastomères, alors que les caractéristiques au choc sont améliorées.

Les propriétés des matériaux composites résultent :

- des propriétés des matériaux constituants.
- de leur distribution géométrique.
- de leurs interactions.

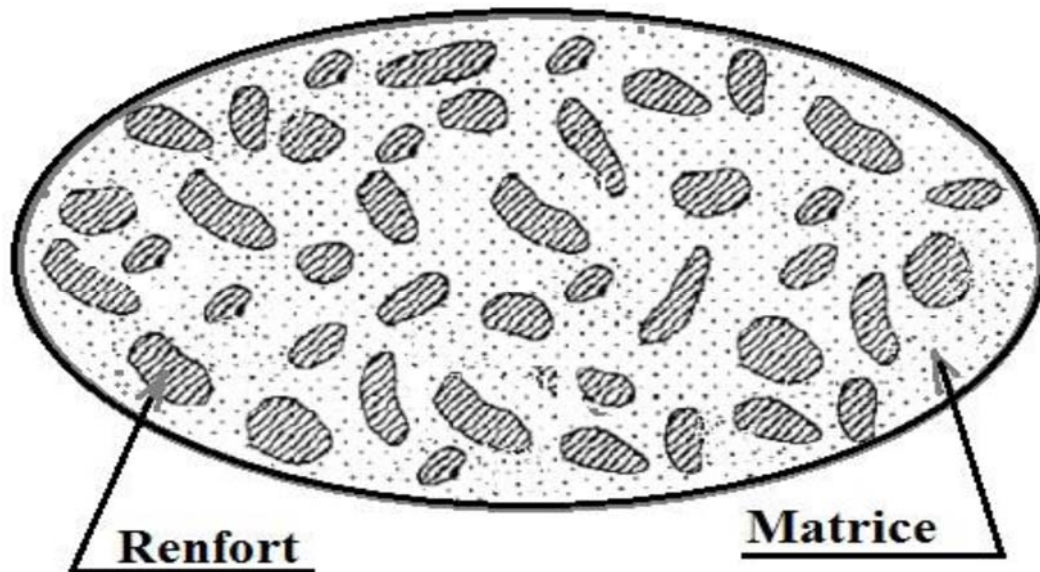


Fig. I.1 : Matériaux composites.

I.4 Généralité sur les matériaux composites

Il existe différentes familles de matériaux : les métaux, les plastiques, les composites, etc. ... Les matériaux composites ne sont pas une nouveauté, ils ont tous temps été utilisé par l'homme, citons par exemple le bois, le béton et le béton armé

I.5 Définition

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux ou plus de natures différentes. Se complétant et permettant d'aboutir à un matériau hétérogène dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Le principal intérêt de l'utilisation des matériaux composites provient de ses excellentes caractéristiques. Ils disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels :

- légèreté
- grande résistance à la fatigue
- liberté de formes
- maintenance réduite
- faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion (sauf alu carbone)
- insensibles aux produits chimiques sauf les décapants de peinture qui attaquent les résines
- Une bonne isolation électrique. Leur faible taux d'utilisation vient de leur coût.

On distingue deux types de composites:

Les composites grandes diffusions et les composites hautes performances.

• **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,
- beaucoup de procédés encore manuels.

I.6 Constituants des matériaux composites

Les renforts : 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). [5]

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.

Tableau I.1 : exemple de matériaux composites, pris au sens large.

Type de composite	Constituants	L'application
1-composites à matrices organique : papier, carton, Panneaux de particules, Panneaux de fibres Toiles enduites Matériaux d'étanchéité Pneumatiques Stratifiés Plastiques renforcés	Résine/charges/fibres celluloses Résine/copeaux de bois Résine/fibre de bois Résine souple/tissus Elastomère/bitume/textiles Caoutchouc/toile/acier Résine/charge/fibre de verre, de carbone, etc. Résine/microsphères	Imprimerie, emballage, etc. Menuiserie Bâtiment Sports, bâtiment Toiture-terrasse, etc. Automobile Domaines multiples
2-composites à matrice minérale béton Composites carbone-carbone Composites céramique	Ciment /sable/granulats Carbone/fibre de carbone Céramique/fibres céramiques	Génie civil Aviation, espace, sports, biomédecine, etc. Pièce thermomécaniques
3- composites à matrice métallique	Aluminium/fibres de bore Aluminium/fibres de carbone	Espace

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

- la nature des constituants et leurs propriétés.
- la géométrie du renfort, sa distribution.
- la nature de l'interface matrice-renfort.

La géométrie du renfort sera caractérisée par : sa forme, sa taille, la concentration du renfort, sa disposition (son orientation), etc. si l'ensemble de ses paramètres concourt à déterminer les propriétés du composite, les modélisations descriptives ne tiendront compte que de certains paramètres, du fait de la complexité des phénomènes mis en jeu. par exemple, la forme du renfort sera schématiquement approchée soit par des sphères, soit par des cylindres.

La concentration du renfort est habituellement mesurée par la fraction volumique (fraction en volume) ou par la fraction massique (fraction en masse). La concentration du renfort est un paramètre déterminant des propriétés du matériau composite.

Pour une concentration donnée, la distribution du renfort dans le volume du composite est également un paramètre important. Une distribution uniforme assurera une (homogénéité) du matériau : les propriétés du composite seront indépendantes du point de mesure. dans le cas d'une distribution non uniforme de renfort, la rupture du matériau sera initiée dans les zones pauvres en renfort, diminuant ainsi la résistance du composite. [6]

Dans le cas de matériaux composites dont le renfort est constitué de fibres, l'orientation des fibres détermine l'anisotropie du matériau composite. cet aspect constitue une des caractéristiques fondamentales des composites : la possibilité de contrôler l'anisotropie du produit fini par une conception et une fabrication adaptées aux propriétés souhaitées

I.7 Classification des matériaux composites

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

I.7.1 Composites à fibres

Un matériau composite est un composite à fibre si le renfort se trouve sous forme de fibres. Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres continues, soit sous forme de fibres discontinues : fibre coupées, fibre courtes, etc. leurs orientations permettent de moduler à la carte les propriétés mécaniques des matériaux composites, pour obtenir des matériaux allant de matériau fortement anisotropie à des matériaux isotropies.

1.7.2 Composites à particules

Un matériau composite est un composite à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. Une particule, par opposition aux fibres, ne possède pas de dimension privilégiée. Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion,

La diminution du retrait, etc.

. Dans de nombreux cas, les particules sont simplement utilisées comme charges pour réduire le coût du matériau, sans en diminuer les caractéristiques.

Le choix de l'association matrice-particules dépend des propriétés souhaitées. Par exemple, des inclusions de plomb dans des alliages de cuivre augmenteront leur facilité d'usinage. Des particules de métaux fragiles tels le tungstène, le chrome et le molybdène, qui sont incorporées dans des métaux ductiles, augmenteront leurs propriétés à températures élevées, tout en conservant le caractère ductile à température ambiante. [7]

I.7.3 Avantages et inconvénients des matériaux composites

I.7.3.1 Avantages

1. Gain de masse.
2. Mise en forme de pièces complexes (principe du moulage) et réduction du nombre d'interfaces (boulonnage, rivetage et soudure sur structures métalliques).[8]
3. Grande résistance à la fatigue.

4. Faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion (sauf en cas de contact entre de l'aluminium et des fibres de carbone).
5. Insensibles aux produits chimiques "mécaniques " comme les graisses, huiles, liquides. hydrauliques, peintures, solvants, pétrole
6. Facilité de mise en forme : le matériau durcit et prend un aspect de surface définitif alors qu'il est positionné sur le moule.
7. Légèreté : pour des propriétés mécaniques équivalentes, l'utilisation de matériau composite à la place de métaux permet un gain de poids de près de 50 %. Cette propriété est notamment mise à profit dans le secteur automobile.
8. Adaptabilité : les caractéristiques mécaniques du composite peuvent être ajustées en jouant globalement sur le taux de fibres mais aussi localement en adaptant la quantité et le positionnement.
9. Résistance à la corrosion ou à l'oxydation : à cause de leur composition chimique à base de résine organique, les composites sont peu sensibles à la corrosion et sont très résistants aux attaques chimiques. Cette caractéristique leur donne un avantage important par rapport aux métaux pour la réalisation de réservoirs et d'équipements destinés à un usage extérieur ou en zone humide.
10. Isolation électrique et thermique : le bon niveau d'isolation que procurent les matériaux composites pourrait conduire à une utilisation plus importante dans le bâtiment. Toutefois, leur emploi massif est freiné à cause de coûts élevés par rapport aux matériaux de construction traditionnels.

I.7.3.2 Inconvénients

1. Les composites présentent également quelques inconvénients qui limitent leurs applications: [9]
 - la tenue en température et au feu est limitée,
 - les résines dégagent des vapeurs de solvant notamment en phase de fabrication,
 - la fin de vie de matériaux composés d'un mélange quasi indissociable de résine organique et de fibres de verre pose des problèmes de recyclage. Il faut noter par ailleurs que les résines courantes sont fabriquées à partir de dérivés du pétrole et consomment donc une matière non renouvelable,
 - les caractéristiques mécaniques dépendent du positionnement des fibres et ne sont donc pas homogènes dans toutes les directions,
 - les composites sont difficilement usinables avec précision

2. Vieillissement sous l'action de l'eau et de la température.
3. Tenue à l'impact moyenne par rapport aux métaux.
4. Meilleure tenue au feu que les alliages légers mais émission de fumées parfois toxiques pour certaines matrices.
5. Coût

Les matériaux composites hautes performances ont été développés principalement pour répondre aux besoins de la communauté aérospatiale où le coût élevé peut être toléré en échange de matériaux plus performants.

Par conséquent, le transfert de la technologie des composites aux produits de grande consommation est lent, à quelques exceptions comme les équipements de sports où la performance prime également sur le coût.[10].

I.8 La microstructure des composites (renforts et matrice)

Pratiquement tous les composites sont constitués d'éléments discontinus appelés renforts, noyés dans une phase continue appelée matrice. Schématiquement, les renforts assurent une part importante de la tenue mécanique (rigidité et résistance) du composite, tandis que la matrice maintient les renforts en position, transfère les efforts entre eux, et assure toutes les autres fonctions techniques. [11]

Il peut par exemple s'agir d'une protection contre diverses agressions (thermiques, chimiques, chocs...), de fonctions esthétiques (couleur, aspect...), de donner sa forme extérieure au produit fini... Les renforts peuvent avoir plusieurs géométries, et les deux constituants peuvent être réalisés dans de nombreux matériaux.

I.8.1 Les renforts

D'un point de vue géométrique, on peut distinguer trois grands types de renforts :

Les fibres longues (c'est-à-dire de longueur comparable aux dimensions de la pièce, voir (Fig. I.2. (a)).

Les fibres courtes (c'est-à-dire de longueur faible devant les dimensions de la pièce, voir (Fig. I.2. (b)).

Les particules, ou charges renforçantes (Fig. I.2. (c)).

Tous ces renforts sont inclus au sein d'une matrice qui répartit les efforts entre eux et les protège des agressions extérieures, comme indiqué ci-dessus. En outre, lorsque les renforts

sont des fibres, celles-ci peuvent être soit orientées dans une direction précise, soit disposées "en vrac", aléatoirement

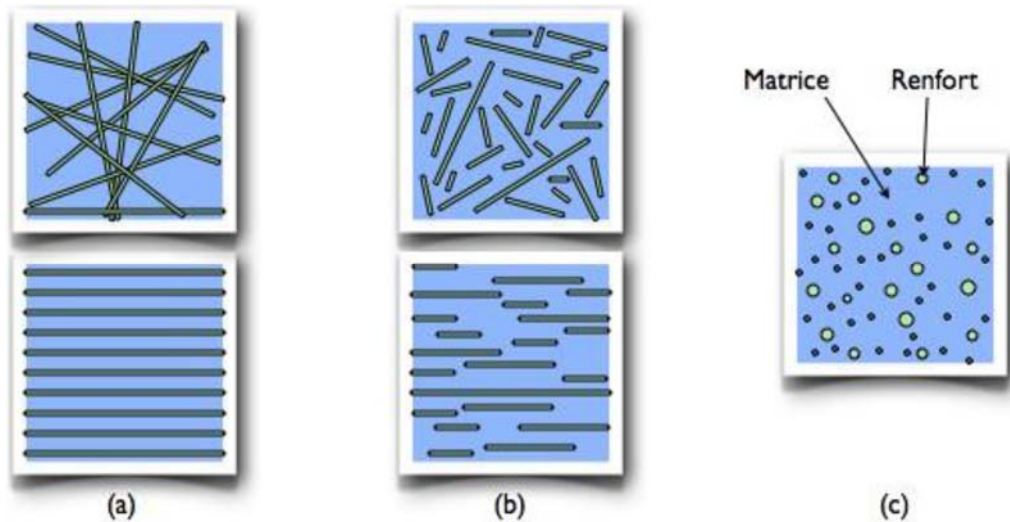


Fig. I.2 : Les structures géométriques des composites : (a) fibres longues, (b) fibres courtes, (c) particules.

I.8.1.1 Renforts et propriétés mécaniques

Les renforts sont généralement conçus de sorte à avoir des propriétés mécaniques (notamment la résistance et la rigidité) optimales. Ceci passe naturellement par le choix d'un matériau adéquat, mais pas seulement :

dans le cas des composites modernes, le caractère particulaire ou filamentaire des renforts fait qu'il est généralement possible de les fabriquer avec très peu de défauts, alors qu'une pièce massive du même matériau en contiendrait beaucoup plus, ce qui nuirait à sa résistance mécanique (c'est pourquoi le verre, peu résistant sous forme massive, peut être employé comme renfort lorsqu'il est sous forme de fibres). [12]

Sauf cas particuliers, les renforts sont donc beaucoup plus rigides et plus résistants que la matrice (souvent d'un facteur 10, voire 100 ou plus). Par conséquent, les propriétés mécaniques du composite dépendent fortement de la forme et de l'orientation des renforts :

Les composites à fibres longues présentent un meilleur comportement mécanique que les composites à fibres courtes ou à particules, du moins dans les directions renforcées par les fibres.

Les composites à fibres parallèles présentent un comportement mécanique anisotrope,

Ainsi, pour des applications structurelles, c'est-à-dire des pièces devant résister à des efforts importants, on utilise généralement des fibres longues, dont on adapte l'orientation aux sollicitations subies par la pièce, et les composites ainsi conçus ont généralement des comportements anisotropes. En revanche, pour des applications non structurelles, on utilise généralement des fibres courtes ou des particules, dont le coût de mise en œuvre est moins élevé. Cette distinction vaut aussi bien pour les composites modernes que pour les "multi- matériaux" traditionnels. Par exemple:

Le verre, associé à des matrices de résine, est utilisé sous forme de microbilles (Fig. I.3. (a)) ou de fibres courtes (Fig. I.3. (b)) pour réaliser des plastiques renforcés ou des isolants thermiques. Sous forme de fibres longues (Fig. I.3. (c)), il peut servir à des applications structurelles comme les coques des bateaux ;

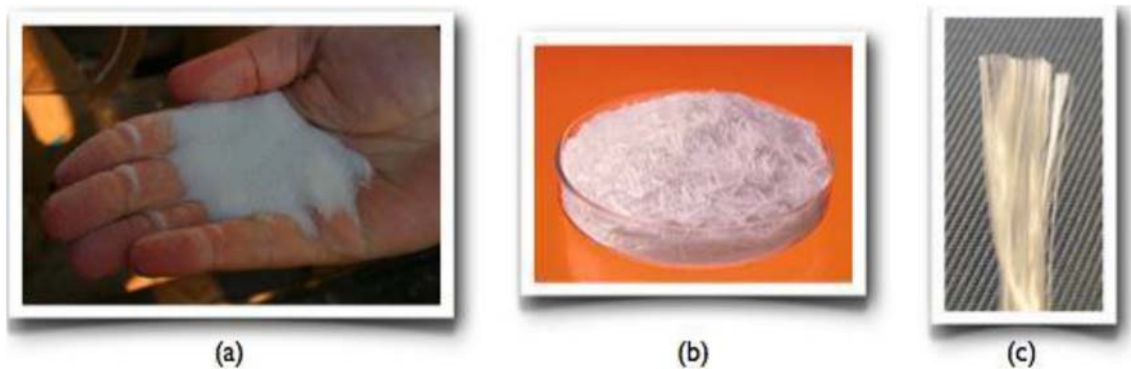


Fig. I.3: Exemples de renforts en verre : (a) microbilles creuses, (b) fibres courtes (image de RTP Compagnie), (c) fibres longues.

Le béton est constitué de granulats (assimilables à des "particules") pris dans une matrice de ciment (Fig. I.4. (a)). Sa résistance mécanique est moyenne en compression, et quasi-nulle en traction, ce qui limite ses possibilités d'emploi.

On l'associe donc couramment à des armatures d'acier (Fig. I.4. (b)), plus résistantes et capables de reprendre les efforts de traction, ce qui permet de réaliser des ouvrages plus fortement sollicités : c'est le principe du béton armé



Fig. I.4 : Les constituants d'un béton armé : (a) le béton seul (qui est lui-même un multi-matériau), (b) les armatures métalliques.

I.8.1.2 Fibre de verre

Elles constituent le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elle est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore). On distingue trois types de fibres [13] :

- verre E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes ;
- verre R : pour les composites hautes performances ;
- verre D : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).



Fig. 1.5 : Fibre de verre.

I.8.1.3 Fibre de carbone

C'est la fibre la plus utilisée dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile). Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres :

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



Fig.1.6 : Fibre de carbone.

I.8.1.4 Fibre d'aramide

Souvent appelée KEVLAR®, 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 haute module : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances [6].



Fig. I.7 : Fibre d'aramide.

I.8.1.5 Fibre de bore

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

I.8.1.6 Fibre de silice

Elles sont produites comme le verre, par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique dans les tuyères pour moteur de fusée [6].

I.8.1.7 Fibres de polyéthylène de haut module

Elles présentent une très bonne résistance à la traction mais une mauvaise mouillabilité. Pour des structures peu sollicitées, on peut encore utiliser des fibres synthétiques courantes de polyamide ou polyester [6].

