

III.1. Introduction

Bien que les joints collés soient des moyens primaires pour transférer la charge dans la construction de structures aéronautiques et maritimes, ils sont des sites d'échec potentiels en raison de la présence de discontinuités géométriques et matérielles qui causent des concentrations de contraintes élevées. Donc, la réduction de concentrations de contraintes le long des bords de l'adhésif est importante pour empêcher l'échec prématuré du joint collé. Cependant, la détermination des champs de contraintes et de déformations dans des assemblages par recouvrement présente des difficultés résultant de la géométrie et des propriétés des matériaux dissemblables. Le chargement excentrique peut aboutir aux fléchissements de l'assemblage à simple recouvrement et les variations de contraintes locales près des fins de la région de chevauchement sont caractérisées par de très hauts gradients. Les gradients des composants de contraintes dépendent des propriétés élastiques de l'adhérent et de l'adhésif et la géométrie commune.

III.2. Contraintes dans l'assemblage à simple recouvrement

L'assemblage à simple recouvrement est de loin le plus étudié, mais c'est aussi le plus compliqué du point de vue de son analyse mécanique car le désalignement des efforts imposés engendre une répartition des contraintes très complexe. Dans l'industrie on a le plus souvent recours à la méthode d'assemblage collé en raison des avantages qu'elles comporte : Facilement réalisable et peu encombrante.

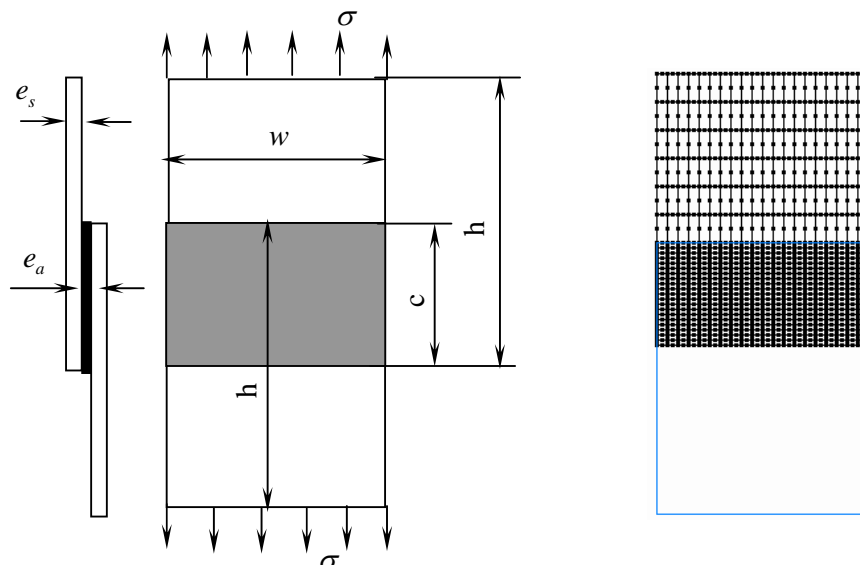


Figure III.1. Modèle géométrique et maillage typique de l'assemblage à simple recouvrement

La figure III.1 présente un assemblage collé à simple joint de recouvrement sollicité en traction uniaxiale avec une contrainte d'amplitude $\sigma = 120MPa$. Cet assemblage est constitué de deux plaques rectangulaires de mêmes dimensions, $h = 127mm$, $w = 152.4mm$ et d'épaisseur $e_s = 1mm$. Les plaques sont collées sur une longueur de recouvrement c par un adhésif de module de cisaillement $G_a = 965MPa$ et d'épaisseur $e_a = 0.127mm$. Dans les calculs réalisés nous faisons l'hypothèse simplifiée d'un comportement élastique linéaire des matériaux.

Pour expliquer le mécanisme de la rupture du joint de colle puisque celle-ci s'initie aux points où les contraintes sont maximales ; nous avons tracé la variation de ces dernières sur la longueur de recouvrement pour trois types de matériaux différents. Les caractéristiques mécaniques des matériaux sont rassemblées dans le tableau III.1.

Property	Aluminum	Boron/epoxy	Graphite/epoxy
$E_1(GPa)$	72	208.0	138.0
$E_2(GPa)$		9.7	9.7
ν_{12}	0.33	0.33	0.3
$G_{12}(GPa)$		16.6	6.9
$G_{13}(GPa)$		16.6	6.9
$G_{23}(GPa)$		14.6	3.2

Tableau III.1. Caractéristiques mécaniques des matériaux.

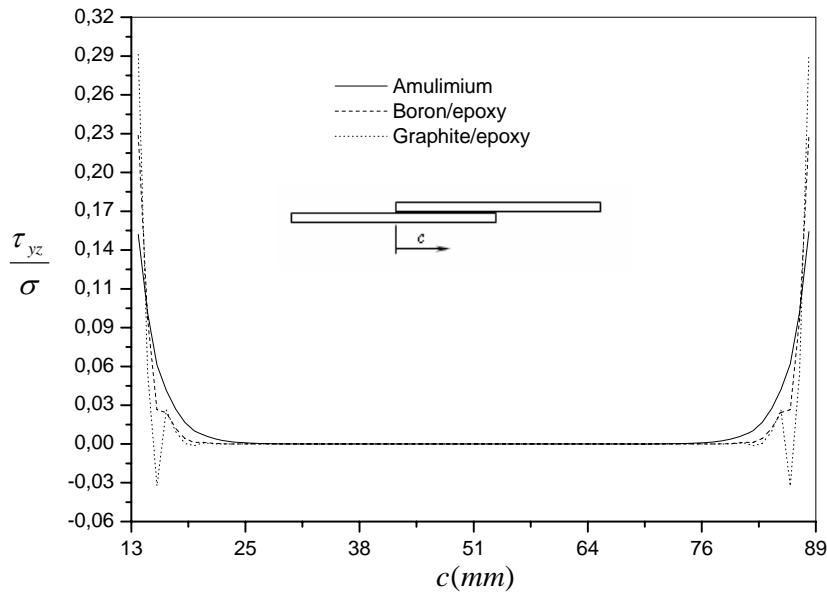


Figure III.2. Variation des contraintes tangentielles de l'adhésif τ_{yz} pour différents matériaux du substrat.

On remarque que les concentrations de contraintes de cisaillements τ_{yz} sont localisées au niveau des arrêtes libres des joints de l'adhésif produites du cumule des déplacements. On constate que l'allure de la contrainte de cisaillement est symétrique par rapport à la longueur de recouvrement, les maxima se trouvent sur les bords des joints tandis que les minima sont situées au centre de la longueur de recouvrement ce qui implique que la structure est équilibrée au tour de la surface collée. La bonne adhérence est donc au milieu de la structure et le risque de décollement est de plus en plus important en se rapprochant des joints libres de recouvrement.

Les contraintes maximales de cisaillement de l'adhésif sont surtout localisées à une distance de l'ordre de 18 % de la longueur de recouvrement et cela quelque soit le type du matériau utilisé. A partir de cette longueur les contraintes tendent à une valeur nulle. La contrainte maximale τ_{yz} diminue respectivement selon la rigidité des matériaux utilisés, graphite/époxy, boron/époxy et l'aluminium. Plus la rigidité du matériau est élevée mieux sera le transfert des charges au adhésif et par conséquent les contraintes de cisaillement seront plus importantes. Donc toute variation dans les caractéristiques mécaniques des matériaux collés influe sur la résistance de l'adhésif.

III.3. Influence de la longueur de recouvrement

Nous avons vu que la variation des caractéristiques mécaniques des substrats influe sur la résistance de l'adhésif, pour cela nous procédons à l'étude de l'influence du dimensionnement d'un assemblage sur la distribution des contraintes dans le joint de l'adhésif.

En faisant varier la longueur de recouvrement c tout en gardant la même hauteur de l'assemblage collé, on trace la variation de la contrainte de cisaillement maximale τ_{yz} pour différents matériaux.

