

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

LA REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Saad Dahlab Blida 1

Institut d'Aéronautique et des Études Spatiales

Département Construction Aéronautique

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de

Master en Aéronautique

Option : Structures Aéronautiques

THEME

Modélisation de la fissuration transverse, longitudinale et délaminage dans un matériau composite sous l'effet des conditions hygrothermiques.

Proposé et dirigé par :

Promoteur M. KHODJET-KESBA

Réalisé par :

BENMAMAR SEIF EL MOULOUC

SADOUDI SARAH

Soutenue devant le jure composé de :

A. MAHI

MCA

Présidente

A. ABADA

MCB

Examineur

B. BOUKERT

MCB

Co-promoteur

Promotion : 2022 / 2023

RESUME

L'objectif principal de cette recherche concerne l'amélioration de notre compréhension du comportement spécifique d'un stratifié à matrice organique à fibres longues $[0/90_n]_s$ soumis à une tension bi axiale et est susceptible de se fissurer par des fissures transversales, longitudinales et délaminages. Cet objectif est atteint en développant un modèle analytique et numérique précis qui décrit le comportement du matériau dans des conditions variables de température, d'humidité et de charge mécanique. Le premier aspect de cette étude a porté sur la question de la fissuration transversale et du délaminage. Deux approches distinctes sont adoptées : un modèle analytique basé sur la méthode de diffusion du cisaillement et une simulation numérique utilisant le code ABAQUS, employant la méthode des éléments finis. Le deuxième volet de la recherche s'est concentré sur l'influence combinée du vieillissement hygrothermique et des dommages causés par les fissurations inter et intralaminaires sur la distribution des contraintes dans les matériaux composites. Pour ce faire, des techniques de modélisation analytique et de simulations numériques ont été effectuées. Les résultats de cette étude contribueront au développement de modèles prédictifs permettant d'évaluer et d'optimiser les performances de ces stratifiés dans diverses applications.

SUMMARY

The main objective of this research is to improve our understanding of the specific behavior of a long-fiber organic matrix laminate $[0/90_n]_s$ subjected to biaxial tension and prone to transverse, longitudinal cracking, and delamination. This objective is achieved by developing an accurate analytical and numerical model that describes the material's behavior under varying conditions of temperature, humidity, and mechanical load. The first aspect of this study focused on the issue of transverse cracking and delamination. Two distinct approaches were adopted: an analytical model using the Shear Lag method and a numerical simulation using the ABAQUS code, employing the finite element method. The second part of the research concentrated on the combined influence of hygrothermal aging and the damage caused by inter and intralaminar on the stresses distribution of composite materials. To achieve

this, analytical modeling techniques and numerical simulations were performed. The results of this study will contribute to the development of predictive models that can evaluate and optimize the performance of these laminates in various applications.

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا البحث هو تحسين فهمنا للسلوك المحدد للصفائح ذات المصفوفة العضوية و الألياف الطويلة $[0/90_n]_s$ المعرضة للتوتر ثنائي المحور وتكون عرضة للتصدع من خلال الشقوق العرضية، الطولية والتفكيك بين طبقات الصفائح. يتم تحقيق ذلك من خلال تطوير نموذج تحليلي ورقمي دقيق يصف سلوك المادة في ظل ظروف مختلفة من درجة الحرارة والرطوبة والحمل الميكانيكي. تناول الجانب الأول من هذه الدراسة مسألة التصدع العرضي والتفكيك بين طبقات الصفائح. تم اعتماد نهجين متميزين: نموذج تحليلي باستخدام طريقة انتشار القص والمحاكاة الرقمية تحت برنامج أباكيس، بالإعتماد على طريقة العناصر المحدودة. ركز الجزء الثاني من البحث على تأثير الشروط الحرارية والضرر الناجم عن التشققات داخل وبين الصفائح على كيفية توزيع التوترات داخل المواد المركبة. للقيام بذلك، تم إجراء تقنيات النمذجة التحليلية والمحاكاة العددية. ستساهم نتائج هذه الدراسة في تطوير نماذج تنبؤية لتقييم أداء هذه الصفائح وتحسين سلوكها في مختلف التطبيقات.

Remerciements

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu être réalisé sans l'aide et l'encadrement de Monsieur Khojet-Kesba Mohamed qu'on remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant la préparation de ce mémoire. Notre remerciement s'adresse aussi à Monsieur Boukert Billel pour son Co-encadrement, son aide pratique et ses encouragements.

Nous tenons à exprimer notre gratitude aux membres de jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Notre remerciement s'adresse également à tous nos professeurs pour leurs générosités et la grande patience, également toute l'équipe pédagogique du département d'aéronautique et les intervenants professionnels responsables de notre formation pendant ces cinq dernières années, ils ont travaillé pour rendre ce parcours le plus agréable possible.

Enfin, une grande reconnaissance à tous ceux qui ont contribué à l'avancement de ce travail.

Dédicace 1

Je dédie ce fruit de nombreuses années de travail à ma chère mère, ma lionne, qui m'a toujours encouragée, soutenue et poussée à donner le meilleur de moi-même, qui n'a jamais cessé de prier pour moi et qui a toujours donné et sacrifié beaucoup pour moi. Que Dieu te préserve et t'accorde santé, longue vie et bonheur. Tu as été et tu seras toujours ma source d'inspiration, de joie et d'affection.

A mon cher père rien ne peut exprimer l'amour, l'estime, et le respect que j'ai pour vous, rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être.

A ma sœur qui était toujours là pour me reconforter et m'encourager dans les moments de doute, à qui je souhaite un avenir radieux plein de réussite.

A mon cher grand père, paix à son âme, et à ma chère grand-mère, une longue vie inchallah merci d'avoir été toujours là à mes côtés. A mes chères tantes maternelles qui m'ont soutenu tout au long de ce cursus et qui ont cru en moi.

A Mr. Allouche, qui n'a jamais cessé de croire en mon potentiel, m'a encouragé durant ces cinq ans et qui a beaucoup influé sur mon parcours.

A mes chères copines et à tous mes camarades de la promotion de Master sans oublier mon binôme.

A toutes les personnes qui m'ont aidée et soutenue de près ou de loin. Merci d'être toujours là pour moi.

SADOUDI SARAH

Dédicace 2

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur douceur, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chers frères, pour leur appui et leur encouragement,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire. Sans oublier mon binôme Sarah.

Tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien immanquable,

Merci d'être toujours là pour moi.

BENMAMAR SEIF EL MOULOUK

Table des matières

| | |
|---|----|
| INTRODUCTION | 17 |
| 1 CHAPITRE 01 : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE | 19 |
| 1.1 Introduction | 19 |
| 1.2 Architecture des matériaux composites | 20 |
| 1.2.1 Structure générale d'un stratifié | 21 |
| 1.2.2 Stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels | 22 |
| 1.3 Dégradation des matériaux composites | 23 |
| 1.4 Les échelles d'observation de l'endommagement | 24 |
| 1.5 Les mécanismes d'endommagement | 25 |
| 1.5.1 Fissuration de la Matrice | 26 |
| 1.5.2 La rupture des fibres | 27 |
| 1.5.3 Décohésion Fibre-Matrice | 27 |
| 1.5.4 Délaminage..... | 28 |
| 1.6 Fissuration des composites stratifiés | 29 |
| 1.7 La propagation des fissures | 29 |
| 1.8 Densité de la fissuration | 31 |
| 1.9 Types de vieillissement | 32 |
| 1.9.1 Vieillissement physique..... | 32 |
| 1.9.2 Vieillissement chimique | 34 |
| 1.10 Problématique..... | 35 |
| 1.11 Travaux effectués | 36 |

| | |
|-------------------------------|----|
| 1.12 Définition du sujet..... | 38 |
|-------------------------------|----|

2 CHAPITRE 02 : MODELISATION DE LA FISSURATION TRANSVERSALE, LONGITUDINALE ET DU DELAMINAGE.....

39

| | |
|-----------------------|----|
| 2.1 Introduction..... | 39 |
|-----------------------|----|

| | |
|--|----|
| 2.2 Modélisation analytique d'un stratifié endommagé par fissuration transverse et délaminage..... | 39 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| 2.2.1 Distribution des contraintes dans la partie délaminée..... | 41 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| 2.1.1.1 Champ de déplacement et distribution des contraintes dans la partie sans délamination..... | 43 |
|--|----|

| | |
|-------------------------------------|----|
| 2.1.1.1.1 Champ de déplacement..... | 43 |
|-------------------------------------|----|

| | |
|--|----|
| 2.1.1.1.2 Contraintes de cisaillement..... | 44 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| 2.1.1.1.3 Champs de contraintes et de déplacements..... | 45 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| 2.3 Modélisation par éléments finis..... | 48 |
|--|----|

| | |
|-----------------------------------|----|
| 2.3.1 Conditions aux limites..... | 49 |
|-----------------------------------|----|

| | |
|---------------------|----|
| 2.3.2 Maillage..... | 50 |
|---------------------|----|

| | |
|---------------------|----|
| 2.4 Conclusion..... | 53 |
|---------------------|----|

3 CHAPITRE 03 : SIMULATION ET VISUALISATION DES RESULTATS DES STRATIFIES FISSURES [0/90_n]_s SOUS SOLLICITATIONS MECANIQUES.....

54

| | |
|-----------------------|----|
| 3.1 Introduction..... | 54 |
|-----------------------|----|

| | |
|-------------------------------|----|
| 3.2 Simulation numérique..... | 54 |
|-------------------------------|----|

| | |
|---|----|
| 3.2.1 Choix du matériau pour la simulation..... | 55 |
|---|----|

| | |
|-------------------------------------|----|
| 3.2.2 Propriétés de la rupture..... | 55 |
|-------------------------------------|----|

| | |
|--|----|
| 3.2.3 Choix de la géométrie de fissuration et du délaminage..... | 56 |
|--|----|

| | |
|-------------------------------|----|
| 3.3 Résultats numériques..... | 57 |
|-------------------------------|----|

| | |
|--|-----------|
| 3.3.1 Validation du model numérique | 57 |
| 3.3.2 Variation de la contrainte longitudinale | 58 |
| 3.3.3 Variation de la contrainte de cisaillement | 59 |
| 3.3.4 Validation de la contrainte longitudinale par le modèle MEF | 60 |
| 3.3.5 Validation de la contrainte de cisaillement par le modèle MEF | 61 |
| 3.4 Modélisation de la fissuration longitudinale | 64 |
| 3.4.1 Modélisation | 64 |
| 3.4.2 Choix de la géométrie de fissuration | 64 |
| 3.4.3 Choix du matériau | 64 |
| 3.4.4 Impact de la présence de la fissure longitudinale sur le comportement du stratifié [0/90 ₃] _s | 65 |
| 3.4.5 Influence des différents rapports d'épaisseur « α » et différents rapports géométriques «a» sur le comportement d'un stratifié [0/90 ₃] _s fissuré avec fissures intralaminaires et délaminage | 69 |
| 3.4.6 Influence de la longueur de la fissure longitudinale sur le comportement du stratifié [0/90 ₃] _s | 73 |
| 3.5 Conclusion | 77 |
| 4 CHAPITRE 04 : SIMULATION ET RESULTATS NUMERIQUES DES STRATIFIES FISSURES ET DELAMINES SOUMIS A UN CHARGEMENT MECANIQUE SOUS L'EFFET DES CONDITIONS HYGROTHERMIQUES..... | 78 |
| 4.1 Introduction | 78 |
| 4.2 Caractérisation du matériau | 78 |
| 4.2.1 Le module de Young dans la direction des fibres | 79 |
| 4.2.2 Le module de Young transversal | 79 |

| | |
|--|----|
| 4.2.3 Le module de cisaillement longitudinal | 79 |
| 4.2.4 Le coefficient de Poisson | 80 |
| 4.2.5 Introduction du vieillissement sur les propriétés mécaniques du matériau et le modèle de Tsai : | 80 |
| 4.2.6 Evolution de Tg au cours du vieillissement | 80 |
| 4.2.7 Température adimensionnelle | 80 |
| 4.2.8 Prise en compte du vieillissement dans les propriétés de la matrice | 81 |
| 4.2.9 Prise en compte du vieillissement dans les propriétés des fibres | 81 |
| 4.3 Choix du matériau | 82 |
| 4.3.1 Propriétés du matériau T300/5208 | 83 |
| 4.4 Conditions de simulation | 84 |
| 4.4.1 Effets de la température | 84 |
| 4.4.2 Effets de l'humidité relative | 84 |
| 4.4.3 Effets des conditions hygrothermiques | 85 |
| 4.5 Simulation numérique | 85 |
| 4.5.1 Conditions aux limites | 85 |
| 4.5.2 Modèle aux éléments finis | 86 |
| 4.6 Effet de la température sur le comportement d'un stratifié $[0/90_3]_s$ endommagé sous sollicitations mécaniques | 87 |
| 4.6.1 Contrainte longitudinale | 87 |
| 4.6.2 Contrainte de cisaillement | 91 |
| 4.6.3 Interprétations des résultats | 95 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.7 | Effet de l'humidité relative sur le comportement d'un stratifié $[0/90_3]_s$ endommagé sous sollicitation mécanique | 96 |
| 4.7.1 | Contrainte longitudinale | 96 |
| 4.7.2 | Contrainte de cisaillement | 100 |
| 4.7.3 | Interprétations des résultats | 104 |
| 4.8 | Impact des conditions hygrothermiques sur la variation de la contrainte longitudinale d'un stratifié $[0/90_3]_s$, endommagé sous sollicitations mécaniques | 105 |
| 4.8.1 | Interprétations des résultats | 107 |
| 4.9 | Impact des conditions hygrothermiques sur la variation de la contrainte de cisaillement d'un stratifié $[0/90_3]_s$, endommagé sous sollicitations mécaniques | 108 |
| 4.9.1 | Interprétations des résultats | 109 |
| 4.10 | Conclusion | 110 |
| 5 | CONCLUSION GENERALE | 111 |
| 6 | LISTE DES SYMBOLES | 114 |
| 7 | BIBLIOGRAPHIE | 116 |

Table des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1-1 : Les constituants d'un matériau composite [3]. | 21 |
| Figure 1-2 : Constitution d'un stratifié [3]. | 21 |
| Figure 1-3 : Poutre sollicitée en flexion [3]. | 22 |
| Figure 1-4 : Désignation d'un stratifié [3]. | 23 |
| Figure 1-5 : Les différentes échelles d'observation de l'endommagement : illustration sur un matériau stratifié [11]. | 25 |
| Figure 1-6 : Les principaux endommagements rencontrés dans un stratifié [13]. | 26 |
| Figure 1-7 : Rupture transverse de la matrice [3]. | 26 |
| Figure 1-8 : Rupture longitudinale de la matrice [3]. | 26 |
| Figure 1-9 : Rupture de Fibre [3]. | 27 |
| Figure 1-10 : Décohésion Fibre-Matrice [3]. | 28 |
| Figure 1-11 : Mécanisme de délaminage [13]. | 28 |
| Figure 1-12 : Fissuration des composites stratifiés [13]. | 29 |
| Figure 1-13 : Propagation de la rupture dans le cas d'une faible adhérence fibre-matrice [3]. | 30 |
| Figure 1-14 : Surfaces de rupture dans le cas d'une faible adhérence fibre-matrice [3]. | 31 |
| Figure 1-15 : Evolution de la densité de fissures en fonction de la contrainte de traction au niveau du pli à 90° d'un stratifié carbone /époxy $[0/90_n]_s$ [17]. | 32 |
| Figure 1-16 : Pénétration d'un solvant dans un polymère [24]. | 34 |
| Figure 1-17 : Equation générale de l'hydrolyse [25]. | 35 |
| Figure 2-1 : Stratifié croisé endommagé par fissuration transverse et délaminage [16]. | 40 |
| Figure 2-2 : Modélisation des plis du stratifié de type $[0/90_2]_s$ sur ABAQUS. | 50 |

| | |
|---|----|
| Figure 2-3 : Modélisation des contraintes appliquées au stratifié de type $[0/90_2]_s$ | 51 |
| Figure 2-4 : Maillage quadratique d'un quart du stratifié de type $[0/90_2]_s$ fissuré par fissure transverse et délaminage. | 51 |
| Figure 2-5 : Modélisation des plis du stratifié de type $[0/90_3]_s$ sur ABAQUS. | 52 |
| Figure 2-6 : Modélisation des contraintes appliquées au stratifié de type $[0/90_3]_s$ | 52 |
| Figure 2-7 : Maillage quadratique d'un quart du stratifié type $[0/90_3]_s$ fissuré par fissure transverse, délaminage et fissure longitudinale. | 53 |
| | |
| Figure 3-1 : Variation de la contrainte longitudinale pour un stratifié $[0/90_2]_s$, pour $\alpha=1/2$ et $a=5$ avec différents types de fissures. | 56 |
| Figure 3-2 : Variation de la contrainte longitudinale pour un stratifié $[0/90_2]_s$ pour $\alpha=1/2$ et $a=6$ avec différentes formes de la fissure transverse. | 57 |
| Figure 3-3 : Variation de la contrainte longitudinale dans un composite stratifié $[0/90_2]_s$, endommagé par fissuration transverse et délaminage. | 58 |
| Figure 3-4 : Variation de la contrainte de cisaillement dans un composite stratifié $[0/90_2]_s$ endommagé par fissuration transverse et délaminage | 59 |
| Figure 3-5 : Validation de la contrainte longitudinale d'un stratifié $[0/90_2]_s$ fissuré par fissuration transverse et délaminage avec le model analytique. | 61 |
| Figure 3-6 : Validation de la variation de la contrainte de cisaillement d'un stratifié $[0/90_2]_s$ fissuré par fissuration transverse et délaminage avec le model analytique. | 63 |
| Figure 3-7 : Variation de la contrainte longitudinale dans un stratifié $[0/90_3]_s$ endommagé par fissuration transverse et délaminage et un stratifié endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différents rapports géométriques. | 66 |
| Figure 3-8 : Variation de la contrainte de cisaillement dans un stratifié $[0/90_3]_s$ endommagé par fissuration transverse et délaminage et un stratifié endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différents rapports géométriques. | 68 |

| | |
|---|----|
| Figure 3-9 : Variation de la contrainte longitudinale dans un stratifié $[0/90_n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « α » | 70 |
| Figure 3-10 : Variation de la contrainte de cisaillement dans un stratifié $[0/90_n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « α » | 72 |
| Figure 3-11 : Variation de la contrainte longitudinale dans un stratifié $[0/90_3]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes longueurs de fissure longitudinale. | 74 |
| Figure 3-12 : Variation de la contrainte de cisaillement dans un stratifié $[0/90_3]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes longueurs de la fissure longitudinale. | 76 |
| Figure 4-1 : Organigramme du calcul des propriétés vieilles. | 82 |
| Figure 4-2: Modélisation des plis du stratifié de type $[0/90_3]_s$ sur ABAQUS. | 86 |
| Figure 4-3 : Modélisation des contraintes appliquées au stratifié de type $[0/90_3]_s$ | 86 |
| Figure 4-4 : Maillage quadratique d'un quart de stratifié $[0/90_3]_s$ fissuré avec fissure transverse, longitudinale et délaminage pour « $a=2.5$ ». | 87 |
| Figure 4-5 : Variation de la contrainte longitudinale pour différents rapports géométriques «a», humidité relative «HR » et « $\alpha=1/3$ » | 89 |
| Figure 4-6 : Variation de la contrainte longitudinale pour différents rapports géométriques «a», humidité relative «HR » et « $\alpha=1$ ». | 91 |
| Figure 4-7 : Variation de la contrainte de cisaillement pour différents rapports géométriques «a», humidité relative «HR » et « $\alpha=1/3$ ». | 93 |
| Figure 4-8 : Variation de la contrainte de cisaillement pour différents rapports géométriques «a», humidité relative «HR » et « $\alpha=1$ ». | 95 |
| Figure 4-9 : Variation de la contrainte longitudinale pour différents rapports géométriques «a», température opérationnelle « T » et « $\alpha=1/3$ ». | 98 |

| | |
|--|-----|
| Figure 4-10 : la variation de la contrainte longitudinale pour différents rapports géométriques « a », température opérationnelle « T » et « $\alpha=1$ » | 100 |
| Figure 4-11 : Variation de la contrainte de cisaillement pour différents rapports géométriques « a », température opérationnelle « T » et « $\alpha=1/3$ » | 102 |
| Figure 4-12 : Variation de la contrainte de cisaillement pour différents rapports géométriques « a », température opérationnelle « T » et « $\alpha=1$ » | 104 |
| Figure 4-13 : Variation de la contrainte longitudinale pour différents rapports géométriques «a» et différents environnements hygrothermiques | 107 |
| Figure 4-14 : Variation de la contrainte de cisaillement pour différents rapports géométriques « a » et différents environnements hygrothermiques | 109 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 3-1 : Propriétés élastiques du matériau AS4-3502 [16]. | 55 |
| Tableau 3-2 : Propriétés de la rupture [16]. | 55 |
| Tableau 3-3 : Propriétés élastiques du matériau T300-914 [32]. | 65 |
| Tableau 4-1 : Caractéristiques de fibres et matrice du T300/5208 [40]. | 83 |
| Tableau 4-2 : Caractéristiques de variation de température et d'humidité [40]. | 83 |
| Tableau 4-3 : Propriétés du T300/5208 $T_{rm}=22^{\circ}\text{C}$ et $C=0.5\%$ [40]. | 83 |
| Tableau 4-4 : Caractéristiques de diffusion du T300/5208 [40]. | 83 |
| Tableau 4-5 : propriétés élastiques du matériau T300/5208 en fonction de différentes valeurs de la température opérationnelle. | 84 |
| Tableau 4-6 : propriétés élastiques du matériau T300/5208 en fonction de différentes valeurs d'humidité relative. | 84 |
| Tableau 4-7 : propriétés élastiques du matériau T300/5208 en fonction de différentes conditions hygrothermiques. | 85 |

INTRODUCTION

Les années 30 sont reconnues comme la décennie la plus importante de l'industrie des composites, avec le développement de la majorité des résines modernes telles que les résines de polyester ou d'époxy. Simultanément, la fibre de verre fait son entrée sur le marché et initie l'industrie des polymères renforcés de fibres. Depuis cette époque, les matériaux composites sont devenus des remplaçants rentables des matériaux traditionnels comme le métal et les thermoplastiques techniques.

Les composites sont des matériaux fabriqués en combinant deux ou plusieurs composants différents pour exploiter leurs propriétés uniques et produire un matériau final avec des propriétés améliorées. Ces matériaux sont largement utilisés dans l'industrie aérospatiale en raison de leur légèreté, de leur haute résistance et de leur capacité à fournir des propriétés supérieures aux matériaux traditionnels tels que les métaux.

Le défi de prédire avec précision la durée de vie des matériaux composites est la raison principale de la mise en place progressive et prudente de ces matériaux dans l'industrie aéronautique. Le comportement à long terme de ces matériaux est particulièrement imprévisible lorsqu'ils sont exposés à des contraintes mécaniques extrêmes, à des températures élevées et à des niveaux d'humidité variables.

L'endommagement entraîne une dégradation des propriétés mécaniques d'un matériau, ce qui peut entraîner des événements catastrophiques. De nombreuses analyses ont été développées dans le domaine des matériaux composites pour tenter d'évaluer les distributions de contraintes dans le stratifié endommagé afin de prévenir de tels événements lors des phases de conception et de fonctionnement.

Dans les stratifiés composites $[0/90_n]_s$ soumis à un chargement monotone, la rupture finale du stratifié résulte du développement et de l'accumulation de plusieurs types d'endommagement. Ces derniers sont observés à l'échelle microscopique et se résument à des microfissures dans la matrice ou à l'interface des plis, à la décohésion des fibres et de la matrice, à l'arrachement et à la rupture des fibres. Ce dernier présente le mode d'endommagement le plus dangereux, il apparaît tardivement et entraîne la destruction finale du matériau.

Les travaux expérimentaux menés précédemment, montrent que le matériau composite est modifié progressivement. A un état d'endommagement donné, il peut avoir un comportement mécanique très différent de celui du matériau sain.

Parmi ces recherches, une a été introduite dans le cadre de l'étude du comportement des structures composites fissurées et soumises à des efforts de traction à travers l'étude des propriétés élastiques. Pour ce faire, deux approches ont été utilisées :

- Une approche analytique en se basant sur la méthode de diffusion de cisaillement (Shear Lag) qui s'intéresse à l'étude du champ de déplacement (parabolique ou progressif).
- Une approche numérique utilisant un modèle aux éléments finis.

Ensuite, le modèle de Tsai est utilisé pour étudier les effets de vieillissement, tels que la température et l'humidité sur le comportement du stratifié et aussi sur la variation des propriétés élastiques du matériau.

Afin d'effectuer cette étude notre travail va être divisé en quatre chapitres :

- Dans un premier temps, une recherche bibliographique a été faite sur la structure générale des composites et les différents types d'endommagements qui apparaissent sur un stratifié, ainsi que les différents types de fissures qui peuvent exister.
- Dans le deuxième chapitre, un modèle analytique est utilisé pour étudier la distribution de contraintes dans un stratifié de type $[0/90_n]_s$ endommagé par fissuration transverse et délaminage, complété par une modélisation numérique sous le code de calcul ABAQUS.
- Dans le troisième chapitre, une modélisation numérique en éléments finis sera effectuée à l'aide du logiciel ABAQUS. Par la suite, un nouveau type d'endommagement nommé fissure longitudinale sera ajouté afin d'évaluer son impact sur la distribution de contraintes.
- Au dernier chapitre, une étude sera mise en place pour voir l'impact des conditions hygrothermiques sur le comportement mécanique du stratifié $[0/90_n]_s$ fissuré avec des fissures interlaminaires et intralaminaires soumis à une traction bi axiale.

On finira par une conclusion générale avec des perspectives pour les prochains travaux.

1 Chapitre 01

RECHERCHE BIBLIOLGRAPHIQUE

1.1 Introduction :

Les matériaux composites sont essentiellement une combinaison de deux ou plusieurs matériaux dissemblables qui sont utilisés afin de grouper les meilleures propriétés, ou de donner un nouvel ensemble de caractéristiques qu'aucun des matériaux constitutifs ne pourrait atteindre seul [1]. Un matériau composite est constitué de différentes phases nommées renforts et matrice. Lorsque le matériau composite est non endommagé, les renforts et la matrice sont parfaitement liés et il ne peut pas y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases. Les renforts se présentent sous forme de fibres continues ou discontinues. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. L'arrangement des fibres et leur orientation permettent de renforcer les propriétés mécaniques de la structure. La matrice quant à elle assure la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques. Nous étudions plus particulièrement les matériaux composites à renfort fibre longue continue utilisés dans l'industrie aéronautique et spatiale. Les pièces structurelles sont réalisées par empilement de nappes en optimisant les directions des renforts en fonction des charges qu'elles doivent subir. La nature de la résine ou du renfort est choisie en fonction de l'application finale visée [2].

Lorsqu'un stratifié composite croisé est soumis à une charge de traction, les fibres de renforcement dans la direction de la charge subissent une tension et commencent à s'étirer. Si la charge continue d'augmenter, les fibres peuvent atteindre leurs limites d'élasticité et se déformer de manière permanente, provoquant une fissure dans le stratifié.

La propagation de la fissure dans un stratifié composite croisé dépend de la direction des fibres de renforcement. Si la fissure se propage dans la direction des fibres (fissuration longitudinale), elle peut se propager rapidement et facilement, car les fibres dans ce cas offrent une faible résistance à la propagation de la fissure. En revanche, si la fissure se propage dans une direction normale aux fibres (fissuration transversale), elle peut rencontrer une résistance plus élevée, car les fibres offrent une résistance plus élevée à la propagation de la fissure.

L'étape de fissuration de la matrice est suivie de l'étape de rupture interfaciale entre les couches (décohésion). Cela représente le début du délaminage.

Ces phénomènes ont été étudiés analytiquement et séparément : les études portent soit sur la propagation des fissures transverses par une méthode analytique ou numérique Berthelot [3], soit sur un modèle analytique de délaminage J.-L. Rebière [4].

Autrement, quelques chercheurs étudient le délaminage et le rôle des fissurations transverses et longitudinales dans leur apparition, par exemple, Wang et Karihaloo ont étudié l'empilement optimal (0, 45, 90) pour réduire la concentration de contraintes à la pointe de la fissure et la constante de cisaillement [5]. De nombreux critères ont été proposés dans la littérature pour étudier le développement des différents mécanismes d'endommagements dans les composites stratifiés croisés. Ces critères sont généralement basés sur le calcul de la contrainte maximum [6].

D'autres critères reposent sur des approches énergétiques. Dans plusieurs modèles analytiques et numériques, ils ont été utilisés pour prédire uniquement l'amorçage de la fissuration transverse dans les stratifiés croisés [6].

1.2 Architecture des matériaux composites :

L'architecture du composite fait référence à la façon dont les différents constituants d'un matériau composite sont disposés et agencés pour former une structure solide. Ils combinent un matériau de renfort, dispersé sous forme de particules, fibres courtes ou fibres longues, au sein d'une matrice qui les enrobe. Alors que les renforts donnent au matériau la résistance et la rigidité, la matrice sert de substance de liaison. L'architecture des composites peut varier en fonction de la nature de la matrice et des renforts (par exemple, des fibres de carbone, des fibres de verre, etc.), de leur disposition, de leur fraction respective, ce qui permet à l'élaborateur du matériau de le concevoir « sur mesure », optimisé pour la pièce où il sera utilisé, et même parfois optimisé localement en fonction de la distribution locale des contraintes dans la pièce [7].

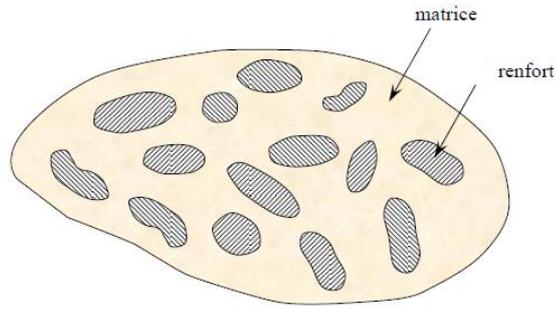


Figure 1- 1 : Les constituants d'un matériau composite [3].

Notre étude va se baser sur le stratifié à base de fils ou de tissus unidirectionnels.

1.2.1 Structure générale d'un stratifié :

Les composites stratifiés sont constitués de couches fines de renforts, généralement des fibres, empilées les unes sur les autres dans diverses orientations imprégnées de résines (figure 1-2). Les renforts peuvent être unidirectionnels (dans une seule direction) ou bidirectionnels. Les composites stratifiés sont largement utilisés dans les applications aérospatiales en raison de leur grande flexibilité de conception [8].

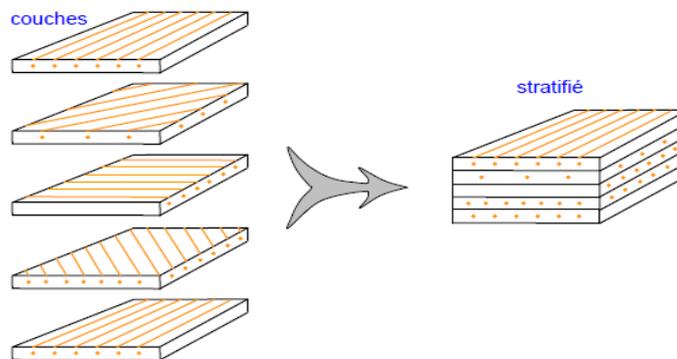


Figure 1- 2 : Constitution d'un stratifié [3].

Dans le cas général, le renfort de chaque couche sera de natures diverses : fils, stratifiés, mats, tissus, fibres de verre, fibres de carbone, etc. Chaque couche doit alors être désignée par l'indication de la nature des fibres et du type de renfort. Le choix de la nature et de la séquence des couches dépendra de l'utilisation du matériau composite, en l'adaptant au mieux au champ des contraintes imposées :

-Les couches unidirectionnelles ont de bonnes performances mécaniques dans la direction des fibres.

-Les mats sont peu résistants en traction et devront être réservés aux zones comprimées, par exemple (figure 1-3) présente des couches unidirectionnelles dans la zone de traction et un mat dans la zone de compression d'une poutre sollicitée en flexion.

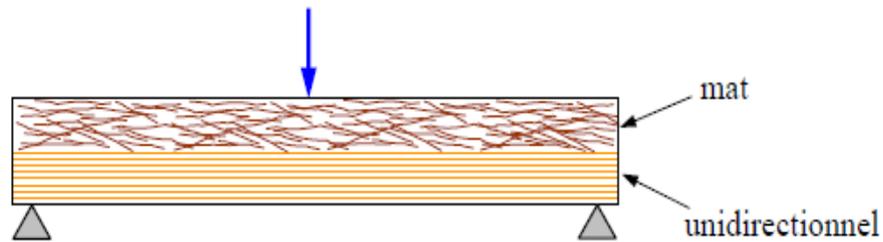


Figure 1- 3 : Poutre sollicitée en flexion [3].

Une stratification croisée sera sensible au délaminage interlaminaire.

Enfin, il est intéressant de noter qu'une stratification symétrique garantira généralement une bonne planéité du stratifié après démoulage.

1.2.2 Stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels :

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 1-4) de couches de fils ou de tissus unidirectionnels, dont la direction est décalée dans chaque couche.

La désignation de ces stratifiés est généralement effectuée selon le code suivant :

1. Chaque couche est désignée par un nombre indiquant la valeur en degrés de l'angle que fait la direction des fibres avec l'axe x de référence.

2. Les couches successives sont séparées par un / si leurs angles sont différents.

3. Les couches successives de même orientation sont désignées par un indice numérique.

4. Les couches sont nommées successivement en allant d'une face à l'autre.

• Des crochets (ou parenthèses) indiquent le début et la fin du code.

• La désignation dépend du système d'axes choisi.

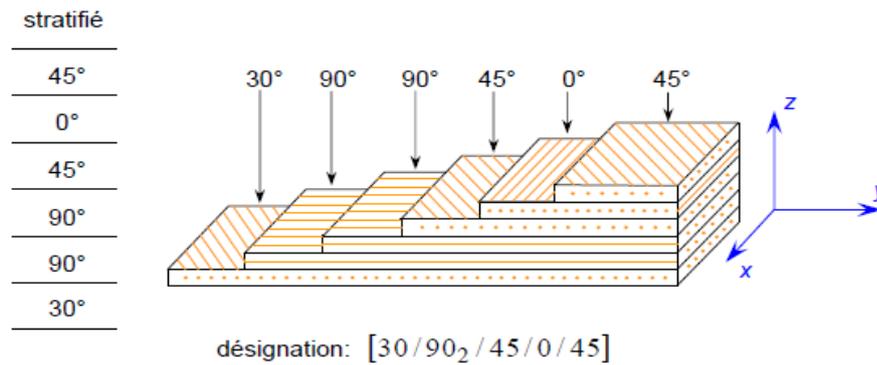


Figure 1- 4 : Désignation d'un stratifié [3].

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

- Si le stratifié a un nombre pair de couches, la désignation débute sur une face pour finir au plan de symétrie, par exemple : [90/45₂/0]_S.

- Si le stratifié comporte un nombre impair de couches, la désignation est semblable à la précédente, la couche centrale étant surlignée. Par exemple : [90/45₂/0]_S [9].

1.3 Dégradation des matériaux composites :

L'endommagement des matériaux composites fait référence à un ensemble de changements microstructuraux au sein du matériau en raison des hétérogénéités qui engendrent des concentrations de contraintes ou de charges appliquées. C'est le cas à l'interface entre fibre et matrice où on peut voir apparaître des décohésions. L'anisotropie provoque également des concentrations de contrainte, notamment à l'interface entre deux plis d'orientations différentes provoquant des délaminages ou la décohésion. Les composites présentent plusieurs types de dommages en fonction de la sollicitation appliquée et de la géométrie de la structure. En cas de contrainte mécanique, les dommages détectés pour la première fois à l'échelle microscopique commencent à se produire lorsque la force locale atteint la limite de défaillance de l'un des composants ou de l'interface reliant les constituants. Plusieurs paramètres sont responsables de la progression de ces modes de défaillances dans les composites tels que la fraction volumique, l'orientation des fibres, l'épaisseur de la couche et l'espacement entre les fibres. La structure est complètement détruite lorsque divers dommages s'accumulent.

Les principaux mécanismes d'endommagement des stratifiés composites sont, dans l'ordre chronologique, la fissuration de la matrice, le décollement des fibres de la matrice, la délamination et la rupture des fibres.

L'emplacement, l'évolution ou la taille des dommages peuvent être évalués à l'aide de méthodes numériques, analytiques et expérimentales.

La compréhension de l'endommagement des matériaux composites est essentielle pour concevoir des structures composites résistantes et durables.

1.4 Les échelles d'observation de l'endommagement :

L'endommagement d'un matériau est un processus irréversible qui conduit à l'apparition de défauts locaux. Du fait de l'hétérogénéité de la structure des matériaux composites, il n'existe pas de mécanisme unique mais plusieurs types de dégradations différentes par leur nature et leur mode de développement. Ces dégradations apparaissent à différentes échelles (figure 1-5). Ainsi, on distingue [10]:

- A l'échelle microscopique apparaissent des ruptures d'adhérence entre les fibres et la matrice (décohésion fibres/matrice) ou de porosité.

- A l'échelle mésoscopique, ou échelle du pli, on observe plusieurs fissures intra/laminaires transverses (perpendiculaires à la direction de sollicitation) ou longitudinales (dans la direction de l'application de l'effort) et des ruptures de fibres au stade ultime de la ruine du matériau.

- A l'échelle macroscopique, on observe le phénomène de délaminage qui correspond à une séparation locale entre deux couches liées à une concentration importante des contraintes en cisaillement s'amorçant généralement aux bords libres de la structure. Ces endommagements ne sont pas présents uniformément dans la structure. Ils dépendent du type de sollicitation, mais aussi de l'orientation et de la proportion des renforts.

La ruine du matériau est le résultat de la combinaison potentielle de l'ensemble des mécanismes élémentaires du pli unidirectionnel (décohésion fibre/matrice, fissures intralaminaires, ruptures de fibres) et à l'interface entre les plis (délaminage). Ces fissures peuvent être générées par des concentrations de contraintes, des discontinuités des champs de

contraintes entre les plis ou peuvent être présentes initialement dans le matériau (défauts apparus lors de la fabrication ou liés à des effets de bords).

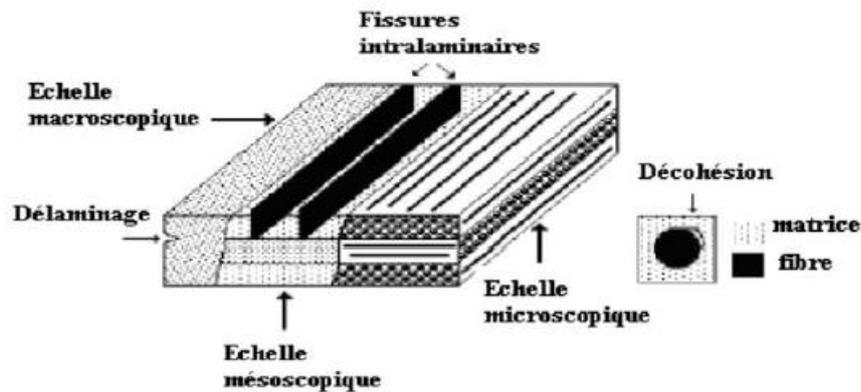


Figure 1- 5 : Les différentes échelles d’observation de l’endommagement : illustration sur un matériau stratifié [11].

1.5 Les mécanismes d’endommagement :

L’identification des dommages par la microscopie a permis de développer l’analyse d’endommagement. La perte de rigidité du matériau endommagé permis de définir et de déterminer un seuil critique de déformation ou de contraintes qui amorce les mécanismes d’endommagement. Il a été montré que la température, la vitesse de sollicitation, les chocs, la nature chimique d’un environnement agressif, le chargement monotone ou cyclique influencent l’évolution de l’endommagement. La ténacité de la matrice et la qualité de l’interface influencent la résistance aux dommages.

Les mécanismes d’endommagement potentiels d’un matériau hétérogène, notamment les composites soumis à une sollicitation mécanique, peuvent se regrouper en quatre principaux modes différents [12] selon le site où ils opèrent (figure 1-6) : fissuration matricielle, rupture de l’interface fibre–matrice et déchaussement de fibre, délaminage (décohésion étendue intra plis) et rupture des fibres.

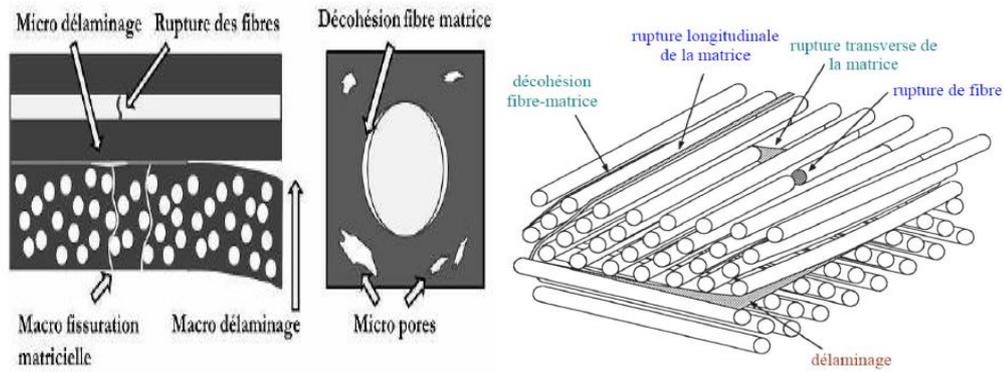


Figure 1- 6 : Les principaux endommagements rencontrés dans un stratifié [13].

1.5.1 Fissuration de la Matrice :

La fissuration de la matrice peut se produire, soit par fissuration transverse (figure 1-7) (quand les criques se propagent le long des fibres désorientées par rapport à la direction de sollicitation) lorsque la contrainte en traction dans la matrice atteint la contrainte à la rupture de la matrice, soit par fissuration longitudinale (figure 1-8) (quand les criques se développent le long des fibres orientées suivant la direction de la sollicitation) lorsque la contrainte de cisaillement dans la matrice atteint la contrainte en cisaillement à la rupture, généralement au voisinage d'une fibre [9].

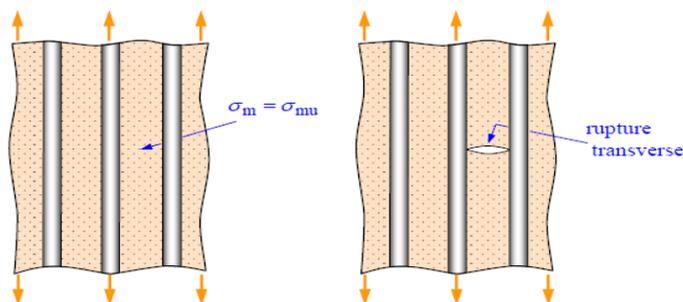


Figure 1- 7 : Rupture transverse de la matrice [3].

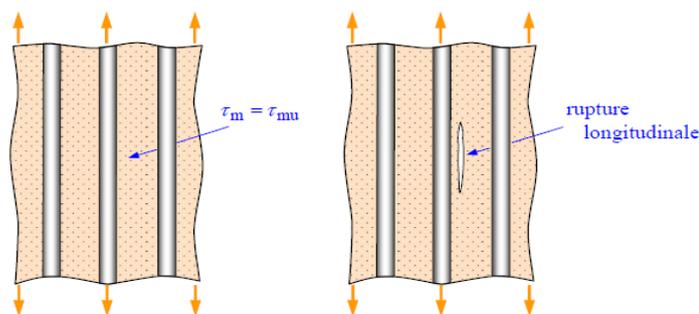


Figure 1- 8 : Rupture longitudinale de la matrice [3].

1.5.2 La rupture des fibres :

La rupture de fibre intervient lorsque la contrainte de traction dans une fibre atteint la contrainte à la rupture de la fibre. Elle se produit souvent dans les plis les moins désorientés par rapport à la direction de sollicitation (figure 1-9). L'excès d'effort provoquera la rupture des constituants voisins, et ce de proche en proche jusqu'à la ruine du volume sollicité.

Il est important de noter que la résistance des composites dépend de la qualité des fibres, de la matrice et de la de fabrication. Les imperfections structurelles telles que la porosité, les inclusions et les zones de mauvaise adhérence entre les fibres et la matrice peuvent également réduire la résistance et la durabilité des composites et augmenter ainsi le potentiel de dommages.

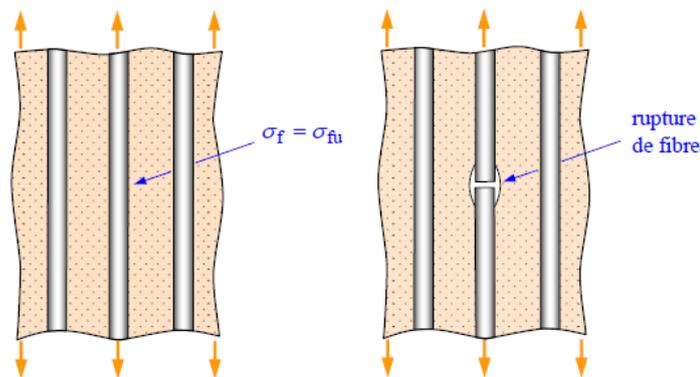


Figure 1- 9 : Rupture de Fibre [3].

