

---

# Analyse numérique de la concentration de contraintes dans une plaque composite sollicitée en traction comportant deux trous

Samir Deghboudj<sup>1</sup>, Wafia Boukhedena<sup>2</sup>, Hamid Satha<sup>3</sup>

1. Université Larbi Tébessi Tébessa, Département de Génie Mécanique,  
Faculté des Sciences et de la Technologie, Rte de Constantine  
Tébessa, 12000, Algeria  
daghboudjs@yahoo.fr

2. Université Larbi Tébessi Tébessa, Département science de la matière,  
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie  
Route de Constantine, Tébessa, 12000, Algeria

3. Laboratoire des Silicates, Polymères et des Nano composites  
Université de Guelma, Faculté des Sciences et de la Technologie  
Route de Constantine, Guelma, 24000, Algeria

---

*RÉSUMÉ.* La concentration de contraintes est un problème rencontré lors de la conception et du design d'une structure mécanique. Ce phénomène conduit à une amplification locale des contraintes dans une zone comportant une modification géométrique ou une singularité. Cette zone est souvent le site d'amorçage des fissures et peut être l'origine d'une rupture brutale. Cette étude concerne principalement le phénomène de concentration de contraintes dans une plaque rectangulaire finie orthotrope soumise à un champ de traction uniforme, en présence de deux trous circulaires. Plusieurs paramètres ont été considérés à savoir l'orientation des fibres, les caractéristiques mécaniques des composites et l'interdistance entre les trous.

*ABSTRACT.* Stress concentrations around holes have great practical importance during the design of mechanical structures. This phenomenon is the main cause of failure. In addition, crack initiation happens near the stress concentration region. In this paper, the work is carried out to analyze the stress concentration, around two circular holes in orthotropic rectangular plates, subjected to tension load by using finite element method. Several parameters were considered such as the orientation of the fibers, the mechanical characteristics of the composites and the distance between holes.

*MOTS-CLÉS :* facteur de concentration de contrainte, plaque composite trouée, méthode des éléments finis.

*KEYWORDS:* stress concentration factor, orthotropic plate with holes, finite element analysis.

---

DOI:10.3166/RCMA.26.147-163 © Lavoisier 2016

### Extended abstract

Orthotropic plates with multiple circular holes under tensile loading have found widespread applications in various fields of engineering especially in the field of aerospace, automotive and transportation. Stress concentrations around holes have big practical importance because they are the main cause of failure. In addition, crack initiation happens near the stress concentration region. The stress concentration near a geometric discontinuity like a hole is estimated by a parameter called stress concentration factor (SCF). The coefficient of stress concentration ( $K_t$ ) in a plate is defined as the ratio of the actual maximum stress ( $\sigma$ ) acting on the zone of discontinuity to the nominal stress ( $\sigma_{nom}$ ) applied to the plate extremity.

The main objective of this study is to evaluate the stress concentration factors for orthotropic finite rectangular plates subjected to a uniform tension field, in the presence of circular holes. We studied the evolution of the stress concentration factor around the holes numerically by using ABAQUS software. Several parameters were considered such as fiber orientation, mechanical characteristics of composites and the inter-distance between holes.

To study the stress concentration factor for composite plates, we used a rectangular plate with two holes of diameter  $d=10$  mm. The length, width and thickness plate were equal to 200 mm, 100 mm and 1 mm, respectively. The plates are subjected to unidirectional tensile load. We considered three different composite materials respectively carbon/epoxy, boron/epoxy and glass/epoxy.

The Finite element method (FEM) is a powerful computational technique widely used for numerical simulation and optimization of structural geometry, especially when dealing with stress raisers or concentrators. In this investigation, the geometric and FE model is carried out using ABAQUS software. The element 'S8R', defined by eight nodes was employed, because quadratic elements are more effective in capturing stress concentrations. The mesh is refined near the holes in order to have a steady value of the maximum stress.

Results obtained from this study reveal that when the two holes are close, in the case of horizontal inter-distance between holes and for all chosen materials, respectively for  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  and  $90^\circ$  fibers orientation the SCF varies slightly and leads to constant stress concentration level. For both vertical and inclined inter-distance between holes, if the fibers orientation is  $45^\circ$  the SCF changes very little. In case of  $0^\circ$  and  $90^\circ$  this parameter reached maximum values when the distance between the two holes is low. The effect of material characteristics was also examined in a second part of this work. In the case of horizontal inter-distance if the fibers orientation is  $0^\circ$ , the (Glass/Epoxy) plate shows the lowest stress level.

For vertical inter-distance and for  $0^\circ$  fibers orientation, it was noted that the (Glass/Epoxy) plate presented the lowest stress level. In case of  $45^\circ$  and  $90^\circ$ , the composite (Carbon / Epoxy) has the lowest stress concentration level. Finally for inclined inter-distance for  $0^\circ$  fibers orientation, it was found that plate (Glass/Epoxy) has the lowest stress level while for  $45^\circ$  and  $90^\circ$  fibers orientation the plate made of (Carbon/Epoxy) has the lowest stress level.

## 1. Introduction

Au cours des deux dernières décennies, l'utilisation des matériaux composites a rapidement augmenté surtout dans le domaine de l'industrie aéronautique, en raison de leurs caractéristiques spécifiques élevées. Toutefois, la tenue des structures composites peut être considérablement réduite par l'ajout de singularités géométriques, telles que les perforations ou les entailles (Rezaeepazhand et Jafari, 2010 ; Daghboudj et Satha, 2014).

