

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

LA REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Saad Dahleb Blida 1



Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales

Département Construction Aéronautique

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme

Master en Aéronautique

Option : Structure Aéronautique

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

Encadré par :

M. KHODJET-KESBA

Co-encadré par :

B. BOUKERT

Réaliser par :

BELKAS AMIR

MESLI MOHAMED

Promotion : 2023/2024

RESUME

Cette recherche vise à approfondir notre compréhension du comportement spécifique d'un stratifié à matrice organique à fibres longues $[\theta_m/90_n]_s$ sous tension bi-axiale, sujet à des fissures transversales, longitudinales et délaminage. Pour ce faire, un modèle analytique et numérique précis est développé pour décrire le comportement du matériau dans des conditions variables de température, d'humidité et de charge mécanique. La première étape de l'étude s'est concentrée sur la fissuration transversale et le délaminage, en utilisant deux approches distinctes : un modèle analytique basé sur la méthode de diffusion du cisaillement et une simulation numérique avec le code ABAQUS utilisant la méthode des éléments finis. La deuxième phase de la recherche s'est penchée sur l'influence combinée du vieillissement hygrothermique et des dommages causés par les fissures inter et intralaminaires sur la distribution des contraintes dans les matériaux composites. Des techniques de modélisation analytique et de simulation numérique ont été employées à cet effet. Les résultats de cette étude contribueront au développement de modèles prédictifs pour l'évaluation et l'optimisation des performances de ces stratifiés dans diverses applications.

SUMMARY

This research aims to deepen our understanding of the specific behavior of a long fiber-reinforced organic matrix laminate $[\theta_m/90_n]_s$ under biaxial tension, subject to transverse, longitudinal, and delamination cracks. To achieve this, a precise analytical and numerical model is developed to describe the material's behavior under varying temperature, humidity, and mechanical load conditions. The first step of the study focused on transverse cracking and delamination, using two distinct approaches: an analytical model based on the shear diffusion method and a numerical simulation using the ABAQUS code with the finite element method. The second phase of the research focused on the combined influence of hygrothermal aging and inter- and intralaminar crack damage on the stress distribution in composite materials. Analytical modeling and numerical simulation techniques were employed for this purpose. The results of this study will contribute to the development of predictive models for the evaluation and optimization of the performance of these laminates in various applications.

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تعميق فهمنا للسلوك المحدد للصفائح المترابكة ذات المصفوفة العضوية المقواة بألياف طويلة $[\theta_m/90_n]_s$ تحت الشد ثنائي المحاور، والتي تكون عرضة للشقوق المستعرضة والطولية والتصفيح. لتحقيق ذلك، تم تطوير نموذج تحليلي رقمي دقيق لوصف سلوك المادة تحت ظروف متغيرة من حيث درجة الحرارة والرطوبة والحمل الميكانيكي. ركزت المرحلة الأولى من الدراسة على التشقق المستعرض والتصفيح، باستخدام نهجين مميزين: نموذج تحليلي يعتمد على طريقة انتشار القص، ومحاكاة رقمية باستخدام برنامج ABAQUS باستخدام طريقة العناصر المحدودة. ركزت المرحلة الثانية من البحث على التأثير المشترك للتقدم الرطب الحراري والأضرار الناجمة عن تشققات ما بين الطبقات وداخلها على توزيع الإجهاد في المواد المركبة. تم استخدام تقنيات النمذجة التحليلية والمحاكاة الرقمية لهذا الغرض. ستنسأهم نتائج هذه الدراسة في تطوير نماذج تنبؤية لتقييم وتحسين أداء هذه الصفائح المترابكة في تطبيقات مختلفة.

Remerciements

On remercie dieu le tout puissant qui nous a donné le courage et la volonté pour réaliser ce modeste travail et le mener jusqu'au bout.

Ensuite, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur, Mr. KHODJET-KESBA Mohamed, pour ses précieux conseils et son soutien indéfectible tout au long de ce travail. Nous remercions également notre co-encadreur, Mr. BOUKERT Bilel, pour le co-encadrement de ce travail.

Nous sommes également reconnaissants aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail.

Enfin, nous souhaitons remercier toute l'équipe pédagogique de l'Institut d'Aéronautique et des études spatiales pour la qualité de leur enseignement et leur disponibilité.

Dédicace

Je dédié ce modeste travail,

*A mes chers parents, pour leur soutien leur
patience et sacrifices pour me voir réussir.*

*A mes frères et mes sœurs, qui m'ont toujours
soutenu et encouragé.*

*A mes aimable amis, collègues d'étude qui
m'ont accompagné durant mon chemin d'études
supérieures.*

Dédicace

Je dédié ce modeste travail,

*A mes chers parents, pour leur soutien leur
patience et sacrifices pour me voir réussir.*

*A mes frères et mes sœurs, qui m'ont toujours
soutenu et encouragé.*

*A mes aimable amis, collègues d'étude qui
m'ont accompagné durant mon chemin d'études
supérieures.*

Table des matières

INTRODUCTION	1
1 Chapitre 01: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE	3
1.1 Introduction :	3
1.2 Architecture des matériaux composites :	4
1.3 Structure générale d'un stratifié :	5
1.3.1 Stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels :	6
1.4 Dégradation des matériaux composites :	7
1.5 Les échelles d'observation de l'endommagement :	8
1.6 Les mécanismes d'endommagement :	9
1.6.1 Fissuration de la Matrice :	10
1.6.2 La rupture des fibres :	11
1.6.3 Décohésion fibre-matrice :	12
1.6.4 Délaminage :	13
1.7 Fissuration des composites stratifiés :	13
1.8 La propagation des fissures :	15
1.9 Densité de la fissuration :	16
1.10 Types de vieillissement :	17
1.10.1 Vieillissement physique :	17
1.10.2 Vieillissement chimique :	19
1.11 Problématique :	20
1.12 Travaux effectués :	21
1.13 Définition du sujet :	23
2 Chapitre 02: MODELISATION DE LA FISSURATION TRANSVERSE, LONGITUDINALE ET DELAMINAGE	24
2.1 Introduction :	24

2.2	Modélisation analytique d'un stratifié endommagé par fissuration transverse et délaminage :	25
2.2.1	Distribution des contraintes dans la partie délaminée :	26
2.2.1.1	Champ de déplacement et distribution des contraintes dans la partie sans délamination :	27
2.2.1.1.1	Champ de déplacement :	27
2.2.1.1.2	Contraintes de cisaillement :	29
2.2.1.1.3	Champs de contraintes et de déplacements :	31
2.3	Modélisation par éléments finis :	34
2.3.1	Conditions aux limites :	36
2.3.2	Maillage :	36
2.4	Conclusion :	39
3	Chapitre 03 : SIMULATION ET VISUALISATION DES RESULTATS DES STRATIFIES FISSURES $[\theta_m/90_n]_s$ SOUS SOLLICITATIONS MECANIQUES	41
3.1	Introduction :	41
3.2	Simulation numérique :	41
3.2.1	Choix du matériau pour la simulation :	42
3.2.2	Propriétés de la rupture :	42
3.2.3	Choix de la géométrie de fissuration et du délaminage :	43
3.3	Résultats numériques :	44
3.3.1	Validation du modèle numérique :	44
3.3.2	Variation de la contrainte longitudinale :	45
3.3.3	Variation de la contrainte de cisaillement :	46
3.3.4	Validation de la contrainte longitudinale par le modèle MEF :	47
3.3.5	Validation de la contrainte de cisaillement par le modèle MEF :	48
3.3.6	Interprétation des résultats :	50
3.4	Modélisation de la fissuration longitudinale :	51
3.4.1	Modélisation :	51

3.4.2	Choix de la géométrie de fissuration :	51
3.4.3	Choix du matériau :	51
3.5	Paramètres influençant le comportement d'un stratifié fissuré par fissuration transverse, longitudinale et délaminage :	52
3.5.1	Variation de la contrainte longitudinale σ_{xx} :	52
3.5.1.1	Influence des différents rapports d'épaisseur « α » sur le comportement d'un stratifié [$\theta_m/90_n$] endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différents rapports géométriques:.....	52
3.5.1.2	Influence des différents angles d'orientation « θ » sur le comportement d'un stratifié [$\theta_m/90_n$] endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différents rapports géométriques :.....	55
3.5.2	Variation de la contrainte de cisaillement τ_{xy} :	57
3.5.2.1	Influence des différents rapports d'épaisseur « α » et différents rapports géométriques « a » sur le comportement d'un stratifié [$0_m/90_n$] fissuré avec fissures intralaminaires et délaminage :	57
3.5.2.2	Influence des différents angles d'orientation « θ » et différents rapports géométriques « a » sur le comportement d'un stratifié [$\theta_m/90_n$] fissuré avec fissures intralaminaires et délaminage :	60
3.6	Conclusion :	63
4	Chapitre 04 : SIMULATION ET RESULTATS NUMERIQUES DES STRATIFIES FISSURES ET DELAMINES SOUMIS A UN CHARGEMENT MECANIQUE SOUS L'EFFET DES CONDITIONS HYGROTHERMIQUES	64
4.1	Introduction :	64
4.2	Caractérisation du matériau :	64
4.2.1	Le module de Young dans la direction des fibres :	65
4.2.2	Le module de Young transversal :	65
4.2.3	Le module de cisaillement longitudinal :	65
4.2.4	Le coefficient de Poisson :	65