1.5.3 Décohésion fibre-matrice :

C'est dans la zone de l'interface où s'effectue le transfert de charge de la matrice vers le renfort ou vice versa. Après initiation, la propagation de la rupture change suivant la nature de l'adhésion fibre-matrice. Dans le cas d'un composite à fibres unidirectionnelles sollicité parallèlement aux fibres, on peut distinguer les cas suivants (figure 1-10) :

- Cas d'une interface très forte : Si l'adhésion entre fibres et matrice est très forte, on aura une propagation de la fissure initiée soit par rupture de fibres, soit par rupture de la matrice comme si elle n'avait rencontré aucun obstacle. La rupture observée sera de type fragile.

- Cas d'une interface très faible : la fissuration matricielle est déviée à l'interface, la décohésion fibre-matrice s'étend sur une très grande distance.

- Cas d'une interface ayant des propriétés intermédiaires : la fissure au contact d'une fibre se dévie dans un plan perpendiculaire en provoquant un décollement de la matrice au niveau de l'interface.

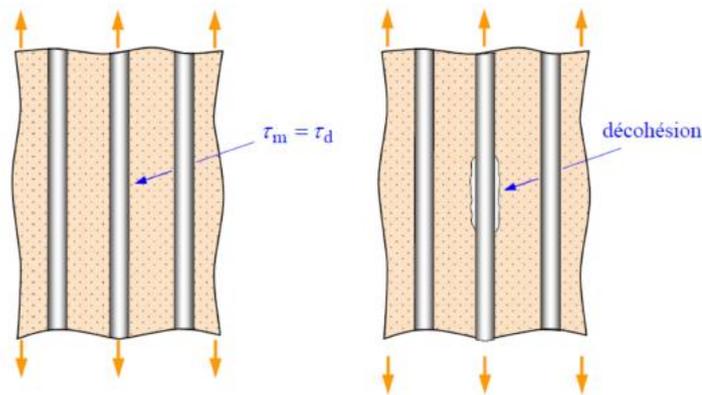


Figure 1- 10 : Décohésion Fibre-Matrice [3].

1.5.4 Délaminage :

Le délaminage fait référence à la séparation des couches constitutives du matériau composite (figure 1-11). Son processus est le résultat d'une chronologie de divers types d'endommagement. Les propriétés mécaniques de la matrice et de la fibre ainsi que les propriétés adhésives et cohésives de l'interface gèrent cette chronologie en révélant des types d'endommagement fréquemment rencontrés comme la micro fissuration de la matrice, la rupture des fibres et la rupture des interfaces. Le délaminage progresse essentiellement par fissuration interlaminaire considéré comme le premier responsable du dédoublement de son épaisseur [14].

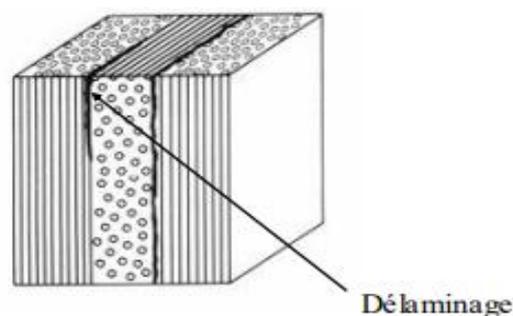
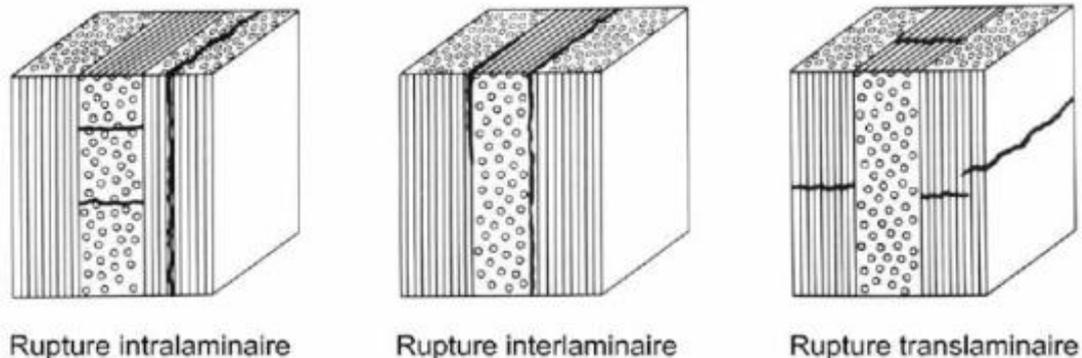


Figure 1- 11 : Mécanisme de délaminage [13].

1.6 Fissuration des composites stratifiés :

Les matériaux composites stratifiés constitués des couches superposées renforcées de fibres unidirectionnels, de tissus ou de mats peuvent présenter différents types de fissuration (interlaminaire, intralaminaire, ou translaminaire). Ces termes définissent les plans dans lesquels peuvent se développer les fissures dans les matériaux composites [13].

- Fissures interlaminaire : la fissure se développe suivant un plan parallèle aux couches de renfort, entre deux couches. Ce type d'endommagement se rencontre lors d'essai de flexion entre appuis rapprochés :
- Fissures Intralaminaire : le plan de la fissure est perpendiculaire ou parallèle aux couches de renfort à l'intérieure des couches. Ce mode d'endommagement se rencontre lors d'essai de cisaillement ou de traction transverse sur matériau unidirectionnel par exemple ;
- Fissures translaminaire : le plan de la fissure est perpendiculaire aux couches et aux renforts. Ce mode d'endommagement est par exemple observé lors d'essai de traction ou compression uni axiale dans le sens des fibres.



1.7 La propagation des fissures :

Le processus par lequel une fissure existante se propage à travers la structure composite en raison des contraintes appliquées est appelé propagation des fissures dans les composites. C'est un élément essentiel de la résistance et de la durabilité des matériaux composites.

Lorsqu'une fissure se trouve dans un matériau composite, une concentration de contrainte est produite à l'extrémité de la fissure. Dans le cas d'une adhérence fibre-matrice élevée, la

rupture initiée, soit par rupture des fibres, soit par rupture de la matrice, induit un front de fissure des concentrations de contraintes conduisant à une propagation de la rupture successivement dans les fibres et dans la matrice [3].

Dans le cas d'une faible adhérence fibre-matrice, la propagation transverse de la fissuration peut être schématisée de la manière suivante. En tête de fissure, la rupture de la matrice traverse les fibres.

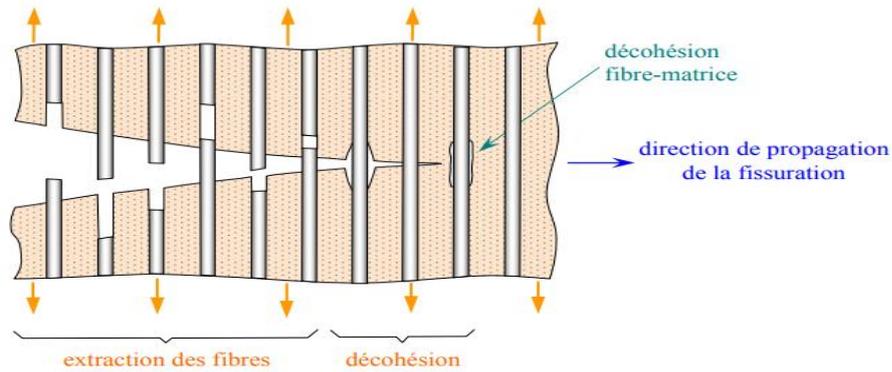


Figure 1- 13 : Propagation de la rupture dans le cas d'une faible adhérence fibre-matrice [3].

Dans certains cas, les concentrations de contraintes en tête de fissure peuvent conduire à une décohésion fibre-matrice avant rupture transverse de la matrice. En arrière, l'ouverture de la fissure induit des contraintes élevées dans les fibres portant la fissure. Ces contraintes provoquent la rupture des fibres à une distance plus ou moins proche de la surface de rupture. La fissure continue de progresser, les fibres rompues sont extraites de la fissure au fur et à mesure de la progression de la fissure. Le pontage des fissures transversales peut se faire par propagation de la rupture à l'interface fibre-matrice, conduisant à un profil plus ou moins en escalier de la surface de rupture [3].

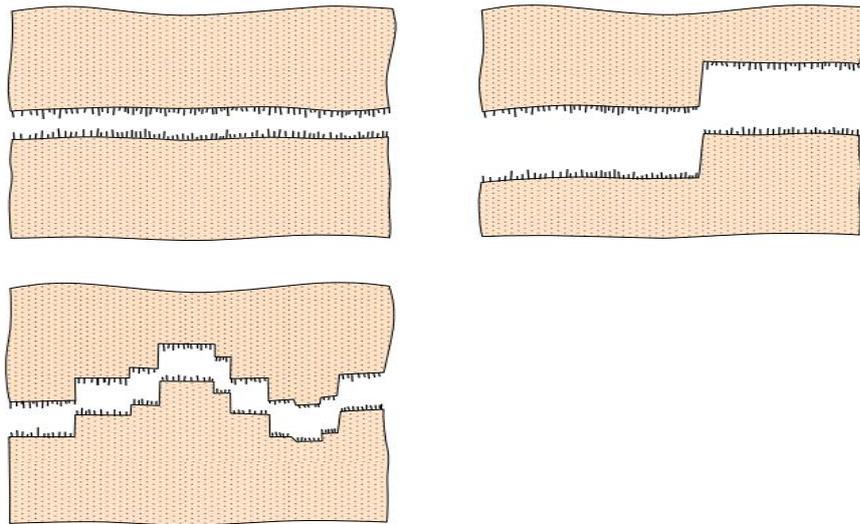


Figure 1- 14 : Surfaces de rupture dans le cas d'une faible adhérence fibre-matrice [3].

1.8 Densité de la fissuration :

Les études sur la fissuration de la matrice se concentrent principalement sur les fissures transversales, autrement dit les fissures matricielles dans les couches de 90° d'un stratifié.

Les fissures dans la matrice se trouvent à des distances égales les unes des autres et se propagent instantanément d'un bord à l'autre, couvrant toute l'épaisseur de la couche endommagée. La densité des fissures, c'est-à-dire le nombre de fissures par unité de longueur, est utilisé pour déterminer le degré de fissuration transversale. La charge appliquée provoque une augmentation de la densité de la fissure d'une façon brusque après l'initiation de la fissuration. L'endommagement de la matrice atteint l'état de saturation, également appelé état caractéristique endommagé, lorsque le taux d'augmentation de la densité des fissures diminue progressivement [15].

En général, les analyses précédentes ne tiennent compte que de la fissuration transversale. En fait, une comparaison des résultats expérimentaux et des résultats issus de modèles analytiques montre que la fissuration transversale n'est pas le seul processus de dommage qui se produit pour les fortes densités de fissures. Les fissures transversales induisent des concentrations de contraintes locales aux extrémités des fissures et impliquent un délaminage inter laminaire entre 0° et 90° de couches. La délamination se développe à partir des extrémités des fissures et libère les concentrations de contraintes [16].

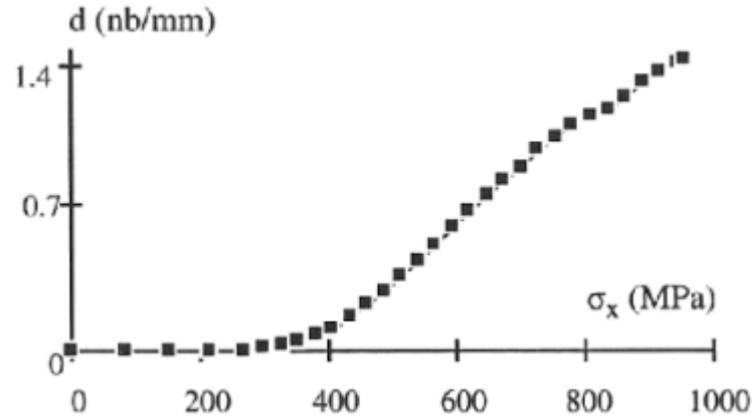


Figure 1- 15 : Evolution de la densité de fissures en fonction de la contrainte de traction au niveau du pli à 90° d'un stratifié carbone /époxy [0/90_n]_s [17].

1.9 Types de vieillissement :

Le vieillissement des matériaux polymères et composites dans des conditions de service réelles se caractérise par des taux d'absorption et de dégradation lentes. Cependant, des essais accélérés sont nécessaires pour évaluer et quantifier les effets du vieillissement. Ces essais exposent généralement le matériau à un environnement plus sévère que celui dans lequel il est utilisé. En général, la température est le paramètre le plus couramment utilisé pour accélérer le processus de diffusion et peut être combinée à d'autres paramètres (humidité, lumière UV) en fonction de l'application [18].

1.9.1 Vieillissement physique :

a) Diffusion de l'eau :

L'absorption d'eau dépend essentiellement de la température T , des propriétés du polymère, et de l'humidité relative (HR) qui est par définition le rapport entre la pression de vapeur d'eau et la pression de vapeur saturante à la même température T). Elle est essentiellement obtenue par [19] :

1. la matrice polymère : diffusion et absorption physique de l'eau moléculaire.
2. les microfissures : transport d'eau liquide par condensation capillaire.
3. l'interface fibre/matrice : diffusion, absorption et condensation capillaire.

La molécule d'eau étant une molécule de petites dimensions (rayon atomique 0.096 nm), peut donc aisément, se déplacer à travers le réseau moléculaire du polymère sous l'influence d'un gradient de concentration ; c'est le phénomène de diffusion et les molécules d'eau sont dites diffusantes ou non liées. La fixation des molécules d'eau aux chaînes moléculaires a deux conséquences majeures : une réduction de la température de transition vitreuse et un gonflement du polymère [20], [21].

Les molécules d'eau diffusent de la surface vers l'intérieur du polymère à travers les pores du réseau tridimensionnel. Ces cavités peuvent correspondre au volume libre ou à des défauts issus de la polymérisation.

L'absorption des molécules d'eau par liaison hydrogène affaiblit la cohésion intermoléculaire, ce qui entraîne une réduction des propriétés mécaniques, qui se traduit par une diminution de la température de transition vitreuse. En moyenne, pour chaque augmentation d'un point de pourcentage de la teneur en eau, la température de transition vitreuse diminue d'environ 20 °C.

b) Plastification :

L'absorption d'eau par les composites à matrice polymère peut conduire à la plastification de la résine. Ce phénomène est expliqué par une augmentation de la mobilité des chaînes macromoléculaires de la résine due à une modification du volume libre et/ou une rupture des liaisons hydrogène –H.

La plastification se traduit concrètement par une diminution de la température de transition vitreuse et du seuil de plasticité.

Les molécules d'eau peuvent s'insérer dans le réseau tridimensionnel en brisant les liaisons secondaires, ou liaisons hydrogènes, entre les groupes polaires des chaînes macromoléculaires voisines.

Les groupes polaires du polymère vont se lier préférentiellement à une molécule d'eau. La rupture des liaisons entre les chaînes, qui assuraient une bonne partie la rigidité du matériau, va permettre une augmentation de mobilité des chaînes ou des segments de chaînes macromoléculaires. On parle dans ce cas de plastification. Cette mobilité accrue va affecter les propriétés mécaniques et physicochimiques du polymère [22].

Les propriétés en traction ou cisaillement sont les plus étudiées (module d'Young et de cisaillement) pour l'aspect mécanique, ainsi que l'évolution de la température de transition vitreuse T_g . Dans la majorité des cas, une diminution du module de Young et du module de cisaillement est constatée ainsi qu'une baisse de T_g . Le phénomène est réversible.

La plastification s'accompagne aussi de gonflements, qui dans le cas des composites, conduit à l'apparition de contraintes inter faciales qui peuvent produire des déchaussements de fibres et des délaminages. Ce phénomène est d'autant plus important que la résistance de l'interface est faible [23]. La (figure 1-16) schématise la pénétration du solvant dans un polymère.

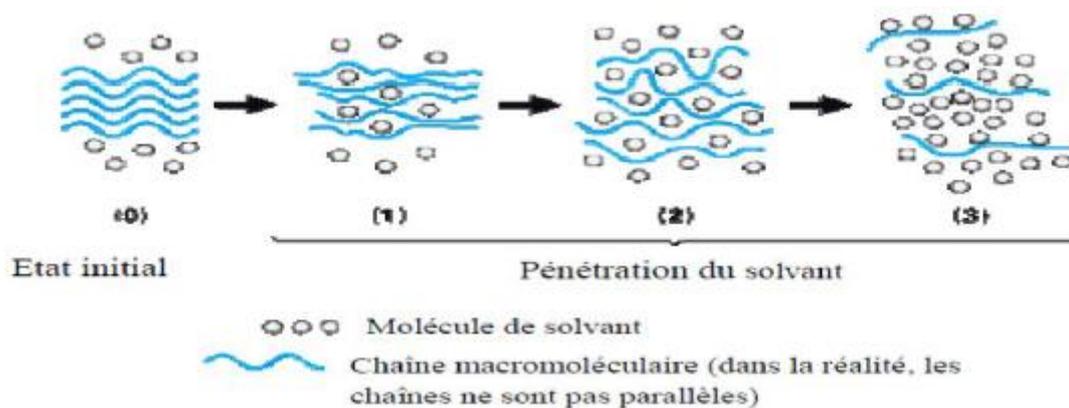


Figure 1- 16 : Pénétration d'un solvant dans un polymère [24].

1.9.2 Vieillessement chimique :

L'exposition à des facteurs environnementaux tels que la chaleur, les radiations ou les agents chimiques peut entraîner une dégradation chimique de la matrice polymère. Cette dégradation peut rompre les chaînes de polymère, réduire leur poids moléculaire et introduire une réticulation ou une ramification.

a) Hydrolyse :

L'hydrolyse est une réaction chimique irréversible due à l'eau et qui se traduit par des scissions des chaînes macromoléculaires entraînant une diminution de la masse moléculaire de la résine polymère.

Au cours de l'absorption, les molécules d'eau peuvent remplacer les liaisons hydrogène déjà existantes par des liaisons hydrogène entre l'eau et le polymère. Le résultat de ces

interactions chimiques à long terme est la dégradation de la résine et de l'interface par hydrolyse.

Celle-ci est activée thermiquement, et est susceptible d'être catalysée par divers agents chimiques : ions OH⁻, H⁺, métaux de transition, d'où l'influence de la composition du milieu réactionnel dans le vieillissement [22].

Le greffage d'eau sur les chaînes macromoléculaires se caractérise par une masse supérieure à la masse initiale de l'échantillon même après séchage [24].

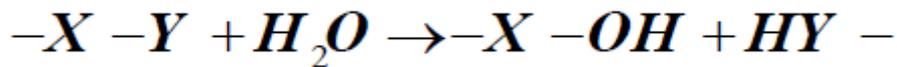


Figure 1- 17 : Equation générale de l'hydrolyse [25].

b) Lessivage :

On parle de phénomène de lessivage du réseau polymère quand il y a perte de masse du polymère après une exposition prolongée dans une atmosphère humide. Cette perte de masse est constatée soit au cours du processus de diffusion de l'eau après la saturation, soit sur un polymère vieilli et séché à nouveau [22].

1.10 Problématique :

Considérons un type de stratifié croisé symétrique $[0/90_n]_s$ fissuré soumis à une traction uni axiale. Dans un premier temps, le problème à résoudre est celui du calcul des variations longitudinales des contraintes de cisaillement en employant une approche numérique utilisant un modèle par éléments finis (ABAQUS). Les résultats obtenus vont valider le modèle analytique basé sur la méthode de diffusion de cisaillement (Shear Lag) qui s'intéresse à l'étude du champ de déplacement [14].

La deuxième phase consiste à analyser l'influence des conditions hygrothermiques sur le comportement mécanique des stratifiés composites $[0/90_n]_s$, sous sollicitation d'une traction bi-axiale et endommagés par des fissurations transversales, longitudinales et délaminage en utilisant une analyse numérique.

1.11 Travaux effectués :

Afin de bien prédire le comportement mécanique des matériaux composites endommagés et proposer des lois d'endommagement, plusieurs approches analytiques et numériques ont été développées. Elles visent à modéliser la manière dont les matériaux composites se détériorent sous l'effet de différentes sollicitations mécaniques. Les chercheurs et les ingénieurs utilisent souvent une combinaison de ces méthodes pour une compréhension approfondie du comportement mécanique des matériaux composites endommagés. Voici donc quelques-unes des méthodes les plus couramment utilisées :

a) Approches utilisant la diffusion de cisaillement :

En 1977, Reifsnider [26] a développé pour la première fois une approche analytique pour modéliser le transfert de charge entre les couches orientées à 90° et 0° des stratifiés croisés endommagés par des fissures transversales. La philosophie est de diviser la moitié de l'épaisseur du stratifié en trois couches de rigidité différente. Il y a une couche longitudinale à 0° , une couche transversale à 90° et une fine couche riche en résine à l'interface $0^\circ/90^\circ$. L'auteur suppose donc que le transfert de charge se produit par diffusion de cisaillement dans la couche mince.

Un modèle proposé par Highsmith et Reifsnider [27] pour traiter les stratifiés croisés qui subissent des fissurations longitudinales et transversales lors d'une tension unie axiale. La théorie de Pagano [28], qui suppose que la contrainte normale varie linéairement avec l'épaisseur de la couche, est la base de cette méthode. À l'interface où se croisent les fissures longitudinales et transversales, le modèle prédit des valeurs significatives de contrainte interlaminaire. Ceci est cohérent avec l'identification d'un délaminage situé aux points de rencontre de fissures.

Pour prédire l'initiation et la propagation des fissures transversales, Garrett et Bailey [29] ont utilisé le même type d'approche que C. Zweben et A.S.D. Wang [30]. La déformation moyenne de la couche transversale est utilisée pour calculer la contrainte normale. La perte de rigidité obtenue à l'état saturé est en bon accord avec les résultats expérimentaux pour les couches transversales épaisses. Le déplacement longitudinal dans cette méthode varie linéairement en fonction de l'épaisseur de la couche transversale.

b) Modélisation numérique :

Un modèle bidimensionnel généralisé basé sur une approche de déplacement d'un stratifié croisé endommagé par une fissuration transversale est développé par Berthelot et Le Corre [31]. Les auteurs proposent un champ de déplacement piloté par une fonction arbitraire à déterminer en fonction de l'épaisseur des couches. Ils démontrent que l'introduction d'un cisaillement progressif dans la couche orientée à 0° donne les meilleurs résultats comparativement à l'analyse par éléments finis. Excepté la contrainte normale longitudinale, qui vérifie les conditions aux limites en termes de valeurs moyennes, et la contrainte de cisaillement entre les couches orientées à 0° et 90° , au voisinage immédiat des fissures transversales, les résultats pour la répartition des contraintes sont en bon accord avec les résultats déduits par le calcul aux éléments finis.

Maatalah [32] a examiné l'impact de l'endommagement par fissuration intralaminare sur le comportement d'un stratifié croisé $[0/90_n]_s$, sollicité en traction uniaxiale en fonction de la direction des plis orientés à 0° . Deux approches de modélisation ont été développées : la première est une approche analytique de type variationnelle qui repose sur la création d'un champ de contraintes statiques admissible. La seconde méthode utilise une analyse par éléments finis 3D et utilise un calcul du champ de contraintes numérique.

c) Viellissement hygrothermique :

Lorsque les matériaux composites sont exposés à des environnements hygrothermiques, c'est-à-dire des conditions combinant humidité et température, l'effet hygrothermique fait référence aux changements de comportement et des propriétés de ces matériaux.

Mercier [33] a examiné la fissuration et le vieillissement en milieu humide des matériaux composites à matrice organique (CMO). La diffusion de l'eau dans le matériau (matrice époxy renforcée par des fibres de verre) a d'abord été analysée expérimentalement en déterminant les cinétiques d'absorption sous différentes conditions d'humidité. Lors d'essais expérimentaux de traction, des diminutions de différentes propriétés mécaniques en fonction de la quantité d'eau absorbée ont été mises en évidence et quantifiées. Les causes physiques de ces modifications ont été découvertes. La fissuration intra laminaire et son interaction avec l'humidité ont également été étudiées expérimentalement comme mode d'endommagement spécifique.

Benkeddad [34] a travaillé sur la prédiction du comportement hygrothermique des structures dans des conditions de température et d'humidité. Un logiciel d'analyse des stratifiés a été créé pour identifier les contraintes hygrothermiques transitoires et les déformations entre les plis. Les effets de l'environnement sur les propriétés mécaniques sont ignorés

1.12 Définition du sujet :

L'objectif principal de notre étude était d'analyser le comportement mécanique des composites $[0/90_n]_s$ soumis à des contraintes bi axiales et endommagé par les fissurations transversales, longitudinales et délaminage, et d'étudier par la suite l'influence des conditions hygrothermique sur son comportement.

L'approche principale de la recherche est essentiellement la simulation numérique en utilisant le code ABAQUS. Des résultats sont obtenus. Pour enrichir l'interprétation des résultats, il convient de les comparer à ceux d'autres travaux réalisés.

2 Chapitre 02

MODELISATION DE LA FISSURATION TRANSVERSALE, LONGITUDINALE ET DU DELAMINAGE

2.1 Introduction :

La Fissure transversale se produit lorsque les fibres du pli sont désorientées par rapport à la direction de la sollicitation appliquée. Pour le type de stratification $[0/90_n]_s$, cette fissure prend naissance au niveau des couches à 90° et se propage parallèlement aux fibres. Les résultats expérimentaux montrent que la fissure transversale est suivie d'un délaminage après qu'une concentration de contraintes interlaminaires se soit développée en pointe de fissure.

Par conséquent, la qualité de l'interface fibre-matrice ainsi que le type et l'intensité du chargement jouent un rôle important dans le développement des fissures transversale et donc du délaminage.

La modélisation de la fissuration transverse et délaminage est proposée par un schéma appelé modèle de transfert du chargement par cisaillement, schéma qui est en fait une application à la fissuration transverse et délaminage de l'analyse du transfert de charge entre fibre et matrice. Ces analyses reposent sur des hypothèses que le chargement mécanique est transféré entre les couches 0° et 90° par l'intermédiaire d'une couche fine situé à l'interface entre les couches. Les modèles de transfert du chargement par cisaillement supposent que le déplacement longitudinal est constant à travers toute l'épaisseur des couches orientées à 0° . Ils conduisent à des contraintes de cisaillement transverse nulles. Cette hypothèse simplifie grandement les analyses, néanmoins elle n'est pas très réaliste puisque les modules de cisaillement transversent des couches à 0° et 90° sont du même ordre de grandeur [35].

Dans ce chapitre, un modèle de distribution de cisaillement parabolique et progressif (Shear-lag) qui inclut le délaminage causé par les fissures transversales, est proposé et appliqué afin de modéliser et analyser le comportement des plaques stratifiées croisés soumises à une charge de traction uni axiale.

2.2 Modélisation analytique d'un stratifié endommagé par fissuration transverse et délaminage :

Berthelot et Le Corre [16] ont développés une approche analytique pour évaluer les distributions de contraintes bidimensionnelles dans le cas de stratifiés à couches croisées

contenant des délaminages provenant des pointes des fissures transversales. L'analyse est basée sur une approche de déplacement, qui suppose que les déplacements longitudinaux dépendent des coordonnées longitudinales et transversales dans chaque couche.

Dans la partie sans délaminage, le champ de déplacement est supposé avoir la forme de cisaillement progressif considérée dans le cas de la fissuration transversale[16]. Dans ce modèle, nous considérons que le délaminage se développe à chaque extrémité des fissures transversales. Le plan médian de la plaque stratifiée (plan xoy) est un plan de symétrie géométrique.

L'état de la fissuration transversale est caractérisé par la longueur $2l$ entre deux fissures consécutives. Les épaisseurs des couches 0° et 90° sont notées t_0 et $2t_{90}$, respectivement. Dans la partie délaminée, le transfert de charge mécanique est supposé être obtenu par friction de cisaillement entre les couches délaminées. Pour des raisons de symétrie, la longueur délaminée est supposée être la même sur les interfaces inférieures et supérieures entre les couches 0° et 90° . Cependant, pour une cellule élémentaire donnée entre deux fissures consécutives, nous considérons que la longueur délaminée l_l sur la partie gauche peut différer de la longueur délaminée l_r sur la partie droite (figure 2-1).

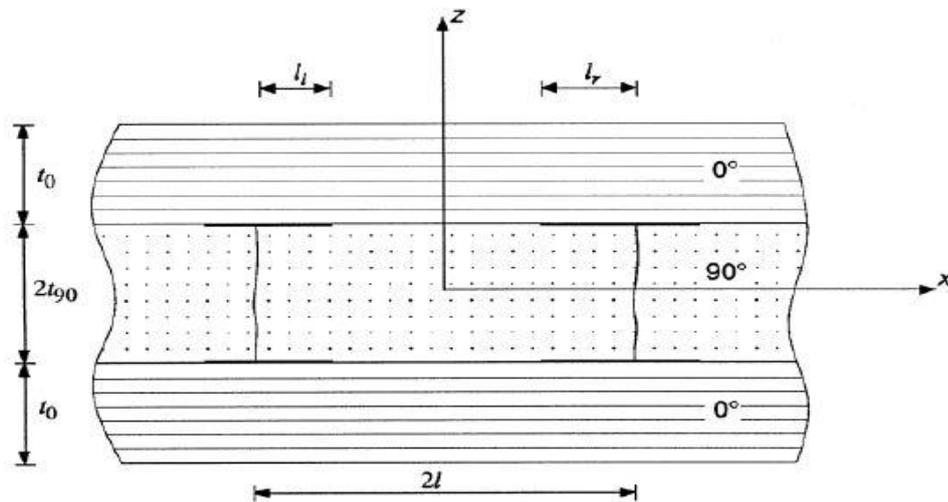


Figure 2- 1 : Stratifié croisé endommagé par fissuration transversale et délaminage [16].

σ_c : La contrainte totale appliquée sur le stratifié dans la direction x.

$2t_{90}$: l'épaisseur de la couche à 90° .

t_0° : l'épaisseur de la couche à 0° .

$2l$: distance entre deux fissures transverses consécutives.

l_l : la longueur délaminée à gauche.

l_r : la longueur délaminée à droite.

2.2.1 Distribution des contraintes dans la partie délaminée :

L'équation d'équilibre dans la couche à 90° est donnée par :

$$\frac{\partial \sigma_{xx}^{90}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xz}^{90}}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

Ou en faisant l'intégration par rapport à l'épaisseur :

$$\int_{-t_{90}}^{t_{90}} \frac{\partial \sigma_{xx}^{90}}{\partial x} dz + \int_{-t_{90}}^{t_{90}} \frac{\partial \sigma_{xz}^{90}}{\partial z} dz = 0 \quad (2.2)$$

Cette relation mène à :

$$\frac{d\overline{\sigma_{xx}^{90}}}{dx} = -\frac{1}{t_{90}} \cdot \tau(x) \quad (2.3)$$

Nous constatons que le paramètre de cisaillement est en fonction de la variation du déplacement longitudinal dans l'épaisseur de la couche à 0° .

Introduisant la contrainte longitudinale moyenne dans la couche 90 :

$$\overline{\sigma_{xx}^{90}}(x) = \frac{1}{2t_{90}} \int_{-t_{90}}^{t_{90}} \sigma_{xx}^{90}(x, z) dz \quad (2.4)$$

Dans la partie délaminée, le transfert de charge mécanique est obtenu par frottement, et la contrainte de cisaillement à l'interface entre les couches délaminées est supposée indépendante de la coordonnée longitudinale x :

$$\tau(x) = \pm \tau_f \quad (2.5)$$

Lorsque τ_f est positif. Un signe plus est associé à $x > 0$ et un signe moins à $x < 0$. En fait, τ_f doit être considéré comme une valeur moyenne sur la longueur délaminée.

Si l'on considère que la contrainte normale longitudinale dans la couche 90 disparaît sur les plans de fissures transversales, l'intégration de l'équation (2.3) donne les résultats suivants

$$\bar{\sigma}_{xx}^{90} = \tau_f a \left(1 - \frac{|x|}{l}\right) \quad (2.6)$$

Introduisant le rapport d'aspect de la fissuration transversale :

$$a = \frac{l}{t_{90}} \quad (2.7)$$

Ensuite, la moyenne longitudinale dans les couches θ peut être déduite de la relation :

$$\alpha \bar{\sigma}_{xx}^0(x) + \bar{\sigma}_{xx}^{90}(x) = (1 + \alpha) \sigma_c \quad (2.8)$$

Où σ_c est la contrainte longitudinale moyenne appliquée au stratifié à couches croisées et α est le rapport des épaisseurs de la couche à 0° et de la couche à 90° , tel que :

$$\alpha = \frac{t_0}{t_{90}} \quad (2.9)$$

Ainsi, les contraintes longitudinales moyennes entre la partie délaminée et la partie sans délaminage sont données par :

$$\bar{\sigma}_{xx}^{90}(-l + l_l) = \tau_f a \frac{l_l}{l} = \tau_f \frac{l_l}{t_{90}} = a_l \tau_f \quad (2.10)$$

$$\bar{\sigma}_{xx}^{90}(l - l_r) = \tau_f a \frac{l_r}{l} = \tau_f \frac{l_r}{t_{90}} = a_r \tau_f \quad (2.11)$$

Dans laquelle les longueurs délaminées (l_l et l_r) ont été rapportées à l'épaisseur de la couche 90 :

$$a_l = \frac{l_l}{t_0} \quad \text{et} \quad a_r = \frac{l_r}{t_{90}} \quad (2.12)$$

2.1.1.1 Champ de déplacement et distribution des contraintes dans la partie sans délamination :

2.1.1.1.1 Champ de déplacement :

L'étude du champ de contraintes et de la distribution des déformations dans la partie sans délaminage peut être réalisée par une analyse similaire à celle introduite dans le cas de l'analyse de la fissuration transversale sans délaminage [16]. La variation du déplacement longitudinal est supposée être progressive dans les couches 0° et parabolique dans la couche 90° :

$$u_0(x, z) = \bar{u}_0(x) + f(z)A_0(x) \quad (2.13)$$

$$u_{90}(x, z) = \bar{u}_{90}(x) + (z^2 - \frac{t_{90}^2}{3})A_{90}(x) \quad (2.14)$$

Où $\bar{u}_0(x)$ et $\bar{u}_{90}(x)$ sont les valeurs moyennes respectives (estimées sur l'ensemble des épaisseurs de couche) de l'indice longitudinal déplacements $u_0(x, z)$ et $u_{90}(x, z)$ dans les couches 0° et 90°. Les fonctions $\bar{u}_0(x)$, $\bar{u}_{90}(x)$, $A_0(x)$, $A_{90}(x)$, $f(z)$ doivent être déterminées. La fonction $f(z)$ tient compte de la variation du cisaillement transversal dans l'épaisseur de la couche 0°. Deux variations ont été considérées [31] dans le cas de la fissuration transversale sans délaminage : une variation parabolique et un cisaillement transversal progressif. Les résultats obtenus montrent que des résultats similaires sont obtenus pour les deux types de variations dans le cas de faibles densités de fissures transversales, alors qu'un cisaillement transversal progressif doit être considéré dans le cas de fortes densités de fissures. Selon ces résultats, nous considérons ici un cisaillement transversal progressif de la couche 0, en prenant la fonction $f(z)$ sous la forme introduite dans la référence [31] .

$$f(z) = \frac{\sinh \alpha \eta_t}{\alpha \eta_t} - \cosh \eta_t (1 + \alpha - \frac{z}{t_{90}}) \quad (2.14)$$

Où η_t est le paramètre de transfert de cisaillement transversal à travers les épaisseurs des 0° couches, exprimé comme suit :

$$\eta_t = \frac{E_0}{G_{xx}^0} \frac{1}{a_m} \quad (2.15)$$

Où E_0 est le module de Young des couches 0, en introduisant la longueur de la pièce sans délaminage $2a_m$ se rapportant à l'épaisseur de la couche 90 :

$$a_m = a - \frac{1}{2}(a_l + a_r) \quad (2.16)$$

Ensuite, la condition de continuité à l'interface entre les couches 0 et 90 impose la relation :

$$\bar{u}_0(x) + f(t_{90})A_0(x) = \bar{u}_{90}(x) + \frac{2}{3}t_{90}^2 A_{90}(x) \quad (2.17)$$

2.1.1.1.2 Contraintes de cisaillement :

Les contraintes de cisaillement dans les deux couches sont liées à la déformation de cisaillement transversal par les relations suivantes :

$$\sigma_{xz}^i = G_{xz}^i \gamma_{xz}^i \quad \text{tel que } i = 0,90 \quad (2.18)$$

Avec :

$$\gamma_{xz}^i = \frac{\partial u_i}{\partial z} + \frac{\partial w_i}{\partial x} \quad \text{tel que } i = 0,90 \quad (2.19)$$

Et en introduisant les modules de cisaillement transversal G_{xz}^0 et G_{xz}^{90} des couches 0 et 90, respectivement.

Ensuite, l'analyse fait l'hypothèse que les variations du déplacement transversal w_i avec la coordonnée longitudinale x sont négligeables, ce qui conduit à :

$$\sigma_x^i \approx G_{xz}^i \frac{\partial u_i}{\partial z} \quad \text{tel que } i = 0,90 \quad (2.20)$$

Ainsi, les contraintes de cisaillement sont exprimées comme suit :

$$\sigma_{xz}^0 = G_{xz}^0 f'(z) A_0(x) \quad (2.21)$$

$$\sigma_{xz}^{90} = 2G_{xz}^{90} z A_{90}(x) \quad (2.22)$$

Avec

$$f'(z) = \frac{df}{dz} \quad (2.23)$$

La condition aux limites sur la surface latérale (la contrainte de cisaillement est nulle) est vérifiée par la fonction (2.14) et la continuité de la contrainte de cisaillement à l'interface entre les couches 0 et 90 conduits à la relation :

$$A_0(x) = 2 \frac{G_{xz}^{90} t_{90}}{G_{xz}^0 f'(t_{90})} A_{90}(x) \quad (2.24)$$

En combinant les équations (2.17) et (2.24), on obtient l'expression qui relie les déplacements longitudinaux moyens des couches 0 et 90 :

$$\bar{u}_0(x) - \bar{u}_{90}(x) = \left[\frac{2}{3} t_{90}^2 - 2 \frac{G_{xz}^{90} t_{90}}{G_{xz}^0 f'(t_{90})} f(t_{90}) \right] A_{90}(x) \quad (2.25)$$

La contrainte de cisaillement $\tau(x)$ à l'interface entre les couches 0 et 90 est :

$$\tau(x) = \sigma_{xz}^{90}(x, t_{90}) \quad (2.26)$$

Elle est exprimée à partir de (2.22) par :

$$\tau(x) = 2G_{xz}^{90} t_{90} A_{90}(x) \quad (2.27)$$

Enfin, en introduisant (2.25) dans l'expression (2.27), on obtient la relation entre la contrainte de cisaillement à l'interface et les déplacements longitudinaux moyens dans les couches 0 et 90, qui peut s'écrire comme suit :

$$\tau(x) = \frac{3G}{t_{90}} [\bar{u}_0(x) - \bar{u}_{90}(x)] \quad (2.28)$$

Introduisons le paramètre de cisaillement :

$$G = \frac{G_{xz}^{90}}{1 + 3 \frac{\alpha \eta_t (\tanh \alpha \eta_t)^{-1} - 1 G_{xz}^{90}}{\alpha \eta_t^2 G_{xz}^0}} \quad (2.29)$$

2.1.1.1.3 Champs de contraintes et de déplacements :

Les relations contrainte/déformation dans les couches 0 et 90 sont sous la forme :

$$\bar{\sigma}_{xx}^i = E_i \bar{\varepsilon}_{xx}^i \quad \text{Avec} \quad \bar{\varepsilon}_{xx}^i = \frac{\partial u_i}{\partial x} \quad \text{tel que} \quad i = 0, 90 \quad (2.30)$$

Où E_0 et E_{90} sont les modules d'Young des couches 0 et 90, respectivement. L'équilibre des forces longitudinales est donné par la relation (2.3) et la relation entre les contraintes longitudinales moyennes par la relation (2.8). La combinaison de ces relations avec les expressions (2.28) et (2.30) conduit à l'équation différentielle donnant la contrainte longitudinale moyenne $\bar{\sigma}_{xx}^{90}$ dans la couche 90 :

$$\frac{d^2 \bar{\sigma}_{xx}^{90}}{dx^2} - \lambda^2 \bar{\sigma}_{xx}^{90} = -\lambda^2 \frac{E_{90}}{E_x^0} \sigma_C \quad (2.31)$$

Avec :

$$\lambda^2 = \frac{3G(t_0+t_{90})E_x^0}{t_{90}^2 t_0 E_0 E_{90}} \quad (2.32)$$

Et où E_x^0 est le module d'Young du stratifié non endommagé, donné par la loi des mélanges :

$$E_x^0 = \frac{\alpha E_0 + E_{90}}{1 + \alpha} \quad (2.33)$$

La solution de l'équation différentielle (2.31) est :

$$\bar{\sigma}_{xx}^{90}(x) = \sigma_C \frac{E_{90}}{E_x^0} + A \exp(\lambda x) + B \exp(-\lambda x) \quad (2.34)$$

Où les constantes A et B sont déduites en considérant la continuité de la contrainte longitudinale moyenne entre la partie sans délamination et la partie délaminée. Ainsi, les constantes A et B sont déduites des expressions (2.10) et (2.11), et la contrainte longitudinale moyenne dans la couche 90 peut être écrite :

$$\bar{\sigma}_{xx}^{90}(x) = \sigma_{90} \left[1 - \frac{1}{\sinh 2\eta a_m} \varphi\left(\frac{x}{l}\right) \right] \quad (2.35)$$

Introduisant la fonction suivante de la coordonnée longitudinale réduite $\left(\frac{x}{l}\right)$:

$$\varphi\left(\frac{x}{l}\right) = \left(1 - \frac{\tau_f}{\sigma_{90}} a_r\right) \sinh \eta a \left(\frac{x}{l} + \alpha_l\right) - \left(1 - \frac{\tau_f}{\sigma_{90}} a_l\right) \sinh \eta a \left(\frac{x}{l} - \alpha_r\right) \quad (2.36)$$

Avec :

$$\sigma_{90} = \sigma_C \frac{E_{90}}{E_x^0} \quad (2.37)$$

$$\eta^2 = \lambda^2 t_{90}^2 = 3 \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \frac{G E_x^0}{E_0 E_{90}} \quad (2.38)$$

Avec :

$$\alpha_l = 1 - \frac{l_l}{l} \quad ; \quad \alpha_r = 1 - \frac{l_r}{l} \quad (2.39)$$

La contrainte σ_{90} est la contrainte longitudinale appliquée à la couche 90, dans le cas d'un composite non endommagé. η est le paramètre de transfert de charge longitudinal introduit dans la référence [36]. Ensuite, la contrainte de cisaillement à l'interface entre les couches 0 et 90 est obtenue en introduisant l'expression (2.35) dans l'équation d'équilibre (2.3), ce qui donne :

$$\tau(x) = \sigma_{90} \frac{\eta}{\sinh 2\eta a_m} \psi\left(\frac{x}{l}\right) \quad (2.40)$$

Avec :

$$\psi\left(\frac{x}{l}\right) = \left(1 - \frac{\tau_f}{\sigma_{90}} a_r\right) \cosh \eta a \left(\frac{x}{l} + \alpha_l\right) - \left(1 - \frac{\tau_f}{\sigma_{90}} a_l\right) \cosh \eta a \left(\frac{x}{l} - \alpha_r\right) \quad (2.41)$$

Enfin, la contrainte longitudinale moyenne dans la couche θ est déduite de la relation (2.8) et peut s'écrire :

$$\bar{\sigma}_{xx}^0(x) = \sigma_0 \left[1 + \frac{1}{\alpha} \frac{E_{90}}{E_0} \frac{1}{\sinh 2\eta a_m} \varphi\left(\frac{x}{l}\right)\right] \quad (2.42)$$

Où σ_0 est la contrainte longitudinale appliquée aux couches 0 dans le cas d'un stratifié non endommagé :

$$\sigma_0 = \sigma_C \frac{E_0}{E_x^0} \quad (2.43)$$

Ensuite, il est possible d'obtenir le champ de déplacement et la distribution des contraintes dans la cellule élémentaire. La comparaison des relations (2.27) et (2.40), associée à la relation (2.24) conduit à l'expression des fonctions $A_0(x)$ et $A_{90}(x)$. Ensuite, en substituant ces expressions aux relations (2.13), (2.14) et (2.21), (2.22), on obtient les déplacements longitudinaux et les contraintes de cisaillement dans les couches 0 et 90 :

$$u_0(x, z) = \bar{u}_0(x) + \frac{\sigma_{90} t_{90}}{G_{xz}^0 \eta_t \sinh \alpha \eta_t} \cdot \frac{\eta}{\sinh 2\eta a_m} f(z) \psi\left(\frac{x}{l}\right) \quad (2.44)$$

$$u_{90}(x, z) = \bar{u}_{90}(x) + \frac{\sigma_{90}}{2G_{xz}^{90} t_{90}} \frac{\eta}{\sinh 2\eta a_m} \left(z^2 - \frac{t_{90}^2}{3} \right) \psi\left(\frac{x}{l}\right) \quad (2.45)$$

$$\sigma_{xz}^0 = \sigma_{90} \frac{\eta}{\sinh \alpha \eta_t \sinh 2\eta a_m} \sinh \eta_t \left(1 + \alpha - \frac{z}{t_{90}} \right) \psi\left(\frac{x}{l}\right) \quad (2.46)$$

$$\sigma_{xz}^{90} = \sigma_{90} \frac{\eta}{\sinh 2\eta a_m} \frac{z}{t_{90}} \psi\left(\frac{x}{l}\right) \quad (2.47)$$

Ensuite, les contraintes longitudinales dans les couches 0 et 90 peuvent être évaluées par les relations contrainte/déformation (2.30), donnant :

$$\sigma_{xx}^0(x, z) = \bar{\sigma}_{xx}^0(x) + \sigma_{90} \frac{E_0}{G_{xz}^0} \frac{\eta^2}{\eta_t \sinh \alpha \eta_t \sinh 2\eta a_m} f(z) \varphi\left(\frac{x}{l}\right) \quad (2.48)$$

$$\sigma_{xx}^{90}(x, z) = \bar{\sigma}_{xx}^{90}(x) + \sigma_{90} \frac{E_{90}}{2G_{xz}^{90}} \frac{\eta^2}{\sinh 2\eta a_m} \left(\frac{z^2}{t_{90}^2} - \frac{1}{3} \right) \varphi\left(\frac{x}{l}\right) \quad (2.49)$$

Enfin, les contraintes transversales peuvent être déduites des équations d'équilibre, en tenant compte des conditions aux limites et les conditions d'interface.