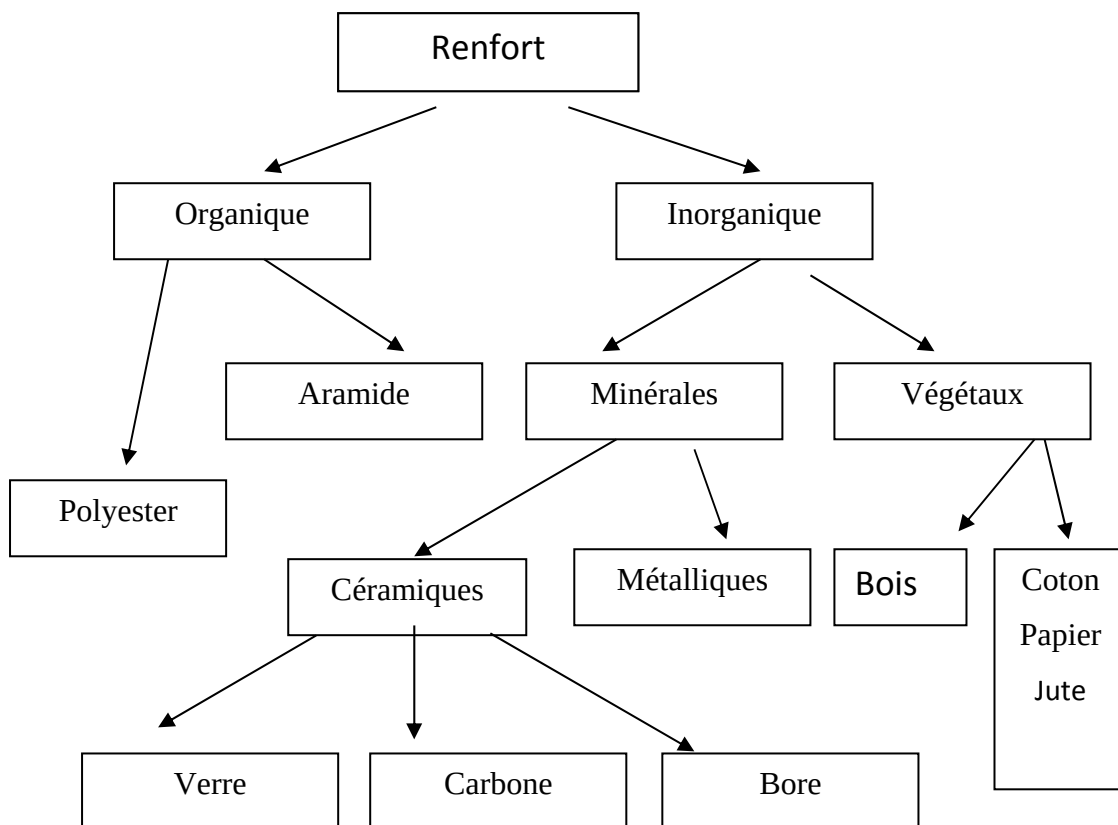


Fig. I.8 : les différents types de renfort.

I.9 Relation entre le pourcentage massique et volumique de fibre

Afin d'effectuer des calculs géométriques (épaisseur, volume, etc.) par exemple, nous avons besoin de savoir la relation qui existe entre le pourcentage massique et volumique de fibre.

Si nous savons le pourcentage volumique de fibre, nous pourrions déterminer le volume d'une pièce à partir de cette proportion pour ensuite évaluer l'épaisseur.

I.9.1 La teneur en masse de renfort

On appelle ainsi le rapport :

$$M_f = \frac{\text{masse de renfort}}{\text{masse totale}}$$

En conséquence, la teneur en masse de matrice est telle que :

$$M_m = \frac{\text{masse de matrice}}{\text{masse totale}}$$

Ou encore :

$$M_m = 1 - M_f$$

I.9.2 La teneur en volume de renfort

On appelle ainsi le rapport [9]:

$$V_f = \frac{\text{volume de renfort}}{\text{volume totale}}$$

En conséquence, la teneur en volume de matrice est telle que :

$$V_m = \frac{\text{volume de matrice}}{\text{volume totale}}$$

Ou encore :

$$V_m = 1 - V_f$$

I.9.3 Les matrice

Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère.

Les résines polymères existent en grand nombre et chacune à un domaine particulier d'utilisations requises, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés.

Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est le cas des matériaux en carbone des températures de 2 200°C peuvent être atteintes.

La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la Fig. I.9.

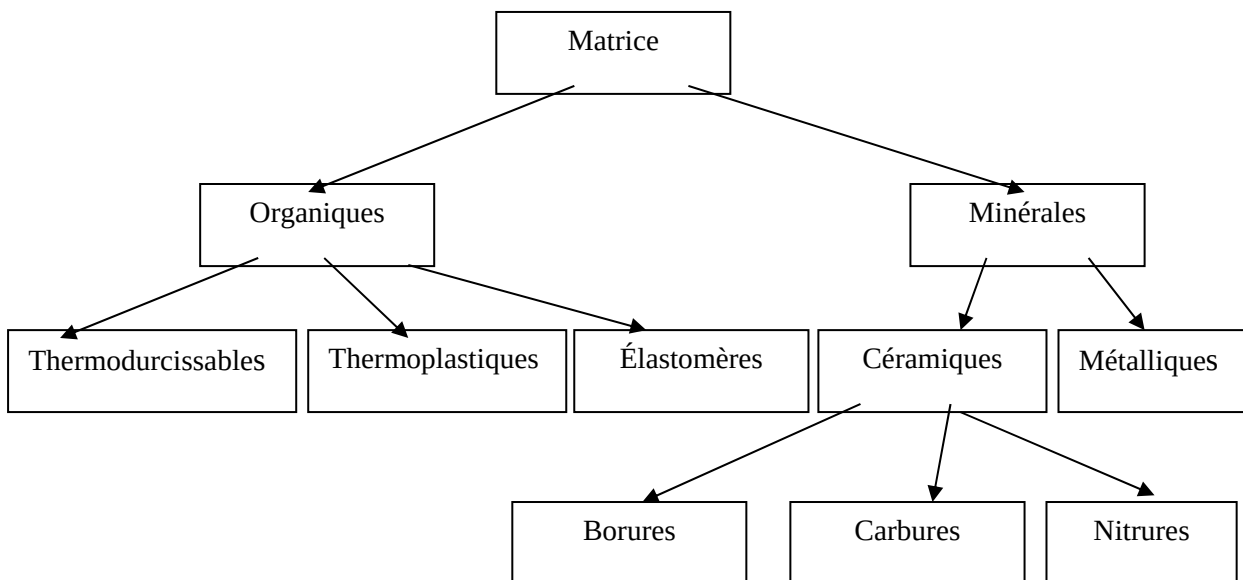


Fig. I.9 : les différents types de matrice.

I.10 Résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois.

Elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants. Les résines polyesters insaturées, les résines de condensation (phénoliques, aminoplastes, furaniques) et les résines époxy sont des résines thermodurcissables[12]

I.10.1 Polyesters insaturés c'est la résine la plus utilisée dans l'application composite de grande distribution. Une résine de polyester insaturé contenant un monomère insaturé (généralement le styrène) est réticulée à température ambiante par addition d'un catalyseur de type peroxyde organique et d'un accélérateur. Elle passe successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel, puis à l'état de solide infusible.

I.10.1.2 Avantages [6,7]

- Bonne accroche sur fibres de verre
- Bonne résistance chimique
- Mise en œuvre facile
- Tenue en température ($> 150\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Prix réduit

I.10.1.3 Inconvénients

- Inflammabilité (sauf résines chlorées)
- Tenue vapeur et eau bouillante
- Retrait important (6 à 15 %)
- Durée de conservation en pot limitée

I.10.2 Vinylesters on peut la considérer comme une variante des polyesters produite à partir d'acides acryliques. Elles possèdent une bonne résistance à la fatigue et un excellent comportement à la corrosion.

-Phénoliques : elles sont issues de la polycondensation du phénol et du formol se caractérise par une bonne tenue au feu, sans fumée. Elles restent fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à colorer et à mettre en œuvre.

I.10.3 Epoxydes elles résultent de la polyaddition de l'épichlorhydrine sur un polyalcool et constitue la résine type des composites hautes performances (HP). On distingue deux classes de résines en fonction :

- du durcissement à chaud ou à froid.
- de la tenue en température ($120\text{-}130\text{ }^{\circ}\text{C}$, ou $180\text{-}200\text{ }^{\circ}\text{C}$).

I.10.3.1 Avantages

- Tenue mécanique
- Tenue thermique
- Tenue chimique
- Tenue Fatigue
- Faible retrait (1 à 2%)
- Excellente adhérence sur fibres
- Mise en œuvre facile

I.10.3.2 Inconvénients

- Prix élevé
- Sensibilité à l'humidité
- Vieillessement sous température
- Sensibilité aux chocs

I.10.4 Polyuréthannes et polyurées [6,7] dans l'application composite, on utilise surtout des formules élastomériques dont la faible viscosité permet un bon remplissage du moule. Les constituants sont livrés à l'état de pré polymères liquides.

I.10.4.1 Avantages

- Facilité de moulage
- tenue chimique
- Vieillessement

I.10.4.2 Inconvénients

- Résistance mécanique réduite
- Coloration en masse difficile
- Combustibilité

I.10.5 Polyimides ces résines sont surtout utilisées dans les composites (HP), lorsque l'on cherche une bonne stabilité sous hautes températures (> 250 °C).

Elles restent toutefois très difficiles à mettre en œuvre.

I.11 Résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont solide set nécessitent une transformation à très haute température.

Les polychlorures de vinyle (PVC), les polyéthylènes, polypropylène, polystyrène, polycarbonate polyamide sont Quelques exemples de ces résines thermoplastiques.

I.12 Additifs

Des produits peuvent être incorporés à la résine pour renforcer les propriétés mécaniques charges renforçant, par exemple les charges sphériques creuses 5 à 150 μm , figure (1.10).

Des charges non renforçant peuvent être également utilisées pour diminuer le coût des matrices en résine.

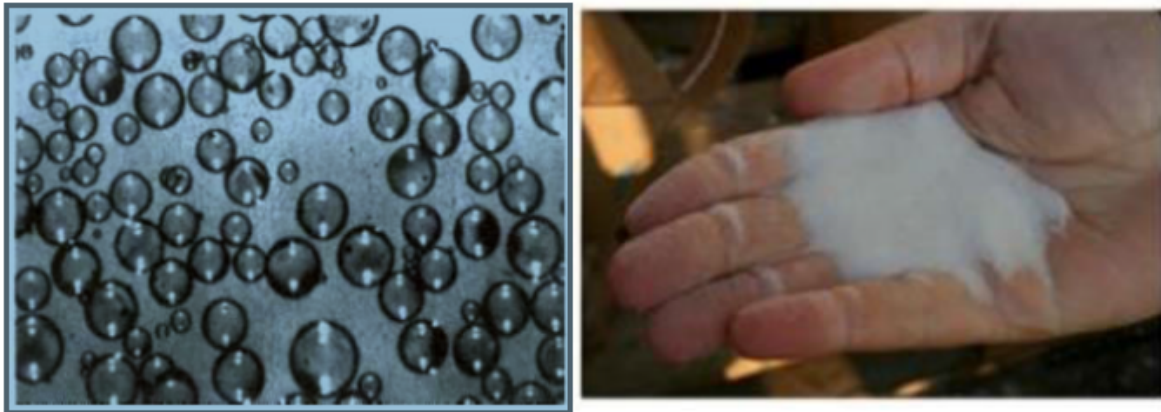


Fig. I.10: Microsphères de verre observées par microscopie optique.

Des additifs, de type colorant ou agent de démoulage sont largement utilisés lors de la conception des structures constituées de matériaux composites [7,1].

I.13 Tolérance aux dommages

Un des points faibles les plus importants des matériaux composites est la tolérance aux dommages. Des dommages de diverses natures peuvent se produire dans la vie d'une structure, par exemple l'impact, soit en service ou pendant la maintenance, est inévitable.

En règle générale, plus un matériau est ductile, plus il est capable de tolérer l'impact car la ductilité fournit la capacité d'absorber de l'énergie. Par conséquent, les structures métalliques ont tendance de se déformer plutôt que de se fracturer sous l'impact. Le caractère fragile des matériaux composites ne permet pas, par contre, de subir l'impact sans avoir d'endommagement.

Les dommages sont souvent des fissurations internes de la matrice, indétectables sur la surface de la structure.

Ce type de dommages diminue considérablement la résistance en compression de la pièce endommagée. Les dommages des fibres diminuent la résistance en compression ainsi qu'en traction. Les outils pour évaluer la tolérance aux dommages des structures sont le programme d'inspection, l'analyse de la résistance résiduelle, et l'analyse de la propagation des dommages.

I.14 Domaine d'utilisations des matériaux composites

I.14.1 Aéronautique

Avec son aspect lisse, et ses caractéristiques mécaniques propres, le composite est le choix des constructeurs aéronautiques. C'est même devenu un enjeu des futurs gros porteurs qui visent 70% de leur poids en composites, principalement à base de carbone. C'est aussi la tendance de l'aviation de tourisme et de loisir avec des ULM de plus en plus carénés de composites.

I.14.2 Agriculture

Dur à la tâche et résistant à tous les temps, le composite figure parmi le matériau de fabrication du matériel agricole : tant sur le matériel roulant (tracteurs, roundballeuses, semoirs) que sur le matériel fixe (robots de traite, cuves, abreuvoirs,...). Sa capacité à être réparé est un atout pour ce secteur d'activité.

I.14.3 Conforme au niveau d'exigence

Des plus grandes marques de voiture de sport, mais aussi apprécié pour son poids réduit, le composite est présent chez les constructeurs et dans les écuries sportives.

Son prix modéré est également l'un des critères de choix chez les carrossiers industriels qui peuvent ainsi proposer à leurs clients des véhicules beaux et économiques.

I.14.4 Bâtiment / BTP

Le monde du bâtiment sait apprécier les beaux produits, et il est également exigeant sur leur robustesse : c'est pourquoi les capots des engins de chantiers, des compresseurs mobiles, ... sont souvent en matériaux composites.

L'avenir de certains équipements de nos maisons et immeubles se joue également dans ces matériaux.

I.14.5 Design / Mobilier

Il peut tout se permettre : les formes les plus tordues, les couleurs les plus décalées, certaines textures également. C'est pourquoi les designers peuvent se faire plaisir avec ce matériau aux caractéristiques incroyables.

On peut ainsi s'asseoir ou manger dessus, travailler avec, se reposer,...que ce soit dans nos maisons, ou dans le mobilier urbain de nos villes.

I.14.6 Industrie

Rien de mieux que le composite pour protéger un mécanisme, un automatisme ou tout simplement éviter que les utilisateurs d'une machine ne se blesse.

I.14.7 Transport / Véhicules spéciaux

Véritable alternative à la voiture, le transport collectif connaît un incroyable essor : bus, tramway, trolleybus, tous sont constitué de composite, tant dans leur aménagement intérieur, que pour leur carrosserie. Il en va de même pour tous les véhicules carrossés, comme les camions de pompier, les véhicules d'intervention ou les ambulances : ils utilisent tous le composite.

I.15 conclusion

Ce chapitre a fait l'objet de généralités sur les matériaux composites, leurs propriétés physiques et mécaniques, le mode de fabrication des pièces en matériaux composites tel que le moulage, leur utilisation dans le secteur industriel tel que l'automobile, le sport et l'aéronautique...etc.

Par ailleurs, nous avons décrit les différents types de matériaux et résines les plus utilisées dans l'industrie.

I.17 Références bibliographiques

- [1] Bourouis FAIROUZ, Etude du comportement mécanique des structures sandwich à différents matériaux de revêtements. Mémoire de magistère, Université de Constantine, 2010.
- [2] Sofiane CHORFI. Analyse des plaques orthotropes minces sous l'effet des conditions extérieures, Mémoire de Magistère, Université de Mentouri Constantine, Mai 2010.
- [3] Paolo VANNUCCI. Méthodes Avancées en Optimisation des Structures. Université de Versailles et Saint Quentin-en-Yvelines, A.U. 2005-06.
<http://paolo.vannucci.free.fr/2012/Downloads.html>
- [4] Daniel, I.M. and Ori Ishai, Engineering Mechanics of Composite Materials, Word University Press Inc, 1994.
- [5] Jamel eddine Arbaoui, étude comparative et caractérisations mécaniques des structures sandwichs multicouches-thèse-Metz-2009
- [6] «Glossaire des matériaux composites» - carma –Actualisation octobre 2006.
- [7] Louis Berreur, Bertrand de maillard, L'industrie française des matériaux composites NODAL consultants-DIGITIP/SIM-2002
- [8] Lionel Gendre, matériaux composites et structures composites - université paris-SACLAY CACHAN-2011.
- [9] Anh Dung Ngo-matériaux composites –cours SYS857-A2013
- [10] modélisation numérique du procédé de tissage des renforts fibreux par matériaux Composites –Jérôme Vilfayeau-INSA-LYON-Français 2014.
- [11] Laurent Gornet, Généralité sur les matériaux composites-ECN-Centrale Nantes-2008
- [12] Dumont F., Contribution à l'expérimentation et à la modélisation du comportement mécanique de renforts de composites tissés, Université Paris VI, 2003
- [13] S. V. Lomov, "Full-field strain measurements in textile deformability studies," Compos. Part A Appl. Sci. Manuf., vol. 39, no. 8, pp.1232–1244, Aug. 2008.

Chapitre II

La théorie classique des stratifiés

II.1 Introduction

L'utilisation des plaques stratifiées composites a connu un grand développement durant ces dernières années, surtout dans les domaines civils là où l'on recherche à améliorer la qualité de la matière face à une certaine utilisation (légèreté, rigidité à un effort, etc.). Une plaque composite utilisée comme élément structural est souvent soumise à différents types de sollicitation telle que traction ou compression. Nous allons présenter ici une bibliographie générale non détaillée concernant l'étude du comportement des plaques isotropes et composites.

D'une manière générale, une plaque est un solide limité par deux plans parallèles, dont la dimension transverse est petite en comparaison des deux autres dimensions (longueur, largeur). Les propriétés d'une plaque dépendent, en grande partie, de son épaisseur en fonction de ses autres dimensions. Nous distinguerons deux sortes de plaques :

Les plaques minces,

Les plaques épaisses.

On appelle h l'épaisseur de la plaque ; le plan inférieur est donc le plan $z = -h/2$ et le plan supérieur est le plan $z = h/2$.

Dans ce chapitre, nous allons procéder à l'étude théorique en utilisant la théorie des plaques minces, ou la théorie classique des stratifiés pour exprimer les résultantes $i_j(N)$ et les moments $i_j(M)$ en fonction des déplacements de la plaque, lorsque cette dernière est constituée d'un matériau composite stratifié.

Premièrement, nous allons écrire dans le repère global la loi de comportement d'un pli composite afin de relier le champ des contraintes au champ des déformations.

Ensuite, les résultantes et les moments seront exprimés en tenant compte du comportement mécanique des différents plis composites.

II.2 Stratifiés

Matériaux composant le stratifié : ils sont orthotropes et connus grâce aux constantes de l'ingénieur dans les directions d'orthotropes de la couche. E_1, E_2, ν_{12} Et G_{12} . Aux caractéristiques de résistance de chaque pli X_c, X_t, Y_c, Y_t, S . aux coefficients de dilatation thermique et d'absorption d'eau dans les deux directions d'orthotrope. $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$. et à leur épaisseur h_0 .

Une alternative est celle de donner directement les composantes tensorielles du tenseur de la rigidité $Q, Q_{11}, Q_{12}, Q_{22}$. Et Q_{66} : dans ce cas l'étape de calcul du tenseur Q à partir des constantes de l'ingénieur n'est évidemment pas nécessaire.

Action mécaniques : elles sont données en spécifiant dans les axes du stratifié le tenseur N et M des actions de membrane et de flexion

Action thermiques : elles sont données en spécifiant la variation de température par rapport a un état sans contraintes et la variation de température Δt entre la surface supérieure et l'inférieure du stratifié.

Action hygroscopique : elles sont données en spécifiant le pourcentage d'eau m absorbée par rapport a l'état de fabrication du stratifié.

