

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique
Filière : Génie mécanique
Option : Conception mécanique et productive

Réf :

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème

Effet d'une ouverture sur le comportement
d'une plaque composite

Présenté par :

TRIR Boubakeur

Soutenu le : 04 Juin 2017

Devant le jury composé de :

Dr DERIES Nouredine
Dr GUERIRA Belhi
Mr DJEBLOUN Youcef

Président
Encadreur
Examineur

Université de Biskra
Université de Biskra
Université de Biskra

Année universitaire : 2016 / 2017

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique
Filière : Génie mécanique
Option : Conception mécanique et productique

Réf :

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème

Effet d'une ouverture sur le comportement
d'une plaque composite

Présenté par :

TRIR Boubakeur

Soutenu le : 04 Juin 2017

Devant le jury composé de :

Dr DERIES Nouredine
Dr GUERIRA Belhi
Mr DJEBLOUN Youcef

Président
Encadreur
Examineur

Université de Biskra
Université de Biskra
Université de Biskra

Année universitaire : 2016 / 2017

REMERCIEMENTS

Louange à Dieu qui m'a aidé à terminer ce travail et m'a donné le courage et la patience.

*Je tiens à exprimer mes vifs remerciements mon encadreur, et mon grand frère **Dr. Guerira Belhi** Pour le soutien et pour tout le bagage scientifique qui m'a transmis durant ce projet.*

*Je tiens aussi à remercier **Pr. TATI Abdelouaheb** et **Dr. Sedira Lakhder** pour leur aide à réaliser ce travail.*

*Mes vifs et sincères remerciements aussi aux membres de jury : **Dr. DERIAS Noureddine** et **Dr. DJEBLOUN Youcef** de l'université de Biskra.*

Je remercie mes collègues au hall technologique ainsi que tous ceux qui nous ont aidés et autant soutenus de loin ou de près.

Mes remerciements les plus chaleureux vont à tous ceux qui ont contribué et participé de près ou de loin à la réalisation et réussite de ce modeste travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A toute ma famille et particulièrement à mes très chers parents et ma chère femme qui m'ont beaucoup aidé, soutenu, sollicité et encouragé tout au long de cette année d'étude.

Ce travail est également dédié à :

*Mes enfants « **Yahya et Mohamed Anes** » et mes frères, et mes collègues.*

Je dédie aussi ce travail, à toute personne qui m'a aidé dans ce travail.

SOMMAIRE

Remerciements

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des notations et symboles

Résumé

Introduction générale 1

Chapitre I : Généralité sur les matériaux composites

I.1. Introduction 5

I.2. Définition général des composites 5

 I.2.1. Un composites... c'est quoi ? 6

 I.2.2. Composition d'un matériau composite 6

I.3. Les Composants du matériau composite 7

 I.3.1. principaux renforts 7

 I.3.1.1. Fibres de verre 7

 I.3.2. Formes des renforts 8

 I.3.2.1. Les stratifiés à base de tissus unidirectionnels 9

 I.3.2.2. Les sandwiches 9

 I.3.2.3. Les types de stratifiés tissées 10

 a. Toile ou taffetas 10

 b. Serge 11

 c. Satin 11

I.4. Les différents matrices 12

 I.4.1. Résines thermodurcissables 12

 I.4.2. Résine polyester 12

 I.4.3. Résine époxyde 12

 I.4.4. Résine phénolique 13

 I.4.5. Résine polyamide 13

 I.4.6. Résines thermoplastiques 13

I.5. Les raisons de l'utilisation des composites 13

I.6. moulage à base pression 13

 I.6.1. Moulage par projection simultanée 13

 I.6.2. Moulage au contact 14

I.7. Architecture des matériaux composites.....	15
---	----

Chapitre II :Comportement mécanique des matériaux composites

II.1.Introduction.....	17
II.2. Comportement élastique des matériaux	17
II.2.1. Loi de Hooke généralisée	17
II.2.1.1. Matrice de rigidité.....	18
II.2.1.2. Matrice de souplesse.....	18
II.2.2.Déférents matériaux	19
II.2.2.1. Matériaux monocliniques	19
II.2.2.2. Matériaux orthotropes.....	19
II.2.2.3. Matériaux isotropes	21
II.2.2.4. Matériaux isotropes transverses.....	22
II.2.2.5. Matériaux quasi isotropes transverses	22
II.2.2.6. Matériaux quasi isotropes	23
II.3.Caractéristiques mécaniques du mélange renfort-matrice	23
II.3.1.Modules d'élasticité et coefficient de Poisson du pli tissu.....	25

Chapitre III :Etude expérimentale sur les plaques trouées

III.1. Introduction	27
III.2. Préparation et fabrication.....	27
III. 2.1. Matériaux choisir	27
III. 2.2. Matériels.....	27
III. 2.3. Les étapes des bases de la stratification	28
III.2.4. Préparation des éptouvettes	29
III.2.4.1. Type du perçage	30
III.2.4.1.1. Perçage par enlèvement de la matière	30
III.2.5. Défauts de perçage des matériaux composites	31
III.2.6. usinage la forme carrée.....	32
III.2.7. Moucheté	33
III.2.8. Préparation des éprouvettes en fibre tissu	34
III.2.8.1. Caractérisation de la fibre	34
III.2.8.2. Caractérisation mécanique de fil.....	35
III.2.9. Préparation des éprouvettes en résine polyester	36
III.3. Détermination du taux de fibres	37
III.4. Détermination module de Young	38

III.4.1. Méthode expérimentale	38
III.4. 2. Méthode analytique	38
III.5. Détermination du coefficient de poisson	38
III.5.1. Essai de vidéo traction et mesure de la déformation.....	39
III.5.2. Avant déformation	40
III.5.3. Equipement utilisé pour l'essai de traction	41
III.6. Essais de flexion trois points	42

Chapitre IV : Etude numérique

IV.1. Introduction	45
IV.2. . Historique	45
IV.3 Etude numérique des plaques trouées soumise à la sollicitation de flexion.....	45
IV.3.1. Effet de l'épaisseur	46
IV.3.2. Modélisation par la méthode des éléments finis	47
IV.3.1.1. Choix du type d'éléments.....	47
IV.3.1.2. Choix du maillage	48
IV.3.1.3. Description de l'élément utilisé	49
IV.3.1.4. Condition aux limites adoptées	49
IV.3.1.5. Structure du programme	50
IV.3.1.6. Développement du programme pour le calcul des plaques	50
IV.4.2. Validation de l'élément	53
IV.5. Comparaison par le logiciel RDM 6	53
IV.5.1. Introduction	53
IV.5.2. Maillage structuré (maillage par bloc)	53
IV.5.3. Modélisation des plaques par RDM6	54

Chapitre V : Résultats et discussions

V.1. Introduction	56
V.2. Représentation des résultats expérimentaux	56
V.3. Représentation des résultats numériques du programme Fortran.....	62
V.4. Confirmation les résultats par logiciel RDM 6.....	67
V.4.1. Présente quelque résultats des éprouvettes modélisées par RDM 6	67
Conclusion générale	77
Référence bibliographiques	78

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur les matériaux composites

Fig. I.1. Matériau composite	6
Fig. I.2. Constituants d'un composite	6
Fig. I.3. Types des renforts.....	7
Fig. I.4. Formes des renforts	8
Fig. I.5. Constitution d'un stratifié	9
Fig. I.6. Matériaux sandwiches à âmes pleines	10
Fig. I.7. Nid d'abeilles.....	10
Fig. I.8. Matériaux sandwiches à âmes creuses.....	10
Fig. I.9. Tissu toile	11
Fig. I.10. Tissu serge	11
Fig. I.11. Tissu satin.....	12
Fig. I.12. Principe de moulage au contact	14
Fig. I.13. Architecture des renforts	15

Chapitre II : Comportement mécanique des matériaux composites

Fig. II.1. Représentation des trois plans de symétrie d'un matériau orthotrope.	24
Fig. II.2. Structure élémentaire d'un matériau composite unidirectionnel.....	29

Chapitre III : Etude expérimentale sur les plaques trouées

Fig. III.1. Balance.....	28
Fig. III.2. Résine polyester.	28
Fig. III.3. Moule.	29
Fig. III.4. Durcisseur.	29
Fig. III.5. Révélateur (<i>Agent de démoulage</i>).....	29
Fig. III.6. Fibre tissu renfort.....	29
Fig. III.7. D'égulleur	29
Fig. III.8. Plaque moulées par contact.....	29
Fig. III.9. Machine de coupe	30
Fig. III.10. Machine outil perceuse	31
Fig. III.11. Forets rapide.....	31
Fig. III.12. Lûmes.....	32

Fig. III.13. Les éprouvettes de composite	32
Fig. III.14. Les éprouvettes mouchées	33
Fig. III.15. Éprouvette en tissu (satin).....	34
Fig. III.16. Éprouvette fil de chaîne	34
Fig. III.17. Module de Young [SAV99].....	36
Fig. III.18. Eprouvette résine de flexion	36
Fig. III.19. Moule pour moulée les éprouvettes	36
Fig. III.20. Eprouvette résine de traction	36
Fig. III.21. Schéma d'éprouvette spécifiant les dimensions normalisées des éprouvettes.....	37
Fig. III.22. Les tâche disposée sur l'échantillon	40
Fig. III.23. Interprétation schématique de la méthode de Gsell	40
Fig. III.24. Dispositif d'enregistrement des données de l'essai	41
Fig. III.25. Essai de traction (Machine INSTRON 5969).....	41
Fig. III.26. Essai de flexion	42
Fig. III.27. Plaque quasi isotrope de largeur finie soumise à un chargement de flexion	42

Chapitre IV : Etude numérique

Fig. IV.1. Éprouvette simplement appuyée soumise à la sollicitation de flexion	46
Fig. IV.2. Géométrie d'éprouvette trouée	46
Fig. IV.3. Système de coordonnées.....	48
Fig. IV.4. Maillage de l'éprouvette sans trou (20*12) éléments.....	48
Fig. IV.5. Maillage de l'éprouvette trouée (20*12) éléments.	49
Fig. IV.6. Géométrie de l'élément (R_4) et variable nodales correspondantes.....	49
Fig. IV.7. Géométrie d'une éprouvette mince.....	50
Fig. IV.8. Organigramme pour l'étude de la flexion des plaques	52
Fig. IV.9. Principe de calcul par le logiciel RDM.....	53
Fig. IV.10. Éprouvette mallée soumise à la sollicitation de flexion.	54

Chapitre V : Résultats et discussions

Fig. V.1. Courbe de traction fibre tissu	56
Fig. V.2. Courbe de flexion 3 points résine polyester.....	57
Fig. V.3. Courbe de flexion 3 points éprouvette composite sans trou.	57
Fig. V.4. Courbe déformation longitudinale polyester /tissu d'orientations de $[0^\circ/90^\circ]$	58
Fig. IV.5. Courbe déformation transverse polyester /tissu d'orientations de $[0^\circ/90^\circ]$	58
Fig. IV.6. Courbe de la flèche en fonction de la force (Eprouvette sans trou).....	59
Fig. IV.7. Courbe de la flèche en fonction de la force (Rapport $d/b = 0.2$)..	60

Fig. IV.8. Courbe de la flèche en fonction de la force (Rapport $d/b = 0.3$).	61
Fig. IV.9. Courbe de la flèche en fonction de la force (Rapport $d/b = 0.4$).	61
Fig. IV.10. Courbe de la flèche en fonction de la force (Rapport $d/b = 0.5$).	62
Fig. IV.11. Variation de la flèche en fonction du rapport (d/b)	63
Fig. IV.12. Histogramme d'erreur (flèche numérique et expérimentale).....	64
Fig. IV.13. Convergence de la flèche maximale d'une plaque quasi isotrope.	64
Fig. IV.14. Variation de la concentration des moments en fonction de rapport (d/b).....	65
Fig. IV.15. Concentration des moments autour du trou pour tous les rapports.	65
Fig. IV.16. Variation de la flèche des noeuds au milieu des éprouvettes sans trou..	66
Fig. IV.17. Variation de la flèche des noeuds au milieu des éprouvettes trouées.....	67
Fig. IV.18. Présentation graphique de la flèche (éprouvette N°1)	68
Fig. IV.19. Présentation graphique du moment M_x (éprouvette N°1)	68
Fig. IV.20. Présentation graphique de la contrainte Von mises (éprouvette N°1).	69
Fig. IV.21. Présentation graphique de la flèche (éprouvette N°1.2).	69
Fig. IV.22. Présentation graphique du moment M_x (éprouvette N°1.2).	70
Fig. IV.23. Présentation graphique de la contrainte Von mises (éprouvette N°1.2)..	70
Fig. IV.24. Présentation graphique de la flèche (éprouvette N°2.1).	71
Fig. IV.25. Présentation graphique du moment M_x (éprouvette N°2.1).	71
Fig. IV.26. Présentation graphique de la contrainte Von mises (éprouvette N°2.1)..	72
Fig. IV.27. Présentation graphique de la flèche (éprouvette N°3.2).	72
Fig. IV.28. Présentation graphique du moment M_x (éprouvette N°3.2).	73
Fig. IV.29. Présentation graphique de la contrainte Von mises (éprouvette N°3.2)..	73
Fig. IV.30. Présentation graphique de la flèche (éprouvette N°4.2).	74
Fig. IV.31. Présentation graphique du moment M_x (éprouvette N°4.2).	74
Fig. IV.32. Présentation graphique de la contrainte Von mises (éprouvette N°4.2)..	75
Fig. IV.33. Evolution de la flèche en fonction du rapport (d/b).....	76

Liste des Tableaux

Chapitre III : Etude expérimentale du comportement des plaques trouées

Tab. III.1. Géométrie des éprouvettes	33
Tab. III.2. Détermination du taux de matériau en polyester/tissu	37

Chapitre IV : Etude Numérique

Tab. IV.1. Caractéristiques mécaniques et géométriques des plaques quasi isotropes	47
Tab. IV.2. Détails de condition aux limites	50

Chapitre V : Résultats et discussions

Tab. V.1. Caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés.....	59
Tab. V.2. Résultats expérimentale d'éprouvettes sans trou.....	59
Tab. V.3. Résultats expérimentale d'éprouvettes trouées.	60
Tab. V.4. Résultats numérique d'éprouvettes sans trou.	62
Tab. V.5. Résultats numérique d'éprouvettes trouées.....	63
Tab. V.6. Convergence de la flèche d'une plaque quasi isotrope simplement appuyé.....	64
Tab. V.7. Présentant les valeurs des flèches comparables en fonction de la charge.	75
Tab. V.8. Présentant les valeurs des flèches comparables en fonction des rapports d/b.....	76

Liste des notations et symboles

Symbole	Désignation	Unité
ρ	Masse volumique du matériau composite	[g/mm ³]
M_f, M_m	Fraction massique des fibres et de la matrice en	[%]
V_f, V_m	Teneur en volume du renfort et de la matrice	[mm ³]
ρ_f, ρ_m	Masse volumiques du renfort et de la matrice	[g/mm ³]
E	Module d'élasticité	[MPa]
G	Module de cisaillement	[MPa]
E_f, E_m	Modules de Young des fibres et de matrice respectivement	[MPa]
E_t	Module de Young dans le sens transversal des fibres tissu	[MPa]
N	Coefficients de Poisson	

ملخص

إن تواجد الأشكال الهندسية في الهياكل مثل الثقوب ضروري في التكنولوجيا لاحتياجات ميكانيكية مثل تجميع القطع و توفير قنوات للتمرير. وفي نفس الوقت تواجهها بسبب ضعف وهشاشة في بنية الهياكل والذي يفسر زيادة في العزوم الموضعية التي تتسبب في أضرار في البنيات والتي تؤثر سلبا على مقاومتها و مدة عيشها و في هذه الدراسة المقسمة إلى جزأين حيث يهتم الجزء الأول بالدراسة التطبيقية من خلال سلسلة من التجارب على ماكنة مؤهلة للعمل المطلوب و الجزء الثاني بالدراسة العددية من خلال برنامج (Fortran) يمكننا من حساب الانتقالات و عزوم الانحناء إضافة إلى ذلك نقارن النتائج المحسوبة مع تلك المتحصل عليها بواسطة برنامج (RDM6) نعرض تأثير نوع من الثقوب شكل مربع على السلوك الميكانيكي لصفائح المواد المركبة وهذا بدراسة توزع العزوم حول الثقب و على الأماكن البعيدة منه وقد أجريت الدراسة لإظهار تأثير بعض العوامل مثل مساحة الثقب و نوع تطبيق القوة على هذا العامل.

الكلمات المفتاحية : المواد المركبة، سلوك الصفائح المثقوبة ، تركيز العزوم، الانحناء.

Résumé

La présence des singularités géométriques dans les structures, comme les ouvertures de différentes formes et dimensions, est une exigence technologique pour des nécessités mécaniques, tels que l'assemblage des pièces ou autres considérations. Par ailleurs, la présence des ouvertures peut également conduire à un affaiblissement de la structure, en vertu de l'amplification des valeurs des moments à leur extrémité. Ce qui peut susciter des endommagements des structures et influe négativement sur leurs sécurité et durée de vie. Le présent travail concerne l'étude des plaques composites avec trou (concentrique) carré. Le travail est divisé en deux parties : la première s'intéressant à l'étude expérimentale à partir d'une série d'essais sur la machine de flexion INSTRON, et la seconde concernant la simulation numérique en langage FORTRAN. Celle-ci, nous a permis de calculer les flèches et les moments de flexion. En outre, les résultats obtenus au moyen du programme FORTRAN sont comparés avec ceux, fournis par le logiciel RDM6. L'accent a été mis sur l'effet de la présence des trous carrés sur le comportement mécanique des plaques en matériaux composites. Il est question de déterminer la distribution des moments, autour et loin du trou, sous les sollicitations de flexion. L'étude paramétrique a été menée pour mettre en évidence l'effet de quelques paramètres, tels que la taille du trou et le type de chargement, sur la concentration des moments.

Mots-clés : Matériau composite, Comportement des plaques trouées, concentration des moments, flexion.

Introduction générale

Les matériaux composites occupent une place de plus en plus importante dans la réalisation de structures à hautes performances mécaniques (aérospatiale, aéronautique, automobile, biomécanique,...). De telles utilisations doivent nécessairement s'accompagner d'une bonne connaissance du comportement du matériau, de manière à déterminer et à choisir le type de renforcement qui permet d'avoir des propriétés mécaniques de façon optimale [1].

Cette nouvelle classe de matériaux structuraux, est fondée sur les principes déjà exploités par la nature. Ces matériaux comprennent deux composants: la matrice, qui a souvent des propriétés mécaniques faibles, et des fibres, qui apportent au composite leurs hautes caractéristiques mécaniques [2].

L'usage des matériaux composites à matrice organique, en particulier les stratifiés, ne cesse de croître dans les domaines les plus variés. Les bonnes propriétés mécaniques spécifiques de ces matériaux permettent en effet un allègement des structures qui est très recherché dans les constructions mécaniques des moyens de transport.

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 et des moments qui influe négativement sur leur comportement mécanique. Qui exprime la variation locale du moment dû à la présence du trou. Le champ des moments autour du trou est fonction de la taille du trou, et la nature de la charge appliquée [3].

Dans cette étude expérimentales et numériques ont été précédé par une analyse du cas de la plaque quasi isotrope trouée, nous considérons l'état plan de moment et les dimensions de la plaque suffisamment grands par rapport aux dimensions du trou carrée ainsi que l'homogénéité de l'état de moment autour et loin du trou.

L'étude expérimentale de ce travail consiste en premier lieu à la détermination des caractéristiques mécaniques du matériau composite mis en œuvre par le procédé de moulage par contact. En deuxième lieu de cette étude, il était question de procéder au perçage de trou carré sur les éprouvettes préparées et étudier l'influence de la présence de ces trous sur le comportement mécanique des éprouvettes. L'analyse des résultats a été effectuée par la comparaison entre l'étude expérimentale et numérique.

Nous avons divisé notre travail en cinq chapitres :

Le **premier chapitre** est une présentation bibliographique touchant 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.

Le **deuxième chapitre** sera consacré à la formulation décrivant le comportement mécanique des matériaux composites. Il s'agit de déterminer les termes de la matrice de rigidité en utilisant les lois de mélange. La loi de comportement du stratifié est ensuite établie sur la base de l'hypothèse de Love-Kirchhoff.

Nous nous intéressons essentiellement dans le **troisième chapitre** à la présentation des étapes de préparation expérimentale des plaques composites minces munies d'un trou carré centré. Les plaques en matériaux composites sont conçues par le procédé de moulage par contact. Des éprouvettes ont été préparées pour la caractérisation statique du matériau suivant des normes internationales ASTM et ISO. Une attention particulière a été donnée à l'opération de réalisation des trous carrés à partir de perçage des trous circulaires en respectant les conditions de coupes relatives aux matériaux composites. Les éprouvettes trouées obtenues ont été sollicitées par un effort de flexion.

Et enfin on calcule le module de Young par la loi de mélange.

Le **quatrième chapitre** propose en premier lieu une analyse numérique de la variation de la concentration des moments dans les plaques quasi isotropes minces d'un trou carré centré. Cette analyse étudie l'influence de quelques paramètres sur la variation des valeurs de la concentration des moments au bord du trou. Le programme Fortran développé sur la base de la méthode des éléments finis est utilisé pour effectuer l'analyse numérique. Dans le but de la comparaison, il a été utilisé logiciel **RDM 6**.

Introduction générale

Dans le **dernier chapitre**, Nous avons présenté les résultats obtenus expérimentalement et numériquement.

Enfin une **conclusion générale** sur les principaux aspects abordés dans cette étude et les résultats obtenus.

Problématique

En vertu de leurs excellentes propriétés mécaniques telles que le rapport rigidité/ poids, résistance /poids ; leur résistance à la fatigue et à l'usure ..., etc. Les stratifiés en matériaux composites sont largement utilisés dans une grande variété d'applications d'ingénierie.

Les plaques en matériaux composites sont des structures les plus répandues dans les champs d'ingénierie mécanique, civile, maritime et aérospatiale.

Différentes formes d'ouvertures sont créés dans les plaques comme exigences pratiques. Cependant leur présence dans les plaques affecte profondément leur comportement mécanique et engendre des concentrations de contraintes et des moments autour des trous, qui peuvent être la cause directe de certains modes de rupture. Par conséquent la compréhension approfondie des caractéristiques des plaques avec des ouvertures est indispensable lors de leur conception.

Objectif

Ce travail est l'analyse de flexion des plaques stratifiées en matériaux composites, menues d'ouverture.

Nous regrettons de ne pas avoir atteint le but tracé, qui consiste à l'accès au champ de déplacement et de déformation, autour du trou, par la technique de corrélation des images numériques. Ce qui nous a obligés de faire appel à la méthode des éléments finis.

Chapitre I

Généralité sur les matériaux composites

I.1. Introduction

Les matériaux composites ne sont pas une nouveauté, car ils étaient utilisés depuis l'antiquité comme le bois. Ces derniers sont définis comme étant un produit solide comportant au moins deux phases physique distinctes, composées d'un matériau de liaison qui est la matrice et d'un autre matériau sous forme lamellaire ou granulaire qui sert de renfort.

L'importance des matériaux composites est maintenant notoire, et les prévisions portent à penser que cette importance va aller croissant dans les années qui viennent. La diversité de fabrication est concernée [4].

En outre, l'utilisation des matériaux composites est très répandue dans divers domaines tels que l'aérospatiale, l'aéronautique, l'industrie navale, de même que dans l'industrie sportive et génie mécanique. Par conséquent, il est nécessaire de développer des modèles appropriés capables de prévoir avec précision leurs différentes caractéristiques. Pour des applications pratiques. En outre, l'utilisation des matériaux composites dans le domaine de génie mécanique peut être avantageuse par rapport aux matériaux traditionnels comme l'acier, car ils permettent la conception de structures aux propriétés globales qui répondent mieux aux exigences particulières d'une situation donnée. Parmi ces propriétés globales, on retrouve la rigidité [5].

I.2. Définition général des composites

D'après Berthelot (2010), "Un matériaux composite est constitué de l'assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles (mais ayant une forte capacité d'adhésion) et de nature différente, (don ils sont des matériaux artificiels), se complétant et permettant d'obtenir un matériau dont les performances globales sont améliorées, vis-à-vis d'un besoin spécifique, par rapport à celles de ces constituants élémentaires [6].

Les composite sont constitués d'une matrice dans laquelle on a dispersé de façon contrôlée des renforts. Un matériau idéal pour un cas ne l'est malheureusement pas dans l'autre cas. En pratique, on doit toujours opter pour un compromis.

I.2.1. Un composites... c'est quoi ?

Les matériaux composites sont des matériaux qui associent deux ou plusieurs matériaux (métalliques, minéraux et organiques), pour obtenir une combinaison de propriétés à partir des ces matériaux.

Un matériau composite est composé dans le cas général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. Dans le cas de plusieurs phases discontinues de natures différentes, le composite est dit hybride. La phase continue est appelée la matrice.

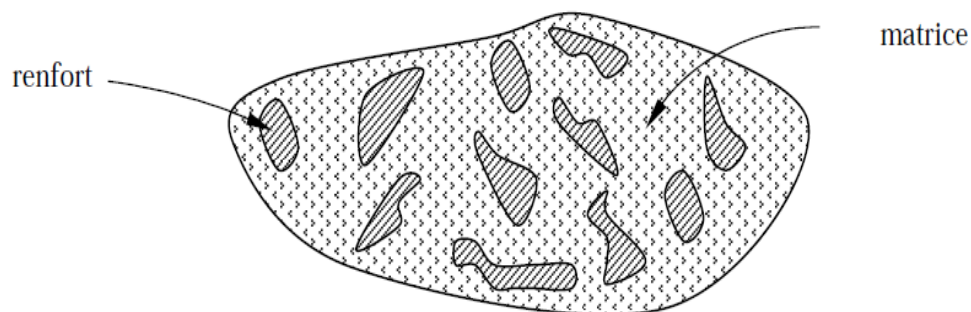


Fig. I.1. Matériau composite [6]

I.2.2. Composition d'un matériau composite

La composition d'un matériau composite est à la base d'au moins deux composants: **le renfort** et **la matrice**, qui doivent être **compatibles** entre eux, ce qui nécessite l'introduction d'un **agent de liaison** à l'interface.