La figure III.3 montre clairement que la contrainte maximale de cisaillement diminue proportionnellement à l'augmentation de la longueur de recouvrement c quelque soit la résistance du matériau. L'augmentation de la résistance mécanique du joint prend de l'importance avec l'augmentation de la longueur de recouvrement et la résistance mécanique des substrats. Nous avons vu que les contraintes τ_{yz} maximales dans le joint se trouvent aux

extrémités de la surface de recouvrement, lorsque la longueur c augmente ; les τ_{yz} maxima se déplacent de plus en plus vers l'extrémité chargée, conduisant à une surface de contact plus grande. Au milieu de la distance de recouvrement c , la contrainte τ_{yz} tend à une valeur nulle. De plus la figure III.3 montre que l'augmentation de la résistance des matériaux collés et de la surface de collage, influent directement sur l'élévation de la probabilité de la rupture dans les substrats, puisque les contraintes de cisaillement maximales diminuent.

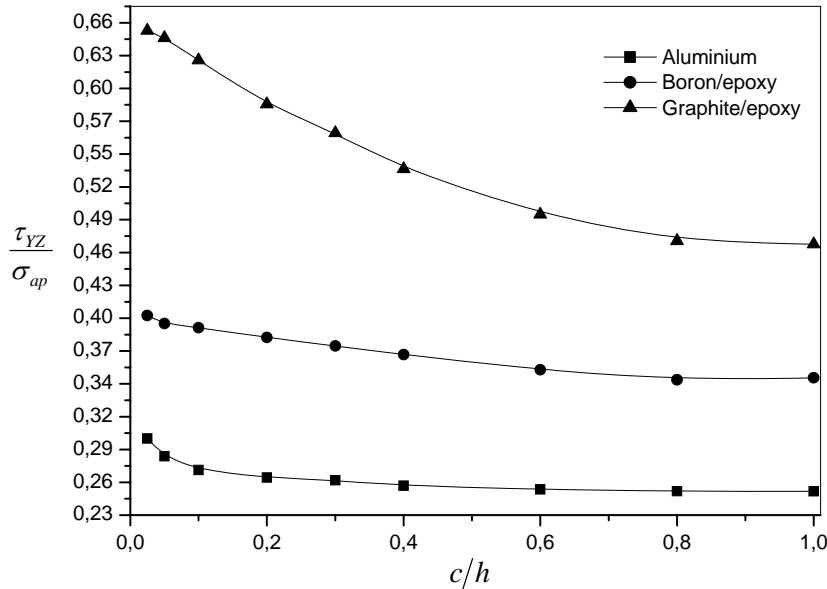


Figure III.3. Variation de la contrainte de cisaillement maximale en fonction de la longueur de recouvrement c .

Lorsqu'il y a augmentation de la longueur de recouvrement (c'est-à-dire l'augmentation de la surface de contact) ceci engendre une diminution de la contrainte moyenne et une augmentation de la charge de la rupture [62]. Cependant Schmit et Fraisse [63] ont déterminé une longueur de recouvrement critique pour un assemblage métallique correspondant au passage d'une rupture par écoulement plastique à une rupture par fissuration de la jonction.

III.4. Influence de l'épaisseur de l'adhésive

L'épaisseur de la couche d'adhésif représente un paramètre géométrique important. Giraud[64] a réalisé des essais sur les assemblages à simple recouvrement et montre que la rupture devient de plus en plus adhésive lorsque l'épaisseur adhésive augmente. Halioui [65] a étudié expérimentalement l'influence de l'épaisseur adhésive sur la résistance du joint à

simple recouvrement, et a montré qu'elle diminue lorsque l'épaisseur du film adhésif augmente. L'analyse par la méthode des éléments finis, nous a permis de déterminer la variation de la contrainte maximale de cisaillement dans le joint de colle, en fonction de son épaisseur pour différents matériaux.

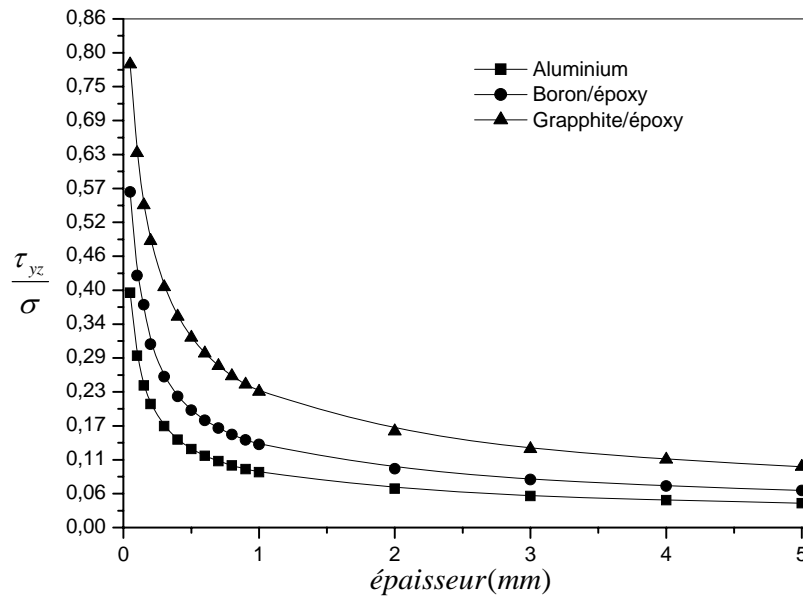


Figure III.4. Influence de l'épaisseur de l'adhésive sur la variation de la contrainte maximale de cisaillement.

On constate que la valeur de la contrainte de cisaillement diminue lorsque l'épaisseur de l'adhésif augmente. Par conséquent, l'adhésion est meilleure lorsqu'on augmente l'épaisseur de la couche de l'adhésif; cela nous permet d'affirmer que la résistance de l'adhésif est fragile pour de faibles épaisseurs. Les faibles épaisseurs conduisent à une mauvaise adhérence.

Il est préférable d'augmenter l'épaisseur de la couche d'adhésif pour améliorer la résistance de l'adhésion; alors si on augmente indéfiniment l'épaisseur de la couche d'adhésive, cette dernière risque de se comporter comme un troisième matériau différent dont les *propriétés mécaniques sont faibles*. De plus l'augmentation de l'épaisseur adhésive accroît le risque de sa plastification. La plastification entraîne une dégradation des propriétés mécaniques de l'adhésif, engendrant ainsi des ruptures adhésives.

L'épaisseur de l'adhésif doit être optimisée pour renforcer l'adhésion et éviter d'avoir un comportement d'un troisième matériau ayant des propriétés mécaniques de résistance faible.

Géraud [65] a déterminé l'épaisseur optimale de la couche d'adhésif à une fourchette de 0.1 et 0.2 mm.

III.5. Influence de la raideur des substrats

Dans ce paragraphe, une étude par la méthode des éléments finis a été menée sur un assemblage à simple recouvrement symétrique, avec un joint de colle d'une épaisseur variable tout en maintenant les mêmes caractéristiques mécaniques des matériaux et de l'adhésif. On prend une longueur de recouvrement $c = 76\text{mm}$. En faisant varier les modules de Young des substrats, nous avons tracé la variation des contraintes de cisaillements maximales τ_{yz} en fonction des rapports de rigidité pour trois différentes épaisseurs de l'adhésif.