2.3 Modélisation par éléments finis :

La prochaine section est dédiée à l'exploration et à l'analyse numérique par la méthode des éléments finis en deux dimensions (2D) du comportement mécanique d'un quart du stratifié de type $[0/90_n]_s$.

Dans un premier temps le stratifié étudié est de type $[0/90_2]_s$ soumis à une traction uni axiale, ayant un rapport d'épaisseur de couches « $\alpha = 1/2$ » et un rapport géométrique de fissuration « $a = 10, 7.5, 6$ », ou on va discuter la comparaison avec le modèle aux éléments finis de Besbaci [25] et le modèle analytique de Berthelot et Le Corre [16] afin de valider notre modèle et améliorer les résultats précédents.

Ensuite, on se concentrera sur une étude paramétrique d'un quart du stratifié $[0/90_3]_s$ en introduisant les trois types de fissurations dans un même plan (fissuration transversale, longitudinale et délaminage). Le stratifié dans ce cas est soumis à une sollicitation en traction bi axiale et cela pour des rapports d'épaisseur de couches « $\alpha = 1, 1/2, 1/3$ » et différentes valeurs du rapport géométrique de fissuration « $a = 25, 10, 5$ ». Enfin, on va étudier l'influence de la longueur de la fissuration longitudinale sur le comportement du stratifié endommagé.

L'analyse d'un seul quart du stratifié se porte sur le fait que la condition de symétrie du composite est vérifiée car les longueurs délaminées $l_l = l_r$, ainsi que pour faciliter le calcul et réduire les pourcentages d'erreur.

Afin de conduire notre analyse par simulation numérique, nous avons employé le logiciel « ABAQUS », qui est utilisé pour résoudre des problèmes d'ingénierie complexes comme dans les secteurs de l'automobile ou de l'aéronautique en se basant sur la méthode des éléments finis. Il est développé et commercialisé par la société Dassault Systèmes, l'interface du logiciel se décompose en 3 parties principales :

- Partie modélisation : cette partie est dédiée pour définir la géométrie concernant l'étude, tout en la créant directement sur le logiciel ou l'importer à partir des logiciels de conception (CAO), aussi pour définir les propriétés du matériau utilisé dans la simulation.
- Partie configuration : après avoir créé le modèle voulu cette partie consiste à définir les conditions aux limites du problème tel que la contrainte, chargement, blocage des degrés de libertés suivant les différents axes ainsi que les résultats (valeurs et courbes) à afficher à la fin de la simulation.
- Partie visualisation : considérée comme la dernière étape de l'étude, ça consiste à visualiser et analyser les courbes et les résultats déjà définis dans la partie précédente.

2.3.1 Conditions aux limites :

Pour observer la progression des dommages de fissuration transversale, longitudinale et délaminage, la plaque étudiée a subi des essais de traction, qui ont été effectués en assurant un déplacement nul dans les directions OX et OY.

Les figures 2-2 jusqu'à 2-7 illustrent les conditions dans lesquelles les tests sont effectués.

- Sollicitation en traction appliquée via des déplacements longitudinaux suivant l'axe OX (figure 2-3).
- Sollicitation en traction appliquée via des déplacements transversaux suivant l'axe OY (figure 2-6).
- Les conditions de symétrie conduisent à supprimer les déplacements transversaux du quart de stratifié tel que :

-Déplacement longitudinal nul suivant l'axe OX : $u=0$

-Déplacement transversal nul suivant l'axe OY : $v=0$

- Pour analyser le délaminage entre les couches 0 et 90 présenté dans (figure 2-7), la couche fine délaminée a été divisée en paires de nœuds : un nœud dans la couche 0 et un nœud avec les mêmes coordonnées dans la couche 90.
- Le frottement entre le pli 0 et le pli 90 a été introduit en imposant une contrainte transversale sur chaque élément de la partie délaminée (figure 2-6).
- La fissure transversale est modélisée sous forme semi-elliptique (figure 2-3).
- Les fissures transversale et longitudinale sont modélisées sous forme rectangulaire plane (figure 2-6).
- Les fissures transversales sont considérées comme des bords libres (aucune contrainte de cisaillement) (figure 2-6).
- La fissure longitudinale est sollicitée avec une contrainte transversale (figure 2-6).

2.3.2 Maillage :

Le but du maillage est de discrétiser le système en décomposant la structure en plusieurs éléments afin de définir précisément la géométrie, assurant ainsi un bon processus de simulation numérique.

Dans les cas présents, pour garantir la fiabilité des résultats, on a choisi un maillage structuré quadratique de taille 0.03mm pour mieux représenter la structure du stratifié étudié. (figures 4-7).

a) Stratifié fissuré par fissure transverse et délaminage :

Pour ce cas on a modélisé un stratifié de type $[0/90_2]_s$ avec l'épaisseur de chaque couche de 0.203mm. Le matériau choisi est l'époxyde 3502 fibre de carbone AS4 (figure 2-2).

| | | Ply Name | Region | Material | Thickness | CSYS | Rotation Angle | Integration Points |
|---|---|----------|----------|----------------|-----------|---------|----------------|--------------------|
| 1 | ✓ | Ply-1 | (Picked) | Material-comp | 0.203 | <Layup> | 90 | 3 |
| 2 | ✓ | Ply-2 | (Picked) | Material-inter | 0.203 | <Layup> | 90 | 3 |
| 3 | ✓ | Ply-3 | (Picked) | Material-comp | 0.203 | <Layup> | 0 | 3 |

Figure 2- 2 : Modélisation des plis du stratifié de type $[0/90_2]_s$ sur ABAQUS.

Une contrainte uni axiale est appliquée sur le stratifié suivant l'axe longitudinale OX et une contrainte transversale appliquée au niveau du délaminage suivant l'axe OY (figure 2-3).

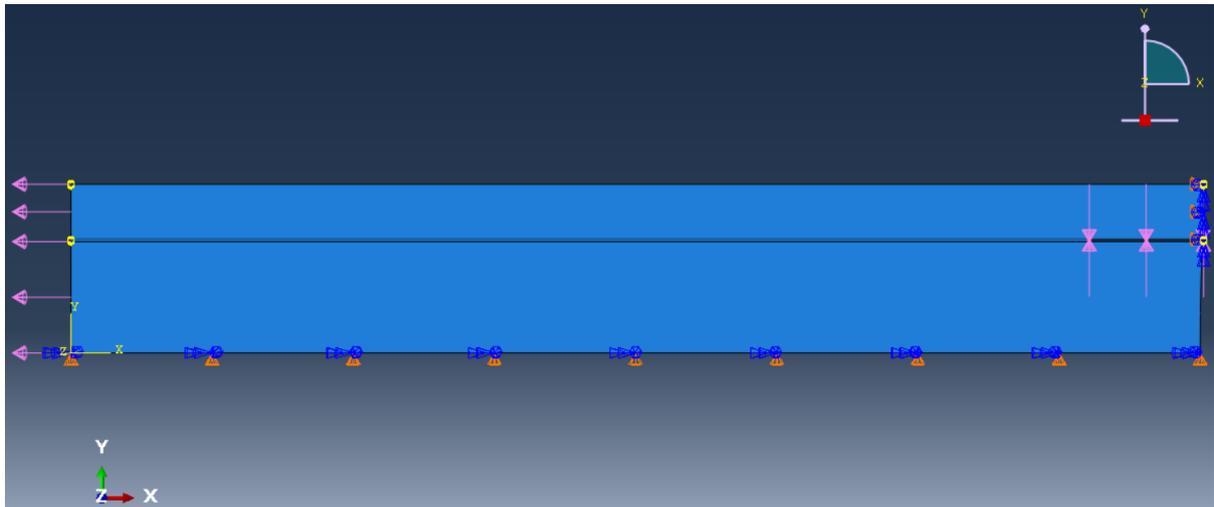


Figure 2- 3 : Modélisation des contraintes appliquées au stratifié de type $[0/90_2]_s$.

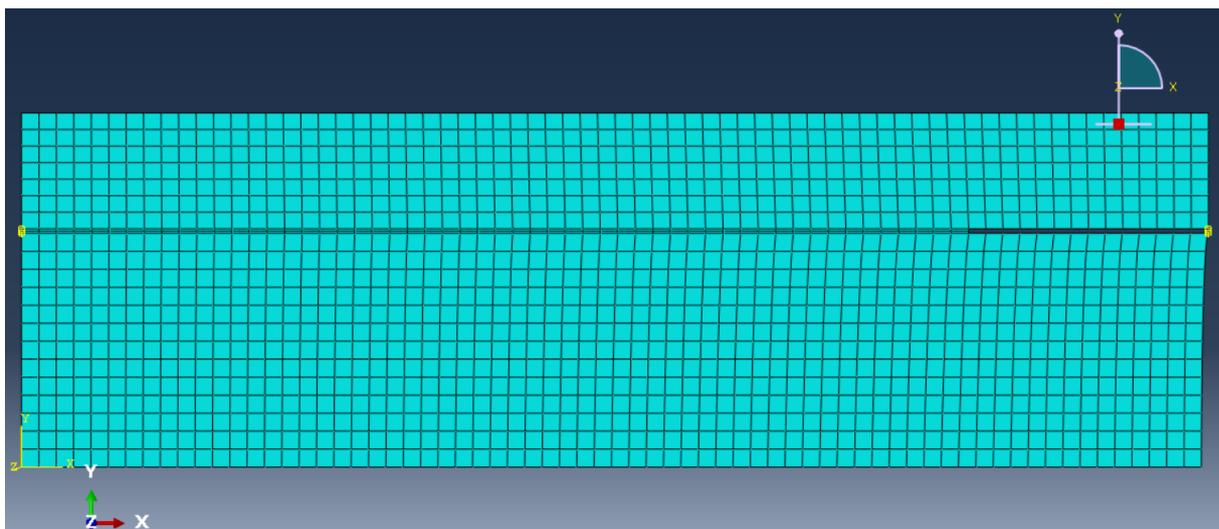


Figure 2- 4 : Maillage quadratique d'un quart du stratifié de type $[0/90_2]_s$ fissuré par fissure transverse et délaminage.

b) Stratifié fissuré par fissure transverse, longitudinale et délaminage:

Pour ce cas on a modélisé un stratifié de type $[0/90_3]_s$ avec l'épaisseur de chaque couche est de 0.125mm ayant une seule fissure longitudinale. Le matériau choisi est le composite époxy 914 fibre de carbone T300 (figure 2-5).

| | | Ply Name | Region | Material | Thickness | CSYS | Rotation Angle | Integration Points |
|---|---|----------|----------|---------------|-----------|---------|----------------|--------------------|
| 1 | ✓ | Ply-1 | (Picked) | Material-comp | 0.125 | <Layup> | 90 | 3 |
| 2 | ✓ | Ply-2 | (Picked) | Material-comp | 0.125 | <Layup> | 90 | 3 |
| 3 | ✓ | Ply-3 | (Picked) | Material-comp | 0.125 | <Layup> | 90 | 3 |
| 4 | ✓ | Ply-4 | (Picked) | Material-comp | 0.125 | <Layup> | 0 | 3 |

Figure 2- 5 : Modélisation des plis du stratifié de type $[0/90_3]_s$ sur ABAQUS.

Une contrainte uni axiale est appliquée sur le stratifié suivant l'axe longitudinale OX ainsi qu'une contrainte transversale suivant l'axe OY.

Un chargement suivant l'axe OY est appliquée au niveau de la fissuration longitudinale et du délaminage. (Figure 2-6)

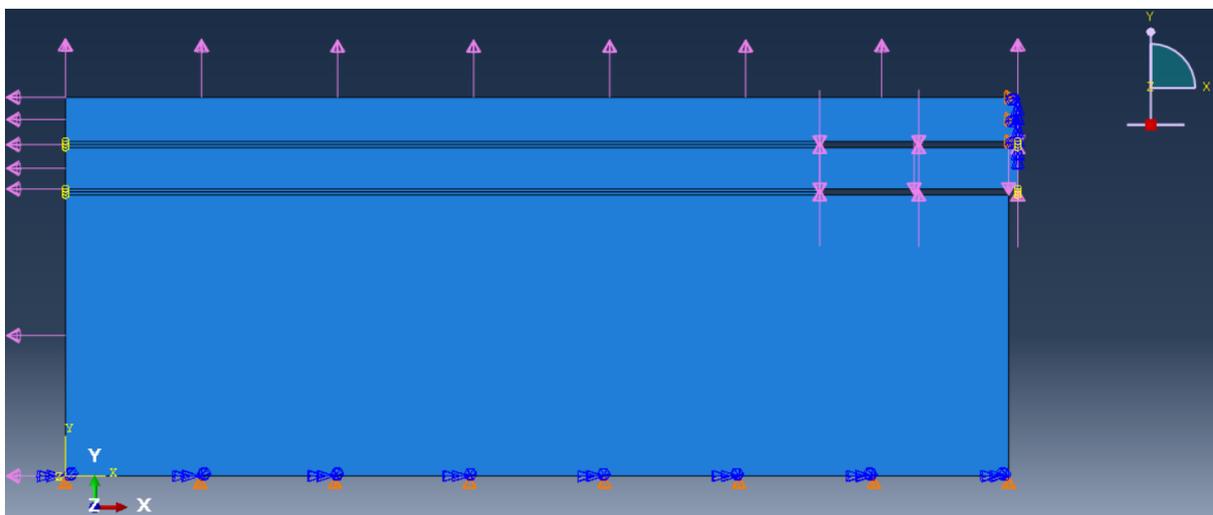


Figure 2- 6 : Modélisation des contraintes appliquées au stratifié de type $[0/90_3]_s$.

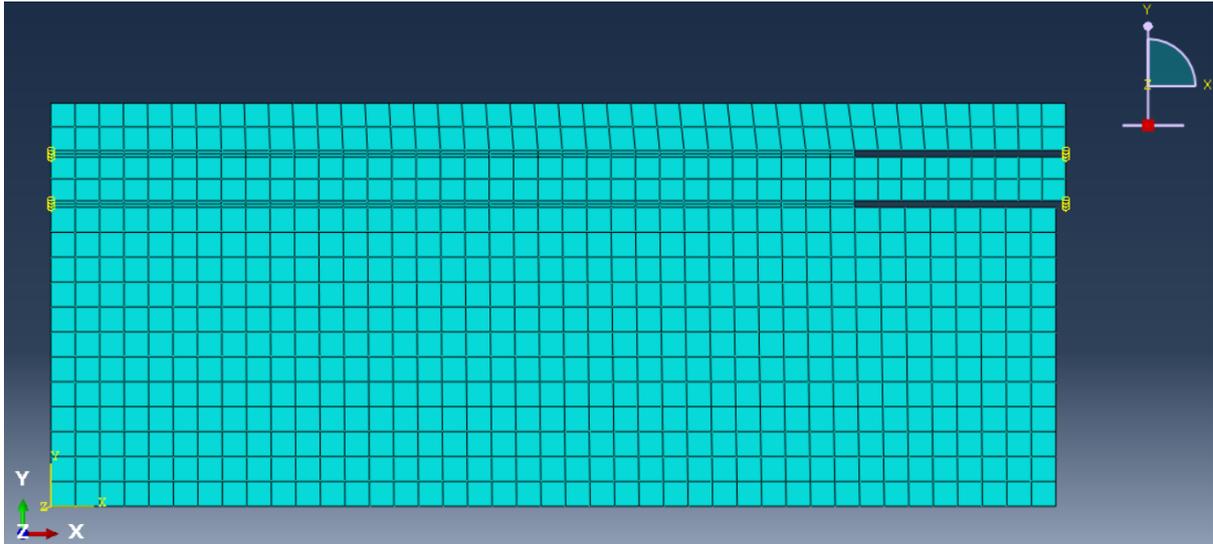


Figure 2- 7 : Maillage quadratique d'un quart du stratifié type $[0/90_3]_s$ fissuré par fissure transverse, délaminage et fissure longitudinale.

2.4 **Conclusion :**

Ce chapitre a exploré des approches analytiques et numériques pour résoudre le problème du comportement mécanique des composites $[0/90_n]_s$ sous chargement uni axiale, endommagés par des fissures transversales et délaminage.

Le chapitre présente le développement des modèles progressifs et paraboliques, qui sont des méthodes de propagation de cisaillement, ces derniers permettent de modéliser le comportement de contrainte longitudinale dans la couche à 90° et le comportement de cisaillement longitudinal sous chargement mécanique ce qui constitue la base du travail de Berthelot et l'objet d'une étude comparative avec les résultats de la simulation au début du chapitre 3.

Pour aborder le comportement mécanique des composites $[0/90_n]_s$ sous contrainte bi axiale, fissurés par des fissures transversales et longitudinales, des méthodes numériques ont également été explorées.

3 Chapitre 03

SIMULATION ET VISUALISATION DES RESULTATS DES STRATIFIES FISSURES $[0/90_n]_s$ SOUS SOLLICITATIONS MECANIQUES

3.1 Introduction :

Le principal but de ce chapitre est de déterminer la répartition des contraintes dans un stratifié $[0/90_n]_s$. Dans un premier temps on va effectuer une comparaison entre les différents résultats numériques obtenus d'un stratifié endommagé par délaminage et fissuration transverse, soumis à une contrainte de traction uni axiale avec les résultats analytiques afin de valider notre modèle numérique.

Ensuite on va introduire un nouveau type d'endommagement dans notre modèle numérique qui est la fissure longitudinale afin de voir l'influence de cette dernière sur le comportement du stratifié endommagé.

A travers des simulations numériques par le code de calcul ABAQUS, nous présentons des résultats du comportement mécanique sur la distribution des contraintes longitudinales et de cisaillements d'un composite fissuré par des fissures intralaminaires et interlaminaires sous l'influence des contraintes en traction bi axiale.

3.2 Simulation numérique :

Dans le cadre de nos recherches, une étude numérique approfondie a été réalisée à l'aide du logiciel ABAQUS dans laquelle nous avons comparé les résultats d'analyse de BERTHELOT, J.-M. et LE CORRE, J.-F [16] présentés dans le deuxième chapitre pour le stratifié fissuré avec fissures transversales et délaminage, validé avec le modèle aux éléments finis ABAQUS de Besbaci, N [25] qu'elle-même a comparé les résultats analytiques d'un stratifié fissuré contenant uniquement des fissures transversales, validé par le modèle aux éléments finis ABAQUS de Doumaz, S. et Touahri, R [17].

Après la comparaison et validation de notre modèle avec le modèle de BERTHELOT, J.-M. et LE CORRE, J.-F [16] et celui de Besbaci, N [25] , on passe à une nouvelle configuration qui consiste à introduire une fissure longitudinale au niveau de la couche 0° en se concentrant sur l'impact de cette dernière sur le comportement du stratifié.

Notre but était en premier lieu d'observer l'influence des différents phénomènes qu'un stratifié composite peut subir, en introduisant des fissures transversales, longitudinales et le délaminage, ensuite faire une amélioration des résultats numériques obtenus précédemment. Nous allons représenter ces résultats sous forme de contraintes longitudinales et de cisaillement, pour chaque stratifié $[0/90_n]_s$ en variant les différentes caractéristiques tel que les rapports géométriques de fissuration « a » et les valeurs du rapport d'épaisseur de couche « α ».

3.2.1 Choix du matériau pour la simulation :

Le matériau composite choisi pour la simulation numérique est le composite carbone époxyde AS4-3502 ayant les propriétés élastiques suivantes :

Tableau 3-1 : Propriétés élastiques du matériau AS4-3502 [16].

| | | | |
|--------------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| $E_0 = 41.7 \text{ GPa}$ | $E_{90} = 13 \text{ GPa}$ | $G_{xz}^0 = 3.4 \text{ GPa}$ | $G_{xz}^{90} = 3.1 \text{ GPa}$ |
| $\nu_{xy} = 0.31$ | $\nu_{xz} = 0.41$ | $h_0 = 0.203 \text{ mm}$ | |

3.2.2 Propriétés de la rupture :

Tableau 3-2 : Propriétés de la rupture [16].

| X(MPa) | Y(MPa) | τ_u (MPa) | τ_f (MPa) |
|--------|--------|----------------|----------------|
| 1500 | 80 | 54 | 10 |

Avec :

X : La limite de rupture de traction longitudinale.

Y : La limite de rupture de traction transversale.

τ_u : La limite de rupture de cisaillement du stratifié.

τ_f : La limite de rupture de cisaillement de l'interface délaminée entre les deux couches 0 et 90.

3.2.3 Choix de la géométrie de fissuration et du délaminage :

Une étude a été réalisée par Doumaz, S. et Touahri, R [17] pour déterminer la géométrie optimale pour la modélisation des fissures transversales. Ils ont choisi la fissure semi-elliptique car c'est la fissure la plus typique qui puisse se produire en pratique. De plus, les résultats obtenus pour de faibles taux de fissuration géométrique pour ce type sont les plus proches du modèle analytique proposé par Berthelot [16].

Pour connaître la géométrie du délaminage, un modèle a été généré par Besbaci, N [25] dans lequel une couche mince, ayant sa propre limite de cisaillement τ_f , a été simulée le long de l'interface de séparation. Lorsque le délaminage se produit, la partie délaminée est retirée de la couche, ce qui lui donne une forme rectangulaire avec très peu d'épaisseur avant déformation (c'est-à-dire avant l'application du chargement). Nous avons comparé cette forme géométrique avec la forme triangulaire et nous avons validé le choix de [25] (voir figures 3-1 et 3-2)

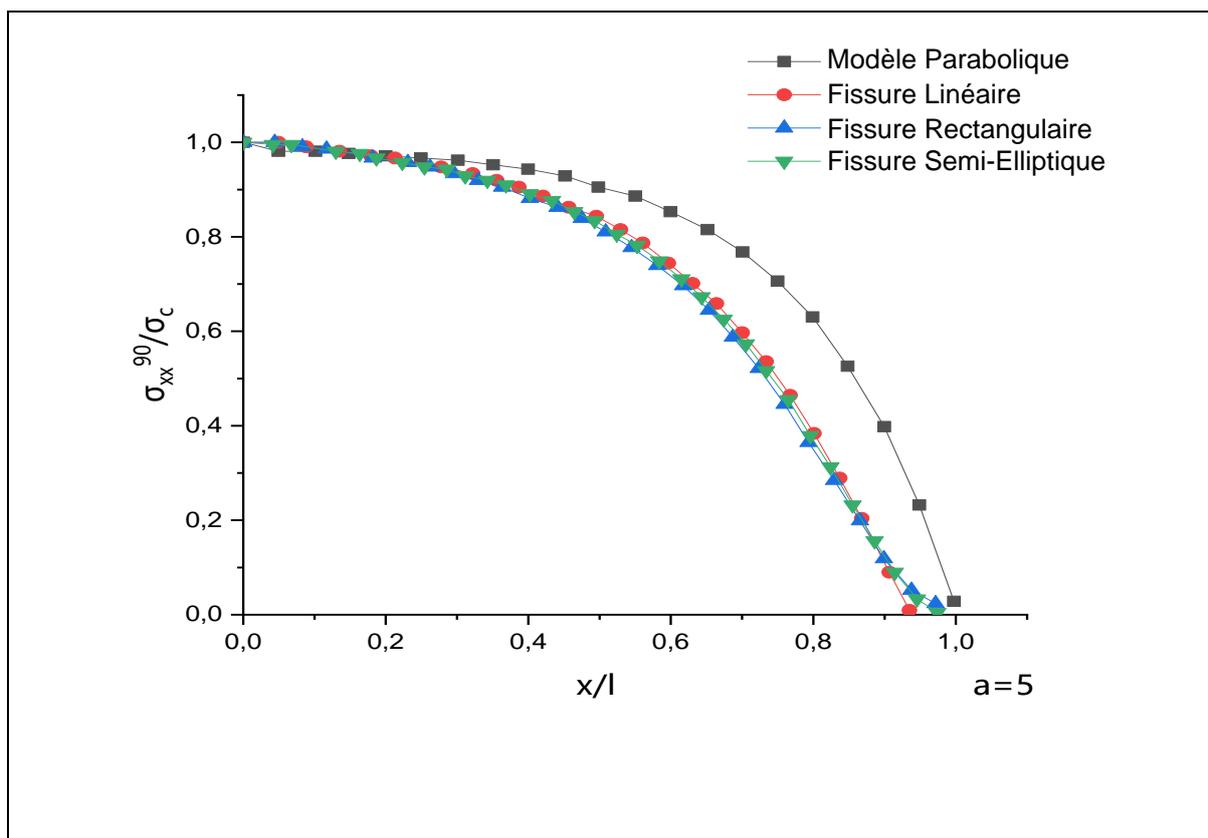


Figure 3- 1 : Variation de la contrainte longitudinale pour un stratifié $[0/90_2]_s$, pour $\alpha=1/2$ et $a=5$ avec différents types de fissures.

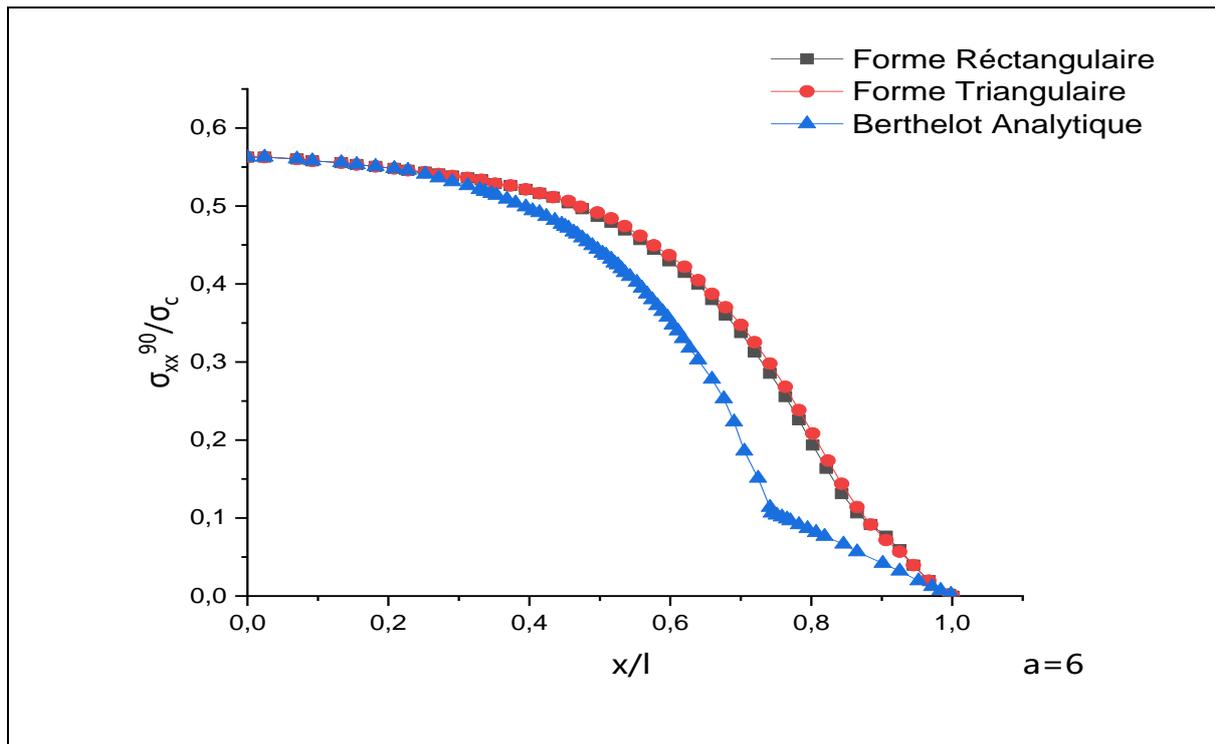


Figure 3- 2 : Variation de la contrainte longitudinale pour un stratifié $[0/90_2]_s$, pour $\alpha=1/2$ et $a=6$ avec différentes formes de la fissure transverse.

3.3 Résultats numériques :

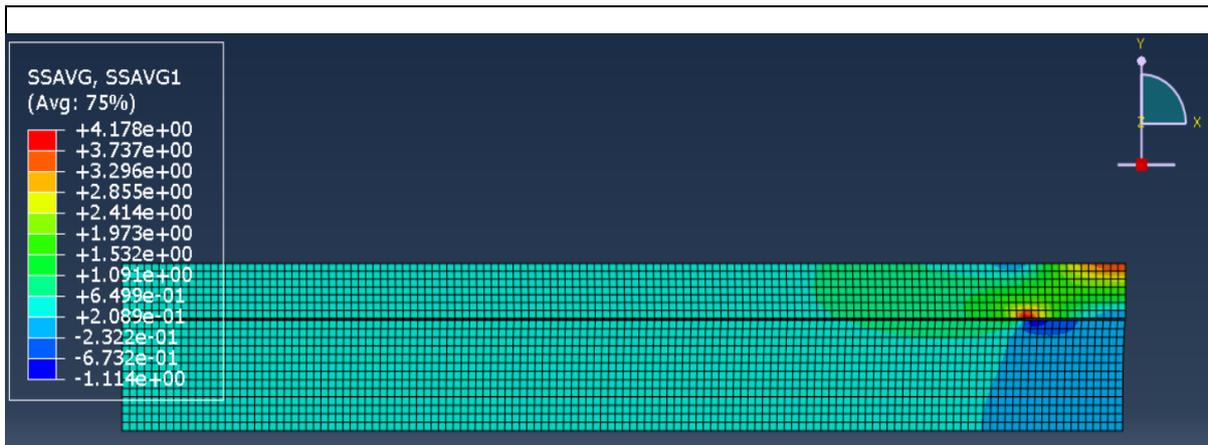
3.3.1 Validation du model numérique :

D'après Berthelot [16], la disposition du matériau stratifié qui a subi une fissure transversale au niveau des couches orientées à 90° et un délaminage à l'interface $0/90$, est représenté par un quart du stratifié qui a une fissure transversale de forme semi-elliptique et un délaminage de forme rectangulaire, soumis à un chargement de traction uni axiale.

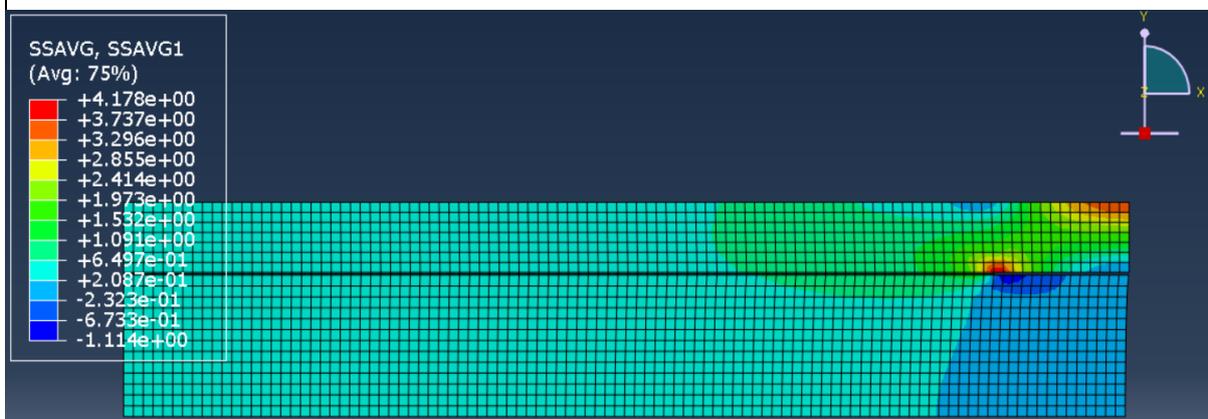
Pour valider et donner une certitude à notre modèle, nous avons comparé nos résultats avec ceux de Berthelot [16] et au même temps avec les résultats obtenues par Besbaci,N [25].

Les champs de contraintes longitudinales et de cisaillement pour chaque stratifié $[0/90_2]_s$ affichés dans les figures 3-3 et 3-4 avec $\alpha=1/2$ et ($a=10 ; 7,5 ; 6$) sont obtenues par le code ABAQUS.

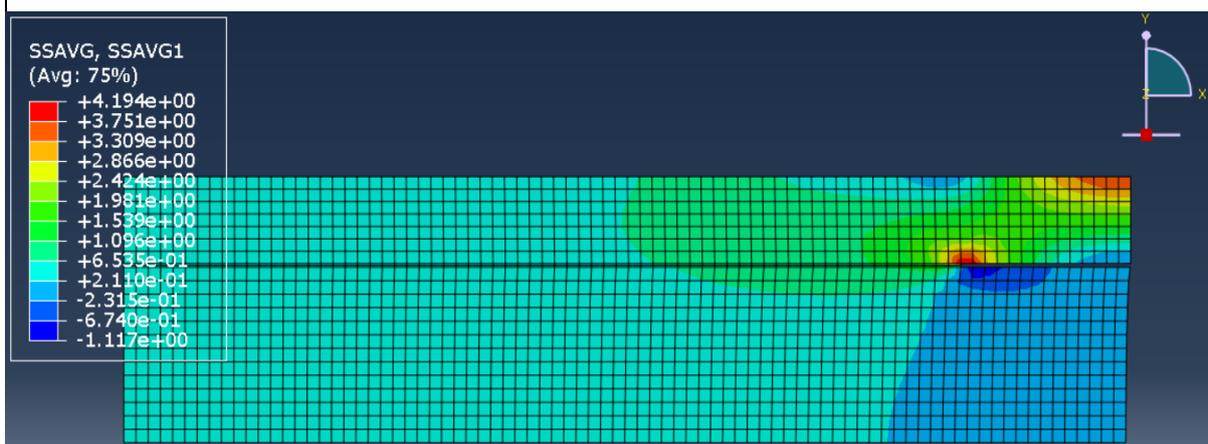
3.3.2 Variation de la contrainte longitudinale :



(a) Un quart de stratifié $[0/90_2]_s$, avec $\alpha=1/2$ et $a=10$



(b) Un quart de stratifié $[0/90_2]_s$, avec $\alpha=1/2$ et $a=7.5$



(c) Un quart de stratifié $[0/90_2]_s$, avec $\alpha=1/2$ et $a=6$

Figure 3- 3 : Variation de la contrainte longitudinale dans un composite stratifié $[0/90_2]_s$, endommagé par fissuration transverse et délaminage.

3.3.3 Variation de la contrainte de cisailement :

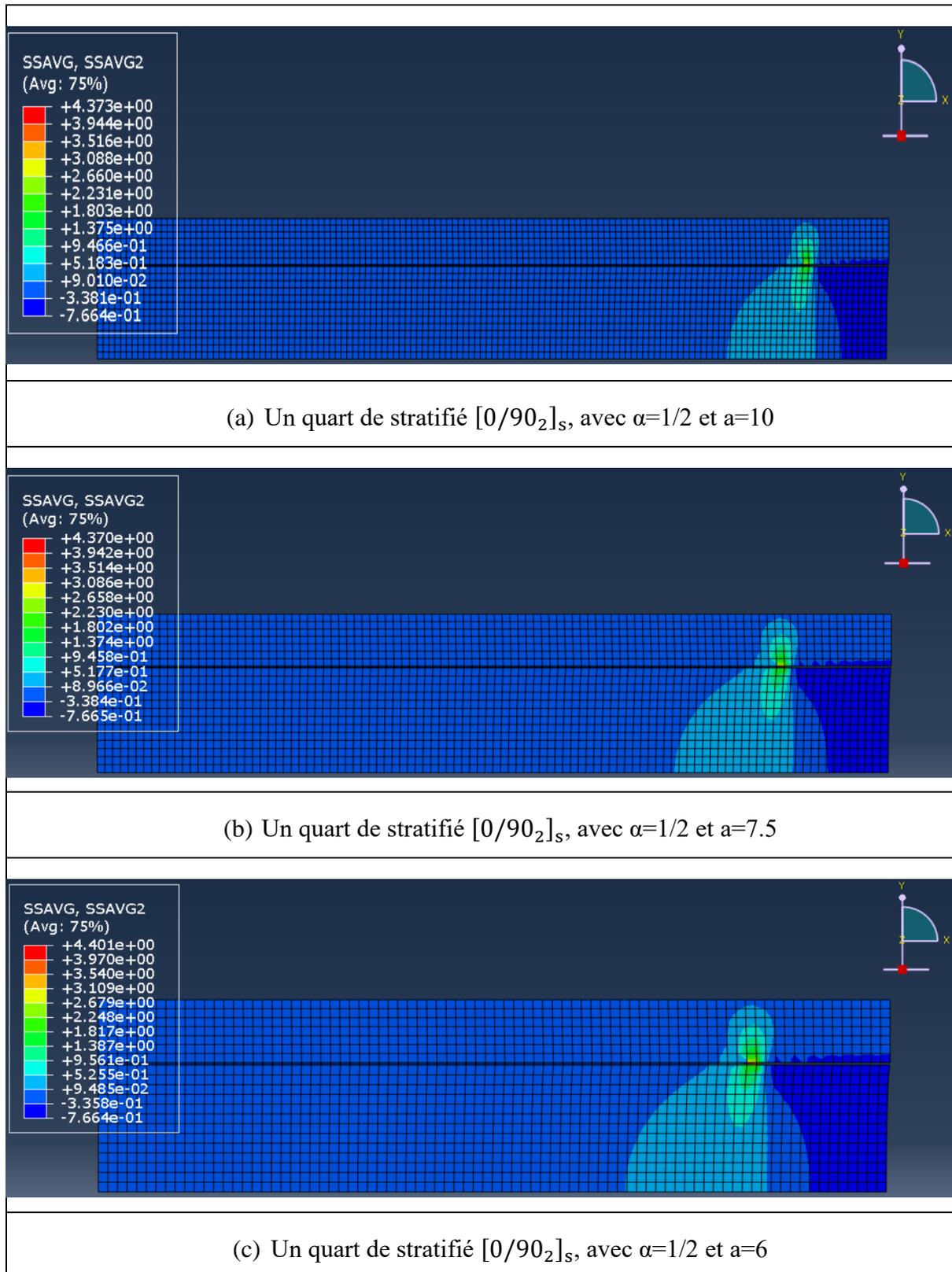
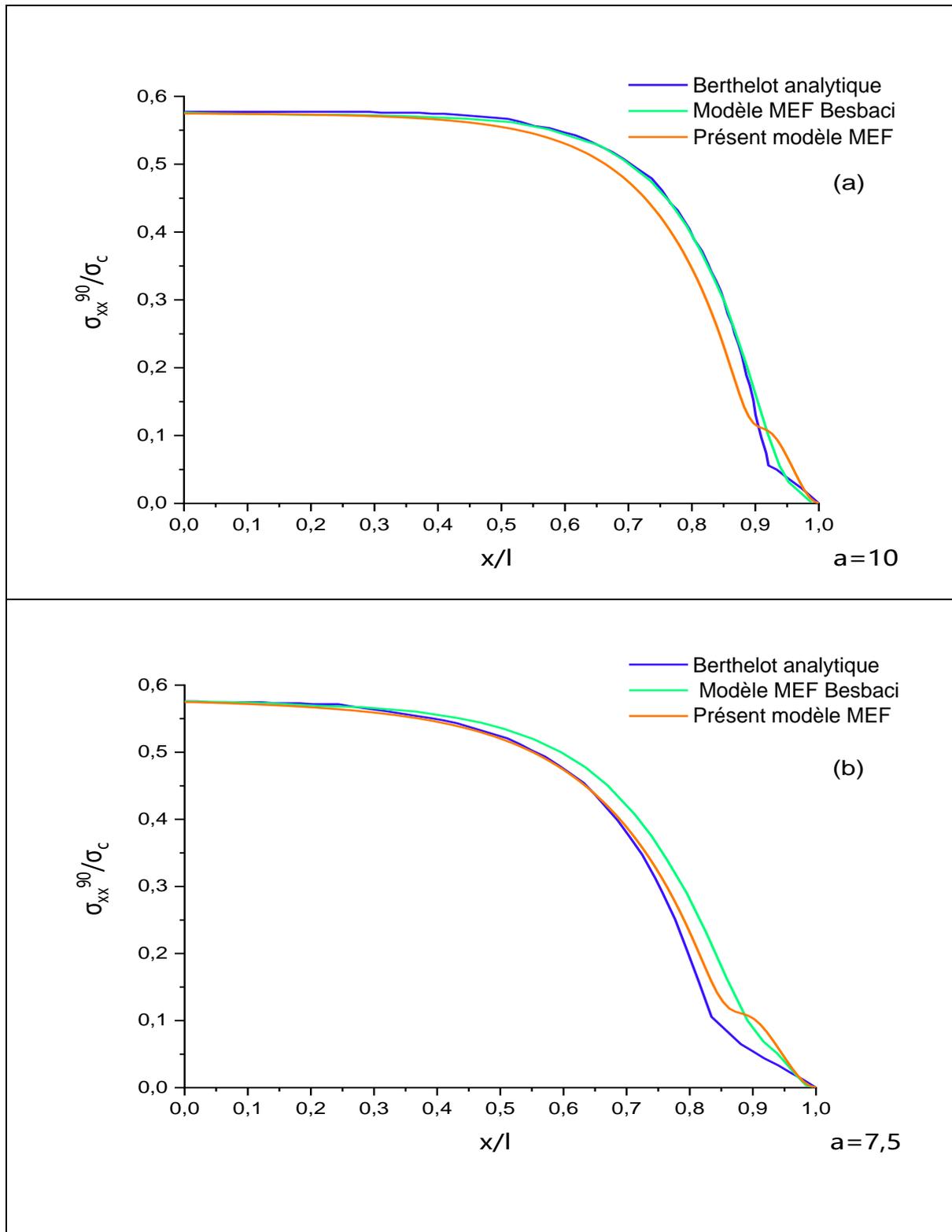


Figure 3- 4 : Variation de la contrainte de cisailement dans un composite stratifié $[0/90_2]_s$, endommagé par fissuration transverse et délaminage

3.3.4 Validation de la contrainte longitudinale par le modèle MEF :

Les représentations graphiques ci-dessous affichent les contraintes longitudinales sur la longueur du matériau, en utilisant des rapports géométriques de fissuration « $a = 10, 7.5, 6$ » et un rapport d'épaisseur de couches « $\alpha = 1/2$ » pour un stratifié $[0/90_2]_s$ (voir figure 3-5).