Les stratifiés résultent de la superposition de plusieurs couches ou plis, qui peuvent être des nappes unidirectionnelles, de tissus ou des mats, imprégnés de résine. Chaque couche peut avoir une orientation propre. Cette opération permet de créer des plaques dont les caractéristiques mécaniques, de rigidité et résistance, peuvent être l'objet de la conception

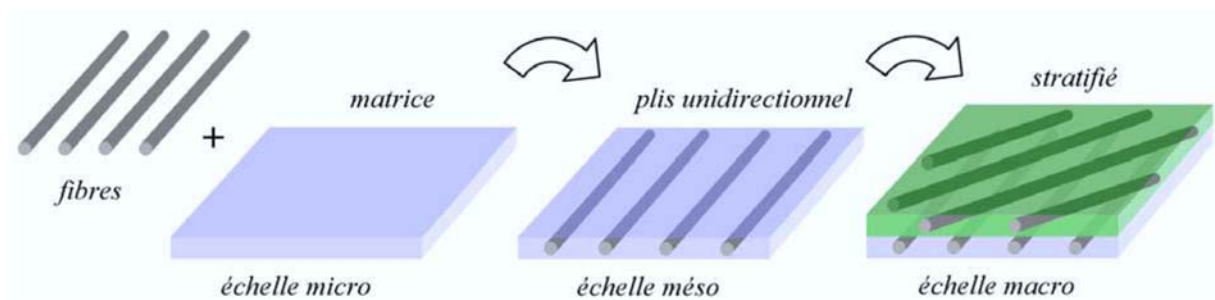


Fig. II.1 : Les constituants d'un composite stratifié.

Ces structures stratifiées sont constituées de couches unidirectionnelles avec des fibres orientées de façon différente d'une couche à l'autre, afin d'obtenir les propriétés mécaniques souhaitées pour la structure finale.

L'épaisseur d'une couche dépend de son grammage. L'épaisseur de chacune des couches est généralement très faible. Chaque couche est formée de fibres de faible section (d'environ 10 à 20 μm de diamètre), imprégnées de résine.

L'interface entre les couches est une entité surfacique assurant le transfert des déplacements et des contraintes normales d'une couche à une autre. En élasticité, les couches sont parfaitement liées et l'interface ne joue aucun rôle particulier.

Toutefois, Le décollement de deux plis, nommé délaminage, constitue le point faible majeur de ce type de matériaux et explique leur faible tenue à l'impact et plus généralement aux

sollicitations hors-plan (directes ou induites) [1][2].

La rigidité d'un stratifié est conditionnée par le nombre et l'empilement des couches, leur nature, leur orientation, leur séquence d'empilement, etc.

La séquence d'empilement du stratifié, désigne le nombre et l'orientation des couches successives en parcourant le stratifié d'une face à l'autre. Ainsi, un stratifié est dit unidirectionnel si, l'angle entre deux couches consécutives est nul, c'est-à-dire, toutes les fibres sont alignées selon une seule direction.

Les stratifiés unidirectionnels caractérisent par une rigidité très élevée (nombre maximum des fibres dans une direction). Par contre, un stratifié est multidirectionnel si les couches successives, sont orientées les unes par rapport aux autres à des angles autres que 0° [3].

II. 3 Désignation des structures stratifiées

Chaque couche est désignée par un nombre indiquant la valeur en degré de l'angle que fait la direction des fibres avec l'axe de référence x. les couches sont représentées décalées les unes par rapport aux autres. La structure stratifiée est décrite de bas en haut.

Les couches sont nommées successivement entre crochet en allant de la face inférieure à la face supérieure. Les couches successives sont séparées par le symbole « / » comme l'exemple de la fig. II.2 (a) : $[30/90/-45/0/45]$;

Les couches successives d'un même matériau et de même orientation sont désignées par un indice numérique, comme l'exemple de la fig. II.2 (b) : $[30/90_2/45/0/45]$;

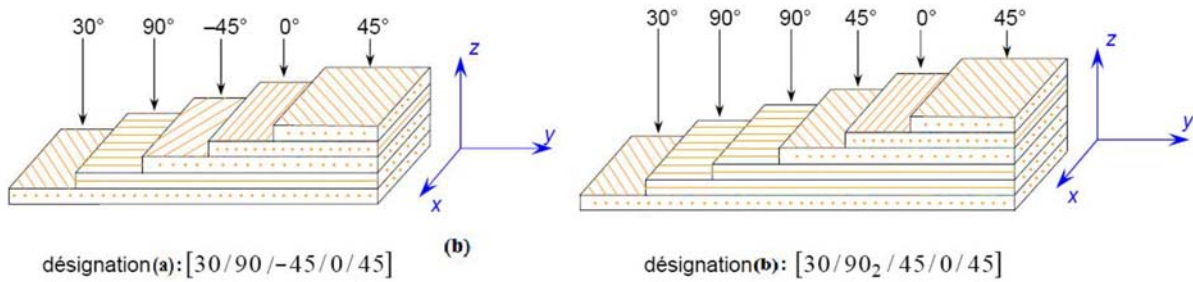


Fig. II.2: Désignation d'un stratifié.

Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des stratifiés de type :

II.3.1 Stratifiés symétriques

Un stratifié est symétrique si son plan moyen est plan de symétrie. Sa désignation ne nécessite alors que la moitié des couches successives.

Si le stratifié a un nombre pair de couches, la désignation débute sur une face pour finir au plan de symétrie. Un indice S indique que le stratifié est symétrique.

Si le stratifié comporte un nombre impair de couches, la désignation est semblable à la précédente, la couche centrale étant surlignée

II.3.2 Stratifiés hybrides

Les stratifiés hybrides sont constitués de couches successives comportant des fibres de natures différentes. Il sera alors nécessaire de les mentionner dans la désignation

II.3.3 Intérêt de l'orientation des fibres sur la déformation

L'orientation de la fibre est choisie de façon adaptable avec les directions d'efforts.

Les fibres sont disposées de sorte qu'elles résistent aux efforts de traction et de compression. Pour résister aussi à l'effet de cisaillement, on met deux fibres orthogonales de façon à ce que l'une d'elle supporte l'effet de compression ou traction et l'autre l'effet de cisaillement. En outre, il y a une influence de la forme de renfort sur la déformation. En effet, la raideur obtenue avec un renfort tissé sera moindre que celle que l'on observait en superposant deux directionnels croisés à 90°. Cela est dû à la courbure des fibres du fait de l'opération de tissage, qui rend le pli tissé plus déformable que les unidirectionnels croisés sous une même sollicitation [4][5].

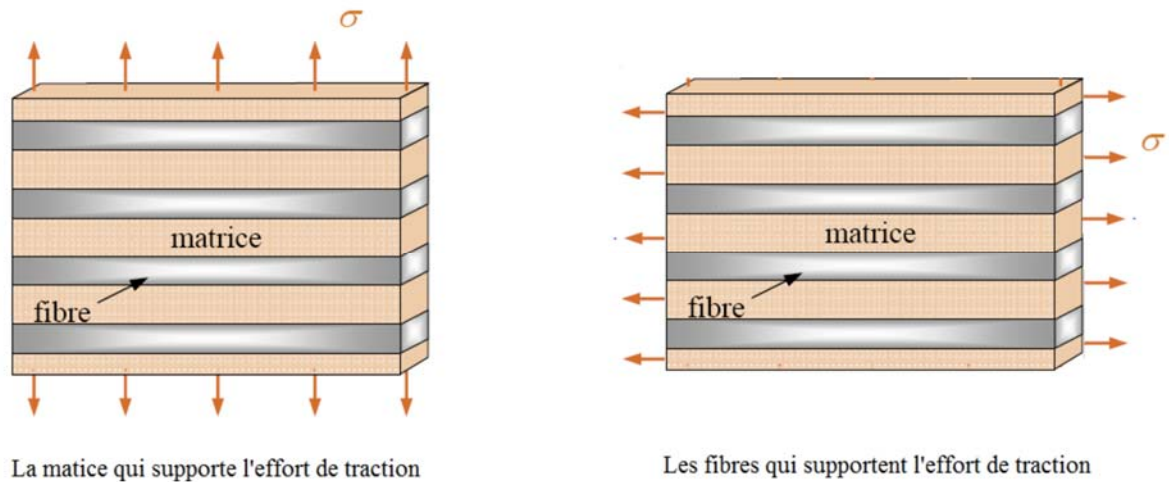


Fig. II.3 : L'influence de l'Orientation des fibres (Essai de traction).

II.4 Loi de comportement des stratifiés

Les matériaux composites sont souvent schématisés par un milieu continu homogène équivalent anisotrope. L'étude de leur comportement consiste à passer des propriétés des composantes et de la géométrie du composite. Cette étude comportera deux phases:

- L'étude du comportement mécanique de chaque pli,
- L'étude du comportement globale du matériau constitué de plusieurs plis, et désigné généralement par le comportement du stratifiés [6].

Historiquement, L'étude du comportement des plaques stratifiées composites est basée sur la théorie des stratifiés. Cette théorie utilise les mêmes hypothèses que la théorie générale des plaques qui sont, dans un schéma de premiers degrés, associées aux noms de Reissner/Mindlin et de Kirchhoff-Love. La théorie de Kirchhoff-Love est historiquement l'une des premières approches bidimensionnelles de la flexion des plaques élastiques. Elle est basée sur l'hypothèse de conservation des normales en négligeant ainsi le cisaillement transverse.

II.5 Caractéristiques du mélange renfort-matrice

Les principaux types de matériaux composites utilisés pour la fabrication de systèmes structuraux sont ceux formés par une phase discontinue, appelée renfort, insérée dans une phase solide, appelée matrice. La distribution et l'interaction, physique et chimique, entre les deux phases donne les propriétés mécaniques finales du matériau composite.

En général, les composites structuraux sont présentés sous la forme d'un empilage de plusieurs plis, chacun présentant des fibres orientées selon une direction préférentielle.

L'ensemble matrice-fibres forme le pli, l'ensemble de plis orientées forme le stratifié [7].

Les propriétés mécaniques moyennes de chaque pli sont obtenues par la règle de mélange. Selon celle-ci, certaines propriétés du pli, telles que ses modules d'élasticité et sa densité, sont obtenus grâce à l'utilisation de la fraction volumique de fibres et de la matrice [8][9].

Pour cela, La première étape d'un calcul composite consiste à déterminer les caractéristiques mécaniques du matériau en fonction de celles de ses composants. Dans la plupart des cas, ces calculs se réduisent uniquement au calcul du module d'Young. Il existe divers modèles d'homogénéisations pour l'obtenir.

D'après Paolo [10], Soit un matériau composite de repère d'orthotrope (1, 2, 3), l'axe 1 ou l'axe longitudinal étant disposé conventionnellement selon la direction des fibres,

Les directions normales aux fibres dans le plan de la couche sont appelées directions transversales, Le composite est considéré comme étant isotrope transverse c'est-à-dire qu'il est isotrope dans le plan normal à la direction 1.

Le plan transverse est repéré par les deux directions équivalentes 2 et 3.

Le cas qui nous intéresse ici est celui d'une couche renforcée par des fibres unidirectionnelles uniformément distribuées dans le corps de la couche.

Soit une cellule élémentaire de fraction volumique $V = 1$ constituée de fibres et de matrice

II.6 Calcul des tenseurs du stratifié

On détaille dans ce paragraphe la façon dont on calcule les tenseurs caractéristiques de chaque couche qui serviront ensuite au calcul des tenseurs caractéristiques du stratifié.

Evidemment dans le cas très fréquent d'un stratifié composé de pli identiques.

Ce calcul ne se fait qu'une seule fois pour le pli de base

Tenseurs Q_k pour chaque couche k il faut calculer le tenseur de rigidité réduite dans les axes d'orthotrope de la couche :

$$Q_{11} = \frac{E}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad Q_{12} = \frac{\nu_{21} E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad .$$

$$Q_{66} = G_{12} \cdot \text{ Avec } \nu_{21} = \nu_{12} \frac{E_2}{E_1}$$

II.7 Calcul des tenseurs du stratifié (comportement en membrane et en flexion)

Calcule les tenseurs qui décrivent le comportement du stratifié en membrane et en flexion négligeant les actions thermiques et hygroscopiques

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ \delta \end{Bmatrix}$$

II.8 Matrice de rigidité

La matrice intervenant dans l'expression est la matrice de rigidité du stratifié, décrivant le comportement élastique macroscopique du stratifié au point $M_0(x, y) = M(x, y, 0)$.

La matrice A est la matrice de rigidité en membrane, D est la matrice de rigidité en flexion et B la matrice de couplage membrane-flexion-torsion.

Ce couplage existe même si les matériaux des couches sont isotropes. Il résulte de la structure en couches de matériaux de caractéristiques mécaniques différentes.

Le couplage est nul ($B = 0$), seulement dans le cas où le stratifié est symétrique. La symétrie implique une symétrie des propriétés des couches, de leurs cotes et de leurs orientations.

Divers couplages peuvent être observés et mis en évidence. Le couplage traction-cisaillement provient des termes A_{16} et A_{26} .

Le couplage membrane-flexion résulte des termes B_{11} , B_{12} et B_{22} , alors que le couplage membrane-torsion résulte des termes B_{16} et B_{26} . Enfin, le couplage flexion torsion résulte des coefficients D_{16} et D_{26}

II.9 Mise en équation d'un laminé

Pour des raisons de simplification il est commode de remplacer la matrice des rigidités par une matrice équivalente mettant en relation les contraintes et moments résultants (N, M) avec les déformations du plan moyen ε et les courbures de flexion

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix}$$

Les équations constitutives pour une plaque deviennent :

Les coefficients A_{ij} sont liés à la traction ou à la compression dans le plan les coefficients B_{ij} sont liés aux couplages et les coefficients D_{ij} sont liés à la flexion

- Contribution des différents paramètres
- Etirement ou compression du plan moyen ($\epsilon_x \epsilon_y$) cisaillement du plan moyen (γ_{xy})
flexion du laminé ($\delta_x \delta_y$) torsion du laminé (δ_{xy})

Cette expression matricielle va nous permettre d'exprimer plus simplement les relations entre les contraintes et les déformations dans le cas de hypothèse des contraintes planes (modélisation de contraintes de traction dans le plan du panneau composite) ou alors dans le cas de déformations de flexion

II.10 Source de simplification

Les coefficients B_{ij} sont nuls dès lors que le laminé est constitué de plis qui sont symétriquement identiques par rapport au plan moyen. Les coefficients D_{16} et D_{26} s'annulent si le laminé est entièrement composé de plis à 0 ou 90°. de même ces deux coefficients peuvent s'annuler (la somme des termes s'annulent) si pour chaque pli θ le laminé possède un équivalent (par rapport au plan moyen) par le biais d'un pli $-\theta$.

Ceci implique dans ce cas de figure que le laminé n'est plus symétrique et par conséquent implique dans ce cas de figure que le laminé n'est plus symétrique et par conséquent $B_{ij} \neq 0$.

Tenseurs A, B et D : ces tenseurs sont donnés par $A = \sum_{k=1}^n Q_k (\theta_k) (z_k - z_{k-1})$; $B = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n Q_k (\theta_k) (z_k^2 - z_{k-1}^2)$;

$$D = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n Q_k (\theta_k) (z_k^3 - z_{k-1}^3) .$$

Ici θ_k est l'angle dont l'axe x_1 du pli n^0_k est tourné par rapport à l'axe x du stratifié comme en figure .

il est impératif d'exprimer les différents tenseurs Q_k dans le même repère celui de la plaque $\{x, y, z\}$.

Alors les formules de changement de repère si $c = \cos \theta_k$ et $s = \sin \theta_k$

$$Q'_k = \begin{bmatrix} Q'_{11} & Q'_{12} & Q'_{16} \\ Q'_{12} & Q'_{22} & Q'_{26} \\ Q'_{16} & Q'_{26} & Q'_{66} \end{bmatrix}$$

$$Q'_{11} = Q_{11} \cos^4 \theta + Q_{22} \sin^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta$$

$$Q'_{12} = (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta + Q_{12} (\cos^4 \theta + \sin^4 \theta)$$

$$Q'_{22} = Q_{11} \sin^4 \theta + Q_{22} \cos^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta$$

$$Q'_{16} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \cos^3 \theta \sin \theta - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66}) \cos \theta \sin^3 \theta$$

$$Q'_{26} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \cos \theta \sin^3 \theta - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66}) \cos^3 \theta \sin \theta$$

$$Q'_{66} = (Q_{11} + Q_{12} - 2Q_{12} - 2Q_{66}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta + Q_{66} (\cos^4 \theta + \sin^4 \theta)$$

$$\begin{bmatrix} Q'_{11} \\ Q'_{16} \\ Q'_{12} \\ Q'_{66} \\ Q'_{26} \\ Q'_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c^4 & 2s^2c^2 & 4s^2c^2 & s^4 \\ sc^3 & s^3c - sc^3 & 2(s^3c - sc^3) & -s^3c \\ s^2c^2 & c^4 + s^4 & -4s^2c^2 & s^2c^2 \\ s^2c^2 & -2s^2c^2 & c^4 + s^4 - 2s^2c^2 & s^2c^2 \\ s^3c & sc^3 - s^3c & 2(sc^3 - s^3c) & -sc^3 \\ s^4 & 2s^2c^2 & 4s^2c^2 & c^4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Q_{11} \\ Q_{12} \\ Q_{66} \\ Q_{22} \end{Bmatrix}$$

$$Q'_k = Q_k(\theta_k)$$

Si les plis sont identiques les formules sont plus simples en numérotant les couches selon le

Schéma de figure on obtient :

$$A = \frac{h}{n} \sum_{k=1}^n Q(\theta_k) \cdot \quad B = \frac{1}{2} \frac{h^2}{n^2} \sum_{k=1}^n b_k Q(\theta_k) \cdot \quad D = \frac{1}{3} \frac{h^3}{n^3} \sum_{k=1}^n d_k Q(\theta_k)$$

Avec

$$b_k = 2k - n - 1. \quad d_k = \frac{1}{4} [12K(K - n - 1) + 4 + 3n(n + 2)]$$

A remarquer que les coefficients b_k sont antisymétriques par rapport au plan moyen et les d_k symétriques.

La déformée de la normale au plan moyen (Oxy) est alors un segment de droite normal à la déformée du plan moyen.

L'ensemble des notations, utilisées dans le cas du schéma de la théorie classique des stratifiés, est schématisé sur la fig. II.4.