4.2.5	Introduction du vieillissement sur les propriétés mécaniques du matériau et le modèle de Tsai :	66
4.2.6	Evolution de Tg au cours du vieillissement :	66
4.2.7	Température adimensionnelle :	66
4.2.8	Prise en compte du vieillissement dans les propriétés de la matrice :	66
4.2.9	Prise en compte du vieillissement dans les propriétés des fibres :	67
4.3	Choix du matériau :	67
4.3.1	Propriétés du matériau T300/5208 :	68
4.4	Conditions de simulation :	69
4.4.1	Effets des conditions hygrothermiques :	69
4.5	Simulation numérique :	70
4.5.1	Conditions aux limites :	70
4.5.2	Modèle aux éléments finis :	70
4.6	Etude de l'évolution de la contrainte longitudinale dans un stratifié $[\theta_m/90_n]_s$ fragilisé par des fissures sous des conditions hygrothermiques variables et des sollicitations mécaniques : 72	
4.6.1	Interprétation des résultats :	76
4.7	Étude de l'évolution de la contrainte de cisaillement dans un stratifié $[0_m/90_n]_s$ fragilisé par des fissures sous des conditions hygrothermiques variables et des sollicitations mécaniques : 78	
4.7.1	Interprétation des résultats :	81
4.8	Conclusion :	83
5	CONCLUSION GENERALE	84
6	LA LISTE DES SYMBOLES	
7	BIBLIOGRAPHIE	

Table des figures

Figure 1-1: les constituants d'un matériau composite [3].	4
Figure 1-2: Constitution d'un stratifié [3].	5
Figure 1-3: Poutre sollicitée en flexion [3].	6
Figure 1-4: Désignation d'un stratifié [3].	7
Figure 1-5: Les différentes échelles d'observation de l'endommagement : illustration sur un matériau stratifié [11].	9
Figure 1-6: Les principaux endommagements rencontrés dans un stratifié [13].	10
Figure 1-7: Rupture transverse de la matrice [3].	10
Figure 1-8: Rupture longitudinale de la matrice [3].	11
Figure 1-9: Rupture de Fibre [3].	11
Figure 1-10: Décohésion Fibre-Matrice [3].	12
Figure 1-11: Mécanisme de délaminage [13].	13
Figure 1-12: Rupture interlaminaire [13].	14
Figure 1-13: Rupture intralaminaire [13].	14
Figure 1-14: Rupture translaminaire [13].	14
Figure 1-15: Propagation de la rupture dans le cas d'une faible adhérence fibre-matrice [3].	15
Figure 1-16: Surfaces de rupture dans le cas d'une faible adhérence fibre-matrice [3].	16
Figure 1-17: 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] s [17].	17
Figure 1-18: Pénétration d'un solvant dans un polymère [24].	19
Figure 1-19: Equation générale de l'hydrolyse [25].	20
Figure 2-1: Stratifié croisé endommagé par fissuration transverse et délaminage [16].	25
Figure 2-2: Modélisation des plis de stratifié de type [0/90 ₂] _s sur ABAQUS.	37
Figure 2-3: modélisation des contraintes appliquées au stratifié de type [0/90 ₂] _s .	37
Figure 2-4: maillage quadratique d'un quart du stratifié de type [0/90 ₂] _s fissuré par fissure transverse et délaminage.	38
Figure 2-5: modélisation des plis du stratifié de type [0/90 ₃] _s sur ABAQUS.	38
Figure 2-6: modélisation des contraintes appliquées au stratifié de type [0/90 ₃] _s .	39
Figure 2-7: maillage quadratique d'un quart du stratifié type [0/90 ₃] _s fissuré par fissure transverse, longitudinale et délaminage.	39
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.	43

Figure 3-2: Variation de la contrainte longitudinale pour un stratifié $[0/90_2]_s$ pour $\alpha=1/2$ et $a=6$ avec différents forme de fissure transverse.....	44
Figure 3-3 : Variation de la contrainte longitudinale dans un composite stratifié $[0/90_2]_s$ endommagé par fissuration transverse et délaminage.	45
Figure 3-4: Variation de la contrainte cisaillement dans un composite stratifié $[0/90_2]_s$ endommagé par fissuration transverse et délaminage.	46
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.	48
Figure 3-6: Validation de la contrainte de cisaillement d'un stratifié $[0/90_2]_s$ fissuré par fissuration transverse et délaminage avec le modèle analytique.	50
Figure 4-1: Organigramme du calcul des propriétés vieillis.....	68
Figure 4-2 : Modélisation des plis du stratifié de type $[0/90_3]_s$ sur ABAQUS.....	71
Figure 4-3: Modélisation des contraintes appliquées au stratifié de type $[0/90_3]_s$	71
Figure 4-4: Maillage quadratique d'un quart de stratifié $[0/90_3]_s$ fissuré avec fissure transverse ,longitudinale et délaminage pour $\ll a=2.5 \gg$	72
Figure 4-5: Variation de la contrainte longitudinale dans un stratifié $[0m/90n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « α » et différents environnements hygrothermiques.....	73
Figure 4-6: Variation de la contrainte longitudinale dans un stratifié $[0m/90n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « α » et différents environnements hygrothermiques.....	75
Figure 4-7: Variation de la contrainte de cisaillement dans un stratifié $[0m/90n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « α » et différents environnements hygrothermiques.	78
Figure 4-8: Variation de la contrainte de cisaillement dans un stratifié $[0m/90n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « α » et différents environnements hygrothermiques.	80

Liste des tableaux

Tableau 3-1: Propriétés élastiques du matériau AS46-3502 [16].	42
Tableau 3-2: Propriétés de la rupture [16].	42
Tableau 3-3: Propriétés élastiques du matériau T300-914 [32].	51
Tableau 3-4: Variation de la contrainte longitudinale dans un stratifié $[0_m/90_n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « α ».	52
Tableau 3-5: Variation de la contrainte longitudinale dans un stratifié $[30_m/90_n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « α ».	53
Tableau 3-6: Variation de la contrainte longitudinale dans un stratifié $[45_m/90_n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « α ».	53
Tableau 3-7: Variation de la contrainte longitudinale dans un stratifié $[\theta_m/90_n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « θ ».	55
Tableau 3-8: Variation de la contrainte longitudinale dans un stratifié $[\theta_m/90_n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « θ ».	55
Tableau 3-9: Variation de la contrainte longitudinale dans un stratifié $[\theta_m/90_n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « θ ».	56
Tableau 3-10: Variation de la contrainte de cisaillement dans un stratifié $[0_m/90_n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « α ».	58
Tableau 3-11: Variation de la contrainte de cisaillement dans un stratifié $[30_m/90_n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « α ».	58
Tableau 3-12: Variation de la contrainte de cisaillement dans un stratifié $[45_m/90_n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « α ».	59
Tableau 3-13: Variation de la contrainte de cisaillement dans un stratifié $[\theta_m/90_n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « θ ».	60

Tableau 3-14: Variation de la contrainte de cisaillement dans un stratifié $[\theta_m/90_n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « θ ».....	61
Tableau 3-15: Variation de la contrainte de cisaillement dans un stratifié $[\theta_m/90_n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « θ ».....	61
Tableau 4-1: Caractéristiques de fibres et matrice du T300/5208 de Tsai [40]......	69
Tableau 4-2 : Caractérisation de variation de température et d'humidité [40]......	69
Tableau 4-3 : Propriétés du T300/5208 $T_{rm}=22^\circ\text{C}$ et $C=0.5\%$ [40]......	69
Tableau 4-4 : Caractéristiques de diffusion du T300/5208 [40].	69
Tableau 4-5: Propriétés élastiques du matériau T300/5208 en fonction des différentes conditions hygrothermiques [25].	70
Tableau 4-6: Variation de la contrainte longitudinale σ_{xx} en fonction de a, α et des conditions hygrothermiques dans un stratifié $[0/90_3]_s$ fissuré.	74
Tableau 4-7: Variation de la contrainte longitudinale σ_{xx} en fonction de a, α et des conditions hygrothermiques dans un stratifié $[0_3/90]_s$ fissuré.	74
Tableau 4-8: Variation de la contrainte longitudinale σ_{xx} en fonction de a, α et des conditions hygrothermiques dans un stratifié $[30/90_3]_s$ fissuré.....	76
Tableau 4-9: Variation de la contrainte longitudinale σ_{xx} en fonction de a, α et des conditions hygrothermiques dans un stratifié $[30_3/90]_s$ fissuré.....	76
Tableau 4-10: Variation de la contrainte de cisaillement τ_{xy} en fonction de a, α et des conditions hygrothermiques dans un stratifié $[0/90_3]_s$ fissuré.	79
Tableau 4-11: Variation de la contrainte de cisaillement τ_{xy} en fonction de a, α et des conditions hygrothermiques dans un stratifié $[0_3/90]_s$ fissuré.	79
Tableau 4-12: Variation de la contrainte de cisaillement τ_{xy} en fonction de a, α et des conditions hygrothermiques dans un stratifié $[30/90_3]_s$ fissuré.....	81
Tableau 4-13: Variation de la contrainte de cisaillement τ_{xy} en fonction de a, α et des conditions hygrothermiques dans un stratifié $[30_3/90]_s$ fissuré.....	81

INTRODUCTION

Les années 1930 marquent une période cruciale dans l'évolution de l'industrie des composites, caractérisée par le développement majeur des résines de polyester et d'époxy. Parallèlement, l'apparition de la fibre de verre sur le marché a donné naissance à l'industrie des polymères renforcés de fibres. Depuis cette époque, les matériaux composites se sont imposés comme des alternatives économiques aux matériaux traditionnels tels que le métal et les thermoplastiques techniques.

