

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

Faculté de technologie

Département de Génie Mécanique



Domaine : science technologie

Filière : Génie Mécanique

Option : Génie des matériaux

Mémoire présente pour l'obtention
Du diplôme de master académique

Par :

Aoufi Moadh

Sidali Hamidat

Intitulé

**Etude numérique du comportement mécanique des
plaques en matériaux composites munies de trou
circulaire**

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. FARSI Chouki

Université de M'sila

Président

Dr. Mohamed latrache

Université de M'sila

Encadreur

Dr. Menasri Nouredine

Université de M'sila

Examineur

Année universitaire : 2020/2021

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Mes chers parents pour tous les sacrifices consentis, pour leur soutien durant toutes mes années d'études,

Toute ma famille

Chaque personne qui a perdu un membre de son corps

Ma reconnaissance est également formulée envers tous mes enseignants et Mes camarades

Remerciements

*Je remercie Dieu tout-puissant, que m'a donné
l'ambition et m'a dirigé sur mon chemin.*

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mon encadreur

Mr Mohamed Latrache

Dr au département de génie mécanique,

Faculté de sciences et technologie, université de mohamed bou diaf m'siba ,

pour son aide et ses orientations durant la réalisation de ce

travail. que monsieur le président ainsi que

les membres du jury trouvent ici l'expression

de ma gratitude pour avoir accepté d'évaluer et de juger ce travail

Enfin, je remercie en particulier ma famille

(maamar , soheyb , Abdo , othmane)

*et plus précisément ma mère et mon père qui m'ont encouragée tout au long de mes
études.*

Je n'oublie pas mes amies

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي
بَدَأَ خَلْقَ الْإِنسَانِ مِنْ طِينٍ
ثُمَّ عَلَّمَهُ الْقُرْآنَ وَالْحِكْمَ

Résumé

Cette étude est accumulée sur la détermination du facteur de concentration des contraintes (FCC) qui est examiné comme un inducteur de l'augmentation locale de la contrainte due à l'existence du trou. L'existence des trous est une exigence technologique pour des utilités mécaniques comme l'assemblage des pièces et les canalisations ... ect, cette existence peut mener à un affaiblissement de la structure en raison de l'augmentation locale de la contrainte. Ce phénomène, appelé concentration des contraintes, peut affronter l'endommagement des structures métalliques ou composites et agis négativement sur leur garantie. L'analyse numérique a été menée pour déterminer le facteur de concentration des contraintes (FCC), une étude paramétrique mettre en évidence l'effet de l'orientation des fibres et le nombres des couches sur le FCC.

summary

This study is accumulated on the determination of the stress concentration factor (FCC) which is examined as an inducer of the local increase in stress due to the existence of the hole. The existence of the holes is a technological requirement for mechanical utilities such as the assembly of parts and pipelines ... ect, this existence can lead to weakening of the structure due to the local increase in stress. This phenomenon, called stress concentration, can face damage to metallic or composite structures and negatively affect their warranty. Numerical analysis was conducted to determine the Stress Concentration Factor (FCC), a parametric study to demonstrate the effect of fiber orientation and number of layers on FCC.

ملخص

تراكمت هذه الدراسة على تحديد عامل تركيز الإجهاد (FCC) الذي تم فحصه كمحفز للزيادة المحلية في الإجهاد بسبب وجود الثقب. إن وجود الثقوب هو مطلب تكنولوجي للمرافق الميكانيكية مثل تجميع الأجزاء وخطوط الأنابيب ... إلخ، يمكن أن يؤدي هذا الوجود إلى إضعاف الهيكل بسبب الزيادة المحلية في الإجهاد. هذه الظاهرة، التي تسمى تركيز الضغط، يمكن أن تتعرض لأضرار في الهياكل المعدنية أو المركبة وتؤثر سلبيًا على ضمانها. تم إجراء التحليل العددي لتحديد عامل تركيز الإجهاد (FCC)، دراسة حدية لإثبات تأثير اتجاه الألياف وعدد الطبقات على التكسير التحفيزي المائع.

Table des matières

Résumé

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction Générale

Chapitre I : Généralité sur les matériaux composites

I.1. Introduction :	3
I.2. Définition	3
I .3. Les constituants	3
I .3.1. Le renfort	4
I.3.2. Architecture des renforts.....	5
I.3.1.1. Caractéristiques mécaniques des fibres.....	9
I .3.1.2. Caractéristiques moyennes des fibres et renforts.....	10
I .3.2. Matrices.....	10
I.3.2.1. Résines thermodurcissables	11
I.3.2.2. Les résines époxydes	11
I.3.2.3. Résines thermoplastiques	12
I.3.2.4. Résines thermostables	12
I .3.3. Les charges et les additifs :	12
I .3.3.1. Les charges	12
I .3.3.2. Les additifs	13
I.4. Procédés d'élaborations	13
I.5. Structure des matériaux composites :	15
I.5.1. Les monocouches.....	16

I.5.2. Les Stratifiés	16
I.5.3. Sandwichs	17
I.6. Les domaines d'utilisation	17
I.7. La loi de mélange pour les composites stratifiés	18
I.8. TRAVAUX EFFECTUE.....	19

Chapitre II : Formulation analytique du comportement des plaques trouées en matériaux composites

II.1. Etude du comportement des plaques trouée en matériau isotrope.	21
II.2. Etude du comportement des plaques munies d'un trou circulaire.	21
II.2.1. Champ des contraintes loin du trou.	22
II.2.2. Champ des contraintes.....	23
II.2.3 Facteur de concentration des contraintes (FCC).....	25
II.3. Etude du comportement des plaques trouées en matériaux composites0	25
II.4. Etude du comportement des plaques composites munies d'un trou circulaire.	27
II.4.1. Fonction d'Airy	27
II.4.2 Fonction de variable complexe.	27
II.4.3 La théorie de Lekhnitskii.	29
II.4.3.1 Cas de la plaque soumise à l'effort de compression pure.	31
II.4.3.2 Cas de la plaque soumise à la contrainte de cisaillement.....	31
II.4.4. Critères de rupture dans les plaques trouées en matériaux composites.	32

Chapitre III : Simulation numérique du comportement des plaques trouées en matériaux composites par ANSYS apdl

III.1- Simulation de l'essai de traction sur une plaque isotrope munie de trou.	34
a- Géométrie de la plaque.....	34
b- Maillage.....	34
c- Conditions aux limites et application des charges.....	35

d- Résultats.....	36
II.2. Simulation de l'essai de traction sur une plaque en matériaux composite munie de trou.	40
III.2.1 Effets des orientations des fibres sur la distribution des contraintes	40
III.2.2- Effets de nombres des couches sur la distribution des contraintes.....	45
Conclusion Générale.....	50
Références bibliographiques.	51

Liste des figures

Figure I.1 : Matériau composite.....	4
Figure I.2 : Types de renfort.....	4
Figure I.3 : renforts unidirectionnels (UD).....	5
Figure I.4 : renforts Toile ou taffetas.....	5
Figure I.5 : renforts Serge.....	6
Figure I.6 : renforts Satin.....	6
Figure I.7 : Fibre de verre.....	7
Figure I.8 : Principe du procédé de fabrication des fibres de carbone.....	8
Figure I.9 : Principe du moulage au contact.....	13
Figure I.10 : Principe du moulage par projection simultanée.....	14
Figure I.11 : Moulage sous vide.....	14
Figure I.12 : Principe de moulage par centrifugation.....	15
Figure I.13 : Composite monocouche.....	16
Figure I.14 : Plaque stratifiée.....	17
Figure I.15 : Composite sandwich.....	17
Figure I.16 : Modélisation par un système de ressorts des propriétés en traction d'un composite stratifié.....	19
Figure II.1 : Traction d'une plaque isotrope élastique munie d'un trou circulaire.....	22
Figure II.2 : Présentation schématique des différentes contraintes (contraintes tangentiel $\sigma_{\alpha\alpha}$ contrainte radial σ_{rr} contrainte de cisaillement $\sigma_{r\alpha}$).....	23
Figure II.3 : Traction d'une plaque orthotrope élastique munie d'un trou circulaire.....	30
Figure II.4 : Cisaillement d'une plaque orthotrope élastique munie d'un trou circulaire.....	32
Figure II.5 : Traction des plaques composites avec et sans trou.....	33
Figure III.1 : Géométrie de l'élément SHELL63.....	34
Figure III.2 : Maillage de la plaque trouée.....	35
Figure III.3 : Fixation du côté droite et application d'effort sur le côté gauche.....	36

Figure III.4 : Variation du FCC au bord du trou circulaire en traction	37
Figure III.5 : Distribution du FCC au bord du trou en traction	38
Figure III.6 : Distribution du FCC au bord du trou en traction, avec l'état initiale	38
Figure III.7 : Distribution du FCC au bord du trou circulaire en traction, vu proche	39
Figure III.8 : Distribution du FCC au bord du trou en traction, vu proche avec l'état initiale	39
Figure III.9 : Géométrie de l'éléments SHELL181	40
Figure III.10 : Distribution du facteur de concentration de contrainte (FCC) selon l'orientation des fibres	44
Figure III.11 : Facteur de concentration des contraintes (FCC) minimales et maximales au bord de trou par rapport d'orientations des fibres.	45
Figure III.12 : Facteur de concentration des contraintes (FCC) minimales et maximales au bord de trou par rapport de nombres des couches.	46
Figure III.13 : Distribution du facteur de concentration de contrainte (FCC) selon les nombres des couches	49

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Caractéristiques mécaniques des fibres.....	9
Tableau 1.2 : Caractéristiques moyennes des fibres et renforts.....	10
Tableau 1.3 : Caractéristiques des résines thermodurcissables	11
Tableau 1.4 :Caractéristiques des résines thermoplastiques	12
Tableau I-5 : Les avantages et les inconvénients du moulage sous vide.....	15
Tableau III.1 : Propriétés géométriques et mécaniques de la poutre isotrope	34
Le tableau III.2 présente les propriétés mécaniques de la plaque en matériaux composite trouée.....	40
Tableau III.3 : Propriétés mécaniques de la plaque en matériaux composite trouée	40
Tableau III.4 : Valeur maximale et minimale des contraintes au bord du trou par rapport d'orientation des fibres	45
Tableau III.5 : Valeur maximale et minimale des contraintes au bord du trou par rapport de nombres des couches.	45

INTRODUCTION

INTRODUCTION

GENERALE

GENERALE

Introduction Générale

Introduction Générale :

Les composites sont définis comme étant la combinaison de deux ou plusieurs matériaux tels que les éléments de renfort, les charges et les matrices liantes. Ces matériaux diffèrent dans la forme ou dans la composition sur une échelle macroscopique, mais ils se complètent et permettent d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément [1].

L'intérêt des matériaux composites n'est plus à prouver. Leurs rapports rigidité et résistance sur masse élevés, leur bonne résistance à la fatigue, à la corrosion, leur capacité à être combinés pour obtenir des matériaux optimisés, tant sur le plan géométrique que des propriétés physico-chimiques et mécaniques ont fait d'eux des acteurs importants de la conception moderne [2].

L'opération de perçage des trous dans les structures composites est utile et nécessaire pour des besoins de la mécanique de construction comme l'assemblage des pièces et la canalisation ainsi que des besoins énergétiques comme l'évacuation de la chaleur dans les systèmes de refroidissement etc.... Cette présence de trous dans les structures composites provoque le phénomène de concentration des contraintes qui influe négativement sur leur comportement mécanique. Ce comportement est analysé par un facteur, dit facteur de concentration des contraintes (FCC), qui exprime la variation locale de la contrainte due à la présence du trou. Le champ des contraintes autour du trou est fonction de plusieurs paramètres tels que la taille et la forme géométrique du trou, l'orientation des fibres, le rapport d'anisotropie, et la nature de la charge appliquée [3].

Le logiciel ANSYS a été développé par Dr. John Swanson, fondateur de la société ANSYS Inc. qui a son siège à Houston, PA, USA. Il s'agit d'un outil de développement en analyse d'ingénierie. La méthode utilisée est celle des éléments finis. Il est utilisé dans des domaines allant de l'automobile et l'électronique à l'aérospatiale et la chimie. Le logiciel ANSYS permet la modélisation de structures, produits, composantes ou systèmes et d'étudier leurs réponses physiques telles que les niveaux de contraintes, les distributions de température ou l'effet de champs électromagnétiques [4].

Le but de notre travail est d'étudier théoriquement et numériquement l'influence de l'existence du trou circulaire sur le comportement mécanique des plaques isotrope et composites.

Le mémoire est divisé en trois chapitres :

Le **premier chapitre** est un préliminaire bibliographique affectant des généralités sur les matériaux composites tels que ses différents constituants et leurs architectures ainsi que les différents procédés de mise en œuvre et les domaines d'application des matériaux composites.

Introduction Générale

Le **deuxième chapitre** sera consacré à la formulation décrivant le comportement mécanique des plaques isotrope et en matériaux composites munies des trous circulaires centrés.

Le **Troisième chapitre** présente une simulation numérique avec ANSYS apdl sur la variation de la concentration des contraintes dans les plaques isotropes et composite munies d'un trou circulaire centré. Cette analyse étudie l'influence de quelques paramètres sur la variation du facteur de concentration des contraintes (FCC) au bord du trou.

CHAPITRE I

CHWLIKET

GÉNÉRALITÉ SUR LES MATÉRIAUX

DENEKWFILF20KGF2WWLEKIWOY

COMPOSITES

COMLOZILF2

Généralité sur les matériaux composites

I.1. Introduction :

- Les matériaux composites sont des matériaux à hautes performances mécaniques, façonnables à volonté au gré du concepteur et donc doué d'un potentiel illimité.
- Les matériaux composites se développent aujourd'hui dans pratiquement tous les domaines et sont à l'origine de formidables challenges dans diverses réalisations de haute technologie [5].

I.2. Définition :

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément.

On distingue deux types de composites [5][6] :

❖ 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 du matériaux (moulage par contact, SMC et injection).

I.3. Les constituants :

En général les constituants principaux d'un matériau composite sont :

- La matrice.
- Le renfort.
- Les charges et les additifs.

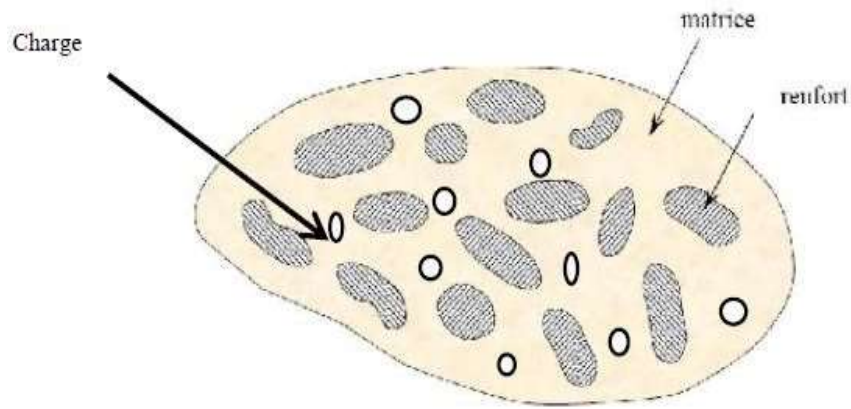


Figure I.1 : Matériau composite [5]

I.3.1. Le renfort :

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

Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes :

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

La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la figure 1[7].

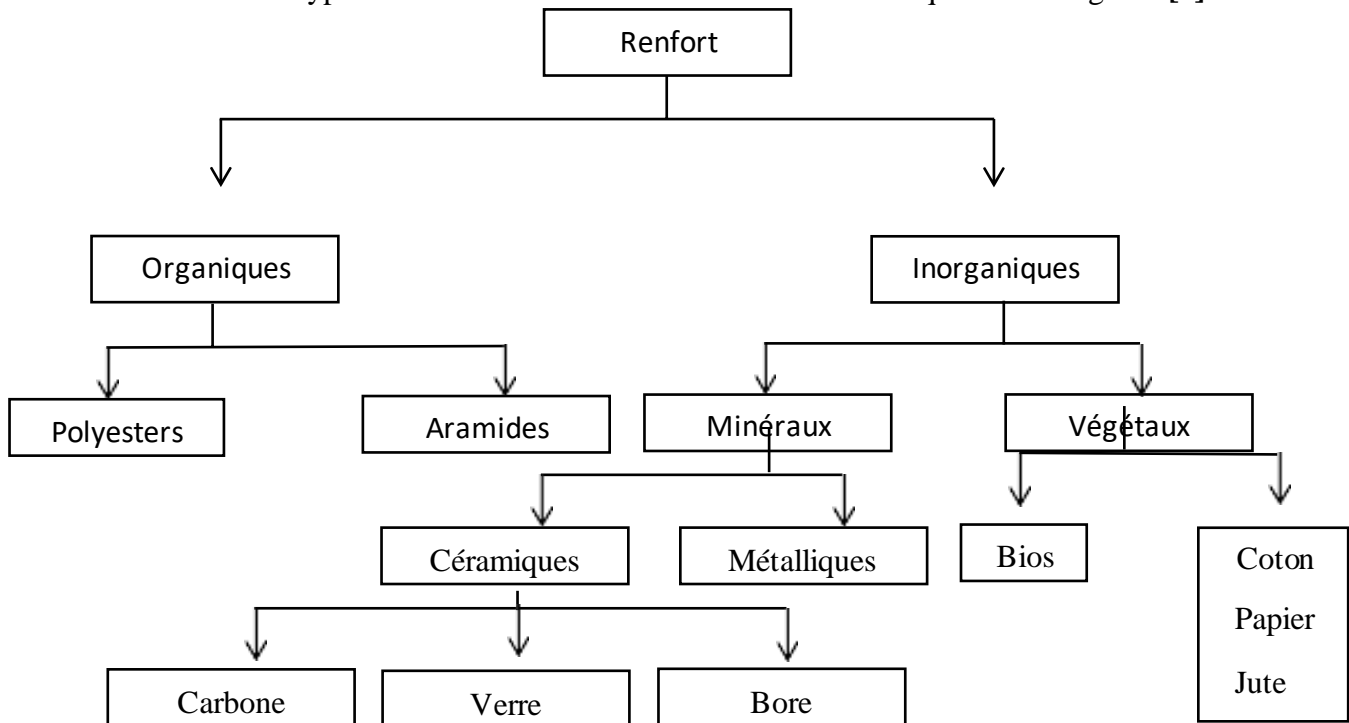


Figure I.2 : Types de renfort [7].

I.3.1. Architecture des renforts : [8]

Il existe différentes géométries et textures de renforts

➤ Les unidirectionnels (UD) :

Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère. Taux de déséquilibre très grand.

Les tissus se composent de fils de chaîne et de trames perpendiculaires entre eux. Le mode d'entrecroisement ou armure les caractérise.

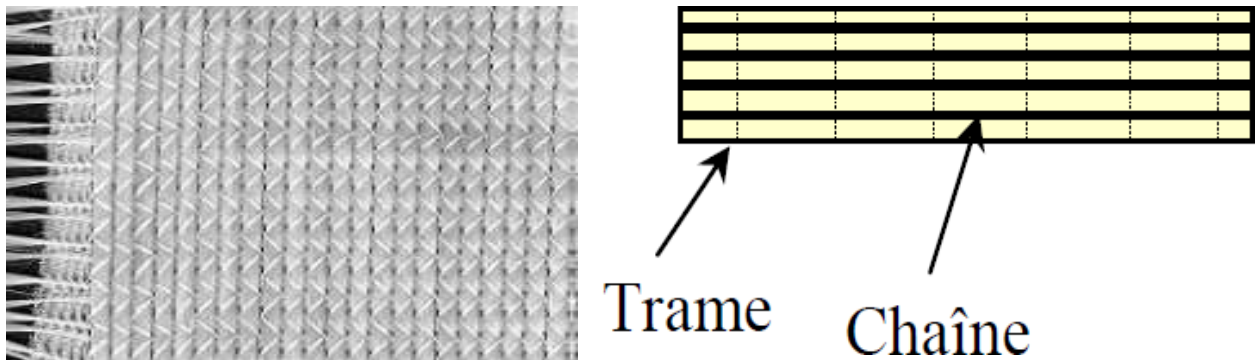


Figure I.3 : renforts unidirectionnels (UD)

➤ Toile ou taffetas

Chaque fil de chaîne passe dessus puis dessous chaque fil de trame, et réciproquement. Le tissu présente une bonne planéité et une relative rigidité, mais est peu déformable pour la mise en œuvre. Les nombreux entrecroisements successifs génèrent un embuvage important et réduisent les propriétés mécaniques.