La concentration de contraintes est parmi les problèmes rencontrés lors de la conception des structures mécaniques. Ce phénomène conduit à une amplification locale des contraintes dans une zone comportant une modification géométrique ou une singularité. Parfois, cette zone est un site d'amorçage des fissures et peut être à l'origine d'une rupture brutale. La concentration de contrainte à proximité d'une discontinuité géométrique est estimée par un paramètre appelé facteur de concentration de contrainte (FCC). Le coefficient de concentration de contraintes ( $K_t$ ) dans une plaque finie est défini comme étant le rapport de la contrainte maximale réelle ( $\sigma_{\max}$ ) agissant sur la zone de discontinuité à la contrainte nominale ( $\sigma_{\text{nom}}$ ) appliquée à l'extrémité de la plaque.

Pour étudier le phénomène de concentration de contrainte autour des formes et des entailles géométriques, plusieurs techniques analytiques, numériques et expérimentales ont été mises au point par différents chercheurs. Heywood (1952), Pilkey (2008) et Peterson (1997) ont étudié la concentration de contraintes pour des plaques isotropes présentant des trous circulaires et elliptiques. Muskhelishvili (1951), Timoshenko et Goodier (1953) ont examiné le phénomène de concentration de contraintes autour de trous dans des plaques de largeur infinies et ont présenté des solutions classiques pour le cas d'une analyse bidimensionnelle. Howland (1930) a proposé une formulation pour le calcul du facteur de concentration de contraintes pour une plaque isotrope avec trou circulaire. Hwai Chung et Bin (2008) ont développé un modèle empirique pour calculer le facteur de concentration de contrainte pour le cas des plaques isotropes/orthotropes comportant des trous circulaires. Jain et Mittal (2008) ont étudié l'effet du rapport diamètre du trou sur la largeur de la plaque sur le facteur de concentration de contrainte pour le cas des plaques finies composites rectangulaires sollicitées à des charges transversales statiques. Troyani *et al.*, (2002) ont déterminé les facteurs de concentration des contraintes dans le plan pour des plaques rectangulaires courtes avec des trous circulaires soumises à un champ de traction en utilisant la méthode des éléments finis. Mittal et Jain (2008) ont étudié l'effet de l'orientation des fibres sur le facteur de concentration de contrainte dans des plaques composites avec présence d'un trou circulaire central sous chargement statique par la méthode des éléments finis. Hashem *et al.*, (2013) ont réalisé une analyse numérique du phénomène de concentration de contrainte pour des plaques orthotropes comportant des fibres discontinues orientées de façon aléatoire, en présence de singularités circulaires/carrées. Mhallah et Bouraoui (2015) ont présenté une analyse expérimentale basée sur la corrélation d'image numérique pour déterminer le facteur de concentration de contraintes pour des plaques orthotropes et isotropes. (Lekhnitskii *et al.*, 1968) et

Tan (1988) ont proposé diverses formulations pour étudier la concentration de contraintes pour les plaques orthotropes infinies ; Nicholas et Christoph (1982) ont étudié les facteurs de concentration de contrainte pour les plaques orthotropes cylindrique. Boubeker et Hecini (2015) ont présenté une étude qui permet la détermination du facteur de concentration des contraintes dans des plaques orthotropes munies d'un trou circulaire en mettent en évidence l'effet de quelques paramètres tels que la taille du trou, l'orientation des fibres, la stratification des couches, le rapport d'anisotropie, et le type de chargement.

Dans cette étude, nous avons mis l'accent sur le phénomène de concentration de contraintes dans une plaque composite rectangulaire et finie soumise à un champ de traction uniaxial, en présence de deux trous circulaires. Plusieurs paramètres ont été pris en considération comme l'orientation des fibres, les caractéristiques mécaniques de la plaque composite et l'interdistance entre les trous.

## 2. Description du problème

Pour étudier numériquement le phénomène de concentration de contraintes autour de deux trous circulaires dans une plaque rectangulaire orthotrope de faible épaisseur ( $e = 1$  mm), soumise à un champ de traction uniforme (figure 1), nous avons considéré trois matériaux différents, constitués par une matrice époxyde avec différentes fibres de renforcement (carbone, bore et verre), dont les caractéristiques mécaniques sont indiquées dans le tableau 1. Nous avons analysé l'évolution du facteur de concentration de contraintes (FCC) en tenant compte de plusieurs paramètres tels que l'orientation des fibres, les caractéristiques mécaniques des matériaux de la plaque, l'interdistance entre les trous et la position de celle-ci (horizontale, verticale et inclinée). La plaque est fixée par l'une de ses extrémités, sur l'autre extrémité on applique une contrainte de traction uniforme ( $\sigma_{nom} = 100\text{MPa}$ ).

Tableau 1. Propriétés mécaniques des trois plaques composites

| Propriétés     | verre/epoxyde | carbone/epoxyde | bore/epoxyde |
|----------------|---------------|-----------------|--------------|
| $E_{11}$ (MPa) | 50000         | 134000          | 208000       |
| $E_{22}$ (MPa) | 14500         | 10300           | 25400        |
| $\nu_{12}$     | 0.33          | 0.33            | 0.1677       |
| $G_{12}$ (MPa) | 2560          | 5500            | 7200         |
| $G_{13}$ (MPa) | 2560          | 5500            | 7200         |
| $G_{23}$ (MPa) | 2240          | 3200            | 4900         |