Les composites sont des matériaux constitués par l'association de deux ou plusieurs composants distincts, permettant de combiner leurs propriétés uniques pour obtenir un matériau final aux caractéristiques améliorées. Ils sont largement utilisés dans l'industrie aérospatiale grâce à leur légèreté, leur haute résistance et leur capacité à offrir des performances supérieures comparées aux matériaux traditionnels comme les métaux.

Prédire avec précision la durée de vie des matériaux composites demeure un défi majeur, ce qui explique leur adoption progressive et prudente dans le secteur aéronautique. Le comportement à long terme de ces matériaux est particulièrement difficile à prévoir lorsqu'ils sont soumis à des contraintes mécaniques extrêmes, à des températures élevées et à des variations d'humidité.

Les dommages subis par les matériaux composites entraînent une dégradation de leurs propriétés mécaniques, pouvant provoquer des incidents catastrophiques. De nombreuses analyses ont été développées dans le domaine des composites pour évaluer les distributions de contraintes dans les laminés endommagés, dans le but de prévenir de tels incidents lors des phases de conception et d'exploitation.

Dans les stratifiés composites $[\theta_m/90_n]_s$ soumis à une charge monotone, la rupture finale résulte du développement et de l'accumulation de divers types d'endommagement. Observés à l'échelle microscopique, ces dommages incluent des microfissures dans la matrice ou à l'interface des plis, la décohésion des fibres et de la matrice, ainsi que l'arrachement et la rupture des fibres. Parmi ces dommages, la rupture des fibres est la plus dangereuse, apparaissant tardivement et entraînant la destruction finale du matériau.

Les travaux expérimentaux menés précédemment, montrent que le matériau composite se dégrade graduellement. Son comportement mécanique peut différer considérablement de celui du matériau intact, en fonction du niveau de dommage.

Parmi ces recherches, l'une a été introduite pour étudier le comportement des structures composites fissurées soumises à des efforts de traction, en se concentrant sur les 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 employé pour analyser les effets du vieillissement, notamment la température et l'humidité, sur le comportement du stratifié ainsi que sur la variation des propriétés élastiques du matériau.

Pour mener à bien cette étude, notre travail sera divisé en quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, une recherche bibliographique a été faite sur la structure générale des composites, les différents types de dommages qui peuvent apparaître sur un stratifié, ainsi que les divers types de fissures possibles.
- Dans le deuxième chapitre, un modèle analytique est utilisé pour étudier la distribution de contrainte 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 par éléments finis sera effectuée avec le logiciel ABAQUS. Ensuite, un nouveau type d'endommagement appelé fissure longitudinale sera ajouté pour évaluer son impact ainsi que l'effet de différents paramètres clés sur la distribution des contraintes dans un stratifié de type $[\theta_m/90_n]_s$ fissuré avec des fissures interlaminaires et intralaminaires, soumis à une traction biaxiale.
- Au dernier chapitre, une étude sera menée pour évaluer l'impact des conditions hygrothermiques sur le comportement mécanique du stratifié $[\theta_m/90_n]_s$ fissuré avec des fissures interlaminaires et intralaminaires, lorsqu'il est soumis à une traction biaxiale.

Nous concluons par une conclusion générale accompagnée de perspectives pour les travaux futurs.

1 Chapitre 01

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Introduction :

Les matériaux composites sont formés en combinant deux ou plusieurs matériaux distincts, afin de rassembler leurs meilleures propriétés ou de créer de nouvelles caractéristiques que chaque matériau seul ne pourrait pas atteindre [1]. Un matériau composite est constitué de phases distinctes, appelées renforts et matrice. Dans un composite intact, les renforts et la matrice sont solidement liés, sans glissement ni séparation entre eux. Les renforts, sous forme de fibres continues ou discontinues, jouent un rôle crucial en fournissant la résistance mécanique. Leur agencement et orientation renforcent les propriétés mécaniques de la structure. La matrice, quant à elle, assure la cohésion entre les renforts et répartit les sollicitations mécaniques. Nous nous intéressons particulièrement aux composites à fibres longues continues, utilisés dans les industries aéronautique et spatiale. Les pièces structurelles sont fabriquées en empilant des nappes, en optimisant l'orientation des renforts en fonction des charges à supporter. Le choix de la résine ou du renfort dépend de l'application finale souhaitée [2].

Lorsqu'un stratifié composite croisé est soumis à une charge de traction, les fibres de renforcement alignées avec cette charge sont mises en tension et commencent à s'étirer. Si la charge continue d'augmenter, les fibres peuvent dépasser leurs limites d'élasticité et subir une déformation permanente, ce qui entraîne la formation d'une fissure dans le stratifié.

La propagation de cette fissure dépend de la direction des fibres de renforcement. Si la fissure se propage dans la direction des fibres (fissuration longitudinale), elle peut progresser rapidement et facilement, car les fibres offrent peu de résistance dans cette direction. En revanche, si la fissure se propage perpendiculairement aux fibres (fissuration transversale), elle rencontrera une résistance plus élevée, car les fibres s'opposent davantage à la propagation de la fissure dans ce sens.

Après la fissuration de la matrice, la rupture interfaciale entre les couches survient, connue sous le nom de décohésion, signalant le début du délaminage.

Ces processus ont été analysés séparément de manière analytique. Certaines recherches, telles que celles menées par Berthelot [3], se concentrent sur la propagation des fissures transverses à l'aide de méthodes analytiques ou numériques. D'autres études, comme celles de J.-L Rebière [4], développent des modèles analytiques spécifiques au délaminage.

Par ailleurs, certains chercheurs examinent le délaminage et le rôle des fissurations transverses et longitudinales dans ce phénomène. Par exemple, Wang et Karihaloo ont étudié l'empilement optimal des couches (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 analyser le développement des différents mécanismes d'endommagement dans les composites stratifiés croisés. Ces critères se basent généralement sur le calcul de la contrainte maximale [6].

D'autres critères se basent sur des approches énergétiques. Dans plusieurs modèles analytiques et numériques, ces critères 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 d'un composite désigne la manière dont les différents constituants d'un matériau composite sont arrangés et agencés pour former une structure solide. Cette architecture combine un matériau de renfort, qui peut être sous forme de particules, de fibres courtes ou de fibres longues, avec une matrice qui les enrobe. Les renforts apportent au matériau sa résistance et sa rigidité, tandis que la matrice agit comme une substance de liaison. L'architecture des composites peut varier en fonction de la nature de la matrice et des renforts (comme des fibres de carbone ou de verre), de leur disposition et de leur proportion respective. Cela permet aux concepteurs de créer des matériaux "sur mesure", optimisés pour l'application spécifique de la pièce, et parfois même ajustés localement en fonction de la distribution des contraintes dans la pièce [7].

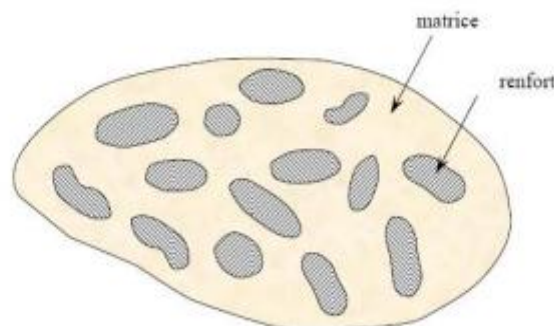


Figure 1-1: les constituants d'un matériau composite [3].

Notre étude se concentrera sur les stratifiés constitués de fils ou de tissu unidirectionnels.