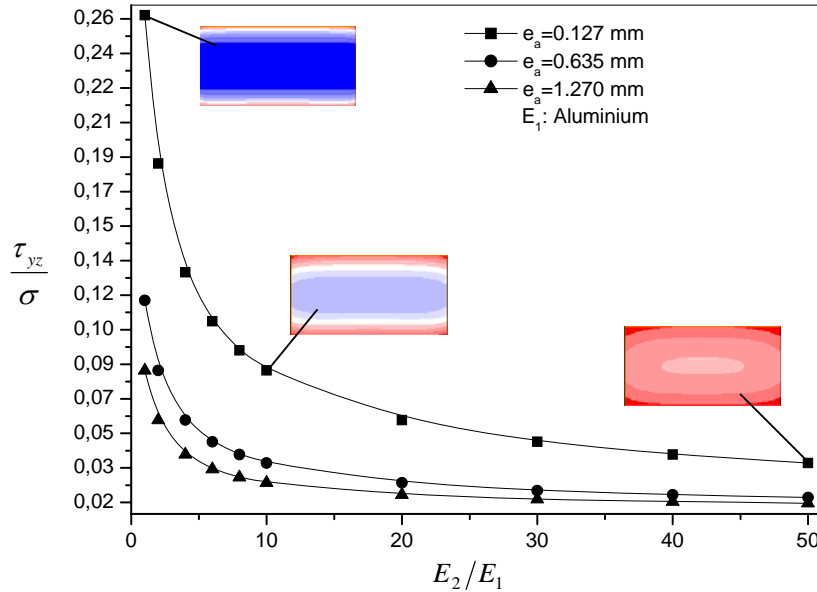


Figure III.5. Variation de la contrainte de cisaillement maximale en fonction de la raideur des substrats pour différentes épaisseurs de l'adhésif.

On remarque que la contrainte maximale de cisaillement τ_{yz} diminue proportionnellement avec l'augmentation de la rigidité des substrats. Cette diminution est beaucoup plus importante lorsque le rapport est inférieur à 20 ($E_2/E_1 \leq 20$). Pour des rapports supérieurs à ce chiffre ($E_2/E_1 > 20$) la variation est peu sensible. Les concentrations de contraintes maximales sont localisées au niveau des arrêtes libres des parties collées perpendiculairement à la direction de la contrainte appliquée. Ces concentrations de contraintes tendent à une valeur nulle au milieu de l'assemblage collé et seront localisées aux angles vifs sur le bord

extérieur de la plaque lorsque la rigidité des substrats augmente. Les contraintes maximales de cisaillement dans l'adhésif sont de plus en plus importantes avec la minimisation de son épaisseur (e_a). Donc l'augmentation de la rigidité des substrats absorbe les contraintes de cisaillement maximale dans les adhésifs. Pour mieux éclaircir ce phénomène nous avons tracé la variation de la contrainte de cisaillement sur la longueur de recouvrement ($c = 76mm$), parallèle au sens de l'application de la contrainte appliquée pour trois rigidités de substrats (figure III.6).

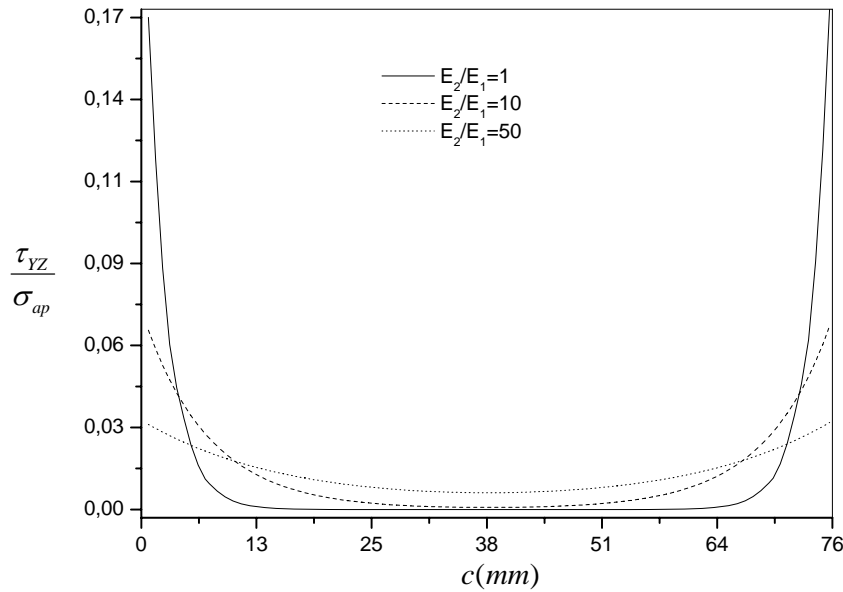


Figure III.6. Variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la longueur de recouvrement (c) pour différentes rigidités de substrats.

Les contraintes τ_{yz} sont maximales aux extrémités pour des faibles rigidités de substrat. Les contraintes sont quasi nulles au milieu de la plaque. Alors, si les rigidités des substrats sont différentes, les concentrations de contraintes seront plus élevées du côté du matériau ayant le module de Young le plus ductile (plus faible). Ces matériaux absorbent l'énergie sous forme de déformations ; ces dernières créent des déplacements importants conduisant à des contraintes tangentielles élevées. Pour réduire ces concentrations de contraintes dans les matériaux ductiles, on doit assurer des tôles épaisses, ou bien utiliser des colles de faibles modules de cisaillement.

III.6. Influence du module de cisaillement de l'adhésif

Nous avons étudié la répartition des contraintes de cisaillement τ_{yz} dans la couche adhésive sur une ligne verticale pour différentes valeurs du module de cisaillement de l'adhésif G_a . Nous remarquons qu'un adhésif ayant un module élevé conduit à des contraintes trop importantes. Autrement dit un adhésif est moins résistant s'il présente un module de cisaillement élevé. Les recherches actuelles tentent d'améliorer cette propriété qui est une caractéristique essentielle de la résistance de l'adhésif.

Lors de la traction, le délaminage s'amorce sur les bords de la plaque en raison de la triaxialité des contraintes locales.

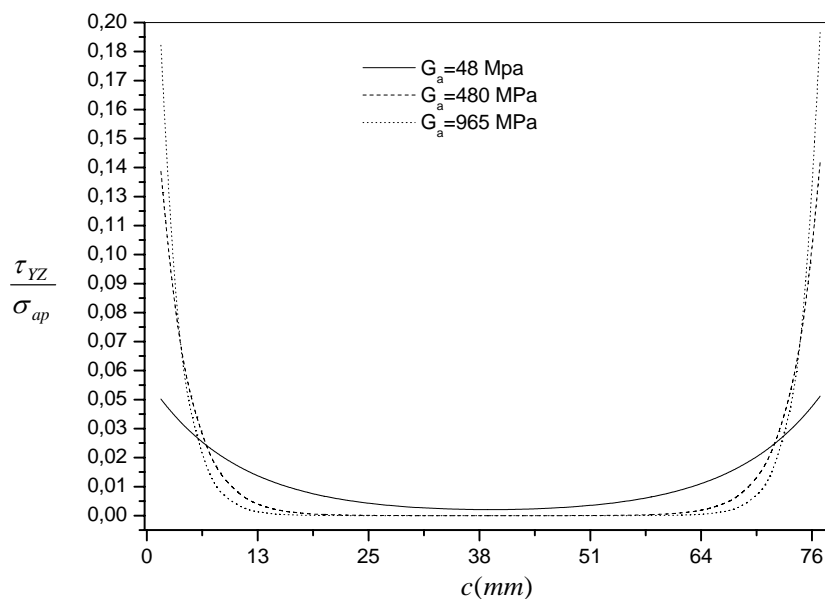


Figure III.7. Influence du module de cisaillement de l'adhésif sur la répartition des contraintes de cisaillements.

III.7. Contraintes dans l'assemblages à double joint de colle

Le joint à double recouvrement est un assemblage symétrique, souvent encombrant et cher à réaliser. L'éprouvette de l'assemblage à double recouvrement est constituée de trois plaques rectangulaires, superposées l'une sur l'autre, avec un joint de colle entre les plaques, comme montré sur la figure III.8. Les largeurs, les longueurs, et les épaisseurs sont identiques. Les trois plaques sont collées sur une longueur de recouvrement $c = 76.2\text{mm}$. L'adhésif a une épaisseur $e_a = 0.127\text{mm}$ et un module de cisaillement $G_a = 965\text{MPa}$.

Les distributions des contraintes de cisaillement τ_{yz} dans les deux joints de l'adhésif sont représentées sur la figure III.8. On remarque dans les arêtes des bords que la distribution des contraintes n'est pas identique pour les deux joints de l'adhésif. Cette différence est due au fait que l'éprouvette sollicitée en traction est chargée d'un côté et encastrée de l'autre, donnant un déplacement plus élevé suivant la direction du chargement, ce qui provoque une concentration maximale du côté des déplacements élevés et donc apparition de l'effet de bord; par contre, du côté de l'encastrement la contrainte est plus faible.