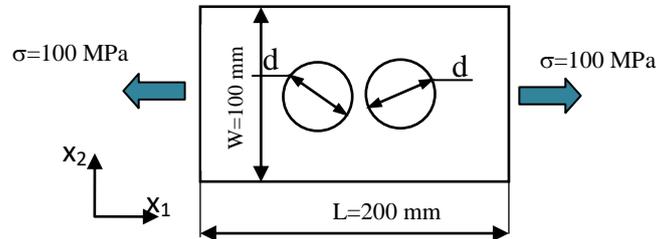


Figure 1. Géométrie et dimensions de la plaque

### 3. Analyse par la méthode des éléments finis

La résolution analytique des problèmes mécaniques ne peut se faire que dans un nombre de cas limité, cependant les méthodes numériques basées sur la discrétisation de ces problèmes présentent une alternative très efficace. La méthode des éléments finis est de toutes ces méthodes de discrétisation, la plus utilisée car elle peut traiter des problèmes de géométries complexes et couvrir de nombreux domaines de la physique. Pour simuler le comportement linéaire en traction des plaques composites de cette étude, nous avons utilisé le code de calcul Abaqus. Nous avons utilisé des éléments quadrilatéraux. La résolution a été faite en état de contraintes planes. L'élément S8R (élément quadratique à intégration réduite), défini par huit nœuds a été choisi, car les éléments du second degré sont efficaces pour capturer les concentrations de contraintes. Le maillage est raffiné à proximité des trous afin d'avoir des valeurs constantes des contraintes maximales. La plaque est fixée à une extrémité et une charge de traction de 100 MPa est appliquée à l'autre. La géométrie de la plaque et les conditions aux limites utilisées sont présentées sur les figures 2, 3 et 4.

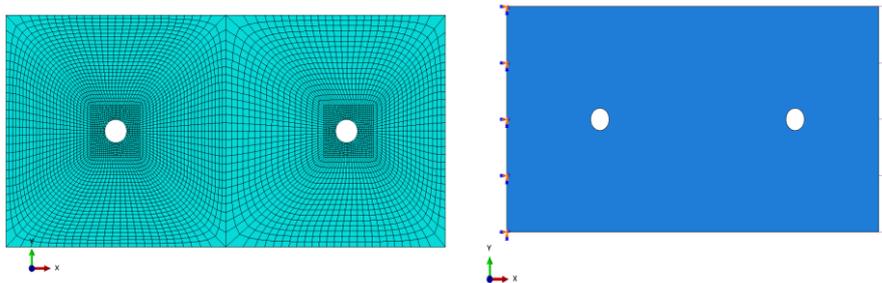


Figure 2. Conditions aux limites et maillage de la plaque  
(interdistance horizontale)

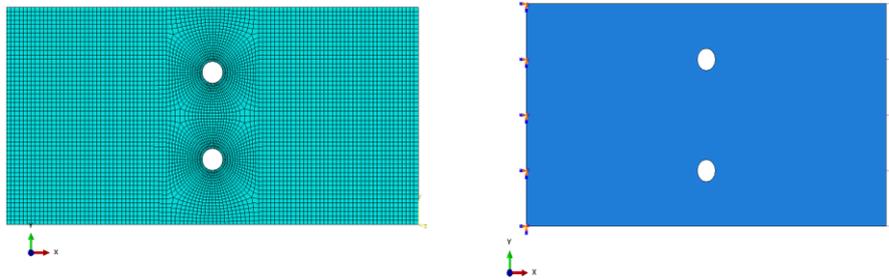


Figure 3. Conditions aux limites et maillage de la plaque (interdistance verticale)

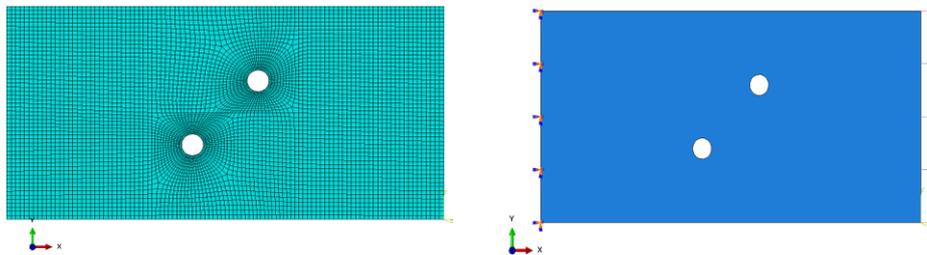


Figure 4. Conditions aux limites et maillage de la plaque (interdistance inclinée)

#### 4. Résultats et discussions

Dans cette étude plusieurs paramètres ont été examinés tels que l'orientation des fibres, les caractéristiques mécaniques des matériaux composites et l'interdistance entre les trous (horizontale, verticale et inclinée à 45°). Pour tous les cas, la plaque comporte deux trous identiques de forme circulaire de diamètre  $d = 10$  mm.

##### 4.1. Effet de l'interdistance horizontale sur le facteur de concentration des contraintes FCC

###### 4.1.1. Plaque verre/epoxyde

Les deux trous sont placés l'un à côté de l'autre par rapport au centre de la structure et occupent une position horizontale par rapport à la direction de l'application de l'effort de traction (figure 2). Nous avons analysé l'évolution du facteur de concentration des contraintes FCC pour trois orientations différentes des

fibres qui constituent la plaque composite (0, 45 et 90°). L'évolution du FCC en fonction de l'interdistance horizontale est présentée sur la figure 5a.

#### 4.1.2. Plaque carbone/epoxyde

Pour ce deuxième cas, la plaque en carbone/epoxyde comporte aussi deux trous placés l'un à côté de l'autre horizontalement par rapport à la direction de l'application de l'effort de traction. Nous avons analysé l'évolution du facteur de concentration des contraintes FCC pour les orientations de fibres (0, 45 et 90°). L'évolution du FCC en fonction de l'interdistance horizontale est présentée sur la figure 5b.