1.3 Structure générale d'un stratifié :

Les composites stratifiés sont composés de fines couches de renforts, typiquement des fibres, empilées les unes sur les autres dans différentes orientations et imprégnées de résine (voir figure 1-2). Les renforts peuvent être unidirectionnels (dans une seule direction) ou bidirectionnels. Ces composites sont largement employés dans les applications aérospatiales en raison de leur grande flexibilité de conception [8].

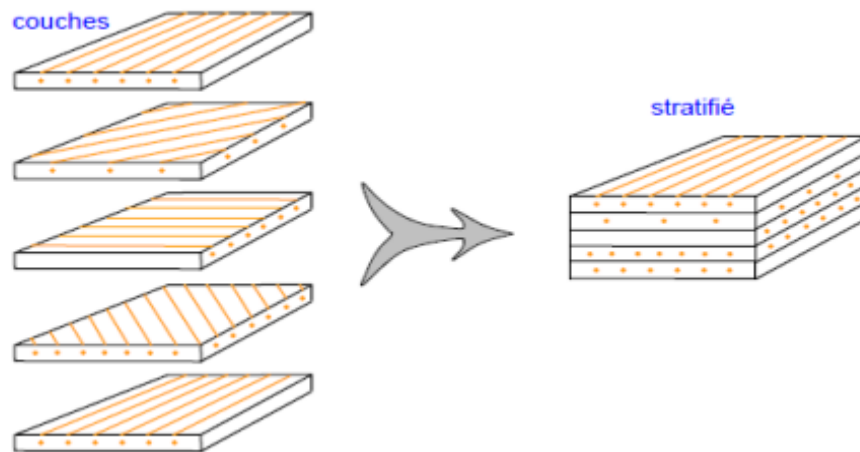


Figure 1-2: Constitution d'un stratifié [3].

En général, chaque couche de renfort peut être de nature variée : fils, stratifiés, mats, tissus, fibres de verre, fibres de carbone, etc. Chaque couche doit être spécifiée en fonction du type de fibres et du renfort utilisé. Le choix de la nature et de la séquence des couches dépendra de l'application du matériau composite, en l'adaptant au mieux aux contraintes spécifiques :

- Les couches unidirectionnelles offrent de bonnes performances mécaniques dans la direction des fibres.
- Les mats sont moins résistants à la traction et sont généralement utilisés dans les zones soumises à compression. Par exemple, la figure 1-3 montre des couches

unidirectionnelles dans la zone de traction et un mat dans la zone de compression d'une poutre soumise à flexion.

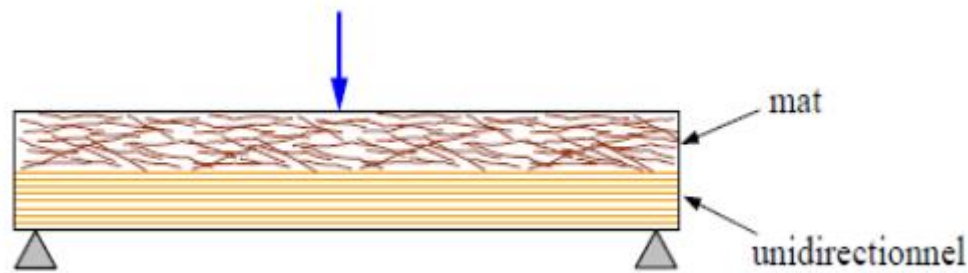


Figure 1-3: Poutre sollicitée en flexion [3].

Une stratification croisée est susceptible de présenter des problèmes de délaminage interlaminaire. En outre, il est pertinent de mentionner qu'une stratification symétrique tend généralement à assurer une bonne planéité du stratifié après démoulage.

1.3.1 Stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels :

Les stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels représentent un type fondamental de stratifié, théoriquement réductible à tout autre type de stratifié. Ils se composent (voir figure 1-4) de couches de fils ou de tissus unidirectionnels, avec une orientation décalée entre chaque couche.

La désignation de ces stratifiés suit généralement le code suivant :

1. Chaque couche est identifiée par un nombre représentant l'angle en degrés entre la direction des fibres et l'axe x de référence.
 2. Les couches successives avec des angles différents sont séparées par un /.
 3. Les couches avec la même orientation sont numérotées séquentiellement.
 4. Les couches sont nommées en ordre progressif de l'une à l'autre face.
- Des crochets (ou parenthèses) encadrent le début et la fin du code.

- La méthode de désignation dépend du système d'axes sélectionné.

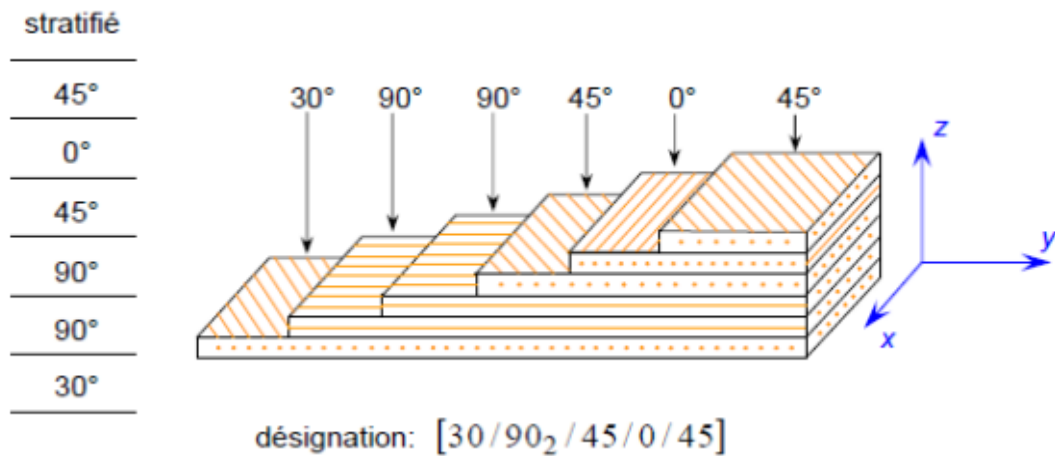


Figure 1-4: Désignation d'un stratifié [3].

- Un stratifié est considéré comme symétrique si son plan médian est un plan de symétrie. Sa désignation nécessite alors seulement la moitié des couches successives. Un indice S est utilisé pour indiquer que le stratifié est symétrique.
- Pour un nombre pair de couches, la désignation commence sur une face et se termine au plan de symétrie. Par exemple : $[90/45_2/0]s$.
- Pour un nombre impair de couches, la désignation est similaire à celle ci-dessus, avec la couche centrale soulignée. Par exemple : $[90/45_2/\underline{0}]s$ [9].

1.4 Dégradation des matériaux composites :

L'endommagement des matériaux composites désigne une série de modifications microstructurales résultant d'hétérogénéités qui génèrent des concentrations de contraintes sous l'effet de charges appliquées. Cela se manifeste notamment à l'interface entre les fibres et la matrice, où des décohésions peuvent apparaître. L'anisotropie contribue également à des concentrations de contraintes, particulièrement entre les plis orientés différemment, pouvant entraîner des délaminages ou une décohésion. Les composites présentent divers types de dommages selon la sollicitation appliquée et la géométrie de la structure. Lorsqu'une contrainte mécanique est appliquée, les premiers signes de dommages microscopiques surviennent lorsque la force locale atteint la limite de défaillance d'un des composants ou de l'interface qui les relie. Plusieurs paramètres influent sur la progression de ces modes de défaillance dans les composites, comme la fraction volumique, l'orientation des fibres, l'épaisseur des couches et

l'espacement entre les fibres. La structure peut être complètement altérée lorsque ces divers dommages s'accumulent.

Les principaux mécanismes d'endommagement des stratifiés composites comprennent, 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 et la taille de ces dommages peuvent être évalués à l'aide de méthodes numériques, analytiques et expérimentales.

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

1.5 Les échelles d'observation de l'endommagement :

L'endommagement d'un matériau est un processus irréversible qui entraîne l'apparition de défauts locaux. En raison de l'hétérogénéité de la structure des matériaux composites, il n'existe pas de mécanisme unique, mais plusieurs types de dégradations qui se distinguent par leur nature et leur mode de développement. Ces dégradations se manifestent à différentes échelles (voir figure 1-5). Ainsi, on distingue :

- À l'échelle microscopique, on observe des ruptures d'adhérence entre les fibres et la matrice (décohésion fibres/matrice) ainsi que la formation de porosités.
- À l'échelle mésoscopique, ou échelle du pli, plusieurs types de fissures sont observés : les fissures intra/laminaires transverses (perpendiculaires à la direction de la sollicitation) et longitudinales (dans la direction de l'effort appliqué), ainsi que des ruptures de fibres lors de l'ultime stade de la défaillance du matériau.
- À l'échelle macroscopique, le délaminage est observé, correspondant à une séparation locale entre deux couches liées, généralement initiée par une concentration importante des contraintes en cisaillement, souvent près des bords libres de la structure. Ces dommages ne se manifestent pas uniformément dans la structure et dépendent du type de sollicitation, ainsi que de l'orientation et de la proportion des renforts.