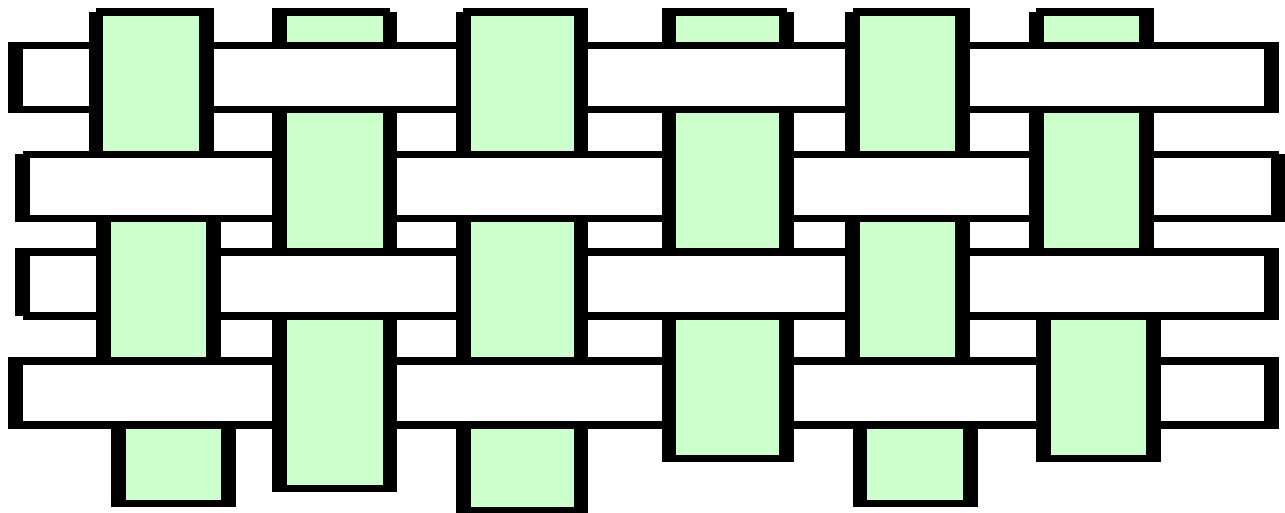


Figure I.4 : renforts Toile ou taffetas

➤ **Serge :**

Chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs(n) fils de trame et chaque fil de trame flotte au-dessus de (m) fils de chaîne. Armure de plus grande souplesse que le taffetas ayant une bonne densité de fils. Ci-contre, un sergé 2/2.

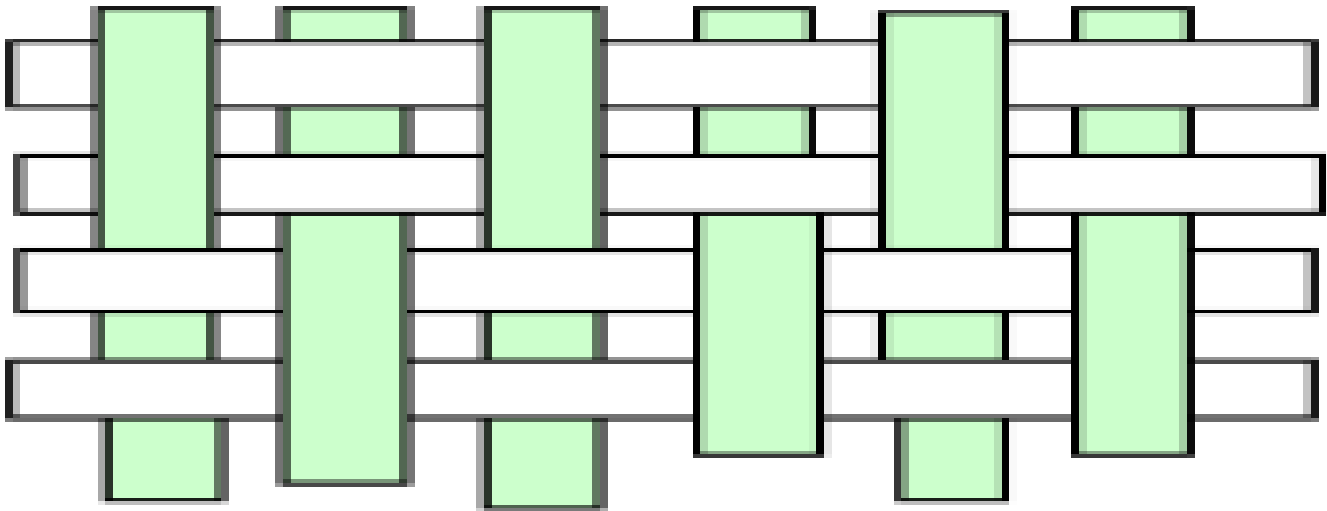


Figure I.5 : renforts Serge

➤ **Satin**

Chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs (n-1) fils de trame et réciproquement. Ces tissus ont des aspects différents de chaque côté. Ces tissus sont assez souples et adaptés à la mise en forme de pièces à surfaces complexes. Ce type de tissus présente une forte masse spécifique.

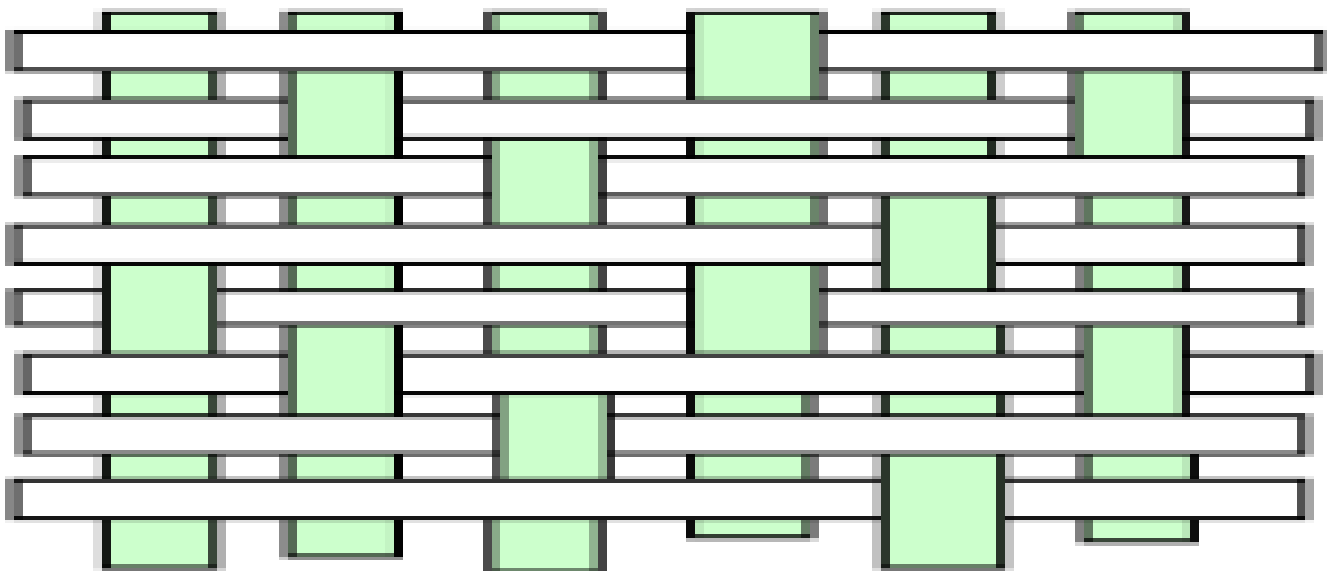


Figure I.6 : renforts Satin

➤ **Fibres de verre**

Les fibres de verre ont un excellent rapport performance–prix qui les placent de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composites.



Figure I.7 : Fibre de verre

➤ **Fibres de carbone**

Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques et sont élaborées à partir d'un polymère de base, appelé précurseur. Actuellement, les fibres *précurseurs* utilisées sont des *fibres acryliques* élaborées à partir du polyacrylonitrile (PAN). La qualité des fibres de carbone finales dépend fortement des qualités du précurseur.

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

Quelques exemples de fibres de carbone classiquement rencontrées : T300, T800, MR40, TR50, IM6, IM7, GY, M55J.

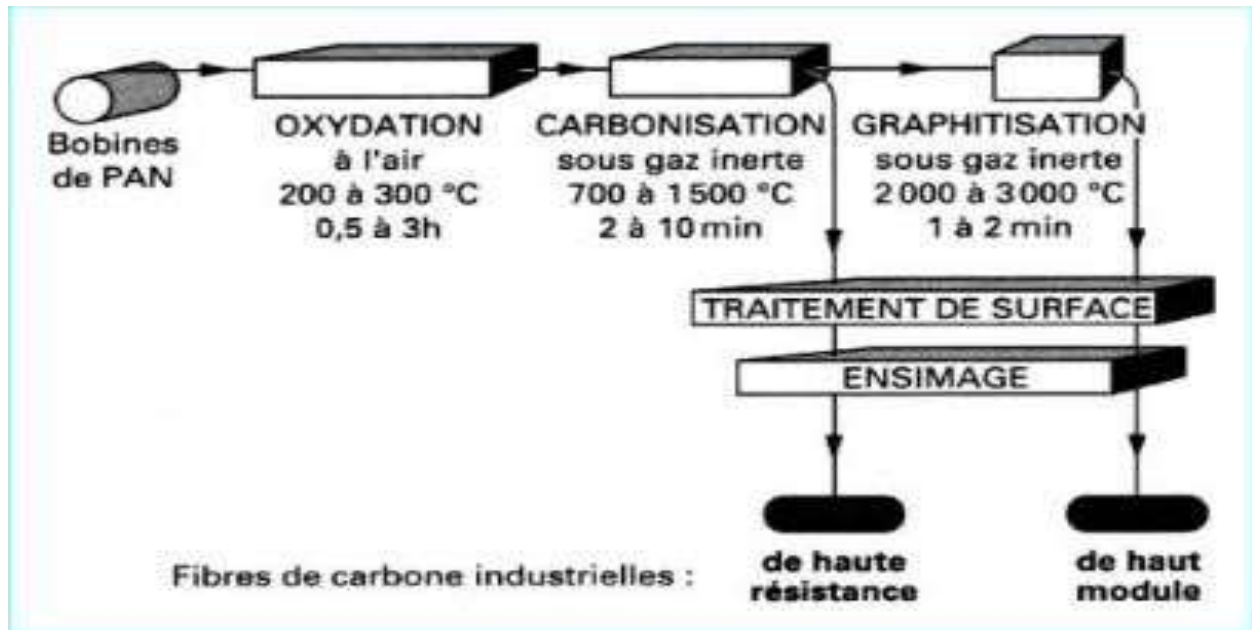


Figure I.8 : Principe du procédé de fabrication des fibres de carbone

➤ **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.

➤ **Fibre de silice (ou de quartz)**

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

➤ **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.

➤ **Fibres aramides**

Les fibres aramides ont des propriétés mécaniques élevées en traction comme les carbones mais leurs résistances à la compression est faible. La faible tenue mécanique en compression est généralement attribuée à une mauvaise adhérence des fibres à la matrice dans le matériau composite. Pour y remédier, des enzymages des fibres peuvent être utilisés. L'utilisation de composites à fibres hybrides permet également de remédier aux faiblesses

des composites à fibres aramides. Des renforts hybrides de type verre–kevlar ou carbone–kevlar sont largement utilisés dans le domaine des loisirs (ski, raquette de tennis).

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

➤ Fibres céramiques

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

- Fibres de Carbure de Silicium
- Fibres de Bore
- Fibres de Bore carbure de silicium

I.3.1.1. Caractéristiques mécaniques des fibres

Il existe différents types de fibres. Elles peuvent être scindées en deux groupes, les fibres à haut module et les fibres à haute résistance. Les fibres à haut module ont une résistance faible et celles à forte résistance ont un module faible.

renforts	ρ (Kg/m ³)	σ^R (MPa)	σ^R (MPa)	E (GPa)
AS4	1 800		3 599	235
T300	1700	1,2	3 654	231
IM6		0,88	1 460	
IM8	1 800		5 171	310
kevlar 49	1 440	2,5	3 620	124
verre E	2 580	3,5	3 450	69

Tableau (1.1) : Caractéristiques mécaniques des fibres

❖ Exemples

Le choix d'une association entre un renfort et une matrice est très délicat et ce travail reste du ressort des chimistes. En effet, l'interface résultant de l'association intime de deux constituants différents doit avoir de bonnes performances mécaniques. La codification est la suivante : renfort/matrice. Les modèles de comportement élastiques des matériaux composites seront abordés dans le chapitre 2. Les exemples d'association entre renfort et

résine couramment rencontrés dans l'industrie aéronautique et spatiale sont les suivants :

- Composites à fibre de carbone et matrice époxy thermodurcissable : carbone/époxy : T300/5208, T300/914, IM6/914, GY/70 M55J/M18, AS4/3501-6
- Composites à fibre de carbone et matrice époxy thermoplastique : carbone/polyamide IM7/K3B, cellion C6000/PMR-15, AS4/PEEK (APC-2)
- Composite à fibre et matrice carbone : 3D C/C, 3D EVO, 4D C/C
- Composite à fibre et matrice céramique : SiC/SiC, Sic/Mas-L. [8]

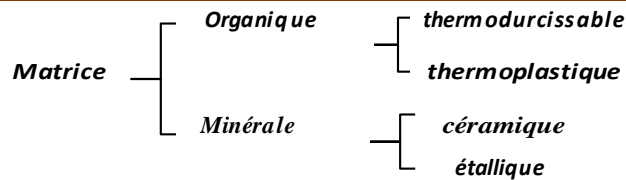
I.3.1.2. Caractéristiques moyennes des fibres et renforts

Renforts	Diamètre du filamen (µm)	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
	d	?	E	G	?	s _r	A	a
Verre E	16	2 600	74 000	30 000	0,25	2 500	3,5	0,5*10 ⁻³
Verre R	10	2 500	86 000		0,2	3 200	4	0,3*10 ⁻³
Carbone HM	6.5	1 800	390 000	20 000	0,35	2 500	0,6	0,08*10 ⁻³
Carbone HR	7	1 750	230 000	50 000	0,3	3 200	1,3	0,02*10 ⁻³
Kevlar 49	12	1 450	130 000	12 000	0,4	2 900	2,3	-0,2*10 ⁻³
Bore	100	2 600	400 000			3 400	0,8	0,4*10 ⁻³
Silicate d'alumine	10	2 600	200 000			3 000	1,5	
Polyéthylène		960	100 000			3 000		

Tableau (1.2) Caractéristiques moyennes des fibres et renforts

I.3.2. Matrices

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'utilisation. Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés. Dans le cas des matériaux en carbone des températures de 2 200°C peuvent être atteints. La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la figure 1.1.



I.3.2.1. Résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées (traitement thermique ou physico-chimique). Ces résines ont donc la particularité de ne pouvoir être mises en forme qu'une seule fois. Les principales résines thermodurcissables utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont par ordre décroissant en tonnage : les résines polyesters insaturées, les résines de condensation, les résines époxydes.

résines	T_f (°C)	ρ (Kg/m³)	f^R(%)	σ^R (MPa)	σ^R (MPa)	E (GPa)
polyesters	60 à 100	1 140	2 à 5	50 à 85	90 à 200	2,8 à 3,6
phénoliques	120	1 200	2,5	40	250	3 à 5
époxydes	290	1 100 à 1 500	2 à 5	60 à 80	250	3 à 5

Tableau (1.3) : Caractéristiques des résines thermodurcissables

I.3.2.2. Les résines époxydes [5]

Les résines les plus utilisées après les résines polyesters insaturées sont les résines époxydes.

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

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

Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes sont les suivantes :

- Masse volumique 1100 à 1500 kg/m³
- Module d'élasticité en traction 3 à 5 GPa
- Contrainte à la rupture en traction 60 à 80 MPa
- Contrainte à la rupture en flexion 100 à 150 MPa
- Allongement à la rupture 2 à 5 %

- Résistance au cisaillement 30 à 50 MPa
- Température de fléchissement sous charge 290 °C

I.3.2.3. Résines thermoplastiques

Ce sont des polymères pouvant être alternativement ramollis par chauffage et durcis par refroidissement dans un intervalle de température spécifique du polymère étudié. Les résines thermoplastiques présentent l'aptitude à l'état ramolli, de se mouler aisément par plasticité [1].

résines	T_f (°C)	ρ (kg/ m ³)	f^R (%)	σ^R (MPa)	σ^R (MPa)	E (GPa)
polyami de	65 à 100	1 140		60 à 85		1,2 à 2,5
polypro pylène	900	1 200		20 à 35		1,1 à 1,4

Tableau (1.4) Caractéristiques des résines thermoplastiques

I.3.2.4. Résines thermostables

Ce sont des polymères présentant des caractéristiques mécaniques stables sous des pressions et des températures élevées (>200°C) appliquées de façon continue. Cette propriété est mesurée en déterminant la température que peut supporter la résine durant 2000h sans perdre la moitié de ses caractéristiques mécaniques. [5]

I.3.3. Les charges et les additifs :

I.3.3.1. Les charges : [5]

❖ Charges renforçantes

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

- Charges sphériques
- Charges non sphériques

❖ Charges non renforçantes

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

Parmi ces classes on trouve :

- Charges de faible coût.

- Charges ignifugeantes.
- Charges conductrices et antistatiques

I.3.3.2. Les additifs :

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

- Lubrifiants et agents de démoulage,
- Pigments et colorants,
- Agents anti-retrait,
- Agents anti-ultraviolets

I.4. Procédés d'élaborations :

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

❖ Moulage au contact :

Le moulage au contact ou stratification au contact est un procédé entièrement manuel de mise en forme de plastiques renforcés, à température ambiante et sans pression. Ce procédé est le premier à avoir été employé pour le moulage des résines polyesters insaturés renforcées.

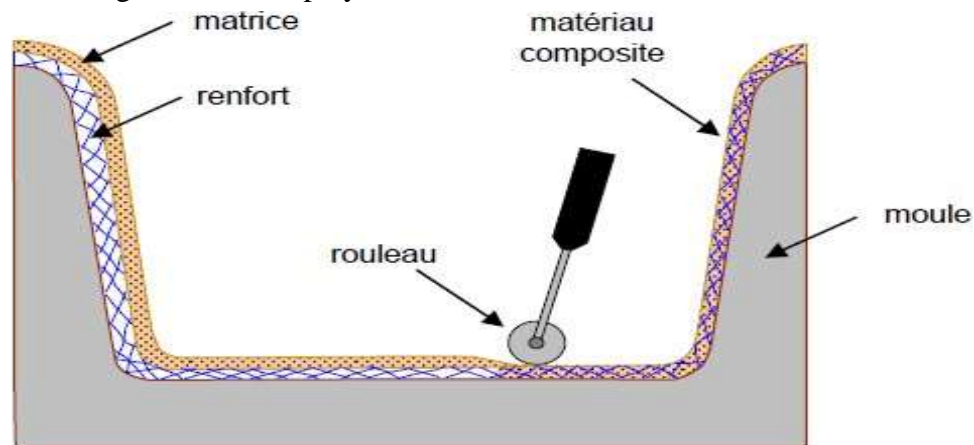
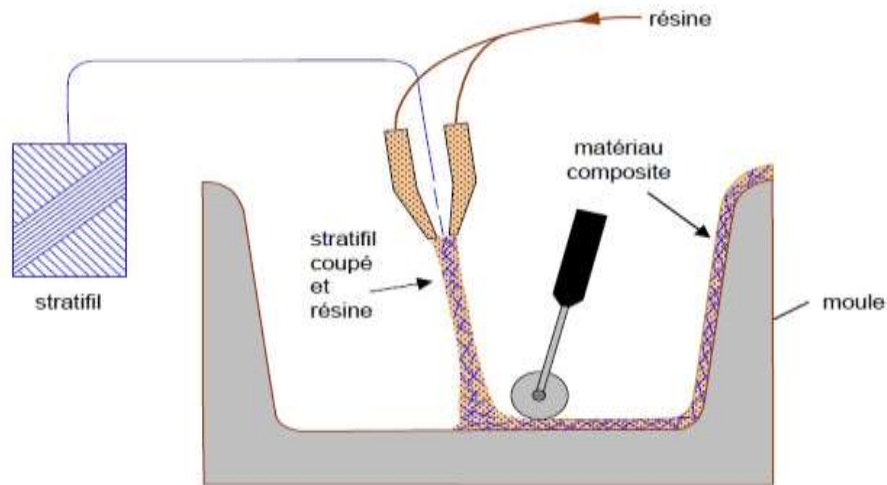


Figure I.9 : Principe du moulage au contact [5].

❖ Moulage par projection simultanée :

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

- Un dispositif de coupe - projection du renfort (fibre)



- Un ou deux pistolets projetant simultanément la résine

Figure I.10 : Principe du moulage par projection simultanée.

❖ Moulage sous vide :

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

Le renfort est placé à l’intérieur du moule ; la résine catalysée est versée sur le renfort. On utilise la pression qui s’exerce sur le moule lors de la mise sous vide pour répartir la résine et imprégner le renfort. La résine peut également être injectée par l’aspiration consécutive au vide. Le tableau suivant représente les avantages et les inconvénients du moulage sous vide.