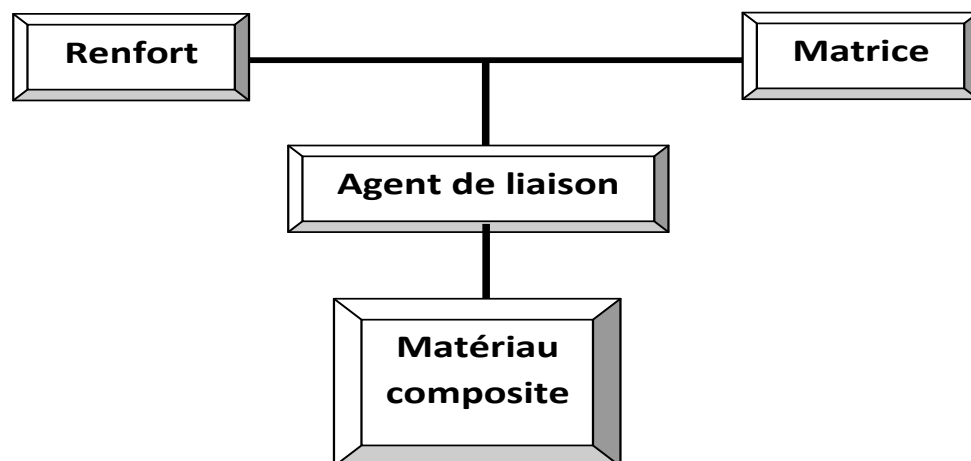


Fig. I.2. Constituants d'un composite

I.3. Les composants du matériau composite

I.3.1. Principaux renforts

Les renforts sont en générale des fibres qui contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites. Elles constituent une fraction volumique comprise entre 30 et 70 % (rapport du volume de fibres au volume total du composite). Les fibres se présentent sous forme de filaments de plus ou moins grande longueur dont les qualités recherchées sont les suivantes :

- bonnes caractéristiques mécaniques ;
- légèreté ;
- résistance thermique ;
- compatibilité avec les résines ;
- adaptabilité aux procédés de mise en œuvre.

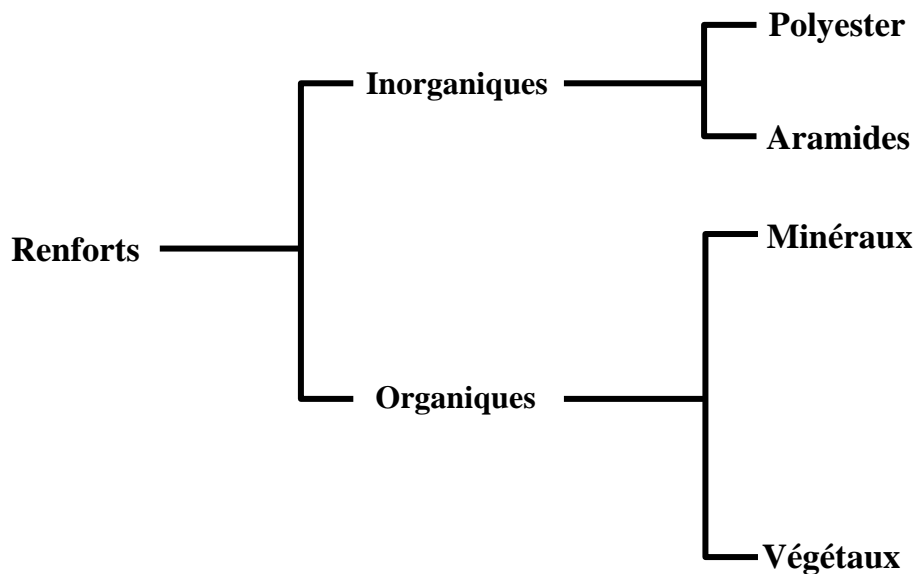


Fig. I.3. Types des renforts

I.3.1.1. Fibres de verre

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.

Les fibres de verre ont un excellent rapport performance-prix. C'est les renforts les plus utilisés actuellement dans la construction de structures composites. On distingue trois types de fibres de verre [6] :

- a. Verre **E** : pour les composites à grande diffusion.
- b. Verre **S** : pour les applications d'électricité.
- c. Verre **R** : pour les composites à haute performance.

Avantages de la fibre de verre

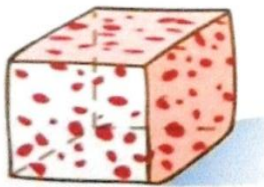
- Compatibilité avec les matrices organiques.
- Bonnes propriétés diélectriques.
- Faible coût.

Inconvénients de la fibre de verre

- Faible module d'élasticité (par rapport aux fibres de carbone et l'aramide).
- Vieillissement au contact de l'eau.

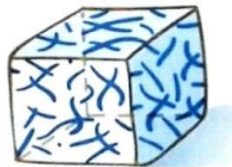
I.3.2. Formes des renforts

a- Inclusion



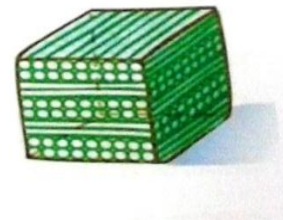
Distribution aléatoire

b- Renforts fibres coutes



Distribution et orientation aléatoire

c- Renforts fibres longues



Stratifiés tissée

Fig. I.4. Formes des renforts [6]

Afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques des structures en composites, il est nécessaire de jouer sur la architecture des renforts pour apporter une bonne résistante adaptée aux contraintes mécaniques.

I.3.2.1. Les stratifiés à base de tissus unidirectionnels [6]

Les stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels constituent un type de stratifié de base auquel peut se ramener en théorie tout autre type de stratifié. Ces stratifiés sont constitués figure (I.6) de couches de fils ou de tissus unidirectionnels, dont la direction est décalée dans chaque couche. On distingue différents types des stratifiés :

- ✓ Stratifiés symétriques.
- ✓ Stratifiés symétriques miroir.
- ✓ Séquences.
- ✓ Stratifiés hybrides.

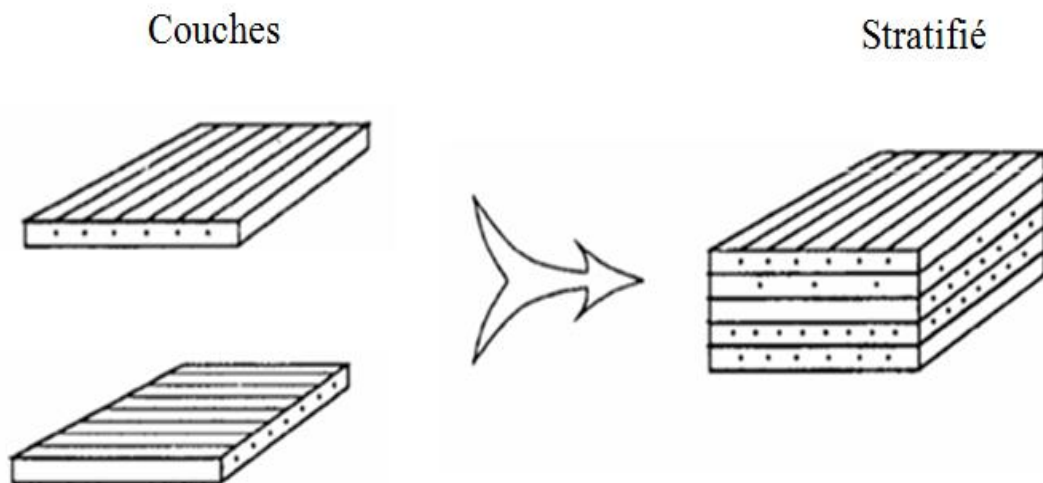


Fig. I.5. Constitution d'un stratifié

I.3.2.2. Les sandwich

Selon Laurent Gornet [7], les structures composites subissant des sollicitations de type flexion ou torsion sont généralement construites en matériaux sandwich. 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 (I.8).

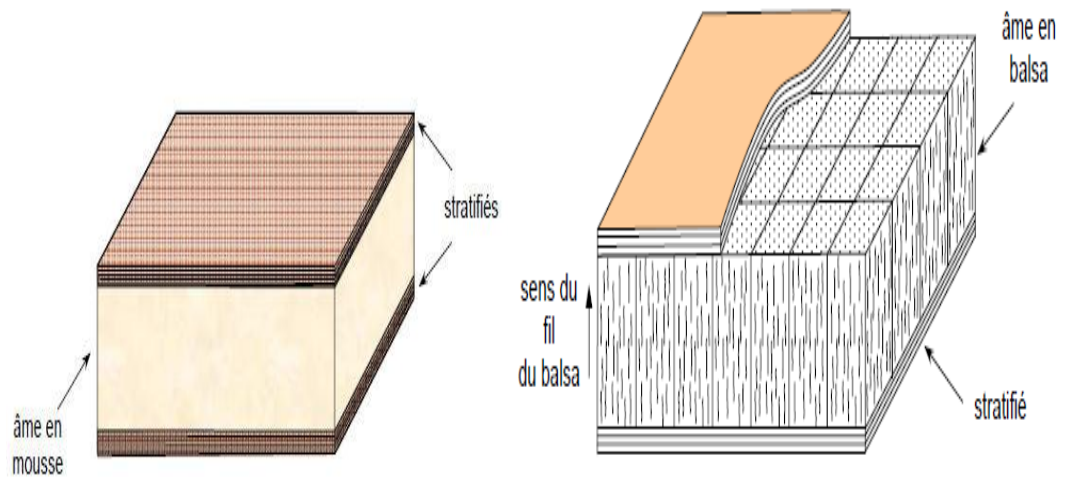


Fig. I.6. Matériaux sandwichs à âmes pleines [6]

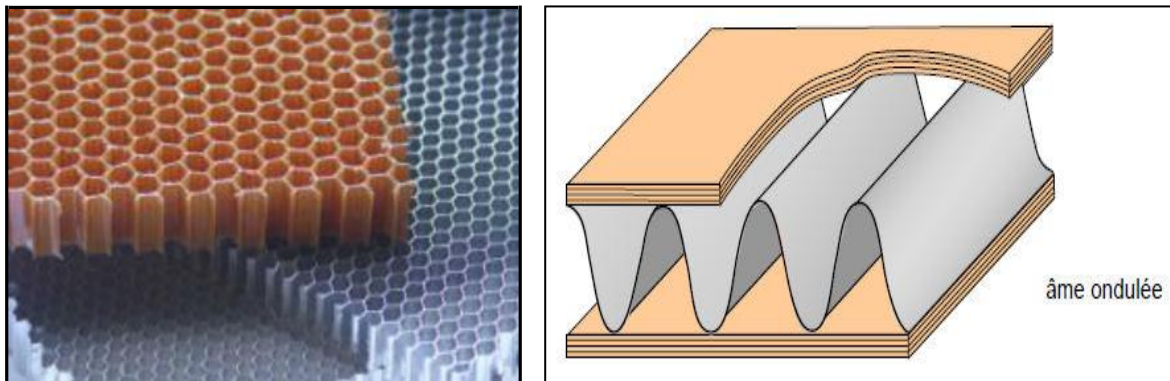


Fig. I.7. Nid d'abeilles

Fig. I.8. Matériaux sandwichs à âmes creuses [6]

Ces structures ont une grande rigidité en flexion et en torsion. L'âme de la structure sandwich résiste principalement aux contraintes de cisaillement et de compression hors plan. Les peaux inférieures et supérieures supportent quant à elles les efforts dans leur plan. Les figures (I.1) et (I.9) présentent quelques types de sandwichs.

I.3.2.3. Les types de stratifiés tissés

a. 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.

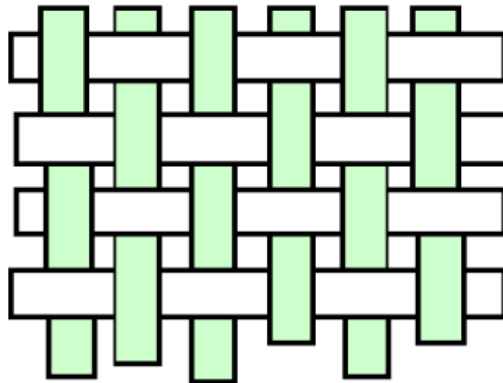


Fig. I.9. Tissu toile

b. 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-dessous, un sergé 2/2.

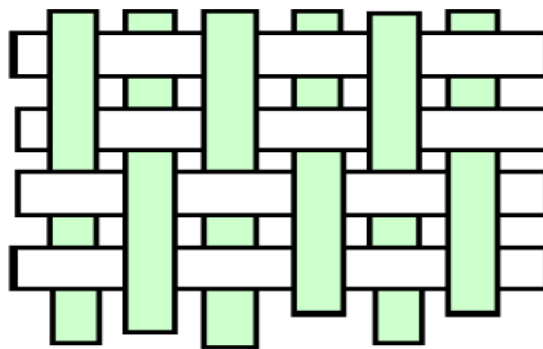


Fig. I.10. Tissu serge

c. Satin

Le fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs fils de trame ; dans un satin de 8, le fil de chaîne flotte au-dessus de 7 fils de trame ; c'est l'armure la plus déformable : elle sera utilisée pour réaliser des formes complexes ; la déformabilité d'un tissu peut aussi être un inconvénient car elle empêche de connaître avec précision l'orientation des fibres dans le matériau final. Les tissus sont plus faciles à manipuler que les nappes et offrent des

propriétés intéressantes dans deux directions. Un tissu équilibré doit être comparé à un matériau réalisé par deux nappes superposées à 90° [8].

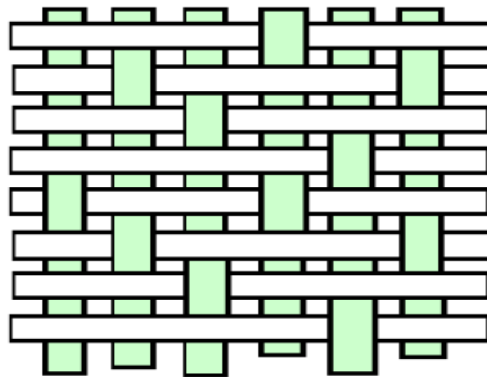


Fig. I.11. Tissu satin

Ceci est la fibre choisie pour la préparation des plaques.

I.4. Les différentes matrices

Pour lier les fibres ensemble, on utilise généralement des matrices qui se classent en trois grandes catégories : les résines thermodurcissables, les résines thermoplastiques et les matrices métalliques.

I.4.1. Résines thermodurcissables

Une résine thermodurcissable est une formulation de différents produits appartenant essentiellement à la chimie organique, qui possède la propriété de passer de façon **irréversible** d'un état liquide à un état solide.

I.4.2. Résine polyester

Elle présente un bon accrochage sur les fibres, un prix réduit, mais a un retrait important et une tenue réduite à la chaleur humide.

I.4.3. Résine époxyde

C'est la plus utilisée dans l'industrie aéronautique. Elle présente un bon accrochage sur les fibres, un faible retrait au moulage (de l'ordre de 0,5 %) et de bonnes propriétés mécaniques. Elle garde d'excellentes caractéristiques jusqu'à une température de 170°C .

I.4.4. Résine phénolique

Ayant de moins bonnes propriétés mécaniques que les résines époxydes, elle n'est utilisée que lorsqu'il y a des exigences vis-à-vis de la tenue au feu (toxicité).

I.4.5. Résine polyamide

D'un emploi relativement difficile, chère, elle a l'avantage de garder de bonnes caractéristiques sur une large plage de température (de -100 °C à $+260\text{ °C}$).

I.4.6. Résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques présentent la propriété de passer de façon **réversible** de l'état solide à l'état pâteux. Elles présentent plusieurs avantages provenant directement de leur définition [8].

I.5. Les raisons de l'utilisation des composites

Le développement des composites modernes est dû essentiellement aux besoins de plus en plus poussés de l'industrie, surtout dans les secteurs :

- Aérospatial
- Aéronautique
- Défense
- Sport
- Biomécanique

Dans tous ces secteurs les impératifs de **légereté**, **rigidité** et **résistance** rendent les composites indispensables

I.6. Moulage à basse pression**I.6.1. Moulage par projection simultanée**

Le moulage est effectué par projection simultanée de fibres coupées et résine catalysée sur un moule. Le moulage par projection permet d'obtenir de grandes séries de

pièces, avec un bas prix de revient. Le renfort est toutefois limité à des fibres coupées, et les caractéristiques mécaniques du matériau restent moyennes.

I.6.2. Moulage au contact

Technologie de réalisation de pièces prototypes ou de simulation. Le principe consiste à imprégner manuellement les renforts disposés dans un moule. C'est peu onéreux et des pièces de formes quelconques peuvent être réalisées mais cadence très faible.

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

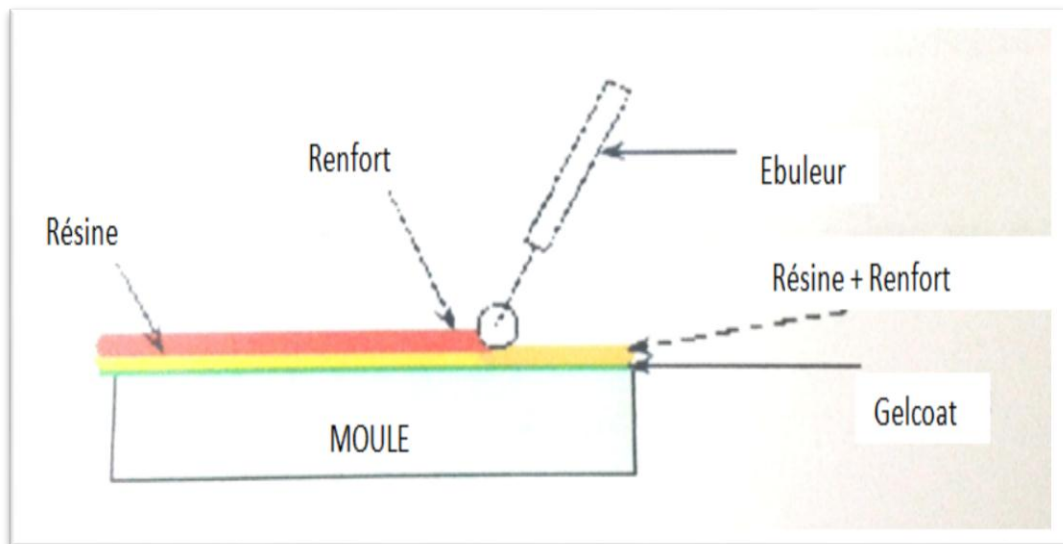


Fig. I.12. Principe de moulage au contact

Avantage

- ✓ Très larges possibilités de forme.
- ✓ Pas de limite dimensionnelle, une surface lisse gelotée (aspect, tenue à la corrosion). Propriétés mécaniques moyennes à bonnes.
- ✓ Investissements spécifiques très faibles.
- ✓ Moules simples, peu onéreux, rapides à réaliser en interne.

Limites

- ✓ Une seule facelisse.
- ✓ Nécessité de finition (détourage, perçage...).
- ✓ Qualité tributaire de la main d'œuvre.
- ✓ Faible cadence de production par moule, espace de travail important [3].
- ✓ Conditions de travail médiocres.

I.7. Architecture des matériaux composites [6]

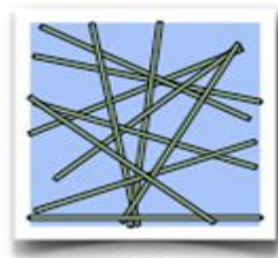
L'ensemble des procédés de mise en œuvre montre la prépondérance de la conception des pièces en matériaux composites :

- par surface : plaques, coques.
- par stratification de couches successives.

On rencontre plusieurs architectures du renfort :

Unidirectionnelle

Ex : fibres de verres

**Multidirectionnelle aléatoire****Orientée**

Ex. comme le tissu

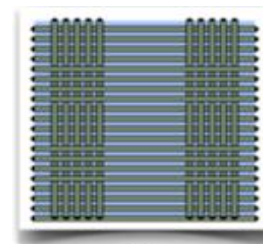


Fig. I.13. Architecture des renforts [6]

Chapitre II

Comportement mécanique des matériaux composites

II.1.Introduction

L'élaboration de la structure est non séparée de celle du matériau. Le comportement résulte de celui des composants par l'intermédiaire de différents types d'interaction, d'où l'importance de l'interface entre les composants. Le comportement des composants est différent d'où l'intérêt de les faire travailler ensemble. La question de base qui se pose est de savoir décrire le comportement du composite connaissant celui des constituants. La spécificité du calcul des matériaux composites viennent donc de l'hétérogénéité par conception, et des discontinuités par des micros vides.

On examine ici une association de deux matériaux (matrice et renfort) de caractéristiques distinctes, avec une géométrie et des sollicitations simples, dans le but d'estimer les caractéristiques élastiques du matériau équivalent, c'est à dire du composite.

Les champs des déformations et des contraintes dans un milieu sont liés par des lois appelées lois de comportement, caractérisant le comportement mécanique du milieu [9].

Ces lois sont décrites par des axiomes qui permettent de rendre compte au mieux des phénomènes observés. L'expérience montre que de nombreux milieux solides déformables ont pour une température donnée, un comportement élastique linéaire [9].

II.2. Comportement élastique des matériaux

Pour un matériau donné, la loi de comportement consiste à déterminer la relation entre les contraintes et les déformations quand il est soumis à des sollicitations extérieures. Dans un milieu continu élastique l'état de contraintes, en un point dans un repère orthonormé (x, y, z) donné est entièrement définis par le tenseur des contraintes noté σ_{ij} . Les propriétés mécaniques de l'interface entre fibres et matrice sont très importantes dans la réalisation d'une structure composite. En effet, il ne doit avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases de la structure pour obtenir de bonnes caractéristiques mécaniques élastiques [3].

II.2.1. Loi de Hooke généralisée

La relation d'élasticité linéaire peut s'écrire sous la forme suivante [3] :

$$\sigma = C \varepsilon \quad (\text{II.1})$$

Ou sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{54} & C_{55} & 0 \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

II.2.1.1. Matrice de rigidité

Dans cette loi, généralement appelée loi de Hooke généralisée, la matrice de rigidité C est symétrique. Le comportement linéaire d'un matériau est donc décrit dans le cas général à l'aide de 21 coefficients indépendants. La matrice de flexibilité ou de souplesse S_{ij} , peut être écrite sous la forme inverse, suivante:

$$\varepsilon = S \sigma \quad (\text{II.3})$$

II.2.1.2. Matrice de souplesse

La relation d'élasticité (II.1) peut être écrite sous la forme inverse, suivant [3] :

$$\varepsilon = S\sigma \quad (\text{II.4})$$

En introduisant la matrice inverse de la matrice de rigidité. La matrice S est appelée matrice de souplesse ou de flexibilité, et s'écrit sous le cas général [3] :

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} . \quad (\text{II.5})$$

Avec : Les coefficients S_{ij} sont appelés les constantes de souplesse ou constantes de flexibilité.

$$S = C^{-1} \tag{II.6}$$

Un matériau dépendant de 21 constantes indépendantes est dit un matériau anisotrope. C'est un matériau ne possédant aucune propriété de symétrie [3].

II.2.2. Différents matériaux

II.2.2.1. Matériaux monocliniques

Si le matériau a un plan de symétrie, monoclinique, quelques constantes sont nulles et le comportement peut être décrit avec 13 constantes indépendantes [3] :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{54} & C_{55} & 0 \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \tag{II.7}$$

II.2.2.2. Matériaux orthotropes

Un milieu est dit orthotrope pour une propriété donnée si cette propriété est invariante par changement de direction obtenue par symétrie relative à deux plans orthogonaux. On remarque alors que la symétrie par rapport au troisième plan orthogonal est automatiquement acquise. Ce mode de comportement est relativement bien réalisé pour les composites unidirectionnels [3].

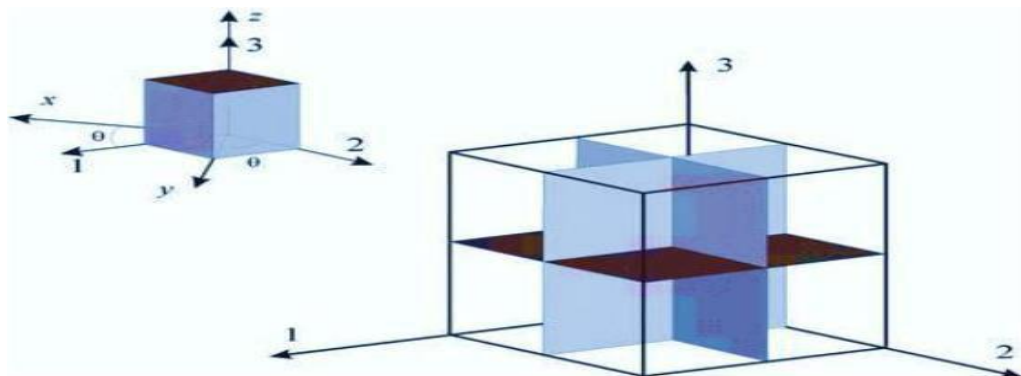


Fig.II.1. Représentation des trois plans de symétrie d'un matériau orthotrope

Les coefficients indépendants se réduit à 9. La loi de comportement s'écrit alors :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ sym & & & & C_{44} & 0 \\ & & & & & C_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (II.8)$$

Ou encore :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & S_{44} & 0 & 0 \\ sym & & & & S_{55} & 0 \\ & & & & & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (II.9)$$

En introduisant les caractéristiques élastiques :

E_1, E_2, E_3 : Modules d'élasticité.

G_{12}, G_{13}, G_{23} : Modules de cisaillement.

$\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$: Coefficients de poisson (contraction).

La relation (2.8) s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & \frac{-\nu_{21}}{E_{21}} & \frac{-\nu_{31}}{E_{31}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_{12}} & \frac{1}{E_{22}} & \frac{-\nu_{32}}{E_{23}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{13}}{E_{13}} & \frac{-\nu_{23}}{E_{23}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (II.10)$$

La symétrie de la matrice de souplesse [S] impose les relations suivantes :

$$\frac{\nu_{21}}{E_2} = \frac{\nu_{12}}{E_1} \quad (\text{II.11})$$

$$\frac{\nu_{31}}{E_3} = \frac{\nu_{13}}{E_1} \quad (\text{II.12})$$

$$\frac{\nu_{33}}{E_2} = \frac{\nu_{32}}{E_3} \quad (\text{II.13})$$

II.2.2.3. Matériaux isotropes

Dans ce cas toutes les directions et en tout point du matériau ont les mêmes propriétés mécaniques. Le nombre de coefficients indépendants se réduit à 2 coefficients et la loi de comportement s'écrit [3].