La ruine du matériau résulte potentiellement de la combinaison de tous les mécanismes élémentaires au sein du pli unidirectionnel (décohésion fibre/matrice, fissures intralaminaires, ruptures de fibres) ainsi qu'à l'interface entre les plis (délaminage). Ces fissures peuvent être induites par des concentrations de contraintes, des discontinuités dans les champs de contraintes entre les plis, ou être présentes initialement dans le matériau (défauts apparus lors de la fabrication ou liés à des effets de bords).

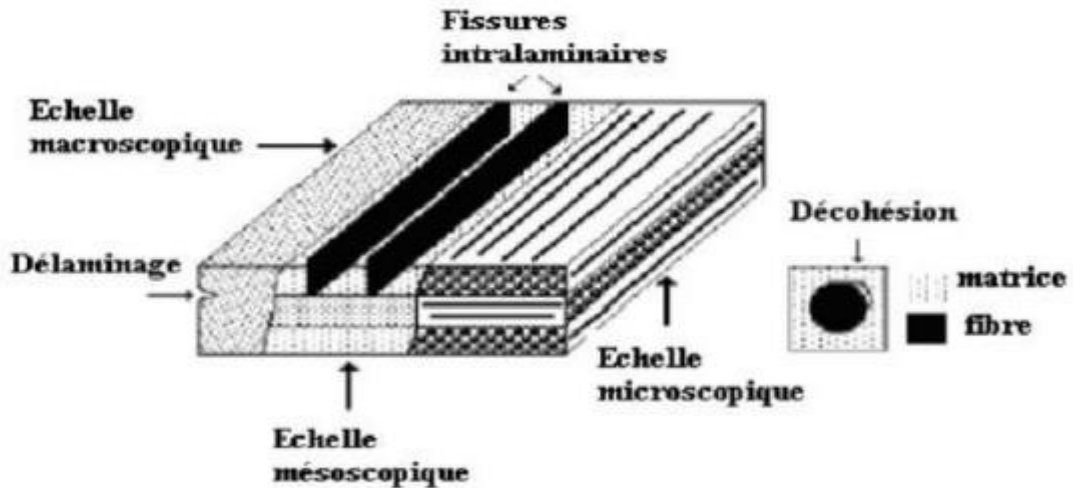


Figure 1-5: Les différentes échelles d'observation de l'endommagement : illustration sur un matériau stratifié [11].

1.6 Les mécanismes d'endommagement :

L'identification des dommages par microscopie a permis le développement de l'analyse d'endommagement. La perte de rigidité du matériau endommagé a permis de définir et de déterminer un seuil critique de déformation ou de contraintes qui déclenche les mécanismes d'endommagement. Il a été démontré que des facteurs tels que la température, la vitesse de sollicitation, les chocs, la nature chimique de l'environnement agressif, ainsi que le chargement monotone ou cyclique, influencent l'évolution de l'endommagement. La ténacité de la matrice et la qualité de l'interface jouent un rôle crucial dans la résistance aux dommages.

Les divers modes d'endommagement potentiels d'un matériau hétérogène, notamment les composites sous contrainte mécanique, peuvent être regroupés en quatre principaux mécanismes [12] opérant à différents emplacements (voir figure 1-6) : fissuration de la matrice,

rupture de l'interface fibre-matrice et désadhésion des fibres, délaminage (décohésion entre les couches) et rupture des fibres.

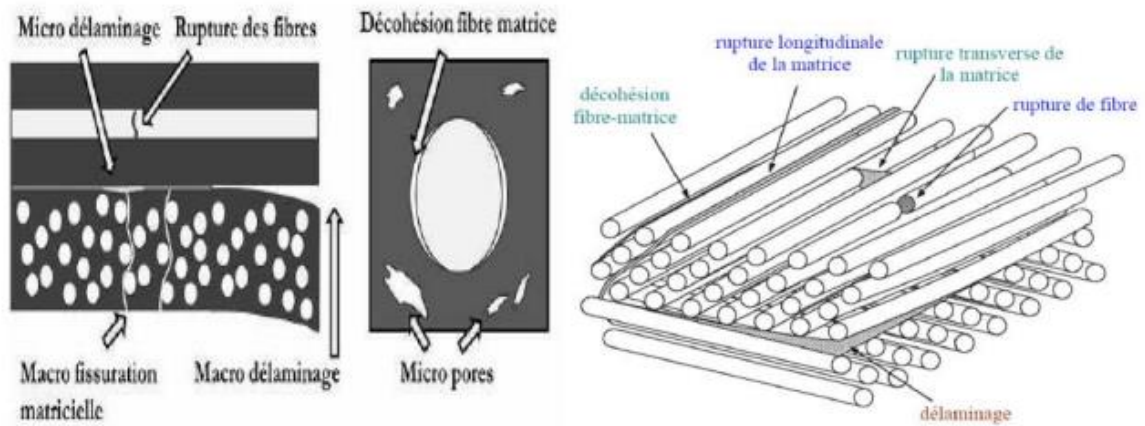


Figure 1-6: Les principaux endommagements rencontrés dans un stratifié [13].

1.6.1 Fissuration de la Matrice :

La fissuration de la matrice peut survenir de deux manières : soit par fissuration transverse (voir figure 1-7), lorsque les fissures se propagent le long des fibres désorientées par rapport à la direction de la sollicitation, généralement lorsque la contrainte en traction dans la matrice atteint sa limite de rupture ; soit par fissuration longitudinale (voir figure 1-8), Lorsque les fissures se développent le long des fibres alignées dans la direction de la sollicitation, généralement près d'une fibre, sous l'effet de contraintes de cisaillement atteignant leur limite de cisaillement [9].

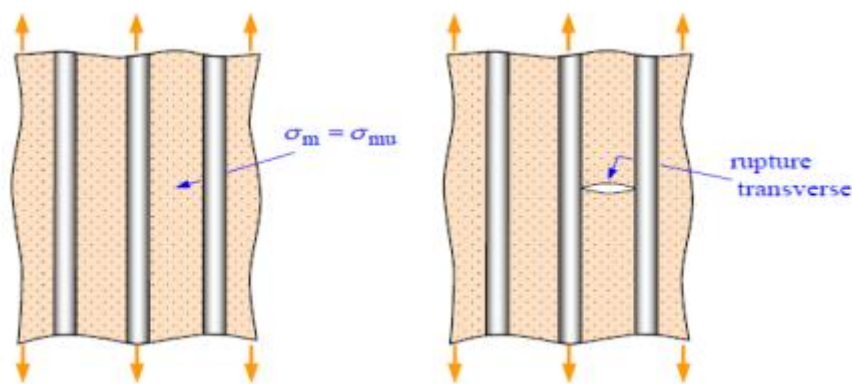


Figure 1-7: Rupture transverse de la matrice [3].

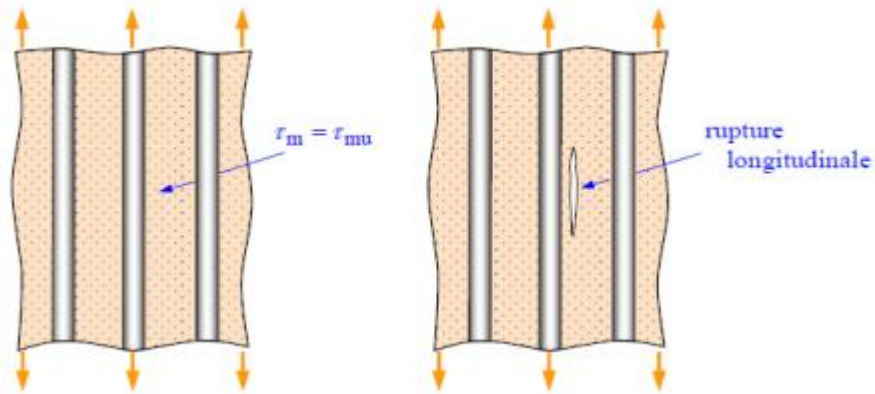


Figure 1-8: Rupture longitudinale de la matrice [3].

1.6.2 La rupture des fibres :

La rupture des fibres survient lorsque la contrainte de traction dans une fibre atteint sa limite de rupture. Ce phénomène se produit souvent dans les plis les moins désorientés par rapport à la direction de sollicitation (voir figure 1-9). L'augmentation excessive de la charge entraîne la rupture des fibres adjacentes, progressant ainsi jusqu'à l'endommagement complet de la zone sollicitée.

Il est crucial de noter que la résistance des composites dépend de la qualité des fibres, de la matrice et du processus de fabrication. Des imperfections structurelles telles que la porosité, les inclusions et les zones de mauvaise adhérence entre les fibres et la matrice peuvent également diminuer la résistance et la durabilité des composites, augmentant ainsi le risque de dommages.