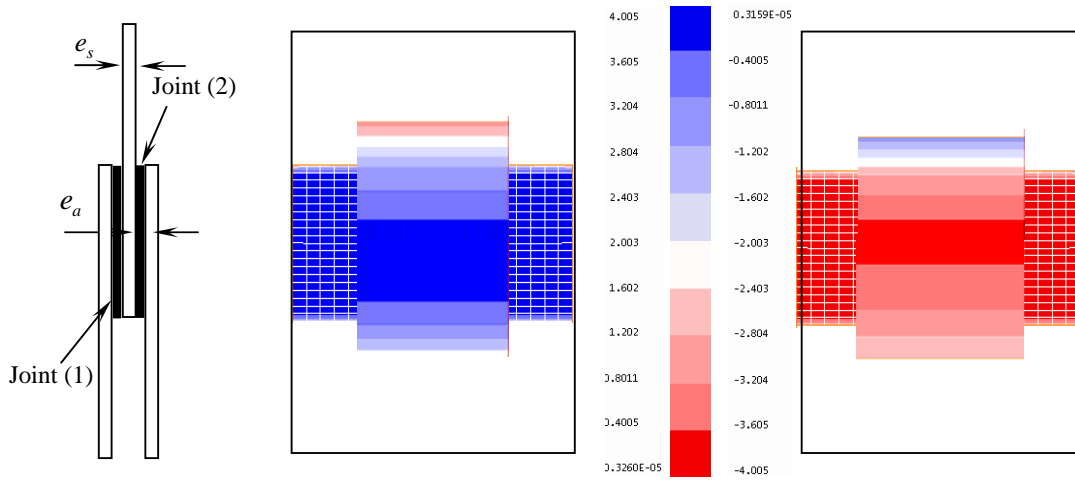


Figure III.8. Distribution du champ de contrainte de cisaillement dans l'assemblage à double recouvrement.

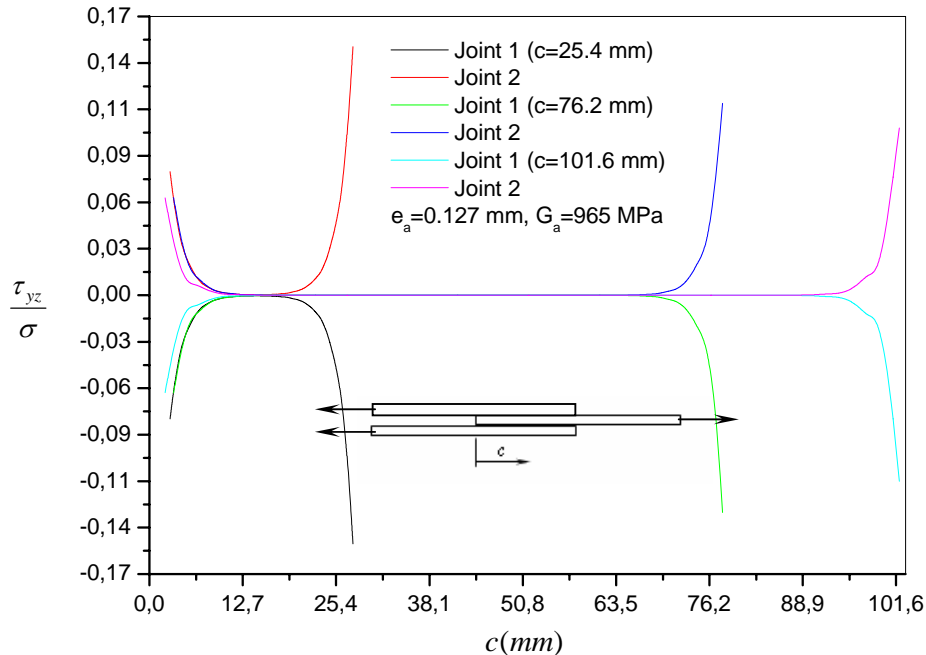


Figure III.9.- Variation des contraintes tangentielles dans les deux joints de l'adhésif.

La figure III.9 représente la variation de, la contrainte tangentielle τ_{xz} suivant une ligne parallèle au chargement; on constate que les contraintes dans les deux joints sont de signes opposés, ce qui implique que les déplacements dans les deux joints sont de sens opposés. Donc on peut conclure qu'il y a un équilibre dans la distribution des contraintes entre les deux joints de colle.

Contrairement aux assemblages à simple joint de recouvrement où la distribution des contraintes est symétrique par rapport au centre du joint, les assemblages à double joint de colle représentent une dissymétrie dans la distribution des contraintes. La concentration est maximale dans une arête puis diminue progressivement jusqu'à atteindre une valeur quasi-nulle au centre puis elle commence à augmenter plus en s'éloignant du milieu du joint. La contrainte τ_{yz} est maximale dans l'extrémité proche de la contrainte de sollicitation.

De même, la figure III.9 monte l'influence de la longueur de recouvrement sur la distribution des contraintes tangentielles dans les joints de l'adhésif de l'assemblage à double recouvrement. On signale que plus la longueur de recouvrement est importante, la contrainte de cisaillement maximale diminue.

III.8. Contraintes dans l'assemblage à simple recouvrement en présence d'entaille

Considérons deux plaques minces en aluminium de même configuration géométrique que précédemment.

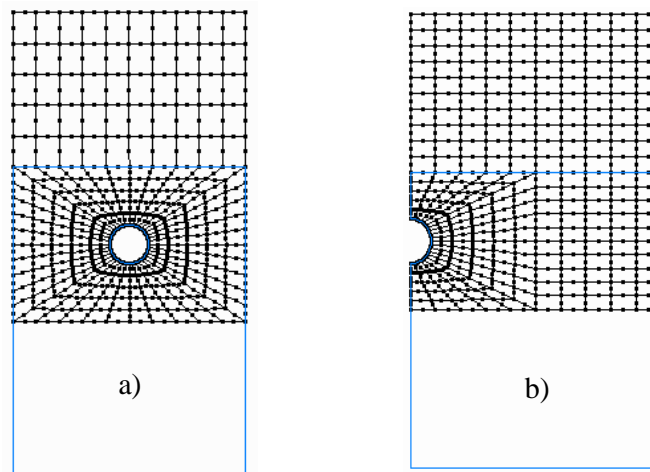


Figure III.10. Modèles géométriques des joints à simple recouvrement en présence d'entailles

a) - Entaille circulaire centrée,

b- Entaille semi-circulaire latérale.

Dans le premier cas on traite une configuration géométrique en présence d'entaille circulaire centrée ; dans le second, les plaques comportent des entailles semi-circulaires latérales non symétriques de rayon $\rho_{ent} = 12.7mm$. Les plaques sont collées par un adhésif de module de cisaillement $G_a = 965MPa$ et d'épaisseur $e_a = 0.127mm$. Après collage nous obtenons une symétrie des deux entailles par rapport à l'axe de symétrie de la couche adhésive (figure III.10). On garde les mêmes conditions aux limites.

III.8.1. Effet d'entaille sur la variation de la contrainte de cisaillement τ_{yz}

Pour illustrer cet effet nous avons étudié plusieurs tailles de l'entaille semi-circulaire caractérisées par leur rayon $\rho_{ent} = 12.7mm$. Sur les figures III.11 et III.12 nous avons représenté la variation des contraintes de cisaillement τ_{yz} le long d'une ligne verticale traversant la couche adhésive pour l'entaille semi-circulaire et qui est centrée respectivement. Nous remarquons que l'effet de la taille de l'entaille sur ces contraintes dans l'adhésif est très significatif. L'augmentation de cette taille influe sur la variation de la contrainte maximale au niveau des extrémités des substrats. Cette variation peut atteindre le centre de la distance de recouvrement, et cela dépend du rayon de l'entaille. Ce comportement s'explique par le fait que pour des rayons élevés, l'entaille est très proche de l'arête libre de la couche adhésive (les contraintes sont élevées). Cette interaction augmente les déplacements dans les substrats ce qui accroît les contraintes maximales dans la couche adhésive.