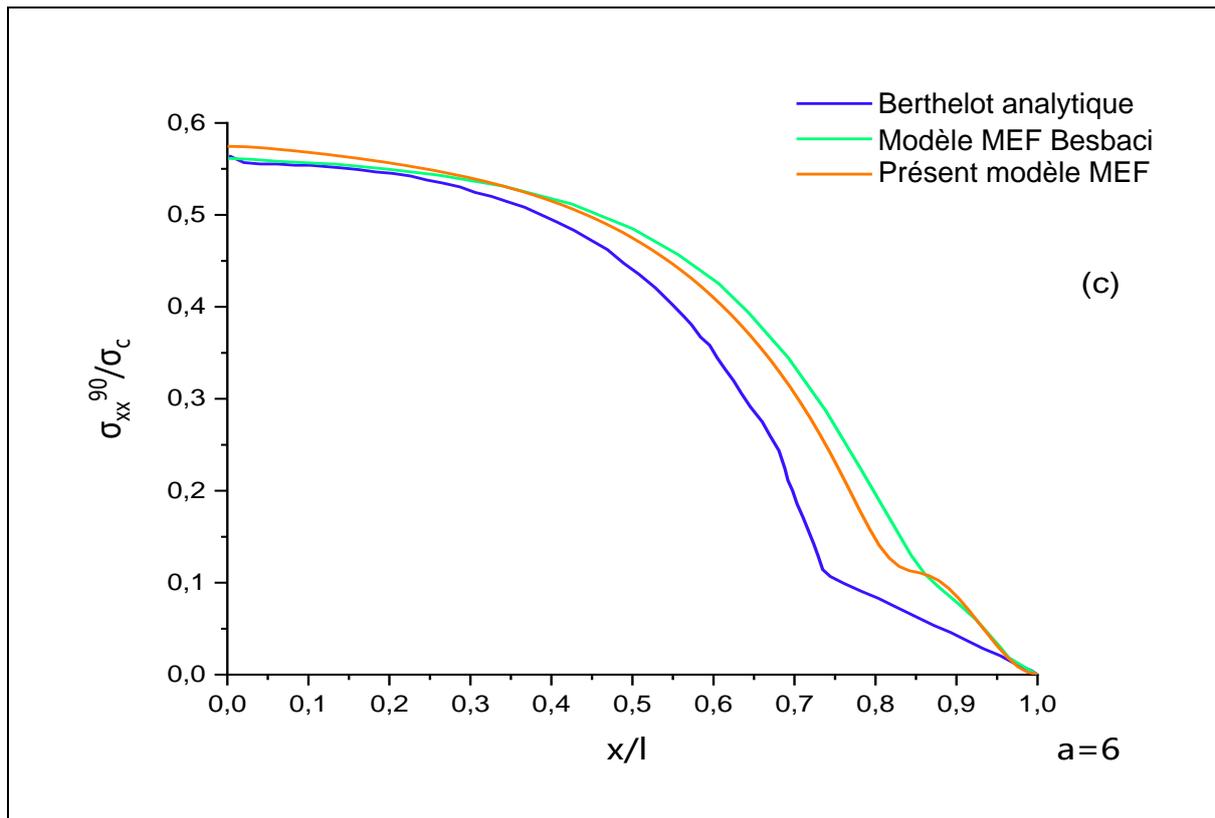
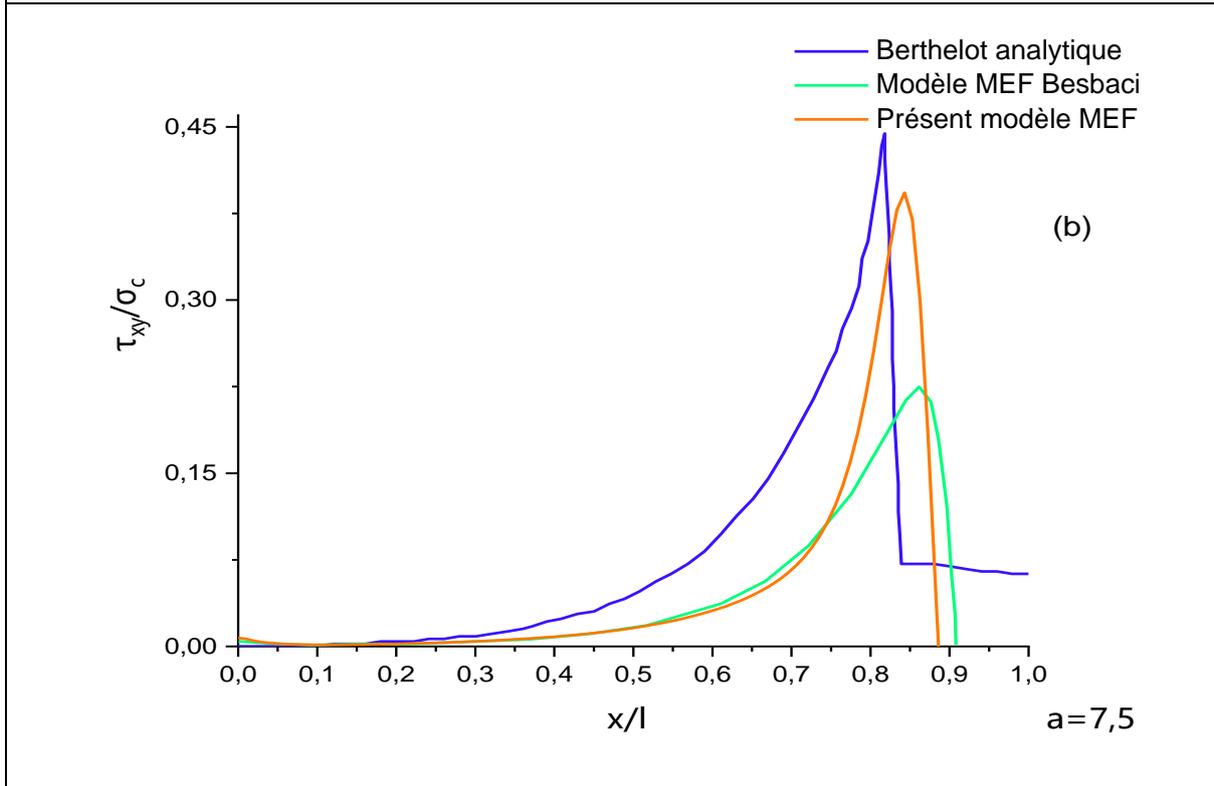
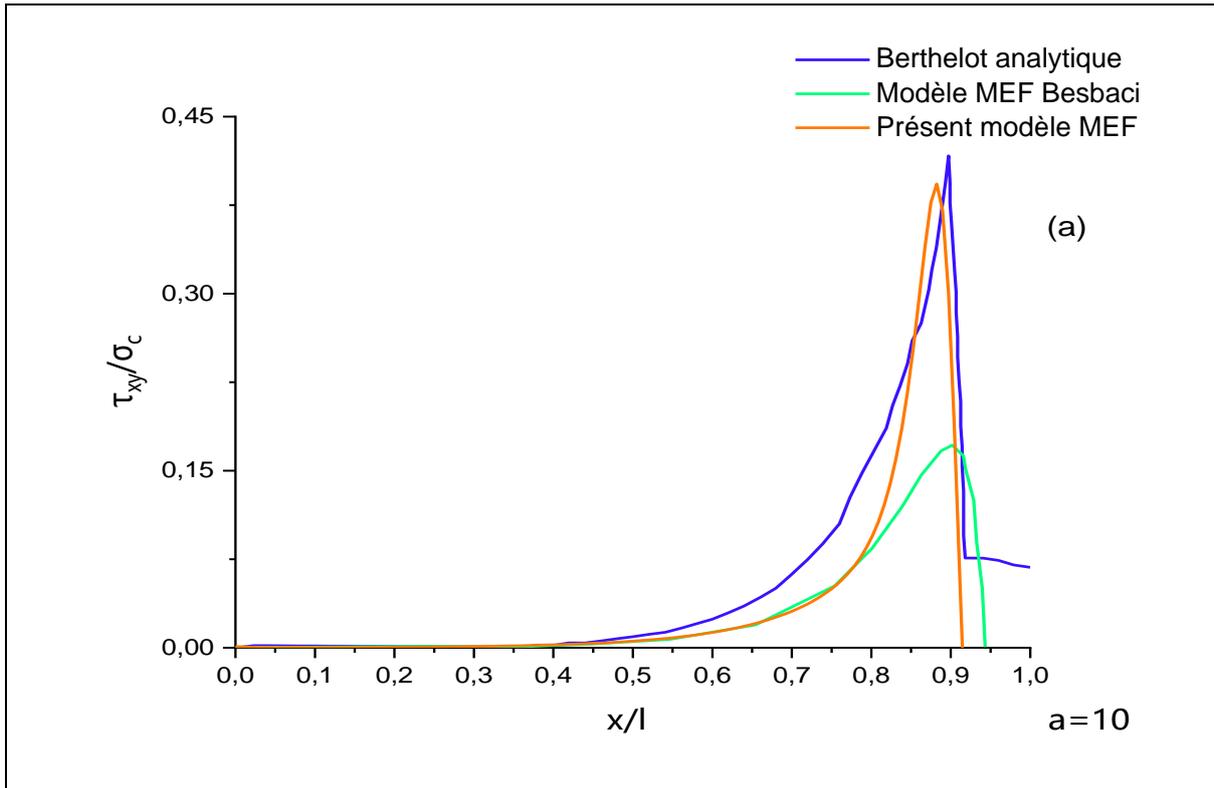


Figure 3- 5 : Validation de la contrainte longitudinale d'un stratifié $[0/90_2]_s$ fissuré par fissuration transverse et délaminage avec le modèle analytique.

3.3.5 Validation de la contrainte de cisaillement par le modèle MEF :

Les représentations graphiques qui suivent affichent les contraintes de cisaillement sur la longueur du matériau, en utilisant des rapports géométriques de fissuration « $a = 10, 7.5, 6$ » et un rapport d'épaisseur de couches « $\alpha = 1/2$ » pour un stratifié $[0/90_2]_s$ (Voir figure 3-6).



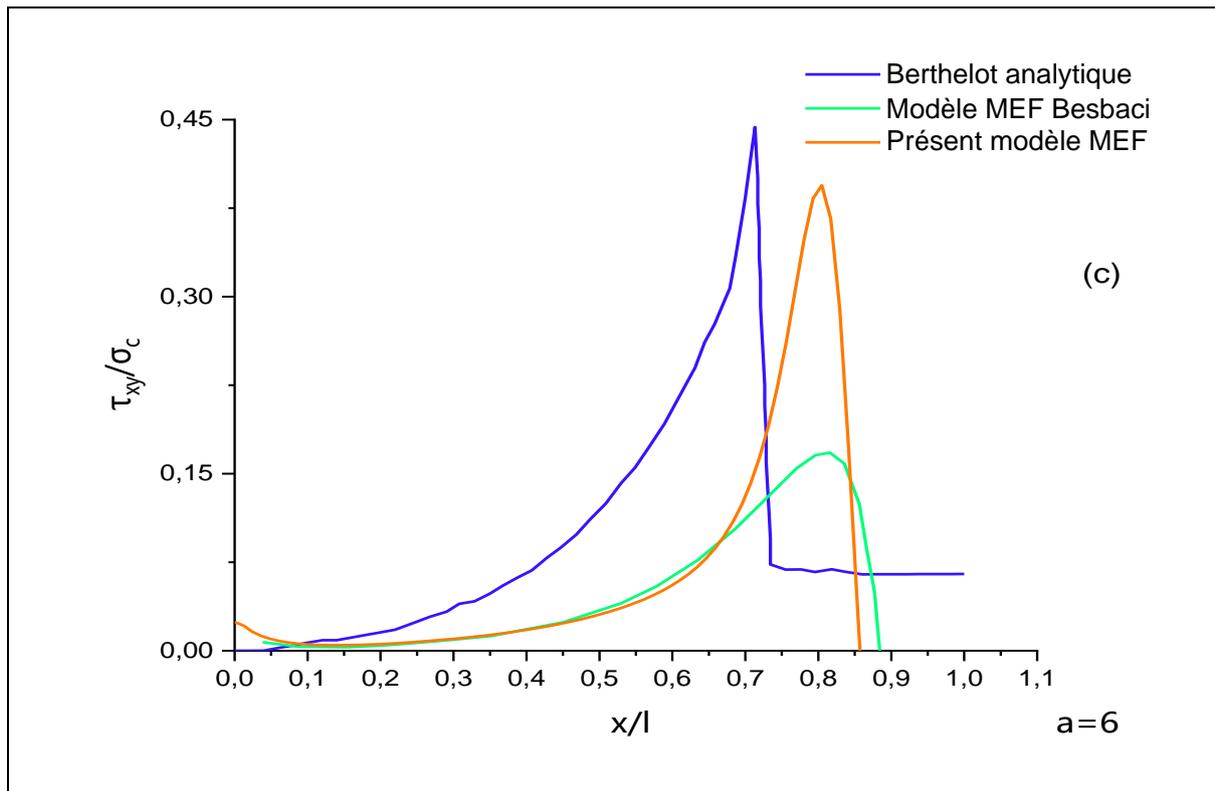


Figure 3- 6 : Validation de la variation de la contrainte de cisaillement d'un stratifié $[0/90_2]_s$ fissuré par fissuration transverse et délaminage avec le modèle analytique.

a) Interprétations des résultats :

Les figures (3-5) et (3-6) représentent la variation de la contrainte longitudinale et de cisaillement en fonction des coordonnées longitudinales pour un stratifié de type $[0/90]_s$ fissuré avec fissure transverse et délaminage soumis à une contrainte de traction uni axiale.

Les résultats existants du modèle numérique de Besbaci,N [25] ont été améliorés pour différentes valeurs du rapport géométrique « $a= 10, 7.5, 6$ » en tenant compte d'un rapport d'épaisseur de couches « $\alpha= 1/2$ ».

La contrainte longitudinale reste maximale à mi-distance entre deux fissures transversales consécutives. A l'approche du plan de fissure, la contrainte commence à diminuer jusqu'à ce qu'elle s'annule au plan de fissure.

La contrainte de cisaillement reste constante mais augmente à proximité du plan de fissure $x/l=0,8$ en raison de la discontinuité de la matière entre la zone délaminée et non

délaminée. Contrairement au modèle analytique de Berthelot [16], la contrainte de cisaillement s'annule au niveau du plan de fissure dans le modèle aux éléments finis.

Les courbes de contraintes longitudinales et de cisaillement du modèle numérique sont proches des courbes de Berthelot [16] lorsque les densités de fissures prennent des valeurs faibles (pour un rapport géométrique élevé).

Les graphes des contraintes longitudinales et des contraintes de cisaillement de notre modèle MEF sont cohérents avec l'étude analytique de Berthelot. Cette comparaison est suffisante pour valider notre modèle.

3.4 Modélisation de la fissuration longitudinale :

3.4.1 Modélisation :

Dans cette partie pour modéliser la fissure longitudinale et afin de valider notre modèle, on va considérer un modèle aux éléments finis ou on va prendre un quart de stratifié $[0/90_3]_s$ soumis à une contrainte de traction bi axiale et endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage, ayant un rapport géométrique de fissuration « $a= 5,10, 25$ » ainsi qu'un rapport d'épaisseur de couches « $\alpha= 1/3$ ».

Les trois types d'endommagement sont modélisés dans le même plan. Deux études sont alors effectuées, la première pour déterminer l'effet de la fissure longitudinale en fonction de différentes valeurs du rapport d'épaisseur des couches « α » et la seconde pour observer l'effet de la longueur de la fissure longitudinale sur le comportement du stratifié.

3.4.2 Choix de la géométrie de fissuration :

Le choix de la géométrie des fissures intralaminaires (fissures longitudinales et transversales) est basée sur le modèle validé par MAATALLAH [32], où les deux fissures sont considérées comme étant de forme rectangulaire.

3.4.3 Choix du matériau :

Dans cette étude on a pris un matériau en époxyde fibres de carbone T300-914 ayant les propriétés élastiques suivantes :

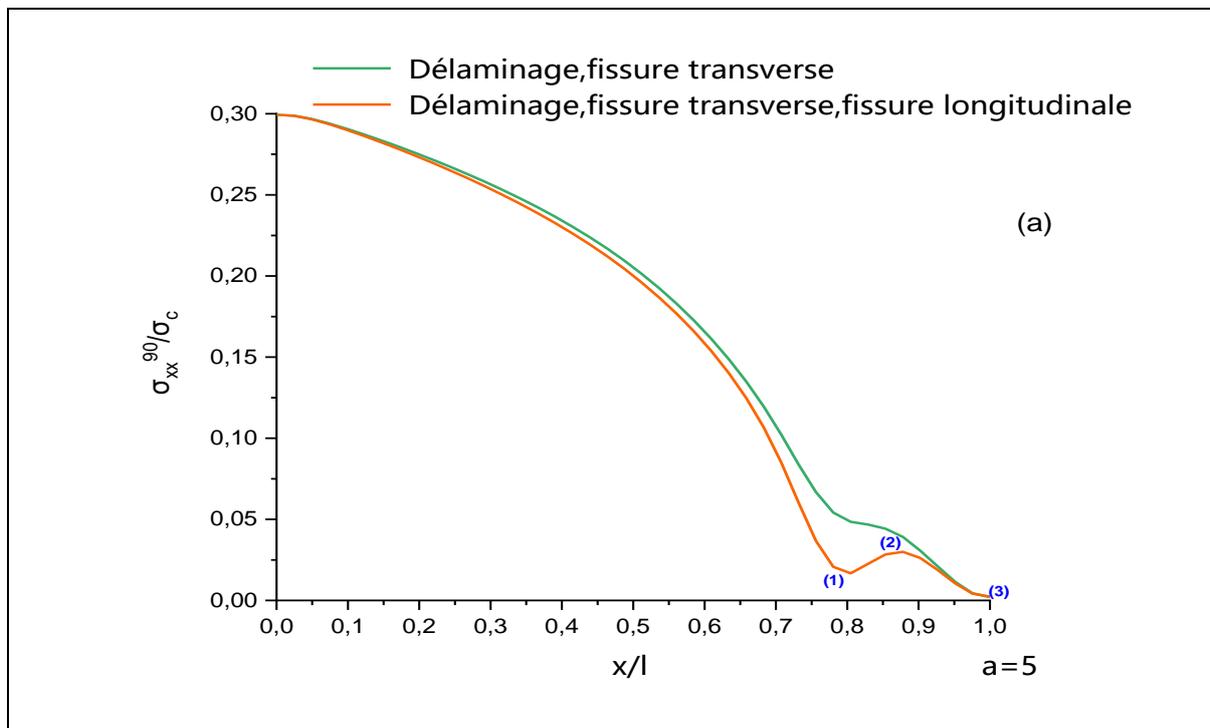
Tableau 3- 3 : Propriétés élastiques du matériau T300-914 [32].

| | | | |
|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| $E_{LT} = 140GPa$ | $E_{TT} = 10 GPa$ | $G_{LT} = 5.7 GPa$ | $G_{TT} = 3.6 GPa$ |
| $\nu_{LT} = 0.3$ | $\nu_{TT} = 0.48$ | $h_0 = 0.125mm$ | |

3.4.4 Impact de la présence de la fissure longitudinale sur le comportement du stratifié $[0/90_3]_s$:

On fera une comparaison entre un stratifié $[0/90_3]_s$ endommagé seulement par fissure transverse et délaminage et un autre stratifié endommagé par fissure transverse, longitudinale et délaminage.

a) Contrainte longitudinale :



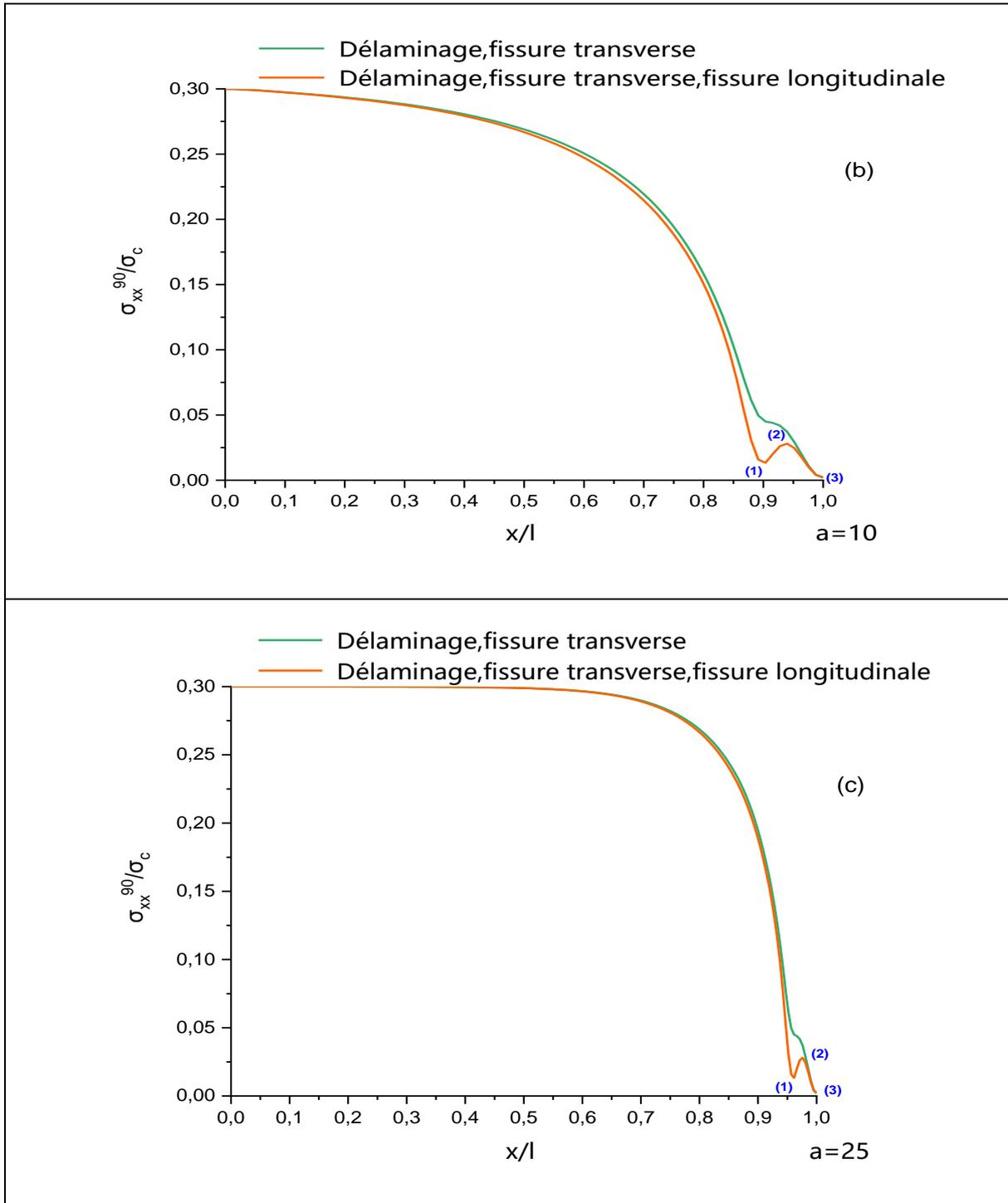
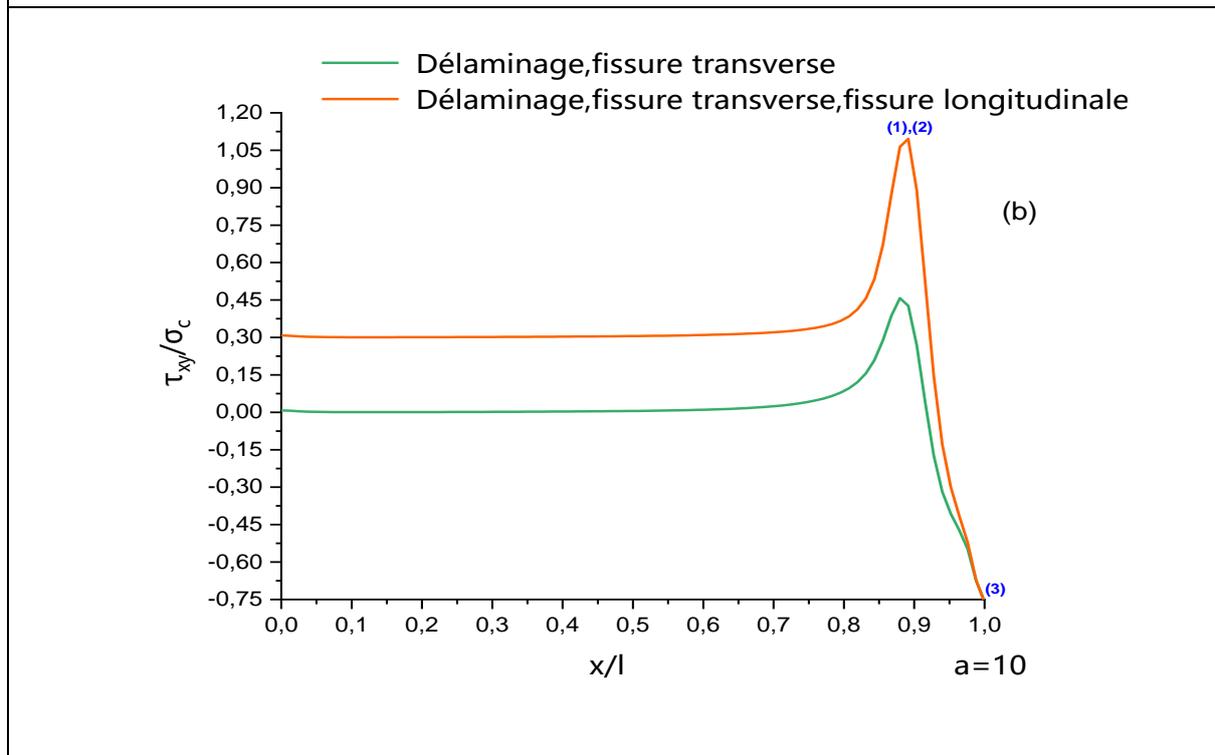
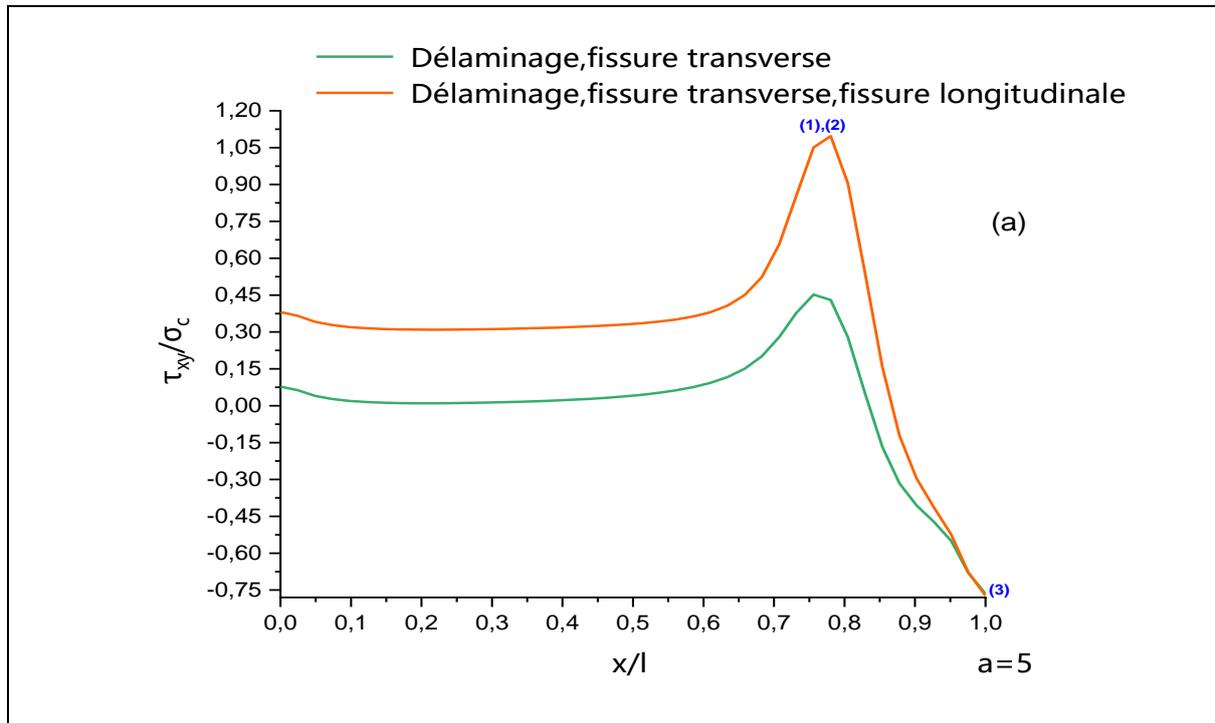


Figure 3- 7 : Variation de la contrainte longitudinale dans un stratifié $[0/90_3]_s$ endommagé par fissuration transverse et délaminage et un stratifié endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différents rapports géométriques.

b) Contrainte de cisaillement :



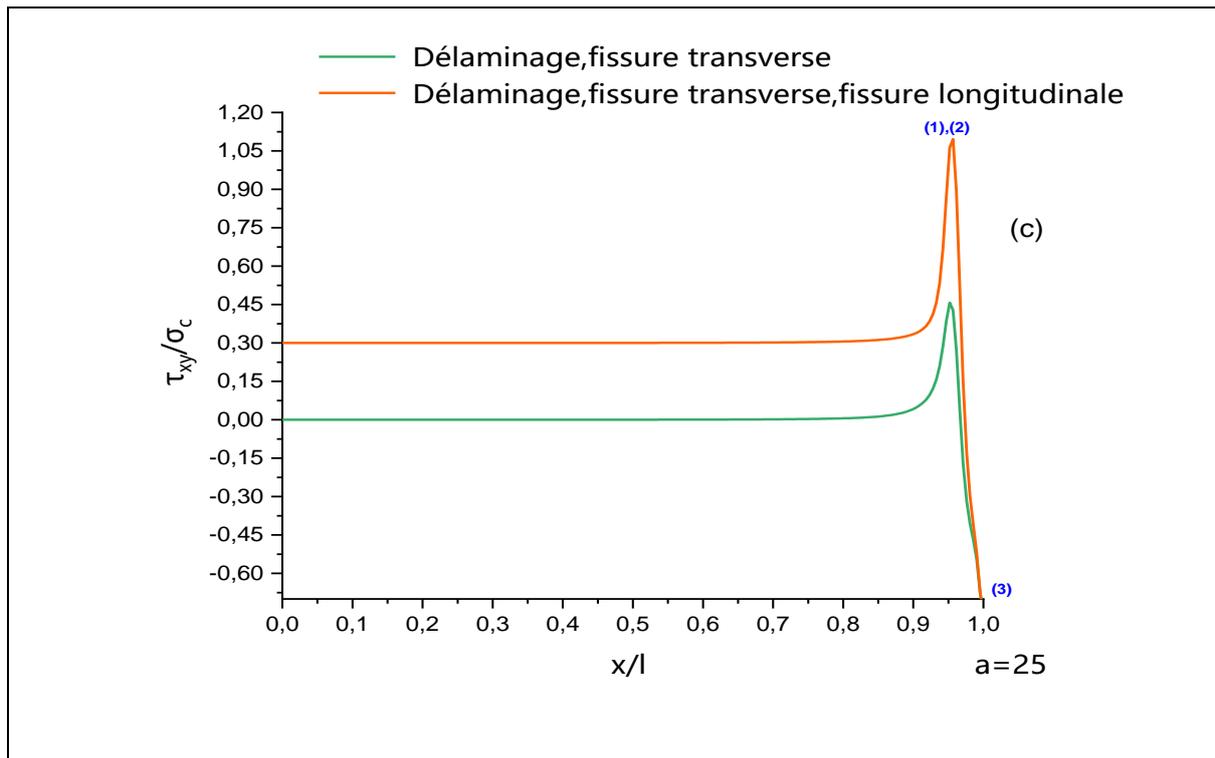


Figure 3- 8 : Variation de la contrainte de cisaillement dans un stratifié $[0/90_3]_s$ endommagé par fissuration transverse et délaminage et un stratifié endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différents rapports géométriques.

c) Interprétation :

La variation des contraintes longitudinales et de cisaillements dans un stratifié de type $[0/90_3]_s$ fissuré avec fissure transverse et délaminage, et d'un autre stratifié fissuré avec fissure transverse, longitudinale et délaminage sont affichés dans les figures (3-7) et (3-8) en fonction des coordonnées longitudinales.

Les résultats montrent un petit écart des contraintes longitudinales entre les deux stratifiés. Par ailleurs, l'évolution de ces contraintes se développe d'une façon presque identique pour les deux stratifiés et pour des densités de fissures faibles (figure 7).

Cette contrainte diminue à proximité du plan de fissure longitudinale au niveau du point (1) avec des valeurs de coordonnées longitudinales $x/l=0.8$, $x/l=0.9$ et $x/l=0.95$ pour les figures 3-7(a),3-7(b) et 3-7(c) respectivement avec un taux de réduction inférieur à 30 %.

Ensuite on remarque un pic de cette contrainte au niveau du point (2) qui est dû au délaminage avec un taux d'augmentation faible, inférieure à 1%.

En s'approchant du plan de fissure transverse, cette contrainte diminue encore une fois et s'annule au niveau du point (3) pour $x/l=1$ avec un taux de réduction de 2.5%.

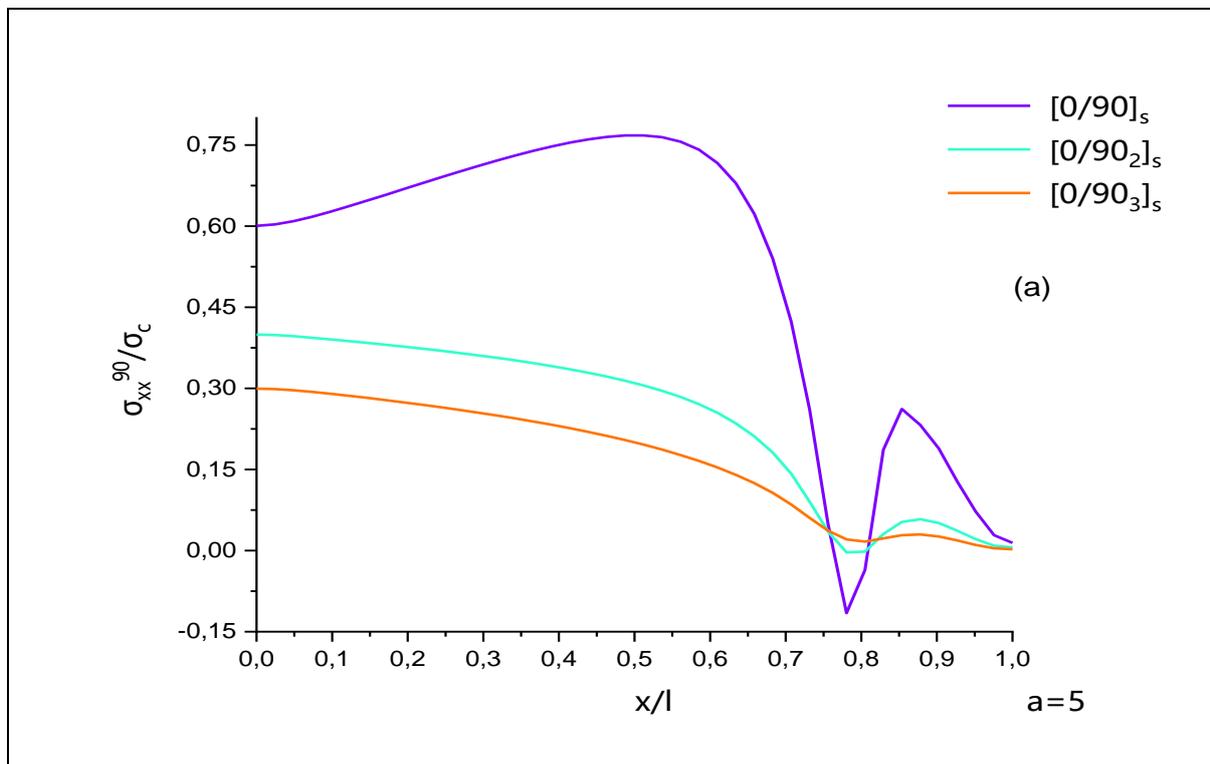
Les résultats montrent aussi un décalage de la contrainte de cisaillement et cela pour les différentes densités de fissures figures 3-8 (a), 3-8 (b) et 3-8 (c), cette dernière prend des valeurs plus remarquables $\tau_{xy}/\sigma_c = 1,2$ dans le cas d'un stratifié qui contient des fissures intralaminaires et interlaminaire (point 1,2) avant de s'annuler au niveau du plan de fissure transversale au point $x/l=1$ (point 3).

Le stratifié sera donc moins rigide et subit des grandes valeurs de la contrainte de cisaillement en raison de la présence de la fissure longitudinale.

En conséquence, la présence des fissures longitudinales ne peut être négligée car elle met en évidence la forte anisotropie des stratifiés composites.

3.4.5 Influence des différents rapports d'épaisseur « α » et différents rapports géométriques « a » sur le comportement d'un stratifié $[0/90_n]_s$ fissuré avec fissures intralaminaires et délaminage :

a) Contrainte longitudinale :



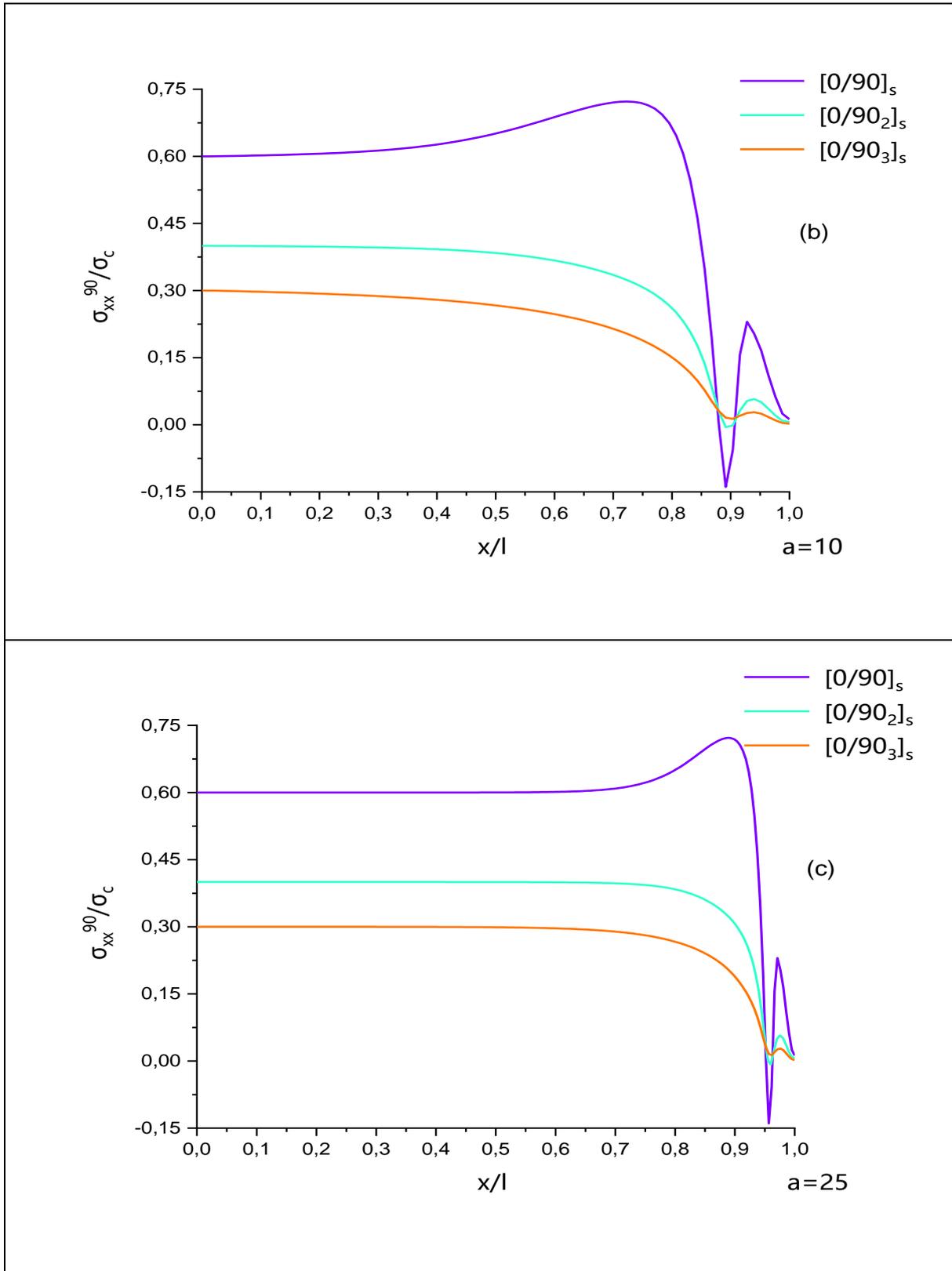
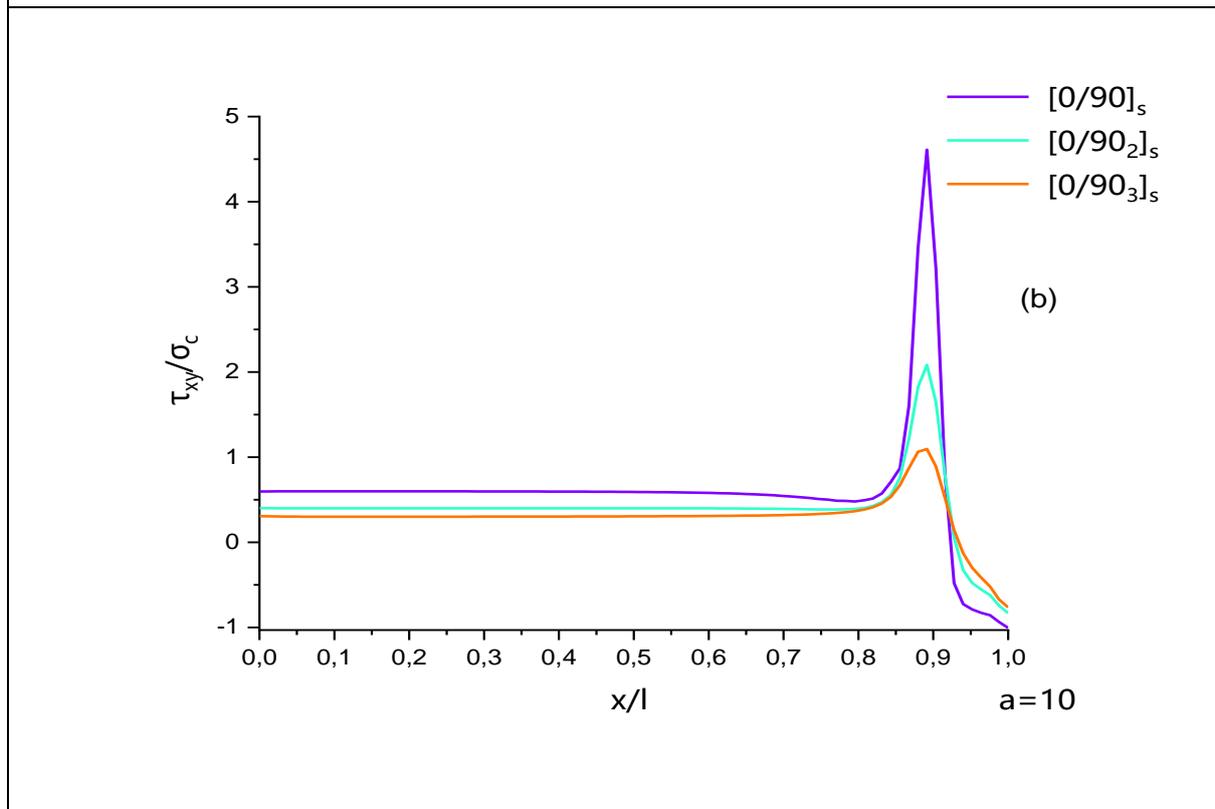
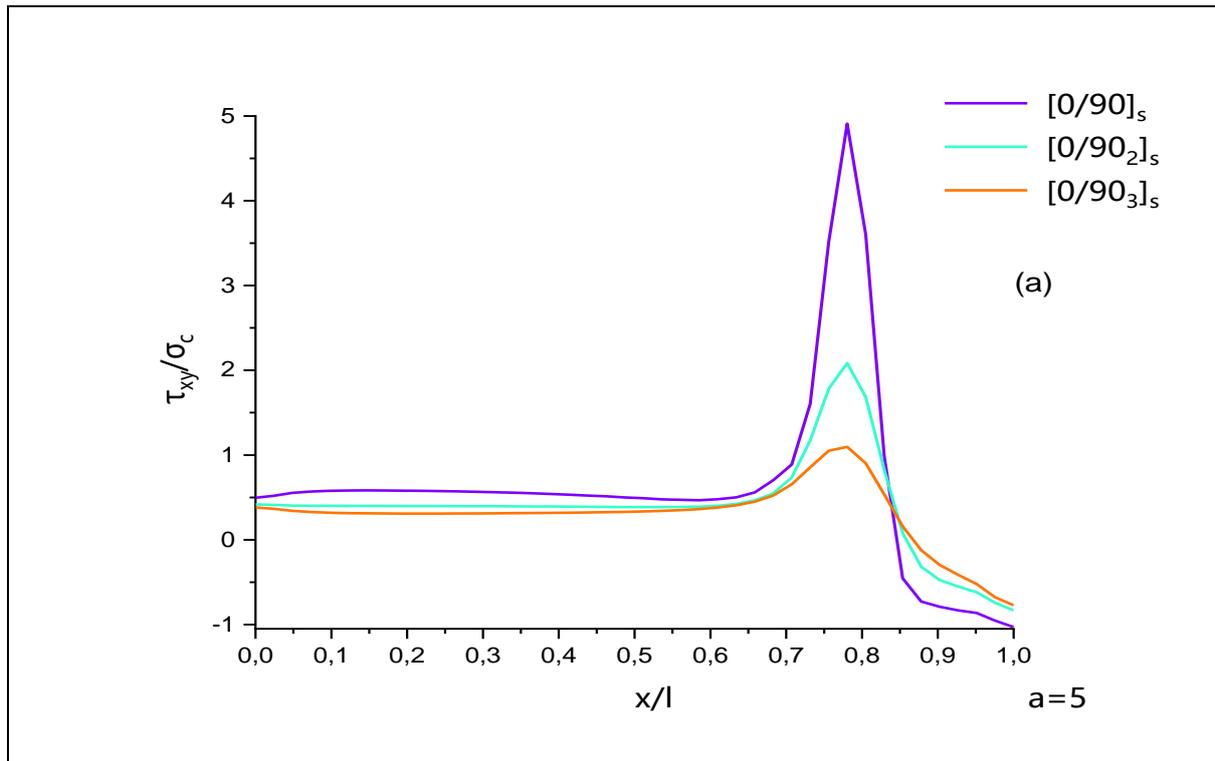


Figure 3- 9 : Variation de la contrainte longitudinale dans un stratifié $[0/90_n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « n »

b) Contrainte de cisaillement :



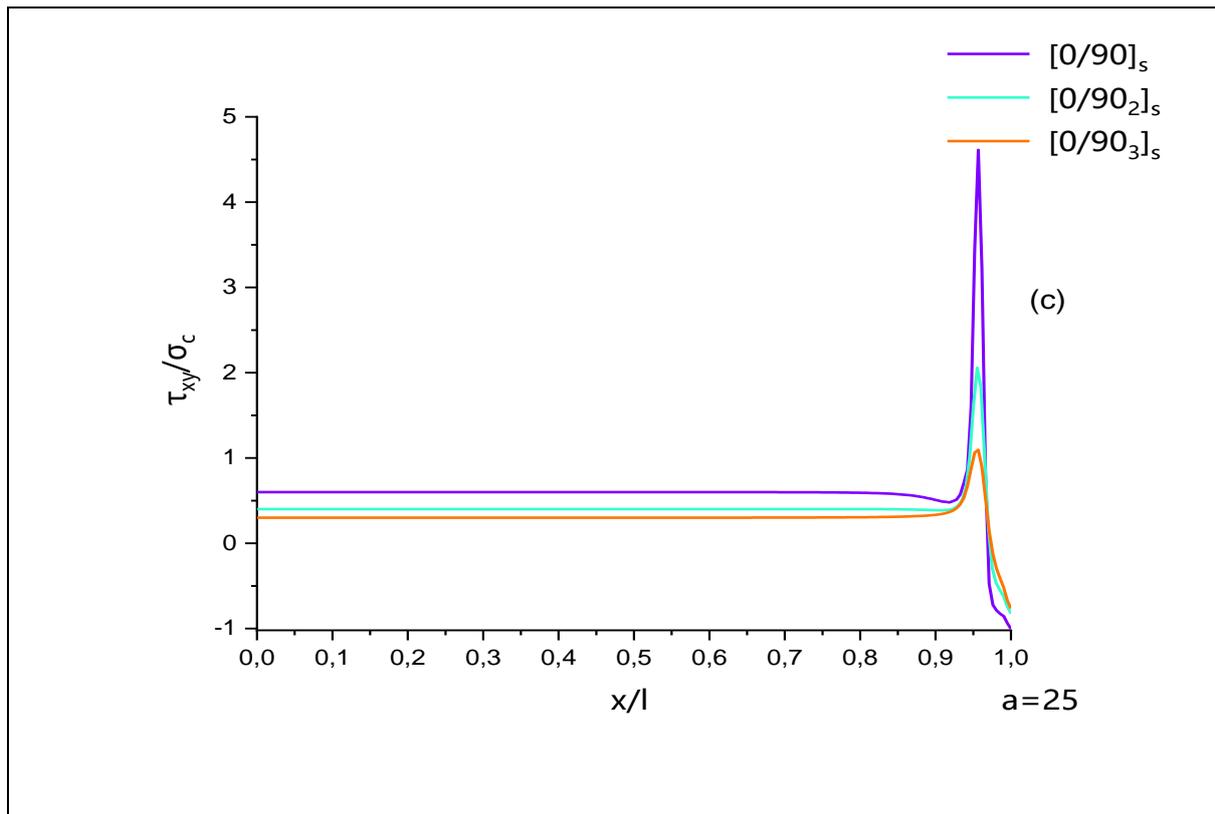


Figure 3- 10 : Variation de la contrainte de cisaillement dans un stratifié $[0/90_n]_s$ endommagé par fissuration transversale, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « α »

c) Interprétation :

La variation des contraintes longitudinales et de cisaillement d'un stratifié fissuré par des fissures transversales, longitudinales et délaminage soumis à une sollicitation bi axiale est illustrée dans la figure (3-9) et figure (3-10) en fonction des coordonnées longitudinales et cela pour différents rapports d'épaisseur de couches « $\alpha= 1, 1/2, 1/3$ ».