#### 4.1.3. Plaque verre/bore

Pour le cas de la plaque composite (bore/epoxyde), nous avons aussi examiné la variation du facteur de concentration des contraintes FCC pour les trois orientations des fibres (0, 45 et 90°). Sur la figure 5c nous avons présenté l'évolution du FCC en fonction de l'interdistance horizontale.

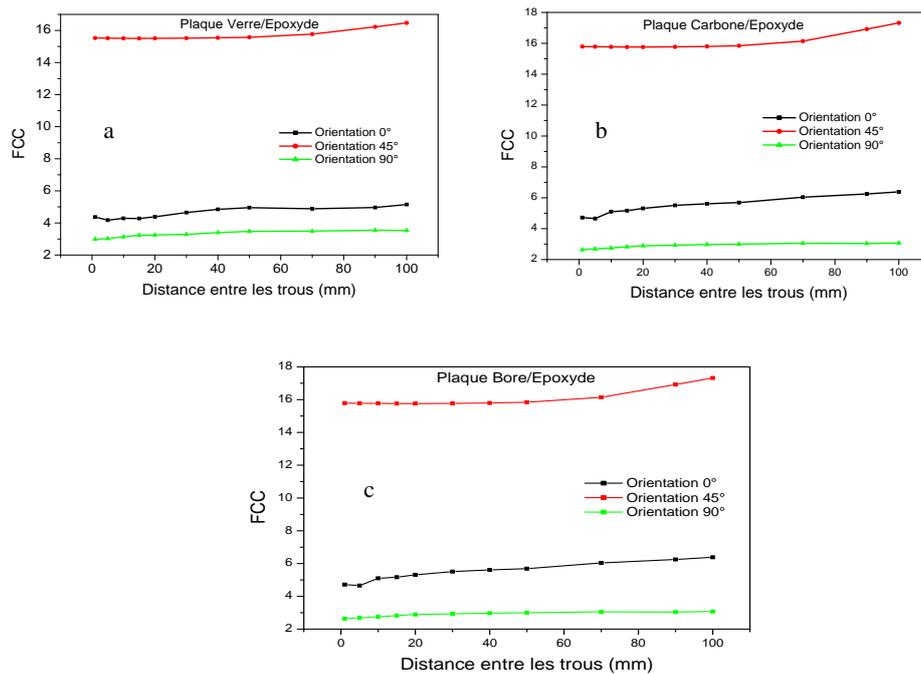


Figure 5. Variation du FCC en fonction de l'interdistance horizontale a) verre/epoxyde b) carbone/epoxyde c) bore/epoxyde

On remarque que pour les trois plaques composites (verre/epoxyde, carbone/epoxyde et bore/epoxyde) lorsque les deux trous s'approchent entre elles, le facteur de concentration de contraintes varie légèrement. Par conséquent, l'influence de l'interdistance trou-trou sur le FCC est négligeable. L'éloignement des deux singularités conduit à des contraintes quasiment constantes.

#### ***4.2. Effet de l'interdistance verticale sur le facteur de concentration des contraintes FCC***

Dans cette partie de l'analyse, les deux trous sont placés l'un à côté de l'autre verticalement par rapport à la direction de l'application de l'effort de traction figure 3. Nous avons analysé l'évolution du facteur de concentration des contraintes FCC en fonction de l'interdistance verticale.

##### ***4.2.1. Plaque verre/epoxyde***

La figure 6a illustre l'évolution du FCC en fonction de l'interdistance verticale pour trois orientations différentes des couches de fibres qui constituent la plaque composite (0°, 45° et 90°).

##### ***4.2.2. Plaque carbone/epoxyde***

Sur la figure 6b on présente la variation du facteur de concentration de contraintes FCC en fonction de l'interdistance verticale pour les trois orientations des couches de fibres (0°, 45° et 90°).

##### ***4.2.3. Plaque verre/bore***

Sur la figure 6c on montre la variation du facteur de concentration de contraintes FCC en fonction de l'interdistance verticale pour les trois orientations des couches de fibres (0°, 45° et 90°).

Pour une orientation des fibres de 45°, pour les trois plaques composites, le facteur de concentration de contraintes varie légèrement. Ainsi l'influence de l'interdistance trou-trou sur le FCC est négligeable. L'éloignement des deux trous conduit à des contraintes quasiment constantes. Pour une orientation des fibres de 0° et 90°, le FCC atteint des valeurs maximales lorsque la distance entre les deux trous est faible comme cela est montré sur les figures 6a, 6b et 6c. L'éloignement des deux trous circulaires par rapport au centre de la structure conduit à la diminution du FCC jusqu'à une valeur constante indépendante de l'interdistance entre les deux trous.

#### ***4.3. Effet de l'interdistance inclinée sur le facteur de concentration des contraintes FCC***

Dans ce cas, les deux trous sont placés inclinés l'un par rapport à l'autre d'un angle égale à 45° par rapport à la direction de l'application de l'effort de traction

figure 4. Nous avons analysé l'évolution du facteur de concentration des contraintes FCC.