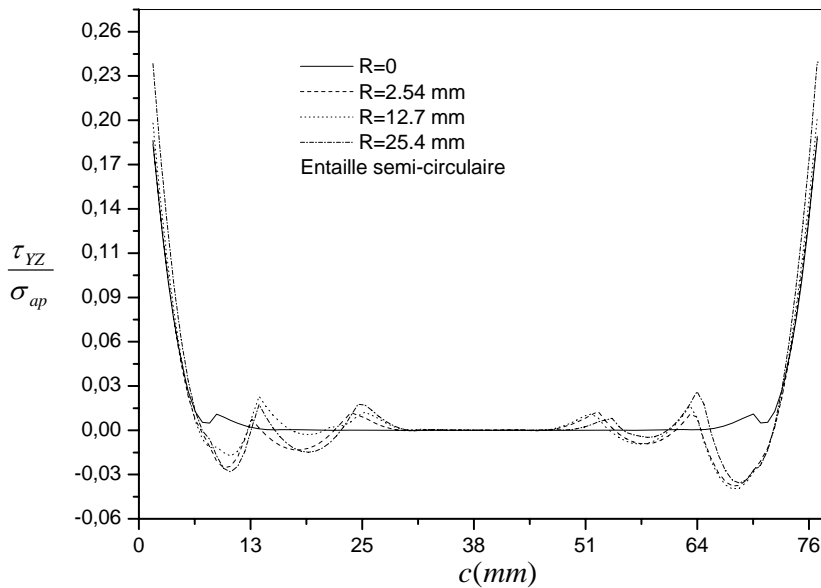


Figure III.11. Effet d'entaille sur la répartition des contraintes de cisaillements dans l'adhésif.

Nous pouvons donc conclure qu'il existe un effet d'interaction entre la présence de l'entaille et l'arête libre de la couche adhésive. Cet effet d'interaction est plus sensible lorsque le rayon de l'entaille tend à s'approcher de l'arête libre de la couche adhésive. Un comportement similaire est remarqué pour le cas de l'entaille circulaire centrée, sauf que les contraintes de cisaillement maximales sont minorées de 18% par rapport à celles de l'entaille semi-circulaire latérale.

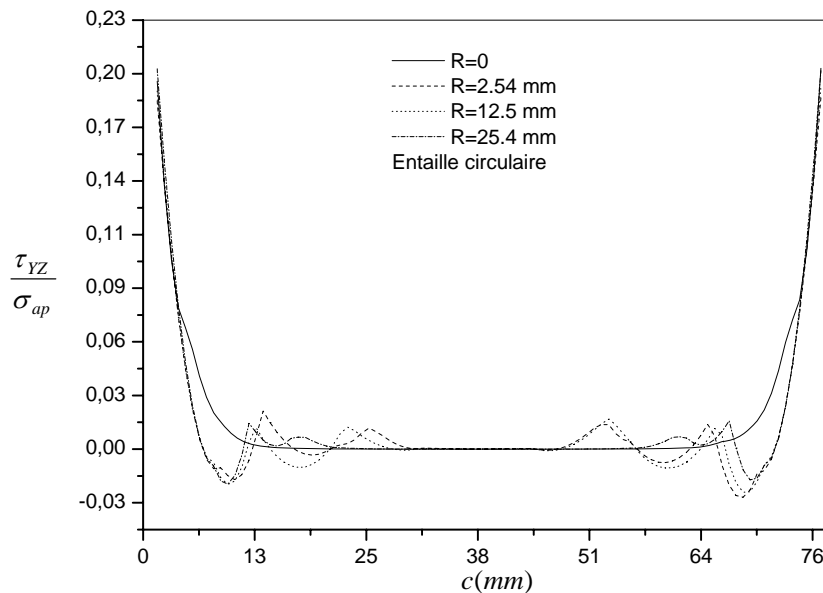


Figure III.12. Effet d'entaille circulaire sur la répartition des contraintes de cisaillement dans l'adhésif.

III.8.2. Effet de fissure émanant d'entaille sur la variation de la contrainte de cisaillement maximale

On traite l'influence de la longueur de la fissure émanant des deux types d'entailles de rayon $\rho_{ent} = 12.7\text{mm}$ sur la variation de la contrainte maximale de cisaillement τ_{yz} par la méthode des éléments finis. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure III.13 dans le cas de la traction.

On remarque que l'augmentation de la contrainte de cisaillement est beaucoup plus parquée lorsque la longueur de la fissure émanant d'entaille est inférieure à 10mm ($a \leq 10\text{mm}$). Au dessus de cette valeur la variation est peu sensible, c'est-à-dire que la contrainte reste presque constante. On constate aussi que le rayon du champ de contrainte produit par les entailles est de l'ordre de grandeur de leurs rayons.

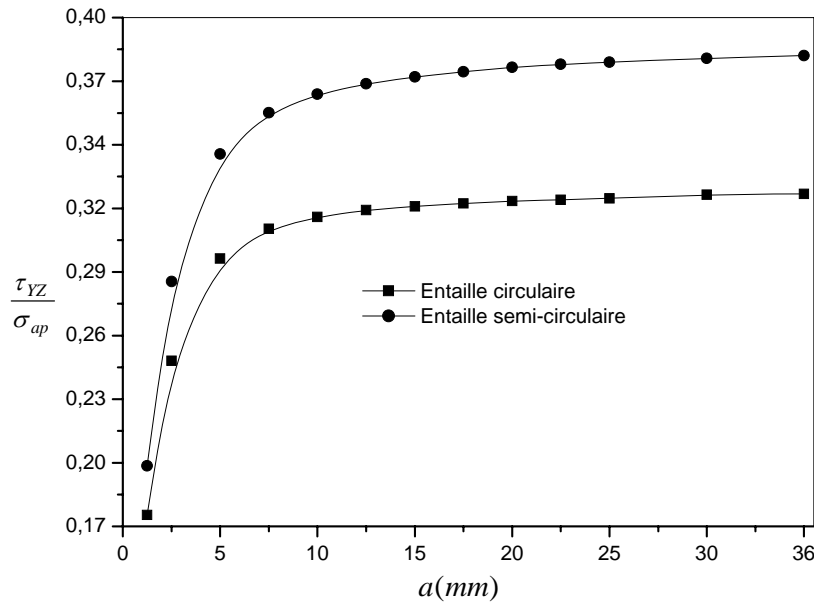


Figure III.13. Influence de la longueur de la fissure émanant d'entailles sur la répartition de la contrainte maximale de cisaillement.

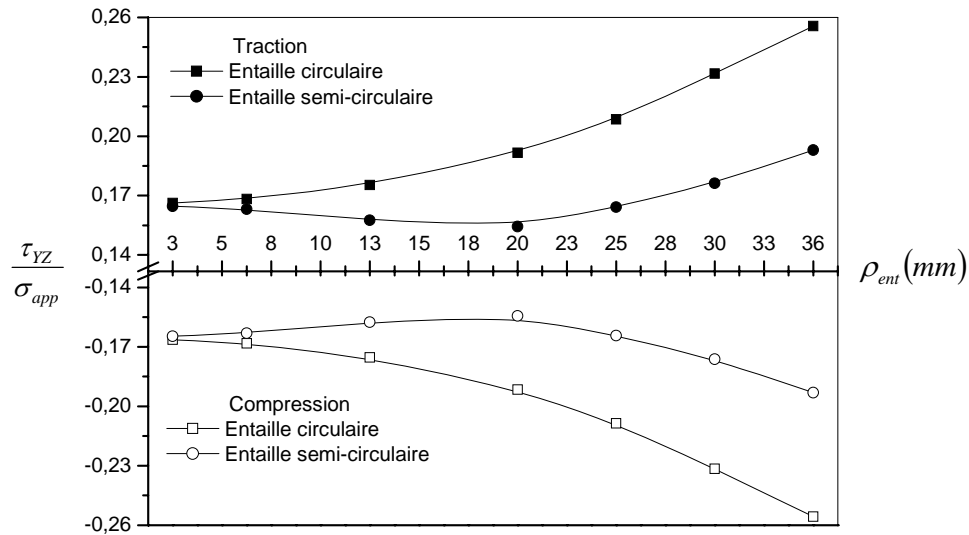


Figure III.14. Variation de la contrainte de cisaillement maximale dans la colle en fonction des rayons d'entailles.