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 \\ & \text{sym} & & & & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

En termes de constantes techniques l'inverse de la relation (2.10) s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu}{E} & \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (\text{II.16})$$

II.2.2.4. Matériaux isotropes transverses

Un matériau isotrope transverse est un matériau orthotrope qui comporte un axe ou un plan d'isotropie. Les propriétés suivant l'axe 2 et 3 sont identiques, donc [3] :

- $C_{22} = C_{33}$
- $C_{12} = C_{13}$
- $C_{55} = C_{66}$
- $C_{44} = \frac{C_{22} - C_{33}}{2}$

Le nombre de coefficients indépendants se réduit à 5.

La loi de comportement s'écrit alors :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{C_{22} - C_{33}}{2} & 0 & 0 \\ & sym & & & C_{66} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

II.2.2.5. Matériaux quasi isotropes transverses

Le nombre de coefficients indépendants se réduit à 6 coefficients, et la loi de comportement s'écrit [3] :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & C_{45} & 0 \\ & sym & & & C_{44} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

II.2.2.6. Matériaux quasi isotropes

Le nombre de coefficients indépendants se réduit à 3 coefficients, la loi de comportement s'écrit [3] :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ & sym & & & C_{44} & 0 \\ & & & & & C_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \tag{II.19}$$

II.3. Caractéristiques mécaniques du mélange renfort-matrice [3]

Les lois de mélange permettent de déterminer les caractéristiques d'un matériau composites en fonction de ces constituants (fibre et matrice) et leur teneur volumique. Les caractéristiques mécaniques de ces constituants sont :

V_f, V_m : Teneur volumique des constituants (f : fibre, m : matrice).

E_f, E_m : Modules de Young.

ρ_f, ρ_m : Masse volumique (f : fibre, m : matrice).

➤ **Teneur en volume et en masse du renfort et de la matrice**

$$V_f = \frac{\text{volume de renfort}}{\text{volume totale}} \quad \text{et} \quad V_m = \frac{\text{volume de la matrice}}{\text{volume totale}} \tag{II.20}$$

Avec :

$$V_m = 1 - V_f \quad \text{et} \quad V_m = \frac{\frac{M_f}{\rho_f}}{\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_m}{\rho_m}} \tag{II.21}$$

$$M_f = \frac{\text{masse de renfort}}{\text{masse totale}} \quad M_m = \frac{\text{masse de la matrice}}{\text{masse totale}} \tag{II.22}$$

Avec :

$$M_f = 1 - M_m \quad \text{et} \quad M_m = \frac{V_f \rho_f}{V_f \rho_f + V_m \rho_m} \quad (\text{II.23})$$

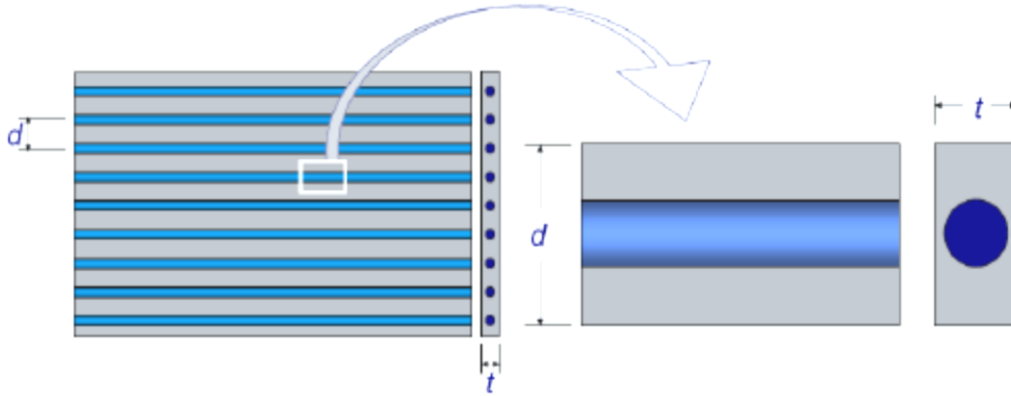


Fig. II.2. Structure élémentaire d'un matériau composite unidirectionnel

➤ **Module d'élasticité dans le sens des fibres**

$$E_l = E_m V_m + E_f V_f \quad (\text{II.24})$$

➤ **Module d'élasticité dans le sens transversal des fibres**

$$E_t = E_m \left[\frac{1}{(1 - V_m) + \frac{E_m V_f}{E_{f_t}}} \right] E_{f_t} \quad (\text{II.25})$$

E_{f_t} : Module de Young dans le sens transversal des fibres (fibres anisotropes), mais dans la majorité des cas on utilisant $E_{f_t} \approx E_f$ donc :

$$E_t = \frac{E_m E_f}{E_f V_m + E_m V_f} \quad (\text{II.26})$$

➤ **Coefficient de Poisson**

Il caractérise la contraction dans le sens transverse t du pli lorsqu'on le sollicite en traction suivant le sens l .

$$v_{l_t} = v_m V_m + v_f V_f \quad (\text{II.27})$$

$$\nu = \frac{\varepsilon_{yy}}{\varepsilon_{xx}} \quad (\text{II.28})$$

II.3.1. Modules d'élasticité et coefficient de Poisson du pli tissu

Le pli est remplacé par un seul pli unidirectionnelle anisotrope qui aurait le même taux volumique V_f de renfort et d'épaisseur (h), (x) étant la chaîne et (y) celle de la trame, on a alors [3] :

$$E_x \approx KE_l + (1 - K)E_t \quad (\text{II.29})$$

$$E_y \approx KE_t + (1 - K)E_l \quad (\text{II.30})$$

$$\nu_{xy} \approx \frac{\nu_{lyt}}{\left(K + (1+K)\frac{E_l}{E_t}\right)} \quad (\text{II.31})$$

Avec :

$$K = \frac{n_1}{n_1 + n_2} \quad (\text{II.32})$$

n_1 : nombre de fils de chaîne par mètre.

n_2 : nombre de fils de trame par mètre.

K : Coefficient de l'équilibrage.

Chapitre III

Etude expérimentale sur les plaques trouées

III.1. Introduction

Dans cette étude expérimentale nous montrons la préparation des plaques composites munies d'un trou carré centré en résine polyester et fibre tissu. Premièrement, les plaques en matériaux composites sont conçues par le procédé de moulage par contact. Des éprouvettes ont été préparées pour la caractérisation statique du matériau suivant des normes internationales ASTM et ISO. Une attention particulière a été donnée à l'opération de perçage des trous carrés en respectant les conditions de coupes relatives aux matériaux composites. Les éprouvettes trouées obtenues ont été sollicitées par un effort de flexion.

Ce dernier consiste à mettre en évidence l'influence de la présence des trous carrés sur le comportement mécanique des plaques.

III.2. Préparation et fabrication

Les plaques en matériaux composites sont fabriquées par le procédé de moulage par contact à la température ambiante. Le matériau est constitué d'une matrice de polyester renforcée par des fibres tissu. La résine est préparée préalablement par malaxage avec le catalyseur [10]. On utilise quatre plis de renfort tissu à 450 g/m². Le taux des fibres est choisi, selon les normes ISO 1268-2, entre le pourcentage de 30 % et 45 %.

III.2.1. Matériaux

- ✓ **Tissu (satin)** : 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 entre croisements successifs génèrent un embuvage important et réduisent les propriétés mécaniques. Un tissu se déforme facilement, car les fils de chaîne et de trame glissent les uns contre les autres. Ce phénomène est d'autant plus facile que le nombre de croisements est réduit.
- ✓ **Résine polyester** : La matrice constituant le matériau composite de cette étude est une matrice thermodurcissable.

III.2.2. Matériels

- ✓ **Durcisseur** : utilisé pour durcir la résine.
- ✓ **Catalyseur (Révélateur)** : utilisé pour faciliter le démoulage.

- ✓ **ciseaux** : utilisé pour couper le tissu.
- ✓ **peinture noire et blanche** : utilisé pour tacheter les éprouvettes.
- ✓ **Moule en inox** : utilisé pour le moulage.
- ✓ **D'ébulleur** : utilisé pour dégager les billes d'aires.
- ✓ **perceuse** : machine-outil utilisé pour percer les échantillons.

III.2.3. Les étapes des bases de la stratification

- Tout d'abord préparer les renforts.
- La fibre tissée se coupe minutieusement pour éviter sa déchirure.
- Préparer une quantité de résine raisonnable.
- Incorporer 2 % catalyseur N°1
- Mélanger soigneusement la résine polyester et le durcisseur (liquide).
- Etaler la résine sur le moule ou sur la pièce à stratifier.
- Positionner la fibre tissée.
- Après quelques minutes le bleu (révélateur) disparaît.
- Imprégner la fibre de verre, elle devient transparente une fois imprégnée.
- Déposer de la résine avant de venir mettre en place la fibre de verre.
- On applique un révélateur sur une plaque rigide pour faciliter le démoulage de la plaque puis on étale une première couche de résine par l'utilisation de rouleau. Les plis sont posés l'un après l'autre, chaque pli est soigneusement imprégné de résine à l'aide d'un rouleau et un d'ébulleur figure (III.7).



Fig. III.1. Balance



Fig.III.2. Résine polyester



Fig. III.3. Moule



Fig. III.4. Durcisseur



Fig. III.5. Révélateur (Agent de démoulage)

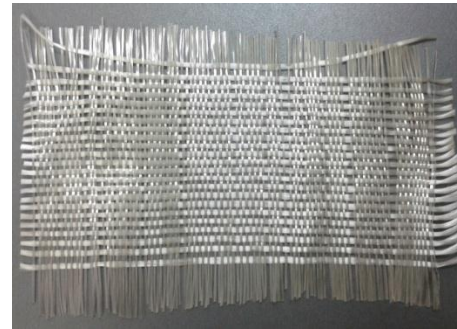


Fig. III.6. Fibre tissu



Fig. III.8. Plaque moulées par contact



Fig. III.7. D'ébulleur

III.2.4. Préparation des éprouvettes

Selon les normes ASTM 5045, il est recommandé d'utiliser le disque en diamant pour découper les plaques en résine polyester renforcée des fibres tissu. On procède au découpage pour préparer les éprouvettes en forme rectangulaire pour l'essai de flexion.

Nous allons utiliser une machine de coupe figure (III.9). Avec les conditions de coupes suivantes :

- Disque en diamant.

- Avance manuelle lente.
- Vitesse de coupe 3000 tr/min
- Sans lubrification.



Fig. III.9. Machine de coupe

III. 2.4.1. Type du perçage

III.2.4.1.1. Perçage par enlèvement de la matière

Le perçage est l'un des plus vieux procédés d'usinage par enlèvement de matière, facile à utiliser mais difficile à maîtriser. Parmi les difficultés propres au perçage des composites, on peut citer :

- ✓ une évolution importante et progressive de la vitesse de coupe (V_c) selon la position sur l'arête de coupe.
- ✓ une évolution de la géométrie de l'outil avec le rayon.
- ✓ une coupe oblique tridimensionnelle.
- ✓ un usinage en espace confiné qui empêche l'évacuation des copeaux et de la chaleur générée dans la zone de coupe.

L'opération de perçage des trous circulaires au centre des éprouvettes composites par machine de coupe ce que n'appelle perceuse à colonne on utilise un outil de coupe (foret) de différents diamètres.

Après avoir coupé les échantillons, on procède au perçage de trous:

Les trous cylindriques sont percés par des forets de différents diamètres en acier rapide : Ø5, Ø7, Ø10, Ø12.



Fig.III.10. Machine outil (perceuse)



Fig. III.11. Forets rapide

III.2.5. Défauts de perçage des matériaux composites

Aujourd'hui, une grande partie des trous percés dans les matériaux composites est réalisée à l'aide d'un foret hélicoïdal à deux lèvres. De nombreuses études ont été menées afin d'identifier les défauts créés dans le matériau composite lors du perçage avec foret hélicoïdal.

D'autres géométries d'outils mieux adaptés à l'usinage des matériaux composites sont constamment développées en donnant des résultats plus ou moins convaincants.

Les défauts inclus lors du perçage peuvent être dissociés en deux catégories :

- a. Caractéristiques géométriques du trou, valable quelle que soit la nature du matériau:
 - ✓ circularité.
 - ✓ diamètre : sur une série de trous.
 - ✓ rugosité.
- b. Défauts liés à la structure des matériaux composites :
 - ✓ défauts côté débouchant :
 - écaillage des arêtes (bris de la résine coté débouchant).
 - délaminage (décohésion des plis sur la surface libre).

- fissurations sur la paroi du trou.

De plus, les paramètres de mise en œuvre, la structure du matériau ainsi que la géométrie du foret influencent sur la nature des défauts générés lors de l'usinage.

Un foret en acier rapide peut convenir, mais la qualité est améliorée avec un foret au carbure.

Il est recommandé de maintenir l'arrière de la pièce et de ralentir l'avance avant de déboucher, afin d'éviter un délaminage des dernières couches. Pour le perçage des stratifiés tissés, la qualité de coupe et, notamment, l'absence de délaminage, est améliorée si le foret comporte une pointe centrale de guidage et un bord de coupe réduit pour diminuer le frottement sur le bord du trou [3].

III.2.6. Usinage la forme carrée

La fabrication d'une forme carrée vient après l'opération de perçage et être manuellement à l'aide des lûmes.



Fig.III.12.Lûmes

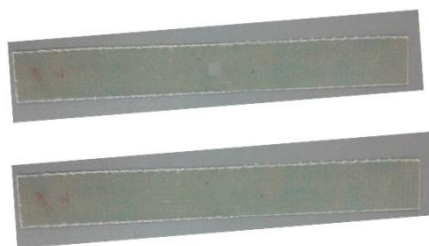


Fig. III.13. Les éprouvettes de composite

III.2.7. Moucheté

Un mouchetis surfacique d'origine naturelle (relief, texture...) ou artificielle (spray de peinture noire ou blanche, relief d'attaque chimique...) présentant des gradients de niveaux de gris suffisants est utilisé pour garantir la réussite du processus de corrélation.

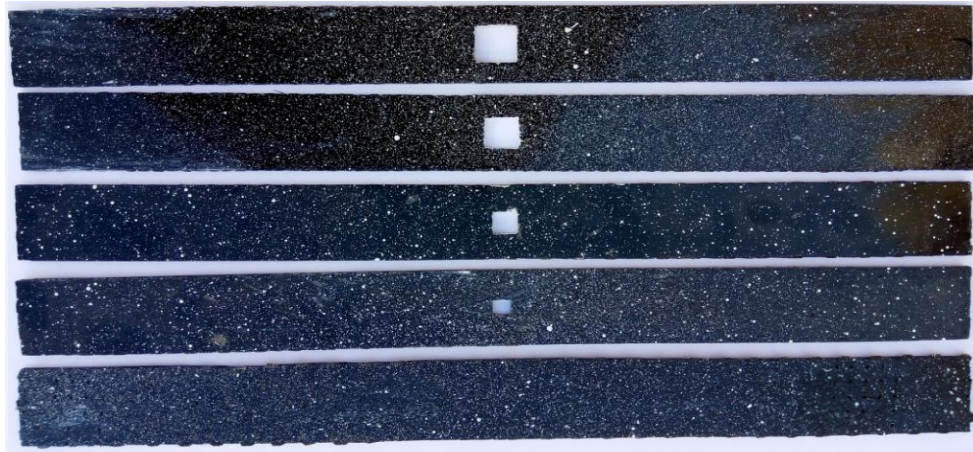


Fig. III.14. Les éprouvettes mouchées

Tab. III.1. Géométrie des éprouvettes

	Rapport (d/b)	Largeur b (mm)	L'épaisseur h (mm)	Langueur L (mm)
Eprouvette sans trou N° 1	/	25.7	1.56	280
Eprouvette sans trou N° 2	/	25.7	1.6	280
Eprouvette sans trou N° 3	/	25.7	1.65	280
Eprouvette N° 1.1	0.2	25.7	2.18	280
Eprouvette N° 1.2	0.2	25.7	1.81	280
Eprouvette N° 1.3	0.2	25.7	2.03	280
Eprouvette N° 2.1	0.3	25.7	1.69	280
Eprouvette N° 2.2	0.3	25.7	1.45	280
Eprouvette N° 2.3	0.3	25.7	2.16	280
Eprouvette N° 3.1	0.4	25.7	1.72	280
Eprouvette N° 3.2	0.4	25.7	1.61	280
Eprouvette N° 3.3	0.4	25.7	2.19	280
Eprouvette N° 4.1	0.5	25.7	2.21	280
Eprouvette N° 4.2	0.5	25.7	1.95	280
Eprouvette N° 4.3	0.5	25.7	1.62	280

III.2.8. Préparation des éprouvettes en fibre tissu

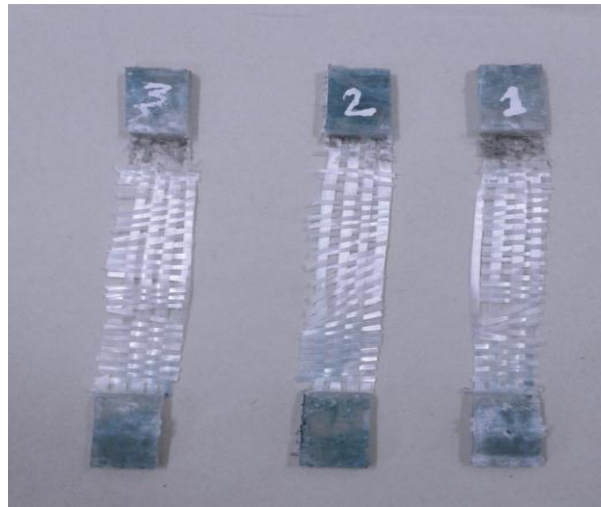


Fig. III.15. Éprouvette en tissu



Fig. III.16. Éprouvette fil de chaîne

III.2.8.1. Caractérisation de la fibre

Les tissés sont des renforts qui se présentent sous la forme de tissus (cf. norme NF G07-154). Ils sont généralement bidirectionnels, mais, pour certaines textures, elles peuvent être considérées comme des quasis unidirectionnels. Un tissu comprend des fils de chaîne (suivant la direction d'enroulement sur son support) et des fils de trame disposés perpendiculairement.

Afin de déterminer les caractéristiques mécaniques des fibres, des échantillons de chaque type de renfort, sont sollicités en flexion sur une machine d'essai universelle.

III.2.8.2. Caractérisation mécanique de fil

a. Titre de fil

Le fil se caractérise par une masse linéique dite « le titre ». Deux types de "titre" peuvent être calculés, le titre conditionné et le titre déshydraté qui donne la masse linéique commerciale. La détermination du titre conditionné se fait par la mesure de la masse et de la longueur d'un fil dans l'atmosphère de conditionnement des textiles. Le titre déshydraté est déterminé par la pesée d'un fil de longueur donnée après dessiccation de celui-ci à l'étuve dans des conditions spécifiées [NFG04].

Le système d'unité utilisé est le « tex » et l'équation qui fournit la valeur de la masse linéique d'un fil est la suivante:

$$\text{Titre} = \frac{M(g)}{L(m)} \times 1000 \quad (\text{III. 1})$$

Où, M est la masse du fil exprimée en gramme et L est la longueur du fil exprimée en mètre.

b. Essai de traction sur fil [NFG03]

Cet essai est utilisé pour déterminer la force et l'allongement des fils soumis à une traction jusqu'à la rupture.

La courbe contient plus d'informations que juste la résistance à la traction de l'échantillon. Les principales caractéristiques qu'on peut dégager de la courbe force-allongement sont :

- La limite élastique «yield point» : la courbe contient souvent un point de diminution de pente. Ce point est la "limite d'élasticité ou limite élastique". Au-dessous de la limite élastique, l'extension du matériau est considérée comme élastique et l'éprouvette retourne à sa longueur initiale quand la force est arrêtée. Au-dessus de la limite élastique, une partie de l'extension est non recouvrable et l'éprouvette maintient une portion de son extension à la fin de l'essai.

- Le module d'élasticité: La pente de la première partie linéaire de la courbe jusqu'à la limite élastique est connue comme le module initial (module d'Young). Il existe un nombre de modules possibles qui peuvent être mesurés.

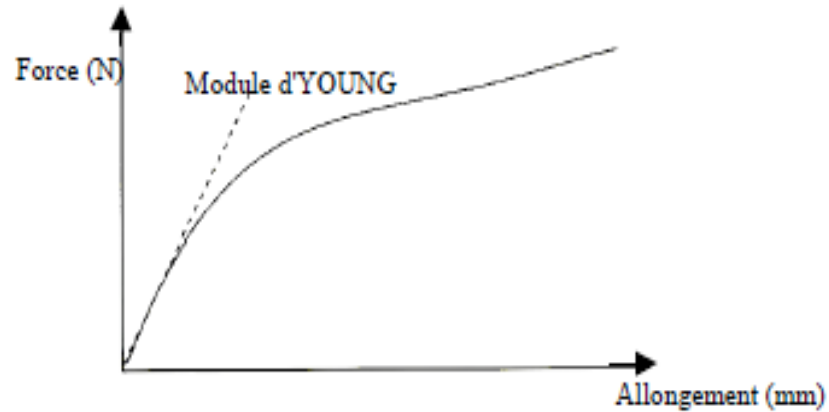


Fig.III.17. Module de Young [SAV99]

Module de Young : Cette valeur est obtenue à partir de la pente de la région linéaire la plus raide de la courbe [11].

II.2.9. Préparation des éprouvettes en résine polyester



Fig. III.18. Éprouvette de flexion



Fig. III.19. Moule



Fig. III.20. Éprouvette de traction

- **Présentation schématique des éprouvettes de tractions étudiées**

La figure (III.21) montre clairement les dimensions normalisées de nos éprouvettes en

résine.

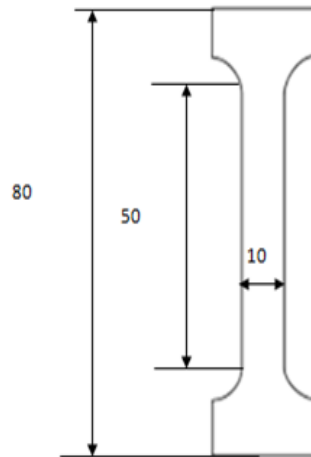


Fig. III.21. Schéma d'éprouvette spécifiant les dimensions normalisées des éprouvettes

III.3. Détermination du taux de fibres

La calcination est une technique utilisée dans le but de déterminer le pourcentage de fibres tissu dans le matériau composite étudié. Nous découpons deux échantillons dans l'éprouvette après l'essai de flexion. L'échantillon est pesé à l'aide d'une balance digitale de 0,001 g de précision. Ensuite l'échantillon est chauffé dans un four pendant 2 heures à une température typique de 750°C, jusqu'à ce que la résine soit totalement calcinée. Le résidu de fibres obtenues est refroidi puis pesé.

Les taux de fibres tissu et de résine sont donnés par les formules suivantes :

$$V_f = \frac{B}{A} * 100\% \quad (III.2)$$

$$\text{et} \quad V_m = 100\% - V_f \quad (III.3)$$

A : poids de l'échantillon en (g) avant la calcination.

B : poids des fibres (g) obtenus après la calcination.

V_f et V_m : fraction massique des fibres et de la matrice en (%).

Tab. III.2. Détermination du taux de matériau en polyester/tissu

N°	A (g)	B (g)	V_m %	V_f %
1	1,309	0,702	53,62	46,37
2	0,33	0,17	50,98	49,02

III.4. Détermination module de Young

III.4.1. Méthode expérimentale

Tout d'abord, nous avons effectué un essai de traction sur deux éprouvettes, la première en résine polyester et la deuxième en fibre tissu, et un essai de flexion sur éprouvette en composite pour déterminer le module de Young.

III.4.2. Méthode analytique

Si la loi des mélanges pour le module d'Young (module d'élasticité longitudinal) donne de bons résultats, les formules donnant les caractéristiques transversales sont beaucoup plus approchées. Il ne faut pas perdre de vue que les propriétés du matériau en rigidité et encore plus en résistance dépendent de la méthode de fabrication.

Il faut donc toujours, pour connaître les caractéristiques du matériau, faire des essais sur des éprouvettes qui seront réalisées de façon identique à la structure finale.

$$\text{La loi de mélange : } E_{\text{éq}} = E_f * V_f + E_m * V_m \quad (\text{III. 4})$$

$$E_f = \frac{E_m * V_m - E_{\text{éq}}}{V_f} \quad \text{et} \quad E_m = \frac{E_f * V_f - E_{\text{éq}}}{V_m} \quad (\text{III. 5})$$

III.5. Détermination du coefficient de poisson [15]

Durant l'essai, l'allongement de l'éprouvette se passe dans le sens de la traction c'est-à-dire le long de la longueur L , il entraîne une augmentation de son volume si la déformation est élastique donc, il y a une compensation partielle de cette augmentation de volume par contraction latérale de l'éprouvette dans le sens de largeur b , on peut dire suivant les directions perpendiculaires à l'axe de traction.

La déformation relative dans les directions y et z s'écrit :

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta y}{y_0} \quad \text{et} \quad \varepsilon_z = \frac{\Delta z}{z_0} \quad (\text{III. 6})$$

Ainsi, on définit le coefficient de Poisson comme étant le rapport de la déformation relative transversale et longitudinale.

Donc :
$$\Delta = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{V - V_0}{V_0} \quad (\text{III. 7})$$

$$V_0 = x_0 * y_0 * z_0 \quad (\text{III. 8})$$

Et
$$\Delta = \frac{x*y*z - x_0*y_0*z_0}{x_0*y_0*z_0} \quad (\text{III. 9})$$

On néglige les termes infiniment petits égaux ou supérieurs d'ordre 2, donc on à :

$$V = x_0 \left(1 + \frac{\Delta x}{x_0}\right) y_0 \left(1 + \frac{\Delta y}{y_0}\right) z_0 \left(1 + \frac{\Delta z}{z_0}\right) \quad (\text{III. 10})$$

Et en remplaçant les équations(III. 8) et (III. 10) dans l'équation (III. 9)

$$\Delta = \frac{\Delta x}{x_0} + \frac{\Delta y}{y_0} + \frac{\Delta z}{z_0}; \quad \frac{\Delta x}{x_0} = \varepsilon_x \quad \text{et} \quad \frac{\Delta y}{y_0} = \varepsilon_y \quad \text{et} \quad \frac{\Delta z}{z_0} = \varepsilon_z$$

Et
$$v = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} \quad (\text{III. 11})$$

Soit :
$$\Delta = \varepsilon_x(1 - 2v)$$

III.5.1. Essai de vidéo traction et mesure de la déformation

Les essais de traction pour les petites déformations sont effectués sur la machine de traction INSTRON TYPE 5969 équipée d'un système de mesure de déformation sans contact ce dernier est appelé vidéo traction figure (III.24).