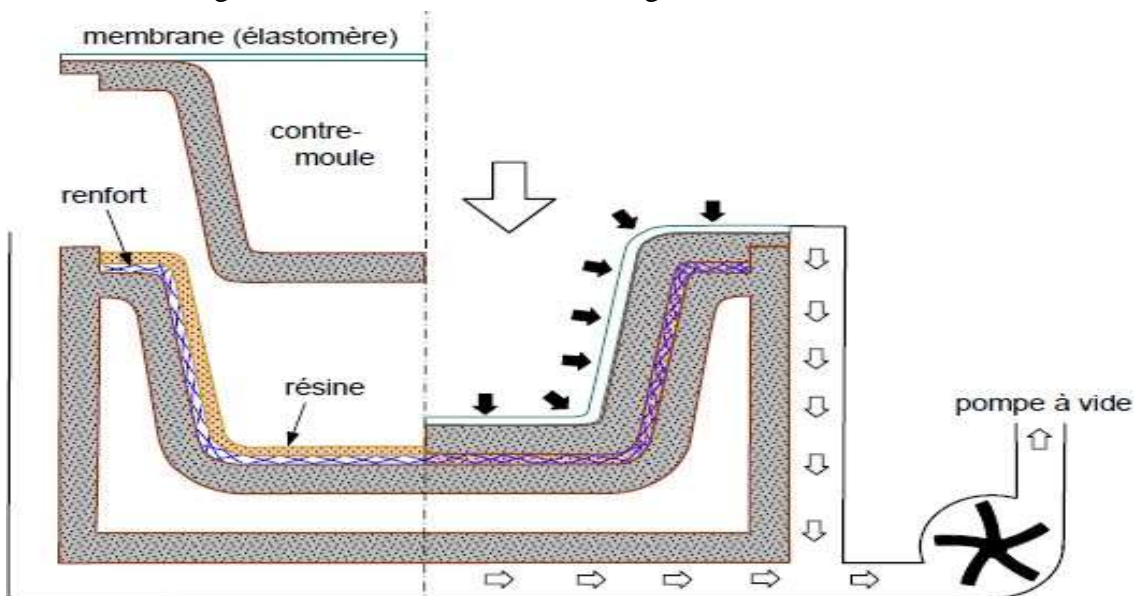


Figure I.11 : Moulage sous vide [5].

Avantages	Limites
Deux faces lisses éventuellement gel-coatés. Qualité constante Bonne cadence de production Nécessite peu de surface Investissement très modéré (moule, pompes à vide) Bonnes conditions de travail et d'hygiène.	Possibilité de forme plus réduite qu'au contact Mise au point parfois difficile.

Tableau (I-5) : Les avantages et les inconvénients du moulage sous vide.

❖ Moulage par centrifugation :

Le moulage par centrifugation est un procédé de mise en forme par moulage de pièces en matériaux plastiques et surtout composites sous forme de cylindres creux. Ces matériaux peuvent être à base de thermoplastiques et surtout de thermodurcissables.

Cette méthode est une extrapolation de la fabrication par centrifugation des tuyaux en fonte ou en béton

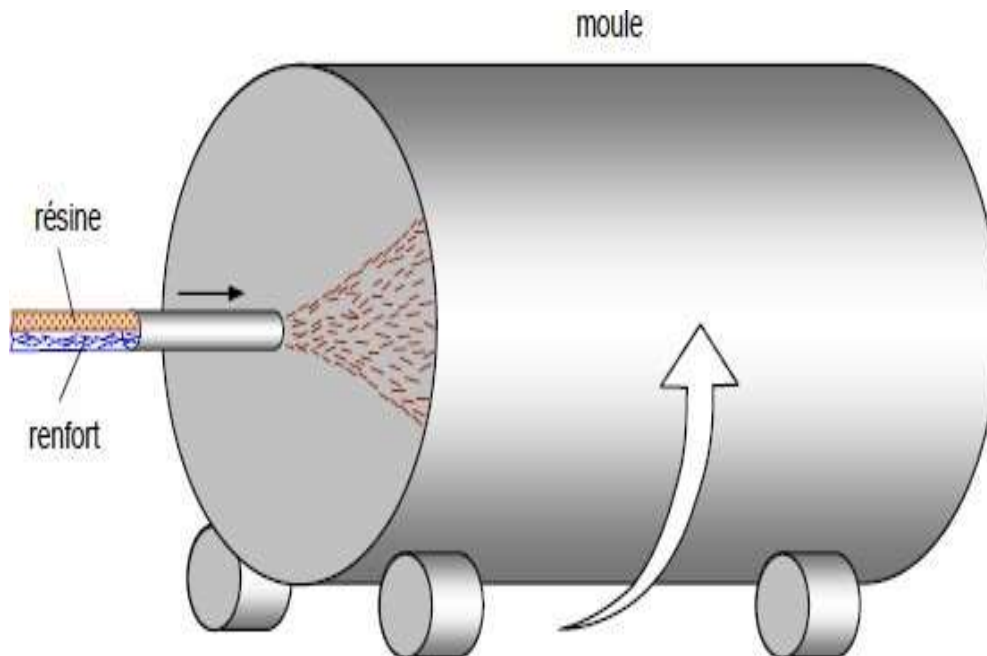


Figure I.12 : Principe de moulage par centrifugation [5].

I.5. Structure des matériaux composites :

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types

- Les monocouches
- Les stratifiées

➤ Les sandwichs

I.5.1. Les monocouches:

Les monocouches sont les éléments de base des structures composites. Des fibres unidirectionnelles placées dans le plan médian sont emprisonnées dans une matrice polymère. Ils sont caractérisés par le type de renfort utilisé : des fibres longues (unidirectionnelles ou non), courtes, sous forme de tissus, de rubans [8]

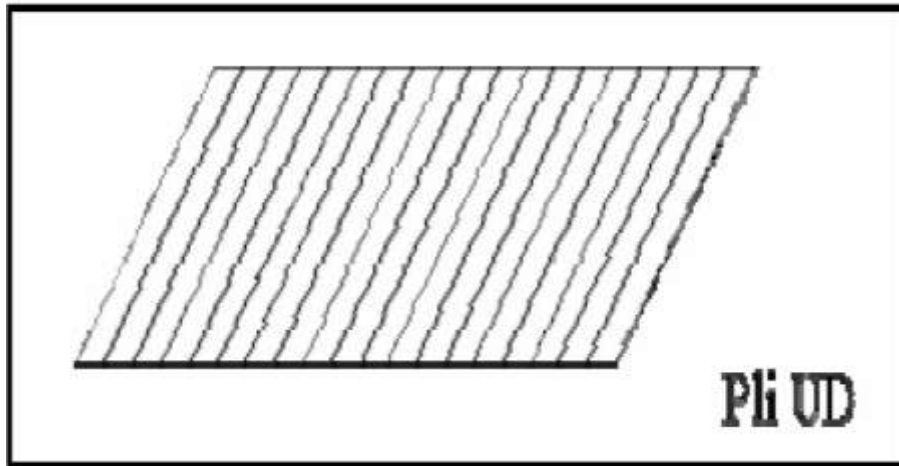


Figure I.13. : Composite monocouche.

I.5.2. Les Stratifiés :

On appelle stratifier un matériau composé d'un ensemble ordonné de couches d'orientation et d'épaisseur données, constituées de divers matériaux (figure I-12). Une couche d'un stratifié est souvent appelée une strate. Le type de stratifié est défini généralement par sa séquence d'empilement, information qui fournit de manière synthétique l'orientation des diverses couches d'un stratifié. L'avantage que présentent les composites stratifiés est de permettre de créer des matériaux aux propriétés mécaniques orientées de manière optimale afin de mieux répondre aux sollicitations de la structure [8]

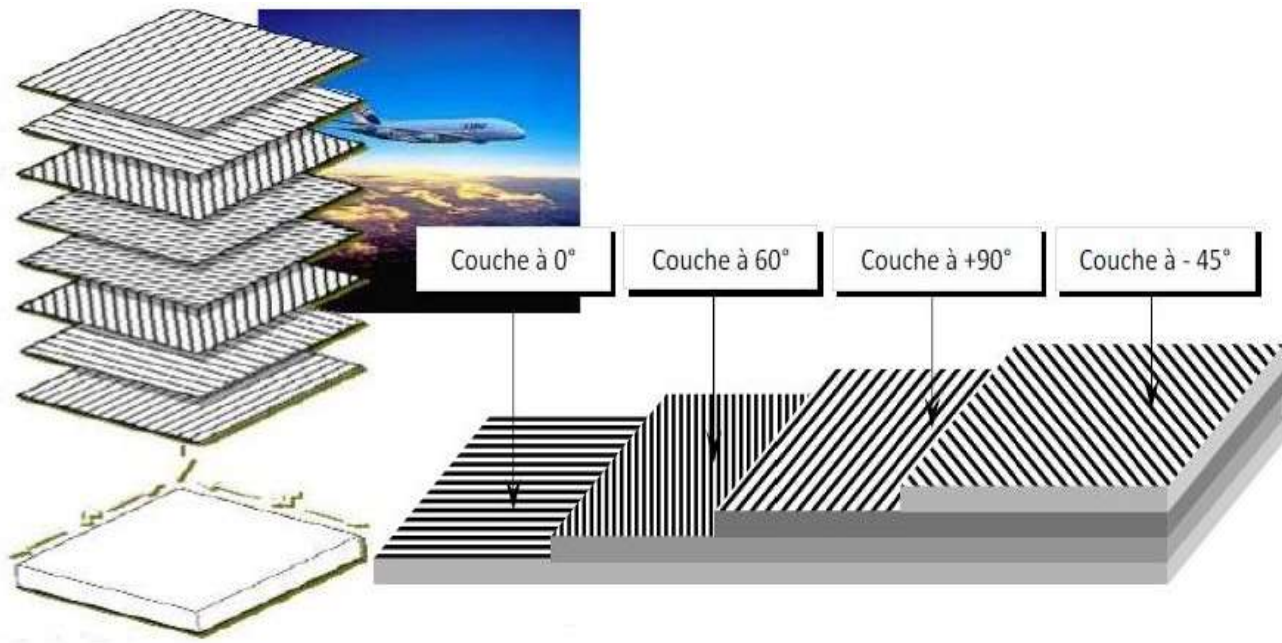


Figure I.14 : Plaque stratifiée.

I.5.3. Sandwichs :

Les structures composites subissant des sollicitations de type flexion ou torsion sont généralement construites en matériaux sandwichs. Une structure sandwich est composée d'une âme et de deux peaux en matériaux composites. L'assemblage est réalisé par collage à l'aide d'une résine compatible avec les matériaux en présence. Les âmes les plus utilisées sont de type nid d'abeilles, âme ondulée ou mousse. Les peaux sont généralement constituées de structures stratifiées. Une âme nid d'abeilles est présentée sur la figure II.12.

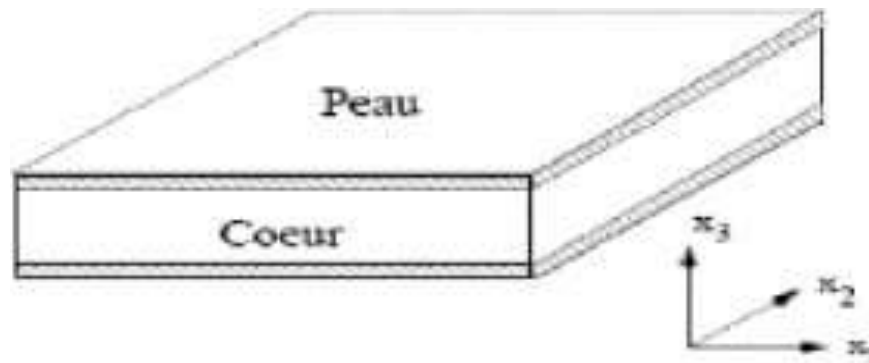


Figure I.15 : Composite sandwich.

I.6. Les domaines d'utilisation :

Les matériaux composites de nos jours prennent une place prépondérante dans différents domaines :

➤ Électricité et électronique,

Bâtiment et travaux publics,

➤ Transports routiers, ferroviaires, maritimes, aériens et spatiaux (notamment militaire.)

Santé (instrumentation médicale), [9].

I.7. La loi de mélange pour les composites stratifiés :

Les déformations des matériaux homogènes et isotropiques peuvent être décrites assez simplement à l'aide des modules d'élasticité et des contraintes de déformation, qui sont les propriétés de base des matériaux bruts. Dans le cas des composites, chaque élément joue un rôle différent et c'est l'association de ces propriétés qui confère au matériau final ses caractéristiques propres. Bien que ces caractéristiques finales soient le résultat d'interactions complexes entre le renfort et la matrice, il est possible d'en donner une estimation simple à l'aide de la Loi des Mélanges [7] appliquée aux composites stratifiés :

$$Pc = \rho_c \times Vc = \rho_f \times Vf + \rho_m \times Vm$$

Où

$$(Vf + Vm) = 1 \quad \text{(I-1)}$$

Avec :

Vf : fraction volumique de fibres

Vm : fraction volumique de matrice

Pc : poids estimé du composite

ρf : masse volumique de la fibre

ρm : masse volumique de la matrice

Il s'agit de valeurs théoriques, en réalité la présence de vides fait que $Vf + Vm \leq 1$. Par exemple, le module d'élasticité en traction peut être estimé en se basant sur les modules respectifs de la fibre et de la matrice. Cette équation peut être modélisée par un système de ressorts associés en parallèle Figure (I-13).

$$E_c = E_f \times Vf + E_m \times Vm \quad \text{(I-2)}$$

Avec :

E_c : module d'élasticité en traction estimé du composite

E_f : module d'élasticité en traction de la fibre

E_m : module d'élasticité en traction de la matrice

V_f : fraction volumique de fibres

V_m : fraction volumique de matrice

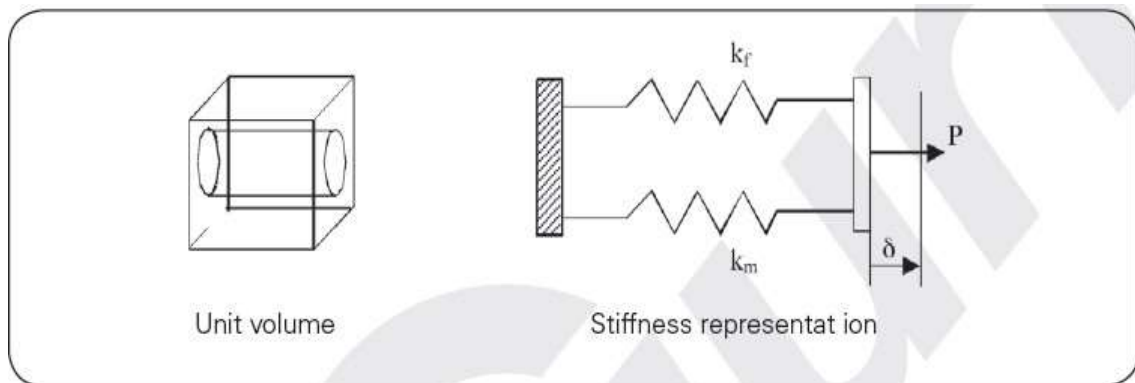


Figure I.16 : Modélisation par un système de ressorts des propriétés en traction d'un composite stratifié.

I.8. TRAVAUX EFFECTUE:

- J. Fitoussi et al ont étudié le comportement mécanique à l'endommagement des matériaux composites sous sollicitations dynamiques. Une gamme de vitesse de déformation a été appliquée de l'ordre de 200/s à deux familles de matériaux composites : le SMCR26 et un stratifié constitué d'un tissu de 5 plis de fibres de carbone et de matrice époxy. Cette étude vise à minimiser l'amplitude des perturbations de mesures afin d'obtenir un champ de contrainte et de déformation homogène et une vitesse de déformation constante dans l'éprouvette testée. [10]
- T. Lorient et al ont proposé une méthode simple permettant de prédire l'amorçage du délaminage au bord des structures stratifiées. Cette dégradation est due à la présence au voisinage des bords des contraintes interlaminaires hors plan, dont le calcul est réalisé à partir du logiciel CLEOPS couplé à un modèle d'endommagement intralaminare. Des essais d'amorçage du délaminage réalisés en traction et en compression sur des empilements de référence ont permis de mettre en évidence l'influence de la contrainte normale interlaminaire sur l'amorçage du délaminage. Une formulation du critère en accord avec ces observations est proposée. L'identification des paramètres intrinsèques au matériau à partir des résultats d'essais permet par la suite l'utilisation du critère. Enfin, la validation de la formulation consiste à confronter les prédictions du critère aux contraintes d'amorçage obtenues expérimentalement sur d'autres empilements. [11]
- R. Zenasni et al ont mené une étude expérimentale sur l'influence combinée de l'humidité et la température sur la résistance au délaminage de deux matériaux composites à matrice thermoplastique renforcée par tissu de verre (ST220 tissu 2/2 Twill et SS303 (8H Satin)). Les deux composites ont

été soumis dans une chambre climatique à une température de 70 °C et un taux d'humidité relative de 95 % HR durant des périodes d'exposition de 0, 60 et 120 jours. Les essais à la rupture ont été réalisés sur des éprouvettes de type DCB en mode

- I. Les valeurs critiques de l'énergie de délaminage ont été calculées selon la théorie des poutres corrigées. Les résultats des essais en mode I ont montré que le tissu SS303 améliore sa résistance à la rupture interlaminaire par rapport à l'état initial. La diminution de l'énergie de rupture est plus importante pour le matériau ST 220. Par l'application des plans d'expériences ils ont présenté un modèle mathématique décrivant non seulement l'énergie de délaminage, mais il montre aussi l'interaction des paramètres influents. [12]
- N. Baral et al. ont procédé à la caractérisation expérimentale de la rupture interlaminaire en mode I et à la traction transversale d'un composite unidirectionnel de matrice époxy renforcée par des fibres de carbone. Le composite est utilisé dans la fabrication des bateaux de loisirs. Le module de Young de la fibre varié de 380 à 640 GPa. L'analyse des résultats expérimentaux montre que la résistance à la délamination G_{Ic} et G_{Ip} et la déformation transversale à la rupture diminuent en fonction de l'augmentation du module de la fibre. Le composite fabriqué à base de fibre de module élevé montre une déformation transversale supérieure par rapport au composite de module bas. Plusieurs mécanismes de rupture ont été observés dans le matériau de module élevé. Le test de traction transversale permet d'estimer un module de Young de l'ordre de 11.5 GPa pour le PAN et de 9 GPa pour le faible. [13]
- F. Zaixia et al. ont étudié l'influence du type de tissage sur la résistance à la traction d'un composite de matrice le polypropylène renforcée par des fibres de verre en forme de tissu. Le coefficient de précontrainte est défini comme le rapport de la rigidité et la contrainte à la traction. En augmentant ce rapport, la rigidité et la résistance augmentent. La déformation à la rupture du composite diminue en augmentant le rapport de précontrainte. [14]
- Ji, F.S, Dharani, L.R.et Mall,S. ont développé un modèle analytique, basé sur le principe de l'énergie potentielle minimale pour la détermination des propriétés thermo élastique bidimensionnels d'un composite contenant plusieurs fissures transversales régulièrement espacées dans les plis, orientés à 90° et sollicité à un chargement de traction selon la direction longitudinale. Le modèle fourni les résultats des déplacements et des contraintes pour le calcul du taux de restitution de l'énergie de déformation. Le modèle analytique prend en compte les effets des contraintes résiduelles. [15]

CHAPITRE II :

FORMULATION ANALYTIQUE DU

COMPORTEMENT DES PLAQUES TROUÉES

EN MATÉRIAUX COMPOSITES

Formulation analytique du comportement des plaques trouées en matériaux composites.

L'assemblage d'éléments composites sur une structure nécessite souvent la réalisation de trous destinés à recevoir des boulons ou des rivets ou pour le passage des câbles électriques et téléphoniques. Pour différentes raisons pratiques, la présence d'un trou conduit à un affaiblissement de la structure en raison de la sur-contrainte locale appelée concentration des contraintes.

L'orientation des fibres des couches et leur caractère orthotrope rajoutent de nouveaux paramètres qui influent sur la distribution des contraintes autour du trou. Le facteur de concentration des contraintes ne sera plus constant ou fonction seulement des dimensions géométriques mais aussi fonction des caractéristiques mécaniques du matériau.

Dans cette étude, nous allons présenter une étude théorique [16], visant l'analyse de la concentration des contraintes autour d'un trou circulaire et elliptique dans une plaque en matériau isotrope dans le premier cas puis une plaque en matériau composite pour le deuxième cas d'étude.

II.1. Etude du comportement des plaques trouée en matériau isotrope.

L'étude théorique des plaques trouées en matériaux isotropes est considérée comme une étude préliminaire de l'étude du matériau composite. Le but étant de montrer la différence entre les deux comportements des matériaux isotropes et composites. Plusieurs travaux de recherche ont traité le cas des plaques isotropes rectangulaires munies de trou circulaire et sollicitées en traction simple

Ces études analytiques comparées à d'autres numériques présentent des résultats similaires. En effet, elles indiquent que les contraintes ne sont pas homogènes au voisinage du trou et que ce champ de contrainte peut être considéré homogène loin du trou. Le facteur de concentration de contrainte (FCC) est défini par le rapport de la contrainte maximale σ_m et la contrainte nominale loin du trou σ_0^* (Figure II.1).