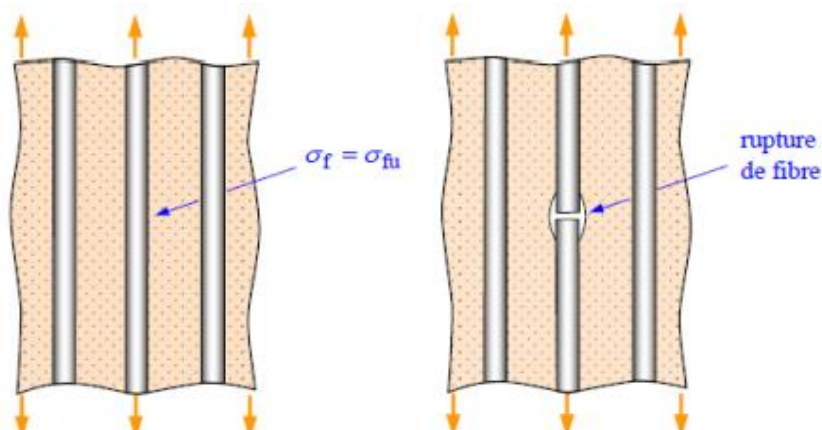


Figure 1-9: Rupture de Fibre [3].

1.6.3 Décohésion fibre-matrice :

Dans la zone de l'interface, le transfert de charge de la matrice vers le renfort, ou vice versa, joue un rôle crucial. Une fois initiée, la propagation de la rupture varie en fonction de la qualité de l'adhésion entre la fibre et la matrice. Dans le cas d'un composite à fibres unidirectionnelles sollicité parallèlement aux fibres, plusieurs scénarios peuvent être distingués (voir figure 1-10) :

- Pour une interface très forte : Lorsque l'adhérence entre les fibres et la matrice est très robuste, la fissure se propage soit par rupture des fibres, soit par rupture de la matrice, comme si elle ne rencontrait aucun obstacle. La rupture observée est de type fragile.
- Pour une interface très faible : Lorsque l'adhérence entre les fibres et la matrice est très faible, la fissuration dans la matrice est déviée vers l'interface, entraînant une décohésion fibre-matrice qui s'étend sur une grande distance.
- Dans le cas d'une interface présentant des propriétés intermédiaires, la fissure au contact d'une fibre se dévie dans un plan perpendiculaire, entraînant un décollement de la matrice au niveau de l'interface.

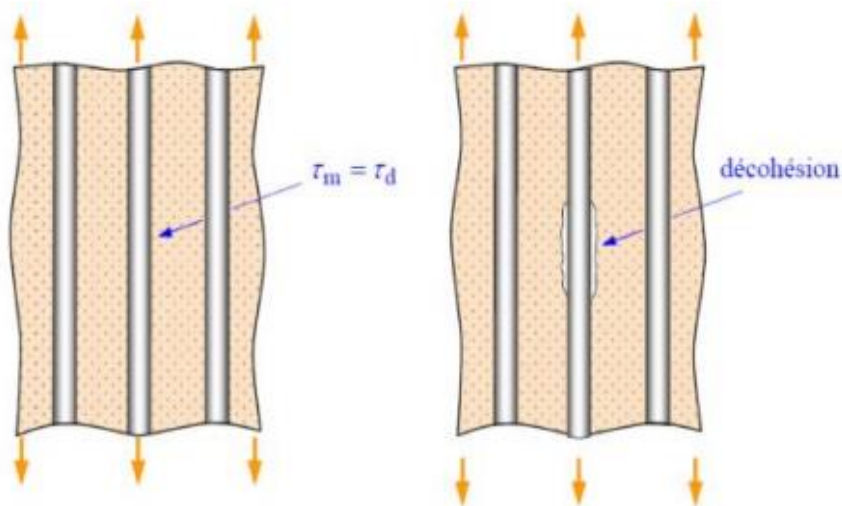


Figure 1-10: Décohésion Fibre-Matrice [3].

1.6.4 Délaminage :

Le délaminage se réfère à la séparation des couches constitutives du matériau composite (voir figure 1-11). Ce processus résulte d'une séquence d'endommagements variés. Les propriétés mécaniques de la matrice et des fibres, ainsi que les caractéristiques adhésives et cohésives de l'interface, influencent cette séquence en impliquant des types d'endommagement courants tels que la microfissuration de la matrice, la rupture des fibres et la rupture des interfaces. Le délaminage progresse principalement par fissuration interlaminaire, considérée comme la principale cause de l'augmentation de son épaisseur [14].

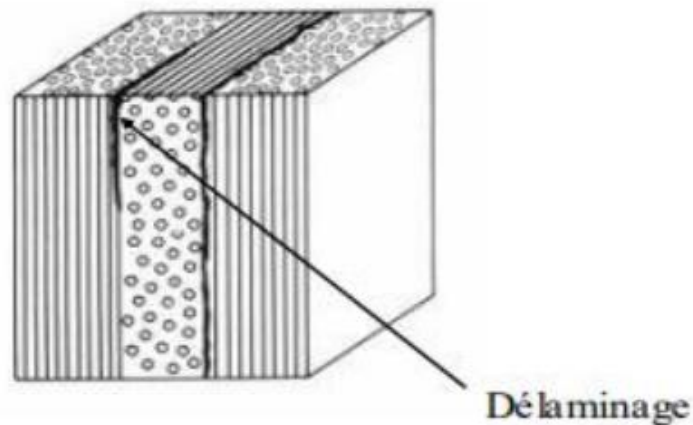


Figure 1-11: Mécanisme de délaminage [13].

1.7 Fissuration des composites stratifiés :

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

- Fissures interlaminaire : Ces fissures se développent le long d'un plan parallèle aux couches de renfort, entre deux couches. Ce type d'endommagement est souvent observé lors d'essais de flexion entre appuis rapprochés.

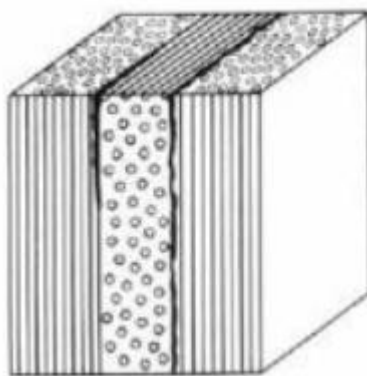


Figure 1-12: Rupture interlaminaire [13].

- Fissures intralaminaire : Dans ce cas, le plan de la fissure est situé à l'intérieur des couches de renfort, perpendiculairement ou parallèlement à celles-ci. Ce mode d'endommagement survient généralement lors d'essais de cisaillement ou de traction transverse sur des matériaux unidirectionnels, par exemple.

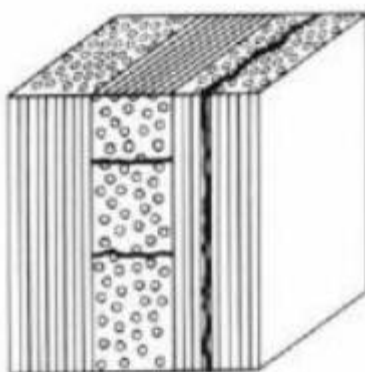


Figure 1-13: Rupture intralaminaire [13].

- Fissures translaminaire : Ces fissures se forment perpendiculairement aux couches et aux renforts. Ce type d'endommagement est observé, par exemple, lors d'essais de traction ou de compression uniaxiale dans le sens des fibres.

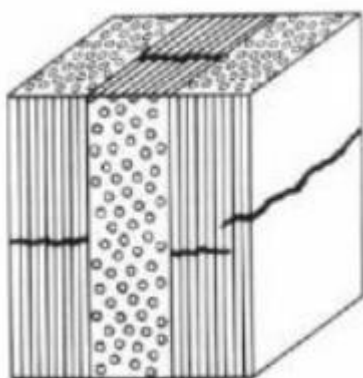


Figure 1-14: Rupture translaminaire [13].

1.8 La propagation des fissures :

Le processus par lequel une fissure déjà présente se propage à travers la structure composite sous l'effet des contraintes appliquées est appelé propagation des fissures dans les composites. C'est un aspect crucial de la résistance et de la durabilité des matériaux composites. Lorsqu'une fissure se forme dans un matériau composite, une concentration de contrainte apparaît à son extrémité. Avec une bonne adhérence entre la fibre et la matrice, la fissure peut s'amorcer soit par rupture des fibres, soit par rupture de la matrice, créant un front de fissure où les concentrations de contraintes favorisent la propagation continue à travers les fibres puis la matrice [3].

Dans le cas d'une faible adhérence fibre-matrice, la propagation transverse de la fissuration peut être illustrée comme suit : au début de la fissure, la rupture de la matrice traverse les fibres.