La contrainte longitudinale est constante à mi-distance entre deux fissures transverses consécutives avec une valeur de $\sigma_{xx}/\sigma_c = 0,6$. Cette dernière diminue brusquement pour une valeur de rapport d'épaisseur de couches « $\alpha= 1$ » et subit un taux de compression significatif de -0,12 à l'approche du plan de fissure.

Loin du plan de fissure, la contrainte longitudinale entre deux fissures transversales consécutives tend à être uniforme pour une valeur de $\sigma_{xx}/\sigma_c = 0,3$ et $\sigma_{xx}/\sigma_c = 0,4$ dans le cas ou « $\alpha= 1/2$ » et « $\alpha= 1/3$ » avec un taux de réduction de 30% et 20 % respectivement figure 3-9(c), avant de subir une diminution en s'approchant du plan de fissures au point $x/l=0,85$.

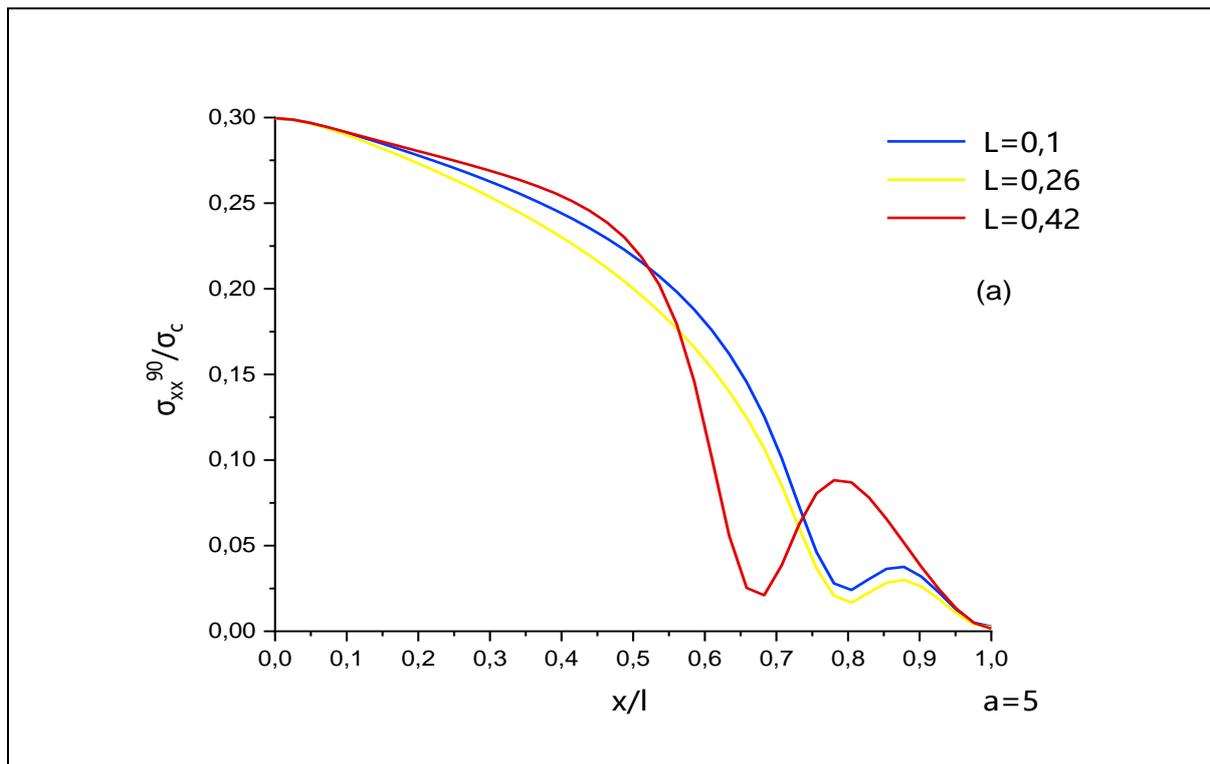
Néanmoins cette contrainte perd cette stabilité pour des valeurs du rapport géométrique plus petites $a=10, 5$. Figures 3-9 (a) et 3-9 (b).

On note que plus le rapport d'épaisseur est petit « $\alpha = 1/2, 1/3$ » plus la réduction des contraintes longitudinale et de cisaillement devient remarquable, contrairement au stratifié avec une seule couche à 90° , la contrainte de cisaillement est plus grande à cause du rapprochement des trois plans de fissures.

L'amorçage des fissurations est plus facile dans le cas de stratifiés contenant une couche à 90° épaisse.

3.4.6 Influence de la longueur de la fissure longitudinale sur le comportement du stratifié $[0/90_3]_s$:

a) Contrainte longitudinale :



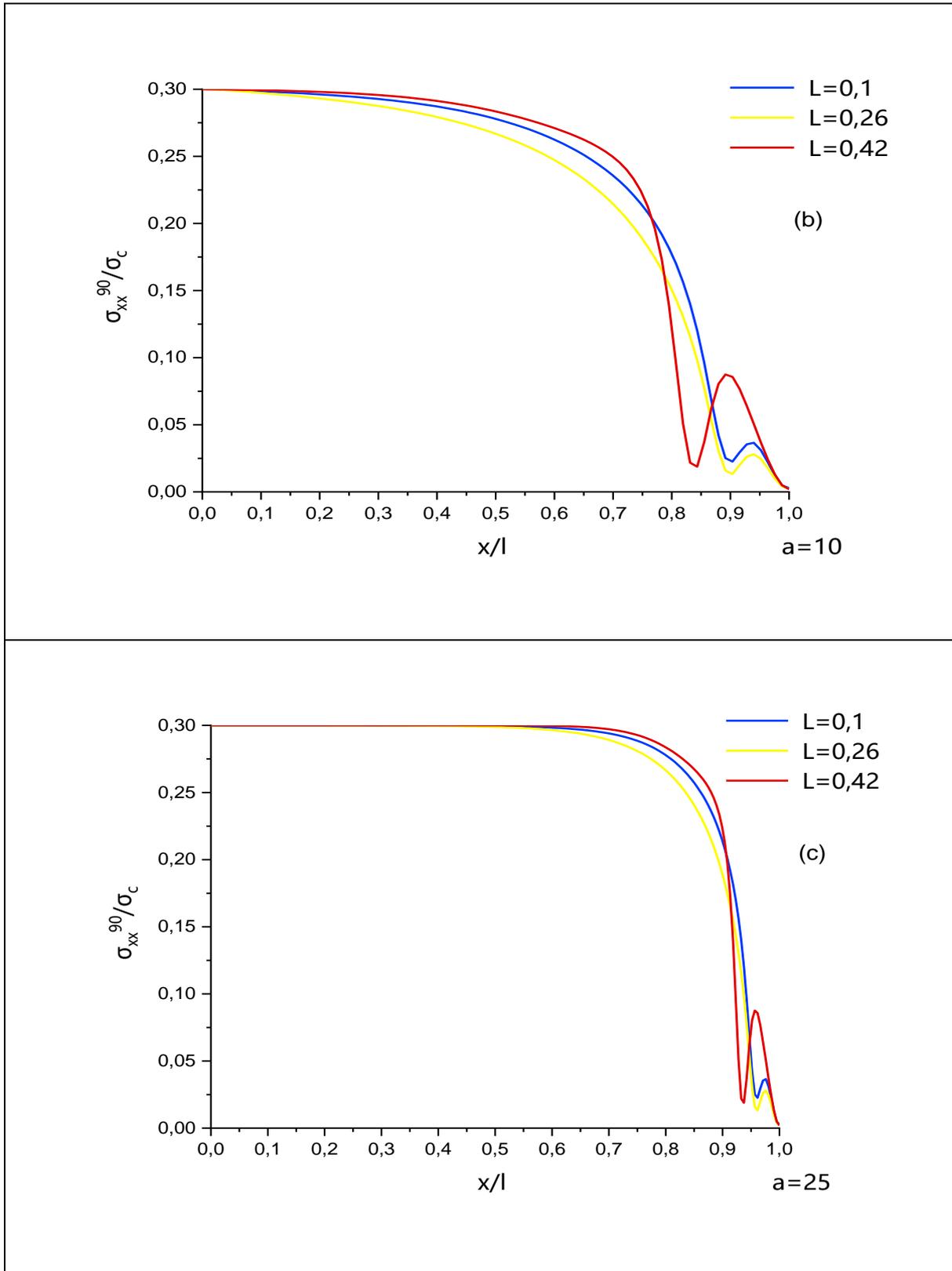
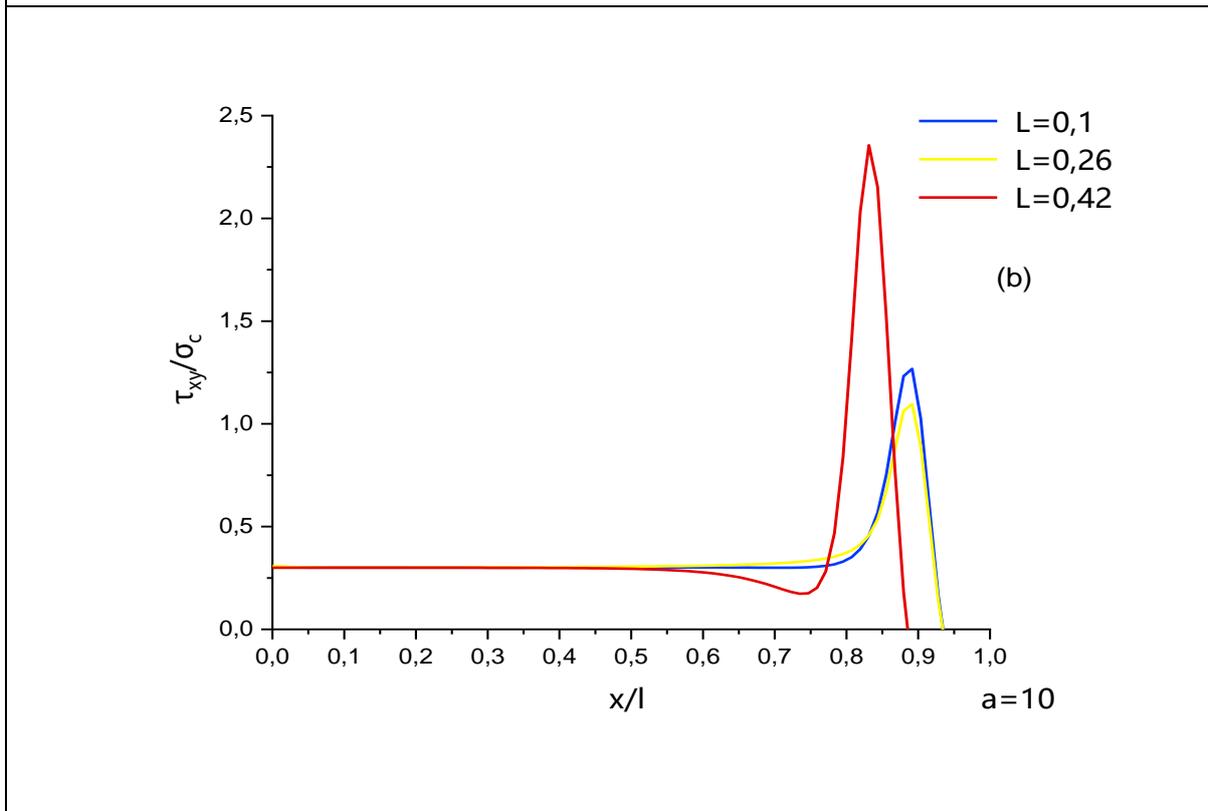
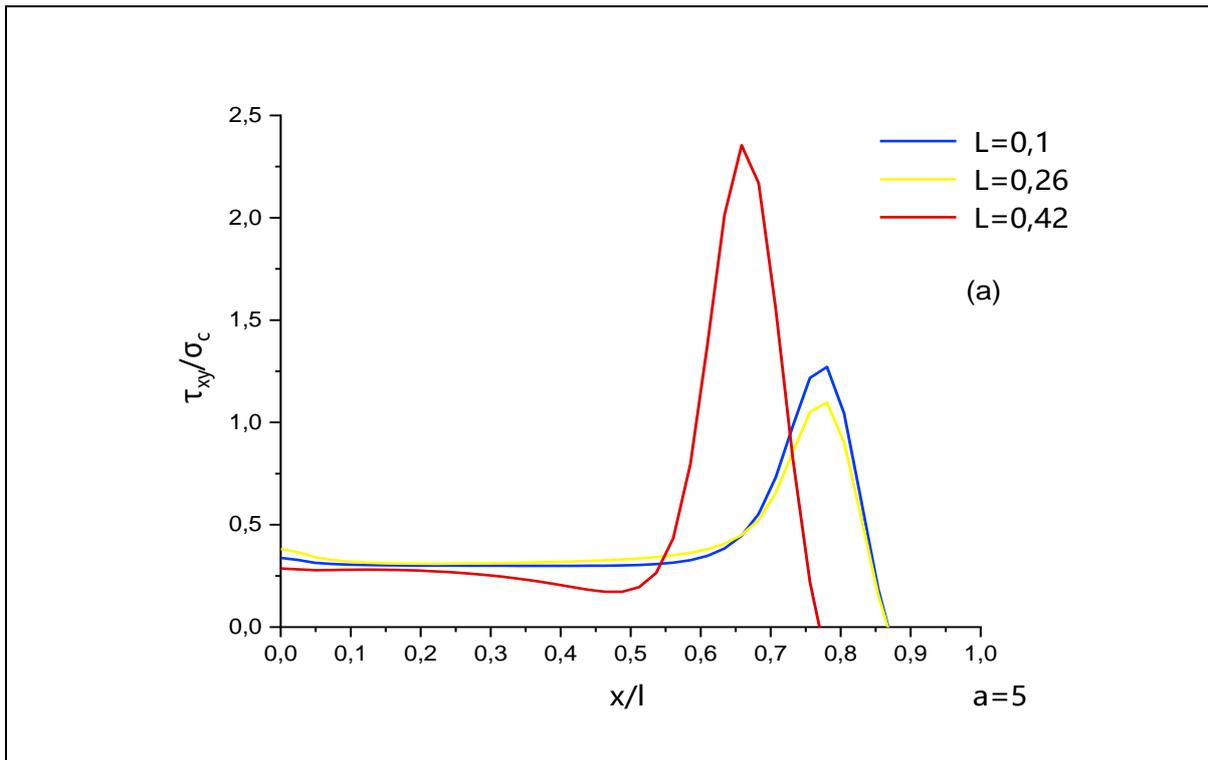


Figure 3- 11 : Variation de la contrainte longitudinale dans un stratifié $[0/90_3]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes longueurs de fissure longitudinale.

b) Contrainte de cisaillement :



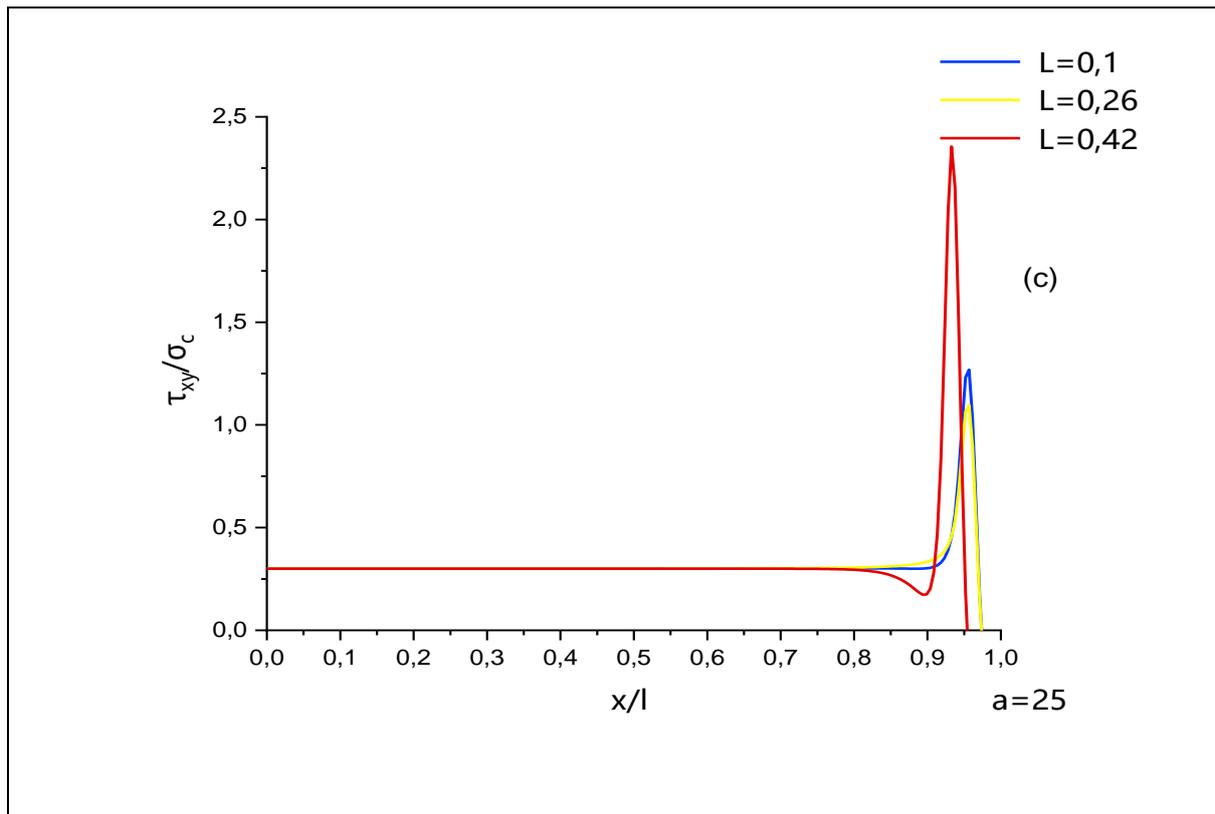


Figure 3- 12 : Variation de la contrainte de cisaillement dans un stratifié $[0/90_3]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes longueurs de la fissure longitudinale.

c) Interprétation :

Les figures (3-11) et (3-12) représentent l'étude de variation de la longueur de la fissure longitudinale d'un stratifié de type $[0/90_3]_s$ fissuré avec fissure transverse, longitudinale et délaminage, soumis à une traction bi axiale.

La variation de la longueur de la fissuration longitudinale entraîne une diminution rapide de la contrainte longitudinale à proximité du plan de fissures pour « $a=10$ » et « $a=25$ » figures 3-11 ((b), (c)) pour les trois différentes longueurs et subit un taux de compression plus élevé -0.15.

On note que la variation de la contrainte au niveau des trois plans de fissures est plus remarquable dans le cas des densités de fissures élevés. Figure 3-11(a).

La contrainte de cisaillement prend des valeurs marquantes approximativement à $\tau_{xy}/\sigma_c = 2.5$ pour des longueurs de fissure longitudinale assez importantes. Elle s'approche du

plan de fissure transversale dans le cas de densités de fissures faibles au point $x/l=0,95$ figure 12 (c). Par ailleurs, la contrainte s'éloigne du point $x/l=1$ quand la distance entre les fissures transversales devient faible. Figures 3-12(a) et 3-12(b).

Le changement de la longueur de la fissure longitudinale modifie le comportement du stratifié, entraînant une perte de rigidité due à l'augmentation de la longueur par rapport à la longueur initiale.

3.5 Conclusion :

Nous avons conçu un modèle numérique en utilisant le logiciel ABAQUS pour un stratifié $[0/90_2]_s$, qui a subi des fissurations transverses et un délaminage sous une traction uni axiale. Le modèle a été comparé à celui réalisé par Berthelot et Besbaci, N [16], [25] et validé grâce aux résultats rapprochés.

Après la validation du modèle, on a modélisé un stratifié $[0/90_3]_s$ qui comporte les trois types de fissurations dont la fissure transverse, la fissure longitudinale et le délaminage soumis à une sollicitation bi axiale.

Diverses études ont été menées pour observer le comportement des stratifiés $[0/90_n]_s$ à différents rapports d'épaisseur et différentes densités de fissures, tandis qu'une étude distincte a été menée pour différentes longueurs de fissures longitudinales.

Les études ci-dessus ont permis de mieux comprendre les effets des fissures multiples dans diverses configurations et l'effet du nombre de plis à 90° sur le comportement de la distribution des contraintes.

La présence des fissurations intralaminaires et interlaminaires influence le comportement des stratifiés composites, ces derniers sont soumis à des conditions réelles comme la température et l'humidité. Comment ces conditions hygrothermiques peuvent-elles avoir un effet sur le comportement d'un stratifié composite de type $[0/90_3]_s$, c'est dans ce sens qu'on va orienter l'étude du chapitre 4.

4 Chapitre 04

SIMULATION ET RESULTATS NUMERIQUES DES STRATIFIES FISSURES ET DELAMINES SOUMIS A UN CHARGEMENT MECANIQUE SOUS L'EFFET DES CONDITIONS HYGROTHERMIQUES

4.1 Introduction :

La discussion initiale de ce chapitre portera sur l'influence du vieillissement hygrothermique sur les propriétés des matériaux composites. Par la suite, nous effectuerons une analyse numérique par éléments finis à l'aide du logiciel ABAQUS.

Afin de résoudre ce problème, nous nous appuyerons sur l'implémentation du modèle de Tsai qui prend en compte les changements de température de transition qui se produisent en raison de l'humidité. Pour nos besoins, nous utiliserons le modèle Tsai simplifié, car la concentration utilisée dans ce modèle ne dépend pas du temps.

Pour mener cette expérience, nous utiliserons un quart de stratifié de type $[0/90_n]_s$ endommagé par des fissures intralaminaires et interlaminaire. Le stratifié sera soumis à une contrainte de traction bi axiale. L'étude se déroulera en deux étapes. Dans un premier temps, on va faire varier la température et l'humidité indépendamment pour observer les effets de chaque paramètre. Dans la deuxième étape, nous modifierons à la fois la température et l'humidité pour étudier les effets des paramètres hygrothermiques sur le stratifié.

4.2 Caractérisation du matériau :

Un matériau est caractérisé principalement par ses modules mécaniques qui peuvent être déterminés expérimentalement. Par exemple plusieurs essais de traction sont nécessaires pour déterminer les différents modules d'élasticité du pli élémentaire d'un composite à fibres continues. Le module d'Young ou module d'élasticité longitudinal et le coefficient de Poisson sont mesurés par un essai de traction monotone sur un unidirectionnel pour un empilement à 0° . Le module d'élasticité transversal est mesuré par un essai de traction monotone sur un unidirectionnel pour un empilement à 90° . Enfin le module de cisaillement est mesuré par un essai de traction monotone sur un unidirectionnel pour un empilement à 45° .

Nous allons devoir choisir les modèles des différents modules qui nous permettront de faire la caractérisation de notre matériau. Le module de Young transversal et le coefficient de Poisson, sont pris selon le modèle correspondant à celui de la loi des mélanges modifiée par Hahn décrit en référence [37]. Ce modèle a également été adopté dans les travaux de Sereir [38].

Soit ci-dessous le choix du modèle semi-empirique pour l'évaluation des propriétés du composite en fonction des volumes des fibres [39].

4.2.1 Le module de Young dans la direction des fibres :

Il est bien approché par la relation :

$$E_x = E_m V_m + E_{fx} V_f \quad (4.1)$$

Avec
$$V_m = 1 - V_f \quad (4.2)$$

En pratique ce module dépend essentiellement du module longitudinal de la fibre.

4.2.2 Le module de Young transversal :

La relation micromécanique modifiée par Hahn [37] pour le graphite époxy **T300/5208** du module de Young transversal est :

$$E_f = \frac{1+0.516(V_m/V_f)}{\frac{1}{E_{fy}} + \frac{0.516(V_m/V_f)}{E_m}} \quad (4.3)$$

4.2.3 Le module de cisaillement longitudinal :

De même la relation micromécanique modifiée par Hahn [37] pour le graphite époxy **T300/5208** du module de Young transversal est :

$$G_{XY} = \frac{1+0.316(V_m/V_f)}{\frac{1}{G_{fy}} + \frac{0.316(V_m/V_f)}{G_m}} \quad (4.4)$$

Avec
$$G_m = \frac{E_m}{2(1+\nu_m)} \quad (4.5)$$

4.2.4 Le coefficient de Poisson :

Il caractérise la contraction dans le sens transverse (Y) du pli lorsqu'on le sollicite en traction suivant le sens longitudinal (X) :

$$V_{XY} = V_m \cdot V_m + V_{fx} \cdot V_f \quad (4.6)$$

La comparaison des valeurs des modules obtenus par ces modèles avec ceux donnés par Tsai [40] donne d'excellents résultats (Tableau 4-3).

4.2.5 Introduction du vieillissement sur les propriétés mécaniques du matériau et le modèle de Tsai :

L'objectif de cette partie est de quantifier le vieillissement et d'observer son effet sur les propriétés mécaniques du matériau.

Le modèle considère l'évolution de la température de transition en fonction de l'humidité, puis l'évolution des propriétés de base des fibres et de la matrice en fonction de la température et de l'humidité.

L'avantage de ce modèle est que le vieillissement des fibres est entièrement pris en compte, contrairement à de nombreuses études qui considèrent cette dégradation comme négligeable, notamment par rapport à la dégradation de la matrice et de l'interface.

Des lois globales ont été établies pour toutes les conditions de vieillissement, permettant de relier la diminution des constantes élastiques des matériaux composites aux propriétés physico-chimiques des matériaux. Les aspects relationnels décrivant les mécanismes physiques à l'origine de ces changements sont décrits ci-dessous.

4.2.6 Evolution de Tg au cours du vieillissement :

Tsai [40] n'assume que la température de transition diminue d'une certaine quantité (g.C.) en raison de l'absorption d'humidité :

$$T_g = T_g^0 - gc \quad (4.7)$$

4.2.7 Température adimensionnelle :

Tsai [40] propose la notion de la température adimensionnelle T*, qui est un élément essentiel pour l'évaluation des caractéristiques du composite :

$$T^* = \frac{T_g - T_{opr}}{T_g - T_{rm}} \quad (4.8)$$

On voit l'effet de la température T_{opr} à travers qui est la température d'utilisation ainsi que l'effet de la concentration à travers la température de transition T_{rm} étant la température de référence.

4.2.8 Prise en compte du vieillissement dans les propriétés de la matrice :

Tsai [40] relie la température adimensionnelle T^* , pour déterminer empiriquement les expressions des propriétés de la matrice, en fonction de la température et de l'humidité avant et après le vieillissement, pour le carbone époxyde T300/5208.

$$\frac{E_m}{E_m^0} = (T^*)^a \quad (4.9)$$

$$\frac{G_m}{G_m^0} = (T^*)^a \quad (4.10)$$

$$\frac{v_m}{v_m^0} = (T^*)^a \quad (4.11)$$

a : étant une constante semi empirique [40], donnée dans le Tableau 4-2.

4.2.9 Prise en compte du vieillissement dans les propriétés des fibres :

Les propriétés des fibres en fonction de la température et de la concentration s'expriment aussi en fonction de la température adimensionnelle.

$$\frac{E_{fx}}{E_{fx}^0} = (T^*)^f \quad (4.12)$$

$$\frac{E_{fy}}{E_{fy}^0} = (T^*)^f \quad (4.13)$$

$$\frac{G_{fx}}{G_{fx}^0} = (T^*)^f \quad (4.14)$$

$$\frac{v_{fx}}{v_{fx}^0} = (T^*)^f \quad (4.15)$$

f : étant une constante semi empirique [40], donnée dans le Tableau 4-2.

4.3 Choix du matériau :

Pour les études qui suivent nous avons choisi le matériau graphite-époxy T300/5208 qui a les propriétés élastiques suivantes :

$$E_f=259.0 \text{ GPa}, G_f=19.69 \text{ GPa}, \nu_f=0.25, \nu_m=0.35 \text{ et } E_m=3.4 \text{ GPa}, C_0=0\%, T_0=22^\circ\text{C}.$$

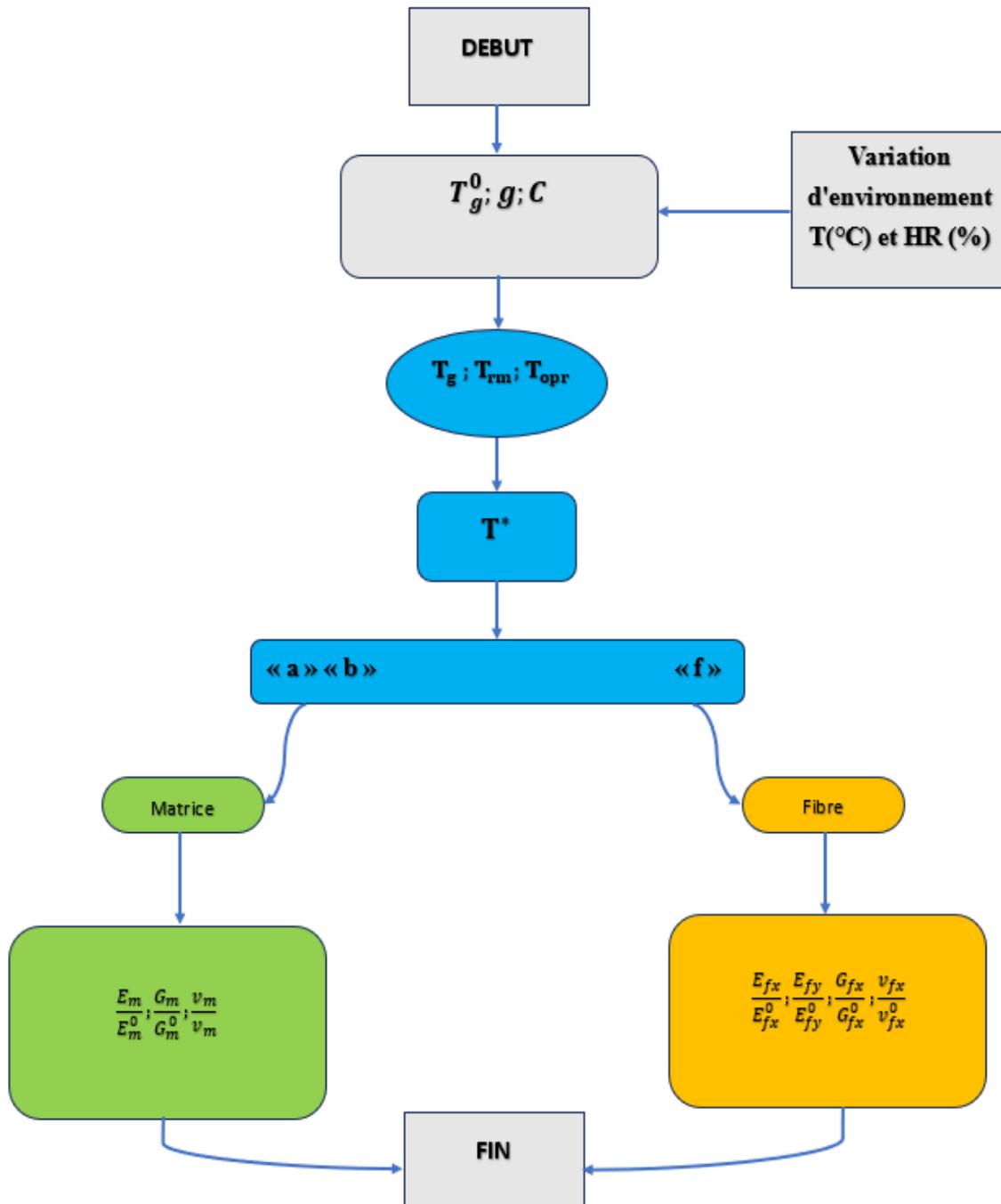


Figure 4- 1 : Organigramme du calcul des propriétés vieilles.

4.3.1 Propriétés du matériau T300/5208 :

Tableau 4- 1 : Caractéristiques de fibres et matrice du T300/5208 de Tsai [40].

| E_{fx} (Gpa) | E_{fy} (Gpa) | G_{fx} (Gpa) | ν_{fx} | E_m (Gpa) | G_m (Gpa) | ν_m | V_f | V_m |
|-------------------|-------------------|-------------------|------------|----------------|----------------|---------|-------|-------|
| 259 | 18.69 | 19.69 | 0.25 | 3.4 | 1.26 | 0.35 | 0.7 | 0.3 |

Tableau 4- 2 : Caractéristiques de variation de température et d'humidité [40].

| T_g^0 (°C) | T_{rm} (°C) | g (°C/c) | a | b | c | f | h | e |
|--------------|---------------|----------|-----|-----|-----|------|------|-----|
| 160 | 22 | 2000 | 0.5 | 0.2 | 0.9 | 0.04 | 0.04 | 0.2 |

Tableau 4- 3 : Propriétés du T300/5208 $T_{rm}=22^\circ\text{C}$ et $C=0.5\%$ [40].

| | E_x (Gpa) | E_y (Gpa) | G_{xy} (Gpa) | ν_{xy} 10^{-6} K^{-1} | α_x 10^{-6} K^{-1} | α_y | β_x | β_y |
|-----------------------------|-------------|-------------|----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------|-----------|-----------|
| « Tsai » | 181 | 10.3 | 7.17 | 0.28 | 0.02 | 22.5 | 0 | 0.6 |
| «Loi des mélange modifiée » | 181.3 | 10.305 | 7.169 | 0.28 | 0.023 | 3.5 | 0 | 0.62 |

Tableau 4- 4 : Caractéristiques de diffusion du T300/5208 [40].

| Type de Matériau | Température | Humidité relative | D (mm^2/s) | C_{max} |
|------------------|-------------|-------------------|-----------------------|-----------|
| T300/5208 | 20° | 100 | 2.27×10^{-8} | 1.5 |

4.4 Conditions de simulation :

4.4.1 Effets de la température :

Les différentes propriétés du matériau T300/5208 sont calculées pour les deux valeurs d'humidité relative HR=0% et HR=100% en variant la température T(°C).

Tableau 4- 5 : propriétés élastiques du matériau T300/5208 en fonction de différentes valeurs de la température opérationnelle.

| Humidité relative | Propriétés | E_x (Gpa) | E_y (Gpa) | G_x (Gpa) | G_y (Gpa) | ν_x | ν_y |
|-------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------|---------|
| | Températures | | | | | | |
| HR=0% | 20°C | 182.4317418 | 10.34432699 | 7.210421946 | 5.091085981 | 0.280 | 0.015 |
| | 60°C | 179.8475139 | 9.349865420 | 6.389233424 | 4.612078565 | 0.262 | 0.013 |
| | 120°C | 173.0872611 | 6.897872202 | 4.487734138 | 3.418545605 | 0.223 | 0.008 |
| HR=100% | 20°C | 182.4625179 | 10.35627706 | 7.220470291 | 5.096820954 | 0.281 | 0.015 |
| | 60°C | 182.4224286 | 10.34071115 | 7.207382369 | 5.089350593 | 0.280 | 0.015 |
| | 120°C | 182.5816454 | 10.40255133 | 7.259421265 | 5.119023502 | 0.282 | 0.016 |

4.4.2 Effets de l'humidité relative :

Les différentes propriétés du matériau T300/5208 sont calculées pour les deux valeurs de température opérationnelle T=20°C et T=120°C en variant l'humidité HR (%).

Tableau 4- 6 : propriétés élastiques du matériau T300/5208 en fonction de différentes valeurs d'humidité relative.

| Température opérationnelle | Propriétés | E_x (Gpa) | E_y (Gpa) | G_x (Gpa) | G_y (Gpa) | ν_x | ν_y |
|----------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------|---------|
| | Humidité | | | | | | |
| T=20°C | 0% | 182.4317418 | 10.34432699 | 7.210421946 | 5.091085981 | 0.280 | 0.015 |
| | 66% | 182.4503147 | 10.35153846 | 7.216485270 | 5.094546909 | 0.281 | 0.015 |
| | 100% | 182.4625179 | 10.35627706 | 7.220470291 | 5.096820954 | 0.281 | 0.015 |
| | 0% | 173.0872611 | 6.897872202 | 3.418545605 | 4.487734138 | 0.223 | 0.008 |

| | | | | | | | |
|---------|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|-------|
| T=120°C | 66% | 169.3518115 | 5.686133915 | 3.610199690 | 2.823493662 | 0.206 | 0.006 |
| | 100% | 165.1497111 | 4.479658192 | 2.775539533 | 2.228280986 | 0.191 | 0.005 |

4.4.3 Effets des conditions hygrothermiques :

Tableau 4- 7 : propriétés élastiques du matériau T300/5208 en fonction de différentes conditions hygrothermiques.

| Environnement | E_x (Gpa) | E_y (Gpa) | G_x (Gpa) | G_y (Gpa) | ν_x | ν_y |
|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------|---------|
| Propriétés | | | | | | |
| ENV01 T=20°C, C=0% | 182.4317418 | 10.34432699 | 7.210421946 | 5.091085981 | 0.280 | 0.015 |
| ENV02 T=60°C, C=1% | 179.3431638 | 9.158404367 | 6.234507019 | 4.519482851 | 0.258 | 0.013 |
| ENV03 T=120°C, C=1.5% | 165.1497111 | 4.479658192 | 2.775539533 | 2.228280986 | 0.191 | 0.005 |

4.5 Simulation numérique :

4.5.1 Conditions aux limites :

- Sollicitation en traction appliquée via des déplacements longitudinaux suivant l'axe OX et via des déplacements transversaux suivant l'axe OY figure 4-2.
- Les conditions de symétrie conduisent à supprimer les déplacements transversaux du quart de stratifié tel que :
 - Déplacement longitudinal nul suivant l'axe OX : $u=0$
 - Déplacement transversal nul suivant l'axe OY : $v=0$
- Le frottement entre le pli 0 et le pli 90 a été introduit en imposant une contrainte transversale sur chaque élément de la partie délaminée figure 4-2.
- Les fissures transversales sont considérées comme des bords libres (aucune contrainte de cisaillement) figure 4-2.
- La fissure transversale et longitudinale sont modélisées sous forme rectangulaire plane figure 4-3.
- La fissure longitudinale est sollicitée avec une contrainte transversale figure 4-2.

4.5.2 Modèle aux éléments finis :

Dans ce chapitre on a modélisé un stratifié de type $[0/90_3]_s$ avec l'épaisseur de chaque couche est de 0.125mm ayant une fissure longitudinale, transversale et délaminage. Le matériau choisi est T300/5208 (Voir figure 4-2).

| | | Ply Name | Region | Material | Thickness | CSYS | Rotation Angle | Integration Points |
|---|---|----------|----------|---------------|-----------|---------|----------------|--------------------|
| 1 | ✓ | Ply-1 | (Picked) | Material-comp | 0.125 | <Layup> | 90 | 3 |
| 2 | ✓ | Ply-2 | (Picked) | Material-comp | 0.125 | <Layup> | 90 | 3 |
| 3 | ✓ | Ply-3 | (Picked) | Material-comp | 0.125 | <Layup> | 90 | 3 |
| 4 | ✓ | Ply-4 | (Picked) | Material-comp | 0.125 | <Layup> | 0 | 3 |

Figure 4- 2: Modélisation des plis du stratifié de type $[0/90_3]_s$ sur ABAQUS.

- Une contrainte bi axiale est appliquée sur le stratifié suivant l'axe longitudinal OX ainsi que suivant l'axe OY.
- Un chargement suivant l'axe OY est appliquée au niveau du délaminage et la fissuration longitudinale.