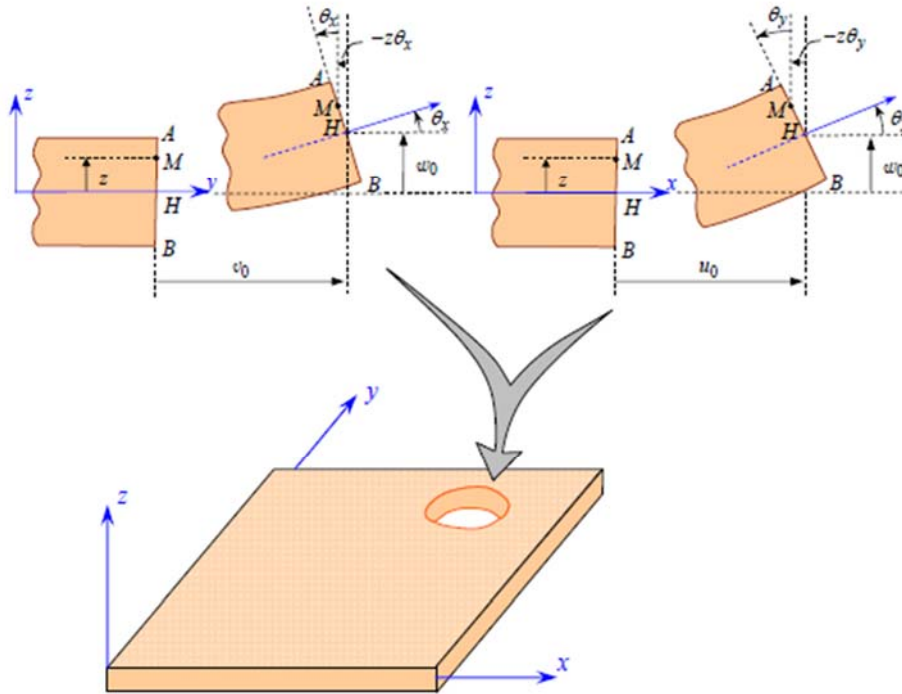


Fig. II.4 : Schématisation des déformations dans le cas de la théorie classique des stratifiés

II.11 Expression du champ des déformations

Le champ des déformations s'écrit:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \end{aligned}$$

$$\varepsilon_{zz}=0$$

$$\gamma_{yz}=0$$

$$\gamma_{xz}=0$$

$$\gamma_{xy} = \left(\frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \right) - 2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y}$$

Le tenseur des déformations en un point M est :

$$\varepsilon(M) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & 0 \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

Et la matrice des déformations se réduit à trois composantes non nulles :

$$\varepsilon(M) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}.$$

Le champ des déformations est la superposition : des déformations en membrane :

$$\varepsilon_m(M) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{bmatrix},$$

S'exprimant exclusivement en fonction des déplacements (u_0, v_0) dans le plan (Oxy) des points de ce plan ; des déformations en flexion et torsion :

$$\varepsilon_f(M) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^f \\ \varepsilon_{yy}^f \\ \gamma_{xy}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ -z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ -2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{bmatrix},$$

S'exprimant en fonction des angles de rotation de la déformée du plan moyen et de la cote z du point M . Généralement, les déformations en flexion et torsion s'expriment suivant la relation :

$$\varepsilon_f(M) = zk(x; y)$$

En posant :

$$\kappa(x, y) = \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ -2\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{bmatrix}.$$

La matrice $\kappa(x, y)$ est appelée matrice des courbures de la plaque sollicitée en flexion.

Les angles de rotation de la déformée du plan moyen au point $H(x, y, 0)$ s'expriment en fonction du déplacement transversal $w_0(x, y)$ de ce point par :

$$\theta_x = \frac{\partial w_0}{\partial y} \quad \text{suivant la direction } \vec{i}$$

$$\theta_y = \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad \text{suivant la direction } \vec{j}$$

Le champ des déplacements s'écrit alors :

$$u(x, y, z) = u_0(x, y) - z\theta_y,$$

$$v(x, y, z) = v_0(x, y) - z\theta_x,$$

$$w(x, y, z) = w_0(x, y).$$

Finalement, le champ des déformations s'écrit :

$$\varepsilon(M) = \varepsilon_m(M) + \varepsilon_f(M),$$

Ou

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix},$$

Avec

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx}^0 &= \frac{\partial u_0}{\partial x}(x, y), & \varepsilon_{yy}^0 &= \frac{\partial v_0}{\partial y}(x, y), & \gamma_{xy}^0 &= \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x}, \\ \kappa_x &= -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}(x, y), & \kappa_y &= -\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2}(x, y), & \kappa_{xy} &= -2\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y}(x, y). \end{aligned}$$

Sous forme abrégée, le champ des déformations s'écrit donc :

$$\boldsymbol{\varepsilon}(M) = \boldsymbol{\varepsilon}(x, y, z) = \boldsymbol{\varepsilon}_m(x, y) + z \boldsymbol{\kappa}(x, y).$$

Les déformations en membrane $\boldsymbol{\varepsilon}_m(x, y)$ et courbures $\boldsymbol{\kappa}(x, y)$ ne dépendent que des coordonnées (x, y) du point H du plan moyen du stratifié.

II.12 champ des contraintes

II.12.1 forme du champ des contraintes

Le champ des contraintes est obtenu Dans le cadre de la théorie classique des stratifiés, nous obtenons, pour la couche k :

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= Q'_{11}\varepsilon_{xx} + Q'_{12}\varepsilon_{yy} + Q'_{16}\gamma_{xy}, \\ \sigma_{yy} &= Q'_{12}\varepsilon_{xx} + Q'_{22}\varepsilon_{yy} + Q'_{26}\gamma_{xy}, \\ \sigma_{xy} &= Q'_{16}\varepsilon_{xx} + Q'_{26}\varepsilon_{yy} + Q'_{66}\gamma_{xy}, \\ \sigma_{yz} &= 0, \\ \sigma_{xz} &= 0. \end{aligned}$$

Le tenseur des contraintes en M est donc de la forme :

$$\boldsymbol{\sigma}(M) = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & 0 \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Le champ des contraintes se réduit aux seules contraintes en membrane : σ_{xx} , σ_{yy} et σ_{xy} .

II.12.2 Expression des contraintes

Les relations précédents montrent que les contraintes dans la couche k s'expriment suivant :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}_k = Q'_k \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}$$

Avec :

$$Q'_k = \begin{bmatrix} Q'_{11} & Q'_{12} & Q'_{16} \\ Q'_{12} & Q'_{22} & Q'_{26} \\ Q'_{16} & Q'_{26} & Q'_{66} \end{bmatrix}_k$$

Où Q_k est la matrice de rigidité réduite de la couche k introduite et dont les termes sont exprimés en fonction des modules par les relations.

Les contraintes dans la couche k s'expriment suivant :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} Q'_{11} & Q'_{12} & Q'_{16} \\ Q'_{12} & Q'_{22} & Q'_{26} \\ Q'_{16} & Q'_{26} & Q'_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} Q'_{11} & Q'_{12} & Q'_{16} \\ Q'_{12} & Q'_{22} & Q'_{26} \\ Q'_{16} & Q'_{26} & Q'_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix},$$

Ou :

$$\sigma_k(M) = \sigma_k(x, y, z) = Q'_k \varepsilon_m(x, y) + z Q'_k \kappa(x, y).$$

La matrice $\sigma_k(M)$ représente la matrice des contraintes dans la couche k : $h_{k-1} \leq z \leq h_k$.

La matrice de rigidité réduite Q_k varie d'une couche à l'autre.

Il en résulte donc une discontinuité du champ des contraintes entre couches successives.

II.13 Conclusion

Cette étude présente les technologies, les connaissances et méthodes nécessaires à la compréhension et au prédimensionnement des structures composites stratifiées. Ce domaine est marqué par une évolution constante des technologies.

Initialement plutôt réservé à l'aéronautique et au spatial, les soucis de performance ou d'allègement des structures font que l'utilisation des structures composites à fibres longues se généralise à de nombreux domaines : transports terrestres ou ferroviaire, naval, énergie (éolien en particulier). L'avenir des structures composites passe en particulier par une optimisation des coûts de fabrication *via* une automatisation plus poussée des procédés, par le développement de structures composites multifonctionnelles et par l'arrivée de fibres de carbone à bas coût et ce en intégrant la notion de recyclage.

II.15 Références bibliographiques :

- [1] Bourouis FAIROUZ, Etude du comportement mécanique des structures sandwich à différents matériaux de revêtements. Mémoire de magistère, Université de Constantine, 2010.
- [2] Sofiane CHORFI. Analyse des plaques orthotropes minces sous l'effet des conditions extérieures, Mémoire de Magistère, Université de Mentouri Constantine, Mai 2010.
- [3] Paolo VANNUCCI. Méthodes Avancées en Optimisation des Structures. Université de Versailles et Saint Quentin-en-Yvelines, A.U. 2005-06.
- [4] Daniel, I.M. and Ori Ishai, Engineering Mechanics of Composite Materials, Word Université Press Inc, 1994.
- [5] Berthelot J. M. Matériaux composites: Comportement mécanique et analyse des structures. 4ème édition, 2010.
- [6] Imen KALLEL-KAMOUN, Analyse mécanique de l'essai de flexion par flambement post-critique. Mémoire de Doctorat, Université de Sherbrooke (Canada), 30 Juin 1999.
- [7] Driss BENDJABALLAH. Analyse des plaques composites CARBONE/EPOXYDE sous l'effet des efforts de perçage. Mémoire de magistère, Université de Mentouri Constantine, 2009.
- [8] CHALAYE, H. Les Matériaux Composites: Dynamisme et Innovation. Le 4 Pages: des statistiques industrielles, DiGIPTIP: Ministère de l'Économie, des Finances et de l' Industrie. n.158. fev, 2002.
- [9] F. Laurin. Introduction générale sur les matériaux composites, le centre français de recherche aérospatiale (ONERA).

Chapitre III

Application numérique et simulation numérique

III.1 Principe

Nous avons faire une étude du comportement mécanique des plaques en matériaux composites stratifié entre l'analytique et numérique, on applique la théorie classique des stratifiés pour déterminer les paramètres des plaques stratifiés et on applique la simulation numérique pour modélisé plusieurs cas d'études pour établir une comparaison des résultats entre les contraintes et les déplacements.

III.2 Présentation des modèles

Notre choix est une étude d'un comportement mécanique des plaques en matériaux composites (verre/époxy), chaque plaque contient de 8 plis orientés,



Fig. III.1 : représente une plaque sans troue.

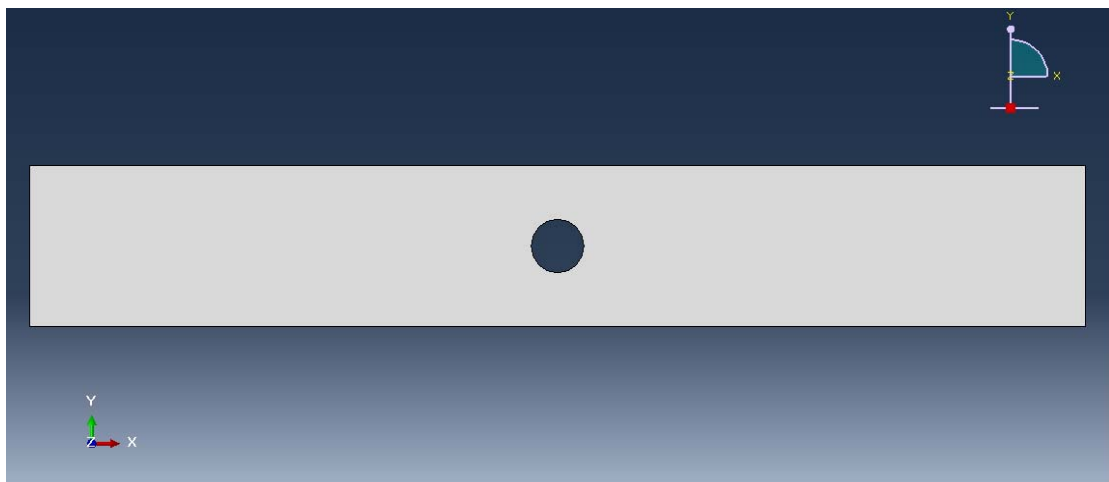


Fig. III.2 : représente une plaque avec un seul troue.

Nous avons modélisé deux plaques en matériaux composites, la première plaque avec un trou et l'autre plaque sans trou, nous avons basé sur les essais de traction avec une sollicitation de traction simple.

III.3 Cas d'étude

A travers ce chapitre nous allons présenter et interpréter les résultats obtenus à l'issue des simulations numériques menées sur le comportement mécanique des matériaux composites. Une étude numérique validée par des travaux disponibles dans la littérature est réalisée en utilisant le code ABAQUS.

Les résultats de la simulation en termes d'évolution des contraintes, des déformations et d'évolution des variables d'endommagement des différents spécimens sont présentés et discutés, sous forme des graphiques contrainte déformation et de cartographies.

III.4 Paramètre des matériaux

Tableau III.1 : les caractéristiques d'époxyde.

	Masse volumique (kg.m-3)	Module d'élasticité longitudinal (Mpa)	Module de cisaillement (Mpa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) Mpa	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique °C-1
	M_v	E	G	ν	S_r	A	a
Epoxyde	1200	4500	1600	0.4	130	2	$11 \cdot 10^{-5}$

Tableau III.2 : les caractéristiques du verre.

	Masse volumique (kg.m-3)	Module d'élasticité longitudinal (Mpa)	module de cisaillement (Mpa)	coefficient de poisson	contrainte de rupture (traction) Mpa	allongement a rupture %	coefficient de dilatation thermique °c-1
	M_v	E	G	ν	S_r	A	A
verre	2600	74000	30000	0.25	2500	3.5	$0.5 \cdot 10^{-5}$

III.5 Calcule la matrice de rigidité

D'après les propriétés d'homogénéisation dans les matériaux composites et grâce à la théorie des stratifiées et la loi de mélange, pour notre cas d'étude des plaques en composites stratifié (verre/époxy), qui peuvent être intégrées au model numérique.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix}$$

III.6 Organigramme de calcul de la matrice de rigidité (sous Matlab 7) :

On utiliser logiciel Matlab7 pour faire un programme qui calcul la matrice de rigidité [ABD].

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ \delta \end{Bmatrix}$$

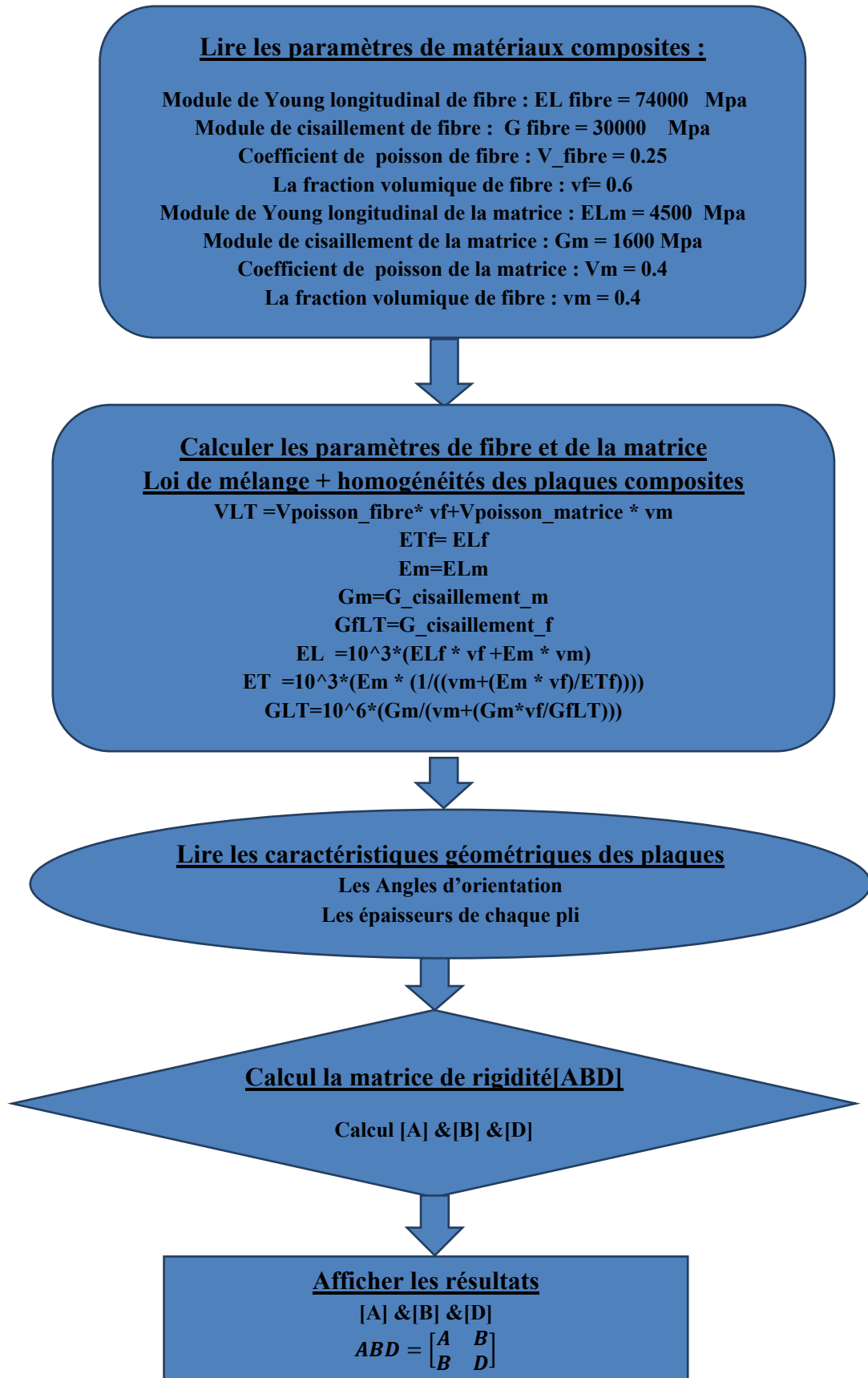


Fig. III.3 : Organigramme de calcul la matrice de rigidité (sous Matlab 7).

III.7 Organigramme de calcul les déplacements et tracer les graphes (sous Matlab 7)

On utilise logiciel Matlab7 pour faire un programme qui calcule les déplacements en fonction des contraintes (avec variation sur un intervalle donné).

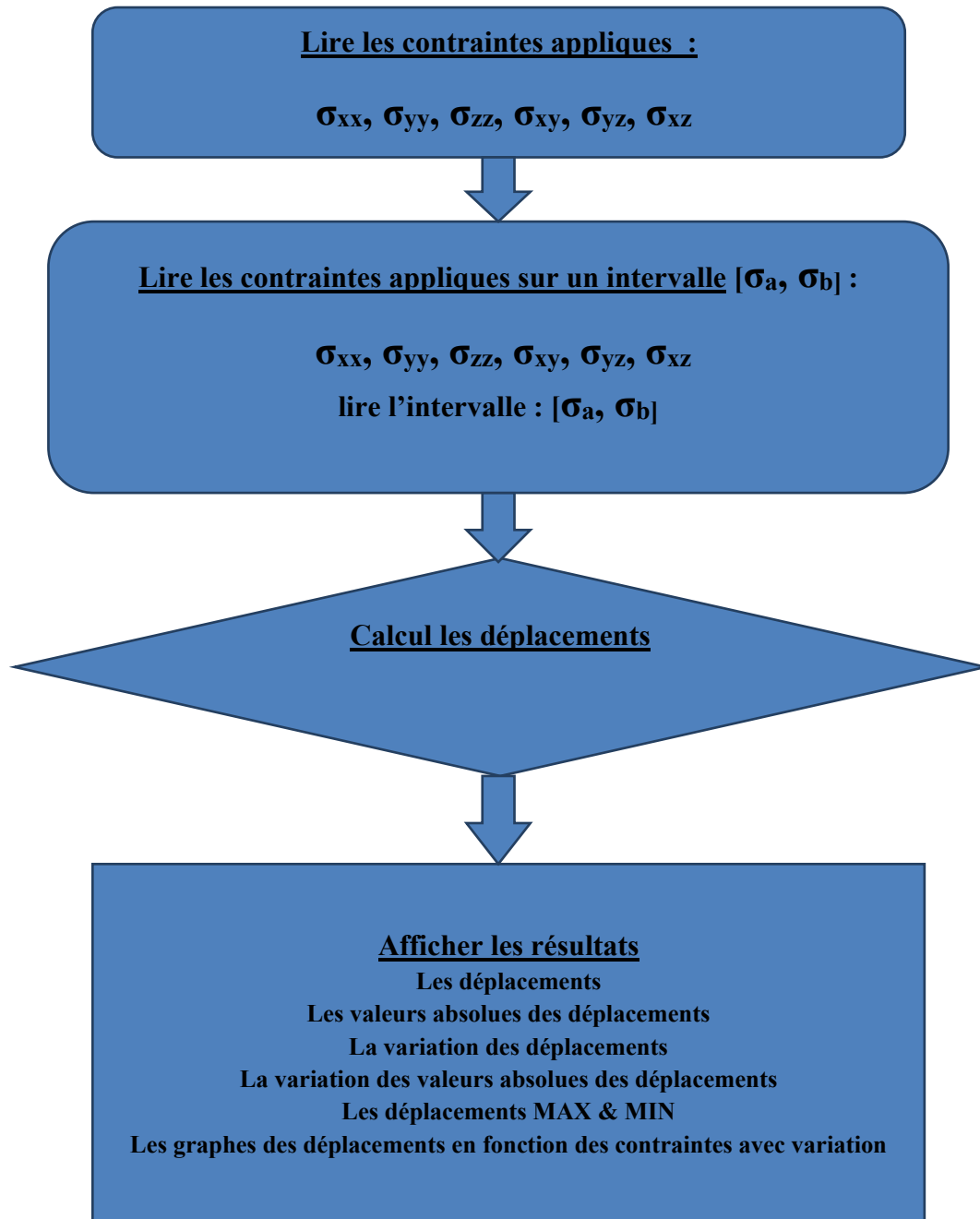


Fig.III.4 : Organigramme de calcul les déplacements et tracer les graphes (sous Matlab 7).