II.2. Etude du comportement des plaques munies d'un trou circulaire.

Le but de cette partie est de présenter l'effet de la présence du trou circulaire sur le comportement mécanique des plaques trouées en matériaux isotropes avec la sollicitation de traction et de compression pure. Afin d'analyser le phénomène de concentration des contraintes par la détermination de la distribution du facteur de concentration des contraintes autour et loin du trou circulaire on applique la théorie d'élasticité plane et on utilise les contraintes d'Airy. Soit une plaque munie d'un trou circulaire

centrée de rayon R et soumise à ces deux extrémités à un état de traction simple (Figure II.1). L'axe du trou est e_3 et la direction de la traction est e_1 . Les dimensions de la plaque sont supposées suffisamment grandes par rapport au rayon du trou et les forces volumiques sont négligeables. On considère l'hypothèse de l'état de contraintes planes. L'état de contrainte loin du trou n'est pas affecté par la présence du trou et peut donc être assimilé à l'état homogène suivant :

$$\sigma^\infty = \sigma^\infty e_1 \otimes e_1 \tag{1}$$

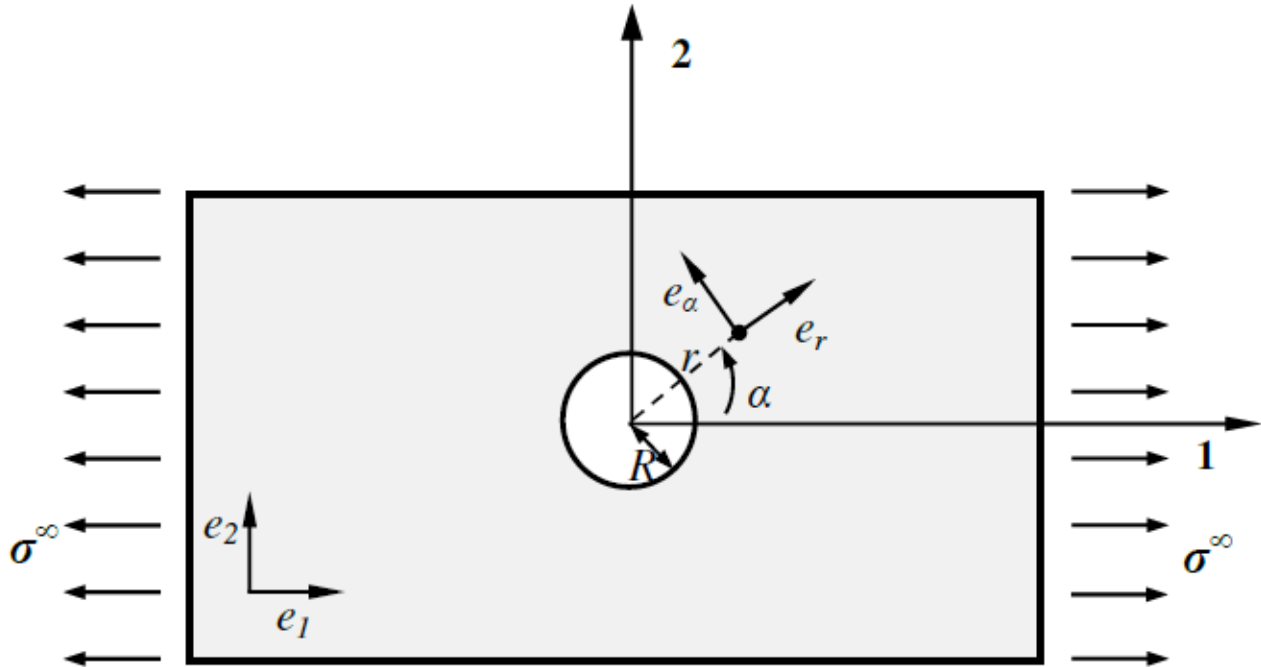


Figure II.1 : Traction d'une plaque isotrope élastique munie d'un trou circulaire.

Un système de coordonnées polaire $(0, r, \alpha)$ est adopté, 0 étant le centre du trou, l'angle α étant mesuré par rapport l'axe e_1

II.2.1. Champ des contraintes loin du trou.

En substituant $e_1 = \cos \alpha e_r - \sin \alpha e_\alpha$ dans l'état de contrainte (3.1) on déduit la relation

Suivante :

$$\sigma^\infty = \frac{\sigma^\infty}{2} \left\{ (1 + \cos 2\alpha) e_r \otimes e_r + (1 - \cos 2\alpha) e_\alpha \otimes e_\alpha - \sin 2\alpha \left(e_{cc} e_{cc} + e_{cc} \otimes e_r \right) \right\} \tag{2}$$

⊗: Produit tensorial

Soit :

$$\begin{cases} \sigma_{rr}^{\infty} = \frac{\sigma^{\infty}}{2} (1 + \cos(2\alpha)) \\ \sigma_{\alpha\alpha}^{\infty} = \frac{\sigma^{\infty}}{2} (1 - \cos(2\alpha)) \\ \sigma_{r\alpha}^{\infty} = -\frac{\sigma^{\infty}}{2} \sin(2\alpha) \end{cases} \quad (3)$$

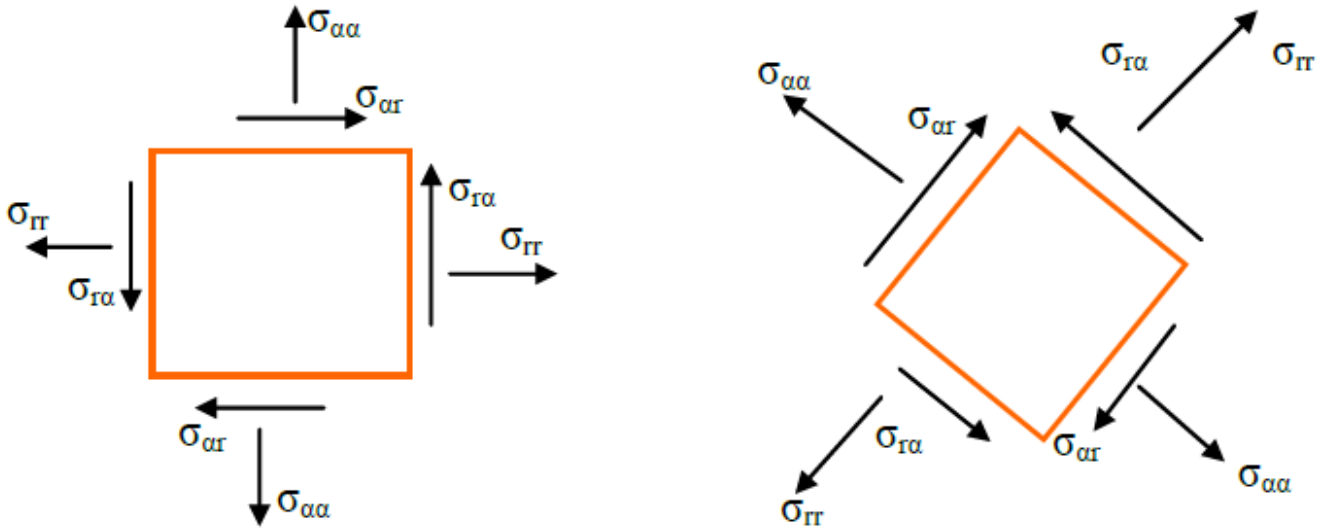


Figure II.2 : Présentation schématique des différentes contraintes (contraintes tangentielle $\sigma_{\alpha\alpha}$, contrainte radiale σ_{rr} , contrainte de cisaillement $\sigma_{r\alpha}$).

II.2.2. Champ des contraintes

On considère que les forces de volume sont nulles, Pour déterminer les fonctions $\sigma_{rr}, \sigma_{\alpha\alpha}, \sigma_{r\alpha}$ on cherche la fonction $\phi(r, \alpha)$ dite la fonction d'Airy tel que :

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2}\right) \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \alpha^2}\right) = 0 \quad (4)$$

et le champ des contraintes est donné par :

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \alpha^2} \\ \sigma_{\alpha\alpha} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} \\ \sigma_{r\alpha} = -\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \alpha}\right) \end{cases} \quad (5)$$

La solution générale de cette équation différentielle (3.4) est donnée par :

$$\phi(r, \alpha) = A \log r + Br^2 \log r + Cr^2 + (A_2 r^2 + B_2 r^4 + \frac{C_2}{r^2} + D_2) \cos 2\alpha \quad (6)$$

Où $A, B, C, A_2, B_2, C_2, D_2$ sont des constantes à déterminer en considérant les conditions aux limites.

L'expression générale du champ de contraintes sera donc :

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \frac{A}{r^2} + 2B \log r + B + 2C - (2A_2 + \frac{6C_2}{r^4} + \frac{4D_2}{r^2}) \cos(2\alpha) \\ \sigma_{\alpha\alpha} = -\frac{A}{r^2} + 2B \log r + 3B + 2C + (2A_2 + 12B_2 r^2 + \frac{6C_2}{r^4}) \cos(2\alpha) \\ \sigma_{r\alpha} = (A_2 + 3B_2 r^2 - \frac{3C_2}{r^4} - \frac{D_2}{r^2}) 2 \sin(2\alpha) \end{cases} \quad (7)$$

Loin du trou, lorsque r est grand, le champ précédent prend la forme :

$$\begin{cases} \sigma_{rr}^{\infty} = 2B \log r + B + 2C - 2A_2 \cos(2\alpha) \\ \sigma_{\alpha\alpha}^{\infty} = 2B \log r + 3B + 2C + (2A_2 + 12B_2 r^2) \cos(2\alpha) \\ \sigma_{r\alpha}^{\infty} = 2 \sin(2\alpha)(A_2 + 3B_2 r^2) \end{cases} \quad (8)$$

L'identification entre ce champ et celui de la traction simple (3.2) et (3.3) permet de déterminer les constantes suivantes : $B = 0$, $C = \frac{\sigma^{\infty}}{4}$, $A_2 = -\frac{\sigma^{\infty}}{4}$, $B_2 = 0$,

En remplaçant les constantes dans l'équation (3.7) on obtient :

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \frac{A}{r^2} + \frac{\sigma^{\infty}}{2} + \left(\frac{\sigma^{\infty}}{2} - \frac{6C_2}{r^4} - \frac{4D_2}{r^2} \right) \cos(2\alpha) \\ \sigma_{\alpha\alpha} = -\frac{A}{r^2} + \frac{\sigma^{\infty}}{2} + \left(\frac{\sigma^{\infty}}{2} - \frac{6C_2}{r^4} \right) \\ \sigma_{r\alpha} = 2 \sin 2\alpha + \left(-\frac{\sigma^{\infty}}{4} - \frac{3C_2}{r^4} - \frac{D_2}{r} \right) \end{cases} \quad (9)$$

Après prise en compte des conditions à la frontière :

$$\begin{cases} \sigma_{rr}(r = R) = \frac{A}{R^2} + \frac{\sigma^{\infty}}{2} + \left(\frac{\sigma^{\infty}}{2} - \frac{6C_2}{R^4} - \frac{4D_2}{R^2} \right) \cos(2\alpha) = 0 \\ \sigma_{r\alpha}(r = R) = \left(-\frac{\sigma^{\infty}}{4} - \frac{3C_2}{R^4} - \frac{4D_2}{R^2} \right) 2 \sin(2\alpha) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

On obtient : $D_2 = \frac{\sigma^{\infty}}{2} R^2$, $A = -R^2 \frac{\sigma^{\infty}}{2}$, $C_2 = -R^4 \frac{\sigma^{\infty}}{4}$

Finalement le champ de contraintes identifiées est :

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \frac{\sigma^{\infty}}{2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma^{\infty}}{2} \left(1 + \frac{3R^4}{r^4} - \frac{4R^2}{r^2} \right) \cos(2\alpha) \\ \sigma_{\alpha\alpha} = \frac{\sigma^{\infty}}{2} \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma^{\infty}}{2} \left(1 + \frac{3R^4}{r^4} \right) \cos(2\alpha) \\ \sigma_{r\alpha} = -\frac{\sigma^{\infty}}{4} \left(1 - \frac{3R^4}{r^4} + \frac{2R^2}{r^2} \right) \sin(2\alpha) \end{cases} \quad (11)$$

La fonction de contraintes sera donc :

$$\phi(r, \alpha) = -\frac{\sigma^{\infty}}{2} R^2 \log r + \frac{\sigma^{\infty}}{4} r^2 + \frac{\sigma^{\infty}}{4} \left(-r^2 + 2R^2 - \frac{R^4}{r^2} \right) \cos(2\alpha) \quad (12)$$

Le champ des contraintes trouvé indique que les contraintes ne sont pas homogènes au voisinage du trou et que ce champ de contraintes peut être considéré homogène que loin du trou de la plaque trouée en sollicitation de traction à ces extrémités.

La décroissance rapide en $1/r^2$ du champ de contraintes assure que ces hétérogénéités se développent seulement au voisinage du trou.

II.2.3 Facteur de concentration des contraintes (FCC).

Soit K_t le facteur de concentration de contrainte défini par le rapport de la contrainte maximale et la contrainte nominale σ^∞ appliquée loin du trou.

$$K_t = \frac{\sigma^{max}}{\sigma^\infty} \quad (13)$$

En particulier, au bord du trou

$$(r = R) : \begin{cases} \sigma_{rr}(r = R) = 0 \\ \sigma_{\alpha\alpha}(r = R, \alpha) - \sigma^\infty (1 - \cos(2\alpha)) \\ \sigma_{r\alpha}(r = R) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

Dans ce cas le FCC sera donné par :

$$K_t = \frac{\sigma_{\alpha\alpha}(r=R)}{\sigma^\infty} = 1 - 2 \cos(2\alpha) \quad (15)$$

On distingue alors deux situations :

Situation de traction : la contrainte $\sigma_{\alpha\alpha}$ est maximale dans l'emplacement au bord du trou en $\alpha = \pm\pi/2$ et vaut trois fois la contrainte appliquée. Le facteur de concentration de contraintes vaut donc 3 et la contrainte $\sigma_{\alpha\alpha}$ est minimale dans l'emplacement au bord du trou en $\alpha = 0$ et $\alpha = \pi$ où elle vaut- σ^∞

II.3. Etude du comportement des plaques trouées en matériaux composites0

Plusieurs travaux de recherche s'accordent sur l'inexistence de la solution analytique dans le cas des plaques trouées en matériaux composites et ils présentent ainsi des formules approchées ou empiriques des distributions du facteur de concentration des contraintes au bord et loin du trou circulaire et elliptique.

Tan S.C.et Al a étudié le problème de concentration des contraintes des plaques de largeur finie pour les matériaux isotropes et orthotropes munis d'un trou circulaire et elliptique, afin de déterminer des solutions analytiques approchées du facteur de correction de la largeur finie (FWC) dans la solution

de la plaque infinie. Il a montré que l'augmentation du rapport (diamètre du trou / largeur de la plaque) fait augmenter le facteur de concentration des contraintes.

Les travaux de H. Murat Arslan étudient l'influence des paramètres de l'orientation des fibres et le rapport d'anisotropie (E_1/E_2) sur la variation du facteur de concentration des contraintes autour du trou en utilisant les solutions analytiques de Green-Zerna, pour les cas de sollicitations de traction et de cisaillement.

Whitney, J.M. et Nuismer, R.J., proposent une méthode semi-empirique employée pour déterminer la contrainte à la rupture des plaques stratifiées trouées afin de calculer les distances caractéristiques du matériau d_0 et a_0 .

Kaltakci et al ont étudié la concentration des contraintes dans les plaques stratifiées trouées en utilisant les solutions approchées analytiques de Green-Zerna. Cette étude consiste à présenter l'effet de l'orientation des fibres des couches sur la variation du facteur de concentration des contraintes au bord du trou circulaire.

Les travaux de Sharma, D.S et al, Yao Weixing se basent sur la résolution des équations de la méthode de variable complexe de Lekhnitskii dans le but de déterminer le champ des contraintes au bord des différentes singularités géométriques et de déterminer l'effet du chargement biaxial sur le comportement des plaques trouées.

Lotfi Toubal et al présentent une étude des plaques composites trouées avec la comparaison entre les différentes méthodes de calcul analytique et numériques par la modélisation par éléments finis et par le calcul du champ de déformation obtenu par le système ESPI "électronique speckle pattern interferometer".

Les travaux de B.Vieille et al , ceux Catherine Bewerse et al et ceux de Sourya D et al [61] étudient le problème de la concentration des contraintes dans les plaques trouées en matériaux composites par l'utilisation de l'approche expérimentale de la corrélation des images numériques pour le calcul du champ de déformation et le calcul numérique se fait par la méthode des éléments finis.

Cette étude présente les théories proposées par Lekhnitskii et par Green Zerna pour la détermination du facteur de concentration des contraintes (FCC) dans le cas des plaques trouées en matériaux composites. Ceci sera suivie par l'analyse de l'influence de certains paramètres sur le FCC dans les plaques munies d'un trou circulaire et elliptique, tels que :

1. La taille du trou.

2. L'orientation des fibres.
3. Le rapport d'anisotropie (E_1/E_2).
4. Le chargement biaxial (q/p).

II.4. Etude du comportement des plaques composites munies d'un trou circulaire.

II.4.1. Fonction d'Airy

La détermination de la distribution du champ de contrainte en élasticité plane peut-être ramenée à la recherche d'une fonction d'Airy [17], notée ϕ telle que en l'absence des forces volumiques, les contraintes sont données par :

$$\sigma_{xx} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2}, \sigma_{yy} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2}, \sigma_{xy} = -\frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} \quad (16)$$

En substituant le rapport de (contrainte-déformation plane) d'un matériau orthotrope et utilisation des équations de compatibilité et en exprimant les composantes des contraintes en fonction du terme de la fonction d'Airy on obtient :

$$Q_{22} \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} - 2Q_{26} \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^3 \partial y} + (2Q_{12} + Q_{66}) \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^2 \partial y^2} - 2Q_{16} \frac{\partial^4 \phi}{\partial x \partial y^3} + Q_{11} \frac{\partial^4 \phi}{\partial y^4} = 0 \quad (17)$$

II.4.2 Fonction de variable complexe.