Le principe du système se base sur l'utilisation d'une camera LVDT monté sur un PC et positionnée sur un pied, un logiciel informatique permettent les traitements en temps réel de l'image, cette méthode permet d'imposer une déformation et une vitesse de déformation axiale et de mesurer en temps réels les déformations transversales grâce à un marquage de la surface de l'éprouvette à tester figure (III.22).

Dans notre cas, c'est la méthode des quatre tâches qui a été retenue, ou deux d'entre elles sont alignées selon l'axe 1 et les autres selon la direction transversale, les déformations et les contraintes sont estimées au cours de la sollicitation dans la partie utile correspondant à un volume élémentaires représentatif de façon que la striction y soit contenue, les tâches sont disposées sur la surface [12].

L'analyse géométrique de la position de ces tâches consiste à repérer la position de leur barycentre, et d'enregistrer la variation de leur distances relatives, le logiciel de

traitement d'image estime au cours de l'essai la déformation axiale et la déformation transverse selon l'axe 2, et enregistre au même temps la force appliquée pour déterminer la contrainte axiale afin d'estimer les déformations axiales (direction de l'axe 1 sens de la traction) et transverse (directions 2 et 3) et par suite la déformation volumique et la contrainte [12].

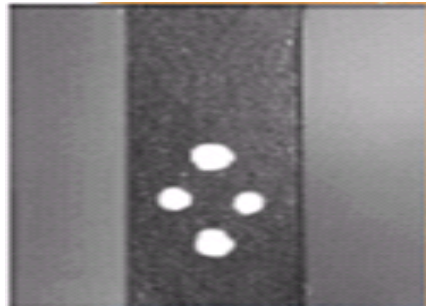


Fig. III.22. Les tâches disposées sur l'échantillon

III.5.2. Avant déformation

L'estimation de la déformation axiale ϵ_{11} et transverse est réalisée à l'aide d'une interpolation polynomiale faite au niveau de la zone utile par Gsell figure (III.23) elle donne :

$$\sigma_{33} = \frac{F}{S_0 \cdot h^2 \epsilon_{11}} \quad \text{et} \quad \nu = -\frac{\epsilon_{33}}{\epsilon_{11}} \quad \text{(III. 12)}$$

$$\epsilon_{11} = \ln \frac{AB}{A_0 B_0} \quad \text{et} \quad \epsilon_{22} = \ln \frac{CD}{C_0 D_0} \quad \text{(III. 13)}$$

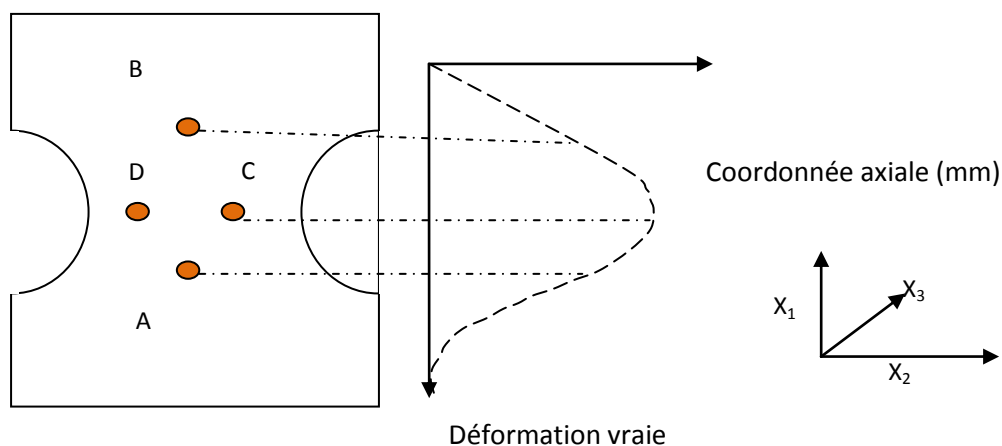


Fig. III.23. Interprétation schématique de la méthode de Gsell

Les lettres indices Oreprésentent les positions [12]

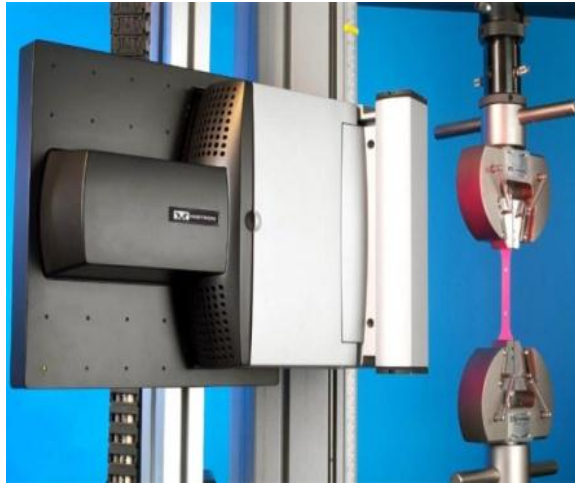


Fig.III.24. Dispositif d'enregistrement des données de l'essai

III.5.3. Equipement utilisé pour l'essai de traction

La machine de traction utilisée lors de notre expérimentation est de marque INSTRON 5969 dotée d'une force de 50 KN. La déformation a été mesurée avec un extensomètre à vidéo, figure (III.25).

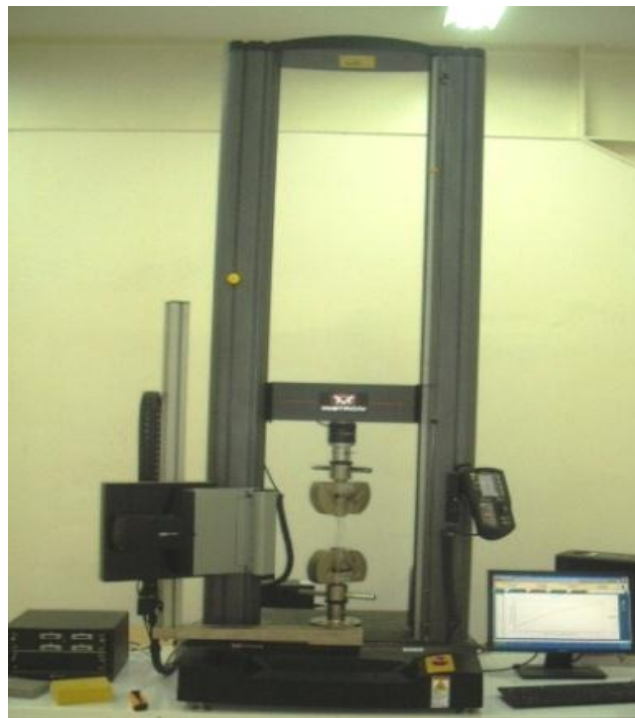


Fig. III.25. Essai de traction

III.6. Essais de flexion trois points

Les essais de flexion 3 points sont effectués à l'aide d'une machine universelle INSTRON constituée d'un système de flexion, un système de mesure des déplacements et un système de mesures des efforts engendrés. La machine est reliée à un ordinateur permettant le calcul direct de la charge appliquée en fonction des dimensions de l'éprouvette préalablement enregistrées avec une vitesse de traverse 1 mm/min.

Le test de flexion 3 points est effectué sur 15 éprouvettes préparées à partir des quatre plaques constituées de 04 plis figure (III.26).

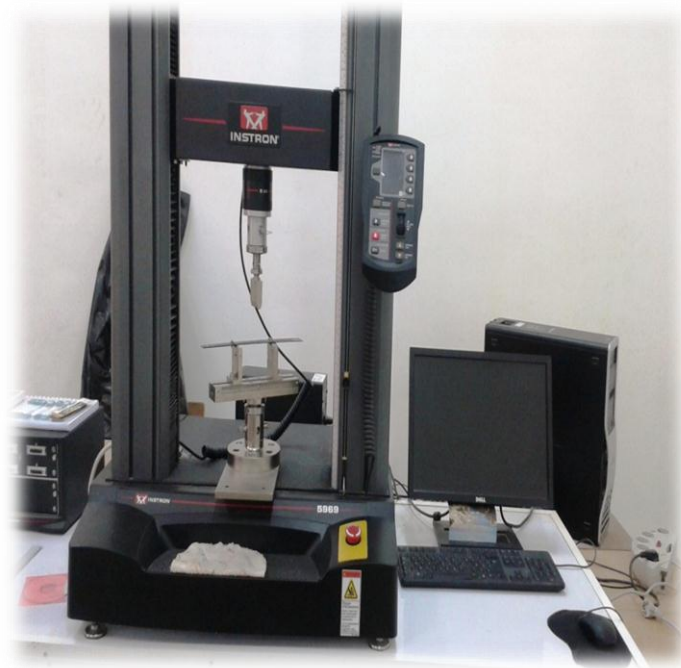


Fig. III.26. Essai de flexion

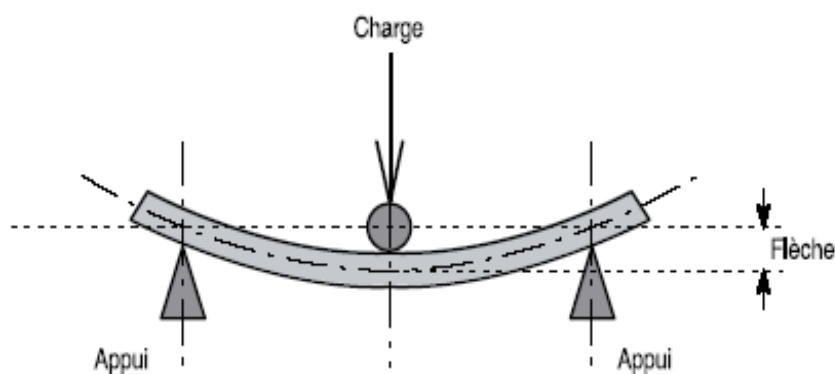


Fig. III.27. Plaque quasi isotrope soumise à un chargement de flexion [13].

La théorie de la résistance des matériaux (RDM) permet d'évaluer le moment fléchissant M_x autour de l'axe x , agissant sur la section droite de centre d'inertie G .

$$M_x = \frac{Pl}{4} \quad ; \quad E_X = \frac{Pl^3}{48\Delta I} \quad ; \quad f = \frac{Pl^3}{48bhE_f}$$

$I_Z = \frac{bh^3}{12}$: moment d'inertie, f : la flèche à l'abscisse Z , E_X : module d'élasticité.

Chapitre IV

Etude Numérique

IV.1. Introduction

Ce chapitre est étudié le comportement des plaques trouées numériquement par la méthode des éléments finis (MEF), cette méthode est considérée comme étant une technique numérique commode et bien établie. Pour cette raison, le recours à une méthode numérique est devenu une obligation. Donc, On a choisi le programme de calcul FORTRAN 77 et logiciel RDM 6, qui formée d'un ensemble de blocs comme une méthode numérique de cette étude.

Aujourd'hui encore le langage FORTRAN reste très utilisé, d'une part en raison de la présence de très nombreuses bibliothèques de fonctions utilisables, d'autre part parce qu'il existe des compilateurs FORTRAN performants qui produisent des exécutables très rapide.

IV.2. Historique

La MEF (Méthode des Elément Finis) est mise au point en 1953 chez Boeing (Seattle, USA, calcul des structures d'aile d'avion), où a développé le premier élément fini. L'assemblage et la résolution par la méthode des déplacements (publié par Turner, Clough, Martin et Topp en 1956 seulement). Quant aux bases théoriques générales, mariant l'analyse des structures en barres et poutres avec celle du solide, elles sont données de 1954 à 1960 (Argyris, Kelsey). Certaines idées apparurent auparavant, en particulier chez les mathématiciens pour résoudre divers problèmes aux limites.

Dès 1970, la méthode envahit tous l'ingénierie et les mathématiques appliquées. Il faut ajouter que son essor est indissociable de celui des ordinateurs [14].

IV.3. Etude numérique des plaques mince trouées soumise à la sollicitation de flexion

Cette étude, nous effectuons une étude localisée sur la variation de la flèche et les moments au bord et loin d'un trou dans les plaques trouées quasi isotropes en plis à tissu longues et à matrice thermodurcissable polyester tel que l'effet de la taille du trou. Pour le cas du trou carré, nous avons introduit l'influence du rapport (d/b). On a appliqué au centre des éprouvettes une force concentrée (flexion 3 points).

IV.3.1. Effet de l'épaisseur

Pour tenir compte de la variation de l'épaisseur d'une plaque quasi isotrope sur les résultats, nous avons utilisé les équations :

$$W = w \frac{D}{PL^3} ; \quad W_{exp} = w_{exp} \frac{D}{PL^3} ; \quad W_{exp} = w_{num} \frac{D}{PL^3}$$

Avec :
$$D = \frac{E \cdot h^2 \cdot b}{12(1-\nu^2)} \tag{IV.1}$$

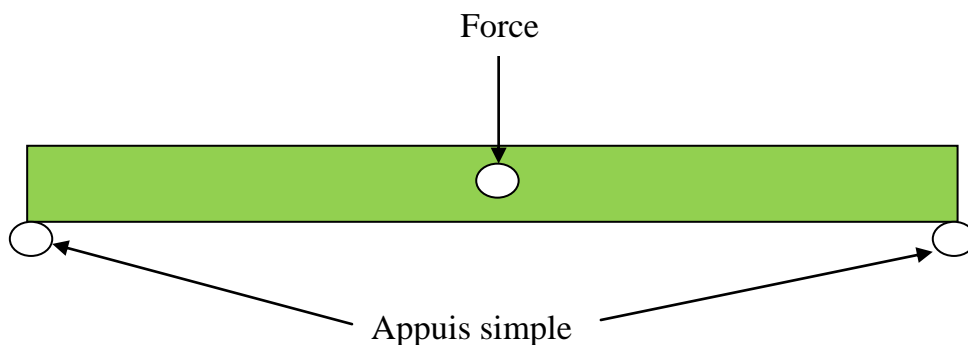


Fig. IV.1. Éprouvette simplement appuyée soumise à la sollicitation de flexion

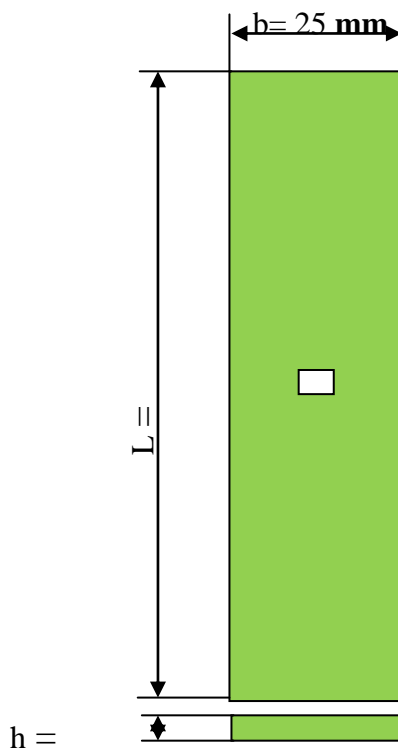


Fig. IV.2. Géométrie d'éprouvette trouée

IV.3.2. Modélisation par la méthode des éléments finis

Les structures planes minces et d'épaisseur faible par rapport aux autres dimensions du plan sont correctement modélisées par le modèle de Love-Kirchhoff. Le langage de programmation Fortran utilise l'élément rectangulaire (R_4) à quatre nœuds est Cinque degré de liberté de type **Lagrange**. D'après l'hypothèse de **Kirchhoff**, les cisaillements transversaux sont négligeables. Dans cet élément, nous avons basé sur le calcul numérique de la flèche et les moments au bord et loin du trou carré menée pour mettre en évidence l'effet des paramètres suivants :

- L'effort des sollicitations flexion 3 points.
- La taille du trou.
- Le rapport du carré (d/b).

En premier lieu, nous présenterons les propriétés mécaniques et géométriques du matériau dans le tableau suivant :

Tab. IV.1. Caractéristiques mécaniques et géométriques des plaques quasi isotropes

Plaque N°	E (Mpa)	Module de cisaillement	Coefficient de Poisson ν	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)
1	9150	34.39	0.33	100	25.7	1.68
2	9150	34.39	0.33	100	25.7	1.54
3	9150	34.39	0.33	100	25.7	2.18
4	9150	34.39	0.33	100	25.7	1.72

IV.3.2.1. Choix du type d'éléments

Il est fonction de la précision voulue, de la nature du problème, mais aussi du temps disponible.

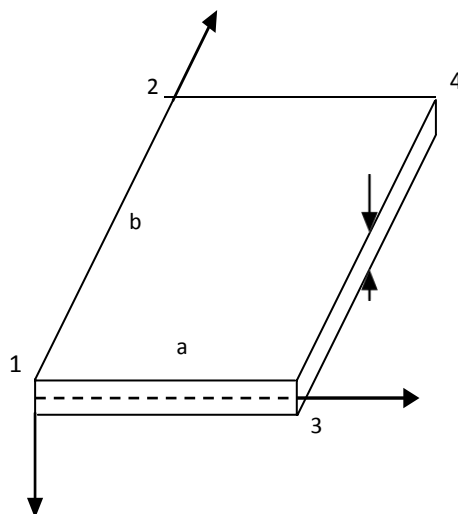


Fig. IV.3. Système de coordonnées

IV.3.2.2. Choix du maillage

Il dépend essentiellement de la géométrie, des sollicitations extérieures, des conditions aux limites imposées. Sans oublier le type d'outils dont on dispose pour réaliser ce maillage.

On a essayé plusieurs tests de maillages pour obtenir un bon résultat :

D'après l'étude de la convergence, la taille de l'élément est adaptée à (d*d) mm, les conditions aux limites et la charge appliquées sont assimilées à celles d'un test de flexion.

Nous présentons quelques éléments du maillage : (4*4), (20*4), (20*8), (20*12).

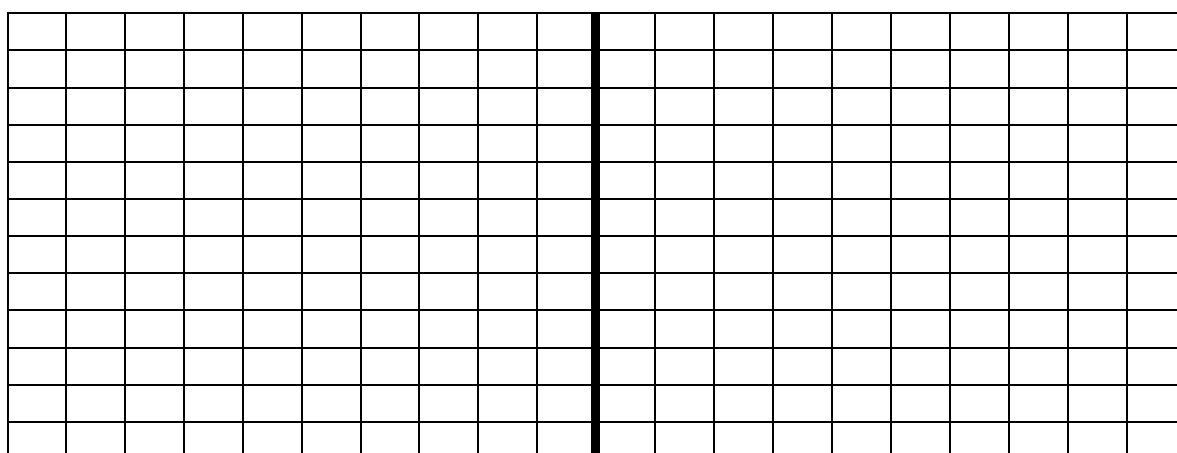


Fig. IV.4. Maillage de l'éprouvette sans trou (20*12) éléments

Et on peut remarquer que les résultats obtenus par ce maillage (20*12) sont en bon accord.

Pour les éprouvettes trouées, on a divisé le maillage en quatre zones :

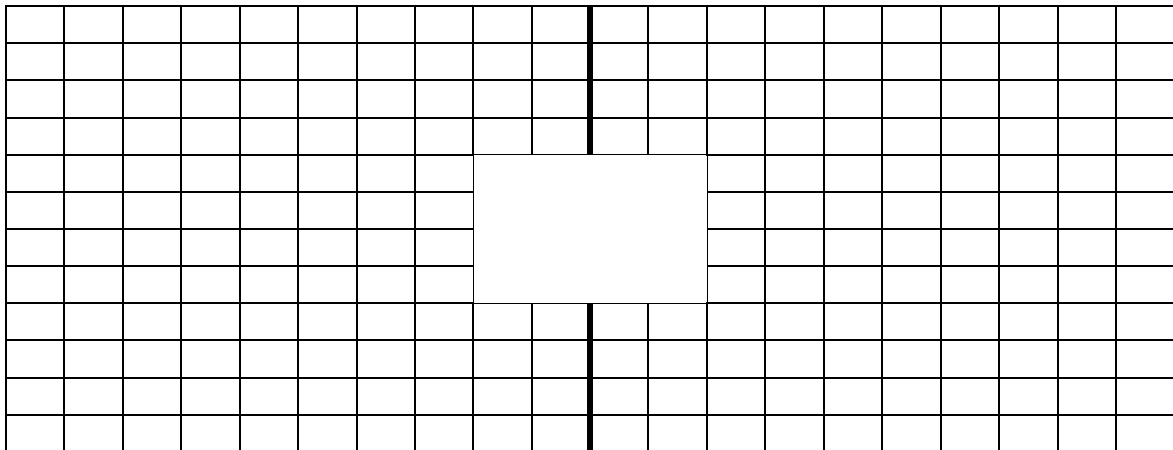


Fig. IV.5. Maillage de l'éprouvette avec trou (20*12) éléments

Les deux zones latérales du trou présentent (8*12) d'éléments, et les autre zones (au-dessus et le bas du trou) présentent (4*4) d'éléments.

IV.3.2.3. Description de l'élément utilisé

L'élément (R_4) est de forme rectangulaire à 4 nœuds de type **Lagrange** c'est-à-dire que les variables sont indépendantes, chaque nœud possède 5 degrés de liberté ; quatre degrés dans le plan (x, y) qui sont $u(x, y)$, $v(x, y)$, $\varphi_x(x, y)$, $\varphi_y(x, y)$, et un degré sur le plan $w(x, z)$.

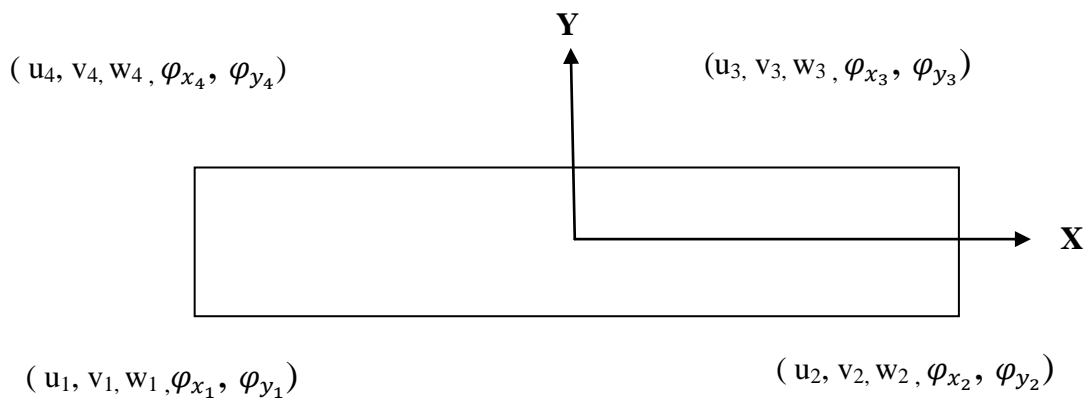


Fig. IV.6. Géométrie de l'élément R_4 et variable nodales correspondantes

IV.3.2.4. Condition aux limites adoptées

Cette figure montre la géométrie pour une plaque quasi isotrope mince de dimension finie.

Les conditions aux limites considérées :

SSSS : plaque simplement appuyée sur les quatre bords.

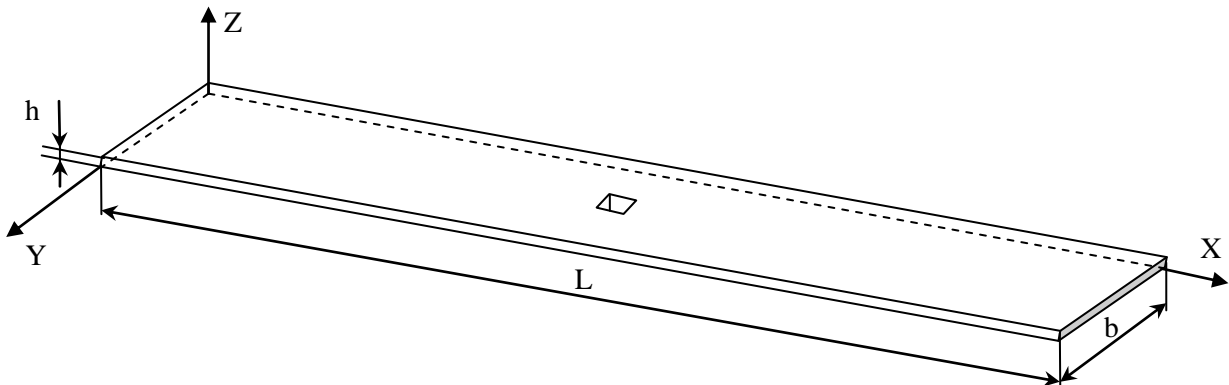


Fig. IV.7. Géométrie d'une plaque composite mince

Tab. IV.2. Détails de condition aux limites

Conditions aux limites	Bord	
	X=0, L	y=0, b
Simply supported (SSSS)	$w = \varphi_y = 0$	$w = \varphi_x = 0$

IV.3.2.5. Structure du programme

La structure d'un programme de calcul en FORTRAN77 est formée d'un ensemble de blocs, ces derniers sont constitués par les différentes sous-routines du programme source. En plus en sa forme, il est totalement identique aux programmes développés dans le domaine du calcul numérique.

IV.3.2.6. Développement du programme pour le calcul des plaques

On considère une plaque homogène soumise à une charge concentrée, qu'on discrétise en éléments rectangulaires égaux, (n) éléments suivant l'axe x et (n) éléments suivant l'axe y, on calcule les déplacements (**w**) au niveau de chaque nœuds, en fin on procède au calcul des moments autour et loin du trou, avec la détermination des valeurs maximales.