III.8 Les Résultats d'après le calcul

Matrice de rigidité de [0 45 15 0] s, l'épaisseur de chaque pli =0.25mm

ABD = 1.0e+009

2.3908	-2.3003	-0.7922	0.0000	-0.0000	0
-2.3003	2.3383	0.8060	-0.0000	-0.0000	0
-0.7922	0.8060	5.1006	0	0	-0.0000
0.0000	-0.0000	0	0.4814	-0.4496	-0.3147
-0.0000	-0.0000	0	-0.4496	0.4606	0.3179
0	0	-0.0000	-0.3147	0.3179	2.0174

III.8.1 Calcule les déplacements :

Pour : $\sigma_{xx}=80$ Mpa

$\sigma_{xx}=80$ Mpa

$\sigma_{yy}=0$ Mpa

$\sigma_{zz}=0$ Mpa

$\sigma_{yz}=0$ Mpa

$\sigma_{xz}=0$ Mpa

$\sigma_{xy}=0$ Mpa

La valeur absolue des déplacements :

$$\mu_{xx} = 0.6253 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

$$\mu_{yy} = 0.6151 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

$$\mu_{zz} = 0.0001 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

$$\mu_{yz} = 0.0000 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

$$\mu_{xz} = 0.0000 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

$$\mu_{xy} = 0.0000 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

Evaluer la contrainte en : o à 100 Mpa avec pas =10 Mpa, pour trouver les déplacements

2ème cas

Matrice de rigidité de [0 45 45 0] s, l'épaisseur de chaque pli =0.25mm

3.7670	-3.6844	0.0092	0.0000	-0.0000	0
-3.6844	3.7303	0.0092	-0.0000	0	0
0.0092	0.0092	3.7165	0	0	0
0.0000	-0.0000	0	1.0261	-0.9974	0.0025
-0.0000	0	0	-0.9974	1.0116	0.0025
0	0	0	0.0025	0.0025	1.4695

$\sigma_{xx} = 80 \text{ Mpa}$

La valeur absolue des déplacements :

$$\mu_{xx} = 0.6255 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

$$\mu_{yy} = 0.6178 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

$$\mu_{zz} = 0.0031 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

$$\mu_{yz} = 0.0000 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

$$\mu_{xz} = 0.0000 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

$$\mu_{xy} = 0.0000 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

3ème cas

Matrice de rigidité de [0 90 45 0] s, l'épaisseur de chaque pli =0.25mm

1.9124	-1.8389	0.0046	0.0000	-0.0000	0
-1.8389	1.8940	0.0046	-0.0000	0.0000	0
0.0046	0.0046	5.5620	0	0	0.0000
0.0000	-0.0000	0	0.7557	-0.7283	0.0018
-0.0000	0.0000	0	-0.7283	0.7438	0.0018
0	0	0.0000	0.0018	0.0018	1.7386

$$\sigma_{xx} = 80 \text{ Mpa}$$

La valeur absolue des déplacements :

$$\mu_{xx} = 0.6302 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

$$\mu_{yy} = 0.6119 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

$$\mu_{zz} = 0.0010 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

$$\mu_{yz} = 0.0000 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

$$\mu_{xz} = 0.0000 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

$$\mu_{xy} = 0.0000 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

4ème cas :

Matrice de rigidité de [0 60 45 0] s, l'épaisseur de chaque pli = 0.25mm

3.3010	-3.2230	0.8077	0.0000	-0.0000	0.0000
-3.2230	3.2735	-0.7905	-0.0000	0	0
0.8077	-0.7905	4.1779	0.0000	0	0
0.0000	-0.0000	0.0000	0.9582	-0.9302	0.1189
-0.0000	0	0	-0.9302	0.9450	-0.1141
0.0000	0	0	0.1189	-0.1141	1.5368

$$\sigma_{xx} = 80 \text{ Mpa}$$

La valeur absolue des déplacements :

$$\mu_{xx} = 0.6271 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

$$\mu_{yy} = 0.6163 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

$$\mu_{zz} = 0.0046 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

$$\mu_{yz} = 0.0000 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

$$\mu_{xz} = 0.0000 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

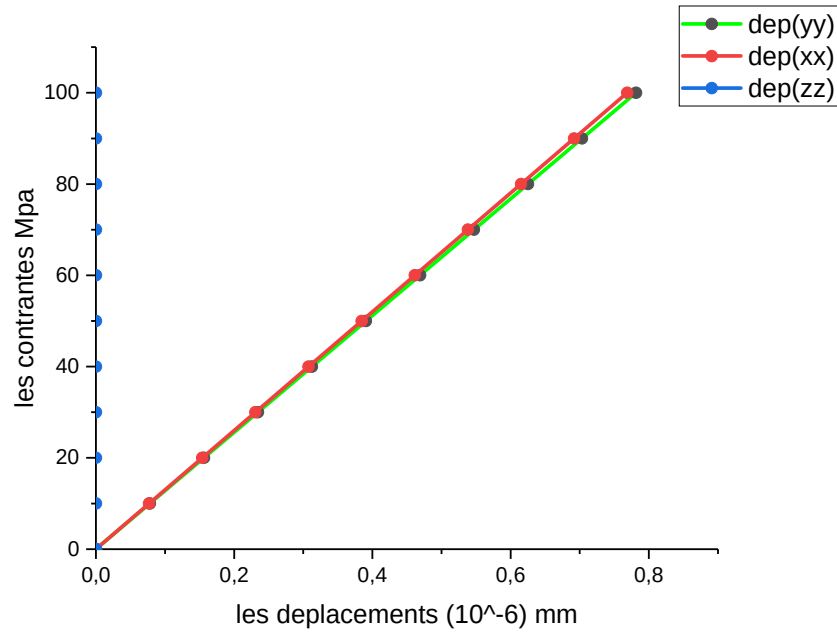
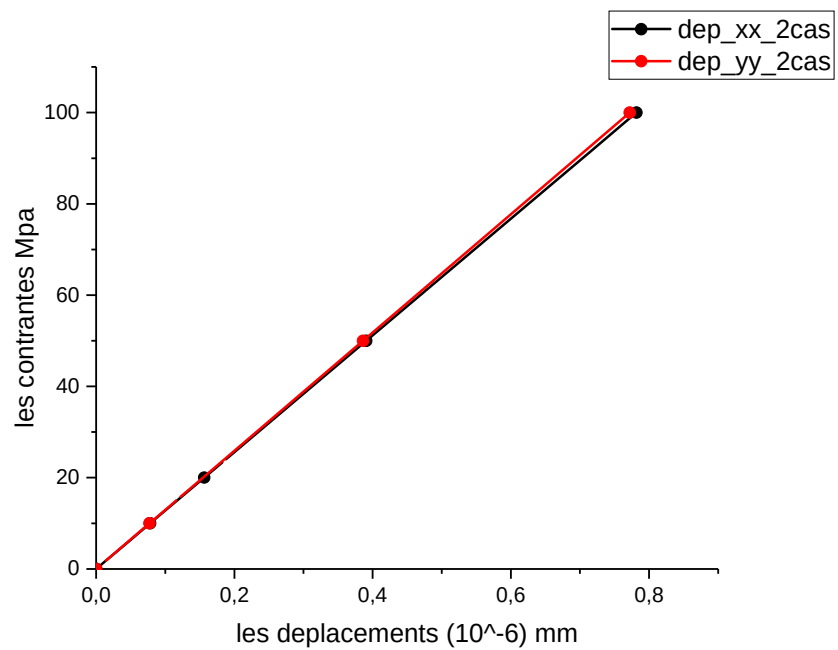
$$\mu_{xy} = 0.0000 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

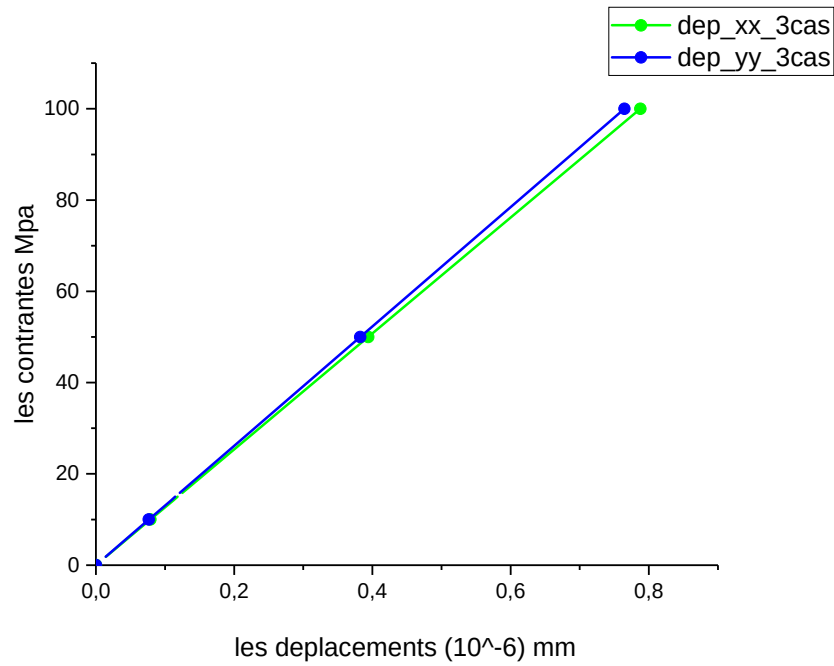
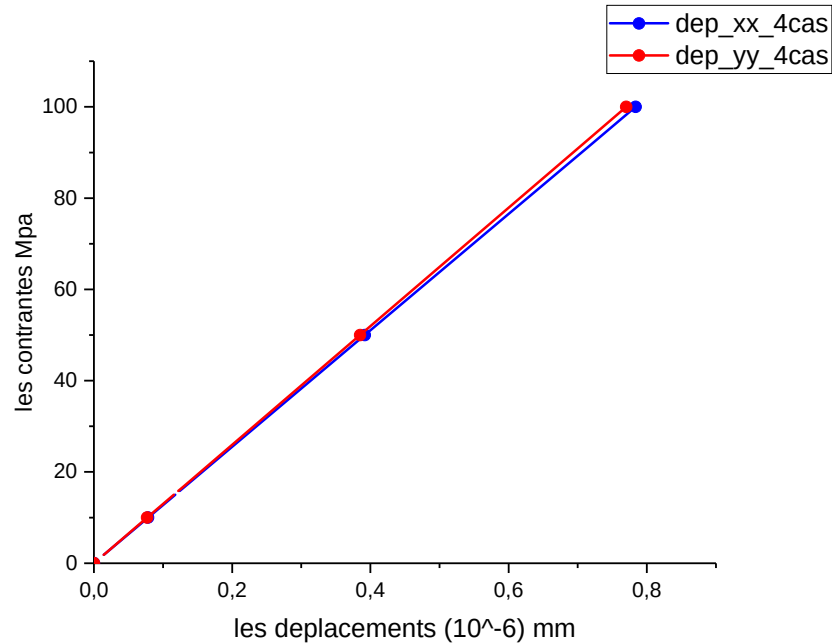
Tableau.III.3 : les résultats de chaque cas.

σ_{xx}	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1cas	$*10^{-7}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$
	0.7816	0.1563	0.2345	0.3126	0.3908	0.4690	0.5471	0.6253	0.7034	0.7816
	0.7689	0.1538	0.2307	0.3076	0.3845	0.4614	0.5383	0.6151	0.6920	0.7689
	-0.0001	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
2cas	$*10^{-7}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$
	0.7818	0.1564	0.2345	0.3127	0.3909	0.4691	0.5473	0.6255	0.7036	0.7818
	0.7722	0.1544	0.2317	0.3089	0.3861	0.4633	0.5405	0.6178	0.6950	0.7722
	-0.0038	-0.0008	-0.0012	-0.0015	-0.0019	-0.0023	-0.0027	-0.0031	-0.0035	-0.0038
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
3cas	$*10^{-7}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$
	0.7878	0.1576	0.2363	0.3151	0.3939	0.4727	0.5514	0.6302	0.7090	0.7878
	0.7648	0.1530	0.2295	0.3059	0.3824	0.4589	0.5354	0.6119	0.6884	0.7648
	-0.0013	-0.0003	-0.0004	-0.0005	-0.0006	-0.0008	-0.0009	-0.0010	-0.0012	-0.0013
	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4cas	$*10^{-7}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$	$*10^{-6}$
	0.7839	0.1568	0.2352	0.3136	0.3920	0.4703	0.5487	0.6271	0.7055	0.7839
	0.7704	0.1541	0.2311	0.3082	0.3852	0.4623	0.5393	0.6163	0.6934	0.7704
	-0.0058	-0.0012	-0.0017	-0.0023	-0.0029	-0.0035	-0.0040	-0.0046	-0.0052	-0.0058
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000

III.9 Les graphes d'après les résultats au tableau

Nous avons tracé les graphes suivants qui représentent les déplacements en fonction des contraintes pour chaque cas et avec un ensemble des déplacements pour voir bien les résultats.

**Fig.III.5 :** Les déplacements 1^{er} cas.**Fig.III.6 :** Les déplacements 2^{ème} cas.

**Fig.III.7 :** Les déplacements 3ème cas.**Fig.III.8 :** Les déplacements 4ème cas.

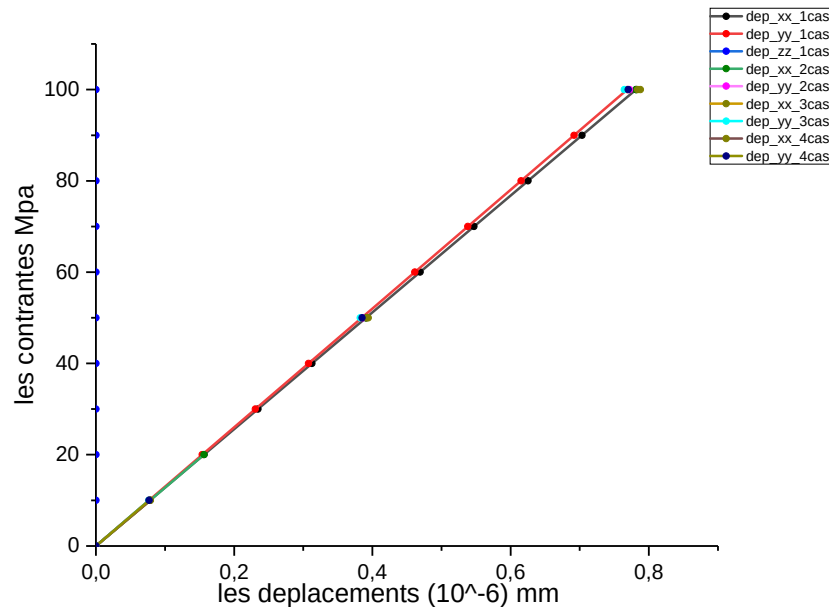


Fig.III.9 : Les déplacements 1^{er} & 2 & 3 & 4^{ème} cas.

III.10 Interprétation des résultats

Nous avons remarqué que tous les déplacements linéaire partent à l'origine puisque on a dans la zone élastique ainsi que pour les déplacements selon l'axe zz est nul (n'est pas des déplacements), puisque on a des déformations plan (x,o,y) si tous, et la même chose nous trouver à la simulation numérique.

III.11 La simulation numérique

III.11.1 Introduction

La simulation et l'analyse numérique sont devenues quasi nécessaires dans le domaine de la recherche, elles couvrent des places importantes dans les différents secteurs publics (constructeur automobile, aéronautique, spatial, génie civil) Vu qu'elles ont un impact direct sur la qualité et le temps, elles sont apparues dans le désir de minimiser le coût d'une étude avec un nombre d'essais optimisés.

La difficulté de la simulation numérique c'est de créer un modèle se rapprochant au maximum de la réalité (matériaux, condition aux limites), l'étude ne sera validée qu'à partir d'essais mécaniques entraînant des mesures pour la comparaison entre la réalité et la simulation. On

dispose actuellement d'une large gamme de logiciels qui constituent des alliés précieux pour le calcul et la conception optimale des structures dans le respect des réglementations techniques et normes de la construction, parmi ces logiciels basés sur la méthode des éléments finis le code de calcul ABAQUS [2].

Dans ce chapitre, nous allons présenter d'une part le logiciel ABAQUS et son fonctionnement,

III.12. Présentation du logiciel

ABAQUS est un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés en mécanique. Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants de problèmes non-linéaires. Il a été développé par Hibbit, Karlson & Sorensen (HKS) [1]. Depuis 30 ans, ABAQUS a été amélioré au fur et à mesure pour intégrer les nouveautés et répondre ainsi aux besoins en octobre 2005, l'entreprise a été rachetée par Dassault industries pour critiquer le package « SIMULIA ». [2]

Le module ABAQUS/CAE est une interface dans laquelle l'utilisateur peut définir toutes les propriétés de son analyse (géométrie des différentes pièces, propriétés mécaniques, choix des éléments, choix de l'intégration de la matrice de rigidité, choix du mode de résolution). Pour la résolution des analyses, il existe deux modules à savoir : ABAQUS/Standard et ABAQUS/Explicit. Le premier est un module utilisant des schémas de résolution implicite dits classiques pour des analyses statiques comme la méthode Newton-Raphson ou la méthode de Risks. Le second utilise une méthode de résolution explicite pour l'intégration temporelle des problèmes dynamiques. Elle permet notamment une meilleure prise en compte des problèmes à force de non linéarité matérielle est donc particulièrement adaptée pour les matériaux à comportement adoucissants

Fenêtre d'affichage graphique.