Les contraintes de cisaillement maximales produites par l'entaille semi-circulaire latérale sont plus importantes que celles produites au niveau des entailles centrées. De plus, elles sont de plus en plus importantes avec l'accroissement des rayons des défauts géométriques (figure III.14). On remarque aussi un comportement symétrique dans le cas de la compression, sauf que les valeurs de la contrainte sont négatives.

III.8.3. Facteur de concentration de contraintes

Lorsque le matériau contient un défaut de géométrie macroscopique, la résistance à la traction diminue considérablement. Les défauts constituent des zones privilégiées où la valeur de la contrainte locale peut atteindre celle de la résistance à la traction. Autrement dit ces contraintes ont généralement une valeur plus élevée que la contrainte appliquée. Bien que la contrainte appliquée soit très faible par rapport à la limite d'écoulement à la traction du matériau, elle peut toutefois atteindre localement des valeurs beaucoup plus élevées que cette dernière, en raison de la concentration de contraintes dues à la présence de défaut superficiel (entaille).

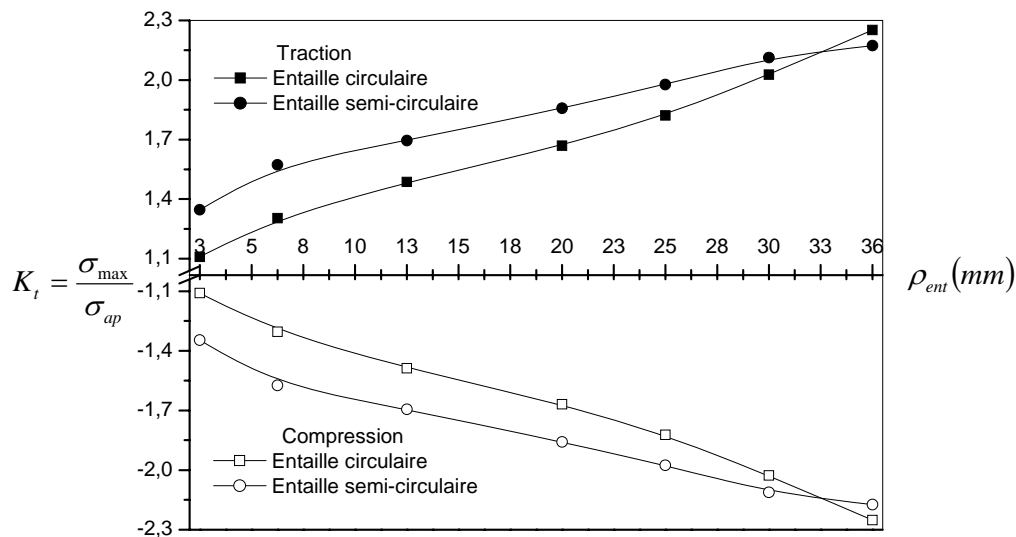


Figure III.15. Variation du facteur de concentration de contraintes en fonction des rayons d'entailles.

Lorsqu'un matériau est soumis généralement à une contrainte extérieure dont la valeur est nettement inférieure à celle de la résistance à la traction, cette contrainte peut, en certaines zones, atteindre une valeur égale à la résistance à la traction. Dans ces zones, il y aurait rupture des liaisons inter-atomiques, rupture qui se propagerait de proche en proche dans le matériau (les liaisons atomiques se rompent en cascade). Les zones où les contraintes locales peuvent atteindre et dépassent des valeurs critiques, pouvant conduire à l'amorçage et à la propagation de la fissure, et par voie de conséquence à l'endommagement du matériau. On peut citer certains chercheurs [66-73] qui se sont penchés notamment sur l'étude de l'effet d'entaille sur le comportement des matériaux.

La contrainte maximale est localisée en fond d'entaille ce qui permet de caractériser l'entaille par un facteur de concentration de contraintes défini comme étant le rapport entre la contrainte maximale et la contrainte appliquée; ce facteur ne dépend généralement que de la géométrie de l'entaille. Pour une entaille circulaire ou semi-circulaire, le facteur de concentration de contraintes ne dépend que du rayon.

La figure III.15 représente la comparaison du facteur de concentration de contraintes K_t en fonction du rayon $\rho_{ent}(mm)$ des entailles circulaires et semi-circulaires latérales. Les plaques sont collées par un adhésif de module de cisaillement $G_a = 965MPa$ et d'épaisseur $e_a = 0.127mm$.

On remarque une symétrie des facteurs K_t que ce soit pour un chargement en traction ou en compression. Lorsque le rayon de l'entaille circulaire varie entre 2.5 et 13mm la variation du facteur de concentration de contraintes est comprise entre 2.86 et 3.016; cette variation n'est pas très significative [74]. Par contre l'influence du rayon d'entaille semi-circulaire est plus importante du fait que le facteur de concentration de contraintes varie entre 3.068 et 3.3, lorsque le rayon de l'entaille varie entre 2,54 et 12,7mm [74].

La figure III.15 montre clairement la réduction du facteur de concentration de contraintes en présence du joint de la colle à simple recouvrement. Il est important de signaler que le facteur de concentration de contraintes pour les entailles semi-circulaires latérales est supérieur à celui des trous centraux. Les entailles semi-circulaires sont plus dangereuses et constituent plus de risques d'amorçage de fissures. On remarque bien que pour la même géométrie des éprouvettes et les mêmes valeurs des rayons d'entailles, les facteurs de concentration de contraintes pour les entailles centrées sont inférieurs à ceux des entailles latérales, ce qui signifie que les deuxièmes structures entaillées seront pré-fissurées plus facilement que les premières; ceci nous conduit à conclure qu'une fissure émanant d'une entaille semi-circulaire latérale se propage plus rapidement qu'une fissure émanant d'une entaille centrale.

III.8.4. Facteur d'intensité de contraintes

Le facteur d'intensité de contraintes caractérise les champs de contraintes et de déplacements en tête de fissure; il est connu par son influence directe sur la vitesse de propagation de la fissure que ce soit en chargement monotone ou cyclique.

Pour comparer le comportement des fissures dues à des entailles circulaire et semi-circulaire, on trace sur la figure III.16, la variation du facteur d'intensité de contraintes normalisé en fonction de la longueur de la propagation de la fissure pour les deux types d'entailles. La variation du facteur d'intensité de contraintes émanant des fonds d'entailles avec et sans présence du joint à simple recouvrement est mise en évidence. Dans le cas du joint à simple recouvrement on suppose que la fissure existe dans un seul substrat. Le maillage au niveau des entailles et autour de la fissure est bien affiné. Les résultats obtenus sont reportés dans la figure III.16.

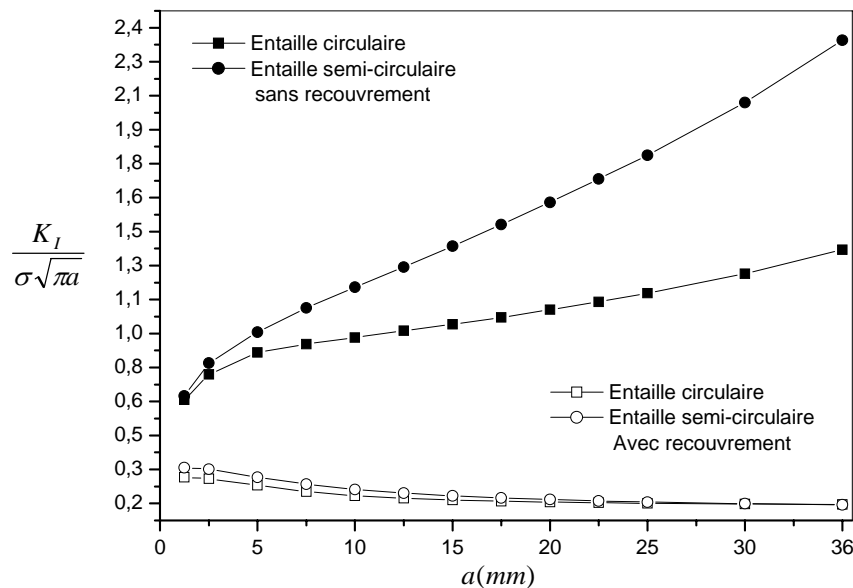


Figure III.16. Variation du facteur d'intensité de contraintes en fonction de l'avance de la fissure émanant des différents types d'entailles.