La résolution de l'équation (3.41) peut être exprimée sous la forme d'une fonction de la forme : $F(x + \mu y)$

Les valeurs de μ sont données par l'équation suivante :

$$Q_{11}\mu^4 - 2Q_{16}\mu^3 + (2Q_{12} + Q_{66})\mu^2 - 2Q_{26}\mu + Q_{22} = 0 \quad (18)$$

Dans le cas d'un stratifié équilibré, l'équation caractéristique (3.41) se réduit à :

$$Q_{11}\mu^4 + (2Q_{12} + Q_{66})\mu^2 + Q_{22} = 0 \quad (19)$$

et dans le cas d'un stratifié symétrique, l'équation caractéristique (3.41) devient :

$$Q_{11}\mu^4 + (2Q_{12} + Q_{66})\mu^2 + Q_{11} = 0 \quad (20)$$

Lekhnitskii et al a prouvé par des considérations énergétiques que cette équation avait seulement des racines complexes. Les racines sont conjuguées deux à deux et peuvent s'écrire sous la forme :

$$\mu_1 = a + ib, \mu_2 = c + id, \mu_3 = \bar{\mu}, \mu_4 = \bar{\mu}.$$

Le problème consiste donc à trouver deux fonctions $F_1(x + \mu_1 y)$ et $F_2(x + \mu_2 y)$ telle que :

$$\phi = 2 \operatorname{Re} [F_1(x + \mu_1 y) + F_2(x + \mu_2 y)] \quad (21)$$

Avec : $z_1 = x + \mu_1 y$, $z_2 = x + \mu_2 y$

D'après les équations (3.38) et (3.44) les relations entre les contraintes en fonction de F_1 et F_2 s'écrivent :

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = 2 \operatorname{Re} [\mu_1^n F_1^n + \mu_2^n F_2^n] \\ \sigma_{yy} = 2 \operatorname{Re} [F_1^n + F_2^n] \\ \sigma_{xy} = [\mu_1 F_1^n + \mu_2 F_2^n] \end{cases} \quad (22)$$

Avec $F_1^n = \frac{d^2 F_1}{dz_1^2}$ et $F_2^n = \frac{d^2 F_2}{dz_2^2}$

Comme pour les matériaux isotropes, au lieu de chercher les fonctions $F_1(z_1)$ et $F_2(z_2)$ nous

Utilisons les fonctions $\varphi(z_1)$ et $\psi(z_2)$ telles que :

$$\begin{cases} \varphi(z_1) = F_1'(z_1) \\ \psi(z_2) = F_2'(z_2) \end{cases} \quad (23)$$

et $F_1'(z_1) = \frac{dF_1}{dz_1}$, $F_2'(z_2) = \frac{dF_2}{dz_2}$, $\varphi'(z_1) = \frac{d\varphi(z_1)}{dz_1}$, $\psi'(z_2) = \frac{d\psi(z_2)}{dz_2}$

Les relations entre les contraintes et les fonctions φ et ψ s'écrivent donc :

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = 2 \operatorname{Re} [\mu_1^2 \varphi' + \mu_2^2 \psi'] \\ \sigma_{yy} = 2 \operatorname{Re} [\varphi' + \psi'] \\ \sigma_{xy} = 2 \operatorname{Re} [\mu_1^2 \varphi' + \mu_2^2 \psi'] \end{cases} \quad (24)$$

Le problème revient finalement à trouver deux fonctions $\varphi(z_1)$ et $\psi(z_2)$. Le champ de contrainte obtenu à partir de ces fonctions (3.47) vérifie les équations d'équilibre et de compatibilité. C'est donc les conditions aux limites qui permettent de déterminer φ et ψ [31]. Le champ de déplacement, sans mouvement rigide du corps, peut être déterminé à partir de 1^{ère} équation suivante :

$$\begin{cases} u = 2 \operatorname{Re} [P_1 \varphi_1(z_1) + p_2 \psi] \\ v = 2 \operatorname{Re} [q_1 \varphi_1(z_1) + q_2 \varphi_2 \psi] \end{cases} \quad (25)$$

Avec : $p_j = Q_{11} \mu_j^2 + Q_{12} - Q_{16} \mu_j$ et $q_j = Q_{12} \mu_j + \frac{Q_{22}}{\mu_j} - Q_{26}$ pour $(j = 1, 2)$

Dans le cas des matériaux isotropes, les racines μ_1 et μ_2 seraient égales à $i = \sqrt{-1}$ et les fonctions des contraintes (fonctions Airy) peuvent alors être décrites en utilisant le nombre complexe \bar{z} .

$$\phi = 2 \operatorname{Re} [F_1(z_1) + \bar{z}_1 F_2(z_1)] \quad (26)$$

L'équation caractéristique suivante :

$$\mu^4 + \left(\frac{E_1}{G_{12}} - 2\nu_{12}\right)\mu^2 + \frac{E_1}{E_2} = 0 \quad (27)$$

En utilisant la méthode de collocation de frontière, les principales racines de l'équation caractéristique (3.50) peuvent être données par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} \mu_1 = \frac{i}{2} \left[\sqrt{\frac{E_1}{G_{12}} - 2\nu_{12} + 2\sqrt{\frac{E_1}{E_2}}} + \sqrt{\frac{E_1}{G_{12}} - 2\nu_{12} - 2\sqrt{\frac{E_1}{E_2}}} \right] \\ \mu_2 = \frac{i}{2} \left[\sqrt{\frac{E_1}{G_{12}} - 2\nu_{12} + 2\sqrt{\frac{E_1}{E_2}}} - \sqrt{\frac{E_1}{G_{12}} - 2\nu_{12} - 2\sqrt{\frac{E_1}{E_2}}} \right] \end{cases} \quad (28)$$

Il y a trois cas possibles du paramètre g défini par :

$$g = \sqrt{\frac{E_1}{G_{12}} - 2\nu_{12} + 2\sqrt{\frac{E_1}{E_2}}} \quad (29)$$

Pour $g > 0$: Les racines seront inégales et purement imaginaires.

Pour $g = 0$: Les deux racines seront égales à i (pour les matériaux isotropes).

Pour $g < 0$: Les racines obéiront à l'équation suivante $\mu_2 = -\bar{\mu}$.

II.4.3 La théorie de Lekhnitskii.

La théorie de Lekhnitskii est choisie pour analyser la distribution des contraintes dans une plaque orthotrope, contenant un trou circulaire de rayon R soumise à la traction uniaxiale de contrainte nominale σ_∞ , et agissant sous un angle β par rapport à l'axe élastique principal de la plaque.

Les dimensions de la plaque sont supposées suffisamment grandes par rapport au rayon du trou (Figure II.3). Les forces de volume sont négligeables, et l'hypothèse d'un état plan de contrainte est considérée dans ce cas.

Dans cet état la contrainte loin du trou ne sera pas affectée par la présence du trou et peut donc être assimilé à un état homogène.

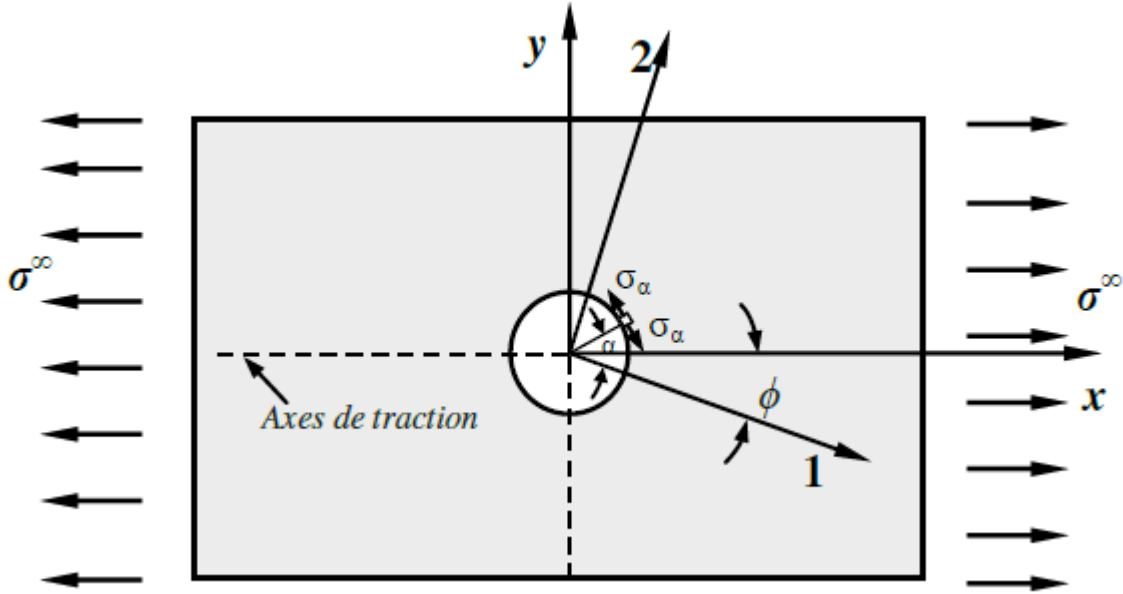


Figure II.3 : Traction d’une plaque orthotrope élastique munie d’un trou circulaire

Selon la théorie Lekhnitskii [18], le facteur de concentration des contraintes peut être exprimé par la formule suivante :

$$K_t^\infty = \frac{\sigma_\alpha}{\sigma^\infty} = \frac{E_\alpha}{E_1} \left\{ \begin{array}{l} [-\cos^2\phi + (m+n)\sin^2\phi R \cos^2\alpha + [(1+n)\cos^2\phi - m\sin^2\phi] \\ \sin^2\alpha - n(1+m+n) \sin\phi \cos\phi \sin\alpha \cos\alpha \end{array} \right. \quad (30)$$

E_α : module d’élasticité dans la direction définie par l’angle α (Figure II.3) donnée par la relation suivante :

$$\frac{E_\alpha}{E_1} = 1 / \left[\sin^4\alpha + \frac{E_1}{E_2} \cos^4\alpha + \frac{1}{4} \left(\frac{E_1}{G_{12}} - 2\nu_{12} \right) \sin^2 2\alpha \right] \quad (31)$$

ϕ : Angle d’application de l’effort de traction par rapport l’axe élastique principale.

α : Angle d’emplacement du facteur de concentration des contraintes.

Les valeurs de m et n sont définies par :

$$m = -\mu_1\mu_2 = \sqrt{\frac{E_x}{E_y}} \quad (32)$$

$$n = -\mu_1\mu_2 = \sqrt{2 \left(\sqrt{\frac{E_x}{E_y}} - 2\nu_{xy} \right) + \frac{E_x}{G_{xy}}} \quad (33)$$

Les caractéristiques élastiques $\{E_x, E_y, G_{xy}, \nu_{xy}, \nu_{yx}\}$ dans le repère de référence (x, y) sont liées aux caractéristiques d'élasticités matérielles $\{E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}, \nu_{21}\}$ par les équations :

$$\begin{cases} E_x = E_1 / \left[\cos^4 \theta + \frac{E_1}{E_2} \sin^4 \theta + \frac{1}{4} \left(\frac{E_1}{G_{12}} - 2\nu_{12} \right) \sin^2 2\theta \right] \\ E_y = E_1 / \left[\sin^4 \theta + \frac{E_1}{E_2} \cos^4 \theta + \frac{1}{4} \left(\frac{E_1}{G_{12}} - 2\nu_{12} \right) \sin^2 2\theta \right] \\ E_x = E_1 / \left[1 + 2\nu_{12} + \frac{E_1}{E_2} - \left(1 + 2\nu_{12} + \frac{E_1}{E_2} - \frac{E_1}{G_{12}} \right) \sin^2 2\theta \right] \\ \nu_{xy} = \frac{E_1}{E_2} \left[\nu_{12} - \frac{1}{4} \left(1 + 2\nu_{12} + \frac{E_1}{E_2} - \frac{E_1}{G_{12}} \right) \sin^2 2\theta \right] \\ \nu_{yx} = \frac{E_1}{E_2} \left[\nu_{12} - \frac{1}{4} \left(1 + 2\nu_{12} + \frac{E_1}{E_2} - \frac{E_1}{G_{12}} \right) \sin^2 2\theta \right] \end{cases} \quad (34)$$

Dans le cas de l'application de la contrainte de traction suivant la direction principale 1 ($\varphi = 0$).

Le facteur de concentration des contraintes est exprimé par :

$$K_t^\infty = \frac{E_\alpha}{E_1} [-m \cos^2 \alpha + (1+n)] \begin{cases} a' = R \left[1 + \frac{\sigma^\infty}{E_1} (1+n) \right] \\ b' = R \left[1 - \frac{\sigma^\infty}{\sqrt{E_1 E_2}} \right] \end{cases} \quad (35)$$

II.4.3.1 Cas de la plaque soumise à l'effort de compression pure.

Pour une plaque soumise à un effort de compression pure parallèle aux axes principale d'élasticité ($\varphi = 0^\circ$), le facteur de concentration de contraintes autour du trou est donné par la relation :

$$K_t^\infty = \frac{E_\alpha}{E} \{ m[1 - \nu_{21}(m+n)] \cos^2 \alpha - (1 - \nu_{21}m + n) \sin^2 \alpha \} \quad (36)$$

Pour les matériaux isotropes :

$$K_t^\infty = -[1 + \nu - 2(1 - \nu) \cos 2\alpha] \quad (37)$$

II.4.3.2 Cas de la plaque soumise à la contrainte de cisaillement.

Pour une plaque orthotrope soumise à un effort de cisaillement (Figure II.4), la distribution du facteur de concentration des contraintes au voisinage du trou est donnée par la formule suivante :

$$K_t^\infty = \frac{E_\alpha}{2E_1} (1 + m + n) + n \cos 2\varnothing \sin 2\alpha + [(1 + m) \cos 2\alpha + m - 1] \sin 2\varnothing \quad (38)$$

Dans le cas où la direction des efforts de cisaillement est parallèle aux axes principaux d'élasticité ($\varphi = 0^\circ$) :

$$K_t^\alpha = \frac{E_\alpha}{2E_1} (1 + m + n) \sin 2\alpha \quad (39)$$

Pour le cas des matériaux isotropes ($\varphi = 0^\circ$) :

$$K_t^\infty = -4 \sin 2\alpha \tag{40}$$

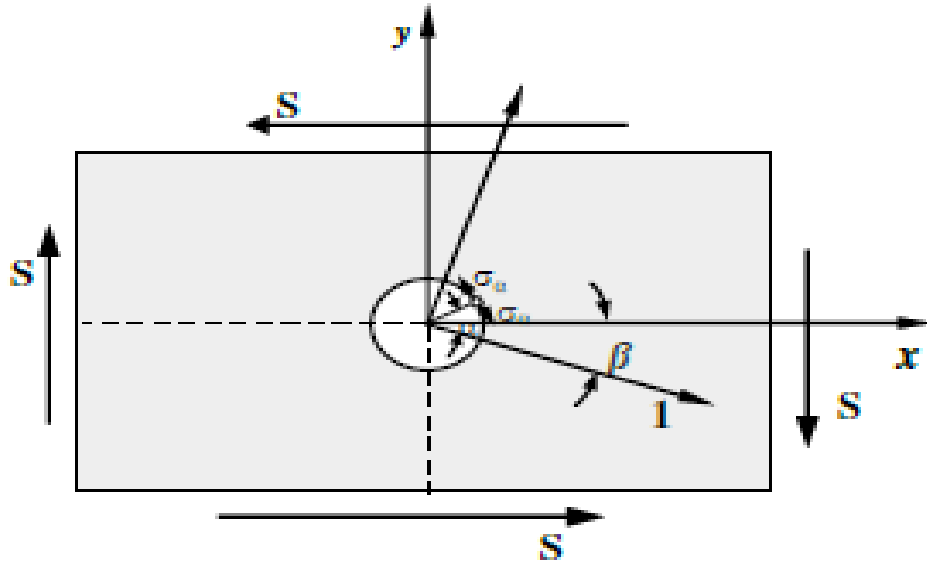


Figure II.4 : Cisaillement d'une plaque orthotrope élastique munie d'un trou circulaire.

II.4.4. Critères de rupture dans les plaques trouées en matériaux composites.

Soit une plaque infinie réalisée par la superposition des couches de fibres unidirectionnelle ayant des orientations différentes, de telle façon que la symétrie miroir soit assurée (Figure II.5). La contrainte uniforme σ^∞ est appliqués dans la frontière de la plaque suivant $1^\dagger axex$.

La méthode semi-empirique proposée par Whitney et al est employée pour déterminer la contrainte à la rupture de la plaque trouée et pour calculer les longueurs caractéristiques d_0 et a_0 .

La contrainte tangentielle σ_y dans la direction de l'axe y devant le trou peut être rapprochée en fonction des coordonnées d'un point sur l'axe des abscisses x par la formule suivante :

$$\sigma_y(x, 0) = \frac{\sigma^\infty}{2} \left\{ 2 + \left(\frac{R}{x}\right)^2 + 3\left(\frac{R}{x}\right)^4 - (1 + n - 3\#5\left(\frac{R}{x}\right)^6 - 7\left(\frac{R}{x}\right)^8) \right\} \tag{41}$$

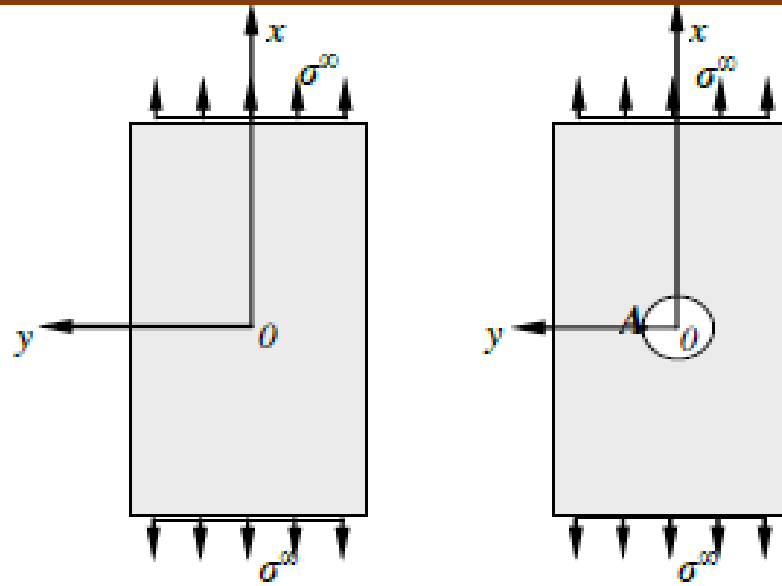


Figure II.5 : Traction des plaques composites avec et sans trou.

CHAPITRE II :

SIMULATION NUMÉRIQUE DU

COMPORTEMENT DES PLAQUES TROUÉES EN

MATÉRIAUX COMPOSITES PAR ANSYS APDL

Simulation numérique du comportement des plaques trouées en matériaux composites par ANSYS apdl.

Dans cette simulation numérique nous allons présenter l'effet de l'existence d'un trou circulaire sur le comportement mécanique de plaque à partir de la distribution des contraintes autour et loin du trou. En a appliqué à la frontière de la plaque différents types d'efforts de sollicitation (traction-compression) pour les deux types de matériaux isotropes et composites.

Nous introduisons ce chapitre par une étude paramétrique préliminaire basée sur le calcul numérique du facteur de concentration des contraintes dans les plaques composites tel que l'effet du type du matériau, l'orientation des fibres et le nombre des couches.

III.1- Simulation de l'essai de traction sur une plaque isotrope munie de trou.

Dans cette partie nous montrerons l'effet de la présence du trou circulaire sur la distribution du facteur de concentration des contraintes en sollicitations de traction.

a- Géométrie de la plaque

Le tableau III.1 présente le dimensionnement de la plaque en Aluminium trouée étudiée et leurs propriétés mécaniques.

E (pa)	Coefficient de Poisson ν	Rayon (mm)	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)
68.9	0.33	25	300	100	2

Tableau III.1 : Propriétés géométriques et mécaniques de la poutre isotrope

b- Maillage

La géométrie considérée est maillée par l'élément SHELL63 de forme rectangulaire 2D (figure III.1).

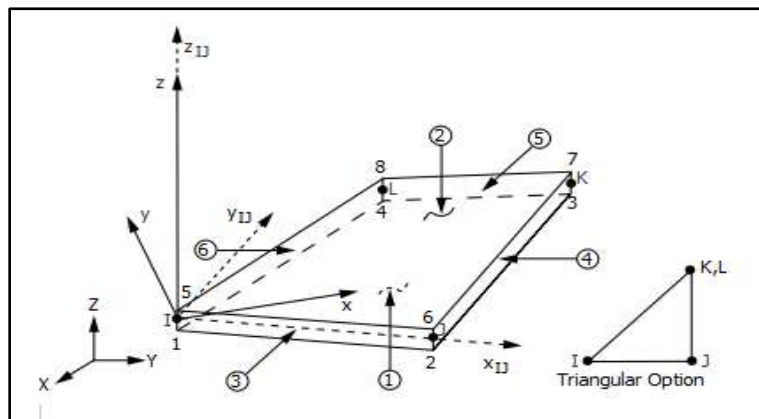


Figure III.1 : Géométrie de l'élément SHELL63

Cet élément possède quatre nœuds à six degrés de liberté (UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ). La taille d'élément est 8×10^{-3} m (Figure III.3).