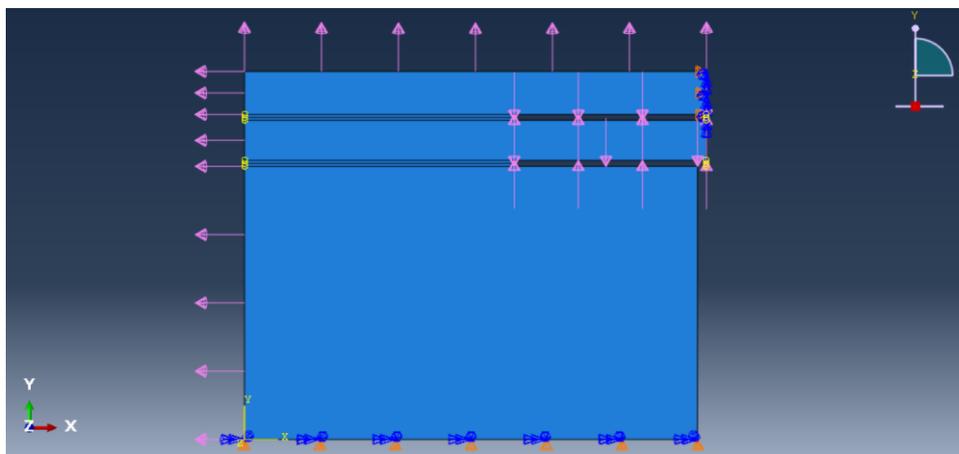


Figure 4- 3 : Modélisation des contraintes appliquées au stratifié de type $[0/90_3]_s$.

- Un maillage quadratique structuré de taille 0.03 a été appliqué pour notre modèle.

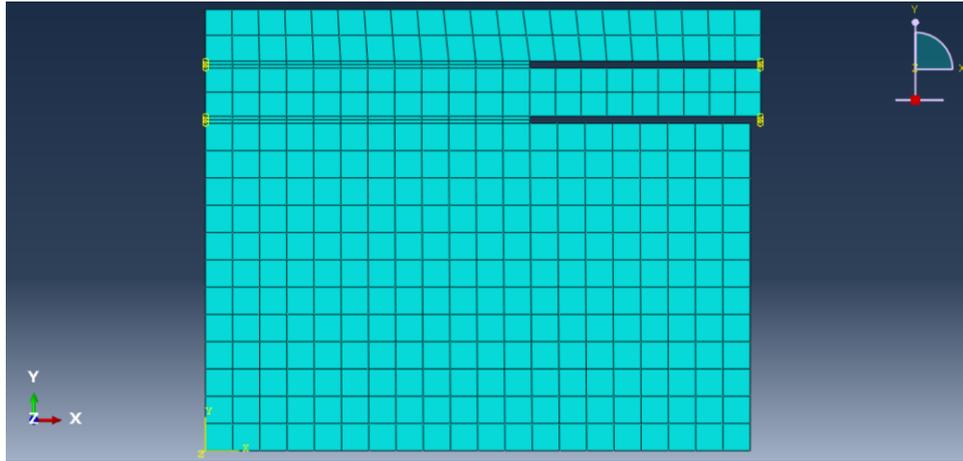
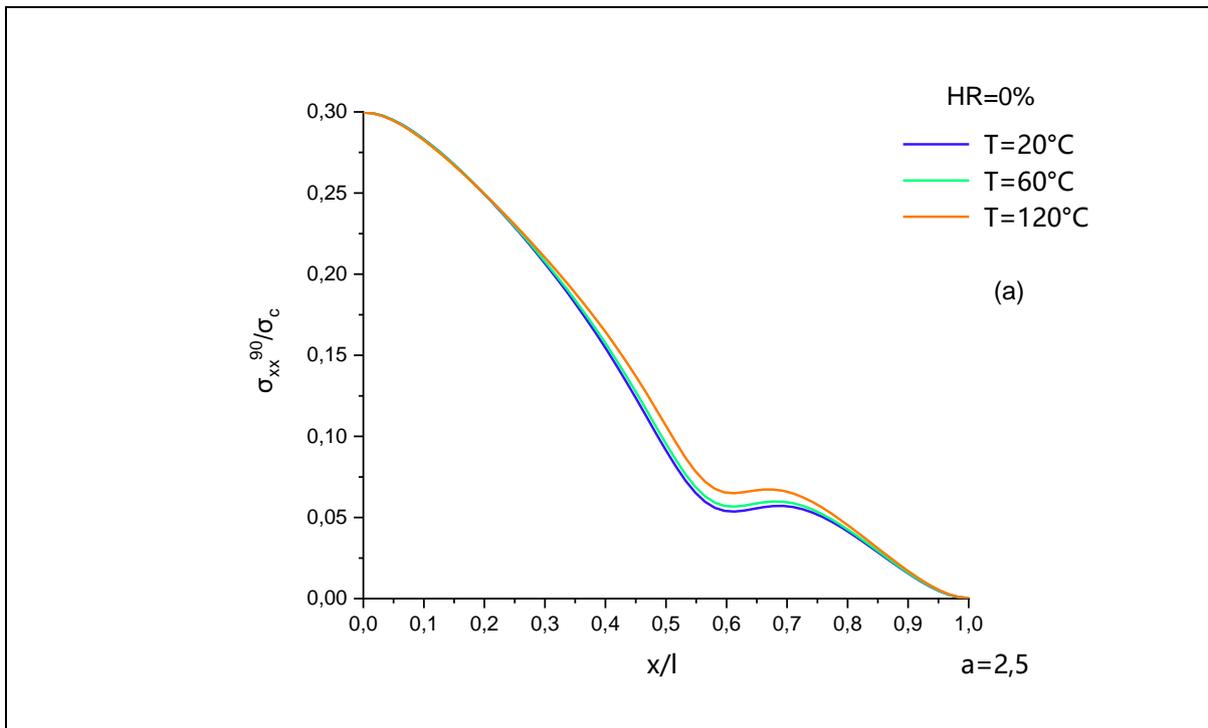


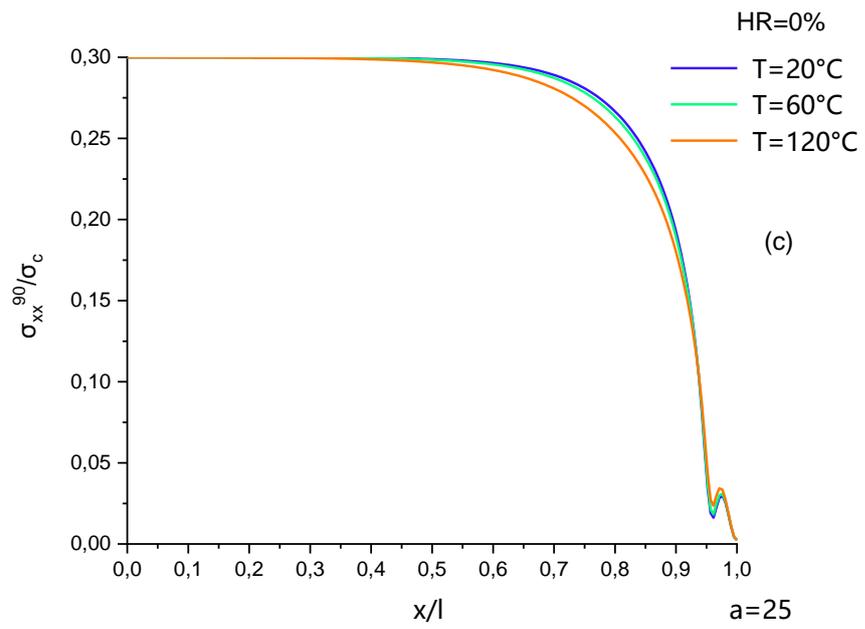
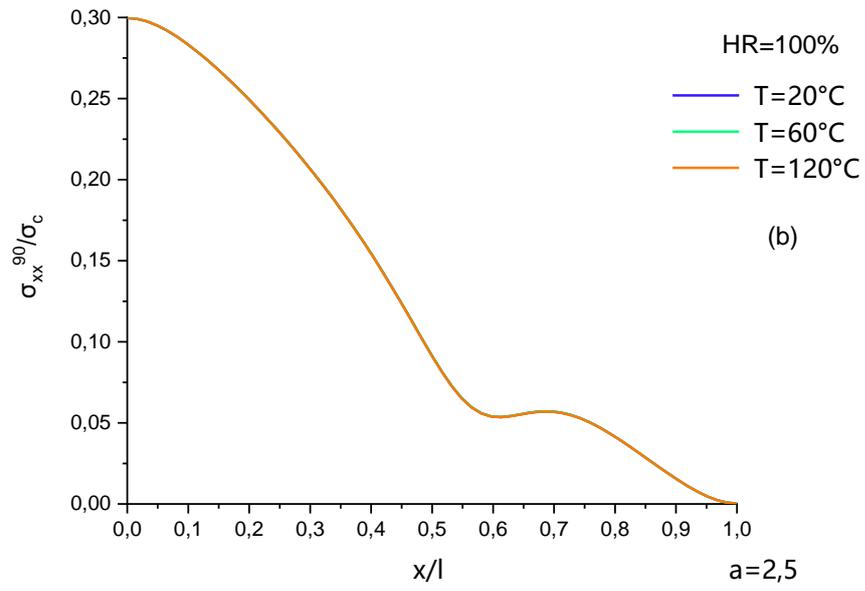
Figure 4- 4 : Maillage quadratique d'un quart de stratifié $[0/90_3]_s$ fissuré avec fissure transverse, longitudinale et délaminage pour « $a=2.5$ ».

4.6 Effet de la température sur le comportement d'un stratifié $[0/90_n]_s$ endommagé sous sollicitations mécaniques :

4.6.1 Contrainte longitudinale :

a) Pour $\alpha=1/3$





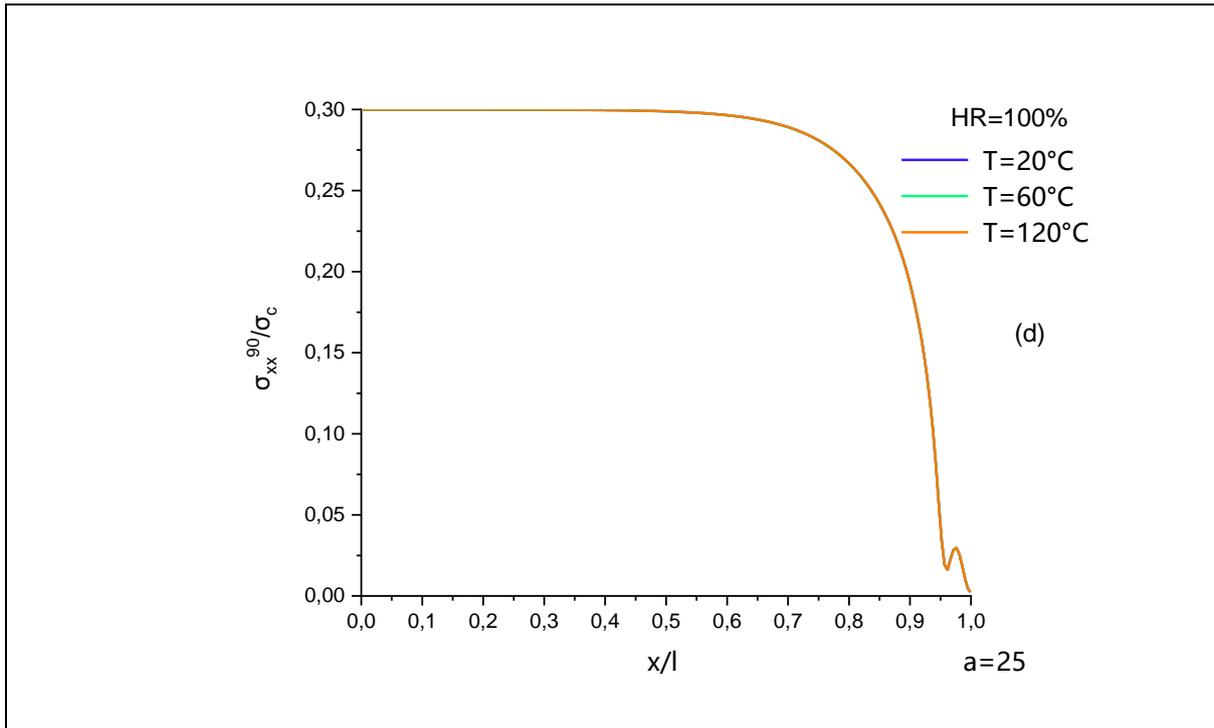
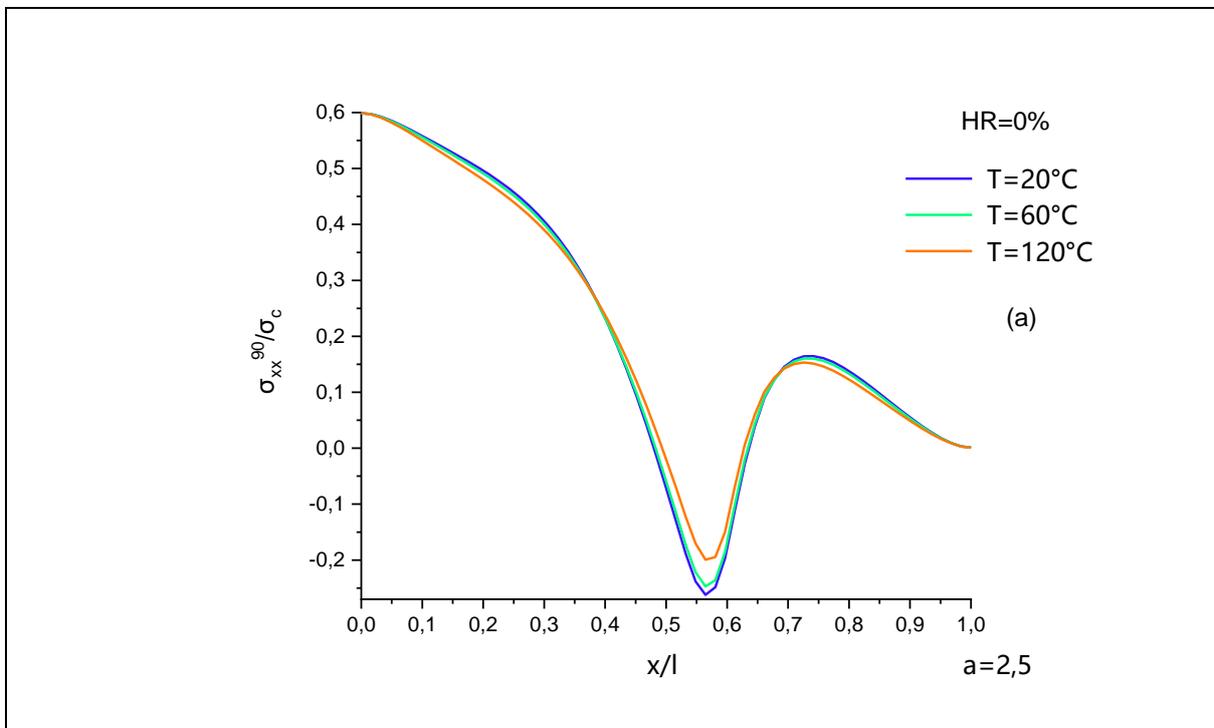
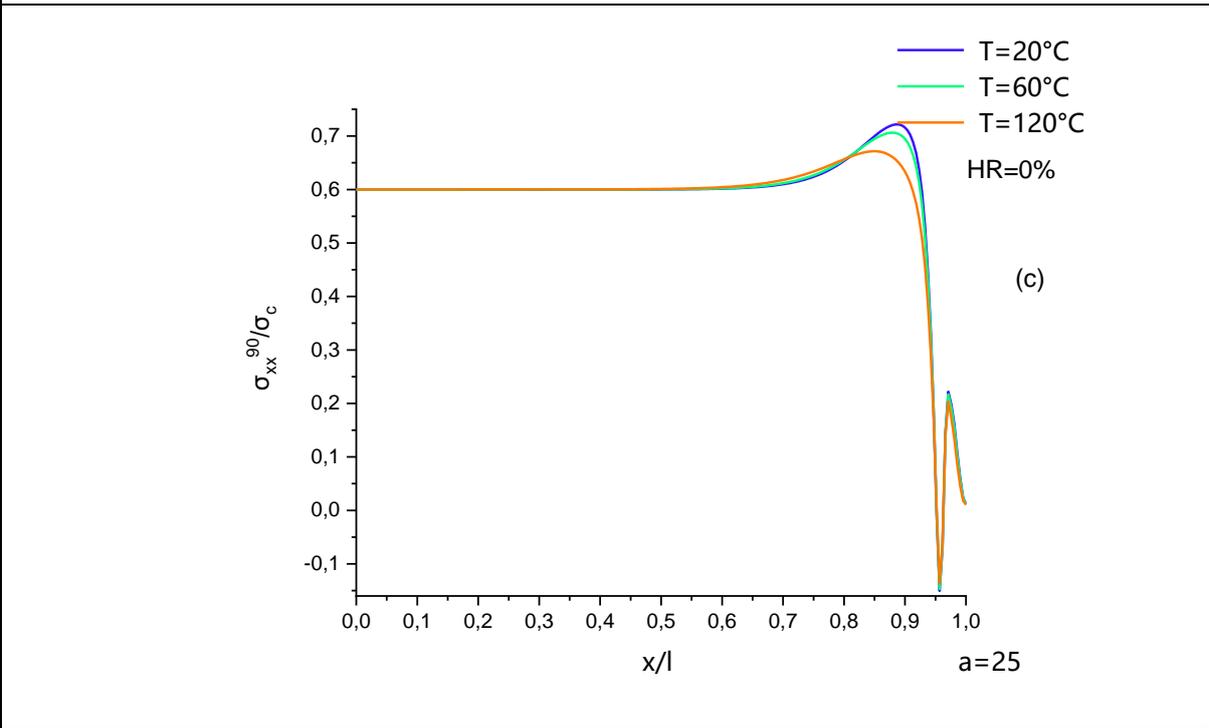
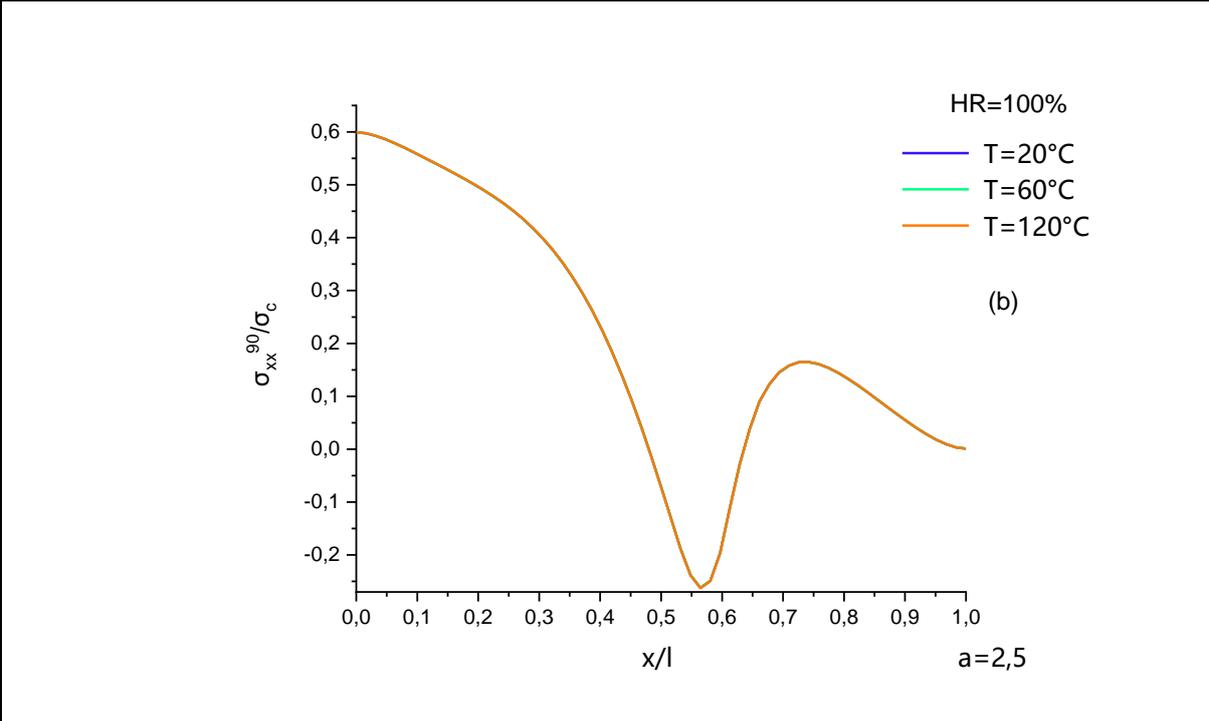


Figure 4- 5 : Variation de la contrainte longitudinale pour différents rapports géométriques « a », humidité relative «HR » et « $\alpha=1/3$ »

b) Pour $a=1$





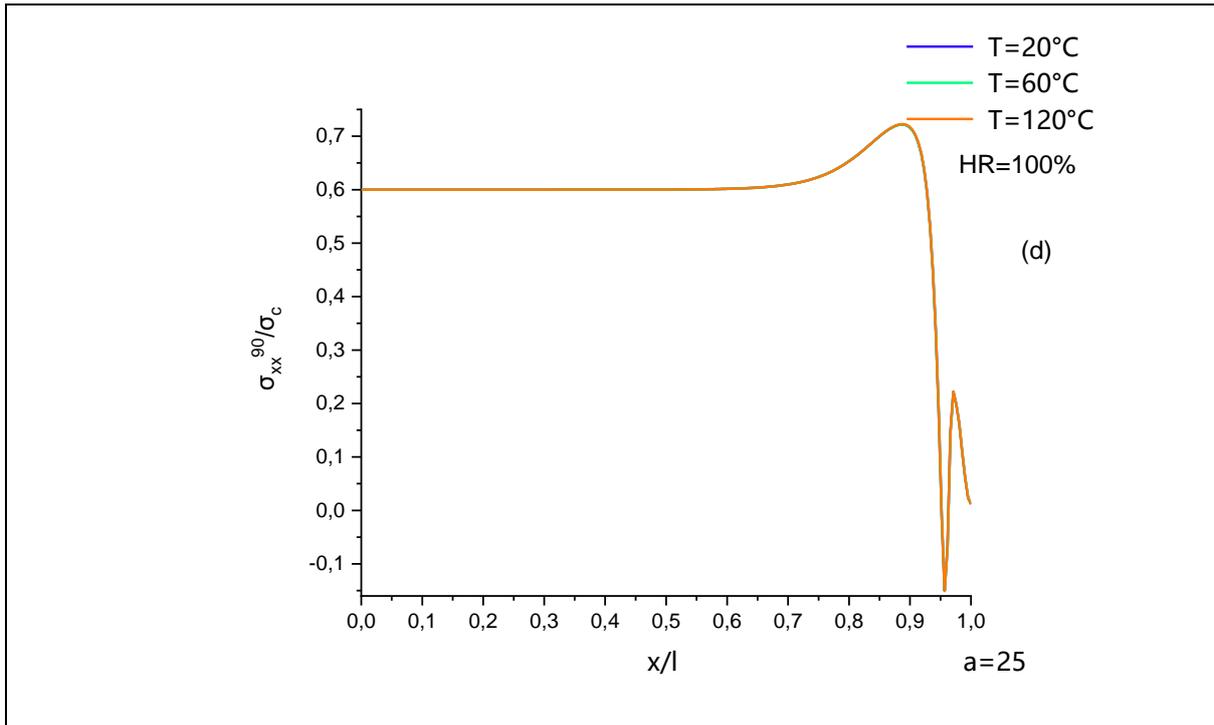
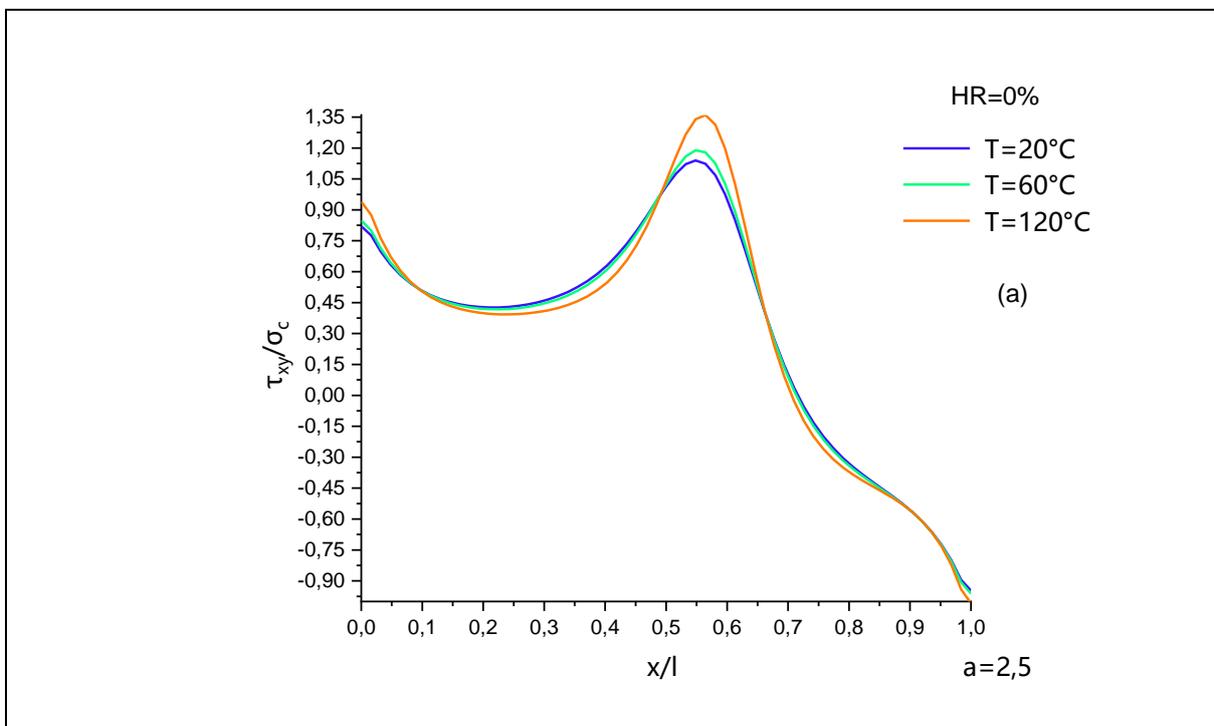
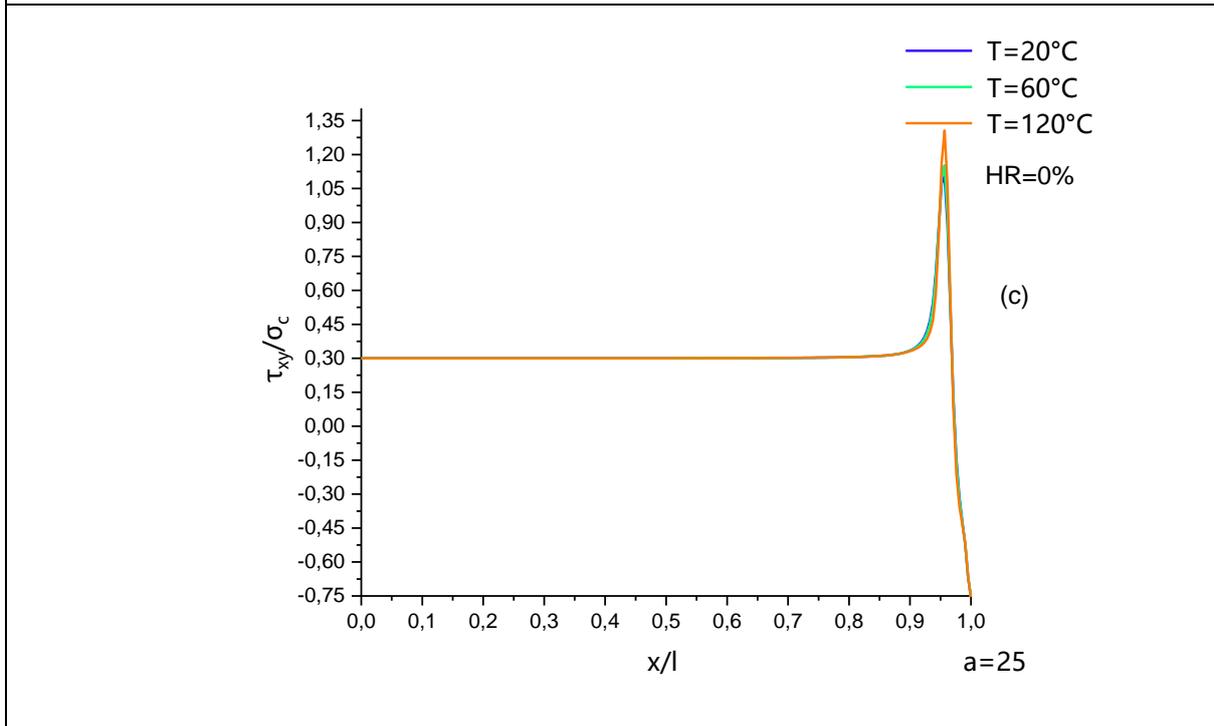
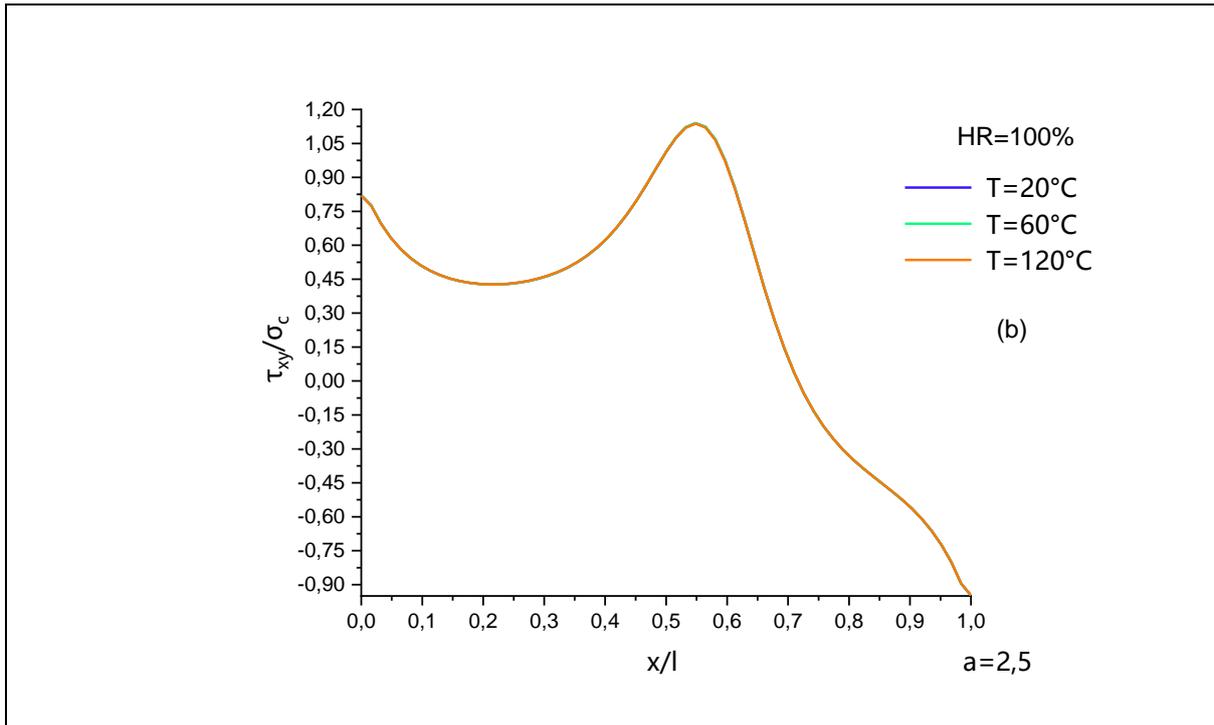


Figure 4- 6 : Variation de la contrainte longitudinale pour différents rapports géométriques « a », humidité relative «HR » et « $\alpha=1$ »

4.6.2 Contrainte de cisaillement :

a) Pour $\alpha=1/3$





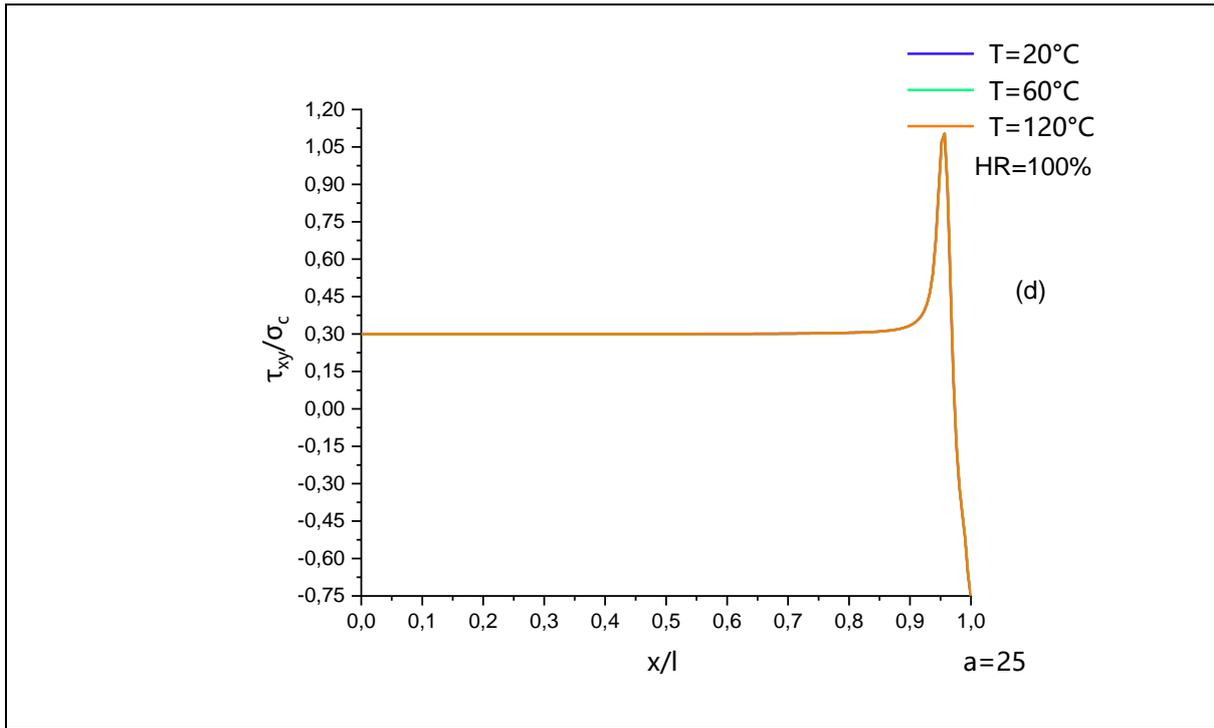
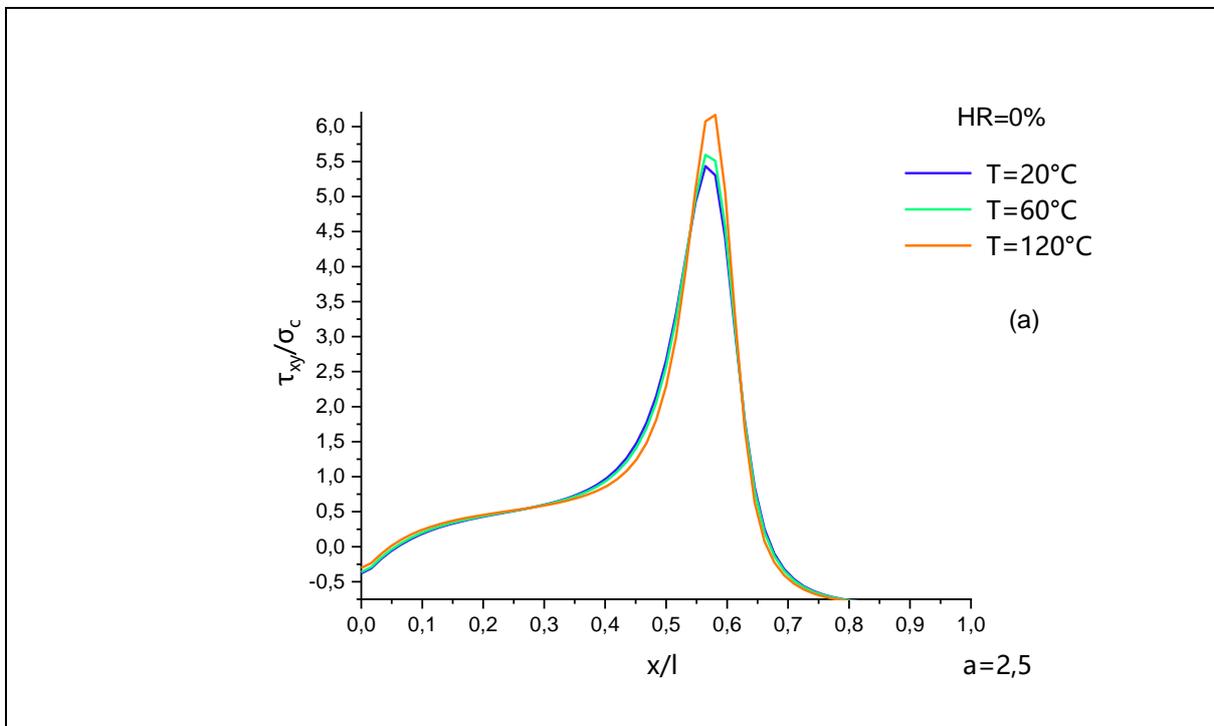
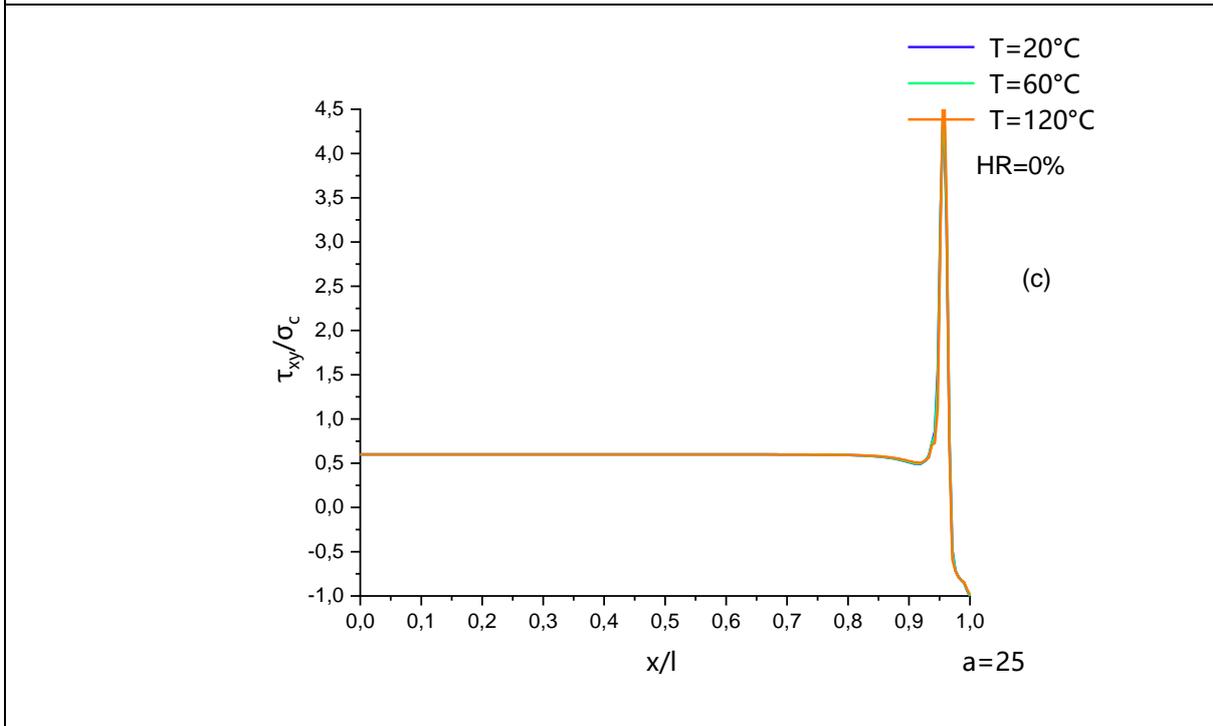
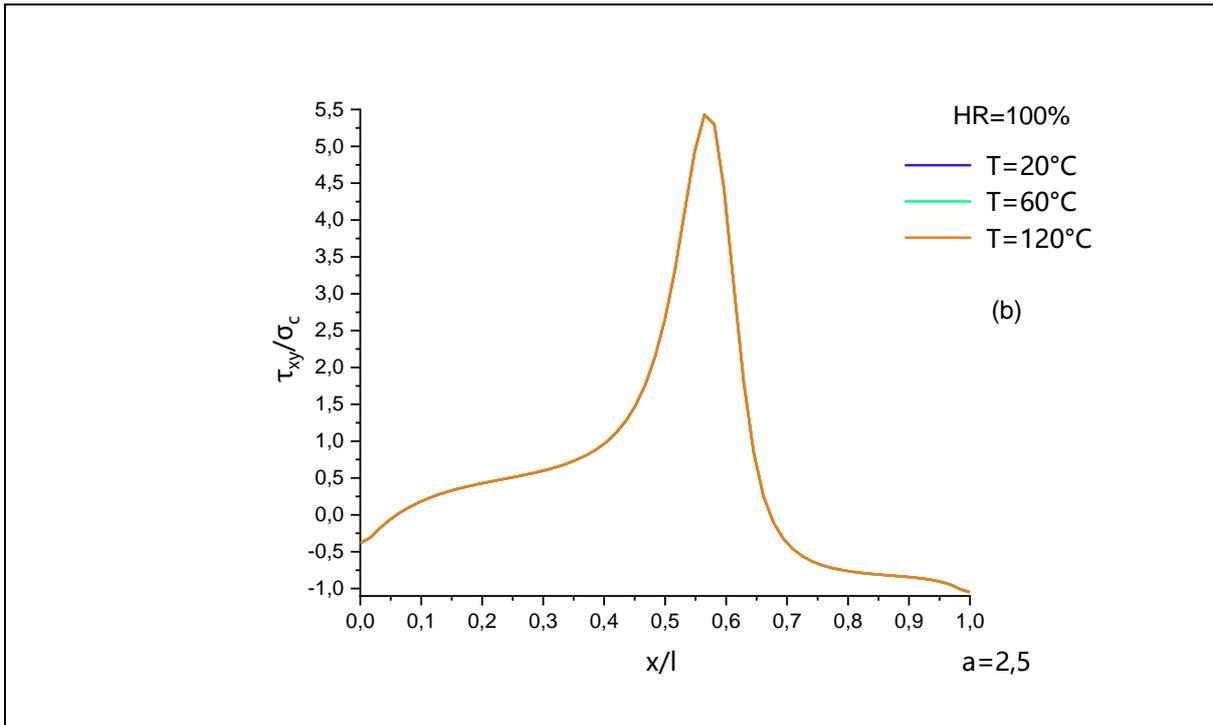


Figure 4- 7 : Variation de la contrainte de cisaillement pour différents rapports géométriques « a », humidité relative «HR » et « $\alpha=1/3$ »

b) Pour $\alpha=1$





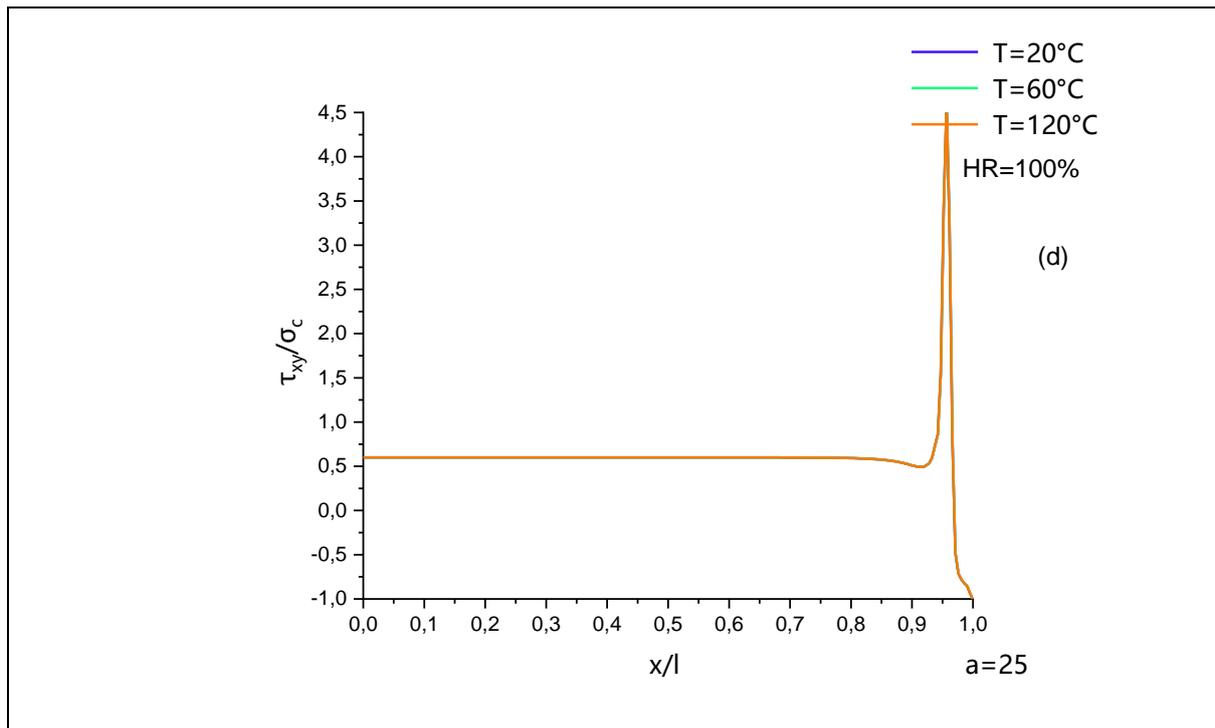


Figure 4- 8 : Variation de la contrainte de cisaillement pour différents rapports géométriques « a », humidité relative «HR » et « $\alpha=1$ »

4.6.3 Interprétations des résultats :

Figures 4-5 à 4-8 représentent la variation de la contrainte longitudinale et de cisaillement en fonction des coordonnées longitudinales (x/l) pour différentes humidités relatives, densités de fissures « a » et rapports d'épaisseur « α » en variant la température.