On note que le facteur d'intensité de contraintes augmente avec la longueur de la fissure. Pour de faibles longueurs de fissures, les facteurs d'intensité de contraintes issus de l'entaille circulaire et de l'entaille semi-circulaire latérale sont sensiblement les mêmes, que ce soit avec ou sans présence du joint à simple recouvrement, ce qui montre que le comportement des fissures courtes ne dépend pas beaucoup du type de l'entaille; par contre, lorsque la longueur de la fissure augmente, le facteur d'intensité de contraintes pour la fissure émanant d'entaille semi-circulaire latérale sans l'influence du joint de la colle est beaucoup plus important par

rapport à celui d'une entaille circulaire centrale ; leurs différences augmentent au fur et à mesure qu'on s'éloigne du fond des entailles. On constate qu'une fissure émanant d'une entaille semi-circulaire latérale se propage plus rapidement qu'une fissure émanant d'une entaille centrale. Dans le second cas, c'est-à-dire dans le cas de la présence du joint de la colle, le facteur d'intensité de contraintes diminue progressivement en s'éloignant des fonds d'entailles tandis que la force motrice produite des deux défauts géométriques perd toute influence.

Ouinass [74] a confronté les résultats du calcul du FIC obtenus en utilisant le code de calcul FRANC-2D/L [75] pour des fissures émanant de l'entaille centrale et de l'entaille semi-circulaire latérale avec ceux obtenus par simulation du modèle de Kujawski [70] établis pour les fissures courtes émanant des fonds d'entaille. La comparaison de ces résultats a montré une bonne coïncidence pour les fissures courtes. Dans le cas de l'entaille centrale l'écart ne dépasse pas 7 % [76] tandis que pour l'entaille semi-circulaire latérale l'écart maximal est de 10% [77].

III.9. Effet de décollement

On parle de l'effet de décollement lorsqu'il y a une région au niveau de la fissure qui n'est pas collée par suite d'un éventuel décollement [78]. Cet effet est modélisé par une distance d le long de la fissure. Comme l'entaille est caractérisée par un facteur de concentration de contraintes, on suppose que le décollement prend lieu à ce niveau. Donc on compare l'évolution du facteur d'intensité de contraintes émanant des deux types d'entailles (circulaire et semi-circulaire) en fonction de la longueur de la fissure avec et sans présence de l'effet de décollement. Les rayons des entailles circulaire et semi-circulaire sont pris de même dimension ($\rho_{ent} = 12.7mm$).

Les figures III.17 et III.18 montrent les résultats de la méthode des éléments finis. La représentation est faite pour trois distances d de décollement, $d = \rho_{ent}$, $0.5\rho_{ent}$ et $d = 0$ (sans décollement). On remarque que le comportement de la fissure est similaire pour les deux types d'entailles, sauf que le facteur d'intensité de contraintes de la fissure émanant de l'entaille semi-circulaire est plus important que celui de l'entaille centrée. L'augmentation de la distance de décollement d amplifie le facteur d'intensité de contraintes.

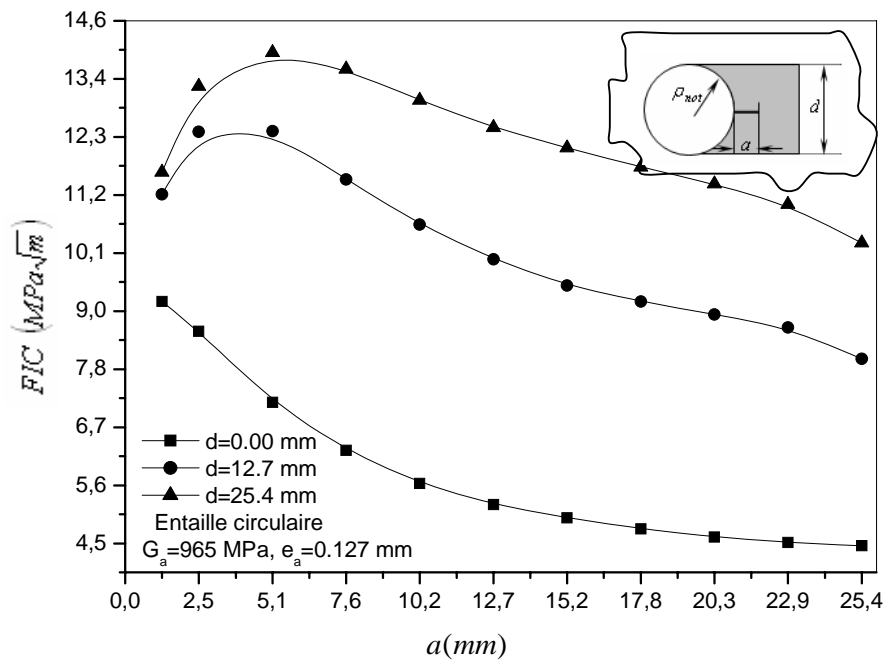


Figure III.17. Effet du disbond sur la variation du facteur d'intensité de contraintes en fonction de la longueur de la fissure émanant d'entaille circulaire centrée.

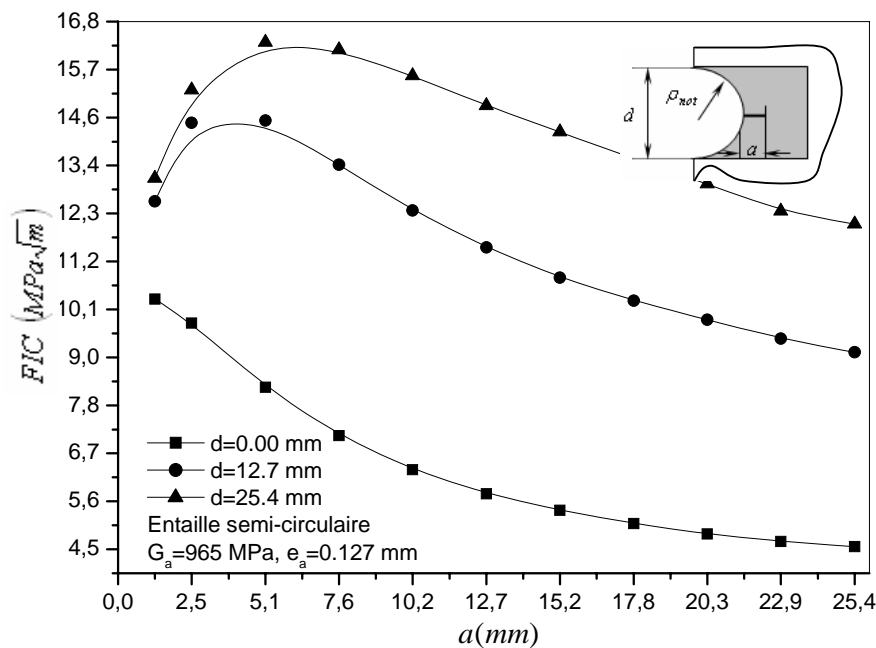


Figure III.18. Effet du disbond sur la variation du facteur d'intensité de contraintes en fonction de la longueur de la fissure émanant d'entaille semi-circulaire.