Les processus de calcul dans le programme se font comme suit :

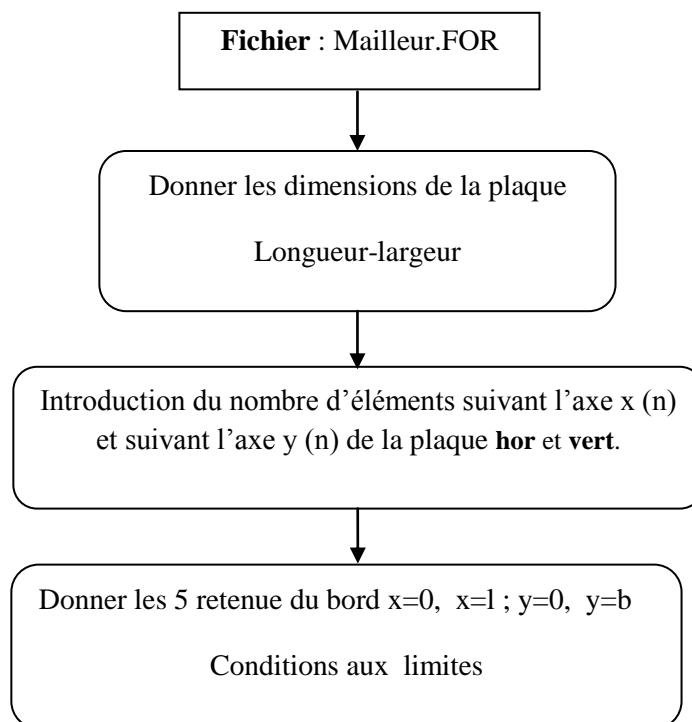
- Introduction des caractéristiques géométriques de la plaque.
- Définition du nombre d'éléments selon les axes (x, y).
- Introduction les conditions aux limites.
- Introduction les caractéristiques de la couche Module de Young **EL ; ET**, module de cisaillement **GLT, G13, G23** et les valeurs nult de couche Coefficient de poisson **v**
- Introduction les valeurs du chargement de la plaque.
- Détermination des déplacements des nœuds.
- Détermination les moments au niveau de chaque élément.

Ce programme principal qui regroupe en deux parties :

- La première opération effectuée, introduction des données dans un fichier. texte, dont le nom (donnees.dat), et finissant par trouver les résultats dans un autre fichier. texte, dont le nom (résultats.txt).

Pour plus de détails, voir ce programme sous forme d'organigramme suivante :

Premier fichier



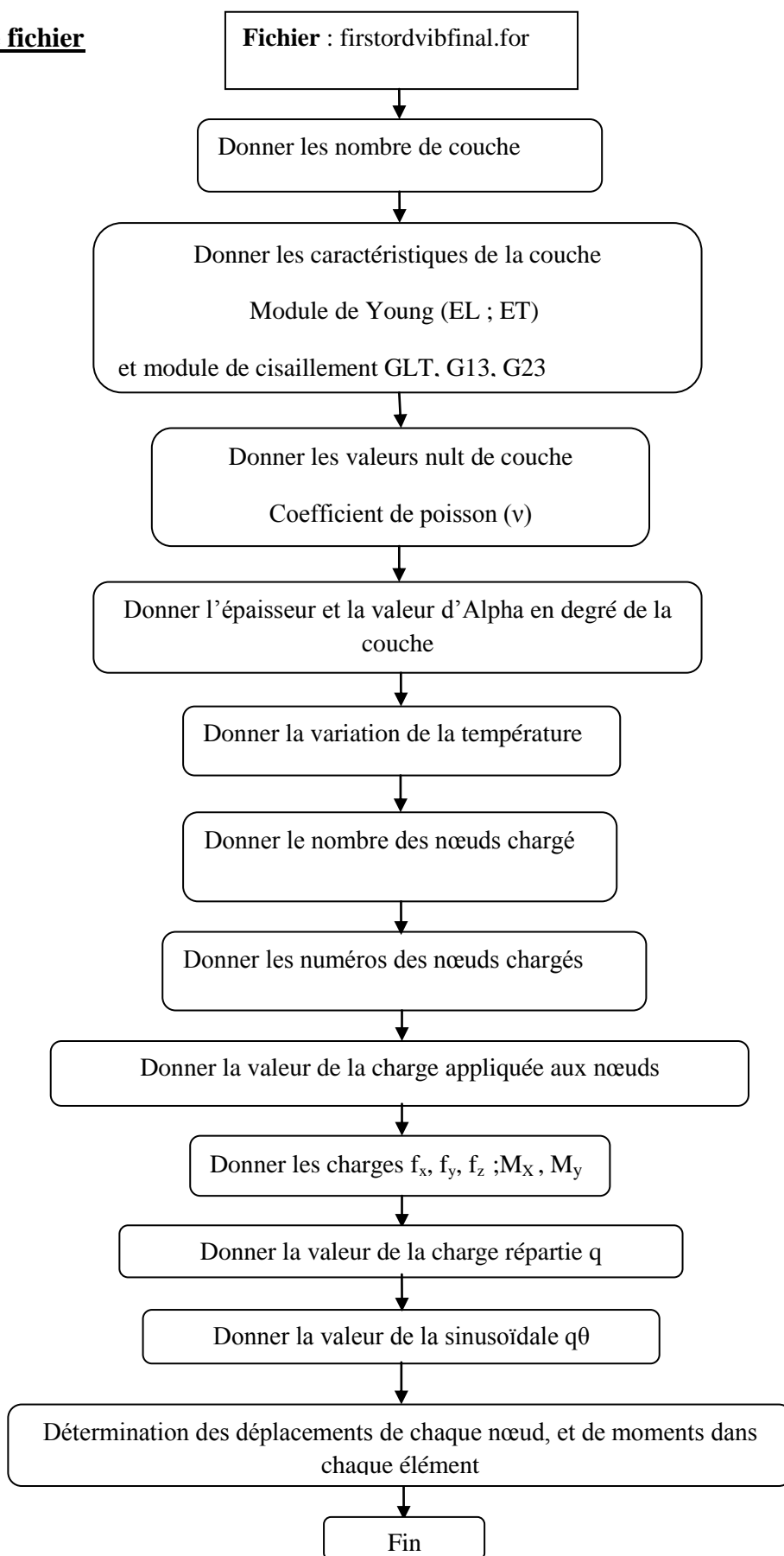
Deuxième fichier

Fig. IV.8. Organigramme pour l'étude de la flexion des plaques

IV.3.3. Validation de l'élément

Nous montrons à travers une série d'applications la performance de l'élément utilisé dans la résolution des problèmes de flexion des plaques composites quasi isotropes stratifiées. Les solutions obtenues numériquement seront comparées aux solutions obtenues expérimentalement et aux celles obtenues par d'autres travaux disponibles dans la littérature.

IV.4. Comparaison par le logiciel RDM 6

IV.4.1. Introduction

RDM6 est un logiciel destiné au calcul des structures par la méthode des éléments finis.

Ce logiciel permet :

- ✓ La modélisation et le maillage d'un domaine plan.
- ✓ L'évaluation du comportement mécanique et/ou thermique d'une pièce plane ou axisymétrique.
- ✓ Le calcul des caractéristiques de plaque et les moments dans celle-ci pour une force concentrée donnée. [15].

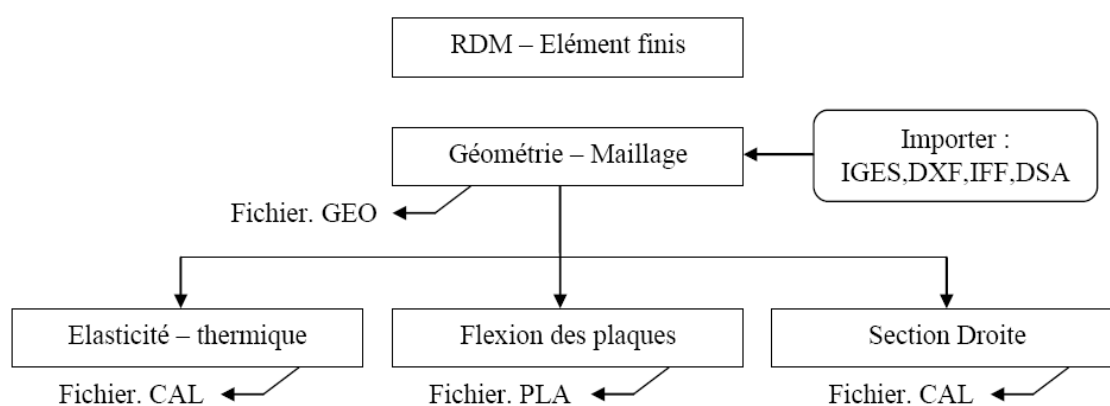


Fig. IV.9. Principe de calcul par le logiciel RDM [15].

IV.4.2. Maillage structuré (maillage par bloc)

Le maillage par bloc ou maillage structuré permet la discrétisation d'un domaine plan en :

- Triangles à 3 ou 6 nœuds.

- Quadrilatères à 4, 8 ou 9 nœuds.

IV.4.3. Modélisation des plaques par RDM6

Ce logiciel permet la détermination du comportement statique et dynamique de plaques sollicitées en flexion.

Les hypothèses retenues sont :

- Les déplacements sont petits.
- Les matériaux sont quasi isotropes.
- Les relations entre les contraintes et les déformations sont linéaires.
- Les cisaillements transversaux peuvent être pris en compte modèle de Reissner-Mindlin ou négligé, hypothèse de Kirchhoff
- Les sollicitations prises en compte sont : les charges ponctuelles et nodales, les charges linéiques, les charges surfaciques, le poids propre, et les déplacements d'appuis.

Dans le choix de la méthode pour le maillage du domaine, le logiciel propose deux types de maillage (Maillage automatique, maillage structure ou par bloc).

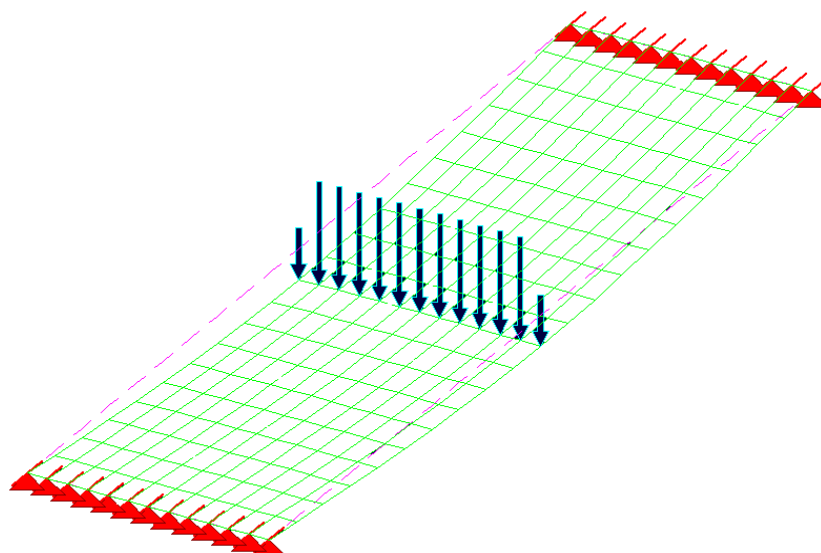


Fig. IV.10. Eprouvette maillée soumise à la sollicitation de flexion

Chapitre V

Résultats et discussions

V.1.Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons l'ensemble des résultats et la comparaisant entre ces dernier obtenus à l'aide du programme principale FORTRAN et un logiciel RDM 6, et les résultats obtenus expérimentalement.

V.2. Représentation des résultats expérimentaux

La première tâche est de déterminer le module de Young des éléments de base constituant le matériau composite en question.

Nous allons traiter l'exemple de la flexion des plaques composites avec et sans ouvertures, de dimensions suivantes : la larguer $b=25.7$ mm, la longueur $L=100$ mm, l'épaisseur $h=1.56$ mm ; de plus, pour éviter l'influence du cisaillement transversal sur le comportement de la plaque, le rapport entre la longueur et l'épaisseur doit être de l'ordre de 65. Dans le but d'évaluer le déplacement vertical W_{max} , les moments et les contraintes. Les caractéristiques mécaniques seront déterminées au moyen de l'expérience ultérieurement.

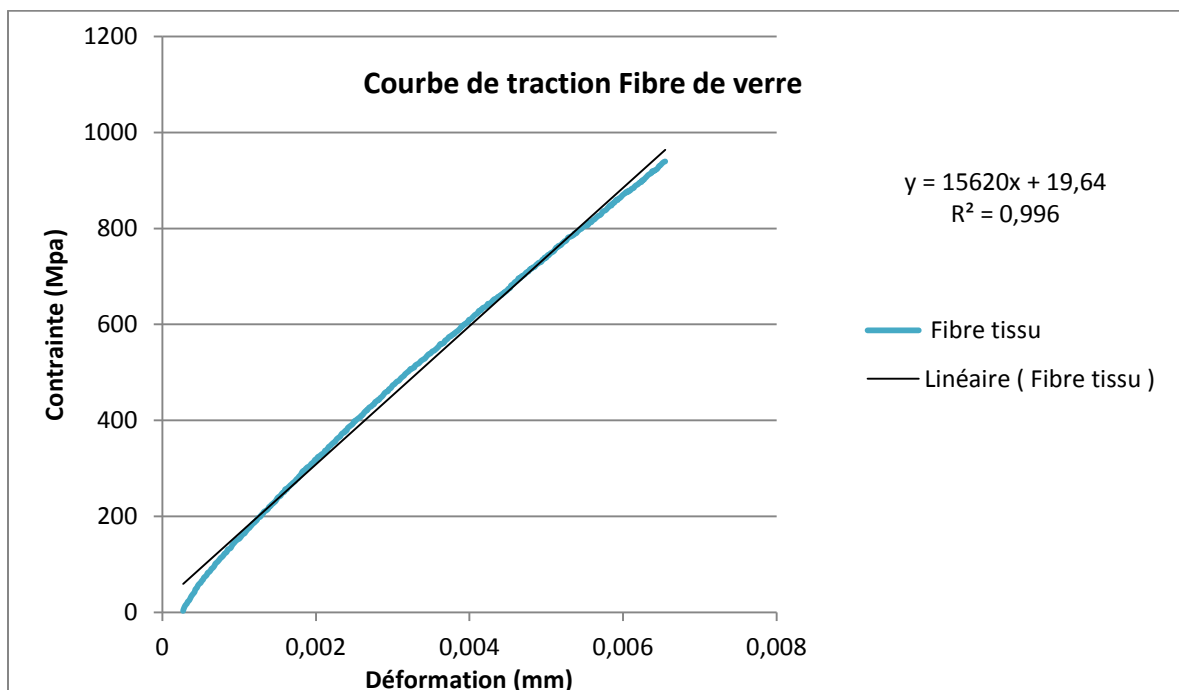


Fig. V.1. Courbe de traction fibre tissu

Cette courbe présente la partie linéaire contrainte-déformation pour fibre tissu dans le domaine de petite déformation, on a trouvé le module d'Young vaut 15.62 Gpa.

Pour la résine est difficile de déterminer le module de Young par l'essai de traction, car son comportement est fragile, il y a aussi l'influence des morts sur l'éprouvette lors de fixation pendant l'essai; si pour cette raison on recourt à l'essai de flexion, qui donne une valeur de module de Young égale 1.90 Gpa.

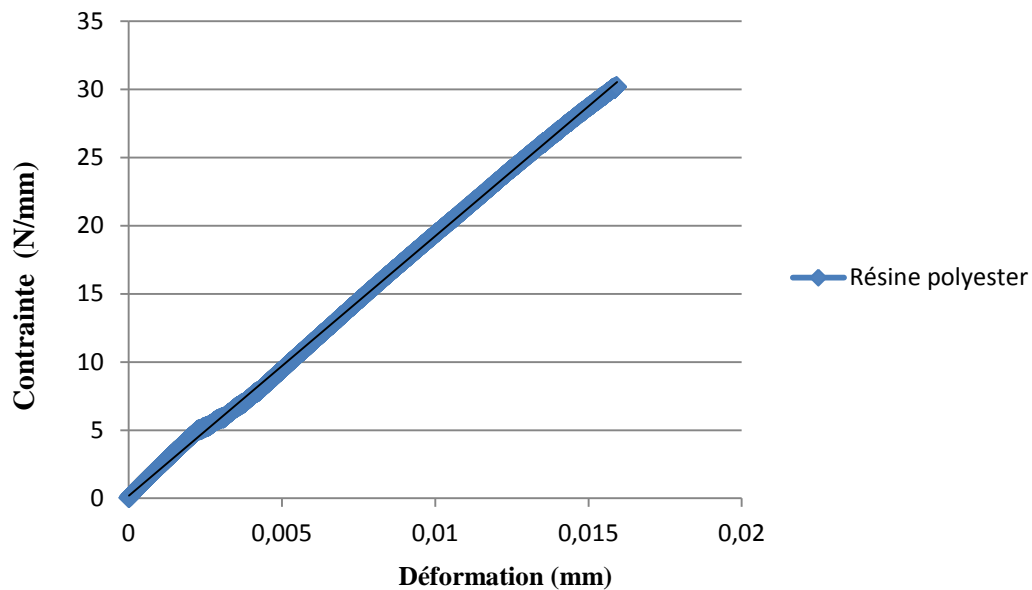


Fig. V.2. Courbe de flexion 3 points résine polyester

Finalement on a réalisé un essai de flexion trois points sur le matériau composite, d'après la courbe enregistrée, l'équation de la partie linéaire nous donne la valeur du module de Young qui est de 9.15 Gpa.

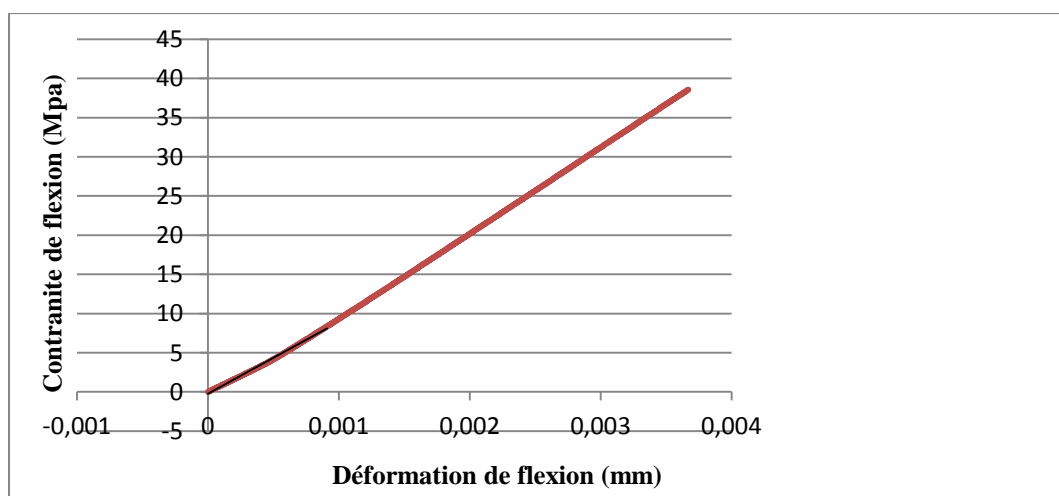


Fig. V.3. Courbe de flexion 3 points éprouvette en composite sans trou

D'après les résultats obtenus de la vidéo traction, sur le composite, on trace les courbes de déformation longitudinale et transversale à partir desquelles on tire la valeur du coefficient de Poisson.

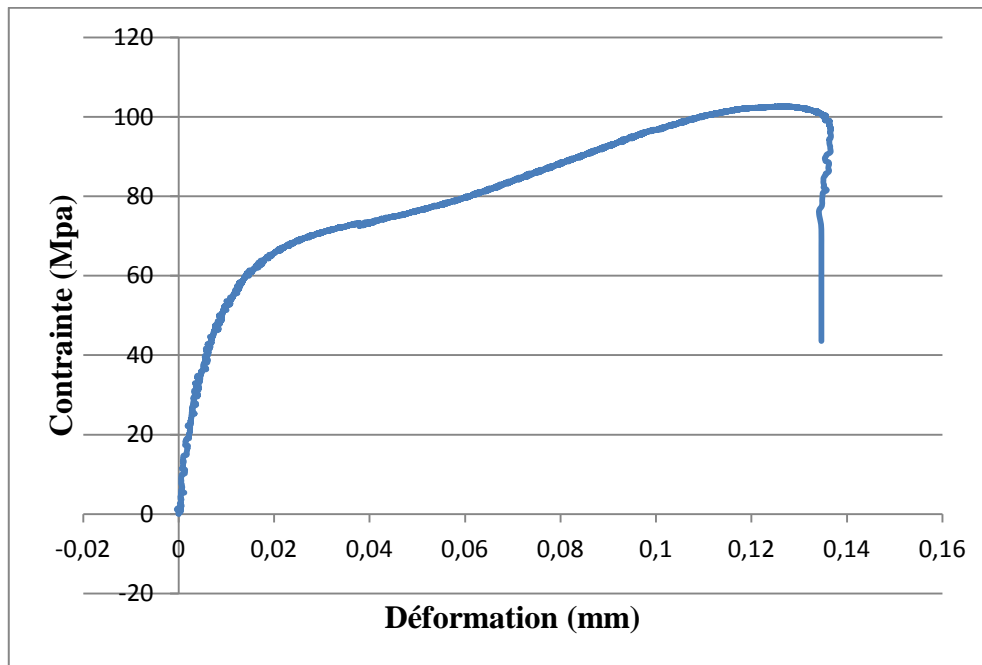


Fig. V.4. Courbe déformation longitudinale de matériau polyester/tissu d'orientations de $[0/90^\circ]$

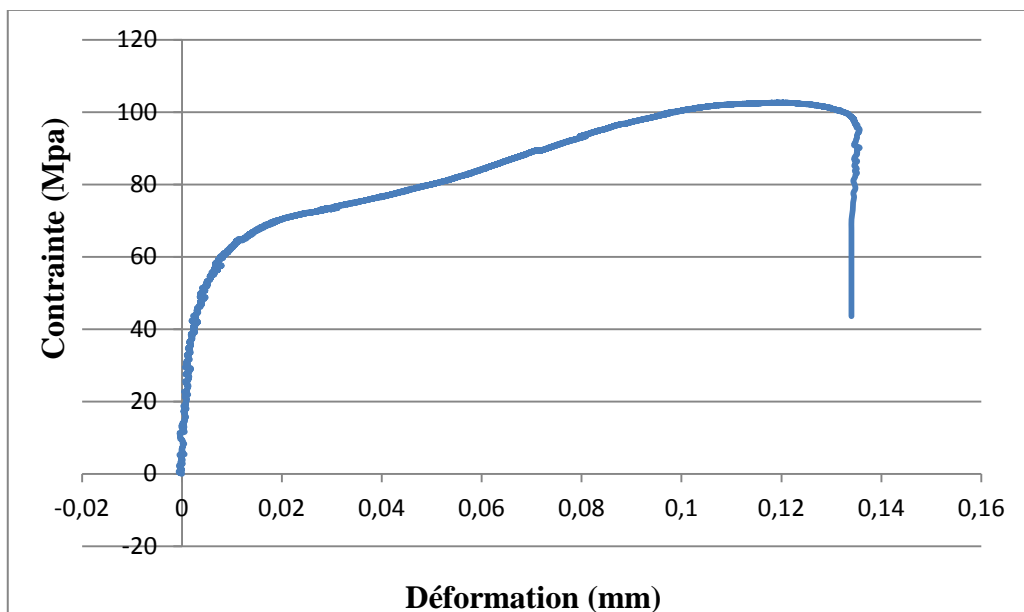


Fig. V.5. Courbe déformation transversale de matériau polyester/tissu d'orientations de $[0/90^\circ]$

Les caractéristiques mécaniques de composite sont représentées sur le tableau suivant :

Tab. V.1. Caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés

matériaux	Module de Young M_{pa}	Coefficient de poisson ν
Résine polyester	1.905	/
Fibre tissu	15.620	/
composite	9150	0.33

Les résultats des d'éprouvettes sans trou et les diagrammes obtenus lors de l'essai de flexion 3 points sont les suivants :

Tab. V.2. Résultats expérimentale d'éprouvettes sans trou

	L'épaisseur h (mm)	La charge (N)	Les flèches (mm)	Contrainte (N/mm)
Eprouvette sans trou N° 1	1.56	3.01	0.8731	6.81526
Eprouvette sans trou N° 2	1.6	3,00089	0.9315	6.43079
Eprouvette sans trou N° 3	1.65	3,01018	0.87557	3.71513

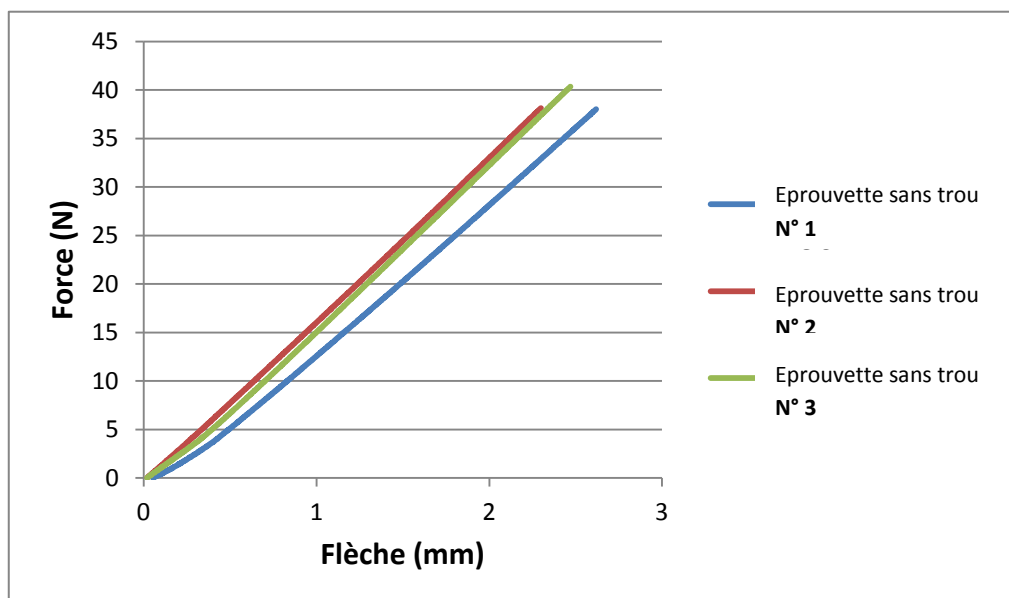


Fig. V.6. Courbe de la flèche en fonction de la force (Eprouvette sans trou)