Pour une grande densité de fissures ($a=2.5$) et un nombre important de couches fissurées avec fissuration transverse ($\alpha=1/3$), la contrainte longitudinale diminue d'une façon significative en approchant des trois plans de fissures (figures 4-5(a),4-5(b)). Un effet de température visible est remarqué pour une humidité relative nulle et proche du plan de fissure longitudinale (figures 4-5 (a) et 4-5(c)).

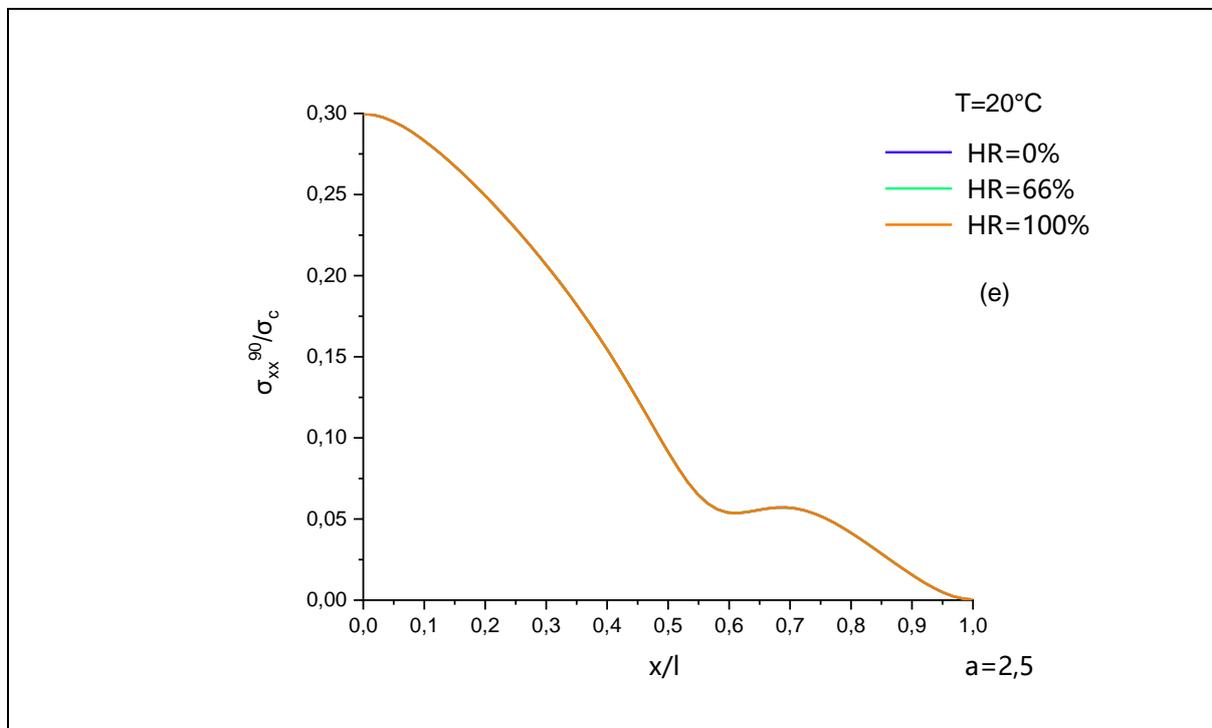
Par contre, pour une seule couche 90° fissurée avec fissuration transverse, on note une chute brutale de la contrainte longitudinale ou elle devient en compression au plan de fissure longitudinale, cette contrainte va être équilibré en s'approchant du plan de délaminage pour qu'elle s'annule au plan de fissure transverse et cela en respectant la condition au limite (figure 4-6). Le même effet de température remarqué précédemment pour une $HR=0\%$ proche du plan de fissure longitudinale (Figures 4-6 (a) et 4-6(c)).

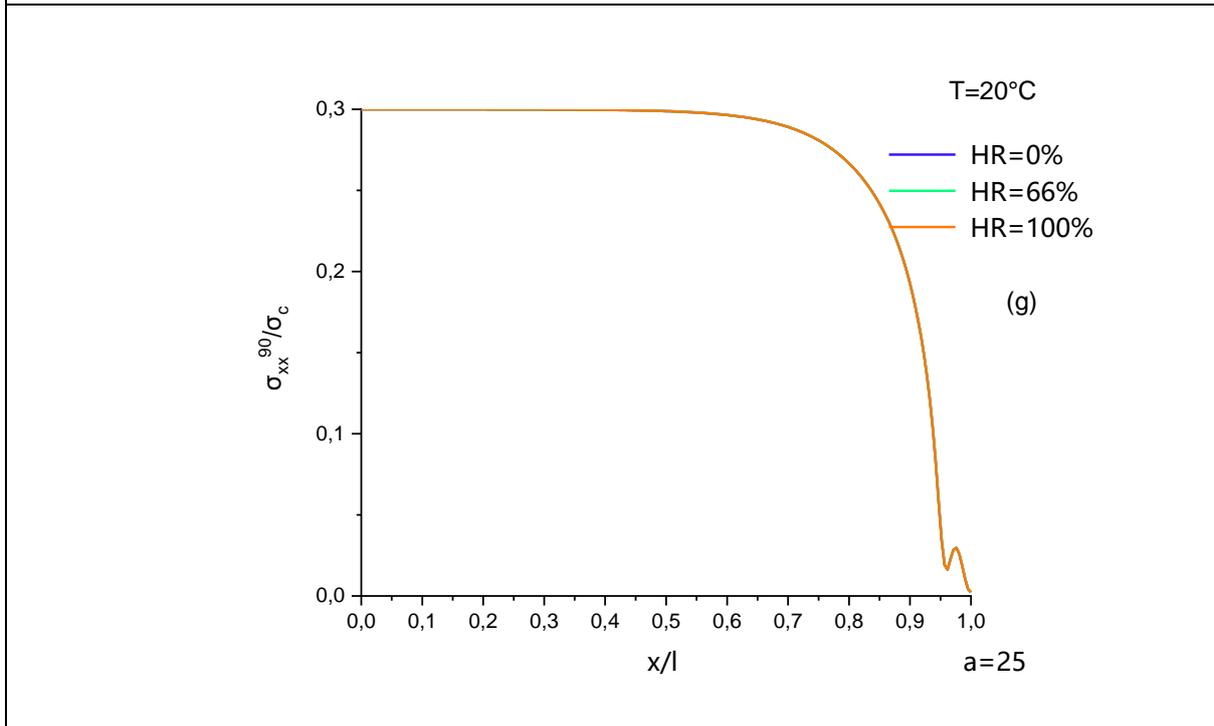
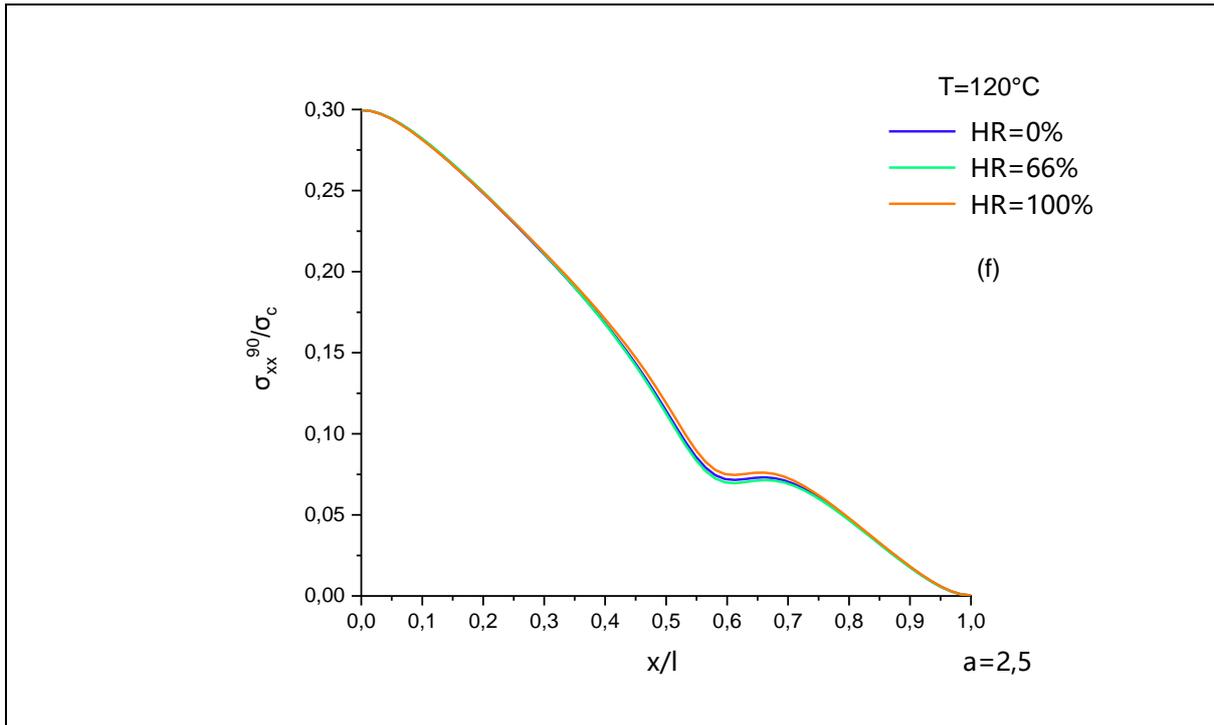
Une distribution constante de la contrainte de cisaillement est notée pour une faible densité de fissures (figures 4-7(c) et 4-7(d) et figures 4-8(c) et 4-8(d)) et cela loin du plan de fissures. Un pic de contrainte de cisaillement est identifié à l'intersection des deux plans de la fissure longitudinale et délaminage dû à la contrainte de cisaillement initialement appliquée au plan de fissures de ces derniers. Par contre un effet de température est noté dans toute la longueur du stratifié et cela pour une grande densité de fissures (figure 4-7(a) et figure 4-8(a)).

4.7 Effet de l'humidité relative sur le comportement d'un stratifié [0/90_n]_s endommagé sous sollicitation mécanique :

4.7.1 Contrainte longitudinale :

a) Pour $\alpha=1/3$





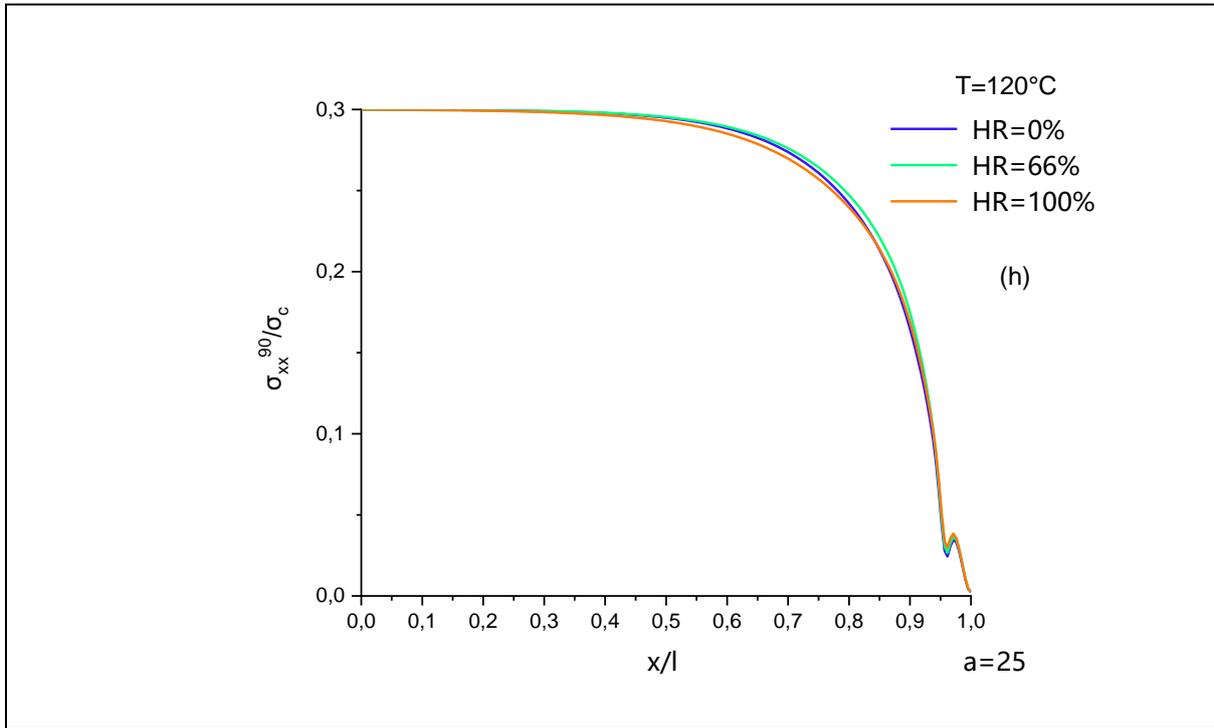
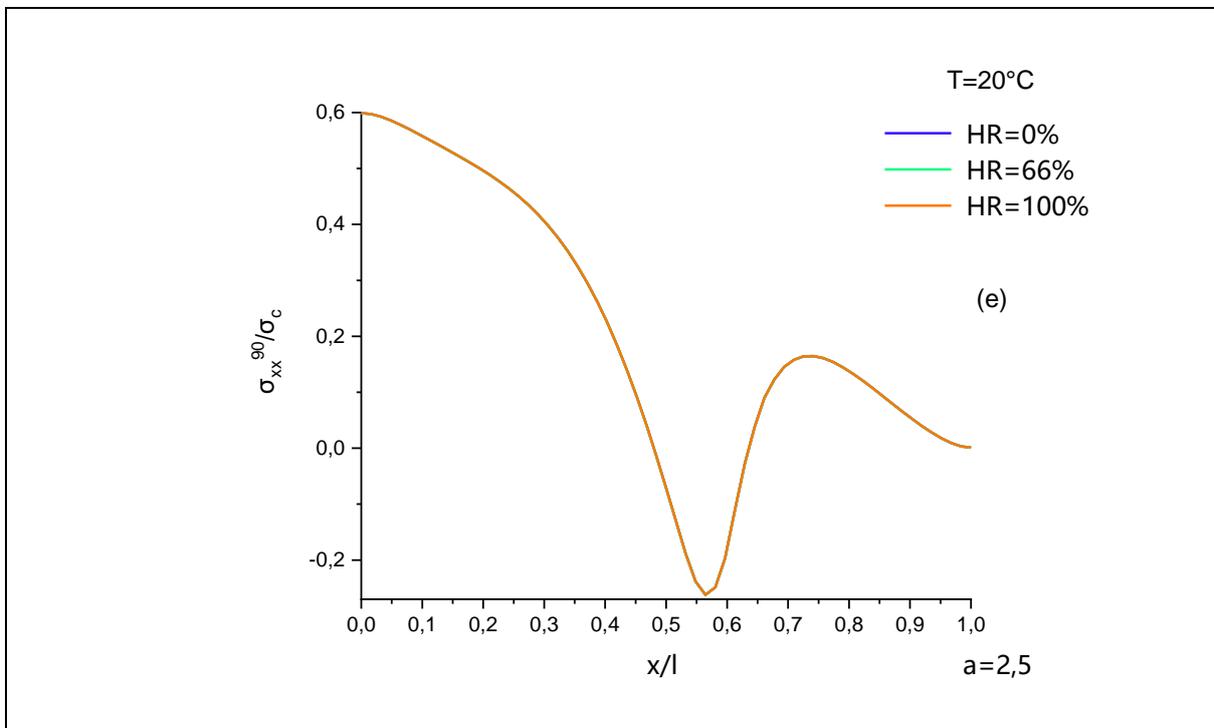
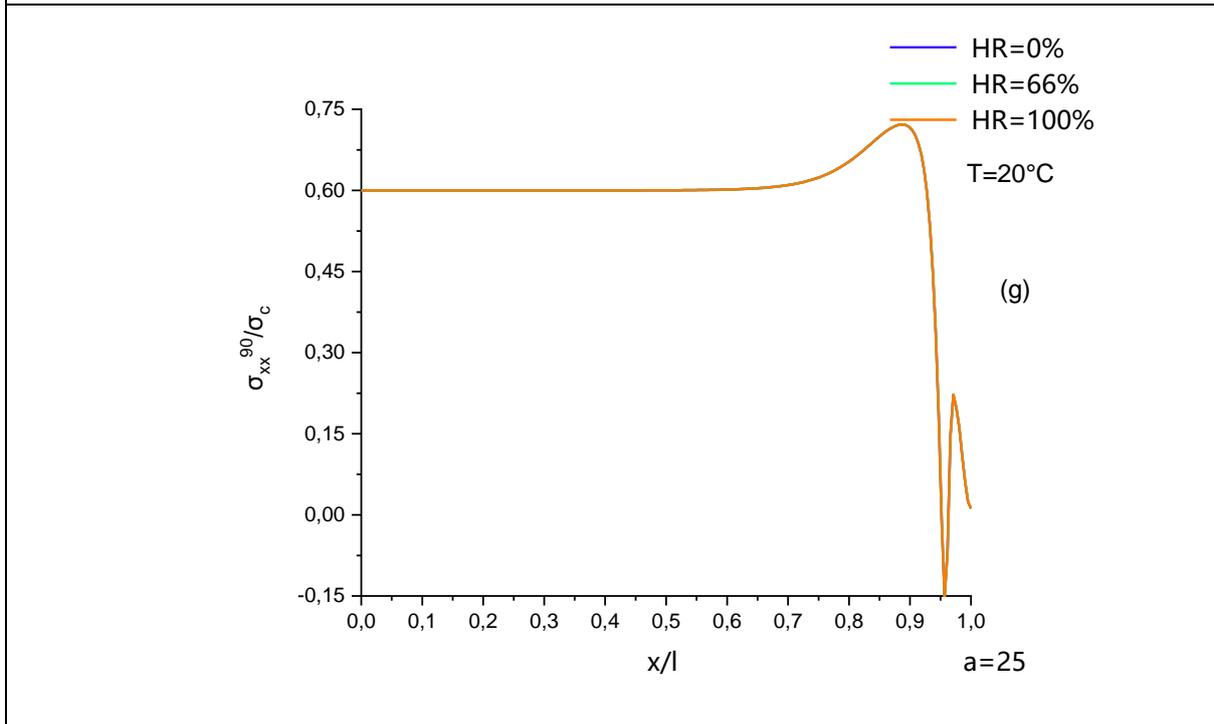
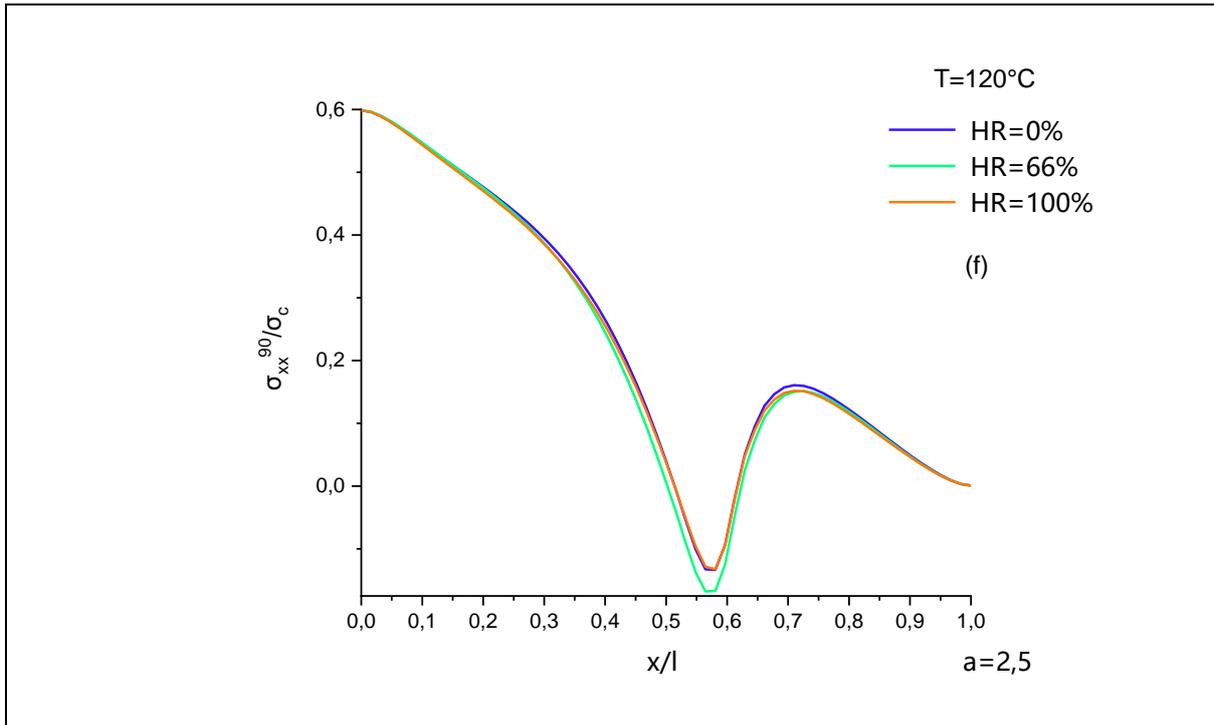


Figure 4- 9 : Variation de la contrainte longitudinale pour différents rapports géométriques « a », température opérationnelle « T » et « $\alpha=1/3$ »

b) Pour $a=1$





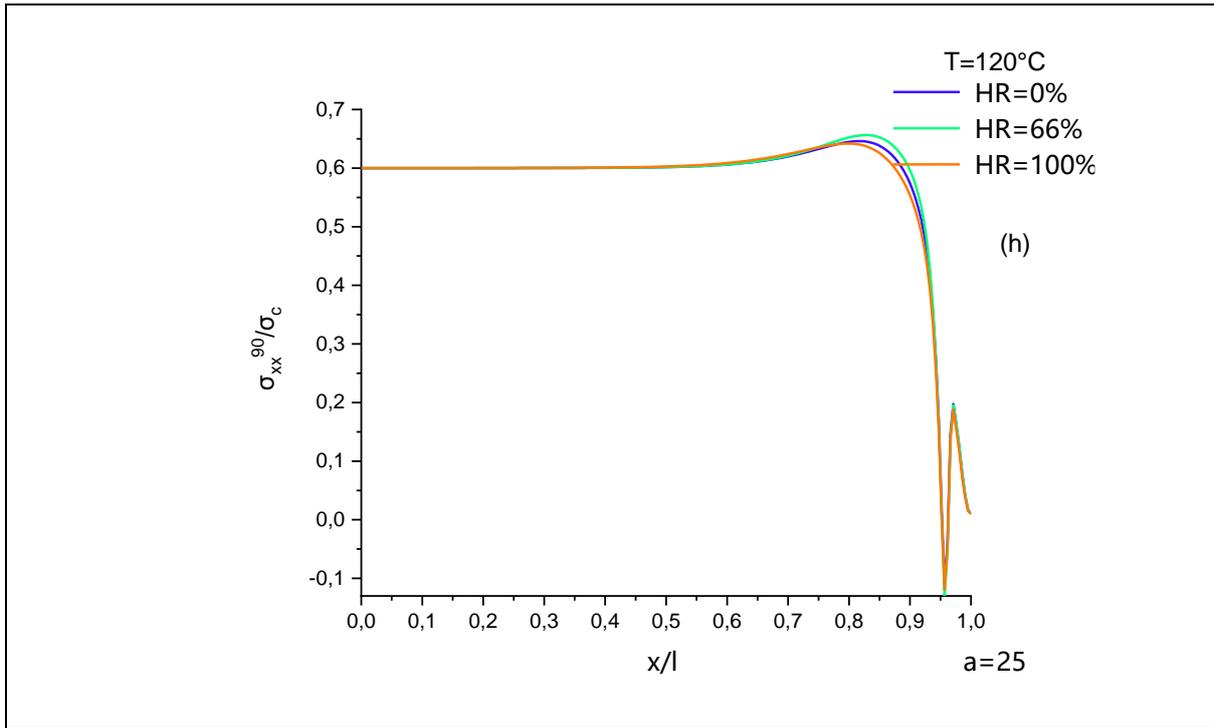
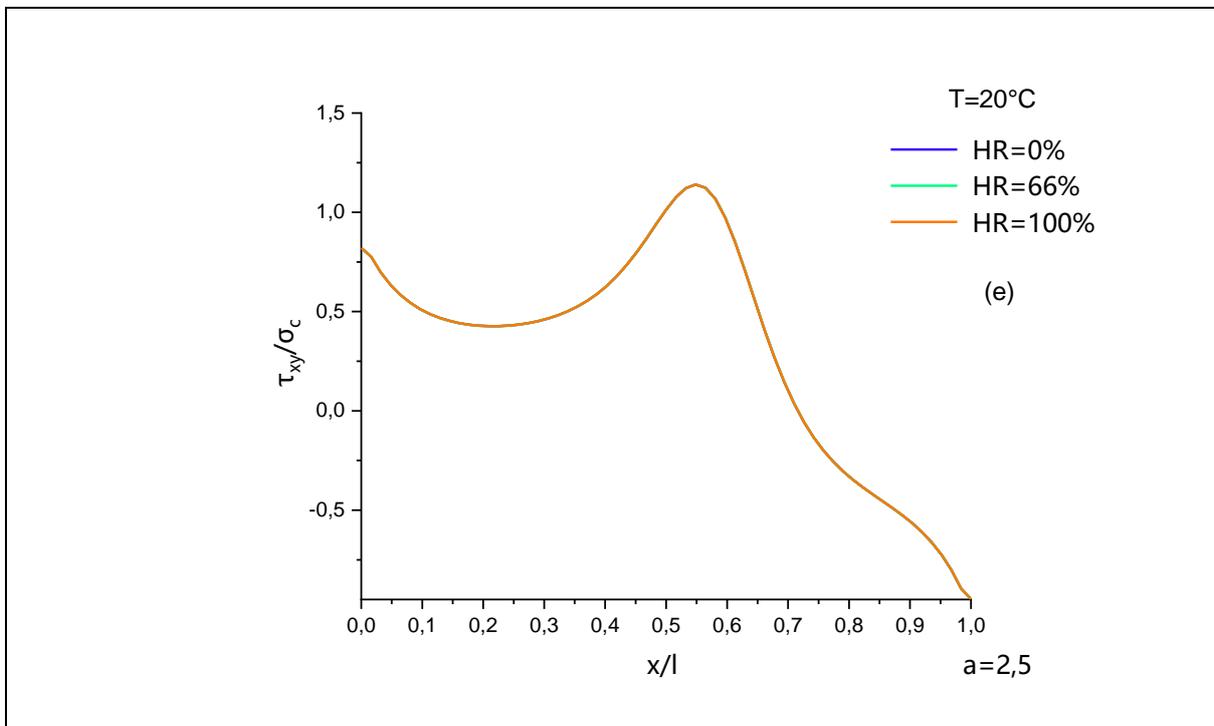
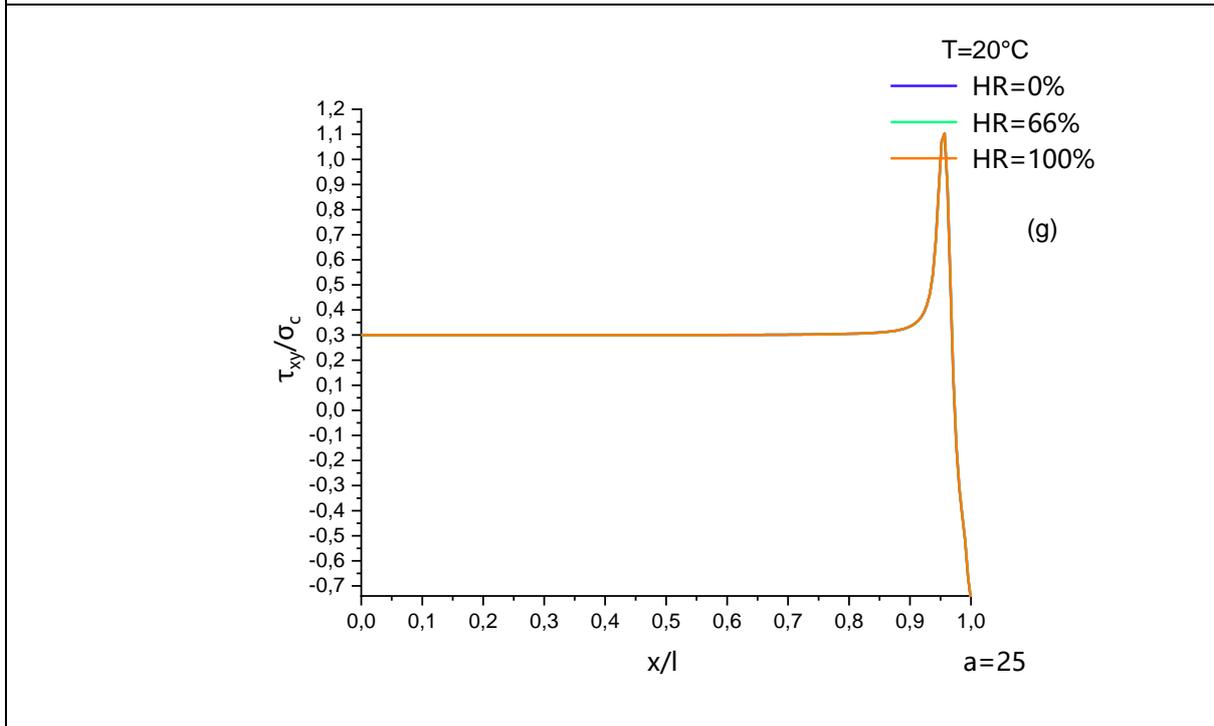
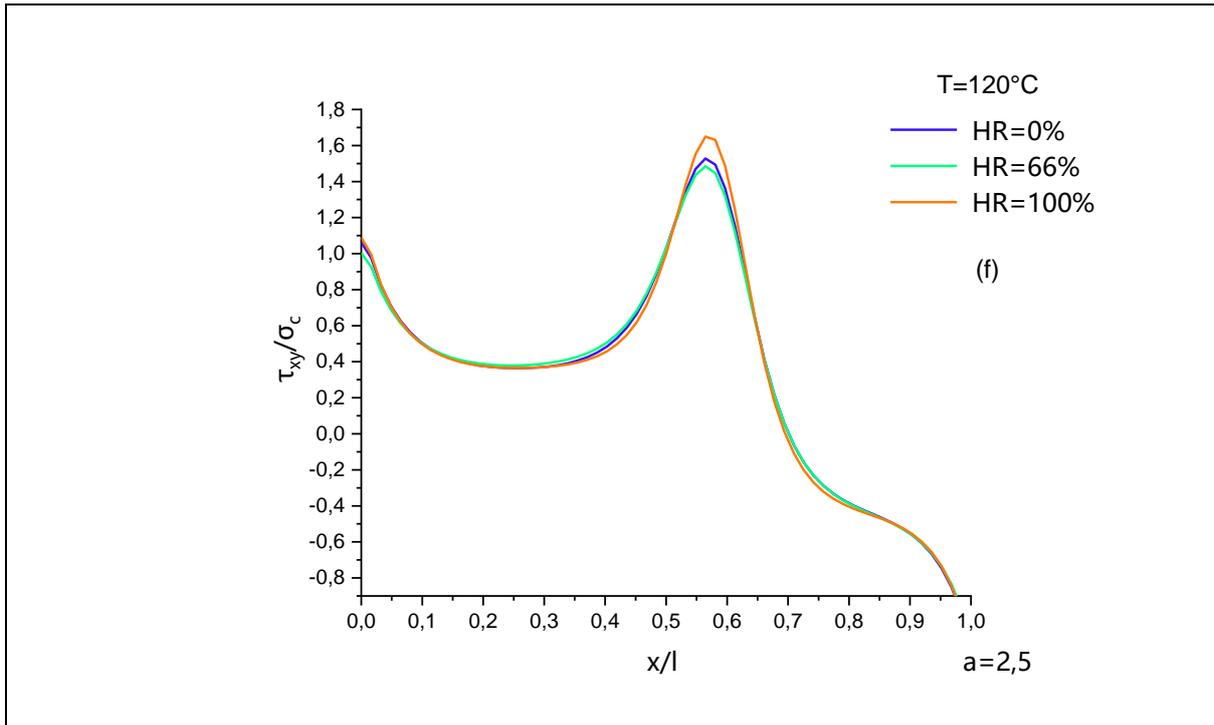


Figure 4- 10 : la variation de la contrainte longitudinale pour différents rapports géométriques « a », température opérationnelle « T » et « $\alpha=1$ »

4.7.2 Contrainte de cisaillement :

a) Pour $\alpha=1/3$





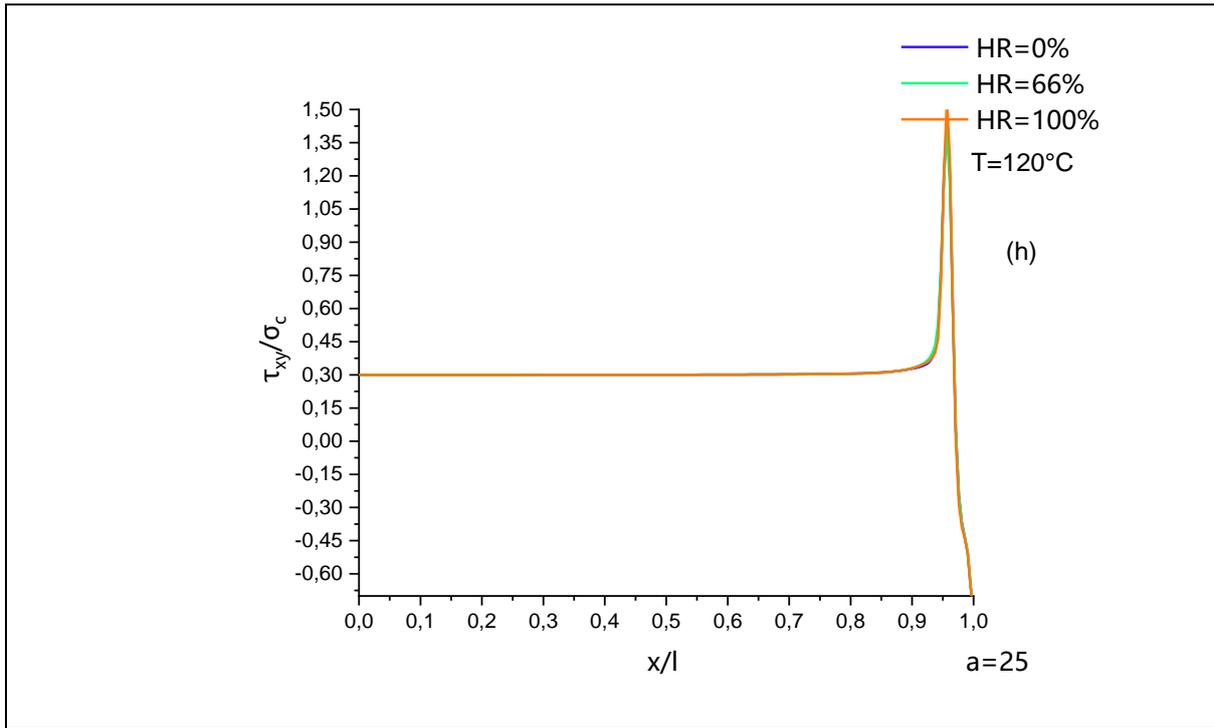
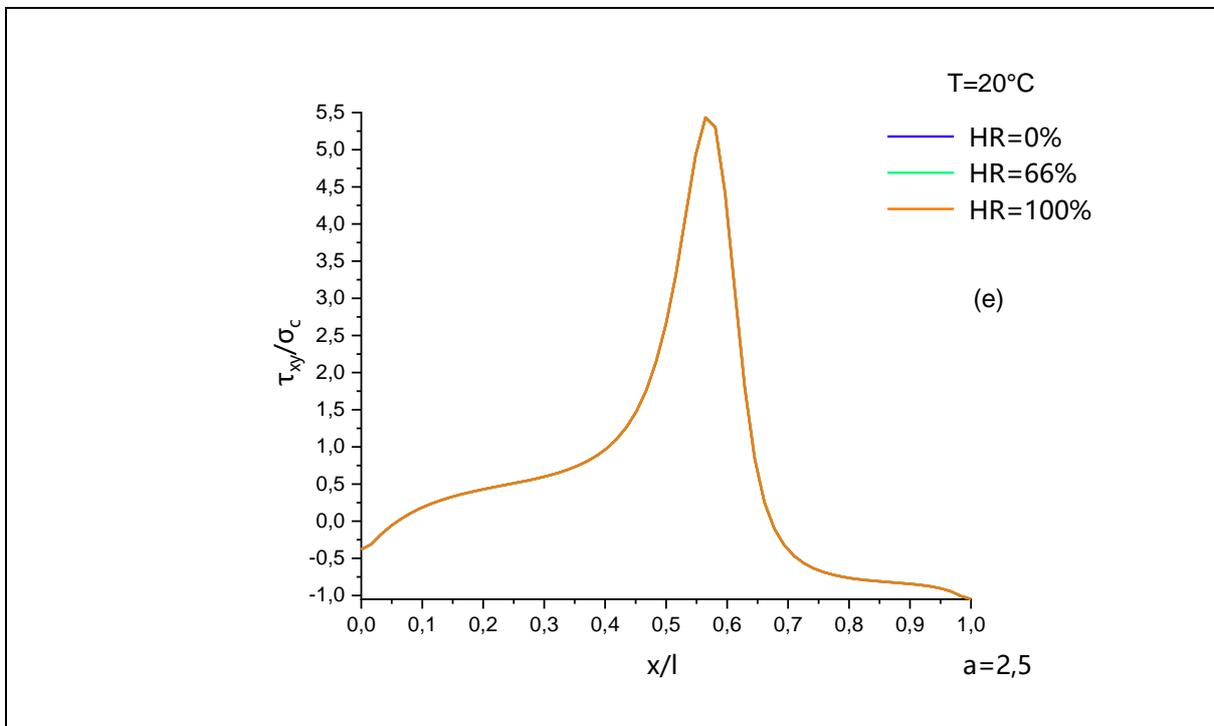
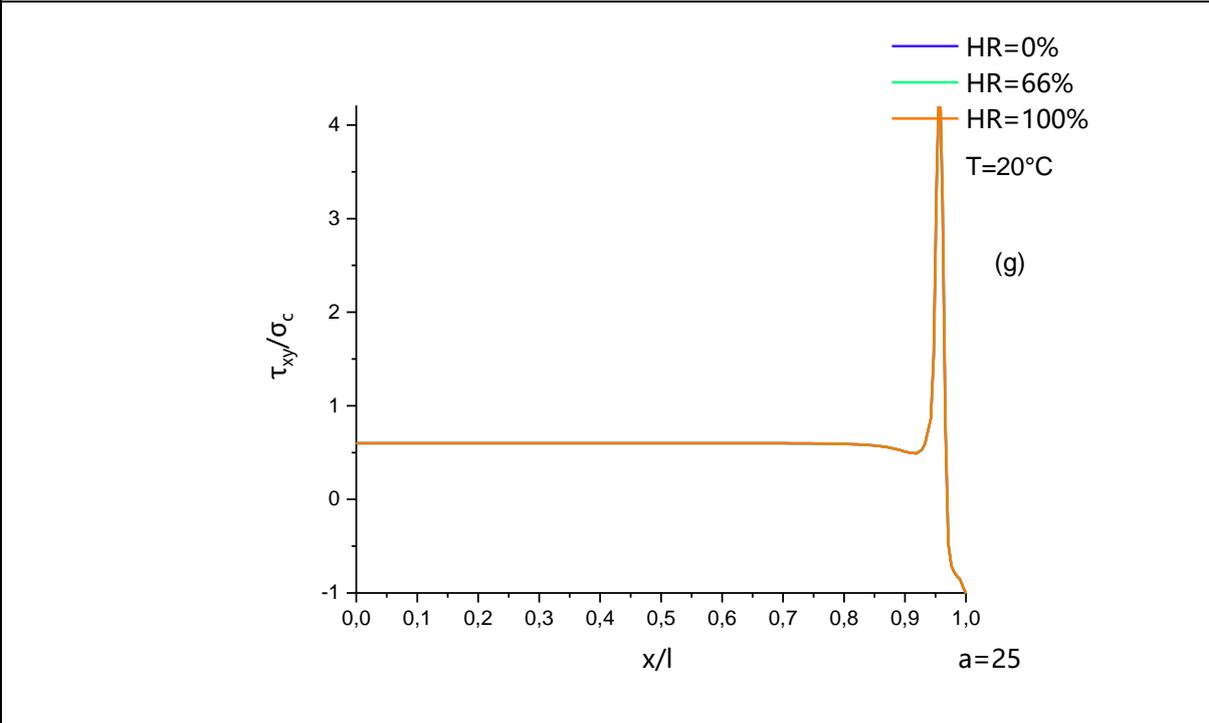
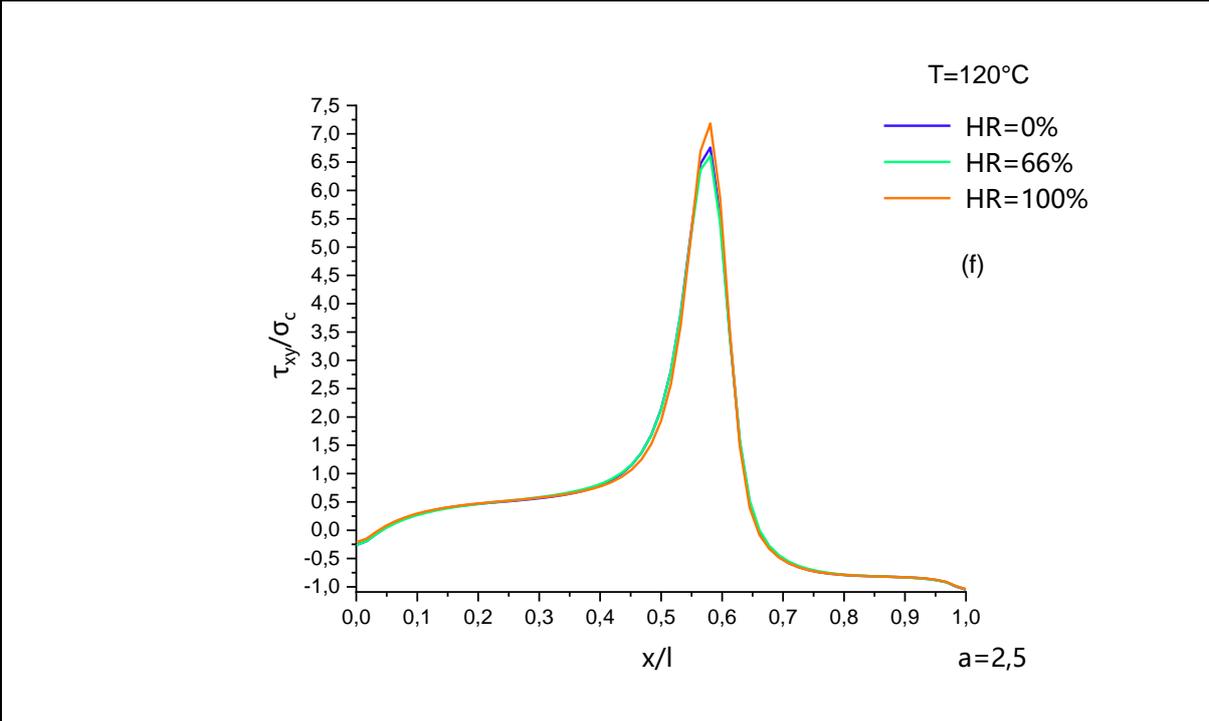


Figure 4- 11 : Variation de la contrainte de cisaillement pour différents rapports géométriques « a », température opérationnelle « T » et « $\alpha=1/3$ »

b) Pour $a=1$





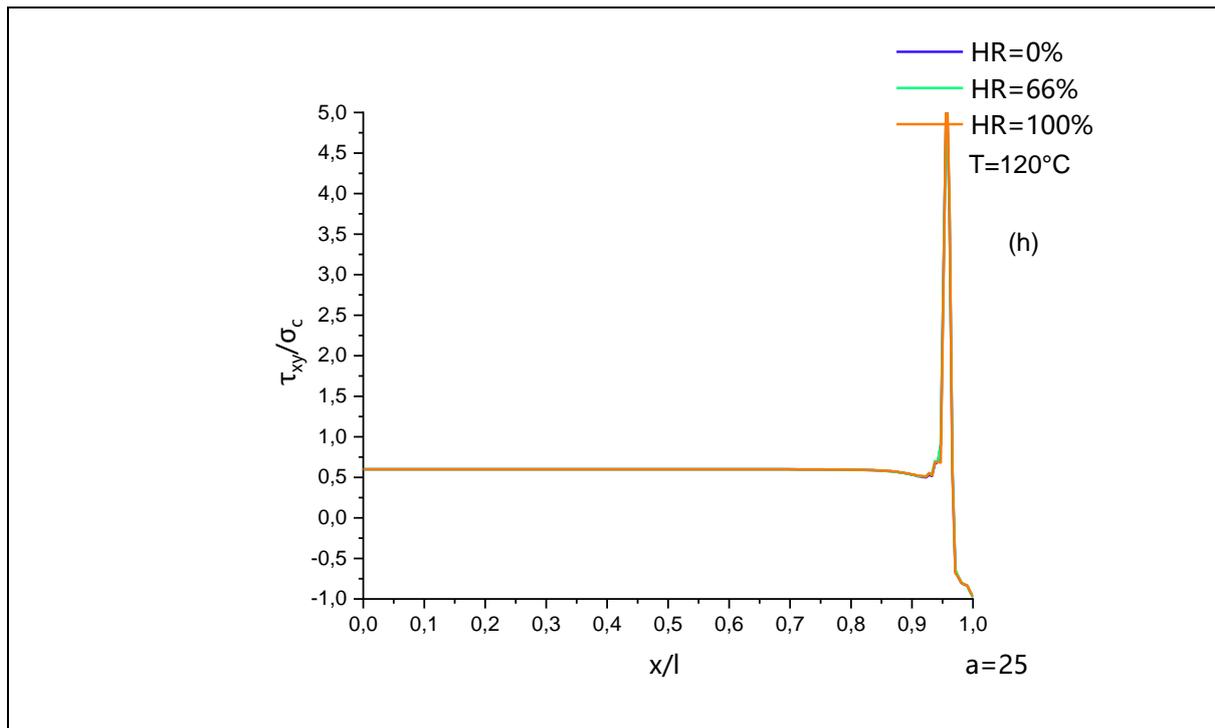


Figure 4- 12 : Variation de la contrainte de cisaillement pour différents rapports géométriques « a », température opérationnelle « T » et « $\alpha=1$ »

4.7.3 Interprétations des résultats :

Figures 4-9 à 4-12 représentent la variation de la contrainte longitudinale et de cisaillement en fonction des coordonnées longitudinales (x/l) pour différentes humidités relatives, densités de fissures « a » et rapports d'épaisseur « α » en variant l'humidité.