En présence de l'effet de décollement, les FIC maximales correspondent à la longueur de la fissure ($a = 5.1mm$), c'est-à-dire le deux cinquième du rayon de l'entaille. Au-delà de cette

valeur les FIC décroissent avec l'augmentation de la longueur de la fissure. Cette diminution est due en fait à l'avance de la fissure de l'emplacement décollé vers la partie collée. Donc l'avance de la fissure sera plus ou moins ralentie.

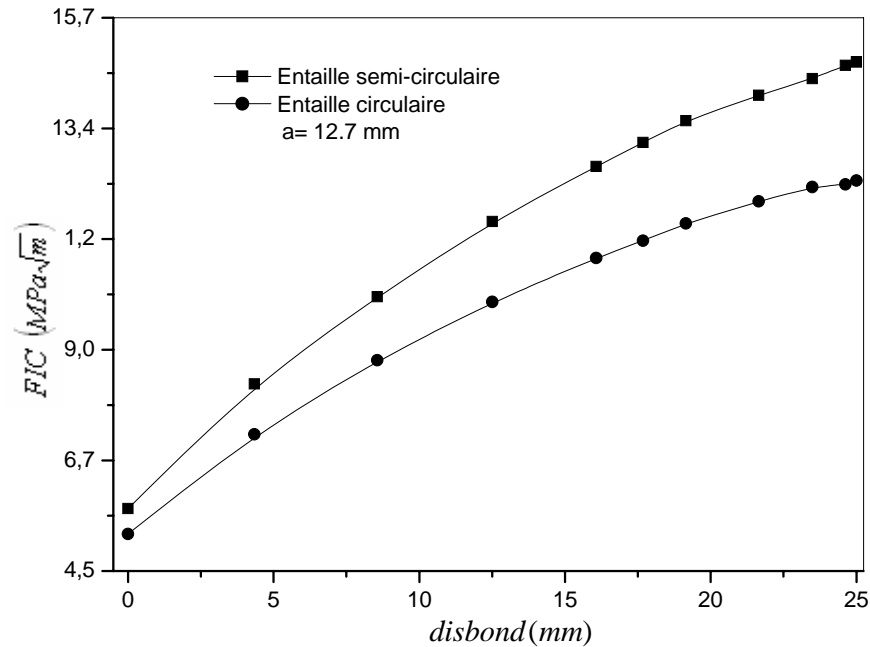


Figure III.19. Variation du facteur d'intensité de contraintes en fonction de disbond d'une fissure émanant d'entailles circulaire centrée et semi-circulaire.

Dans le cas où $d = 0$ (sans présence de l'effet de disbond) on remarque que l'allure du FIC diminue progressivement avec l'importance de la taille de la fissure.

La figure III.18 indique que la variation relative du FIC entre un décollement nul $d = 0$ et un décollement $d = 0.5\rho_{ent}$ varie dans une fourchette de 33 à 42 %. Cette variation sera majorée lorsque la longueur de la fissure $a = 2\rho_{ent}/5$ de 16%. Lorsque le décollement sera égal au rayon de l'entaille, les variations du FIC seront majorées de 18%.

La figure III.19 montre l'influence du décollement sur le facteur d'intensité de contraintes d'une fissure stationnaire émanant des entailles circulaire et semi-circulaire de rayon $\rho_{ent} = 12.7 \text{ mm}$. La longueur de la fissure est du même ordre du rayon d'entaille. La figure indique que l'augmentation du décollement d affect la variation du facteur d'intensité de

contraintes. En effet, le facteur d'intensité de contraintes augmente indéfiniment avec l'augmentation du disbond. En outre le facteur K_I n'a pas de valeur asymptotique.

Sur la figure III.20, on montre la variation du carré du facteur d'intensité de contraintes en fonction du disbond. Le décollement varie linéairement avec le K_I^2 , par contre la variation du facteur K_I avec le décollement est une relation polynomiale d'ordre deux (2).

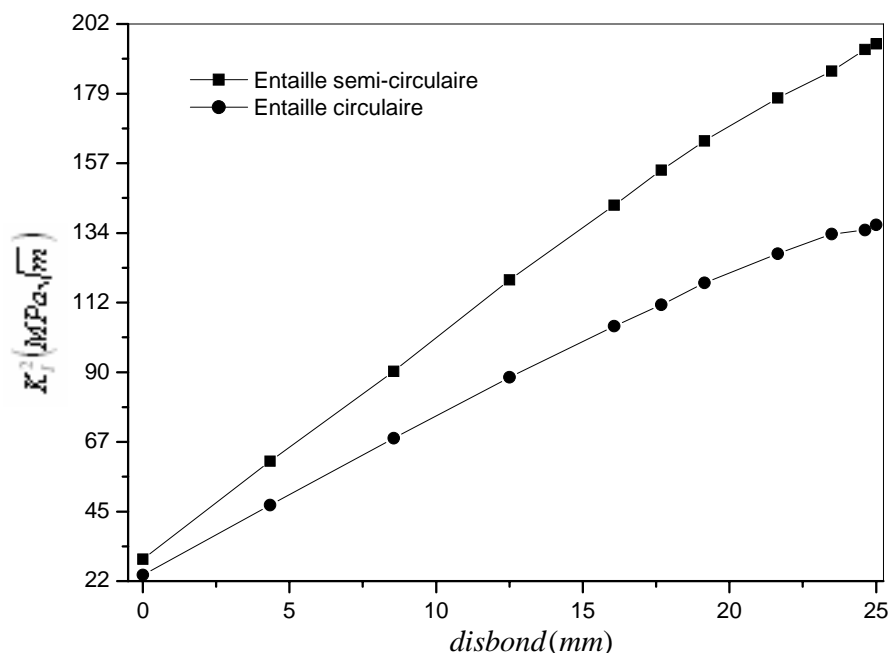


Figure III.20. Variation du carré du facteur d'intensité de contraintes en fonction de disbond d'une fissure émanant d'entailles circulaire centrée et semi-circulaire.

III.10. Conclusions

Les résultats obtenus dans ce chapitre nous permettent d'annoncer les conclusions suivantes :

- * Les contraintes longitudinales sont maximales à la surface des substrats aux extrémités du recouvrement, ceci en raison de la flexion des supports. Les contraintes de cisaillement sont maximales dans la couche adhésive à l'extrémité du recouvrement.

- * L'augmentation de la longueur de recouvrement mène à une diminution des maxima de contraintes longitudinales des substrats et de cisaillement de l'adhésif. De plus, la rigidité de l'assemblage augmente avec la longueur de recouvrement.

- * Lorsque la rigidité des substrats augmente, les contraintes d'arrachement à l'interface adhésif/substrat sont minimisées au profit du cisaillement τ_{yz} .
- * L'assemblage à simple recouvrement présente une symétrie dans la répartition des contraintes de cisaillement contrairement à l'assemblage à double joint. Ce dernier présente un équilibre des contraintes entre les joints de l'adhésif.
- * L'augmentation de l'épaisseur adhésive réduit les contraintes de cisaillement, mais le choix de cette épaisseur doit être optimisé afin d'éviter l'émergence d'un troisième matériau de faible propriétés mécaniques.
- * L'augmentation du module de cisaillement de l'adhésif diminue la résistance de l'adhésion.
- * Les assemblages à simple recouvrement présentent une symétrie dans la répartition des contraintes de cisaillement par rapport au centre du joint, contrairement aux assemblages à double recouvrement.
- * L'effet de la taille de l'entaille sur les contraintes dans l'adhésif au niveau des extrémités des substrats est très significatif. Elles sont plus importantes en présence de l'entaille semi-circulaire latérale que des entailles centrées.
- * L'augmentation de la contrainte de cisaillement est beaucoup plus marquée lorsque la longueur de la fissure émanant d'entaille est inférieure à 10mm ($a \leq 10mm$). Au dessus de cette valeur la variation est peu sensible.
- * Les résultats montrent que le facteur d'intensité de contraintes est affecté par l'effet négatif du disbond. L'augmentation de celui-ci est proportionnelle à l'augmentation du FIC.
- * La variation du K_I^2 avec le décollement a un comportement linéaire. Une relation polynomiale regroupe le décollement avec le facteur K_I .