2. Barre de menu en haut, ces menus sont relatifs au module correspondant.
3. Barre horizontale d'outil, y sont disposées les icônes correspondant aux commandes les plus courantes, c'est-à-dire les commandes d'ouvertures et de sauvegarde de fichiers, et les commandes réglant l'affichage des vues (perspective, ombrage, zoom, etc.).
4. Une troisième barre de menus déroulant permettant d'accéder aux autres modules, ou de sélectionner le modèle ou la pièce sur lesquels on souhaite travailler.
5. On dispose à gauche d'une colonne d'icône permettant d'accéder aux outils disponibles à l'intérieur du module dans lequel on se trouve

6. L'espace juste sous la fenêtre d'affichage graphique correspond aux messages affichés par ABAQUS lors de la modélisation ; ils permettent d'être mieux guidés dans les actions entreprises.

7. Enfin, une fenêtre en dessous sur fond blanc est utilisée pour afficher des messages informatifs, réponses à des questions posées, avertissements liés à des problèmes rencontrés, etc.



Figure III.10 : Présentation de l'interface ABAQUS.

III.13 Démarches et étapes de simulation

La modélisation complète d'une structure ou d'un élément de structure s'effectue après un passage successif sur les neuf modules de ABAQUS à savoir : les modules part, property, assembly, step, interaction, load, mesh, job et visualisation).

ABAQUS ne gère pas les unités c'est à l'utilisateur d'utiliser un système d'unités cohérent.

III.14 Notre étude

Notre étude est de faire une expérience de traction simple sur des plaques en matériaux composites, réalisé par logiciel ABAQUS pour déterminer les contraintes et les déplacements.

L'objectif de cette étude est de faire une comparaison entre l'étude théorique et l'étude numérique.

III.15 Les étapes de la simulation

Les dimensions des plaques étudiées :

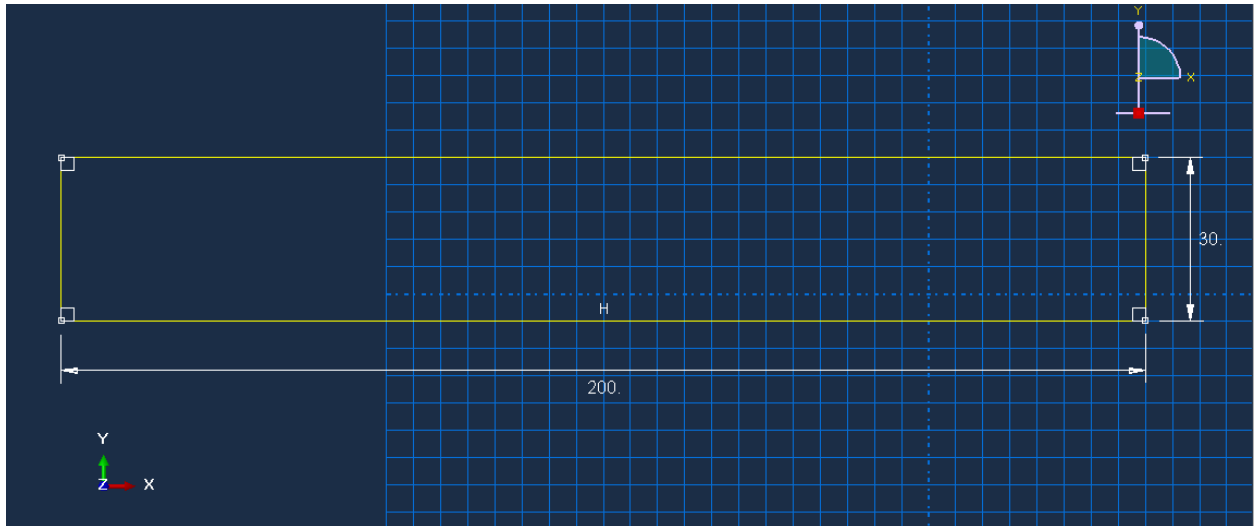


Fig.III.11 : les dimensions de la plaque.

La longueur est de 200 mm

Le largeur est de 30 mm

Le deuxième modèle est une plaque trouée au milieu, la section de troue est 10 mm.

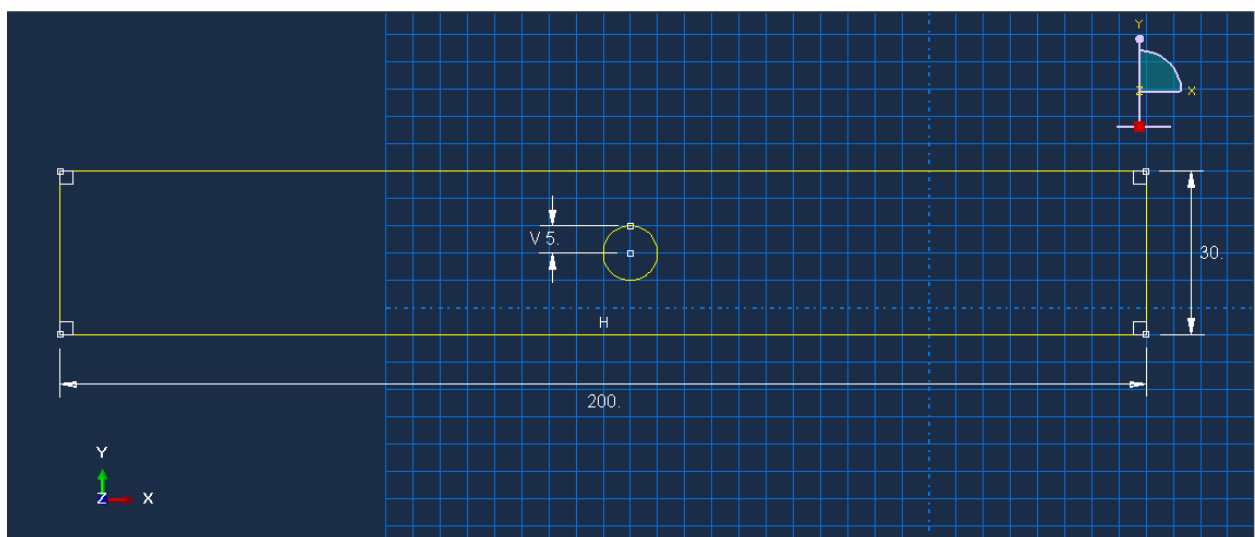


Fig. III.12 : la plaque avec un seul troue.

Condition aux limites :

Cette étude concerne a encastré chaque plaque sur une seul extrémité et de faire une opération de traction de l'autre extrémité avec un effort de 80 Mpa.

L'épaisseur de chaque pli =0.25mm

III.16 Les résultats de la simulation

Les déplacements selon xx (μ_{xx}) de la plaque simple

$$\mu_{xx} = 5.924 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$$

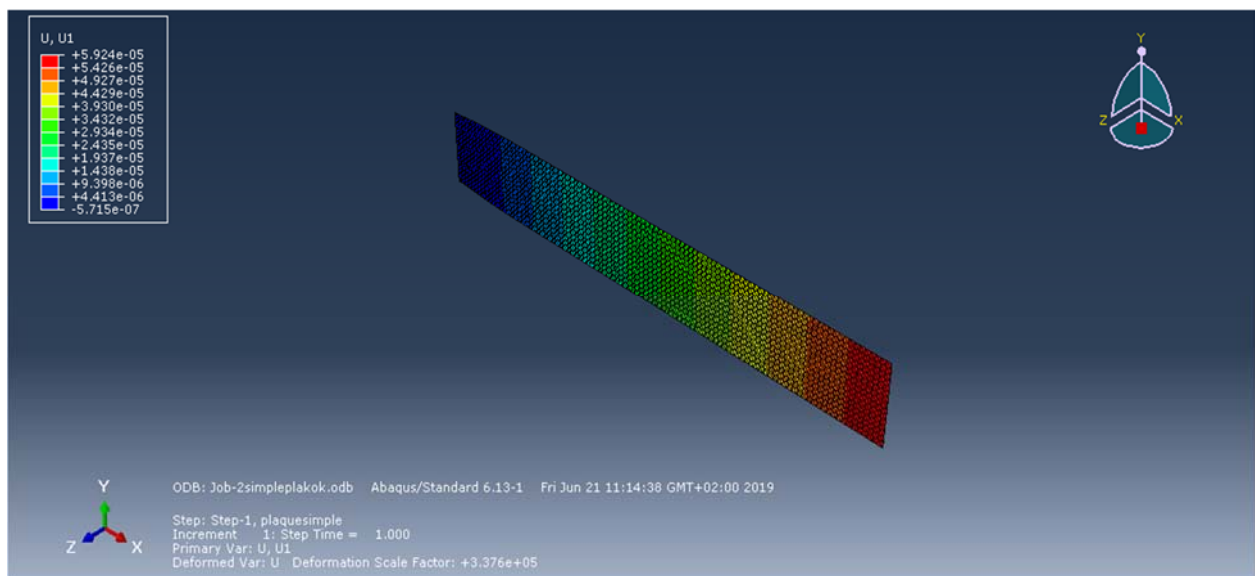


Fig. III.13 : résultat des déplacements selon μ_{xx} .

La valeur de déplacement Max $\mu_{xx} = -5.715 \cdot 10^{-7} \text{ mm}$

La valeur de déplacement Min $\mu_{xx} = 5.924 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$

Les déplacements selon yy (μ_{yy}) à la plaque simple

$$\mu_{yy} = 4.366 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

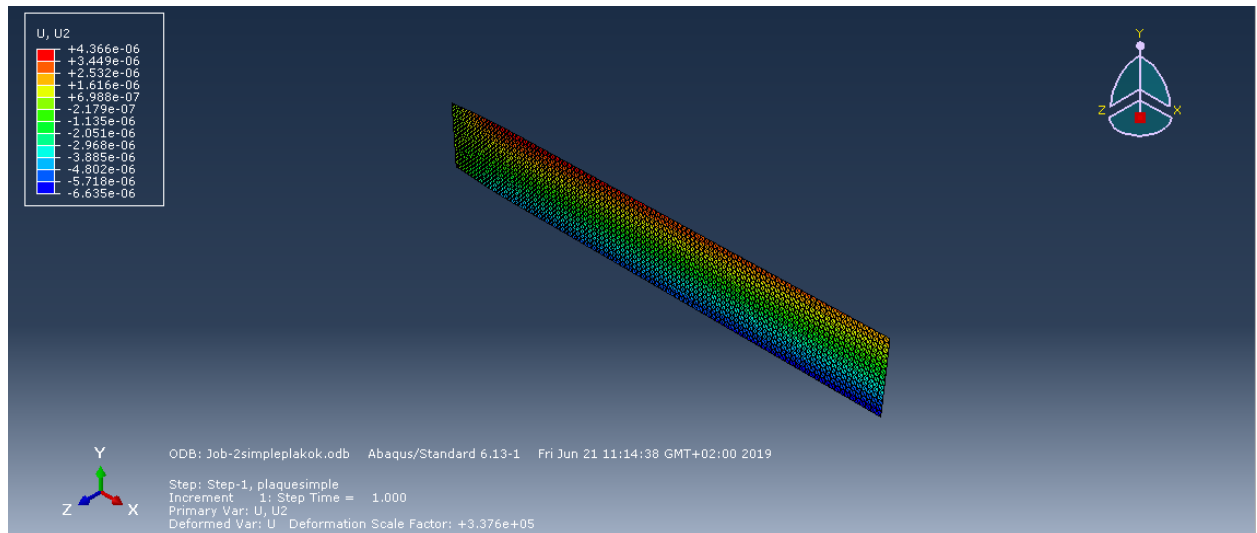


Fig.III.14 : les résultats des déplacements μ_{yy} .

La valeur de déplacement Max $\mu_{yy} = 4.366 \cdot 10^{-6}$ mm

La valeur de déplacement Min $\mu_{yy} = -6.635 \cdot 10^{-6}$ mm

Les déplacements selon zz (μ_{zz}) à la plaque simple

$$\mu_{zz} = 3.774 \cdot 10^{-15} \text{ mm}$$

La valeur de déplacement Max $\mu_{zz} = 3.774 \cdot 10^{-15}$ mm

La valeur de déplacement Min $\mu_{zz} = -1.051 \cdot 10^{-19}$ mm

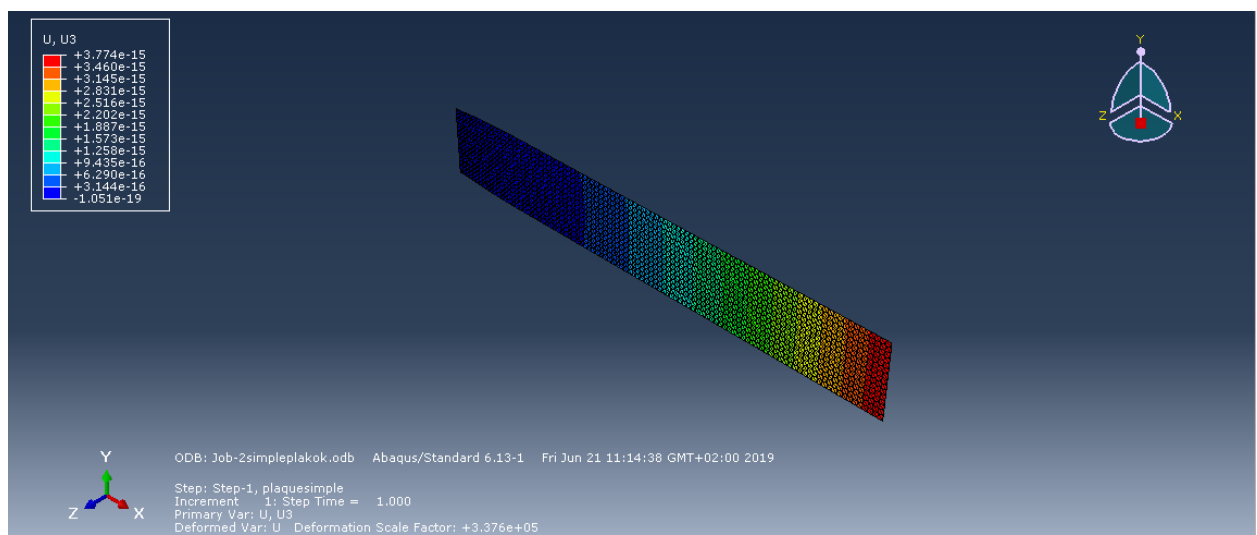


Fig.III.15 : les résultats des déplacements μ_{zz} .

La valeur de déplacement Max $\mu_{zz} = 3.774 \cdot 10^{-15}$ mm

La valeur de déplacement Min $\mu_{zz} = -1.051 \cdot 10^{-19}$ mm

Les contraintes σ_{xx} de la plaque simple

$$\sigma_{xx} = 1.632 \cdot 10^2$$

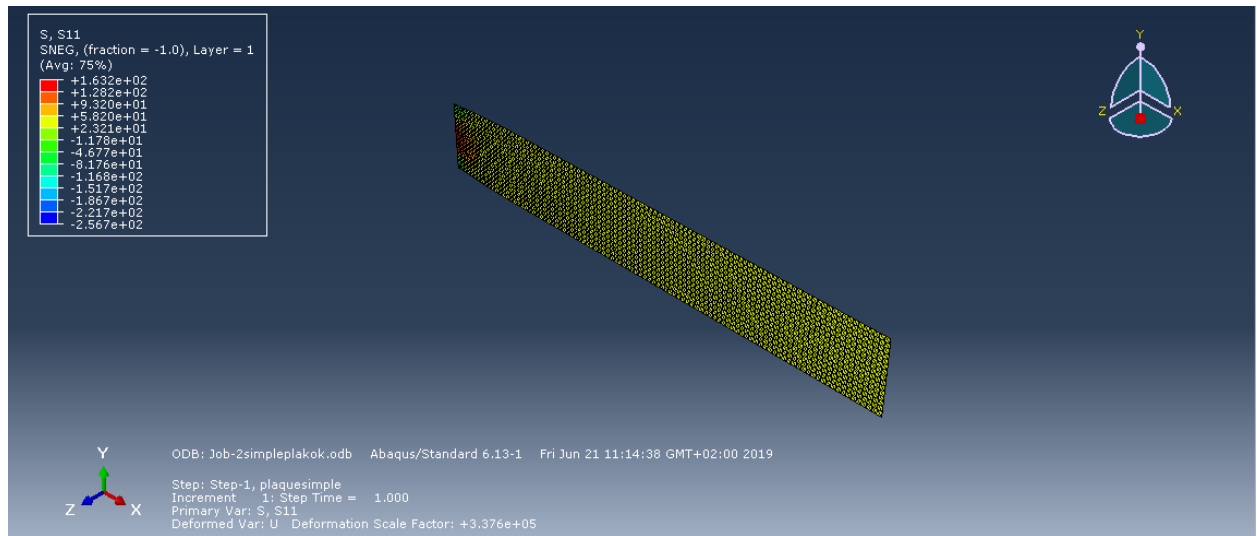


Fig.III.16 : les résultats des contraintes σ_{xx} .

La valeur de contrainte Max $\sigma_{xx} = 1.632 \cdot 10^2$ Mpa

La valeur de contrainte Min $\sigma_{xx} = -2.567 \cdot 10^2$ Mpa

Les contraintes σ_{yy} de la plaque simple

$$\sigma_{yy} = 2.462 \cdot 10^2 \text{ Mpa}$$

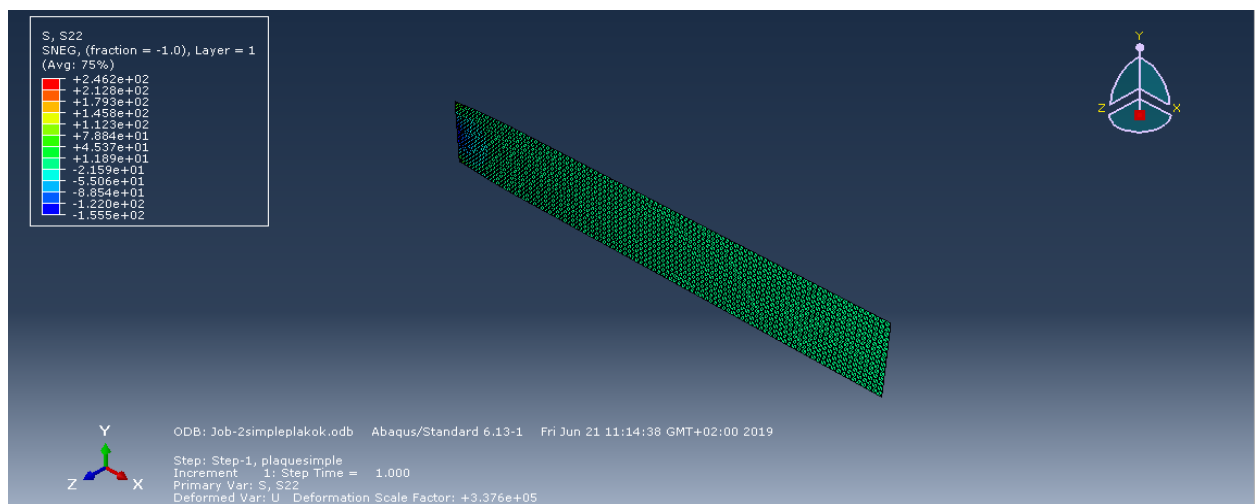


Fig.III.17 : les résultats des contraintes σ_{yy} .