Les valeurs de la flèche des douze types d'éprouvettes avec différentes ouvertures et les diagrammes force-déplacement obtenus lors de l'essai de flexion 3 points sont les suivants :

Tab. V.3. Résultats expérimentale d'éprouvettes trouées

	Rapport (d/b)	L'épaisseur h (mm)	La charge (N)	Les flèches (mm)
Eprouvette N° 1.1	0.2	2.18	3,02502	0.29013
Eprouvette N° 1.2	0.2	1.81	3,02699	0.62685
Eprouvette N° 1.3	0.2	2.03	3,0139	0.3001
Eprouvette N° 2.1	0.3	1.69	3,02828571	0.71160857
Eprouvette N° 2.2	0.3	1.45	3,01624333	0.97520333
Eprouvette N° 2.3	0.3	2.16	3,01816	0.32743
Eprouvette N° 3.1	0.4	1.72	3,01504	0.8103
Eprouvette N° 3.2	0.4	1.61	3,02017	0.93753
Eprouvette N° 3.3	0.4	2.19	3,02205	0.33898
Eprouvette N° 4.1	0.5	2.21	3,0236	0.39882
Eprouvette N° 4.2	0.5	1.95	3,02831	0.52062
Eprouvette N° 4.3	0.5	1.62	3,02721	1.13885

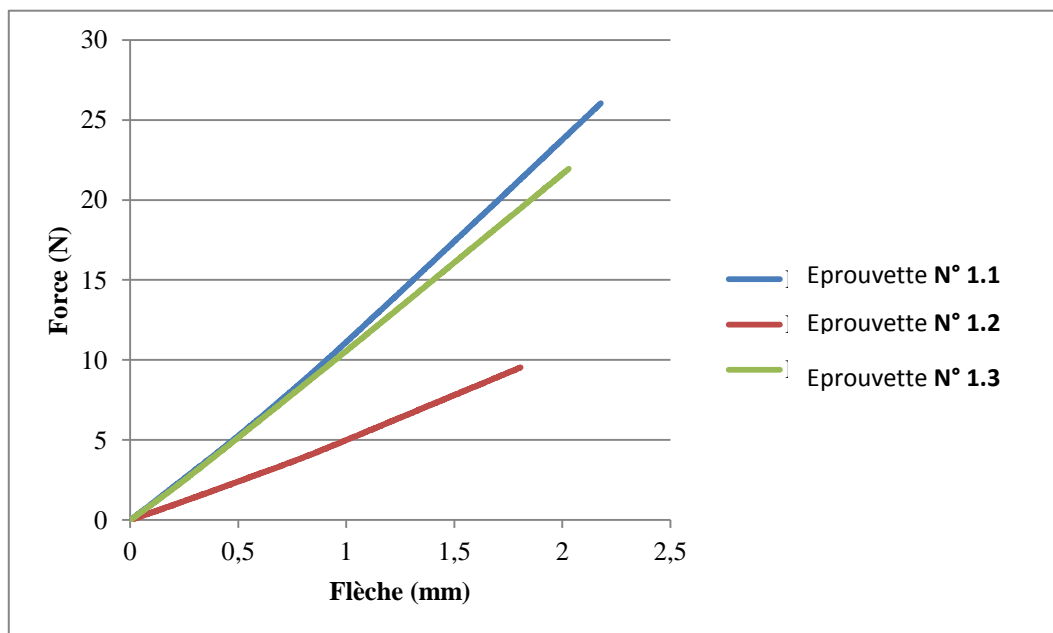


Fig. V.7. Courbe de la flèche en fonction de la force (Rapport d/b=0.2)

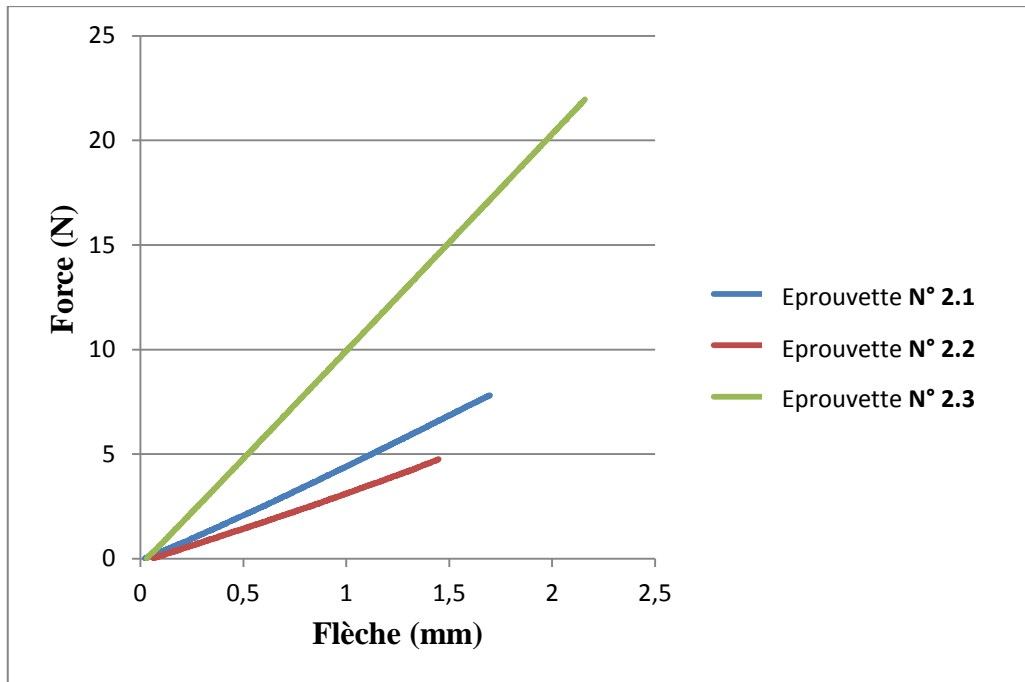


Fig. V.8. Courbe de la flèche en fonction de la force (Rapport $d/b=0.3$)

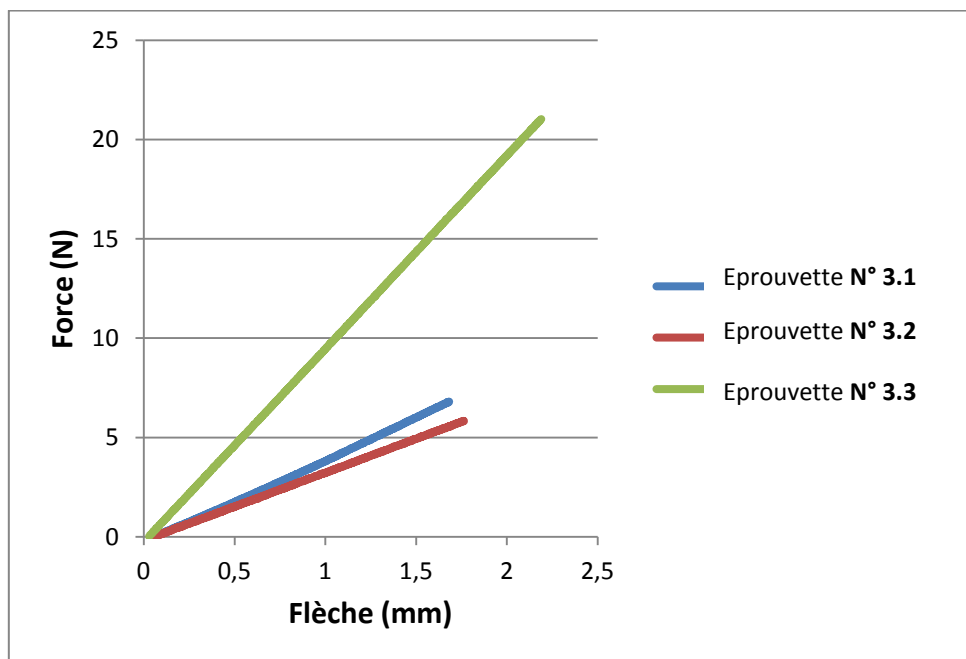


Fig. V.9. Courbe de la flèche en fonction de la force (Rapport $d/b=0.4$)

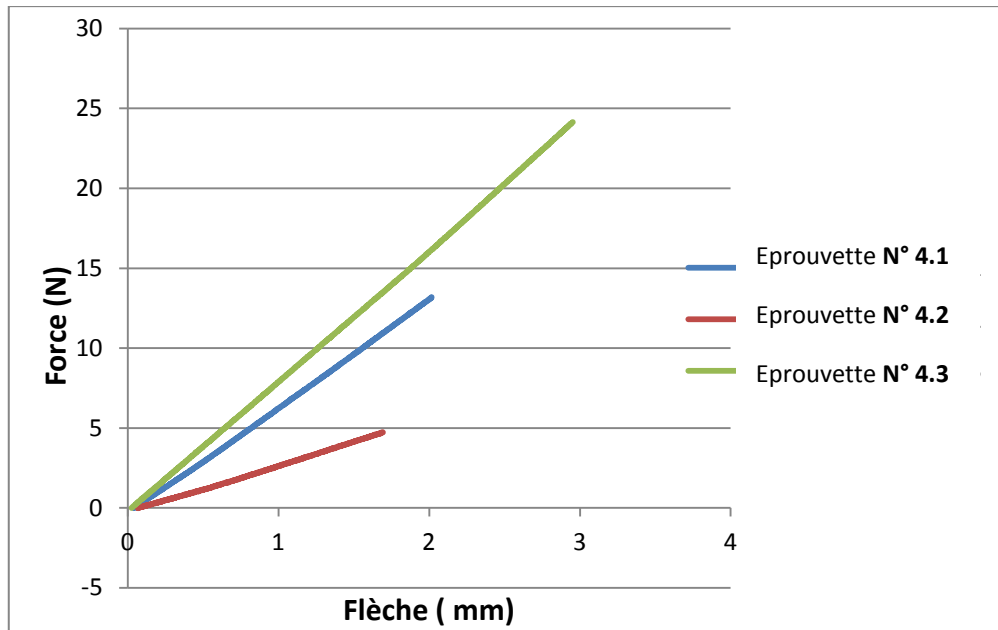


Fig. V.10. Courbe de la flèche en fonction de la force (Rapport $d/b=0.5$)

V.3. Représentation des résultats numériques du programme Fortran

Les résultats obtenus sont comparés aux résultats calculés numériquement sur les stratifiés conçus avec : fibre tissu/polyester pour des plaques sans et avec ouverture.

Le tableau suivant donne les valeurs de la flèche et le moment.

Tab. V.4. Résultats numérique d'éprouvettes sans trou

	L'épaisseur h (mm)	La charge (N)	Les flèches (mm)	M_x max (N/mm)
Epreuve sans trou N° 1	1.56	3.01	0.8731	2,764
Epreuve sans trou N° 2	1.6	3,00089	0,78377	2,769
Epreuve sans trou N° 3	1.65	3,01018	0,71529	2,772

Tab. V.5. Résultats numérique d'éprouvettes trouées

	Rapport (d/b)	L'épaisseur h (mm)	La charge (N)	Les flèches (mm)	M _x max (N/mm)
Eprouvette N° 1.1	0.2	2.18	3,02502	0,32878	4,147
Eprouvette N° 1.2	0.2	1.81	3,02699	0,57403	4,152
Eprouvette N° 1.3	0.2	2.03	3,0139	0,40546	4,13
Eprouvette N° 2.1	0.3	1.69	3,02828571	0,74074	4,53
Eprouvette N° 2.2	0.3	1.45	3,01624333	1,167	4,519
Eprouvette N° 2.3	0.3	2.16	3,01816	0,35433	4,504
Eprouvette N° 3.1	0.4	1.72	3,01504	0,77998	5,199
Eprouvette N° 3.2	0.4	1.61	3,02017	0,95212	5,21
Eprouvette N° 3.3	0.4	2.19	3,02205	0,37972	5,203
Eprouvette N° 4.1	0.5	2.21	3,0236	0,36973	5,205
Eprouvette N° 4.2	0.5	1.95	3,02831	0,53827	5,217
Eprouvette N° 4.3	0.5	1.62	3,02721	0,99281	5,545

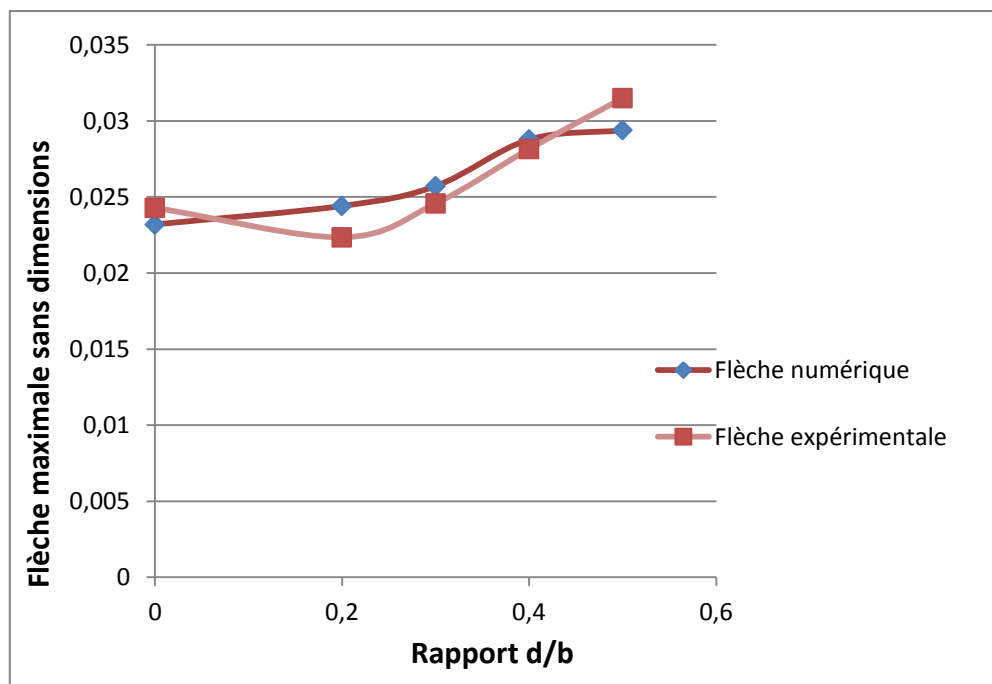


Fig. V.11. Variation de la flèche en fonction du rapport (d/b)

Cette courbe indique l'effet d'ouverture sur la flèche, on constate que la flèche calculée numériquement par le programme de fortran accroître, mais à partir la valeur du rapport (d/b) de 0.4, cette dernière prend approximativement les mêmes valeurs, par contre la flèche calculée expérimentalement est toujours en augmentation.

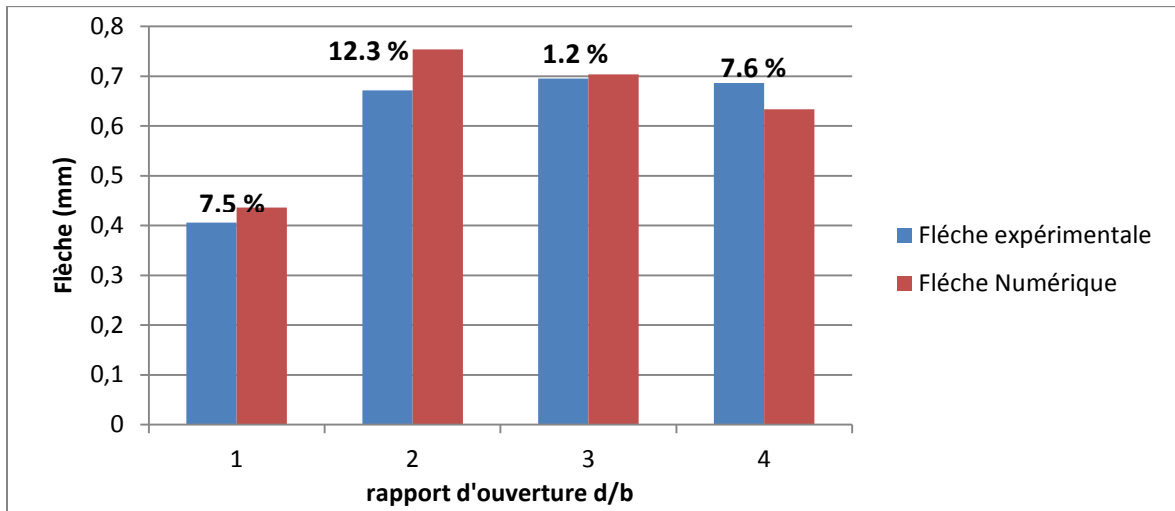


Fig. V.12. Histogramme d'erreur (flèche numérique et expérimentale)

Cet histogramme présente la marge d'erreur entre les valeurs des flèches obtenues expérimentalement et les valeurs obtenues numériquement.

Tab .V.6. Convergence de la flèche d'une plaque quasi isotrope simplement appuyé

Références	N° éléments	Flèche	Erreur
Présent élément (4*4)	16	0.79249400	0.077506
Présent élément (20*4)	80	0.83130182	0.03869818
Présent élément (20*8)	160	0.82105889	0.04894111
Présent élément (20*12)	240	0.83570169	0.03429831

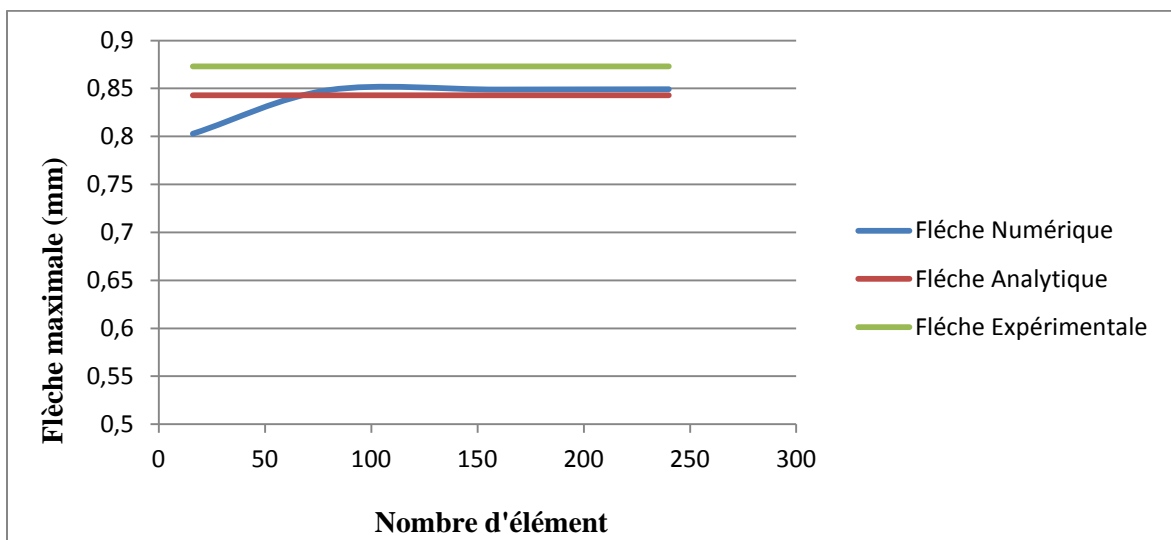


Fig. V.13. Convergence de la flèche maximale d'une plaque quasi isotrope

Cette courbe montre la rapidité de la convergence et la précision du calcul de la flèche maximale.

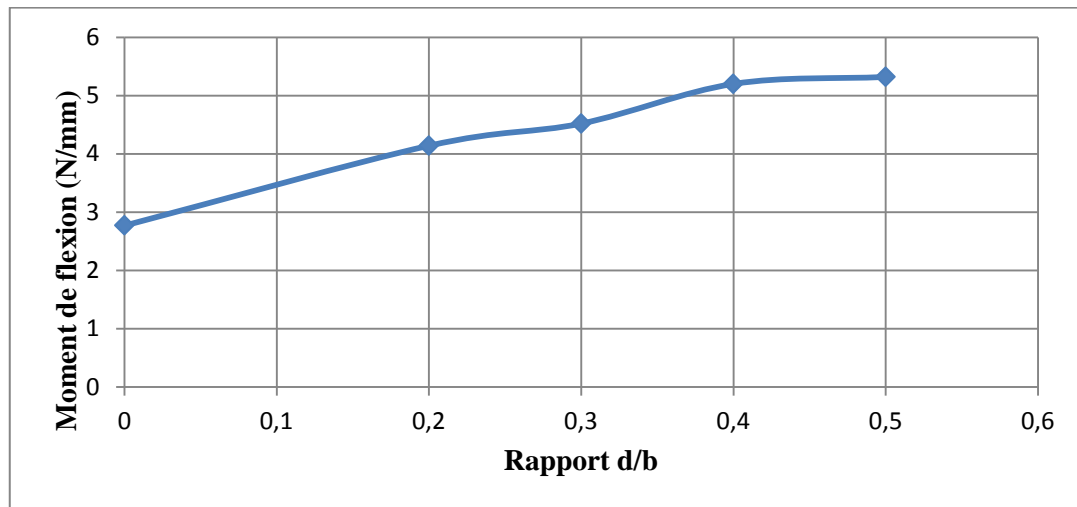


Fig. V.14. Variation de la concentration des moments en fonction de rapport (d/b)

Cette courbe prouve que plus le rapport d'ouverture augmente la concentration du moment augmente aussi.

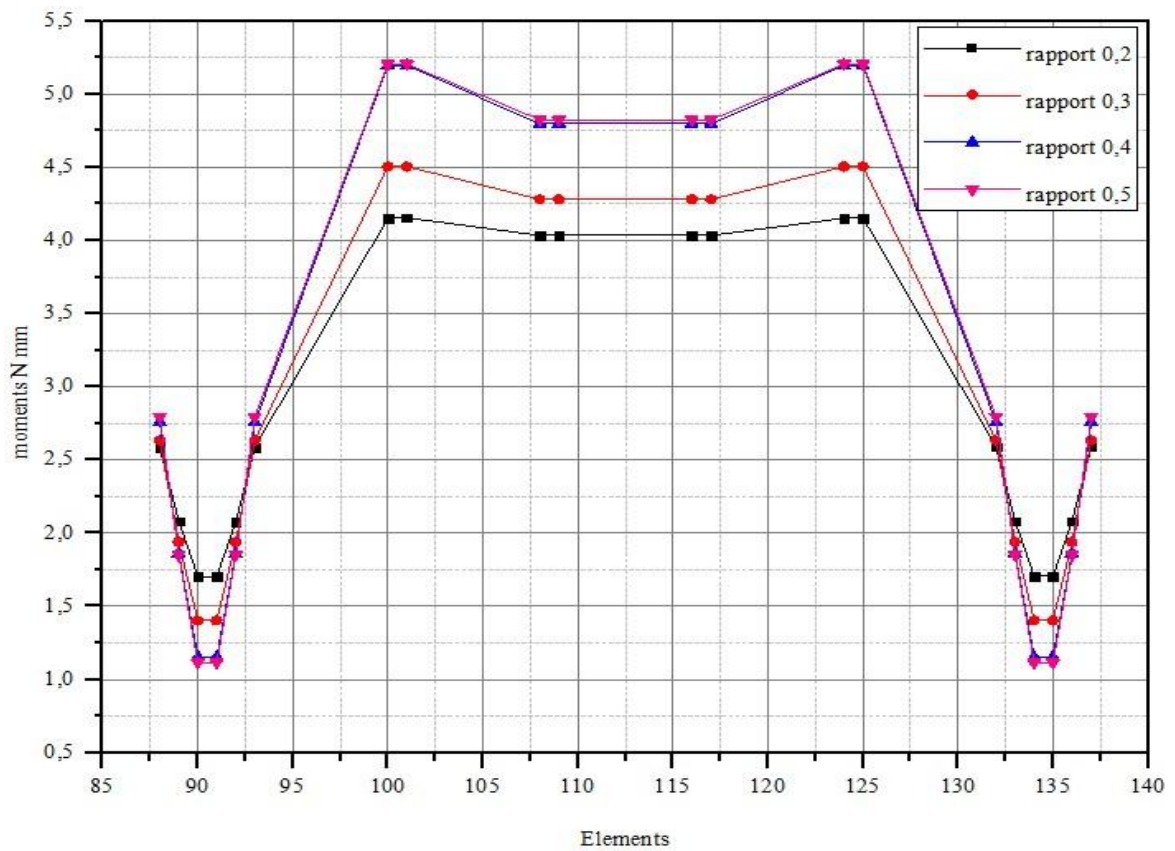


Fig. V.15. Concentration des moments autour du trou pour tous les rapports

Cette figure montre la distribution du moment de flexion pour des éprouvettes rectangulaire trouée sous une charge appliquée au milieu de celle-ci suivant la largeur.

On peut voir que le moment est plus élevé autour du trou dont il est concentré dans les quatre coins de ce trou; loin de ce dernier le moment est plus faible.