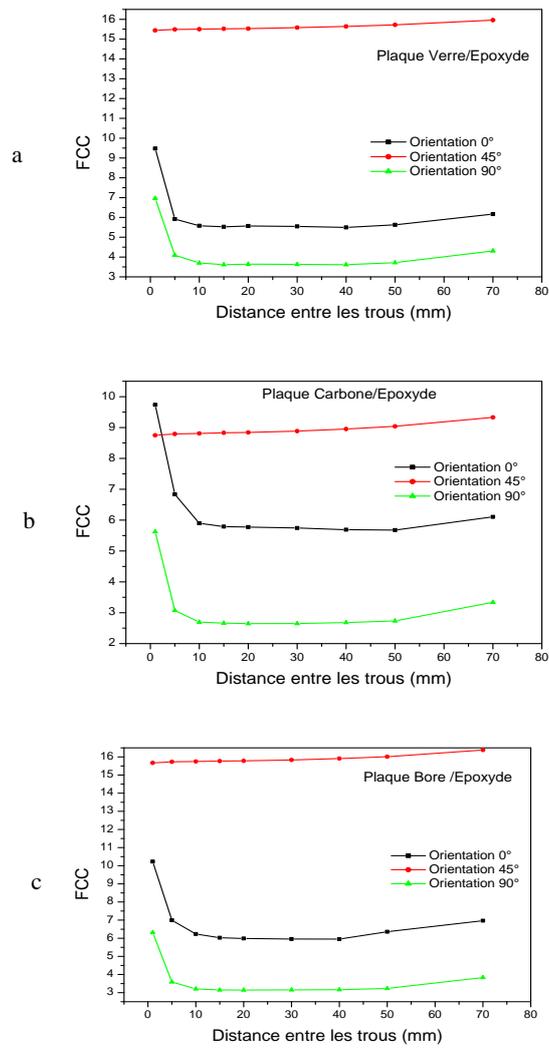


Figure 6. Variation du FCC en fonction de l'interdistance verticale  
 a) verre/epoxyde b) carbone/epoxyde c) bore/epoxyde

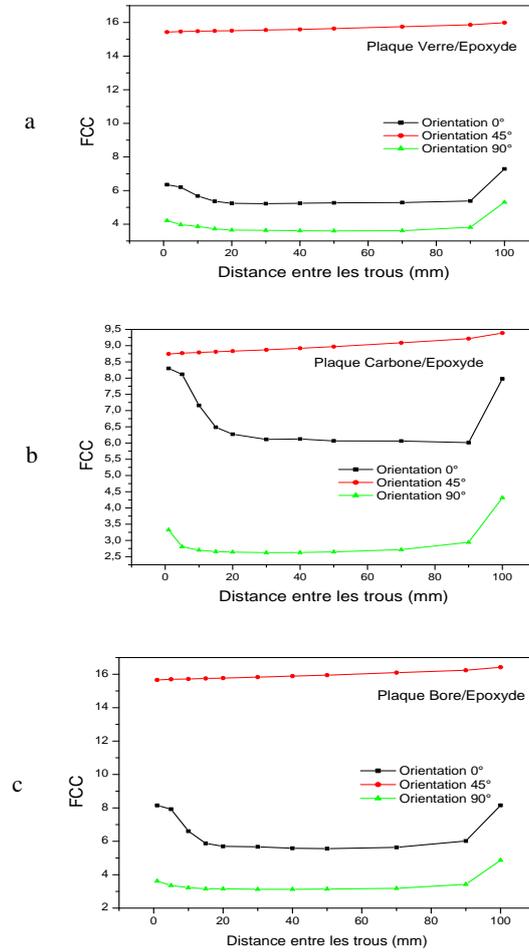


Figure 7. Variation du FCC en fonction de l'interdistance inclinée  
 a) verre/epoxyde b) carbone/epoxyde c) bore/epoxyde

#### 4.3.1. Plaque verre/epoxyde

La figure 7a illustre l'évolution du facteur de concentration de contraintes FCC en fonction de l'interdistance inclinée pour les trois orientations des couches de fibres (0°, 45° et 90°).

#### 4.3.2. Plaque carbone/epoxyde

Sur la figure 7b on montre l'évolution du facteur de concentration de contraintes FCC en fonction de l'interdistance inclinée pour les trois orientations des couches de fibres ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  et  $90^\circ$ ).

#### 4.3.3. Plaque bore/epoxyde

La figure 7c présente l'évolution du facteur de concentration de contraintes FCC en fonction de l'interdistance inclinée pour les trois orientations des couches de fibres ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  et  $90^\circ$ ).

Dans ce cas aussi, pour une orientation des fibres de  $45^\circ$  et pour les trois matériaux composites respectifs (verre/epoxyde, bore/epoxyde et carbone/epoxyde), le facteur de concentration de contraintes varie légèrement. Dans ce cas l'influence de l'interdistance trou-trou sur le FCC est négligeable. L'éloignement des deux trous conduit à des contraintes quasiment constantes. Pour une orientation des fibres de  $0^\circ$  et  $90^\circ$ , le FCC atteint des valeurs maximales lorsque la distance entre les deux trous est faible (jusqu'à 17 mm) ; au-delà d'une certaine distance d'éloignement des deux trous ce facteur de concentration de contraintes commence à augmenter (à partir de 90 mm) comme cela est montré sur les figures 7a, 7b et 7c. L'éloignement des deux trous circulaires par rapport au centre de la structure conduit à la diminution du FCC jusqu'à une valeur constante indépendante de l'interdistance cercle-cercle. Au-delà d'un certain seuil la distance entre les deux trous, le FCC atteint des valeurs maximales.