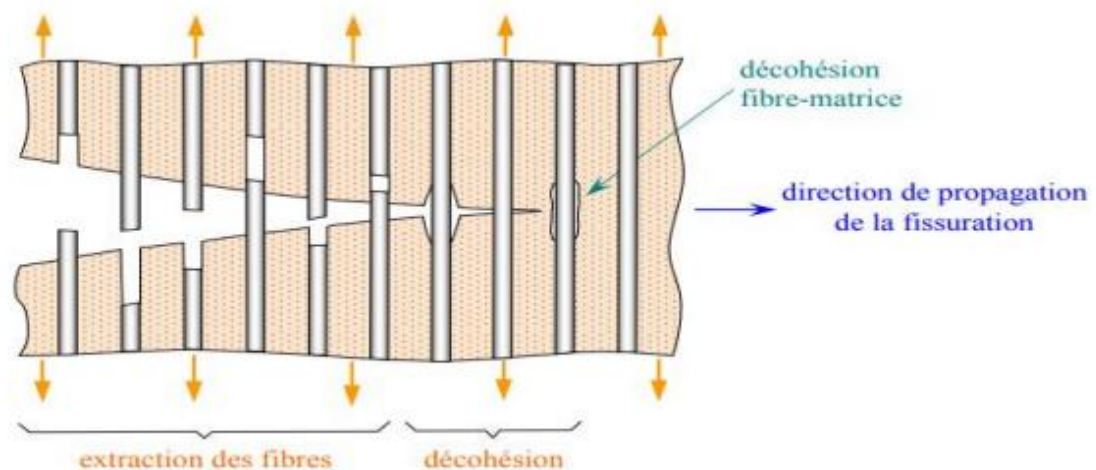


Figure 1-15: Propagation de la rupture dans le cas d'une faible adhérence fibre-matrice [3].

Dans certains cas, les concentrations de contraintes à l'extrémité de la fissure peuvent entraîner une décohésion entre la fibre et la matrice avant que la matrice ne se rompe transversalement. En aval de la fissure, l'ouverture de celle-ci génère des contraintes élevées dans les fibres qui supportent la fissure. Ces contraintes peuvent provoquer la rupture des fibres à proximité de la surface de la fissure.

La fissure continue de progresser, et les fibres rompues sont extraites de la fissure à mesure qu'elle avance. Le pontage des fissures transversales peut se produire par la propagation de la rupture le long de l'interface fibre-matrice, ce qui peut entraîner un profil de surface de rupture plus ou moins escalier [3].

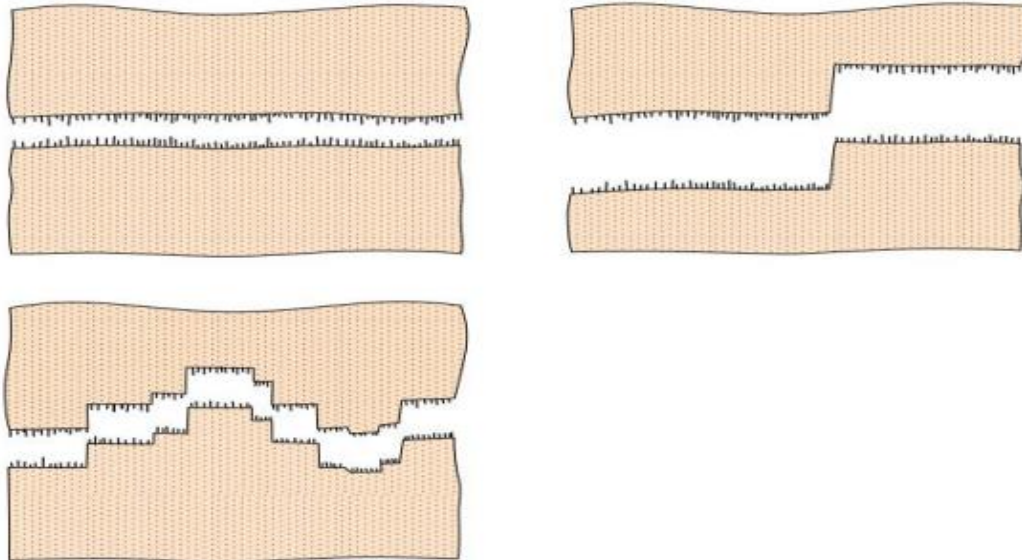


Figure 1-16: Surfaces de rupture dans le cas d'une faible adhérence fibre-matrice [3].

1.9 Densité de la fissuration :

Les recherches sur la fissuration de la matrice se focalisent principalement sur les fissures transversales, c'est-à-dire les fissures qui se forment dans les couches à 90° d'un stratifié. Ces fissures matricielles sont régulièrement espacées et se propagent rapidement d'un bord à l'autre, traversant toute l'épaisseur de la couche endommagée. La densité de ces fissures, mesurée en nombre de fissures par unité de longueur, est utilisée pour évaluer l'ampleur de la fissuration transversale. Une fois la fissuration initiée, la charge appliquée provoque une augmentation soudaine de cette densité. L'endommagement de la matrice atteint un état de saturation, également connu sous le nom d'état caractéristique endommagé, où l'augmentation de la densité des fissures ralentit progressivement [15].

En règle générale, les études antérieures se limitent à examiner uniquement la fissuration transversale. Cependant, une comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux issus des modèles analytiques révèle que la fissuration transversale n'est pas le seul processus de dommage observé à des densités élevées de fissures. Les fissures transversales entraînent des concentrations locales de contraintes aux extrémités des fissures et provoquent un délaminage

interlaminaire entre les couches orientées à 0° et 90°. Ce délaminage se propage à partir des extrémités des fissures, dissipant ainsi les concentrations de contraintes [16].

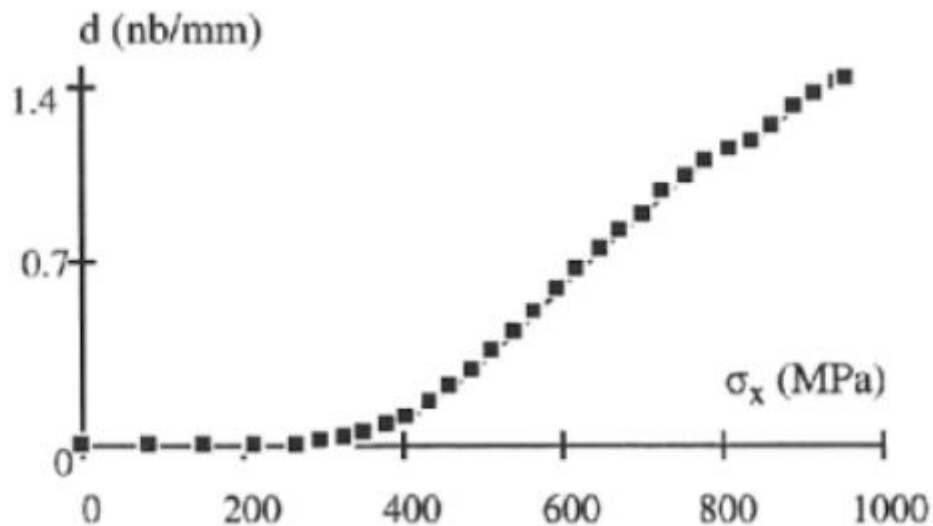


Figure 1-17: Evolution de la densité de fissures en fonction de la contrainte de traction au niveau du pli à 90° d'un stratifié carbone /époxy [0/90] s [17].

1.10 Types de vieillissement :

Le vieillissement des matériaux polymères et composites dans des conditions réelles de service se caractérise par des processus d'absorption et de dégradation lents. Toutefois, des tests accélérés sont indispensables pour évaluer et quantifier les effets du vieillissement. Ces tests exposent généralement le matériau à des environnements plus sévères que ceux rencontrés en service. En général, la température est le paramètre le plus fréquemment utilisé pour accélérer le processus de diffusion, et elle peut être combinée à d'autres facteurs tels que l'humidité et la lumière UV en fonction des applications spécifiques [18].

1.10.1 Vieillissement physique :

a) Diffusion de l'eau :

L'absorption d'eau dépend principalement de la température T , des propriétés du polymère, et de l'humidité relative (HR), qui représente 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 petite taille de la molécule d'eau (rayon atomique de 0,096 nm) lui permet de se déplacer facilement à travers le réseau moléculaire du polymère sous l'effet d'un gradient de concentration, phénomène connu sous le nom de diffusion. Les molécules d'eau impliquées dans ce processus sont dites diffusantes ou non liées. Lorsque les molécules d'eau se fixent aux chaînes moléculaires, cela entraîne deux conséquences majeures : une diminution de la température de transition vitreuse et un gonflement du polymère [20], [21].

Les molécules d'eau se 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 résultant de la polymérisation.

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

b) Plastification :

L'absorption d'eau par les composites à matrice polymère peut conduire à la plastification de la résine. Ce phénomène résulte de l'augmentation de la mobilité des chaînes macromoléculaires de la résine, due à une modification du volume libre et/ou à la rupture des liaisons hydrogène -H. Cette plastification se traduit 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 rompant les liaisons secondaires, telles que les liaisons hydrogène, entre les groupes polaires des chaînes macromoléculaires voisines.