La valeur de contrainte Max $\sigma_{yy} = 2.462 \cdot 10^2$ Mpa

La valeur de contrainte Min $\sigma_{yy} = -1.555 \cdot 10^2$ Mpa

Les contraintes σ_{xy} de la plaque simple

$$\sigma_{xy} = 4.444 \cdot 10^1 \text{ Mpa}$$

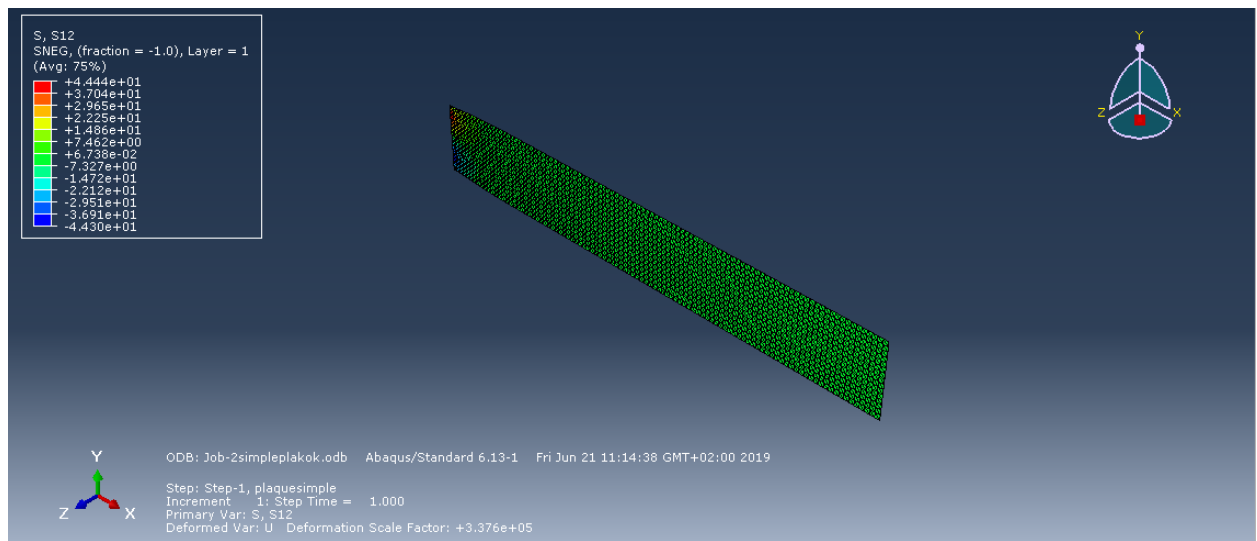


Fig.III.18 : les résultats des contraintes σ_{xy} .

La valeur de contrainte Max $\sigma_{xy} = 4.444 \cdot 10^1 \text{ Mpa}$

La valeur de contrainte Min $\sigma_{xy} = -4.430 \cdot 10^1 \text{ Mpa}$

Les déplacements selon xx (μ_{xx}) à la plaque avec un seul trou.

$$\mu_{xx} = 1.212 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$$

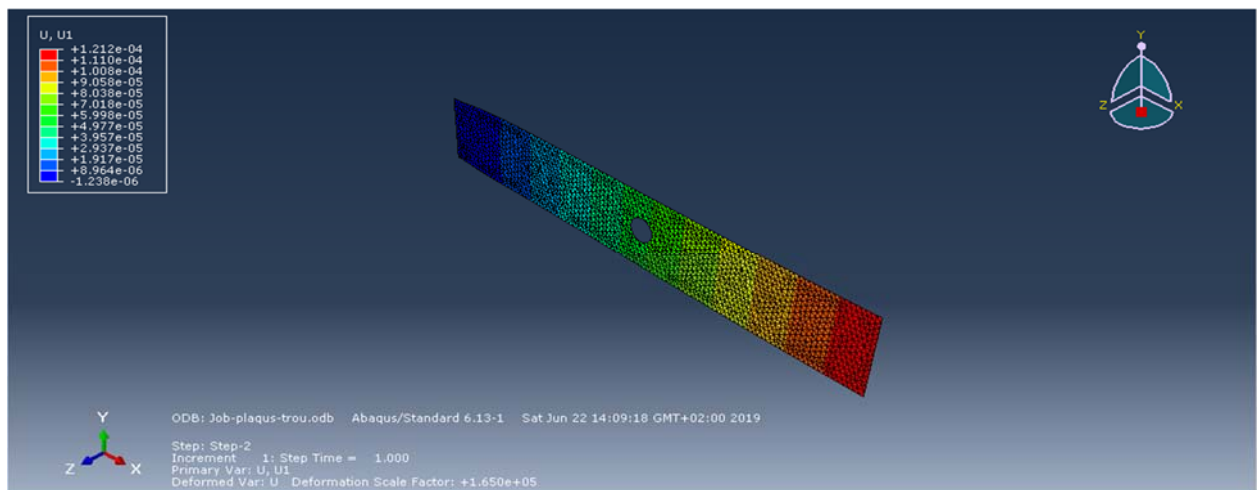


Fig.III.19 : résultats des déplacements μ_{xx} .

La valeur de déplacement Max $\mu_{xx} = 1.212 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$

La valeur de déplacement Min $\mu_{xx} = -1.238 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$

Les déplacements selon yy (μ_{yy}) à la plaque avec un seul trou.

$$\mu_{yy} = 8.972 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

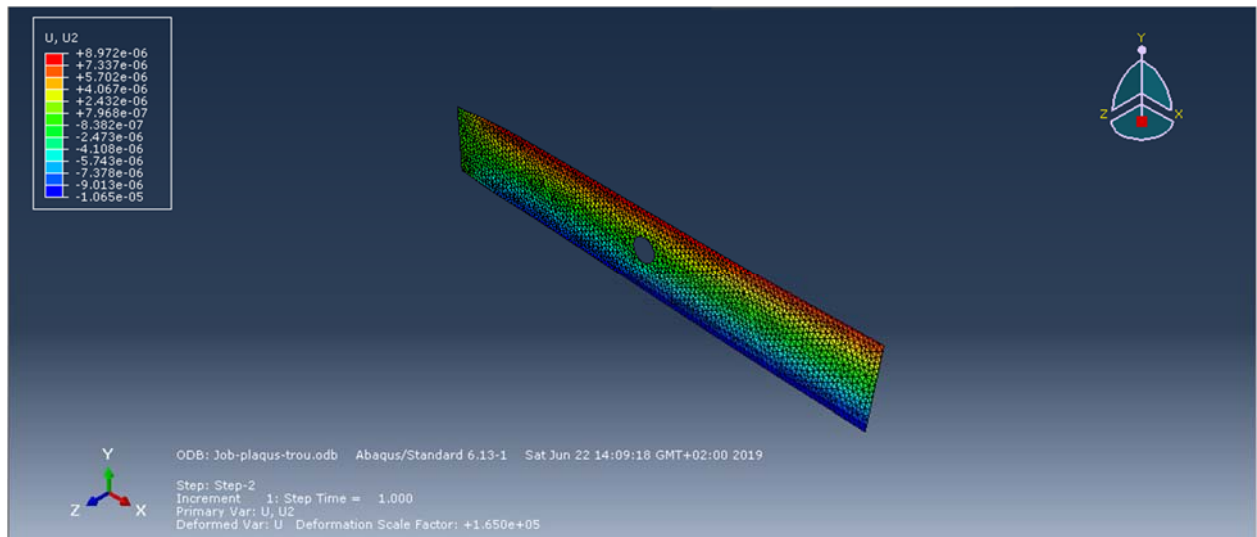


Fig.III.20 : les résultats des déplacements μ_{yy} .

La valeur de déplacement Max $\mu_{yy} = 8.972 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$

La valeur de déplacement Min $\mu_{yy} = -1.065 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$

Les contraintes σ_{VM} de la plaque

$$\sigma_{VM} = 8.206 \cdot 10^2 \text{ Mpa}$$

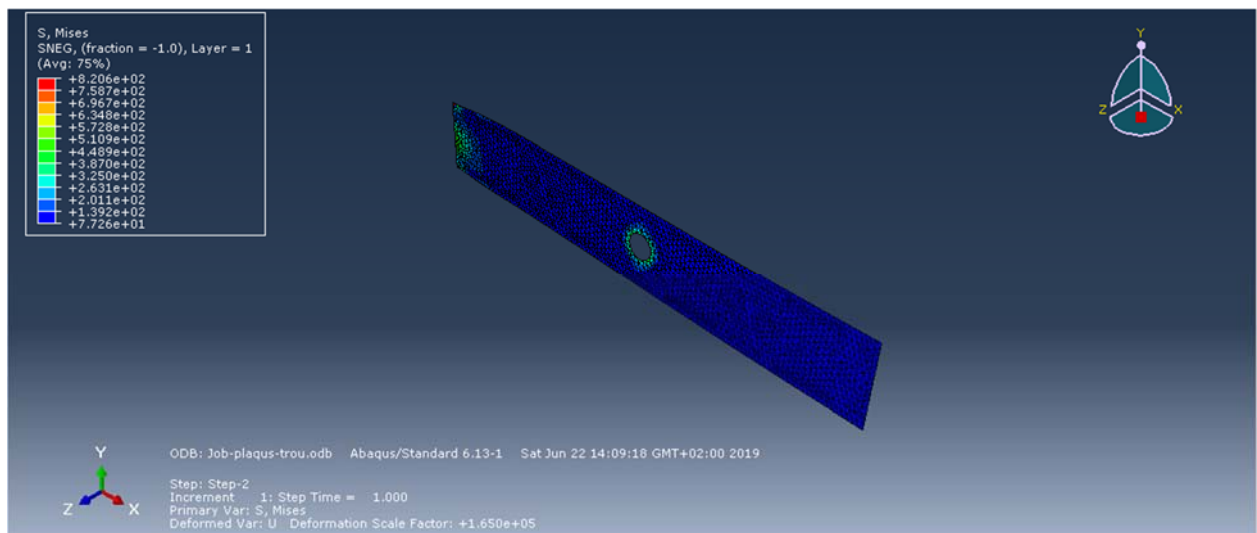


Fig.III.21 : les résultats des contraintes σ_{VM} .

Les contraintes σ_{xx} de la plaque avec un seul trou.

$$\sigma_{xx} = 2.893 \cdot 10^2 \text{ Mpa}$$

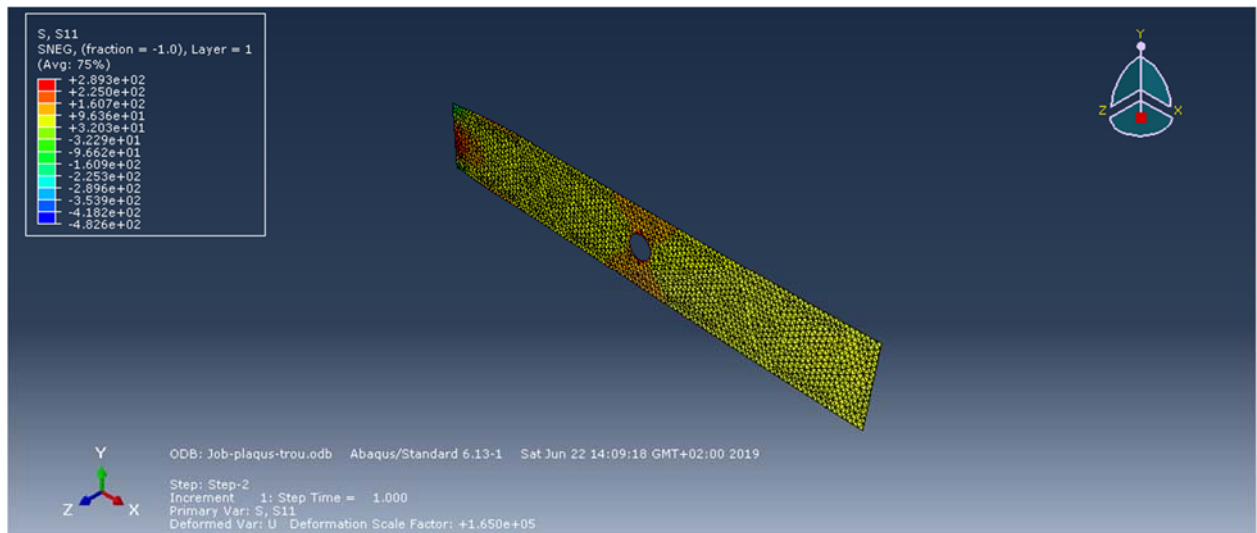


Fig.III.22 : les résultats des contraintes σ_{xx} de la plaque avec un seul trou.

La valeur de contrainte Max $\sigma_{xx} = 2.893 \cdot 10^2$ Mpa

La valeur de contrainte Min $\sigma_{xx} = -4.826 \cdot 10^2$ Mpa

Les contraintes σ_{yy} de la plaque avec un seul trou.

$$\sigma_{yy} = 4.628 \cdot 10^2$$

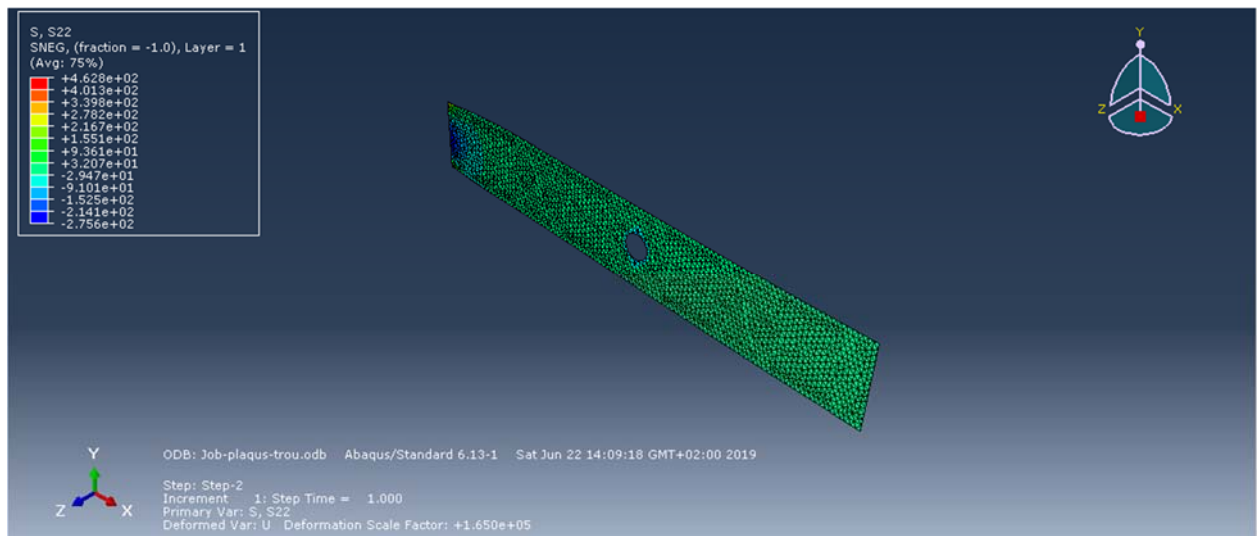


Fig.III.23 : les résultats des contraintes σ_{yy} de la plaque avec un seul trou. .

La valeur de contrainte Max $\sigma_{yy} = 4.628 \cdot 10^2$ Mpa

La valeur de contrainte Min $\sigma_{yy} = -2.756 \cdot 10^2$ Mpa

Les contraintes σ_{xy} de la plaque avec un seul trou.

$$\sigma_{xy} = 9.825 \cdot 10^1 \text{ Mpa}$$

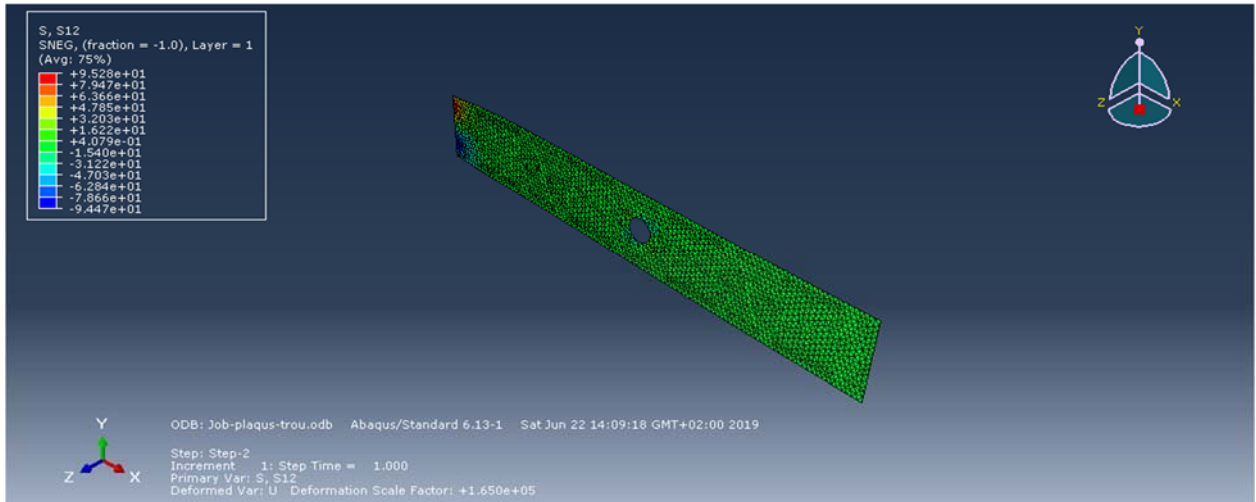


Fig.III.24 : les résultats des contraintes σ_{xy} de la plaque avec un seul trou.

La valeur de contrainte Max $\sigma_{xy} = 9.825 \cdot 10^1 \text{ Mpa}$

La valeur de contrainte Min $\sigma_{xy} = -9.447 \cdot 10^1 \text{ Mpa}$

Les déplacements selon xx (μ_{xx}) à la plaque avec deux trou.

$$\mu_{xx} = 6.726 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$$

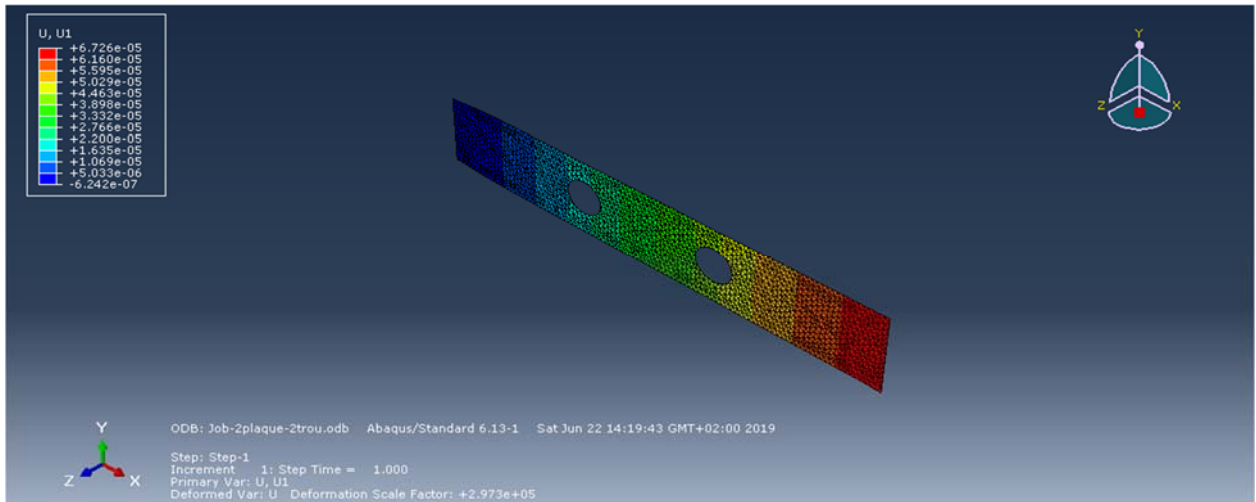


Fig.III.25 : les résultats des déplacements μ_{xx} de la plaque avec deux trou.