### 4.4. Effet du matériau sur le facteur de concentration des contraintes FCC

#### 4.4.1. Interdistance horizontale

Dans cette partie de l'analyse, les deux trous sont placés l'un à côté de l'autre horizontalement par rapport à la direction de l'application de l'effort de traction (figure 8). Nous avons analysé l'évolution du facteur de concentration des contraintes FCC en fonction du type du matériau (verre/epoxyde, bore/epoxyde et carbone/epoxyde).

Pour une orientation des fibres de  $0^\circ$ , on remarque que le composite (verre/epoxyde) présente le niveau de contrainte le plus bas, suivi respectivement des matériaux (carbone/epoxyde et bore/epoxyde) (figure 8a), ainsi il possède la meilleure résistance.

Pour une orientation des fibres de  $90^\circ$ , on remarque que le composite (carbone/epoxyde) présente le niveau de contrainte le plus bas, suivi respectivement des matériaux (bore/epoxyde et verre /epoxyde) (figure 8b), il possède la meilleure résistance.

Pour une orientation des fibres de  $45^\circ$ , on remarque que comme pour le cas précédant (orientation  $90^\circ$ ), le composite (carbone/epoxyde) présente le niveau de

contrainte le plus bas, suivi respectivement des matériaux (verre/epoxyde et bore/epoxyde) (figure 8c), ainsi il possède la meilleure résistance.

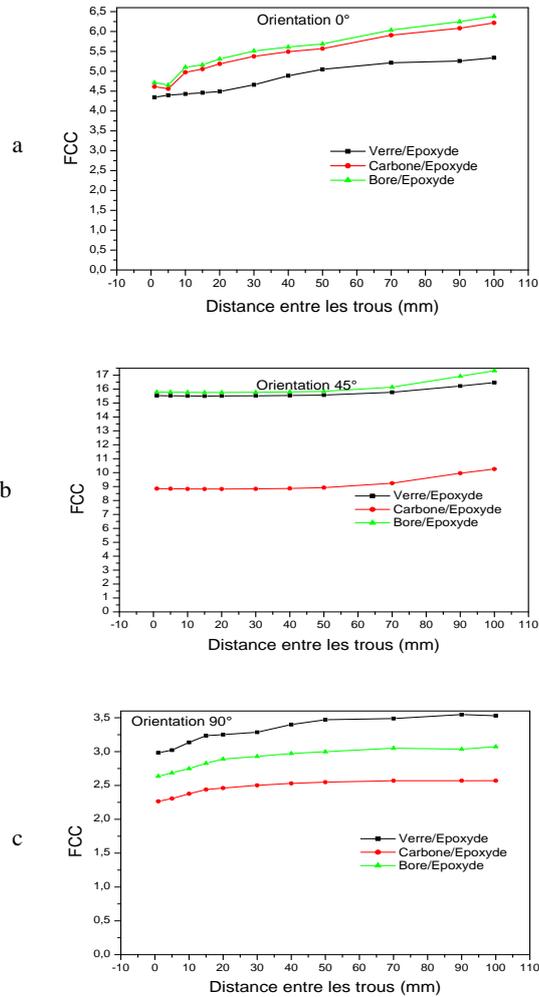


Figure 8. Variation du FCC en fonction du matériau inter-distance horizontale orientation des fibres à a) 0° b) 45° c) 90°

#### 4.4.2. Interdistance verticale

Dans ce cas d'analyse, les deux trous sont placés l'un à côté de l'autre verticalement par rapport à la direction de l'application de l'effort de traction (figure 9). Nous avons analysé l'évolution du facteur de concentration des

contraintes FCC en fonction du type du matériau (verre/epoxyde, bore/epoxyde et carbone/epoxyde).

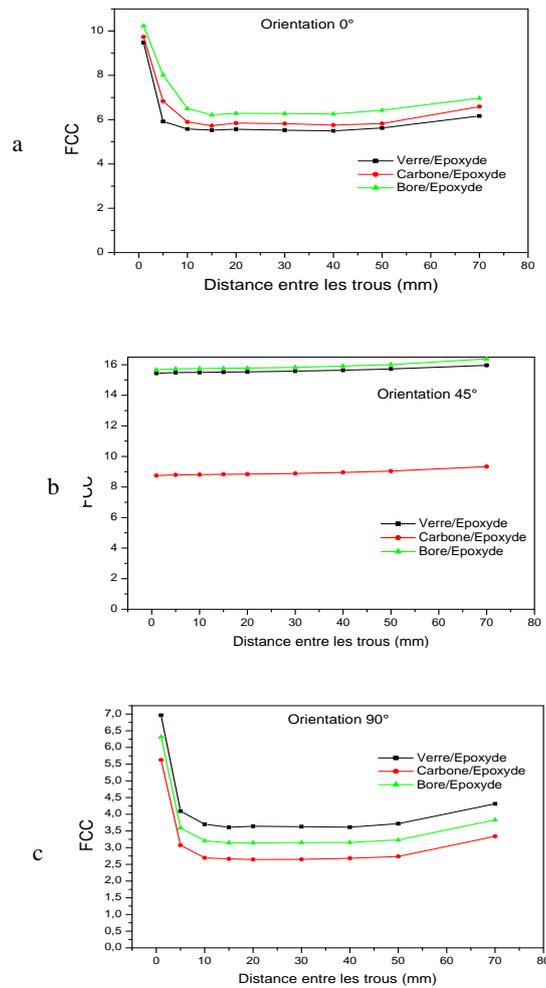


Figure 9. Variation du FCC en fonction du matériau interdistanse verticale orientation des fibres à a) 0° b) 45° c) 90°

Pour une orientation des fibres de 0°, on remarque que le composite verre/epoxyde présente le niveau de contrainte le plus bas, suivi respectivement des matériaux carbone/epoxyde et bore/epoxyde (figure 9a), ainsi il possède la meilleure résistance.