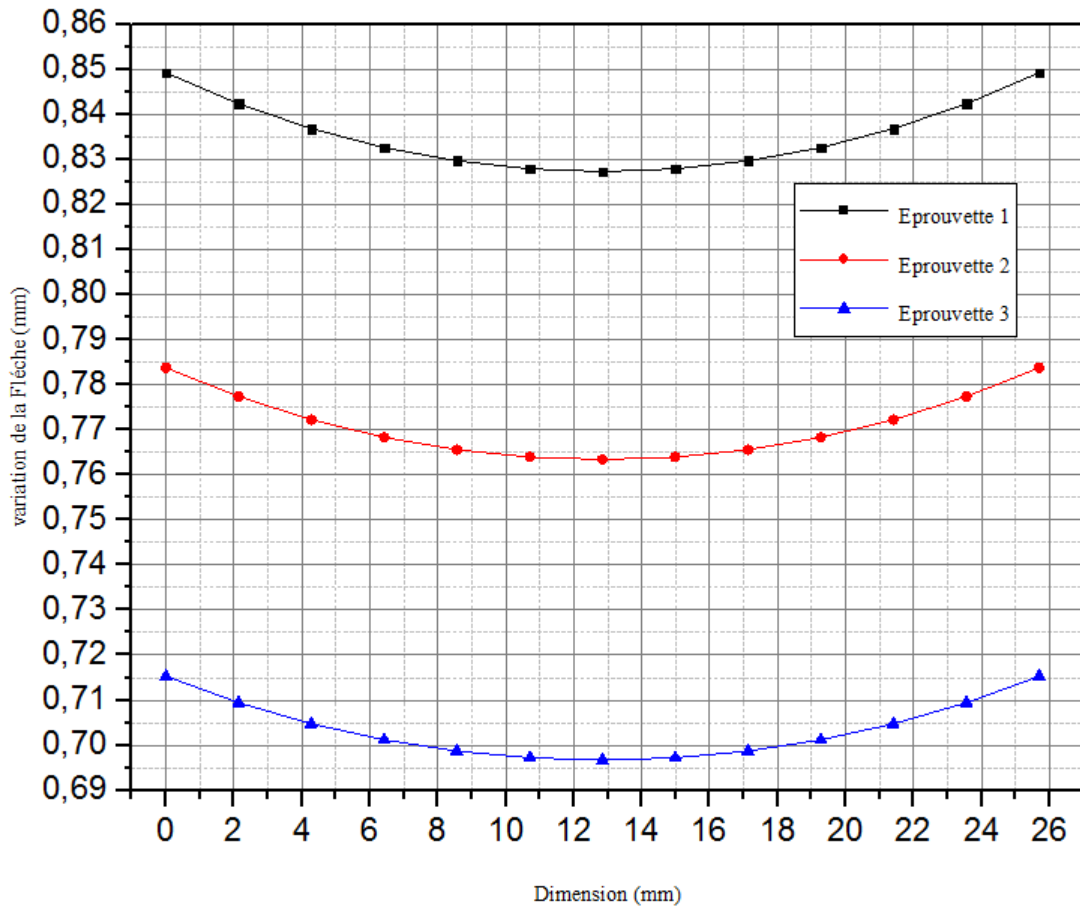


Fig. V.16. Variation de la flèche des nœuds au milieu des éprouvettes sans trou

On remarque que la variation de la flèche suivant la largeur de l'éprouvette est symétrique, c-à-d la flèche aux nœuds des deux extrémités de l'éprouvette est plus élevée.

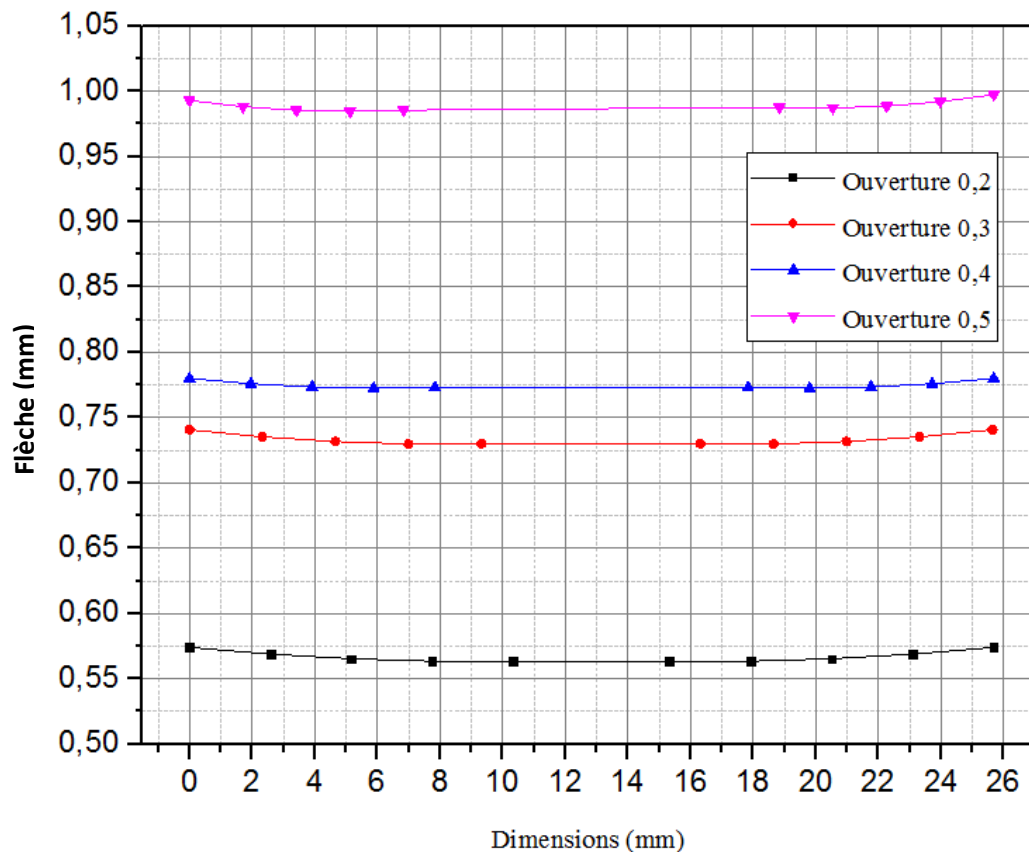


Fig. V.17. Variation de la flèche des nœuds au milieu des éprouvettes trouées

On constate que la variation de la flèche suivant la largeur de l'éprouvette est symétrique, c-à-d la flèche aux nœuds des deux extrémités de l'éprouvette est plus élevée par rapport à celle au voisinage du trou.

V.4. Confirmation les résultats par logiciel RDM 6

Dans cette partie, nous utiliserons le logiciel RDM 6 dans le but de comparer les résultats expérimentale et numérique, nous avons effectué un calcul sur les mêmes éprouvettes citées auparavant, possédant deux bords simplement appuyées et une charge concentrée au milieu voir figure (IV.1).

Les résultats obtenus sont présentés ci-après :

V.4.1. Présente quelque résultat des éprouvettes modélisées par RDM 6

Moitié d'éprouvette sans trou : $1h=1.56\text{mm}$ et $b=25.7\text{mm}$

➤ La flèche

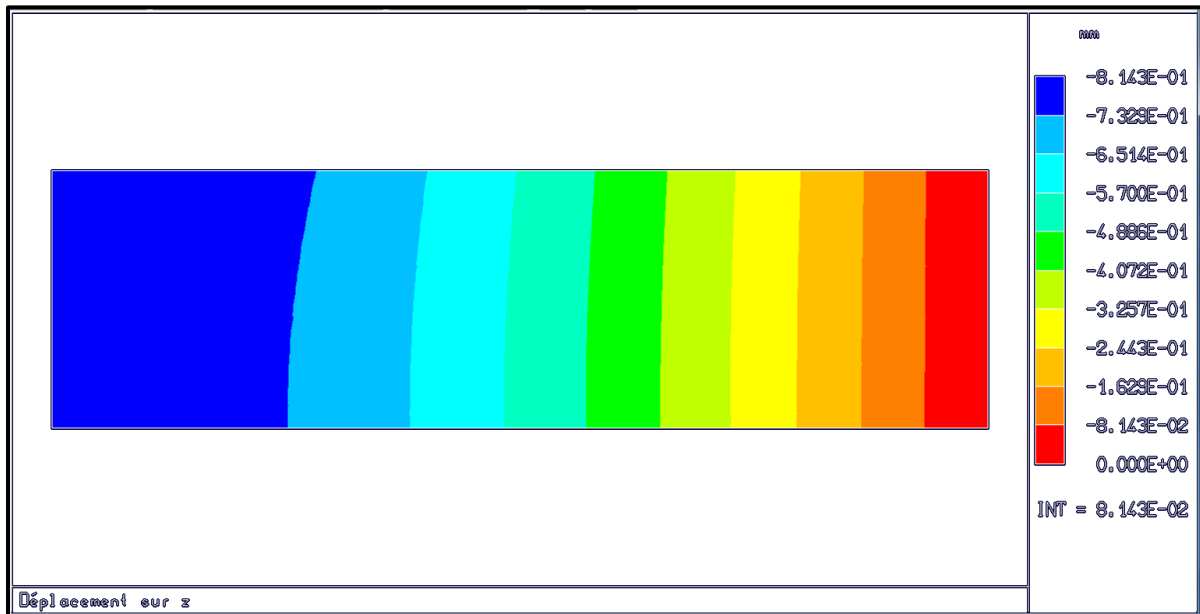


Fig. V.18. Présentation graphique de la flèche (éprouvette N°1)

Cette image montre que la flèche au milieu de la plaque qu'est en bleu est maximal est égal 0.814 mm, en allant du milieu vers l'extrémité la flèche va tend vers zéro.

➤ Le moment

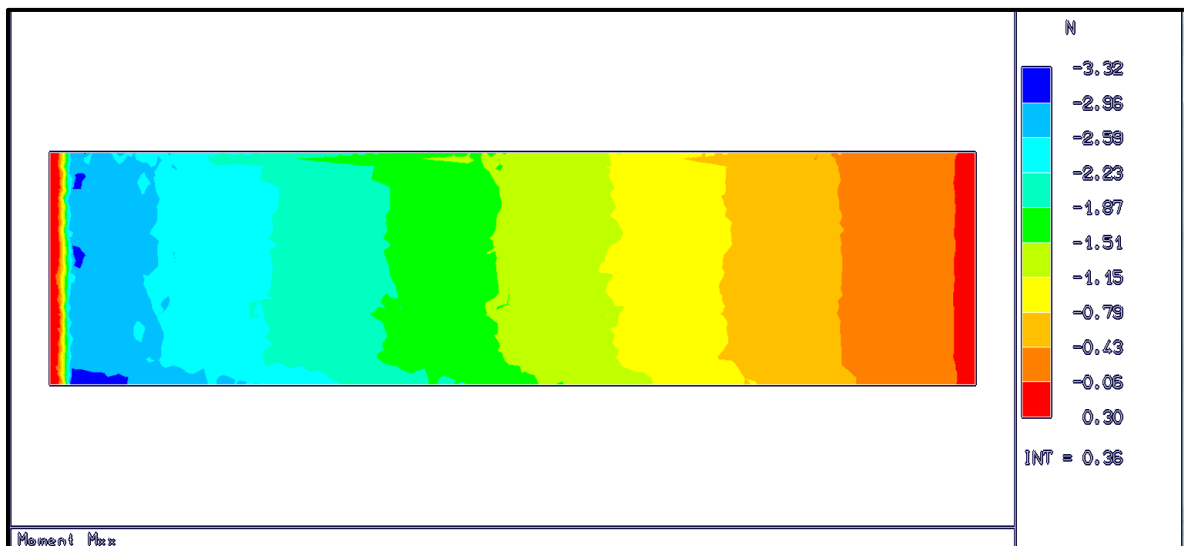


Fig. V.19. Présentation graphique du moment M_x (éprouvette N°1)

Cette image montre que le moment est maximal sur le bord au milieu de la plaque qui est en bleu, en allant du milieu vers l'extrémité le moment va tend vers zéro.

➤ La contrainte Von mise

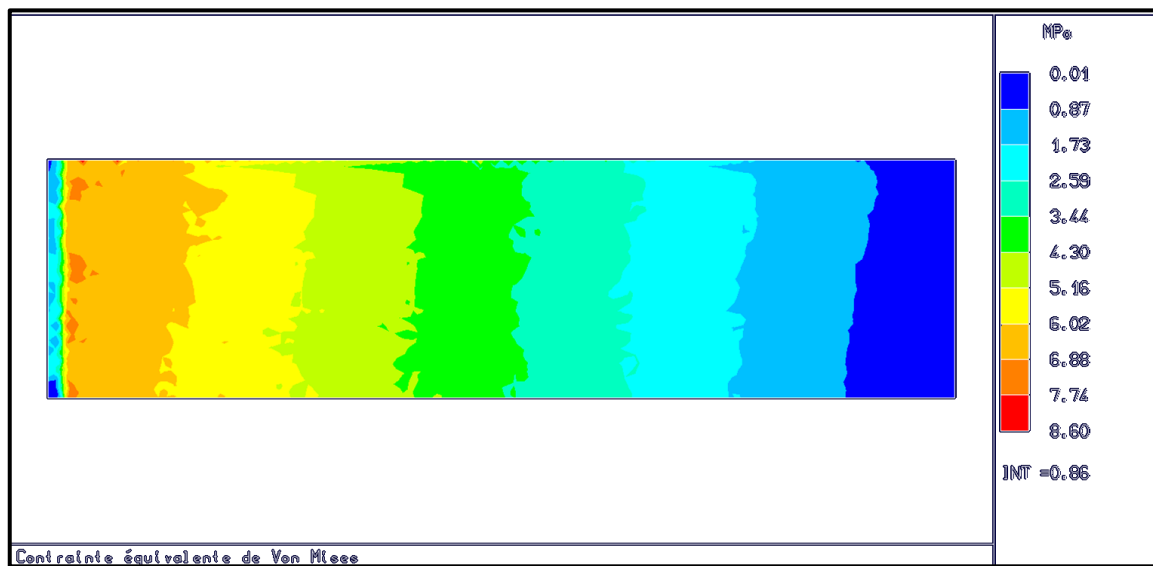


Fig. V.20. Présentation graphique de la contrainte Von mises (épreuve N°1)

Quart d'éprouvette trouée : h=1.81mm et b=25.7mm, Le rapport d/b=0.2

➤ La flèche

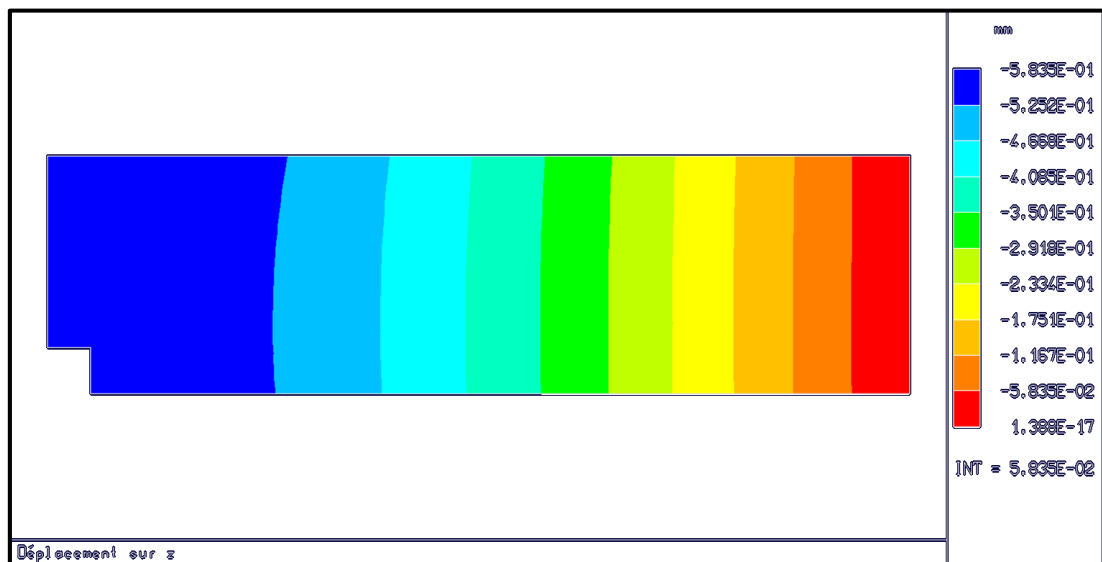


Fig. V.21. Présentation graphique de la flèche (épreuve N°1.2)

Cette image montre que la flèche au milieu est loin du trou de la plaque qu'est en bleu est maximal, en allant du milieu vers l'extrémité la flèche est diminué.

➤ Le moment



Fig. V.22. Présentation graphique du moment (épreuve N°1.2)

Cette image montre que le moment est concentré dans l'élément du cois de l'éprouvette par contre, en allant du milieu vers l'extrémité le moment est diminué.

➤ La contrainte Von mises

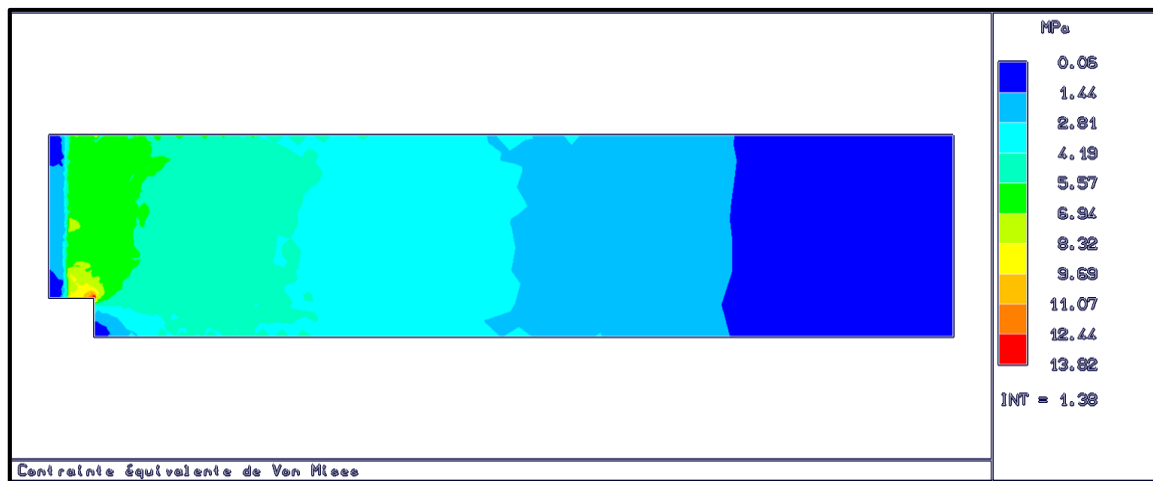


Fig. V.23. Présentation graphique la contrainte équivalente de Von mises (Éprouvette N°1.2)

Cette image montre que la contrainte Von mises est concentrée dans le cois de l'éprouvette. Par contre, en allant du milieu vers l'extrémité le moment est diminué.

Quart d'éprouvette trouée : h=1.69 mm et b=25.7 mm, Le rapport d/b=0.3

➤ La flèche

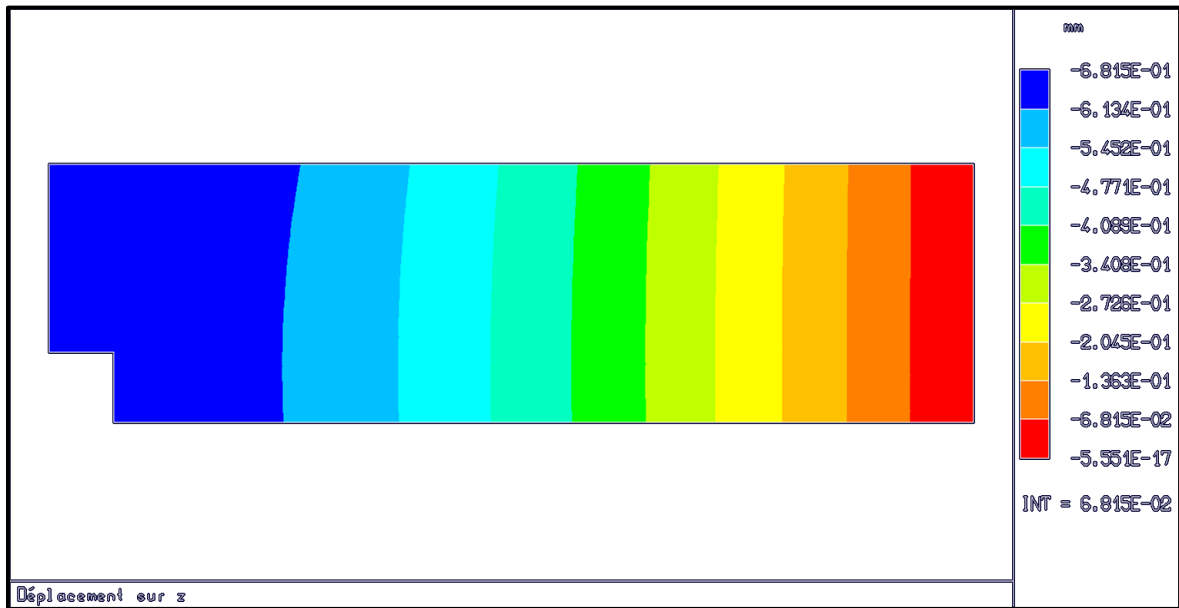


Fig. V.24. Présentation graphique de la flèche (éprouvette N°2.1)

➤ Le moment

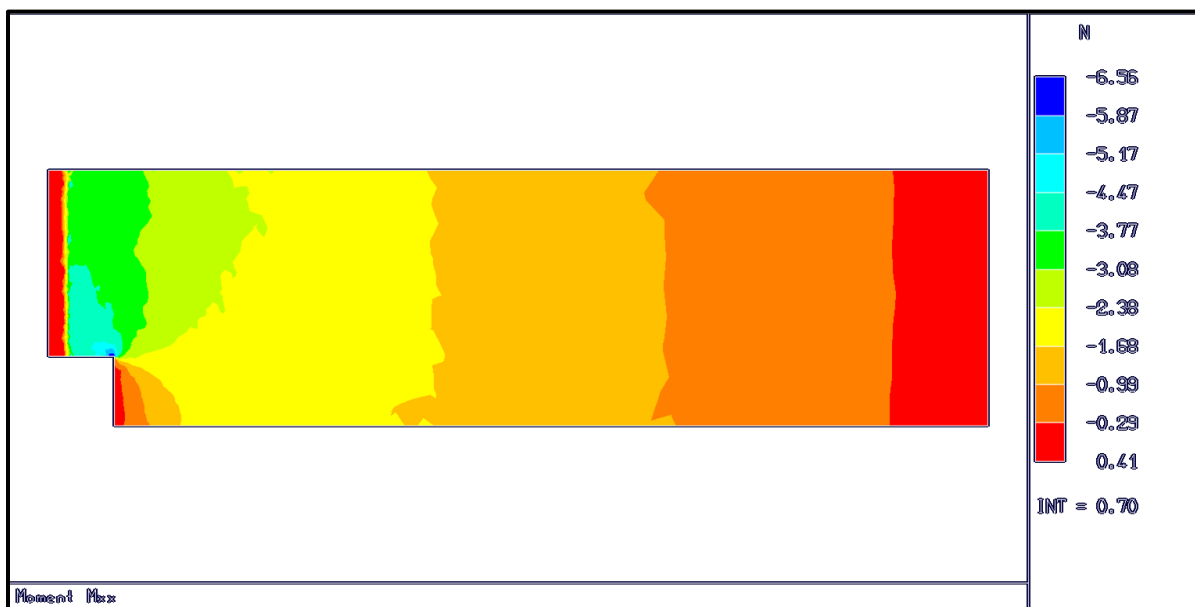


Fig. V.25. Présentation graphique du moment (éprouvette N°2.1)

➤ La contrainte Von mises

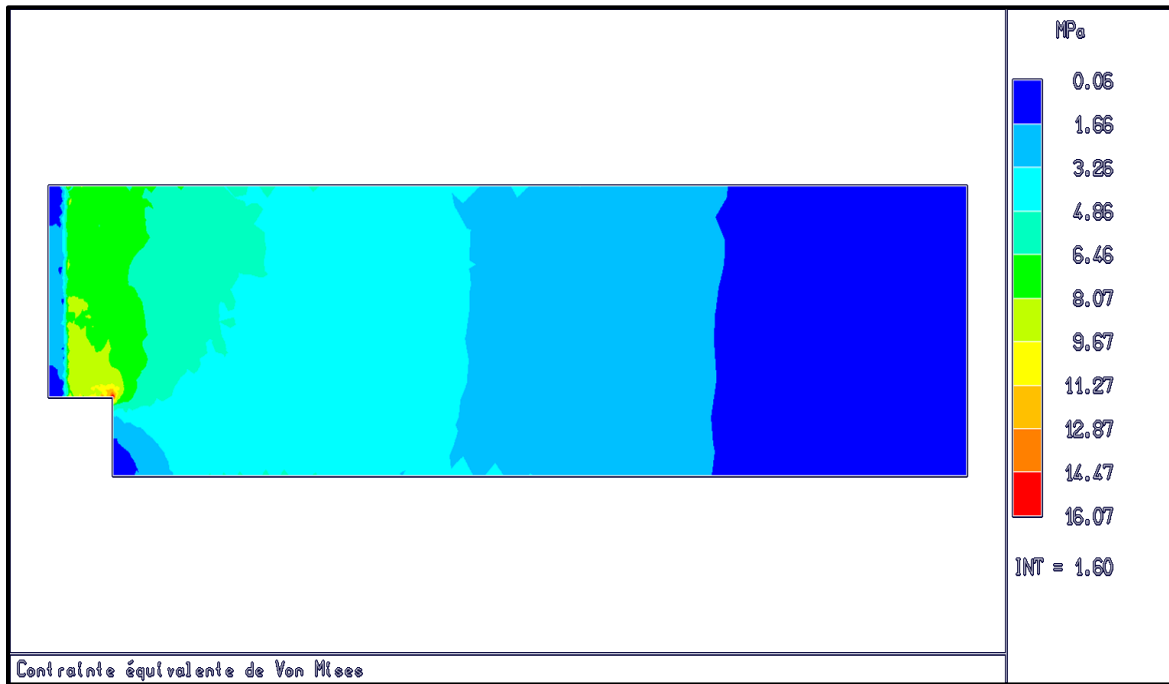


Fig. V.26. Présentation graphique de la contrainte Von mises (épreuve N°2.1)

Quart d'éprouvette trouée : $h=1.61$ mm et $b=25.7$ mm, Le rapport $d/b=0.4$

➤ La flèche

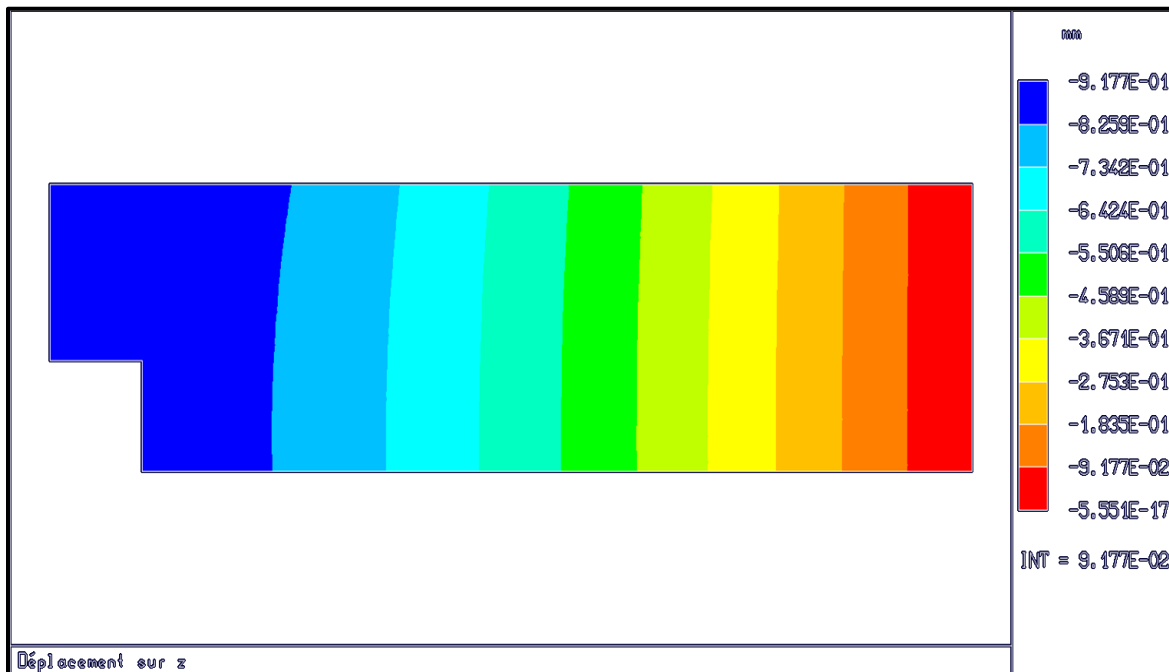


Fig. V.27. Présentation graphique de la flèche (épreuve N°3.2)