La valeur de déplacement Max $\mu_{xx} = 6.726 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$

La valeur de déplacement Min $\mu_{xx} = -6.242 \cdot 10^{-7} \text{ mm}$

Les déplacements selon xx (μ_{yy}) à la plaque avec deux troue.

$$\mu_{yy} = 4.657 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$$

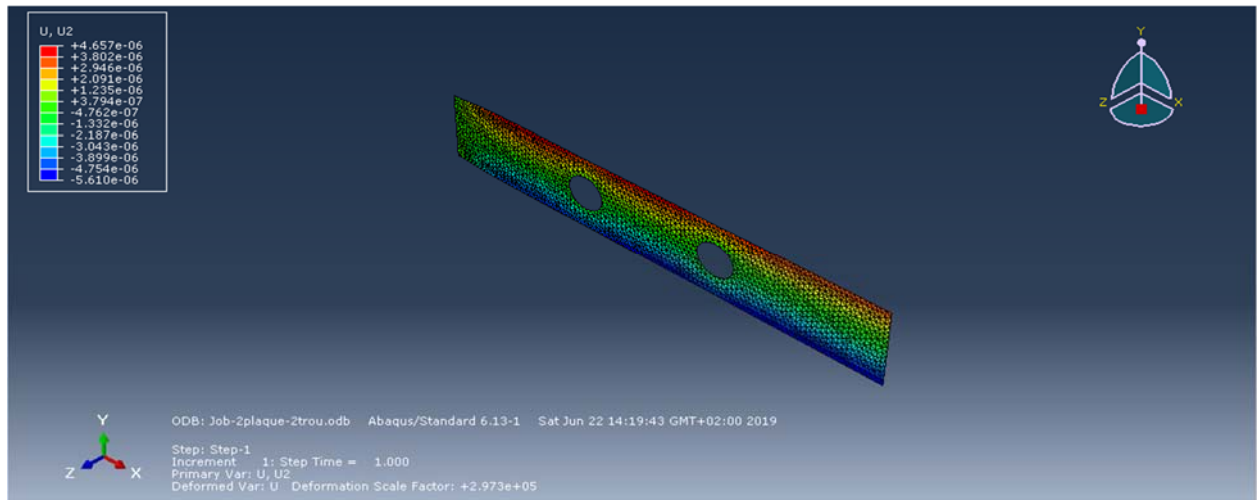


Fig.III.26 : les résultats des déplacements μ_{yy} de la plaque avec deux troue.

La valeur de déplacement Max $\mu_{yy} = 4.657 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$

La valeur de déplacement Min $\mu_{yy} = -5.610 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$

Les contraintes σ_{VM} de la plaque avec deux troue

$$\sigma_{VM} = 4.696 \cdot 10^2 \text{ Mpa}$$

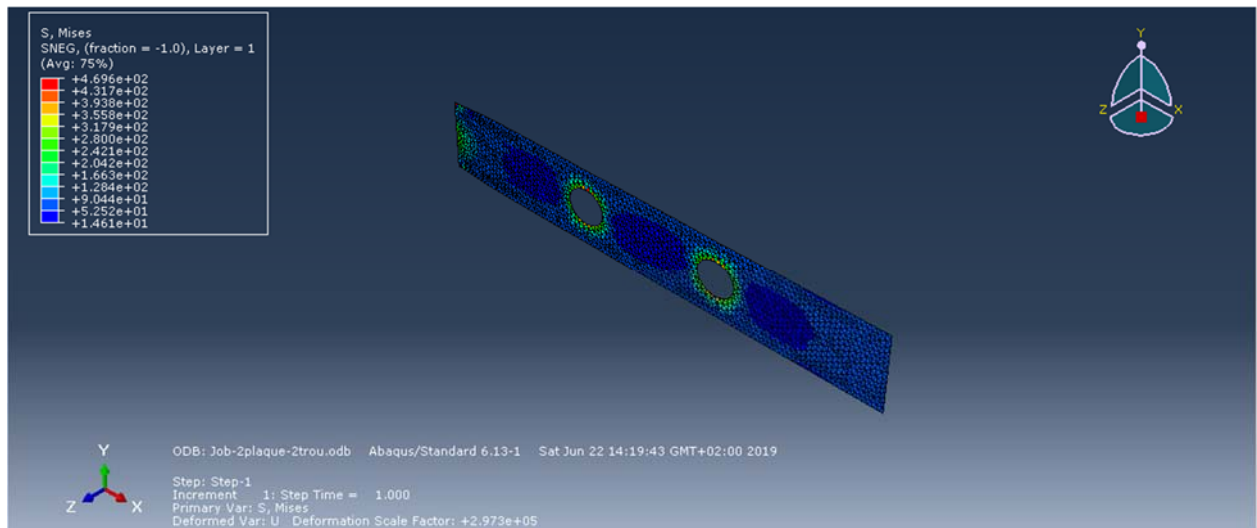


Fig.III.27 : les résultats des contraintes σ_{VM} de la plaque avec deux troue.

Les contraintes σ_{xx} de la plaque avec deux troue

$$\sigma_{xx} = 1.878 \cdot 10^2 \text{ Mpa}$$

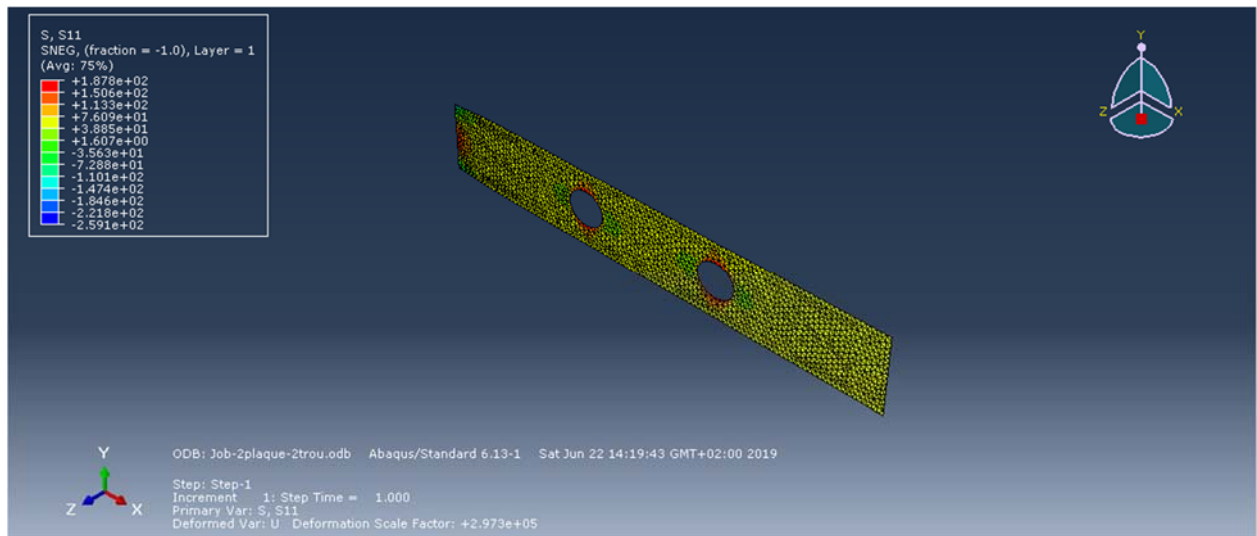


Fig.III.28 : les résultats des contraintes σ_{xx} de la plaque avec deux troue.

La valeur de contrainte Max $\sigma_{xx} = 1.878 \cdot 10^2 \text{ Mpa}$

La valeur de contrainte Min $\sigma_{xx} = -2.591 \cdot 10^2 \text{ Mpa}$

Les contraintes σ_{yy} de la plaque avec deux troue

$$\sigma_{yy} = 2.485 \cdot 10^2 \text{ Mpa}$$

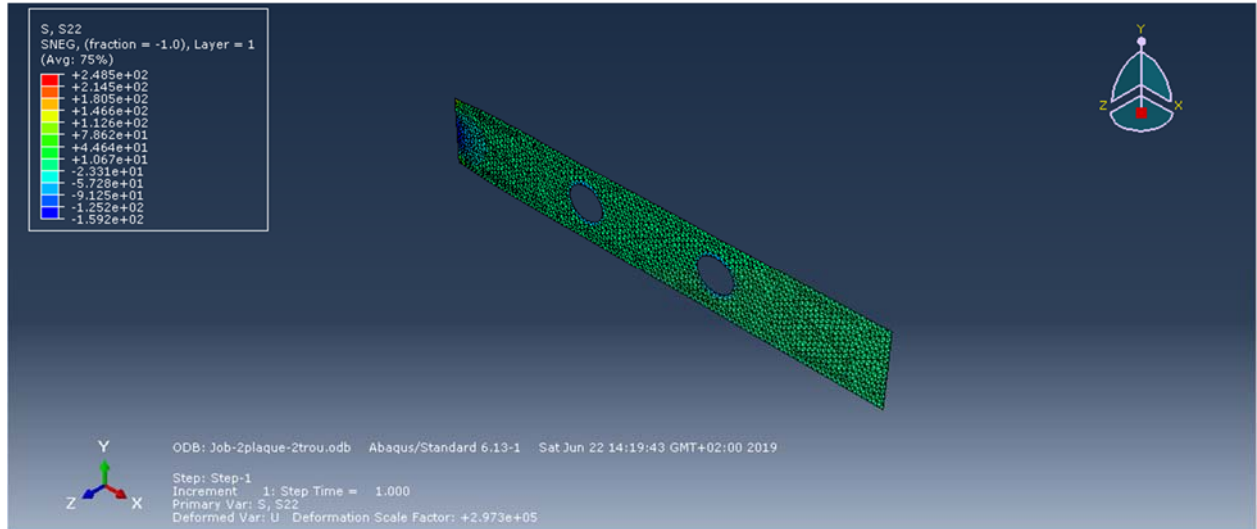


Fig.III.29 : les résultats des contraintes σ_{yy} de la plaque avec deux troue.

La valeur de contrainte Max $\sigma_{yy} = 2.485 \cdot 10^2 \text{ Mpa}$

La valeur de contrainte Min $\sigma_{yy} = -1.591 \cdot 10^2 \text{ Mpa}$

Les contraintes σ_{xy} de la plaque avec deux troue

$$\sigma_{xy} = 4.497 \cdot 10^1 \text{ Mpa}$$

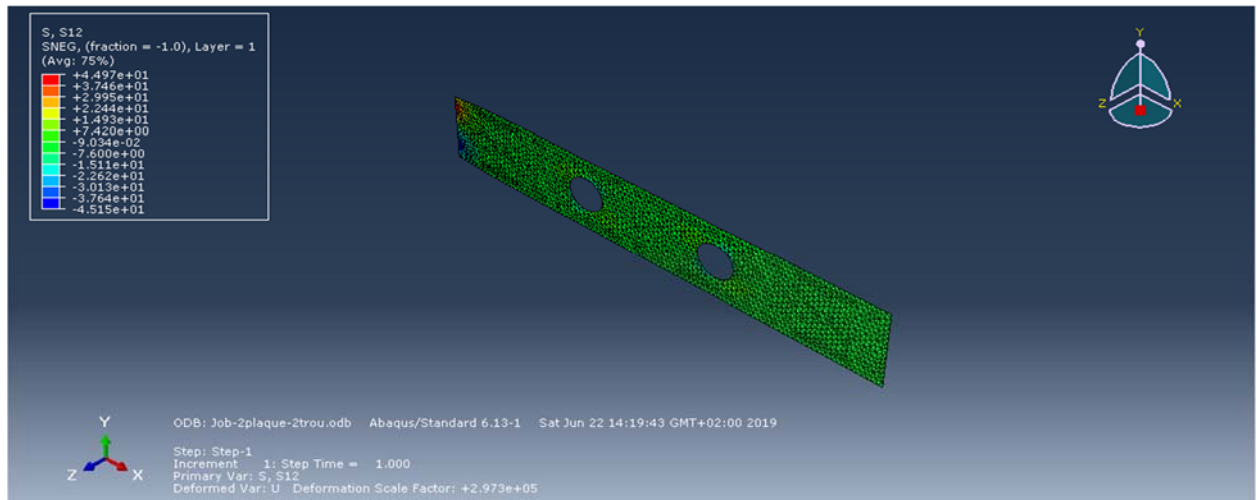


Fig.III.30 : les résultats des contraintes σ_{xy} de la plaque avec deux troue.

La valeur de contrainte Max $\sigma_{yy} = 4.497 \cdot 10^1 \text{ Mpa}$

La valeur de contrainte Min $\sigma_{yy} = -4.515 \cdot 10^1 \text{ Mpa}$

III.17 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents résultats prédits par la méthode théorique et la simulation numérique on utilisant le code de calcul ABAQUS permettant de déduire le comportement mécanique de chaque plaque

L'analyse des différents résultats montre que les évolutions des champs de contrainte et de déformation dépendent des paramètres du matériau varié et la confrontation des résultats obtenus par les différentes théories considérées a permis de valider le modèle proposé.

Les résultats obtenus sont des graphes de chaque cas de notre étude d'après les résultats de tableau.

III.18 Références bibliographiques

[1] HIBBIT, Karlsson & Sorensen, INC. ABAQUS documentation version 6.14 ; 2014

[2] ABAQUS, Theory Manual, version 6.12 et 6.14, Karlsson H., Abaqus Simulia, HKS Inc Providence, RI USA ; 2013.

Conclusion générale

Il est connu que lorsque un composite unidirectionnel est soumis à un effort de traction, le déplacement axial dans la fibre et la matrice sera différent à cause de la différence entre les propriétés mécaniques de ces deux composants. Créant des contraintes de cisaillements dans tous les plans parallèles à l'axe de la fibre. Les différences de contrainte longitudinale dans la matrice et des fibres adjacentes se traduiront par des contraintes de cisaillement à l'interface. Une théorie développée par Cox (Shear – Lag Model 1952) pour prédire le module d'élasticité et la contrainte dans ce type de composite, il suppose que le transfert de contrainte se fait aux extrémités de la fibre. Alors, la contrainte maximale normale dans la fibre se produit à mi-longueur.

Les fibres de verre sont considérées comme purement élastiques et sont définies par une fraction volumique, une longueur, un diamètre et une fonction d'orientation. La matrice, quant à elle, est considérée comme élasto-viscoplastique et a un comportement très sensible à la reprise en eau et à la température.

Les composites renforcés développés en grande partie pour combler l'écart de propriété entre les stratifiés (des fibres continues) utilisées comme structures primaires par l'industrie aéronautique et aérospatiale et matériaux non renforcés utilisés principalement dans les applications non porteuses. À certains égards, les fibres courtes couplent les avantages de chacun de ces matériaux. Si les fibres sont suffisamment longues, la rigidité se rapprochant de celles des composites à fibres continues sous à la même charge de fibres peuvent être obtenues, tandis que l'aptitude des matériaux non renforcés est au moins partiellement retenue dans les systèmes à fibres courtes. Ainsi, la fibre courte a trouvée sa place dans les structures légèrement chargés, dans lequel la rigidité domine la conception, mais dans lequel il doit être également une augmentation notable de la force sur le matériau non renforcé

Aucune étude quantitative ne permet pas d'affirmer que le V_f puisse varier localement dans l'épaisseur d'une pièce. Néanmoins, beaucoup d'observations MEB permettent de remarquer des amas de fibres et des zones de déplétion en fibres.

Cette étude concerne l'influence de la fraction volumique sur le comportement mécanique des composites renforcés par des fibres courtes, On a constaté que l'augmentation du pourcentage de renforts améliore quasi systématiquement la rigidité du composite. La fraction volumique de fibres augmente la rigidité et la contrainte à la rupture. Cette augmentation s'accompagne d'une réduction de la déformation à la rupture. Nous noterons que la fraction volumique de fibres influence le facteur d'orientation, ce qui entraîne une interaction de 2 facteurs majeurs.

Conclusion générale

Cependant, une trop grande quantité de renforts implique une adhésion plus difficile qui conduit à une baisse de performances dans certains cas. D'après la littérature, il est assez peu fréquent de trouver des composites fabriqués qui contiennent un pourcentage de fibres supérieur à 50-60%, sans rencontrer de nombreuses difficultés lors du moulage, à partir d'un taux de 50% en fibres, le matériau devient rugueux.

Résumé

Cette étude a pour objectif de prévoir le comportement mécanique du matériau composite à renforcement unidirectionnel verre-E/époxyde. Elle se base sur les caractéristiques élastiques et propriétés mécaniques des constituants et de la disposition du renfort. Cette technique a revêtu plusieurs aspects en fonction de la complexité du phénomène à mettre en évidence.

Des modèles sont développés et mis en équations dans les domaines de comportement élastique linéaire en utilisant des approches mathématiques probabilistes et des simulations numériques (ABAQUS). De tels comportements sont comparés à ceux obtenus par plusieurs et différents modèles basés sur le volume élémentaire représentatif et la loi des mélanges issue de la technique d'homogénéisation, la résistance du matériau a été aussi prise en considération pour une sollicitation importante de traction.

Abstract

This study has for objective to predict the micromechanical behavior of the E-glass/epoxy composite material with unidirectional reinforcement. It is based on the elastic characteristics and mechanical properties of the components and the provision of the reinforcement.

This technique took on several aspects according to the complexity of the phenomenon to be highlighted, some models are developed and put in equations in the domains of linear elastic behavior while using probabilistic mathematical approaches and using the program (ABAQUS). Such behaviors are compared with those obtained by several and various models based on elementary volume representative and the law of the mixtures resulting from the homogenization technique. The resistance of the material was as consideration for one important solicitation state of traction.

المُلخَص

الهدف من هذه الدراسة هو تنبؤ التصرف الميكانيكي الدقيق للمادة المركبة والمقوية بألياف احادية الاتجاه زجاج_ايبوكسي. تعتمد على خصائص المرونة والمقومات الميكانيكية للمكونات ووضعيات الالياف

قد اقرت هذه الدراسة عدة مظاهر حسب درجة لتعقيد التي يجب تسليط الضوء في هذه الحالة تم تحليل المادة المركبة ذات تصرف مختلف عن مكوناتها , بحيث طورت بعض النماذج ووضعت في معادلات بمجالات التصرف الخطي المرن حيث قورنت مثل هذه التصرفات بتلك التي تم الحصول عليها من خلال عدة نماذج كذلك تم الاستعانة ببرنامج محاكاة وعلى اساس الحجم الابتدائي التمثيلي قد اتخذت ايضا في الحسبان مقاومة المادة خلال التعرض لعملية (ABAQUS) الشد .