Pour une orientation des fibres de 45°, on remarque que le composite carbone/epoxyde présente le niveau de contrainte le plus bas, suivi respectivement des matériaux epoxyde/verre et bore/epoxyde (figure 9b), ainsi il possède la meilleure résistance.

Pour une orientation des fibres de 90°, comme pour le cas précédant (orientation 45°), on remarque que le composite carbone/epoxyde présente le niveau de contrainte le plus bas, suivi respectivement des matériaux bore/epoxyde et verre/epoxyde (figure 9c), ainsi il possède la meilleure résistance.

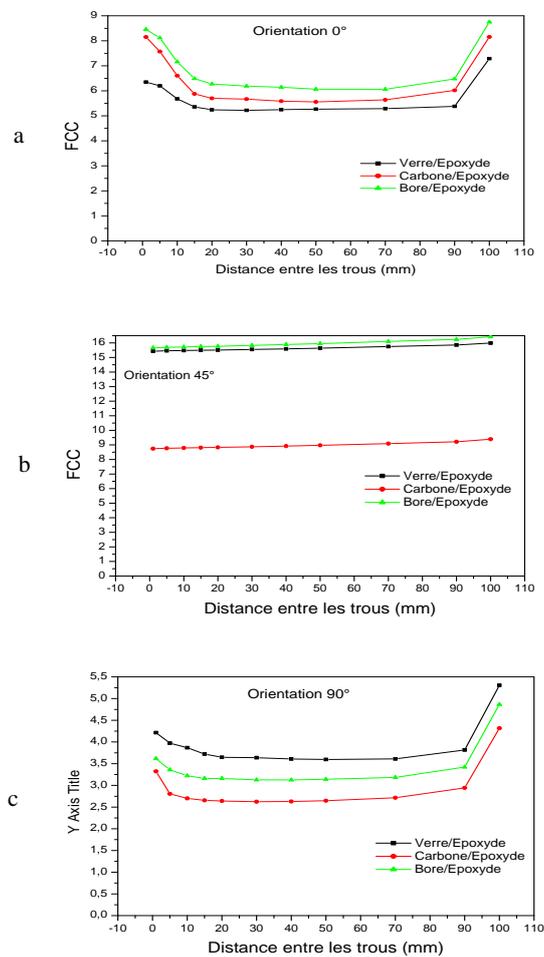


Figure 10. Variation du FCC en fonction du matériau interdistance inclinée orientation des fibres à a) 0° b) 45° c) 90°

#### 4.4.3. Interdistance inclinée

Les deux trous sont placés inclinés de  $45^\circ$  par rapport à la direction de l'application de l'effort de traction (figure 10). Nous avons analysé l'évolution du facteur de concentration des contraintes FCC.

Pour une orientation des fibres de  $0^\circ$ , on remarque que le composite verre/epoxyde présente le niveau de contrainte le plus bas, suivi respectivement des matériaux carbone/epoxyde et bore/epoxyde (figure 10a), ainsi il possède la meilleure résistance.

Pour une orientation des fibres de  $45^\circ$ , on remarque comme pour les deux cas précédents que le composite (carbone/epoxyde) présente le niveau de contrainte le plus bas, suivi respectivement des matériaux (epoxyde/verre et bore/epoxyde) (figure 10b), ainsi il possède la meilleure résistance.

Pour une orientation des fibres de  $90^\circ$ , on remarque aussi que le composite carbone/epoxyde présente le niveau de contrainte le plus bas, suivi respectivement des matériaux (bore/epoxyde et verre/epoxyde) (figure 10c), ainsi il possède la meilleure résistance.

## 5. Conclusion

Dans cette étude la méthode des éléments finis a été utilisée pour analyser le phénomène de concentration de contraintes dans une plaque rectangulaire finie orthotrope soumise à un champ de traction uniforme, en présence de deux trous circulaires. Les paramètres qui ont été considérés sont les caractéristiques mécaniques des composites utilisés, l'orientation des fibres ainsi que l'interdistance entre les deux trous. Les principaux résultats sont résumés comme suit.

Pour les trois plaques verre/epoxyde, bore/epoxyde et carbone/epoxyde, dans le cas d'une interdistance horizontale, lorsque les deux trous se rapprochent, le facteur de concentration de contraintes FCC varie légèrement. L'éloignement des deux trous circulaires conduit à des contraintes quasiment constantes.

Si l'interdistance est verticale, pour une orientation des fibres de  $45^\circ$  et pour les trois plaques composites, le facteur de concentration de contraintes varie légèrement. Dans ce cas l'influence de l'interdistance trou-trou sur le FCC est négligeable. L'éloignement des deux trous conduit à des contraintes quasiment constantes. Pour une orientation des fibres de  $0^\circ$  et  $90^\circ$ , le FCC atteint des valeurs maximales lorsque la distance entre les deux trous est faible. L'éloignement des deux trous par rapport au centre de la structure conduit à la diminution du FCC jusqu'à une valeur constante indépendante de l'interdistance cercle-cercle.