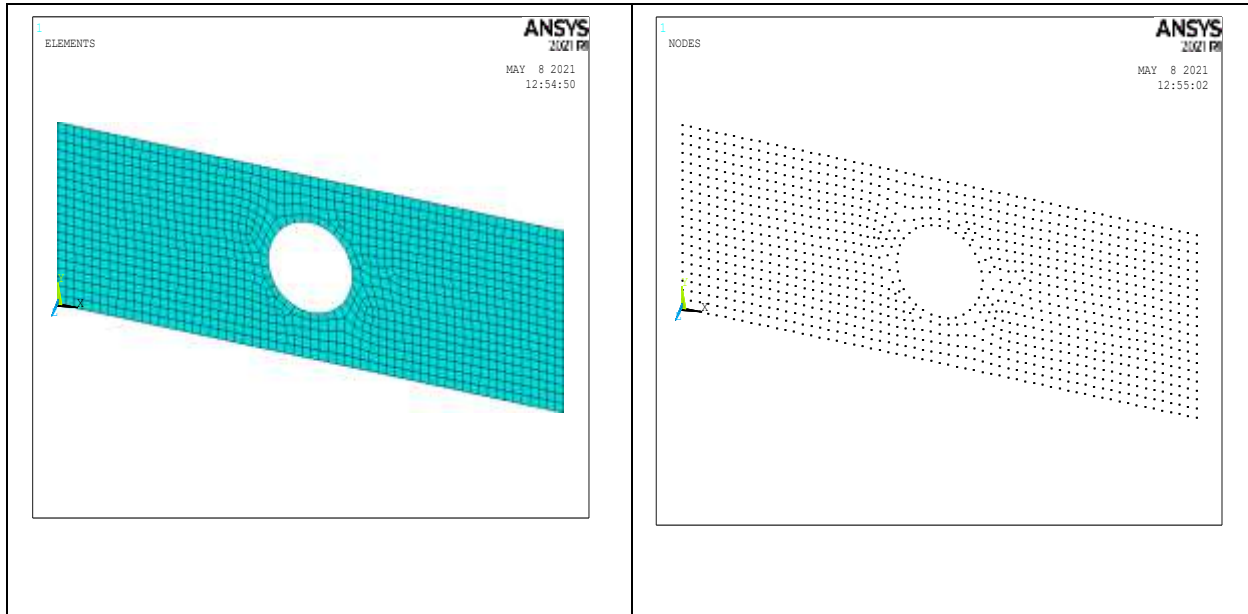


Figure III.2 : Maillage de la plaque trouée

c- Conditions aux limites et application des charges

Nous allons fixons le modèle de la plaque maillée du côté droite et nous appliquons une force sur côté gauche (Figure III.4)

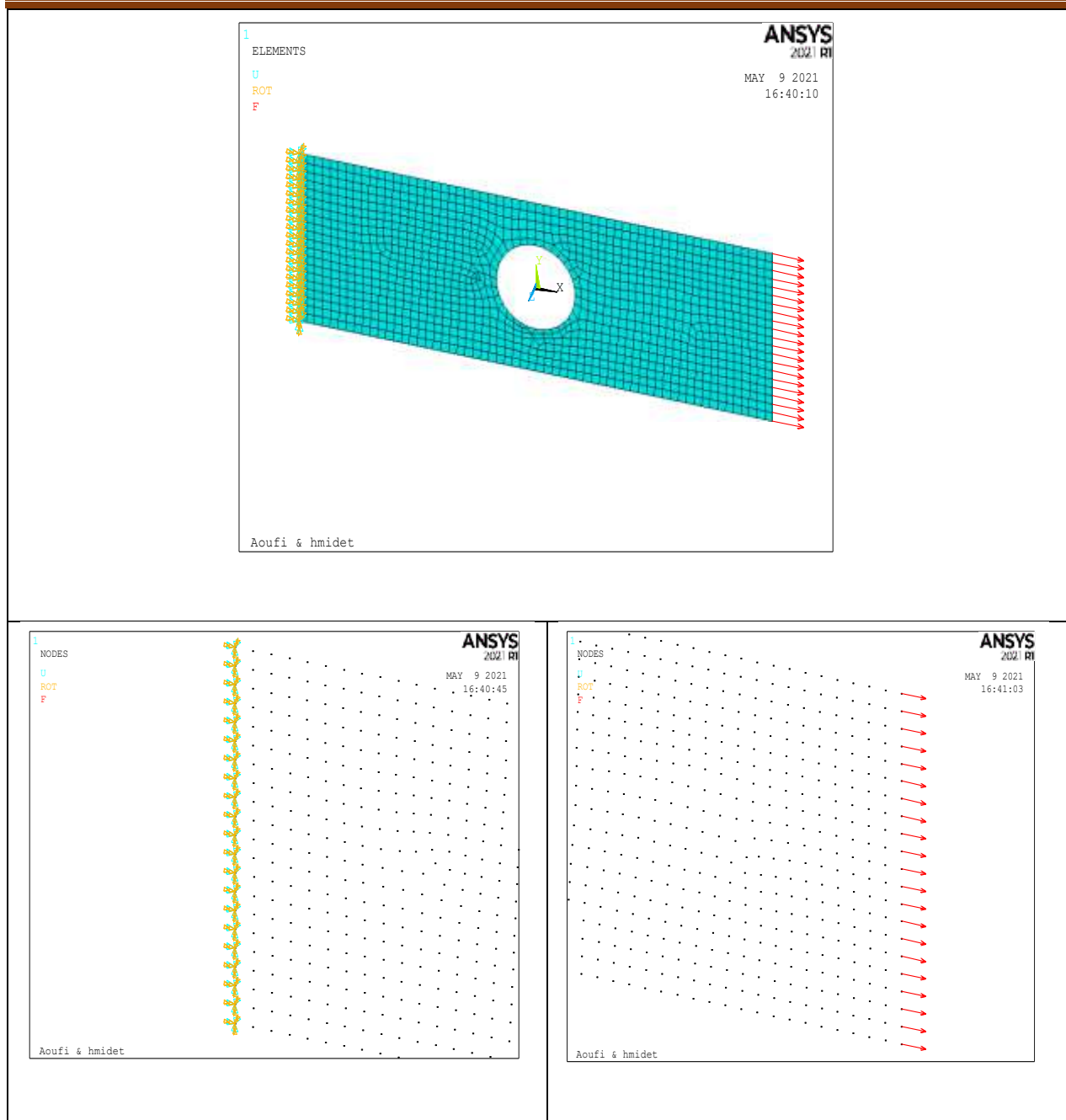


Figure III.3 : Fixation du côté droite et application d’effort sur le côté gauche

d- Résultats

La valeur du facteur de concentration des contraintes (FCC) est déterminée directement en divisant le champ des contraintes obtenu par la contrainte nominale σ^∞ .

La variation du facteur de concentration des contraintes (FCC) présentée dans le graphe de la figure III.4 au bord d’ un trou de la plaque isotrope.

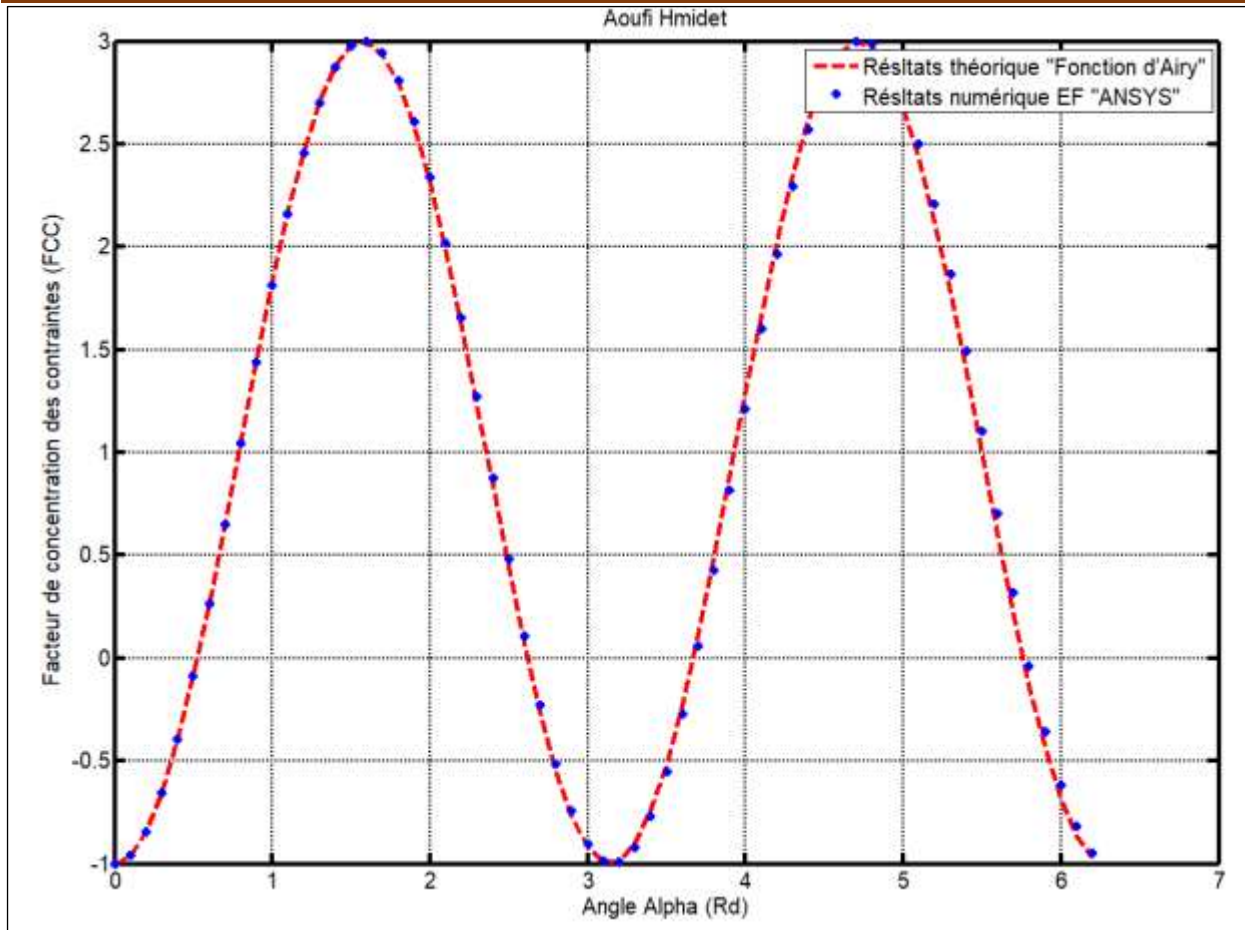


Figure III.4 : Variation du FCC au bord du trou circulaire en traction

Les graphes des figures III.6, III.7, III.8 et III.9 présentent la variation du facteur de concentration des contraintes au bord d'un trou réalisé sur une plaque isotrope.

Le facteur de concentration des contraintes est nul dans la direction faisant $\pi/6$ Rd (30°).

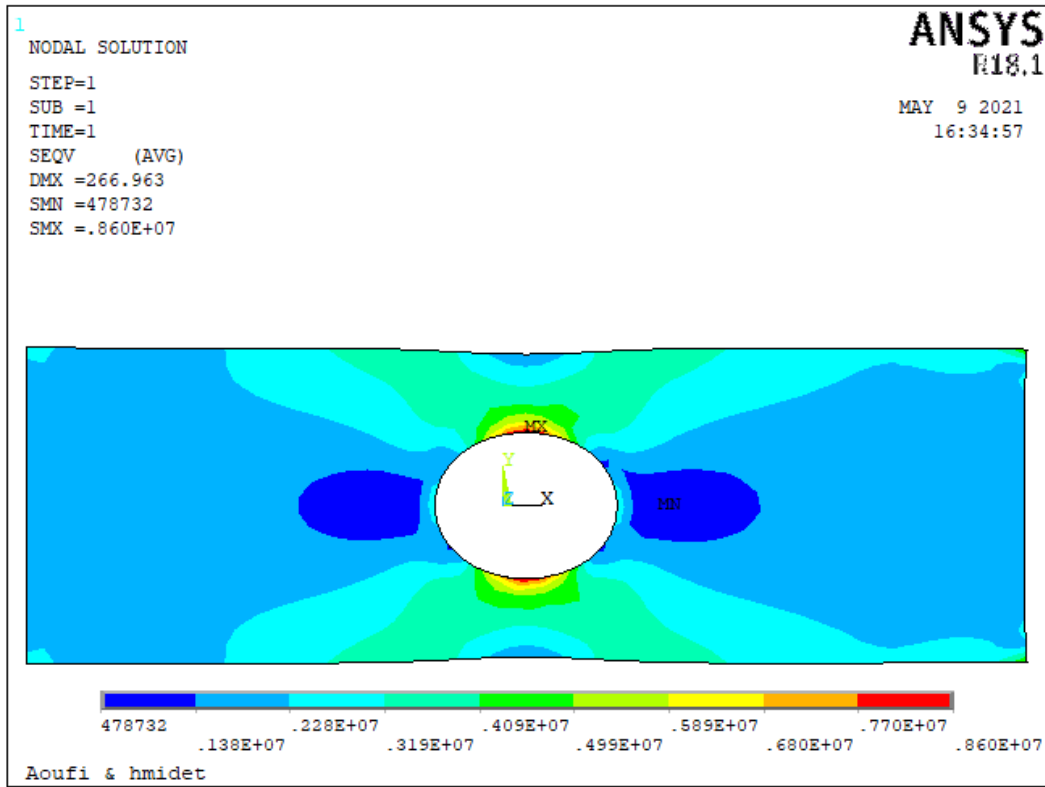


Figure III.5 : Distribution du FCC au bord du trou en traction

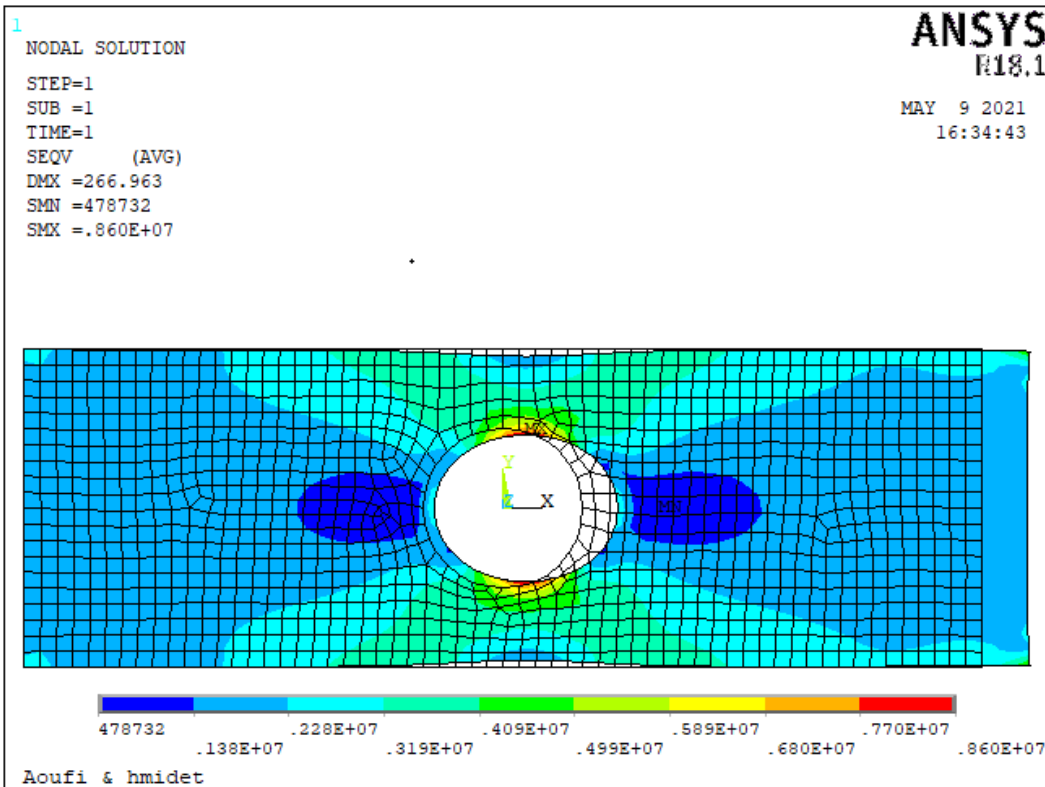


Figure III.6 : Distribution du FCC au bord du trou en traction, avec l'état initiale

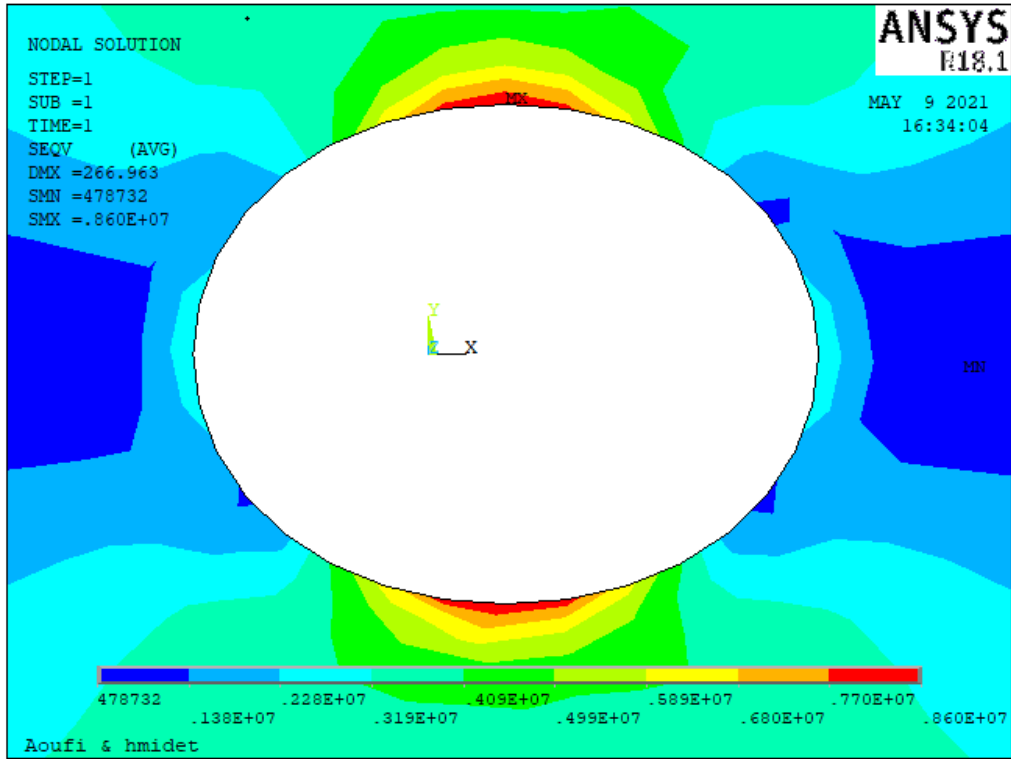


Figure III.7 : Distribution du FCC au bord du trou circulaire en traction, vu proche

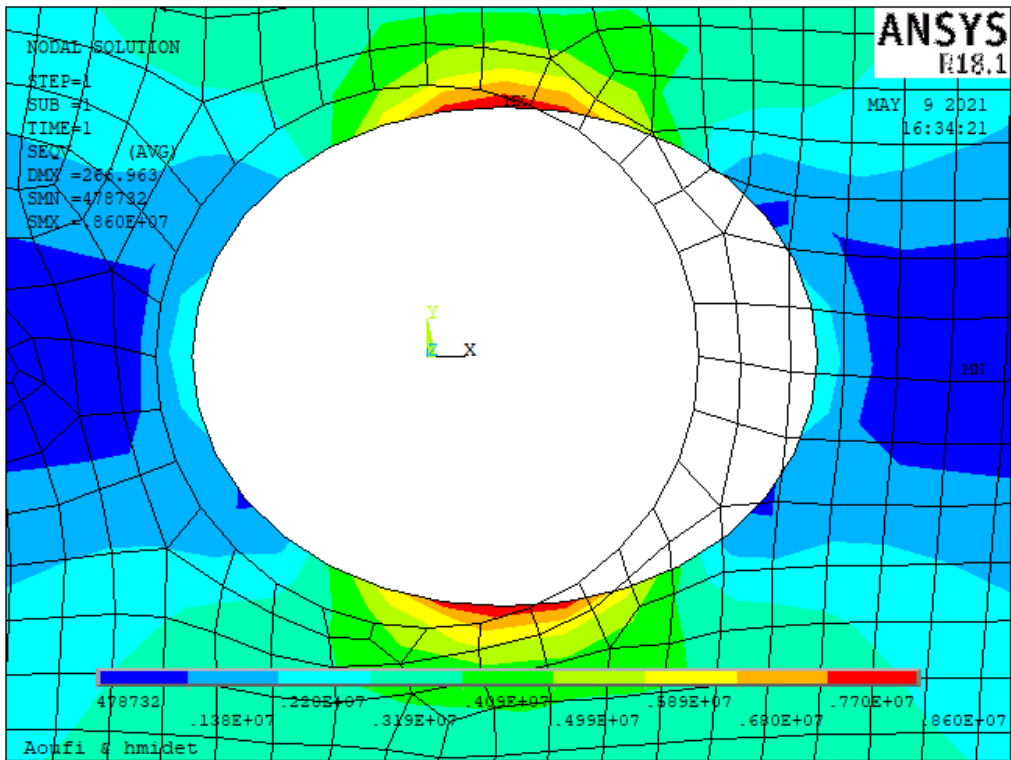


Figure III.8 : Distribution du FCC au bord du trou en traction, vu proche avec l'état initiale

III.2- Simulation de l'essai de traction sur une plaque en matériaux composite munie de trou.

L'analyse du comportement des plaques en matériaux composites munies d'un trou circulaire centré est réalisée avec la détermination la distribution des contraintes dans une plaque en matériaux composite à la présence de trou.

III.2.1- Effets des orientations des fibres sur la distribution des contraintes

La géométrie de la plaque étudiée précédemment maintenant est maillée par l'élément shell181 à deux dimensions, avec quatre nœuds avec quatre degrés de liberté par six nœud (UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ) (figure III.10). La taille de l'élément est de 0,25 mm. Les conditions aux limites et les charges appliquées sont celle d'un test de traction.