Pour $a=2.5$ et $\alpha=1/3$, la contrainte longitudinale diminue rapidement avec un comportement presque identique pour $T=20^\circ\text{C}$ et $T=120^\circ\text{C}$ (figures 4-9(e),4-9(f),4-10(e) et 4-10(f)). Un faible effet d'humidité est noté lorsque la température est maximale ($T=120^\circ\text{C}$) figures 4-9(f) et 4-10(f). Par contre pour une faible densité de fissure ($a=25$), une distribution stable de la contrainte longitudinale est remarquée loin du plan de fissures et une dégradation rapide en approchant des plans de fissures longitudinale, délaminage et transversale.

Pour une seule couche à 90° (figure 4-10), l'effet de l'humidité relative est visible au plan de fissure longitudinale et avec des températures élevées que ce soit pour des grandes densités de fissures ou même faibles.

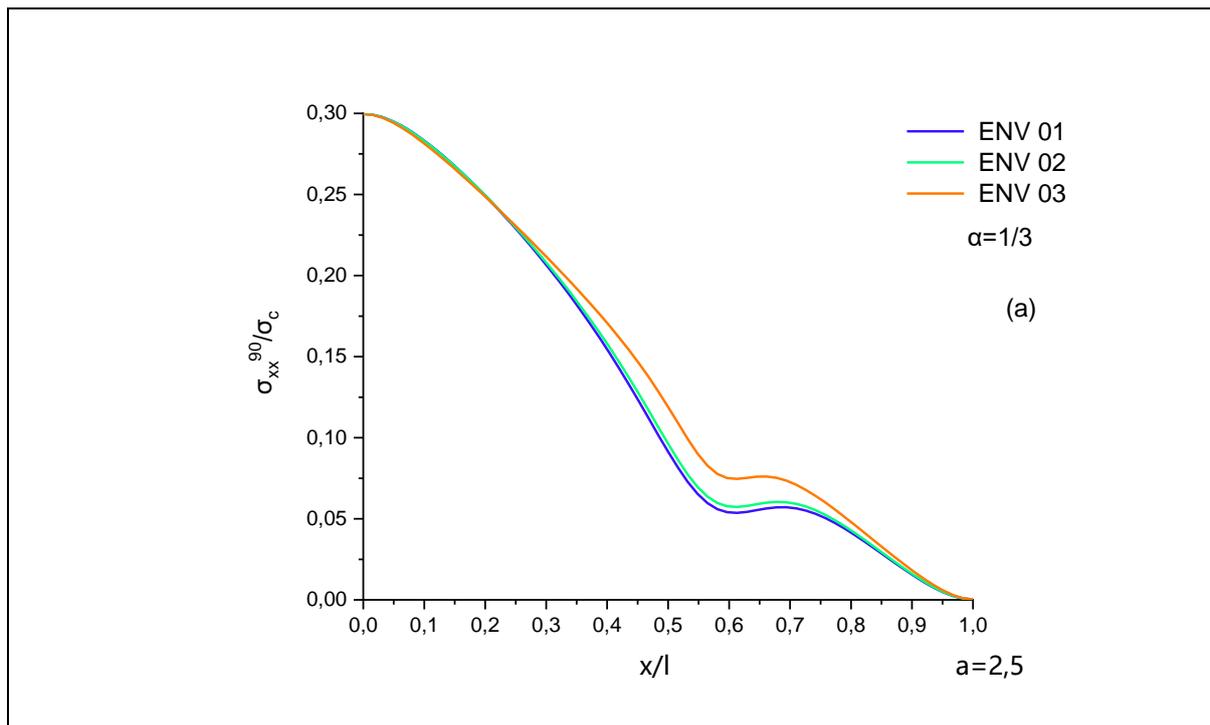
La contrainte de cisaillement marque des valeurs plus importantes pour $\alpha=1$ comparant au $\alpha=1/3$, cette dernière varie d'une façon similaire pour une température faible avec une ou

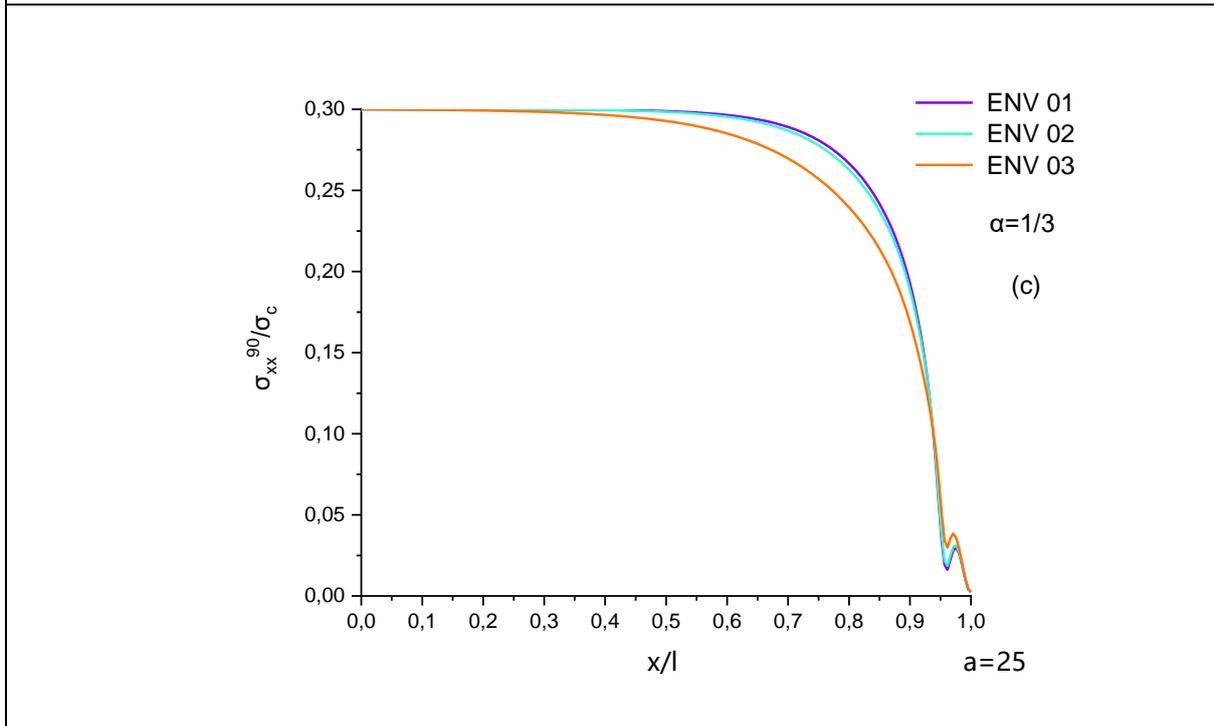
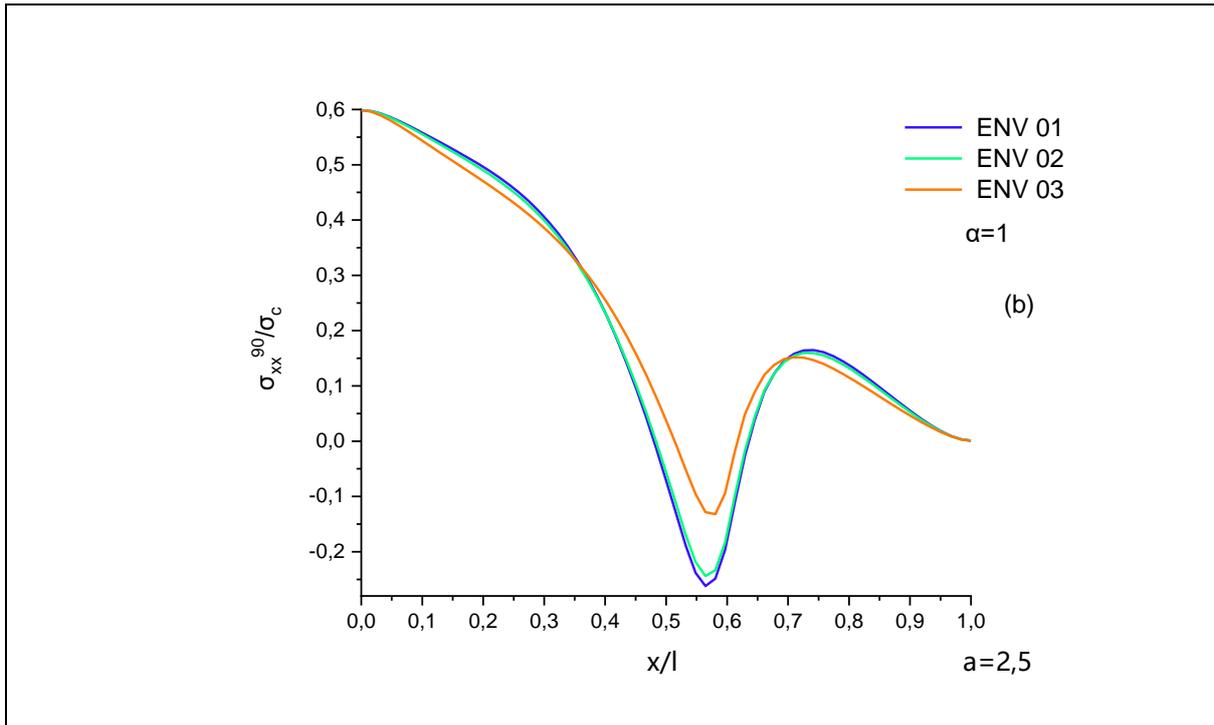
trois couches à 90° (figures 4-11(e),4-12(e)), on constate une variation rapprochée pour une valeur élevée de la température (figures 4-11(f),4-12(f)).

Pour $a=25$ ($\alpha=1/3$, $\alpha=1$) la stratifié se comporte de la même manière pour les deux valeurs de la température ($T=20^\circ\text{C}$ et $T=120^\circ\text{C}$) et cela dans les figures 4-11(g),4-11(h),4-12(g) et 4-12(h).

4.8 Impact des conditions hygrothermiques sur la variation de la contrainte longitudinale d'un stratifié $[0/90_3]_s$, endommagé sous sollicitations mécaniques :

Les graphs ci-dessous représentent la variation des contraintes longitudinales en fonction des coordonnées longitudinales (x/l) avec des rapports géométriques de fissuration « $a=2.5 ; 25$ » et un rapport d'épaisseur de couches « $\alpha=1/3$ » et « $\alpha=1$ » pour un stratifié $[0/90_n]_s$ fissuré avec fissures intralaminaires et interlaminaire (voir figure 4-13).





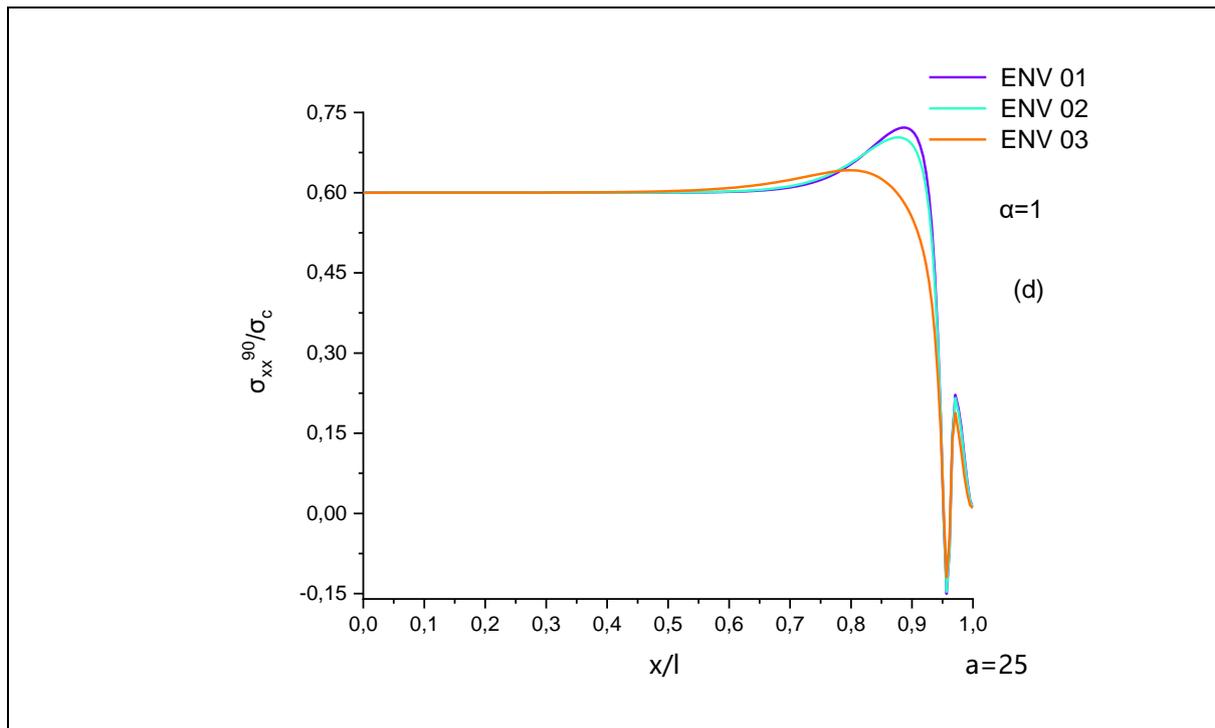


Figure 4- 13 : Variation de la contrainte longitudinale pour différents rapports géométriques « a » et différents environnements hygrothermiques

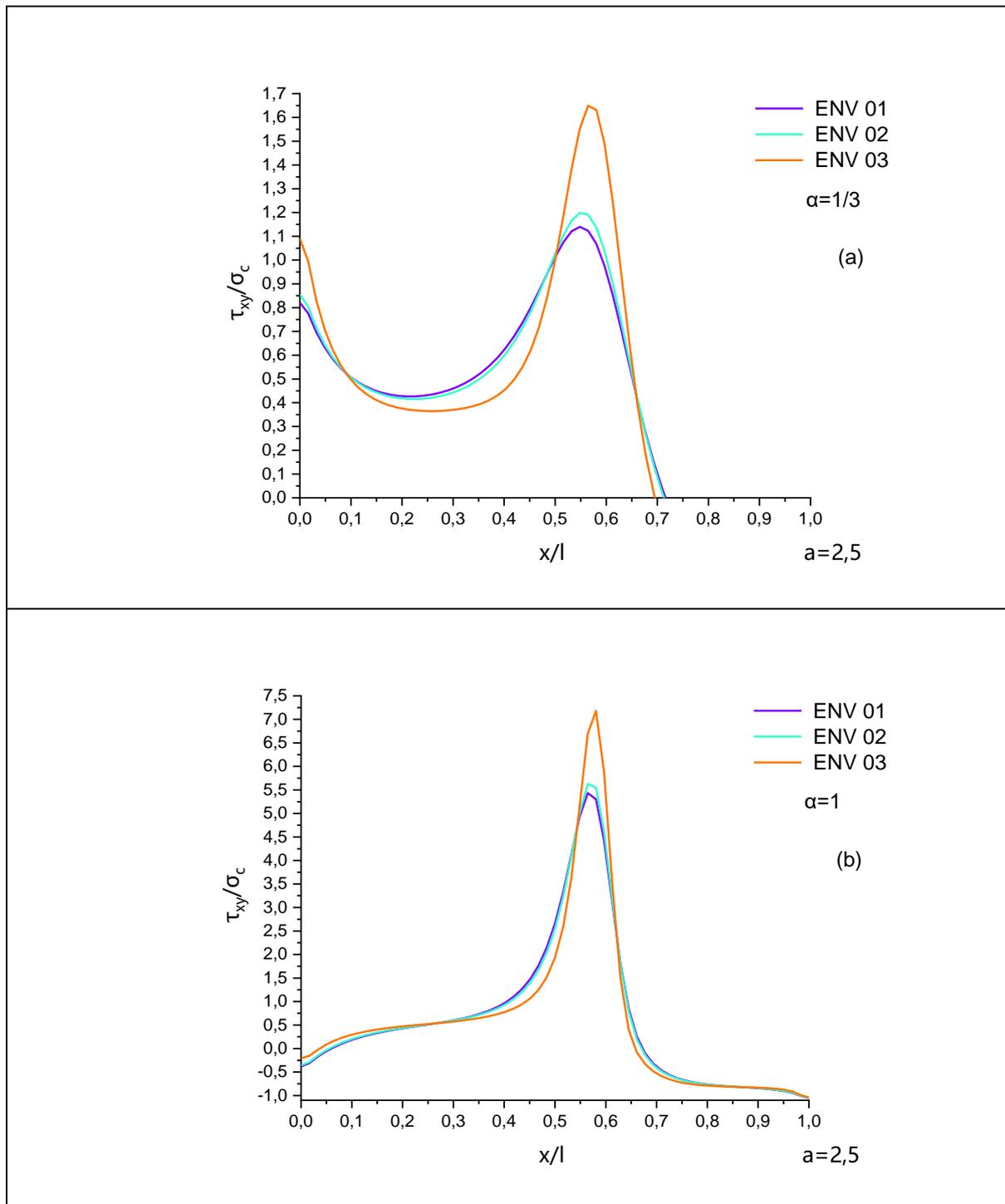
4.8.1 Interprétations des résultats

La figure 4-13 représente la variation de la contrainte longitudinale en fonction des coordonnées longitudinales d'un stratifié $[0/90_n]_s$ fissuré avec fissures intralaminaires et interlaminaire ayant un rapport d'épaisseur « $\alpha=1/3$ » et « $\alpha=1$ » et cela pour différents rapports géométriques « $a=2.5 ; 25$ » et divers environnements hygrothermiques.

La contrainte longitudinale diminue d'une façon plus significative avec la variation des conditions hygrothermiques, cette diminution de contrainte est importante dans le cas où la densité de fissures est importante (figures 4-13 (a), et 4-13(b)), par ailleurs a une valeur de « $a=25$ », la contrainte tend à être uniforme entre deux fissures transverses consécutives avant de diminuer à proximité du plan de fissures (principalement au plan de fissure longitudinale) (figures 4-13 (c), et 4-13(d)) et cela pour des valeurs de température et d'humidité relative élevées (ENV 03) pour « $\alpha=1/3$ » et « $\alpha=1$ ».

4.9 Impact des conditions hygrothermiques sur la variation de la contrainte de cisaillement d'un stratifié $[0/90_3]_s$, endommagé sous sollicitations mécaniques :

Les graphes qui suivent montrent la variation des contraintes de cisaillement en fonction des coordonnées longitudinales (x/l) avec des rapports géométriques de fissuration « $a=2.5$; 25 » et un rapport d'épaisseur de couches « $\alpha=1/3$ » et « $\alpha=1$ » pour un stratifié $[0/90_n]_s$ fissuré avec fissures intralaminaires et interlaminaire (voir figure 4-14).



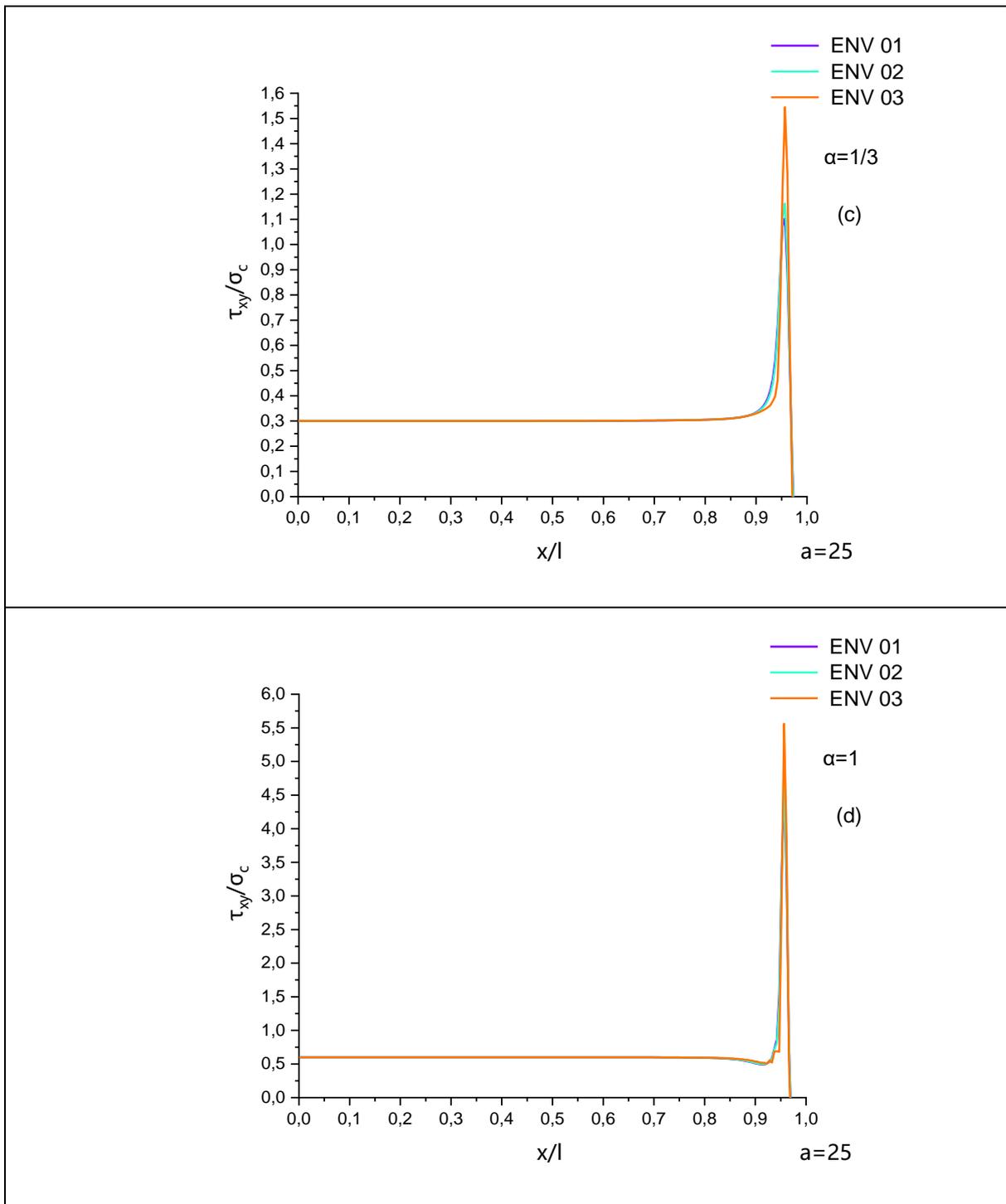


Figure 4- 14 : Variation de la contrainte de cisaillement pour différents rapports géométriques « a » et différents environnements hygrothermiques.

4.9.1 Interprétations des résultats :

La distribution de la contrainte de cisaillement en fonction des coordonnées longitudinales d'un stratifié $[0/90_n]_s$ fissuré avec fissures intralaminaires et interlaminaire ayant un rapport d'épaisseur « $\alpha=1/3$ » et « $\alpha=1$ » est représentée dans la figure 4-14 et cela

pour différents rapports géométriques « $a=2.5$; 25 » et divers environnements hygrothermiques.

La contrainte de cisaillement prend des valeurs plus marquantes dans des conditions hygrothermiques extrêmes (ENV 03) approximativement $\tau_{xy}/\sigma_c = 1.7$ et $\tau_{xy}/\sigma_c = 7.5$ (figures 4-14 (a) et 4-14 (b)) respectivement pour la valeur de « $a=2.5$ » et cela à l'intersection des plans de fissures longitudinale et délaminage. Contrairement au comportement du stratifié qui est presque identique pour une densité de fissures faibles « $a=25$ » et « $a=1/3$ », « $a=1$ » et cela est valable pour les trois environnements (figures 4-14 (c) et 4-14 (d)).

4.10 Conclusion :

Nous avons étudié l'effet des conditions hygrothermiques sur le comportement mécanique des composites $[0/90_n]_s$ soumis à une tension bi axiale et endommagés par des fissures transversales et longitudinales ainsi qu'un délaminage. Un modèle simplifié de Tsai a été utilisé pour simuler le vieillissement hygrothermique.

Le modèle en éléments finis qu'on a validé et discuté dans le chapitre précédent, on l'a mis sous différents environnements, en abordant les défauts et les dégradations générés par le vieillissement hygrothermique, afin d'étudier l'influence de la variation de la température dans un premier lieu et d'humidité dans un second lieu. Ensuite faire l'étude de l'impact des conditions environnementales sur la variation des contraintes mécaniques d'un matériau composite $[0/90_n]_s$ soumis à une traction bi axiale et endommagé par des fissurations transversales, longitudinales et délaminage.

Un effet plus ou moins visible de la température seul ou humidité relative est noté sur la distribution de la contrainte longitudinale ou de cisaillement et cela au plan de fissure longitudinale. D'un autre côté, une réduction des contraintes longitudinales et une augmentation des contraintes de cisaillement sont remarquées avec l'augmentation des conditions hygrothermiques.

En conclusion, l'influence des conditions d'humidité et de chaleur est cruciale et importante dans l'étude des changements des propriétés mécaniques des stratifiés endommagés avec fissuration transversale, longitudinales et délaminage.

5 CONCLUSION GENERALE

Au cours de ce travail de recherche, nous avons procédé à une étude dans le but d'évaluer quantitativement le comportement des matériaux composites stratifiés de type $[0/90_n]_s$ sollicités en traction uni axiale dans un premier temps ensuite par une sollicitation bi axiale. Le processus d'endommagement est caractérisé par des fissures transversales dans la couche orientée à 90° , des fissures longitudinales dans la couche orientée à 0° ainsi qu'au délaminage inter laminaire a l'interface fibre/matrice.

Dans le but de décrire de façon précise le comportement mécanique du stratifié endommagé, nous avons développé dans notre étude deux types d'approche : approche analytique et analyse numérique par éléments finis en utilisant le code ABAQUS. En premier lieu, notre étude permet de décrire la répartition du champ des contraintes, des déplacements et déformations dans le composite endommagé, ainsi que celles régissant la variation des propriétés élastiques en fonction de la densité de fissurations.

Dans un second lieu, l'intérêt a porté essentiellement sur l'étude et l'amélioration de la contrainte longitudinale à travers le stratifié et la contrainte de cisaillement inter laminaire en adoptant une modélisation de la fissuration transverse avec délaminage qui s'appuie sur un schéma appelé modèle de transfert du chargement par cisaillement (Shear Lag), ainsi qu'une étude numérique par éléments finis.

En troisième lieu, une simulation numérique s'est portée sur un stratifié endommagé par les trois types de fissures afin de voir l'influence de la fissuration longitudinale sur le comportement mécanique du matériau composite.

Pour pouvoir quantifier l'évolution des propriétés mécaniques, la modélisation du vieillissement a été établie à travers un modèle à l'échelle micro-analytique, modèle de Tsai qui prend en considération l'effet de la concentration d'humidité et de la température sur les propriétés des fibres et de la matrice.

L'étude numérique de l'évolution des champs de contraintes à travers l'épaisseur du stratifié $[0/90_3]_s$ vieillis hygrothermiquement soumis à une traction bi axiale et endommagé par des fissurations transversales, longitudinales et délaminage est primordiale car les structures sont exposées à des environnements externes souvent très agressifs pendant leur service.

A l'aide de cette modélisation analytique et de l'étude numérique par éléments finis, les résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

- Pour le modèle analytique, la modélisation est basée sur une approche déplacement, l'équilibre ne peut être donc vérifié qu'en moyenne. Car, si on veut prendre en compte la variation suivant l'épaisseur des couches de la contrainte normale longitudinale dans la couche à 90° et transverse dans la couche à 0° , les conditions aux limites au niveau des plans des fissures transverses ne peuvent en aucun cas être respectées
- Pour la modélisation numérique du stratifié $[0/90_2]_s$ endommagé par fissurations transverses et délaminage, les résultats améliorés montrent une bonne concordance avec les résultats obtenus par Berthelot. Ces résultats nous permettent d'avoir une idée sur le comportement mécanique du stratifié endommagé d'un point de vue local. Toutefois, des prédictions restent discutables et ne peuvent en aucun cas être fiables à 100 %.
- La contrainte normale longitudinale dans la couche orientée à 90° qui pilote l'endommagement par fissuration transverse, longitudinale et délaminage prend les valeurs maximales à mi-distance entre deux fissures transverses consécutives.
- La contrainte de cisaillement prend les valeurs maximales à proximité des deux plans de fissures (longitudinale et délaminage), et s'annule sur le plan de fissures transverses (conditions aux limites respectées).
- L'apparition des fissures longitudinales dans la couche à 0° est causée par la contrainte normale transverse.
- L'amorçage aux fissures transversales, longitudinales et délaminage est plus facile lorsque le rapport d'épaisseur « α » est faible, soit à un drapage qui contient des plis à 90° épais.
- L'architecture du drapage est le paramètre le plus intéressant sur lequel il est possible d'intervenir pour la prévention de l'endommagement, en vue d'obtenir des stratifiés répondant au cahier des charges.
- Le modèle de simulation sur Abaqus utilisé pour modéliser le comportement des stratifiés soumis à des conditions de vieillissement hygrothermiques semble satisfaisant pour représenter le comportement des contraintes en fonction de la densité de fissuration, sous différentes conditions environnementales.

- Une réduction des contraintes longitudinales et une augmentation des contraintes de cisaillement sont remarquées avec l'augmentation des conditions hygrothermiques dans les stratifiés fissurés avec fissurations transversales, longitudinales et délaminage soumis à une traction bi axiale.
- Les contraintes mécaniques dépendent de plusieurs paramètres, à savoir : le rapport géométrique des couches, la densité de fissure, longueur de la fissure longitudinale, la température et l'humidité.

En conclusion, on peut dire que la présence des trois fissures dans un stratifié composite de type $[0/90_n]_s$ a un impact sur le changement des contraintes mécaniques en prenant en considération l'architecture du stratifié, ainsi que le rapport géométrique de fissuration. La température et l'humidité aussi jouent un rôle major sur la variation des propriétés mécaniques des stratifiés fissurés.

Comme perspectives futures de notre recherche, nous proposons d'établir un modèle aux éléments finis à 3 dimensions (3D) d'un stratifié fissuré avec fissure transversale et délaminage en ajoutant la fissuration longitudinale et voir l'influence de la variation de la couche 0° sur le comportement mécanique du composite. L'étude sera étalée à l'influence des conditions hygrothermiques sur le comportement mécaniques d'un matériau composite $[\theta_m/90_n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage et sollicité en traction uni axiale en utilisant deux types d'approches : approche analytique et approche numérique.

6 LISTE DES SYMBOLES

σ_m : La contrainte en traction dans la matrice (GPa)

τ_m : La contrainte de cisaillement dans la matrice (GPa)

τ_{mu} : La contrainte en cisaillement a la rupture de la matrice (GPa)

τ_d : La contrainte de décohésion (GPa)

σ_f : La contrainte de traction dans une fibre (GPa)

σ_{fu} : La contrainte à la rupture de la fibre (GPa)

(a): Rapport géométrique de fissuration

(α): rapport d'épaisseur de couches

m : nombre de couches 0°

n : nombre de couches 90°

t_θ : Epaisseur de la couche à θ° (mm)

t_{90} : Demi-épaisseur de la couche à 90° (mm)

x : coordonnée longitudinale

τ : Contrainte de cisaillement (Gpa)

ν_{xy} : Coefficient de poisson longitudinal

ν_{yz} : Coefficient de poisson transverse

x, y, z : Repère du pli

σ_c : contrainte de traction appliquée (Gpa)

E_{fx} : Module longitudinal de Young dans la direction de la fibre (Gpa)

E_{fy} : Module transversal de Young dans la direction de la fibre (Gpa)

E_x : Module longitudinal de Young dans le pli fissuré (Gpa)

E_{0x} : Module longitudinal de Young dans le pli non fissuré (Gpa)

E_y : Module transversal de Young dans le pli (Gpa)

E_{0y} : Module transversal de Young dans le pli à température de référence (Gpa)

G_{fx} : Module de cisaillement de la fibre (Gpa)

G_{xz}^0 : Module de cisaillement longitudinal (Gpa)

G_{xz}^{90} : Module de cisaillement transversal (Gpa)

G_m : Module de cisaillement de la matrice (Gpa)

G_{xy} : Module de cisaillement dans le pli (Gpa)

T_g^0 = Température de transition vitreuse a la température de référence (°C)

T_g = Température de transition vitreuse

HR : Degré hygrométrique ou humidité relative (%)

7 BIBLIOGRAPHIE

- [1] « An Introduction to Composite Materials », *Aerospace Engineering Blog*, 3 juillet 2012. <https://aerospaceengineeringblog.com/composite-materials/> (consulté le 28 mai 2023).
- [2] L. Gornet, *Généralités sur les matériaux composites*. 2011. [En ligne]. Disponible sur: <https://cel.hal.science/cel-00470296v2>
- [3] J.-M. Berthelot, « Mécanique des Matériaux et Structures Composites ».
- [4] J.-L. Rebière, M.-N. Maâtallah, et D. Gamby, « Analysis of damage mode transition in a cross-ply laminate under uniaxial loading », *Compos. Struct.*, vol. 55, n° 1, p. 115-126, janv. 2002, doi: 10.1016/S0263-8223(01)00133-7.
- [5] J. Wang et B. L. Karihaloo, « Matrix crack-induced delamination in composite laminates », [En ligne]. Disponible sur: [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(97\)00103-7](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(97)00103-7)
- [6] J.-L. Rebière, « Prediction of matrix cracking damage and delamination in cross ply laminates. », [En ligne]. Disponible sur: <https://www.researchgate.net/publication/281271683>
- [7] Y. Mimoune, « MODELISATION DYNAMIQUE DES STRUCTURES COMPOSITES ENDOMMAGEES. », Thesis, Univ M'sila, 2020. Consulté le: 28 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: <http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/22030>
- [8] R. M. Jones, *Mechanics Of Composite Materials*, 2^e éd. Boca Raton: CRC Press, 2018. doi: 10.1201/9781498711067.
- [9] Berthelot, J. M, « Matériaux composites: comportement mécanique et analyse des structures. 1999. »
- [10] I. B. Ammar, « Contrôle de santé vibro-acoustique de l'endommagement des matériaux composites à base polymère pour l'aéronautique », phdthesis, Le Mans Université ; Université de Sfax (Tunisie), 2014. Consulté le: 28 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-01223982>
- [11] « L'endommagement dans le cas d'un matériau stratifié à différents... | Download Scientific Diagram ». https://www.researchgate.net/figure/3-Lendommagement-dans-le-cas-dun-matériau-stratifié-a-différents-echelles_fig3_333660069 (consulté le 22 juin 2023).
- [12] C. Thomas, « Étude des mécanismes d'endommagement des composites fibres de carbone / matrice polyamide : application à la réalisation de réservoirs de stockage de gaz sous haute pression de type IV », phdthesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2011. Consulté le: 28 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00656807>
- [13] I. Zairi et A. (promotrice) Benkhedda, « Etude du Comportement Mécanique d'un Matériau Composite [0m/90n]s Fissuré et Soumis à des Conditions Hygrothermiques », Thesis, université blida 1, 2014. Consulté le: 22 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://di.univ-blida.dz/jspui/handle/123456789/4342>

- [14] H. Nechad, « Evaluation de l'endommagement et de la rupture de matériaux hétérogènes par ultrasons et émission acoustique : estimation de la durée de vie restante », These de doctorat, Lyon, INSA, 2004. Consulté le: 23 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2004ISAL0040>
- [15] M. Kashtalyan et C. Soutis, « Analysis of composite laminates with intra- and interlaminar damage », *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 41, n° 2, p. 152-173, févr. 2005, doi: 10.1016/j.paerosci.2005.03.004.
- [16] J.-M. Berthelot et J.-F. Le Corre, « A model for transverse cracking and delamination in cross-ply laminates », *Compos. Sci. Technol.*, vol. 60, n° 7, p. 1055-1066, mai 2000, doi: 10.1016/S0266-3538(00)00006-3.
- [17] S. Doumaz et R. Touahri, « Effet de la température sur les propriétés d'un matériau composite stratifié [0 m /90 n] s fissuré et sous sollicitation de traction uni axiale », Thesis, Université Blida 01, 2020. Consulté le: 22 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://di.univ-blida.dz/jspui/handle/123456789/11085>
- [18] E. H. Saidane, « Etude de l'effet du vieillissement hygrothermique sur le comportement mécanique d'éco-composites à renfort hybride », These de doctorat, Reims, 2015. Consulté le: 22 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2015REIMS034>
- [19] A. Benkhedda, « Etude hygrothermique des matériaux composites à matrice polymère avec la prise en compte de l'effet du vieillissement lors de la désorption en transitoire », Thesis, univ.blida1, 2008. Consulté le: 22 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://di.univ-blida.dz/jspui/handle/123456789/6474>
- [20] G. S. Springer, « Environmental effects of composite materials (Book) », *Westport CT Technomic Publ. Co Inc 1981 210 P*, 1981.
- [21] C.-H. Shen et G. S. Springer, « Moisture Absorption and Desorption of Composite Materials », *J. Compos. Mater.*, vol. 10, n° 1, p. 2-20, janv. 1976, doi: 10.1177/002199837601000101.
- [22] B. Boukert, « Prise en compte du vieillissement hygrothermique dans l'analyse du comportement des composites hybrides », Thesis, univ.blida 1, 2011. Consulté le: 22 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://di.univ-blida.dz/jspui/handle/123456789/5639>
- [23] Y. Perrot, « Influence de la matrice sur le comportement mécanique de matériaux composites verre/polyester utilisés en construction navale de plaisance : cas des résines polyester limitant les émissions de styrène », These de doctorat, Lorient, 2006. Consulté le: 22 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2006LORIS074>
- [24] J. Mercier, « Prise en compte du vieillissement et de l'endommagement dans le dimensionnement de structures en matériaux composites », These de doctorat, Paris, ENMP, 2006. Consulté le: 22 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2006ENMP1438>
- [25] N. Besbaci, « Modélisation de la fissuration transverse et délaminage dans un matériau composite sous l'effet de la variation de température », Thesis, univ Blida, 2021. Consulté

le: 22 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://di.univ-blida.dz/jspui/handle/123456789/11912>

- [26] K. L. Reifsnider, *Damage in Composite Materials*. ASTM International.
- [27] A. L. Highsmith et K. L. Reifsnider, « Internal Load Distribution Effects During Fatigue Loading of Composite Laminates », in *Composite Materials: Fatigue and Fracture*, ASTM International, p. 233-251. doi: 10.1520/STP19989S.
- [28] N. J. Pagano, « Stress fields in composite laminates », *Int. J. Solids Struct.*, vol. 14, n° 5, p. 385-400, janv. 1978, doi: 10.1016/0020-7683(78)90020-3.
- [29] K. W. Garrett et J. E. Bailey, « Multiple transverse fracture in 90° cross-ply laminates of a glass fibre-reinforced polyester », *J. Mater. Sci.*, vol. 12, n° 1, p. 157-168, janv. 1977, doi: 10.1007/BF00738481.
- [30] C. Zweben et A. Wang, « Fracture mechanics of sublaminar cracks in composite materials », *Compos. Technol. Rev. Vol 6 2*, 1984.
- [31] J.-M. Berthelot, P. Leblond, A. El Mahi, et J.-F. Le Corre, « Transverse cracking of cross-ply laminates: Part 1. Analysis », *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 27, n° 10, p. 989-1001, janv. 1996, doi: 10.1016/1359-835X(96)80002-A.
- [32] N. M. Maatallah, « Analyse de l'endommagement par fissuration transverse, fissuration longitudinale et delaminage des stratifiés croisés », These de doctorat, Le Mans, 2000. Consulté le: 22 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2000LEMA1009>
- [33] J. Mercier, « Prise en compte du vieillissement et de l'endommagement dans le dimensionnement de structures en matériaux composites », phdthesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2006. Consulté le: 22 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00156986>
- [34] A. Benkeddad, « Conception d'un logiciel d'analyse des plaques stratifiées avec prise en compte des contraintes hygrothermiques transitoires », These de doctorat, Dijon, 1994. Consulté le: 22 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/1994DIJOS002>
- [35] N. El Meiche, « Analyse des champs de contraintes dans les matériaux composites croisés en présence des fissures transversales », Thèse de magister, Département de génie civil ,Sidi Bel Abbas, 2000.
- [36] N. Laws et G. J. Dvorak, « Progressive Transverse Cracking In Composite Laminates », *J. Compos. Mater.*, vol. 22, n° 10, p. 900-916, oct. 1988, doi: 10.1177/002199838802201001.
- [37] S. E. Groves, C. E. Harris, A. L. Highsmith, D. H. Allen, et R. G. Norvell, « An experimental and analytical treatment of matrix cracking in cross-ply laminates », *Exp. Mech.*, vol. 27, n° 1, p. 73-79, mars 1987, doi: 10.1007/BF02318867.
- [38] Z. Sereir, Ea. Adda-Bedia, et A. Tounsi, « Effects of the Accelerated Moisture Diffusivity on the Hygrothermal Behavior on a Laminated Plate with Symmetrical Environmental

Conditions », *J. Therm. Stress.*, vol. 28, n° 9, p. 889-910, sept. 2005, doi: 10.1080/01495730590964891.

[39] X. Wang, K. Dong, et X. Y. Wang, « Hygrothermal effect on dynamic interlaminar stresses in laminated plates with piezoelectric actuators », *Compos. Struct.*, vol. 71, n° 2, p. 220-228, nov. 2005, doi: 10.1016/j.compstruct.2004.10.004.

[40] S. W. Tsai, « *Composites Design* ». in Think Composites. , Dayton, Paris, Tokyo, 1987.