Pour une interdistance inclinée à  $45^\circ$ , on remarque aussi que pour une orientation des fibres de  $45^\circ$  et pour les trois matériaux composites respectifs verre/epoxyde, bore/epoxyde et carbone/epoxyde, le facteur de concentration de contraintes varie légèrement. Dans ce cas, l'influence de l'interdistance trou-trou sur le FCC est négligeable. L'éloignement des deux trous conduit à des contraintes quasiment

constantes. Pour une orientation des fibres de  $0^\circ$  et  $90^\circ$ , le FCC atteint des valeurs maximales lorsque la distance entre les deux trous est faible ; au-delà d'une certaine distance d'éloignement des deux trous, ce facteur de concentration de contraintes commence à augmenter. L'éloignement des deux trous circulaires par rapport au centre de la structure conduit à la diminution du FCC jusqu'à une valeur constante indépendante de l'interdistance cercle-cercle. Au-delà d'un certain seuil, le FCC atteint des valeurs maximales.

Pour le cas d'une interdistance horizontale, si l'orientation des fibres est à  $0^\circ$ , la plaque composite verre/epoxyde présente le niveau de contrainte le plus bas, suivi respectivement des matériaux carbone/epoxyde et bore/epoxyde. Pour une orientation des fibres respectivement à  $45^\circ$  et  $90^\circ$ , le composite carbone/epoxyde présente le niveau de contrainte le plus bas, suivi respectivement des matériaux bore/epoxyde et verre/epoxyde.

Pour le cas d'une interdistance verticale, pour une orientation des fibres à  $0^\circ$ , on remarque que le composite verre/epoxyde présente le niveau de contrainte le plus bas, suivi respectivement des matériaux carbone/epoxyde et bore/epoxyde, ainsi il possède la meilleure résistance. Pour une orientation des fibres respectivement à  $45^\circ$  et  $90^\circ$ , le composite carbone/epoxyde présente le niveau de contrainte le plus bas, suivi respectivement des matériaux bore/epoxyde et verre/epoxyde, ainsi il possède la meilleure résistance.

Pour le cas d'une interdistance incliné à  $45^\circ$ , pour une orientation des fibres de  $0^\circ$ , on constate que le composite verre/epoxyde présente le niveau de contrainte le plus bas, suivi respectivement des matériaux carbone/epoxyde et bore/epoxyde. Pour une orientation des fibres respectivement à  $45^\circ$  et  $90^\circ$  la plaque carbone/epoxyde présente le niveau de contrainte le plus bas, suivi respectivement des matériaux bore/epoxyde et verre/epoxyde.

## Bibliographie

- Boubeker R., Hecini M. (2015). Analyse de la concentration des contraintes dans les plaques orthotropes munies d'un trou circulaire. *Revue des Composites et des Matériaux Avancés*, vol. 25, n° 1, p. 47-68.
- Daghboudj S., Satha H. (2014). Determination of the in-plane shear rigidity modulus of a carbon non-crimp fabric from bias-extension data test. *Journal of Composite Materials*, vol. 48, n° 22, p. 2729-2736.
- Hashem Z., Bahador M., Pedram B., Gudarzi M. (2013). On Stress Concentration Factor for Randomly Oriented Discontinuous Fiber Laminas with Circular/Square Hole. *Journal of Science and Engineering*, vol. 3, n° 1, p. 7-18.
- Heywood R.B. (1952). *Designing by Photoelasticity*. Chapman and Hall.
- Howland R.C.J., (1930). On the Stresses in the Neighborhood of a Circular Hole in a Strip under Tension. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 229, p. 49-86.

- Hwai Chung C., Bin M. (2003). On stress concentrations for isotropic/orthotropic plates and cylinders with a circular hole. *Composites Part B*, vol. 34, p. 127-134.
- Jain N.K., Mittal N.D. (2008). Effect of fibre orientation on stress concentration factor in a laminate with central circular hole under transverse static loading. *Indian Journal of Engineering & Material Sciences*, vol. 15, p. 452-458.
- Jain N. K, Mittal N. D. (2008). Finite element analysis for stress concentration and deflection in isotropic, orthotropic and laminated composite plates with central circular hole under transverse static loading. *Materials Science and Engineering: A*, vol. 498, p. 115-124.
- Lekhnitskii S.G., Tsai S.W., Cheron T. (1968). *Anisotropic Plates*, Cordon and Breach Science Publishers.
- Mhallah M., Bouraoui C. (2015). Determination of Stress Concentration Factor for Orthotropic and Isotropic Materials Using Digital Image Correlation (DCI). *Multiphysics Modelling and Simulation for Systems Design and Monitoring, Applied Condition Monitoring*, p. 517-530.
- Muskhelishvili N. I. (1953). *Some Basic Problems of the Mathematical Theory of Elasticity*. Groningen.
- Nicholas J. H., Christoph M. (1982). Stress Concentration Factors for Cylindrically Orthotropic Plates. *Journal of Composite Materials*, vol. 16, n° 4, p. 313-317.
- Peterson R.E. (1997). *Stress Concentration Factors*, John Wiley & Sons.
- Pilkey W.D. (2008). *Peterson's Stress Concentration Factors*, John Wiley & Sons.
- Tan S.C. (1988). Finite Width Correction Factors for Anisotropic Plate Containing a Central Opening. *Journal of Composite Materials*, vol. 22, n° 11, p. 1080-1097.
- Timoshenko S., Goodier J. N. (1951). *Theory of Elasticity*. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Toubal L., Karama M., Lorrain B. (2005). Stress concentration in a circular hole in composite plate. *Composite Structures*, vol. 68, p. 31-36.
- Troyani N., Gomes C., Sterlacci G. (2002). Theoretical stress concentration factors for short rectangular plates with centered circular holes. *Journal of Mechanical Design*, ASME, vol. 124, p. 126-128.
- Rezaeepazhand J., Jafari M. (2010). Stress concentration in metallic plates with special shaped cutout. *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 52, n° 1, p. 96-102.