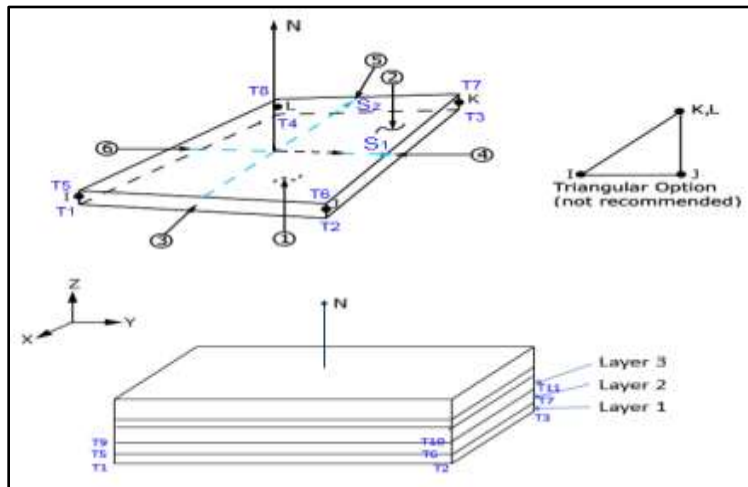


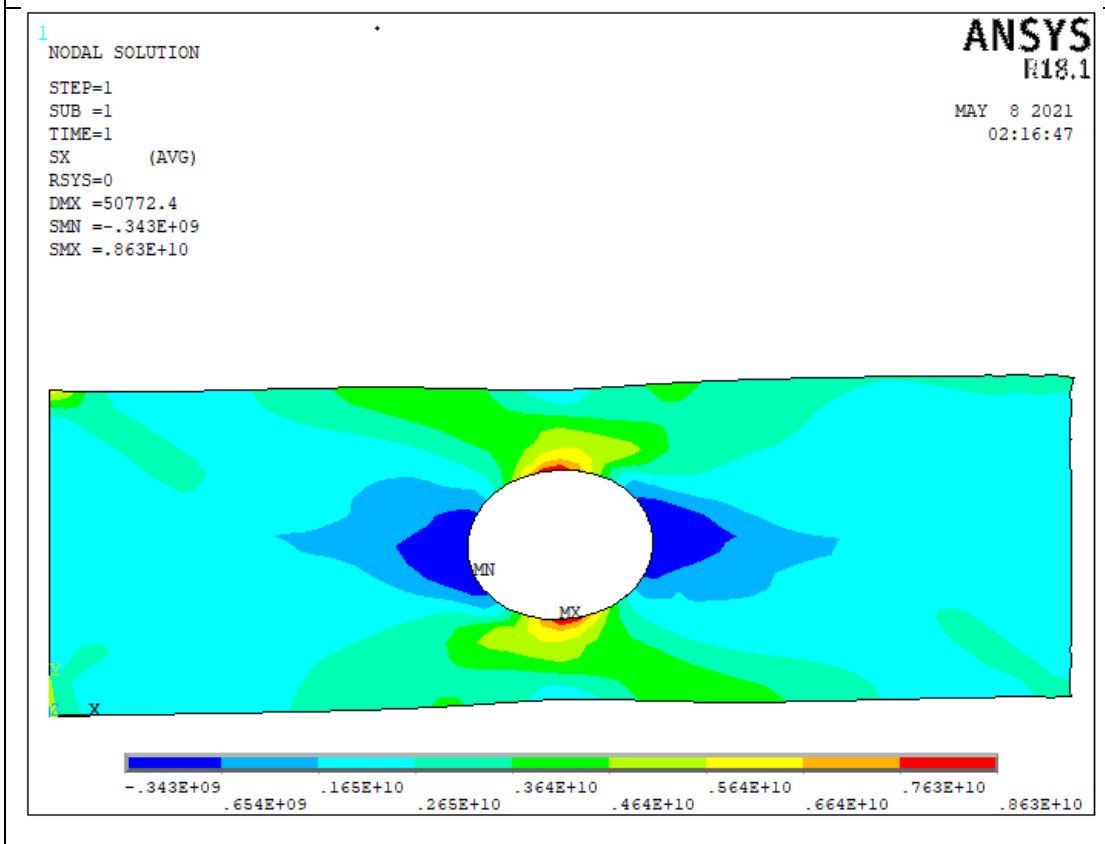
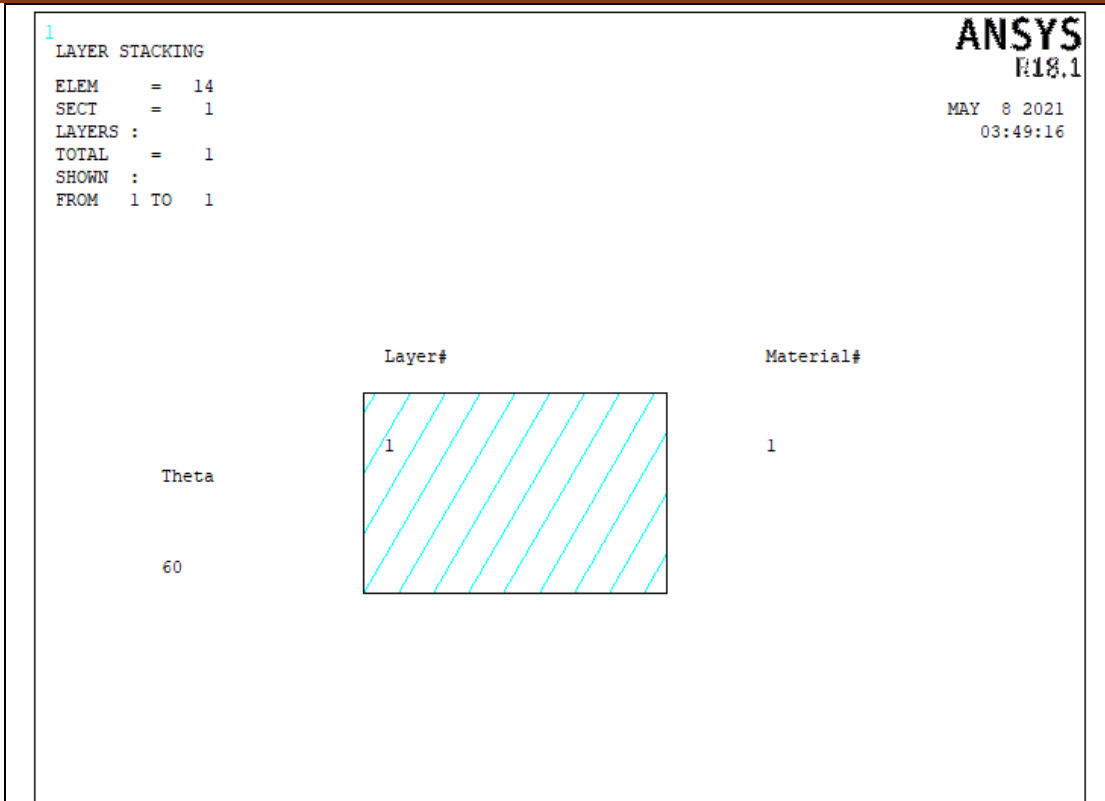
Figure III.9 : Géométrie de l'éléments SHELL181

Le **tableau III.2** présente les propriétés mécaniques de la plaque en matériaux composite trouée.

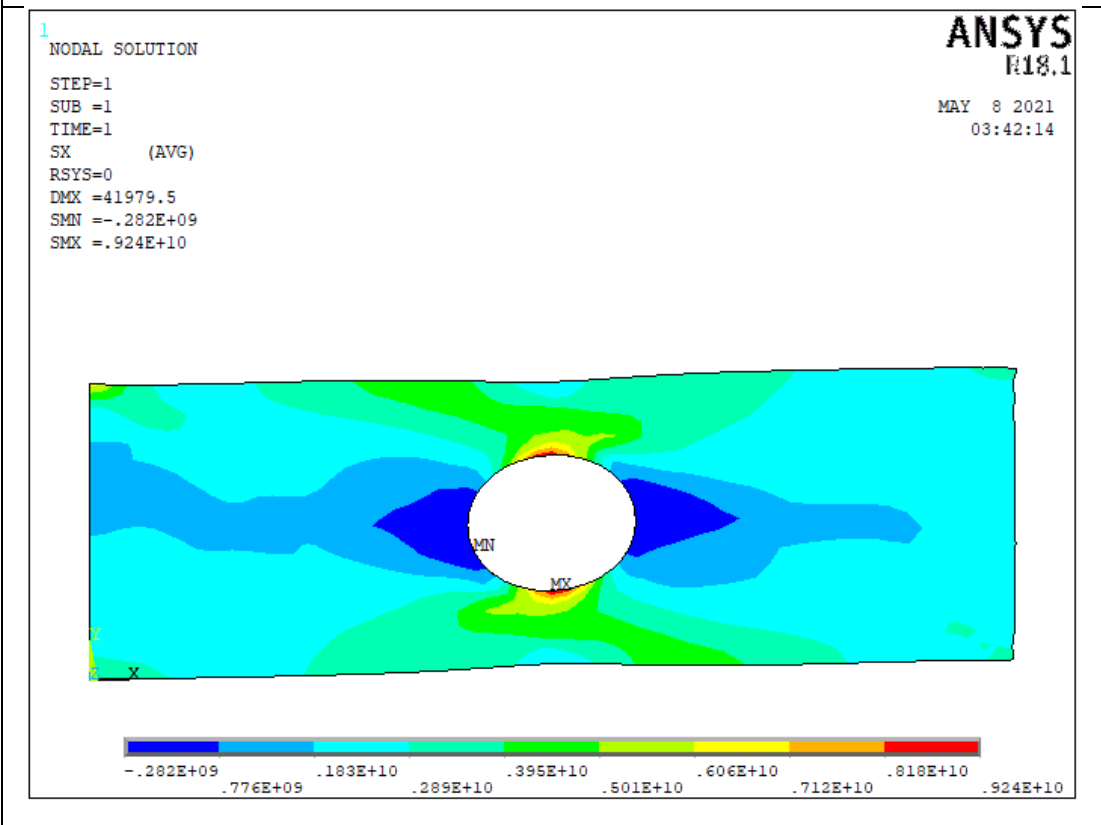
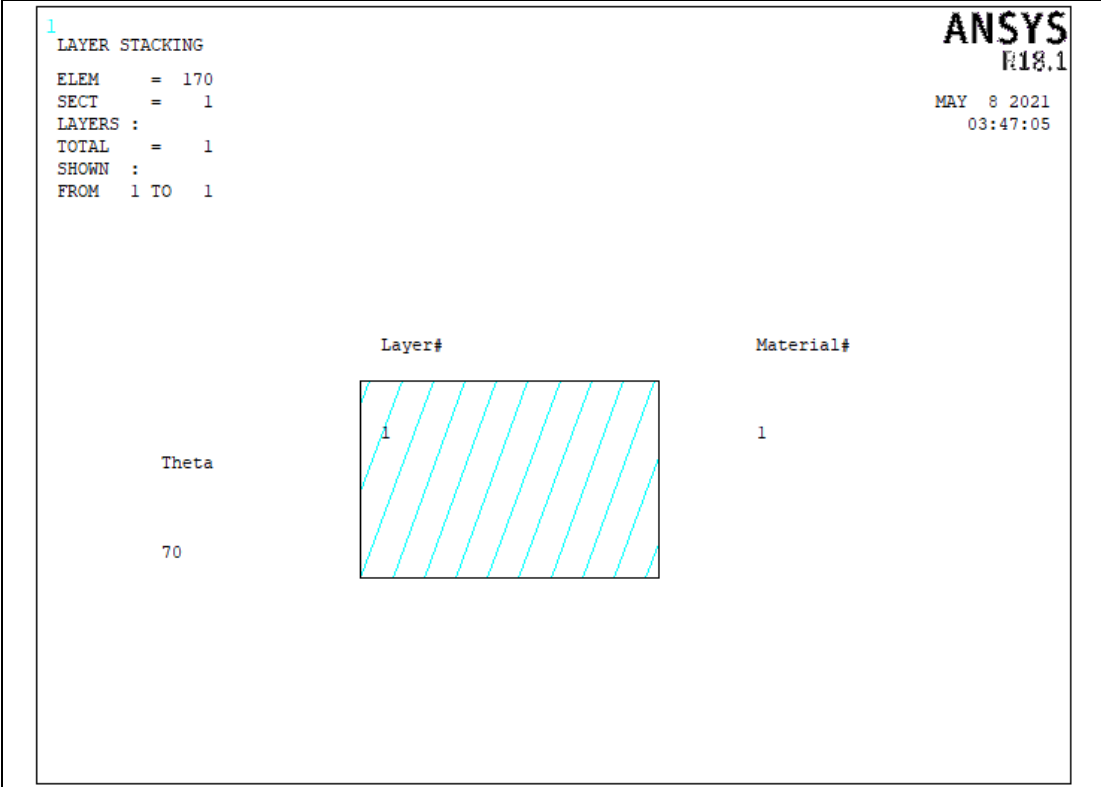
Matériau	E_x (pa)	E_y (pa)	E_z (pa)	G_{xy} (pa)	G_{yz} (pa)	G_{xz} (pa)	ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{xz}
	44.7 e 3	12.7 e 3	12.7 e 3	5.8 e 3	4.5 e 3	5.8 e 3	0.297	0.4111	0.297

Tableau III.3 : Propriétés mécaniques de la plaque en matériaux composite trouée

[60]



[70]



[80]

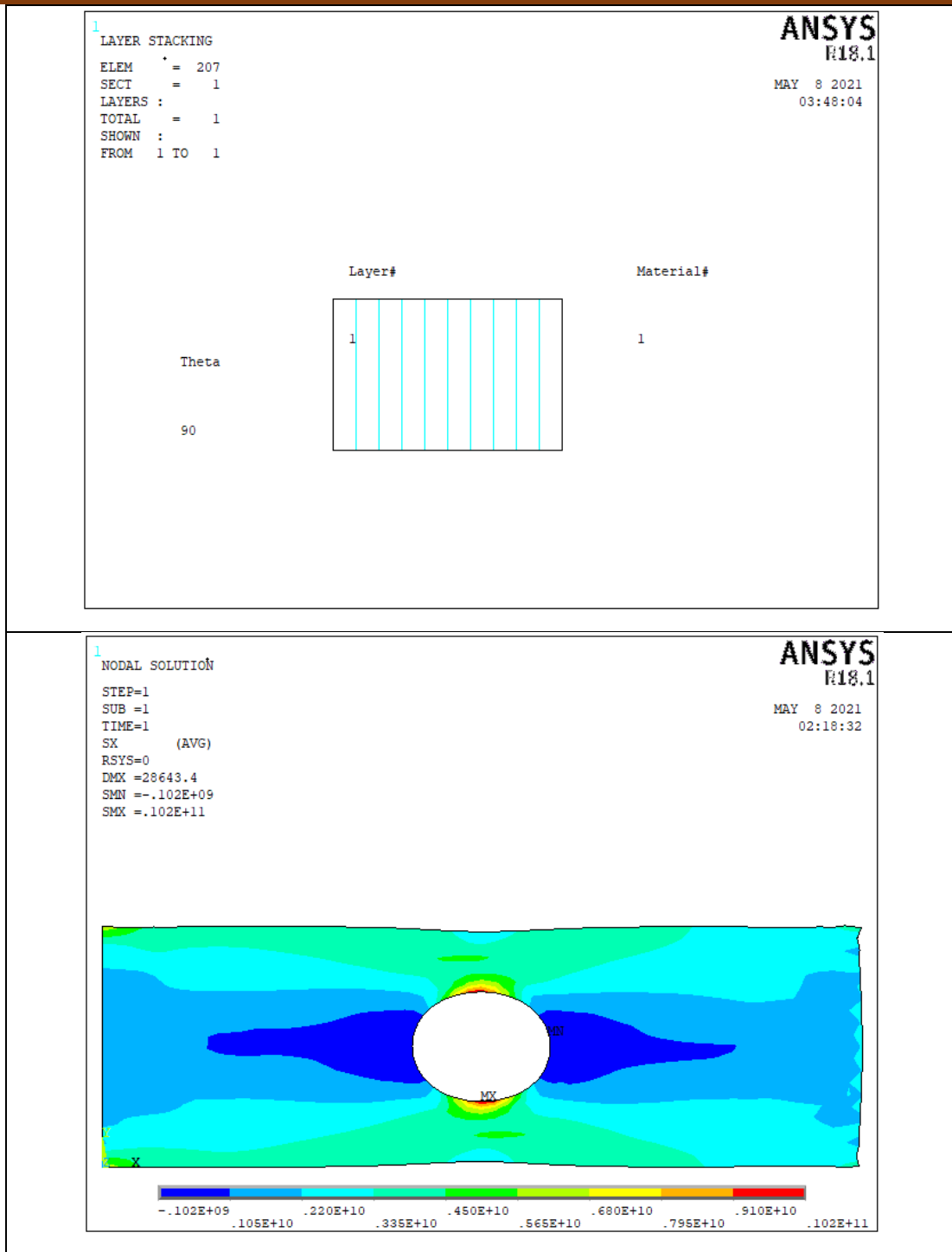


Figure III.10 : Distribution du facteur de concentration de contrainte (FCC) selon l’orientation des fibres.

L’orientation des fibres est un paramètre important qui agit sur la variation des propriétés mécaniques globales des matériaux composites.

Donc L’orientation des fibres influe sur la valeur du facteur de concentration de contrainte.

Le tableau III.4 montre les résultats des contraintes maximales et minimales obtenus par ANSYS apdl.

	[60]	[70]	[80]	[90]
Contrainte Max (Pa)	0.863 e 10	0.924 e 10	0.983 e 10	0.102 e 11
Contrainte Min (Pa)	-0.343 e 9	-0.92 e 9	-0.16 e 9	-0.102 e 9

Tableau III.4 : Valeur maximale et minimale des contraintes au bord du trou par rapport d'orientation des fibres

Le diagramme de la figure III.12 présente le facteur de concentration des contraintes minimales et maximales au bord de trou réalisé sur une plaque en matériaux composite.

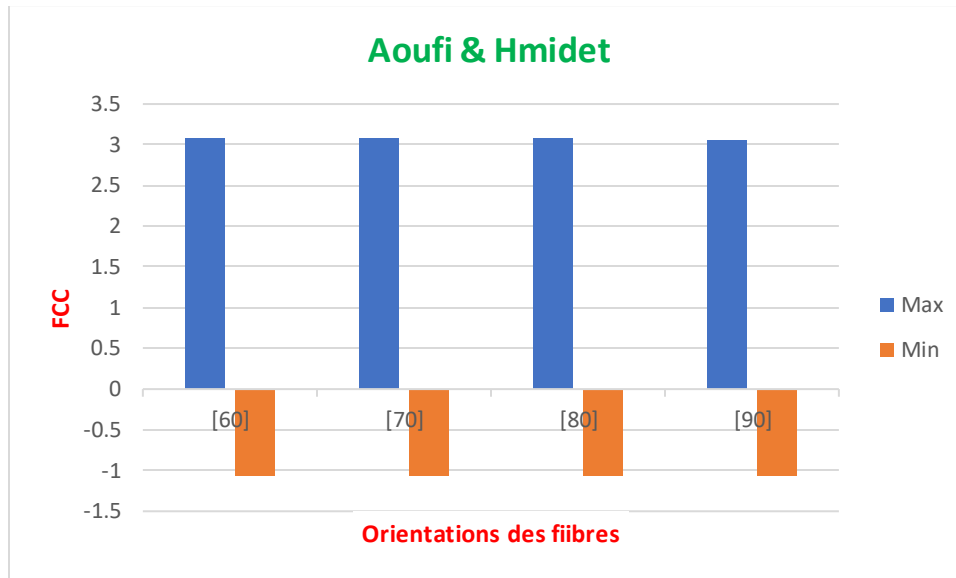


Figure III.11 : Facteur de concentration des contraintes (FCC) minimales et maximales au bord de trou par rapport d'orientations des fibres.

III.2.2- Effets de nombres des couches sur la distribution des contraintes

Le nombre des couches est aussi un très important paramètre qui influe sur la variation des propriétés mécaniques globales des matériaux composites.

Donc le nombre des couches agit sur la valeur du facteur de concentration de contrainte.

Le tableau III.5 montre les résultats des contraintes maximales et minimales obtenus par ANSYS apdl.

	[0,25]	[0,25,-25]	[0,25,-25,0]
Contrainte Max (Pa)	0.8 e 10	0.54 e 10	0.454 e 10
Contrainte Min (Pa)	-0.317 e 9	-0.339 e 9	-0.188 e 9

Tableau III.5 : Valeur maximale et minimale des contraintes au bord du trou par rapport de nombres des couches.

Le diagramme de la figure III.12 présente le facteur de concentration des contraintes minimales et maximales au bord de trou réalisé sur une plaque en matériaux composite.