➤ Le moment

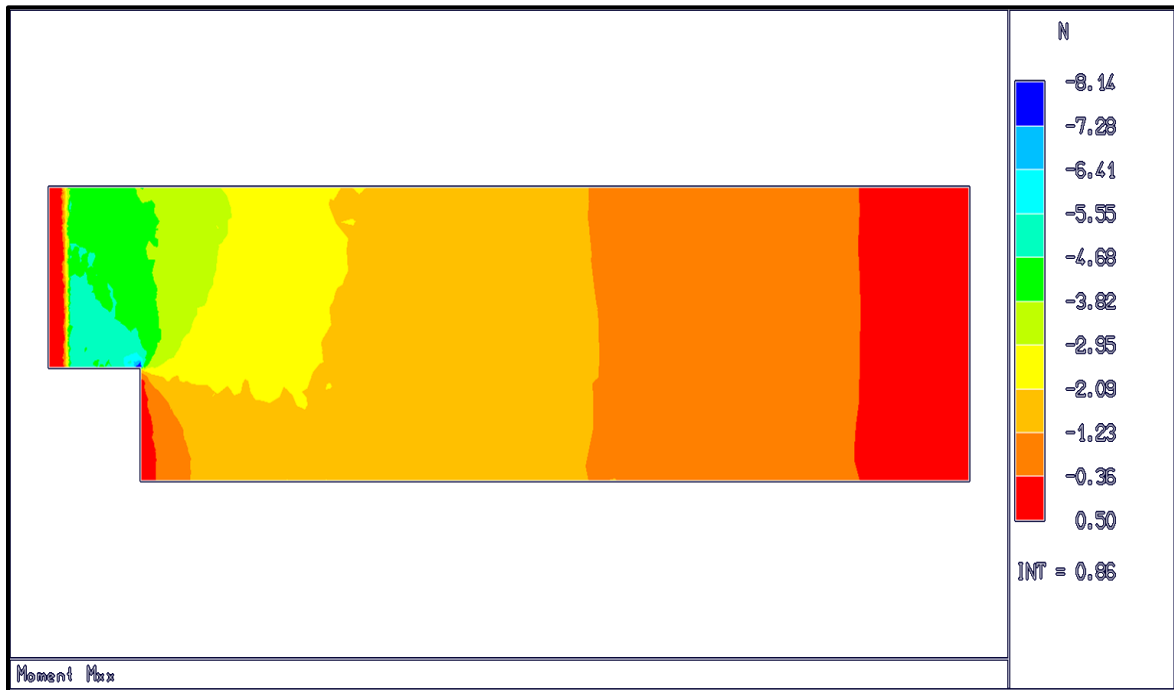


Fig. V.28. Présentation graphique du moment (épreuve N°3.2)

➤ La contrainte Von mises

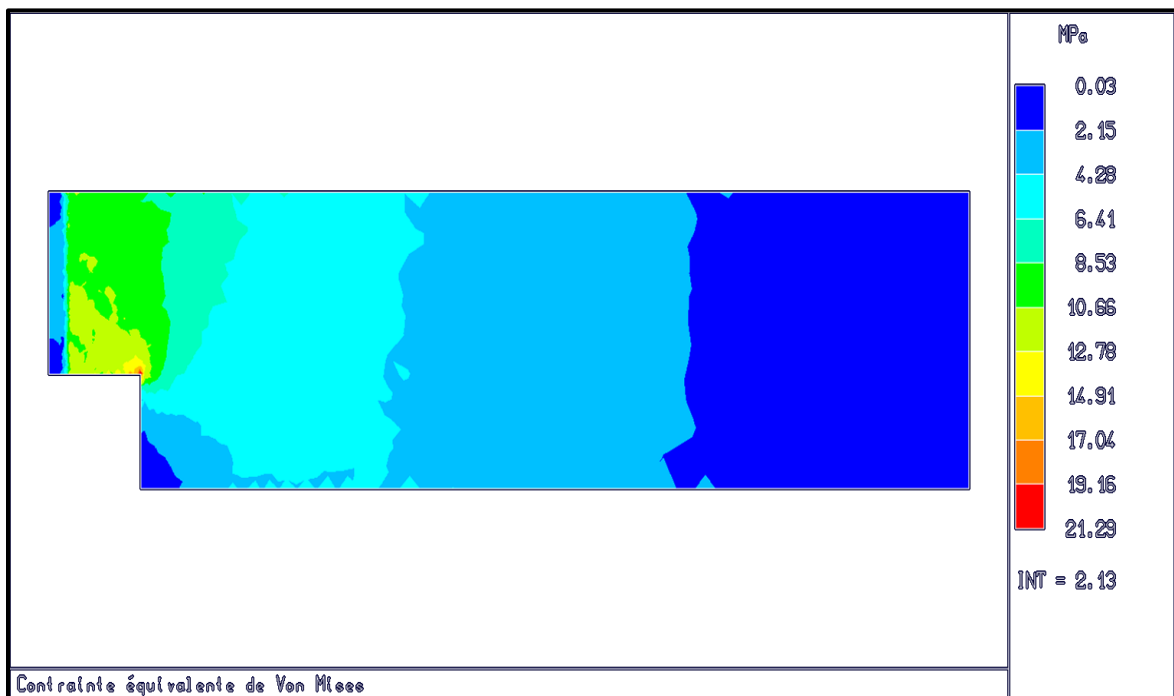


Fig. V.29. Présentation graphique de la contrainte Von mises (épreuve N°3.2)

Quart d'éprouvette trouée : h=1.95 mm et b=25.7 mm, Le rapport d/b=0.5

➤ La flèche

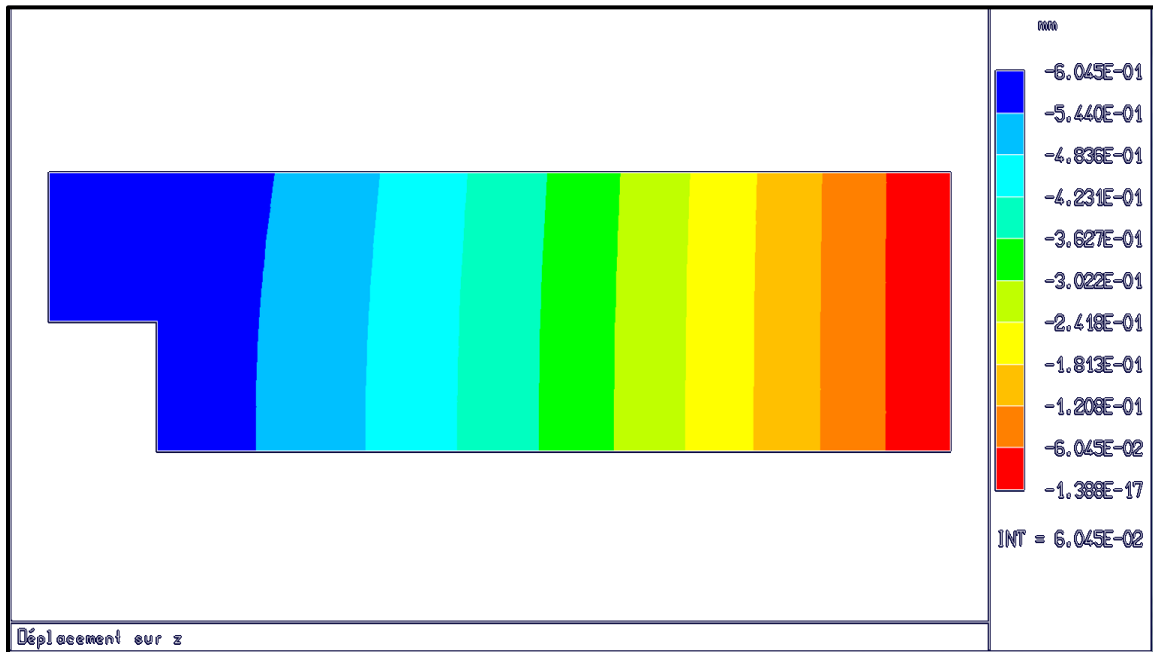


Fig. V.30. Présentation graphique de la flèche (éprouvette N°4.2)

➤ Le moment

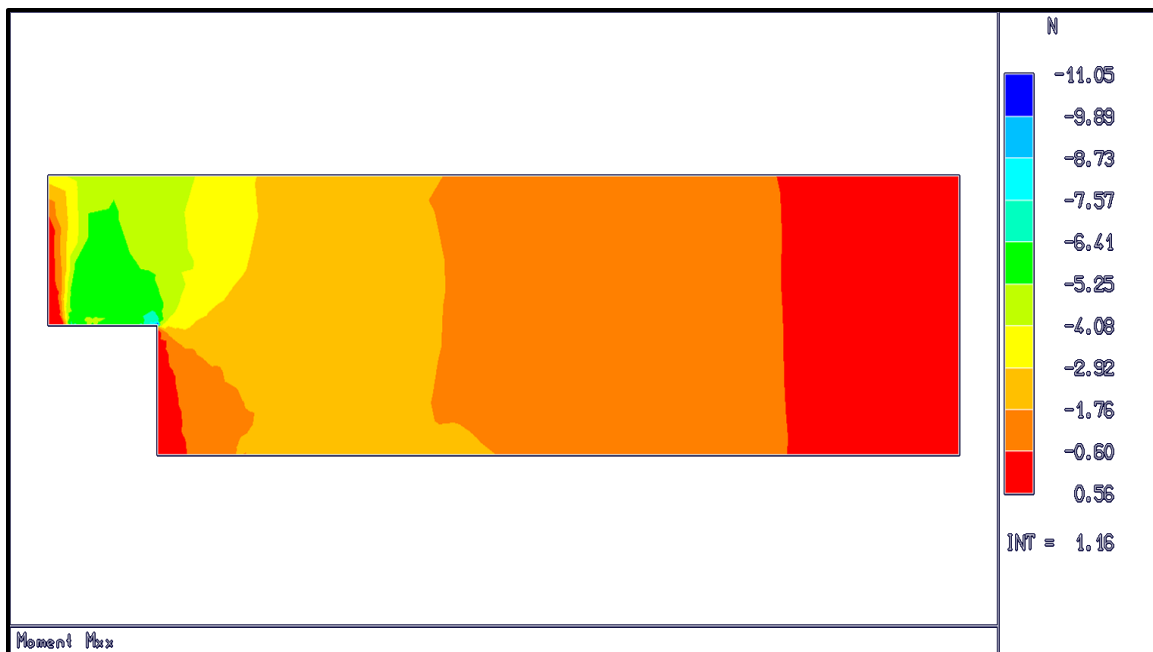


Fig. V.31. Présentation graphique du moment (éprouvette N°4.2)

➤ La contrainte Von mises

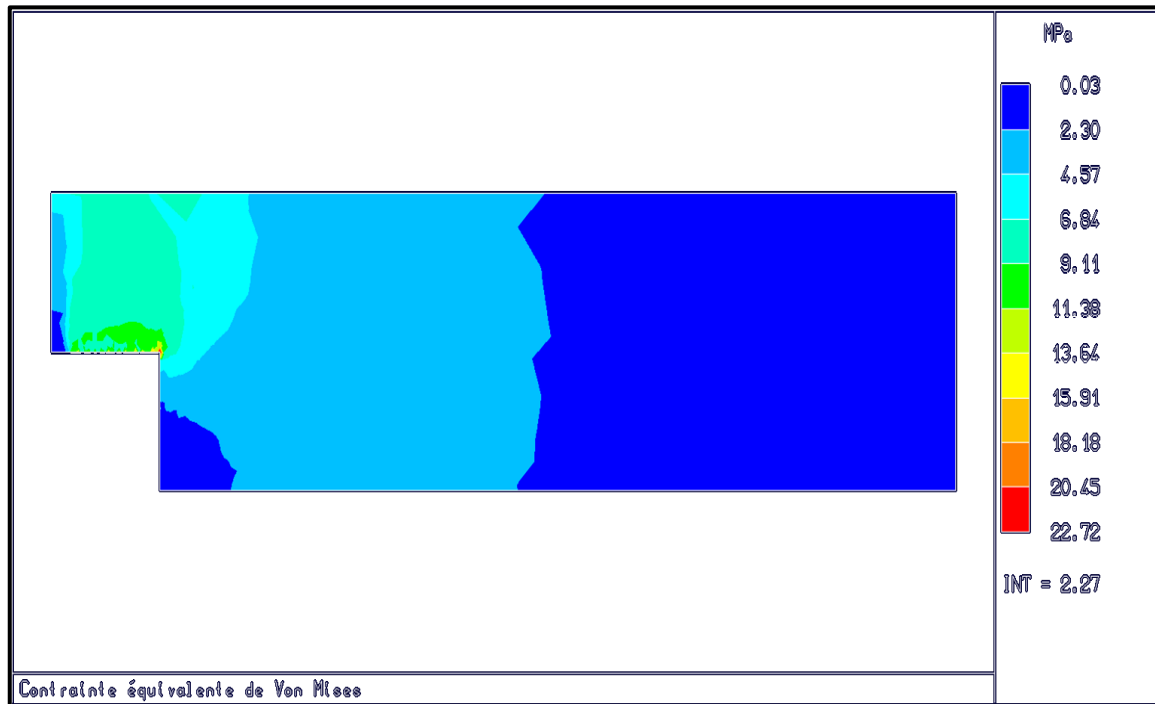


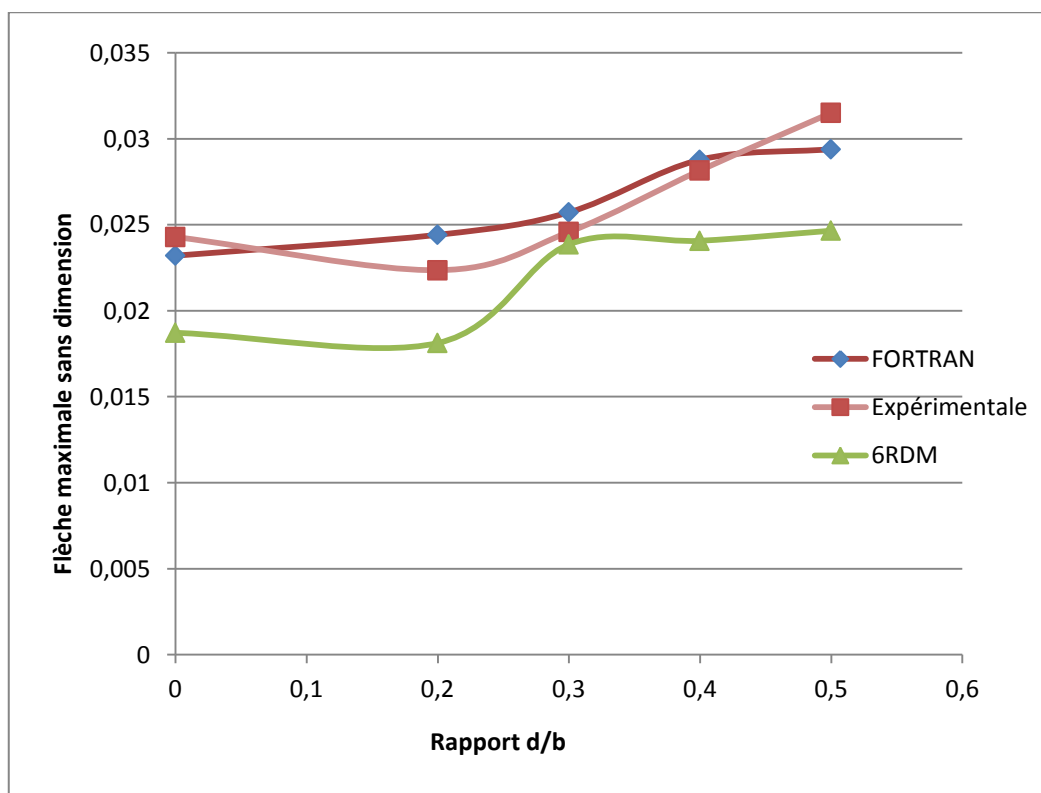
Fig. V.32. Présentation graphique de la contrainte Von mises (éprouvette N°4.2)

Tab. V.7. Présentant les valeurs des flèches comparables en fonction de la charge

	Rapport (d/b)	Flèches expérimental (mm)	Flèches Fortran (mm)	Flèches RDM 6
Eprouvette sans trou N° 1	/	0.8731	0.87342	0.814
Eprouvette sans trou N° 2	/	0.9315	0,78377	0.7986
Eprouvette sans trou N° 3	/	0.87557	0,71529	0.717
Eprouvette N° 1.1	0.2	0.29013	0,32878	0.2508
Eprouvette N° 1.2	0.2	0.62685	0,57403	0.5835
Eprouvette N° 1.3	0.2	0.3001	0,40546	0.402
Eprouvette N° 2.1	0.3	0.71160857	0,74074	0.6815
Eprouvette N° 2.2	0.3	0.97520333	1,167	1.46
Eprouvette N° 2.3	0.3	0.32743	0,35433	0.460
Eprouvette N° 3.1	0.4	0.8103	0,77998	0.848
Eprouvette N° 3.2	0.4	0.93753	0,95212	0.9177
Eprouvette N° 3.3	0.4	0.33898	0,37972	0.413
Eprouvette N° 4.1	0.5	0.39882	0,36973	0.386
Eprouvette N° 4.2	0.5	0.52062	0,53827	0.544
Eprouvette N° 4.3	0.5	1.13885	0,99281	1.086

Tab. V.8. Présentant les valeurs des flèches comparables en fonction des rapports d/b

Rapport (d/b)	Flèches expérimental (mm)	Flèches Fortran (mm)	Flèches RDM 6
0	0.02319933	0.02428537	0.01871739
0.2	0.0244131	0.02235618	0.01812201
0.3	0.02572121	0.02457692	0.02385264
0.4	0.02877908	0.02815721	0.02406682
0.5	0.02938976	0.031505	0.0246519

Fig. V.33. Evolution de la flèche en fonction du rapport (d/b)

Cette courbe montre l'effet d'ouverture sur la flèche, on remarque que la flèche calculée numériquement par fortran et RDM6 augmente mais à partir l'intervalle du rapport (d/b) de 0.3 et 0.4, cette dernière prend approximativement les mêmes valeurs, par contre la flèche calculée expérimentalement est toujours en croissance.

Conclusion générale

Notre travail a pour objectif l'étude de la présence des singularités géométriques (ouvertures de forme carrée) dans les plaques composites et son influence sur la concentration des moments, et par conséquent des contraintes, autour et au voisinage de l'ouverture. En effet, la présence des singularités géométriques dans les plaques composites peut conduire à un phénomène dangereux appelé phénomène de concentration de contraintes, provoquant la déchirure de la plaque, influençant négativement sur sa sécurité et pouvant conduire à son endommagement.

Une recherche bibliographique a été menée sur les types et les différents procédés de mise en œuvre des matériaux composites : les domaines de leur application technique et domestique ; ensuite quelques techniques de perçage des matériaux.

L'étude expérimentale du présent travail consiste en la détermination des caractéristiques mécaniques des stratifiés, à renfort en fibre de verre (plus exactement le module de Young et le coefficient de Poisson). A cet effet, des plaques en matériaux composite, de mêmes dimensions figure (IV.7), ont été préparées par le procédé de moulage par contact.

Les formules donnant le module de Young par la loi de mélange donnent de bons résultats, les caractéristiques transversales sont beaucoup plus approchées. Il ne faut pas perdre de vue que les propriétés du matériau en rigidité, et encore plus en résistance dépendent de la méthode de fabrication. Il faut donc toujours, pour connaître les caractéristiques du matériau, faire des essais sur des éprouvettes qui seront réalisées de façon identique.

Après avoir déterminé les caractéristiques E , ν ; nous avons procédé au calcul de la flèche. Dans les premiers temps, on s'est fixé le but de calculer la concentration des moments aux bords de l'ouverture par la méthode de corrélation d'image. Malheureusement, ça n'a pas marché, ce qui nous a obligés à chercher solutions numériques. Le calcul par la méthode des éléments finis nous a donné de bons résultats, qui sont confirmés par RDM 6.

Référence bibliographique

- [1] J. M. Berthelot., « **Matériaux composite** », édition Masson, pp34, p. 483. Paris 1992
- [2] Aicha BOUNADJA., « **Etude expérimentale du comportement mécanique des stratifiés à renfort métallique sollicités en flexion 3 points** ». Mémoire de magistère, Université de BOUMERDES, 2006.
- [3] Rabia BOUBEKER.,« **Etude expérimentale et numérique du comportement des plaques trouées en matériaux composites** ». Thèse Doctorat LMD, Université de Biskra, Mai 2016.
- [4] Saidani K, 2010, « **Comportement en flexion 3- points des sandwichs à âme en polystyrène** ». Première conférence Internationale de génie civil UMMTO-ALG2RIE.
- [5] Chilali.A, Chettibi.T, « **Contribution à l'optimisation multi-objectif de la rigidité d'un stratifié composite** ». Première conférence Internationale de Mécanique (ICM 2010), Laboratoire de mécanique des structures, EMP, BEB, Alger, Algérie. 23 et 24 novembre 2010
- [6] Berthelot J. M,«**Matériaux composites : Comportement mécanique et analyse des structures** », 4ème édition, 2010.
- [7] Laurent Gornet., «**Généralité sur les matériaux composites**», ECN, Centre Nantes,2011.
- [8] Jean-Jacques BARRAU., Serge LAROZE., « **Structures en matériaux composites** »,Professeurs à l'École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace (ENSAE).
- [9] Yousef DJEBLOUN, « **ETUDE DE LA RUPTURE EN MODE I D'OUVERTURE DES MATERIAUX COMPOSITES** », Mémoire de magistère, Université Mohamed khider Biskra, 2004.
- [10] N. Belloul, « **Procédé de fabrication de structure en composites en composites verre/polyester** », Thèse de magister en polymères et composites de l'université de Boumerdes, 2007.
- [11] Samia DRIDI, « **Essais de Caractérisation des Structures Tissées** », Thèse de doctorat, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 28/06/2010.

[12] Belhi Guerira, « **Contribution dans l'exploration des phénomènes viscoélastiques non linéaires de composites thermoplastiques**», Thèse de doctorat, université de Biskra, 2016.

[13] Ahlam ZAINANE, ACHARD Aurélien, DIOP Aliou, « **Rapport projet expérimental : Caractérisation de matériaux à base de bois** », **Option Mécanique et Matériaux, Promotion 2006**

[14] François F., Jaroslav, « **Analyse des structure et milieux continus : Méthode des éléments finis** », école polytechniques fédérale de Lausanne, volume 6, 297 p.

[15] Said DERBANE, « **Modélisation des plaques par la méthode des éléments finis** ». Mémoire de magistère, Université de Biskra, 19/02/2012

ملخص

إن تواجد الأشكال الهندسية في الهياكل مثل الثقوب ضروري في التكنولوجيا لاحتياجات ميكانيكية مثل تجميع القطع و توفير قنوات للتمرير. وفي نفس الوقت تواجهها بسبب ضعف وهشاشة في بنية الهياكل والذي يفسر زيادة في العزوم الموضعية التي تتسبب في أضرار في البنيات والتي تؤثر سلبا على مقاومتها و مدة عيشها و في هذه الدراسة المقسمة إلى جزأين حيث يهتم الجزء الأول بالدراسة التطبيقية من خلال سلسلة من التجارب على ماكنة مؤهلة للعمل المطلوب و الجزء الثاني بالدراسة العددية من خلال برنامج (Fortran) يمكننا من حساب الانتقالات و عزوم الانحناء إضافة إلى ذلك نقارن النتائج المحسوبة مع تلك المتحصل عليها بواسطة برنامج (RDM6) نعرض تأثير نوع من الثقوب شكل مربع على السلوك الميكانيكي لصفائح المواد المركبة وهذا بدراسة توزع العزوم حول الثقب و على الأماكن البعيدة منه وقد أجريت الدراسة لإظهار تأثير بعض العوامل مثل مساحة الثقب و نوع تطبيق القوة على هذا العامل.

الكلمات المفتاحية : المواد المركبة، سلوك الصفائح المثقوبة ، تركيز العزوم، الانحناء.

Résumé

La présence des singularités géométriques dans les structures, comme les ouvertures de différentes formes et dimensions, est une exigence technologique pour des nécessités mécaniques, tels que l'assemblage des pièces ou autres considérations. Par ailleurs, la présence des ouvertures peut également conduire à un affaiblissement de la structure, en vertu de l'amplification des valeurs des moments à leur extrémité. Ce qui peut susciter des endommagements des structures et influe négativement sur leurs sécurité et durée de vie. Le présent travail concerne l'étude des plaques composites avec trou (concentrique) carré. Le travail est divisé en deux parties : la première s'intéressant à l'étude expérimentale à partir d'une série d'essais sur la machine de flexion INSTRON, et la seconde concernant la simulation numérique en langage FORTRAN. Celle-ci, nous a permis de calculer les flèches et les moments de flexion. En outre, les résultats obtenus au moyen du programme FORTRAN sont comparés avec ceux, fournis par le logiciel RDM6. L'accent a été mis sur l'effet de la présence des trous carrés sur le comportement mécanique des plaques en matériaux composites. Il est question de déterminer la distribution des moments, autour et loin du trou, sous les sollicitations de flexion. L'étude paramétrique a été menée pour mettre en évidence l'effet de quelques paramètres, tels que la taille du trou et le type de chargement, sur la concentration des moments.

Mots-clés : Matériau composite, Comportement des plaques trouées, concentration des moments, flexion.