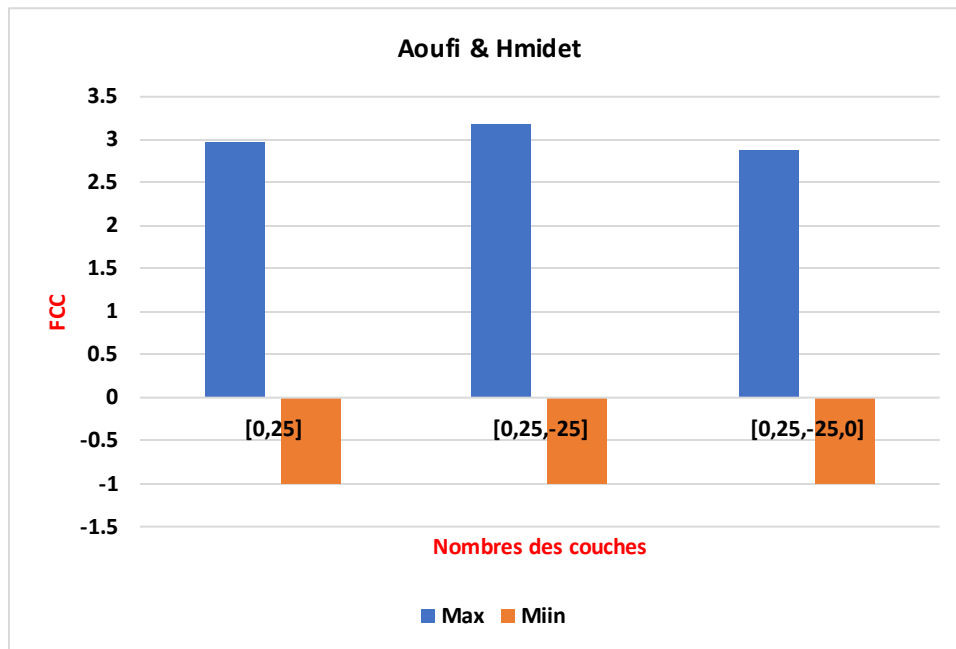
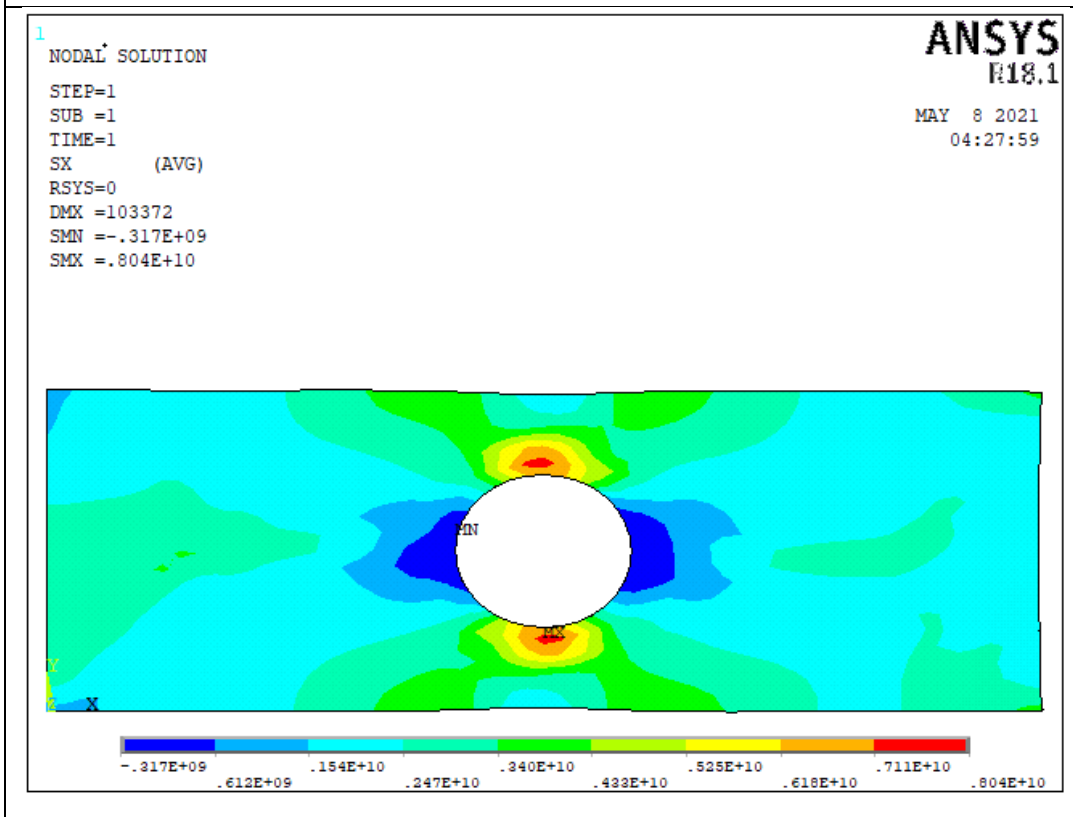
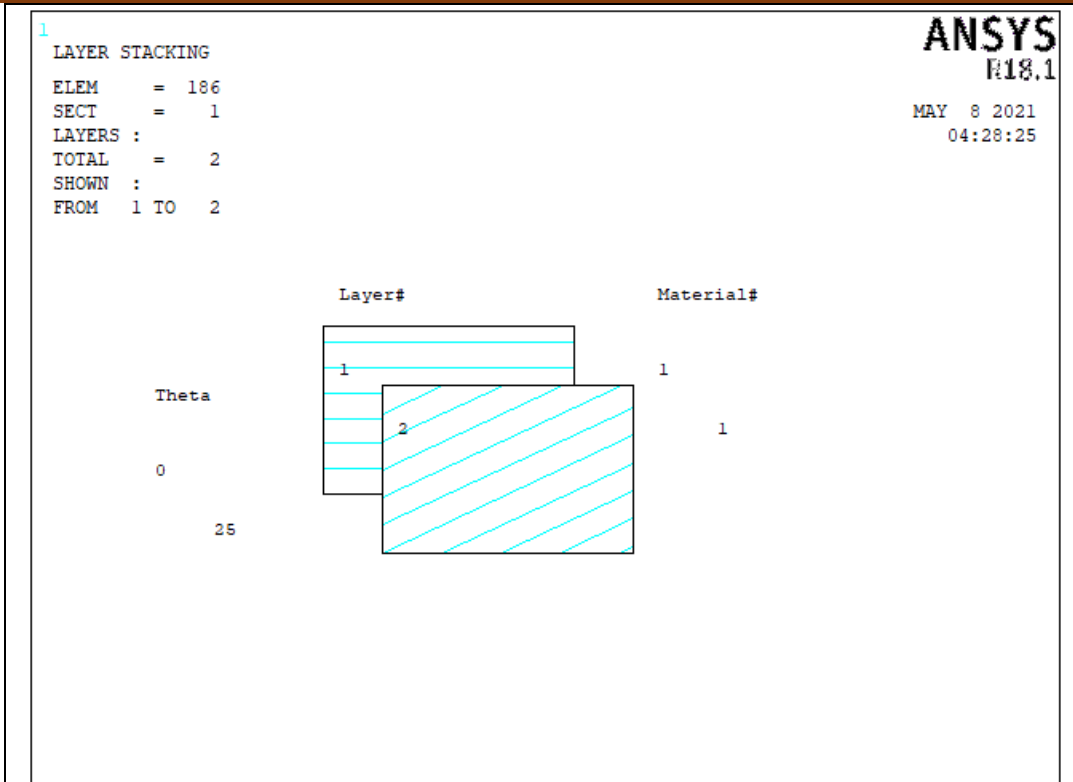
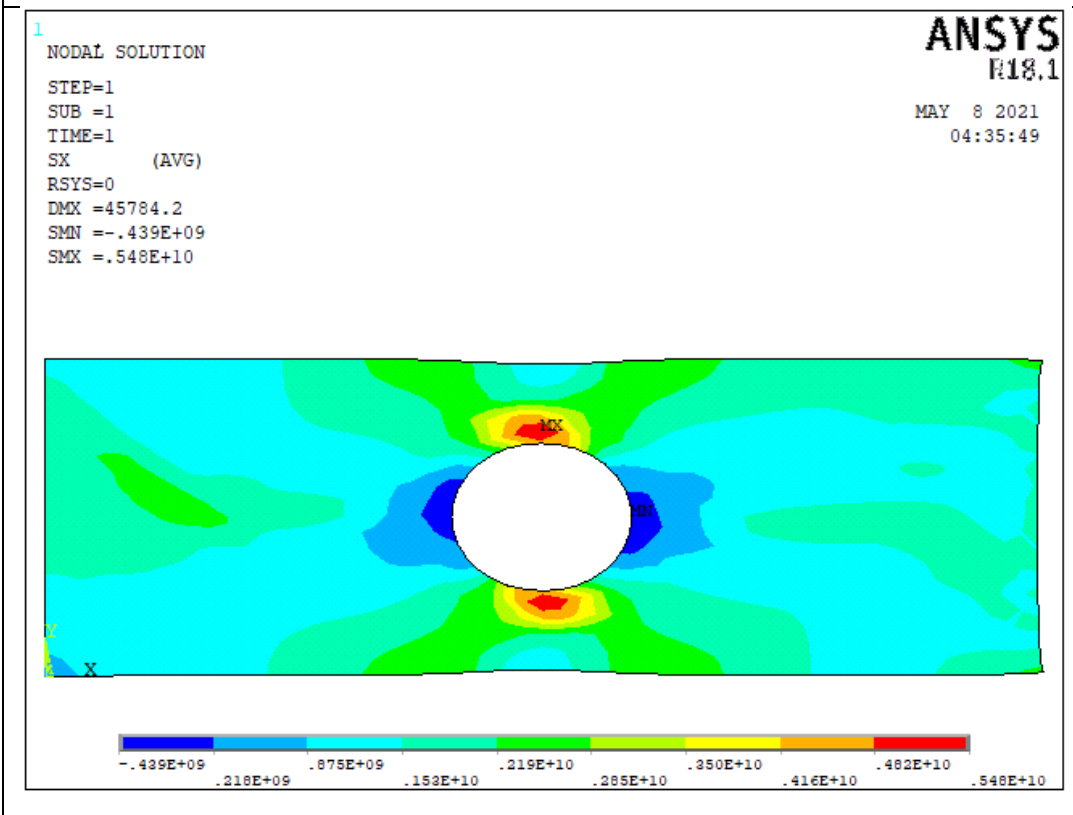
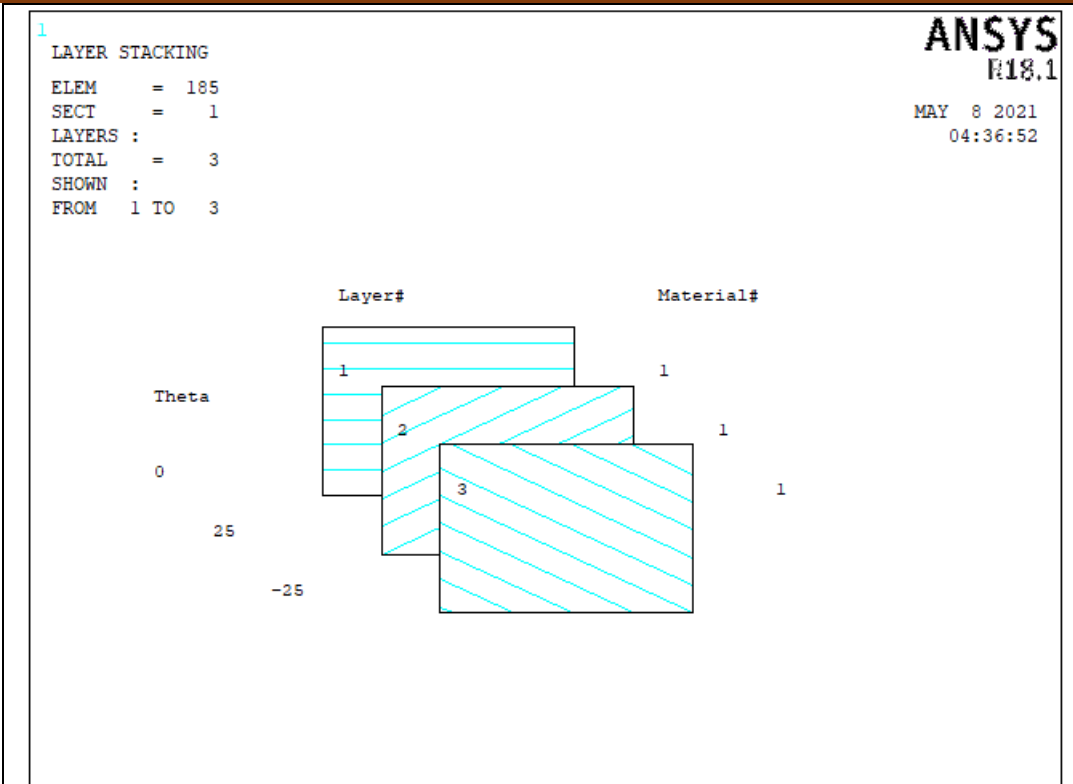


Figure III.12 : Facteur de concentration des contraintes (FCC) minimales et maximales au bord de trou par rapport de nombres des couches.

[0,25]



[0,25,-25]



[0,25,-25,0]

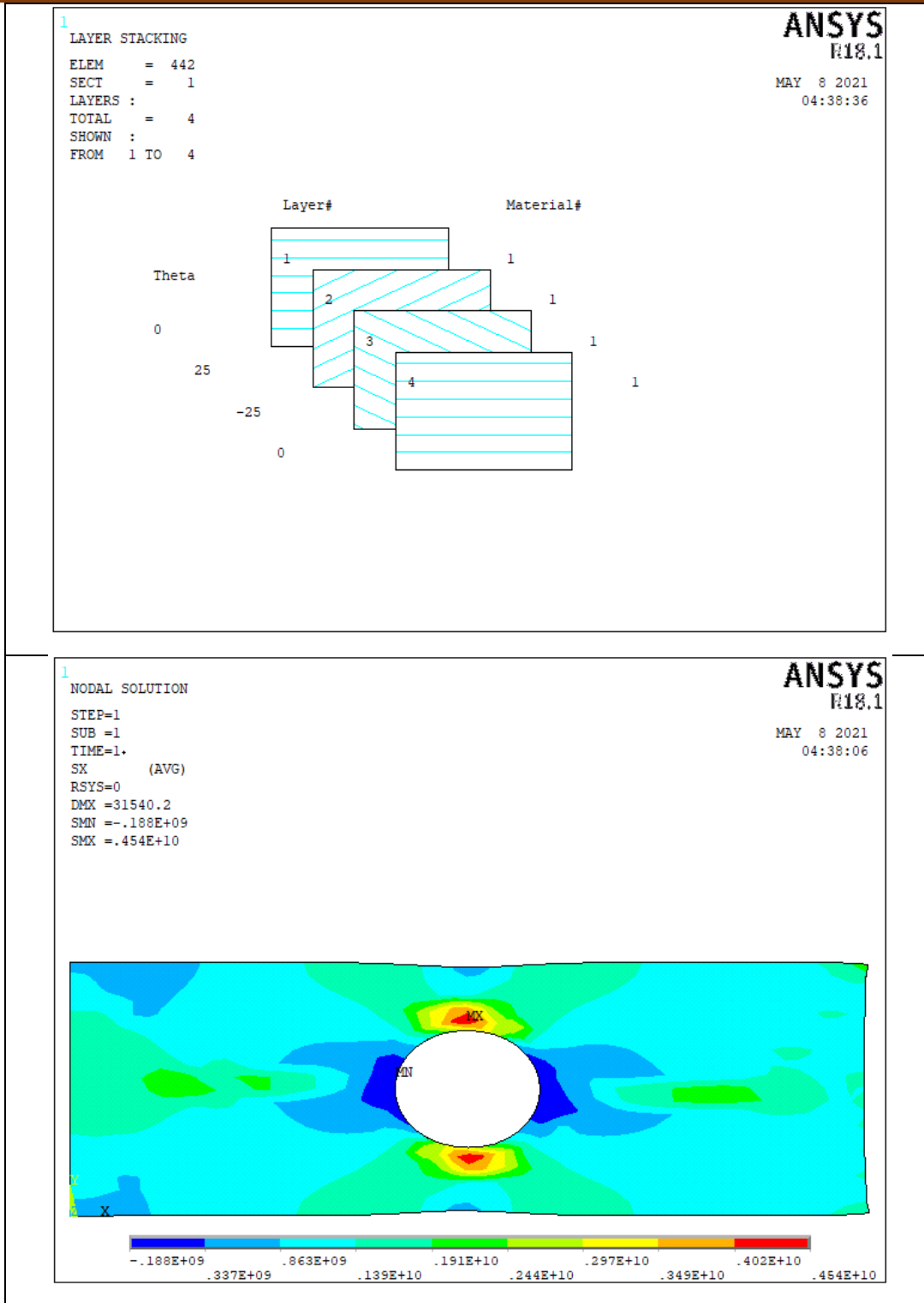


Figure III.13 : Distribution du facteur de concentration de contrainte (FCC) selon les nombres des couches.

CONCLUSION

CONCLUSION

GENERALE

GENERALE

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire avait comme principal objectif l'analyse de l'influence de l'existence des singularités géométriques telles que les trous de formes circulaires sur le comportement mécanique des structures isotrope et composites. L'étude concernée à la détermination des valeurs du facteur de concentration des contraintes (FCC) qui est considérées comme un inducteur de l'augmentation locale de la contrainte due à l'existence du trou circulaire. Par conséquent, la présence des trous dans les structures isotrope et composites peut mener à un phénomène dangereux appelé phénomène de la concentration des contraintes, qui défie un affaiblissement de la structure et agit négativement sur sa sécurité et peut mener à son endommagement.

RÉFÉRENCES

RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] Bahi-Eddine LAHOUEL, « Vibration des Plaques Composites Trouées », thèse doctorat, Université El-Hadj Lakhdar Batna, 2015.
- [2] Manet Vincent, « Méthodes d'analyse par éléments finis des contraintes aux interfaces dans les structures sandwich », thèse doctorat, École Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur de Clermont-Ferrand, 2012.
- [3] Rabia BOUBEKER "Etude Expérimentale et Numérique du Comportement des Plaques Trouées en Matériaux Composites", Thèse doctorat, Université de Biskra, 2016.
- [4] Melle. KAOUANE Malika, "Analyse des contraintes mécaniques et de la fissuration des éléments en béton armé sous l'effet thermomécanique", mémoire magister, UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI, TIZI OUZOU, 2011.
- [5] **Jean-M Berthelot** mécanique et analyse des structure 5^eédition 201 Lavoisier Paris IBBN : 978-2-7430-14507
- [6] Nadia **bahlouli** « Cours Matériaux composites /DESS Mécanique avancée et stratégie industrielle » IOST-ULP
- [7] **BOUDENNE**, "Etude expérimentale et théorique des propriétés thermo physiques d'matériaux composites à matrice polymère," Université PARIS XII, 2003.
- [8] **JoelCugnoni**, « Identification par recalage modal et fréquentiel des propriétés constitutives de coques en matériaux composites », Thèse, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, 2005
- [9] **L. Berreur, B. d. Maillard, and S. Nösperger**, "L'industrie française des matériaux.
- [10] J.Fitoussi, F.MeraghnI, Z.Jendli, G.Hug, D.Baptiste, " Méthodologie expérimentale d'analyse du comportement mécanique de matériaux composites sous sollicitations dynamiques", Revue des composites et des matériaux avancés, vol. 14/1, pp.9-30,2004.
- [11] T.Lorriot, L.Lagunegrand, H.Wargnier, R.Harry, "Contribution à la définition d'un critère de délaminage en mode mixte", Revue des composites et des matériaux avancés, vol.16/3, pp.315-348,2006.
- [12] R.Zenasni, A.Hebbar, M.Mechmache, "Modélisation de l'énergie de délaminage des composites à matrice thermoplastique sous l'effet de la température et de l'humidité",Revue des composites et matériaux avancés, vol. 16/2, pp.209-219,2006.
- [13] N. Baral, H. Guezenoc, P. Davies and C. Baley, "High modulus carbon fibre composites:

Références bibliographiques

Correlation between transverse tensile and mode I interlaminar fracture properties Materials Letters", Materials letters, vol. 62, No6-7, pp. 1096-1099, 2008.

[14] F. Zaixia, Z. C. Yanmo, and L Hairu, "Tensile Properties of Glass Fiber Knitted Fabric Reinforced Polypropylene Composite Made from GF/PP Commingled Yarn Affected by Prestretching", Journal of reinforced plastics and composites, vol. 25, no5, pp. 553- 560, 2006.

[15] J.F.S. Dharani, L.R. Mall, "Analysis of transverse craking in cross-ply composite laminates", Advanced composite materials, vol.7, Number 1, pp.83-103(21),1998.

[16] Rabia BOUBEKER "Etude Expérimentale et Numérique du Comportement des Plaques Trouées en Matériaux Composites", Thèse doctorat, Université de Biskra,2016.

[17] Laurent BAILLET "Concentration de contraintes autour d'un trou circulaire Fonction d'Airy" Elasticité /UFR Mécanique / UJF Grenoble.

[18] Lekhnitskii, S. G.,. "Anisotropic Plates", Translated from the 2nd Russian edition bay .S.W. Tsai and T. Cheron, Gordon, Breach Science Publishers Inc .N4, 1968.

يا مقلب الدنيا
يا ذا الجلال والإكرام

يا ذا الجلال والإكرام
يا ذا الجلال والإكرام
يا ذا الجلال والإكرام
يا ذا الجلال والإكرام