Les groupes polaires du polymère ont une affinité préférentielle pour les molécules d'eau. La rupture des liaisons entre les chaînes, qui contribuaient largement à la rigidité du matériau, entraîne une augmentation de la mobilité des chaînes ou des segments de chaînes macromoléculaires. Ce phénomène est appelé plastification. La mobilité accrue affecte ainsi les propriétés mécaniques et physicochimiques du polymère [22].

Les propriétés en traction ou en cisaillement, telles que le module d'Young et le module de cisaillement, sont les plus étudiées du point de vue mécanique, tout comme l'évolution de la température de transition vitreuse T_g . Dans la plupart des cas, on observe une diminution du module d'Young et du module de cisaillement, ainsi qu'une baisse de T_g . Ce phénomène est réversible.

La plastification s'accompagne également de gonflements, qui dans le cas des composites, peuvent entraîner l'apparition de contraintes interfaciales susceptibles de provoquer le déchaussement des fibres et des délaminages. Ce phénomène est d'autant plus critique lorsque la résistance de l'interface est faible [23]. La figure 1-18 illustre schématiquement la pénétration du solvant dans un polymère.

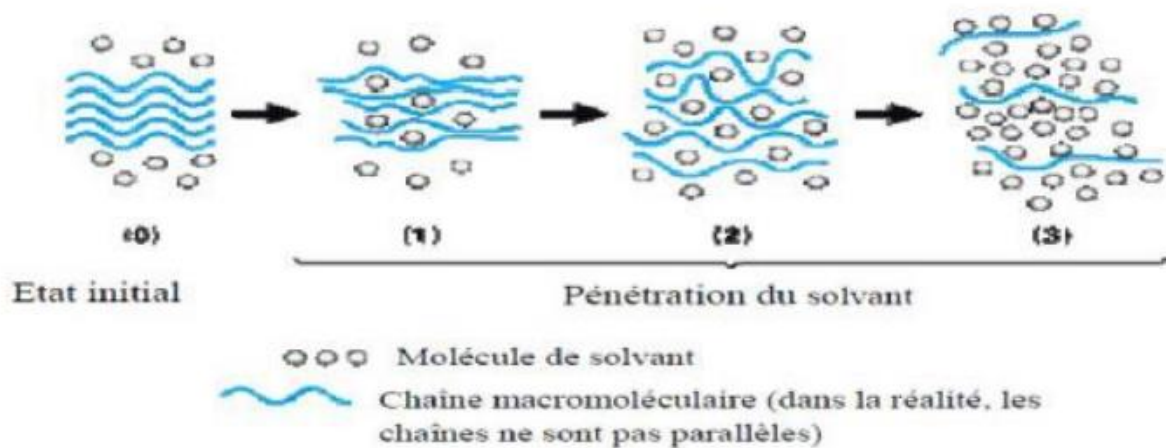


Figure 1-18: Pénétration d'un solvant dans un polymère [24].

1.10.2 Vieillessement chimique :

L'exposition à des facteurs environnementaux comme la chaleur, les radiations ou les agents chimiques peut conduire à une dégradation chimique de la matrice polymère. Cette dégradation peut provoquer la rupture des chaînes polymères, diminuer leur poids moléculaire et entraîner une réticulation ou une ramification.

a) Hydrolyse :

L'hydrolyse est une réaction chimique irréversible provoquée par l'eau, qui entraîne la scission des chaînes macromoléculaires et une diminution de la masse moléculaire de la résine polymère.

Pendant l'absorption, les molécules d'eau peuvent remplacer les liaisons hydrogène déjà présentes par de nouvelles liaisons hydrogène entre l'eau et le polymère. À long terme, ces interactions chimiques conduisent à la dégradation de la résine et de l'interface par hydrolyse.

Cette réaction est thermiquement activée et peut être catalysée par divers agents chimiques tels que les ions OH⁻, H⁺, et les métaux de transition. Ainsi, la composition du milieu réactionnel joue un rôle crucial dans le processus de vieillissement [22].

Le greffage d'eau sur les chaînes macromoléculaires se manifeste par une masse supérieure à celle de l'échantillon initial, même après séchage [24].

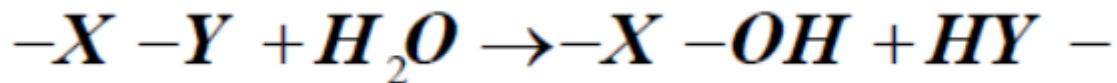


Figure 1-19: Equation générale de l'hydrolyse [25].

b) Lessivage :

Le phénomène de lessivage du réseau polymère se produit lorsqu'il y a une perte de masse du polymère après une exposition prolongée dans une atmosphère humide. Cette diminution de masse est observée soit pendant le processus de diffusion de l'eau après la saturation, soit sur un polymère qui a été vieilli et séché à nouveau [22].

1.11 Problématique :

Considérons un stratifié croisé symétrique de type $[\theta_m/90_n]_s$ fissuré soumis à une traction uniaxiale. Dans un premier temps, le problème à résoudre concerne le calcul des variations longitudinales des contraintes de cisaillement en utilisant une approche numérique avec un modèle par éléments finis (ABAQUS). Les résultats obtenus permettront de valider le modèle analytique basé sur la méthode de diffusion de cisaillement (Shear Lag), qui étudie le champ de déplacement [14].

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

1.12 Travaux effectués :

Afin de prédire précisément le comportement mécanique des matériaux composites endommagés et de proposer des lois d'endommagement, plusieurs approches analytiques et numériques ont été développées. Elles visent à modéliser comment les matériaux composites se détériorent sous diverses sollicitations mécaniques. Les chercheurs et les ingénieurs utilisent souvent une combinaison de ces méthodes pour obtenir une compréhension approfondie du comportement mécanique des matériaux composites endommagés. Voici 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. Sa méthode consiste à diviser la moitié de l'épaisseur du stratifié en trois couches de rigidité différente : 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 que le transfert de charge se produit par diffusion de cisaillement dans la couche mince à l'interface.

Highsmith et Reifsnider [26] ont proposé un modèle pour étudier les stratifiés croisés soumis à des fissurations longitudinales et transversales sous une tension uniaxiale. Ce modèle s'appuie sur la théorie de Pagano [28], qui postule une variation linéaire de la contrainte normale avec l'épaisseur de la couche. À l'interface où les fissures longitudinales et transversales se croisent, le modèle prédit des valeurs significatives de contrainte interlaminaire. Cela est en accord avec l'identification de délaminations localisées aux intersections des fissures.

Pour prédire l'initiation et la propagation des fissures transversales, Garrett et Bailey [29] ont adopté une approche similaire à celle de C. Zweben et A.S.D. Wang [30]. Ils utilisent la déformation moyenne de la couche transversale pour calculer la contrainte normale. La perte de rigidité observée à l'état saturé correspond bien aux résultats expérimentaux pour les couches transversales épaisses. Dans cette méthode, le déplacement longitudinal 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, a été 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. À l'exception de la contrainte normale longitudinale, qui respecte les conditions aux limites en termes de valeurs moyennes, et de la contrainte de cisaillement entre les couches orientées à 0° et 90° près des fissures transversales, les résultats pour la répartition des contraintes concordent bien avec ceux obtenus par les calculs par éléments finis.

Maatalah [32] a étudié l'impact de l'endommagement par fissuration intralaminare sur le comportement d'un stratifié croisé $[0/90_n]_s$ soumis à une traction uniaxiale, en fonction de l'orientation des plis 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 en 3D pour calculer le champ de contraintes de manière numérique.

c) Vieillessement hygrothermique :

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

Mercier [33] a étudié la fissuration et le vieillissement en milieu humide des matériaux composites à matrice organique (CMO). L'expérience a d'abord porté sur la diffusion de l'eau dans le matériau (matrice époxy renforcée par des fibres de verre), avec une analyse des cinétiques d'absorption sous différentes conditions d'humidité. Lors d'essais expérimentaux de traction, des diminutions de diverses propriétés mécaniques en fonction de la quantité d'eau absorbée ont été observées et quantifiées. Les causes physiques de ces modifications ont été identifiées. De plus, la fissuration intralaminare et son interaction avec l'humidité ont été étudiées expérimentalement en tant que mode d'endommagement spécifique.

Benkeddad [34] a travaillé sur la prédiction du comportement hygrothermique des structures soumises à des conditions de température et d'humidité. Ils ont développé un logiciel d'analyse des stratifiés pour identifier les contraintes hygrothermiques transitoires et les déformations entre les plis. Cependant, les effets de l'environnement sur les propriétés mécaniques sont ignorés dans cette approche.

1.13 Définition du sujet :

L'objectif principal de notre étude était d'analyser le comportement mécanique des composites $[\theta_m/90_n]_s$ sous contraintes bi axiales et endommagés par des fissurations transversales, longitudinales et des délaminage, et ensuite d'étudier l'influence des conditions hygrothermiques sur leur comportement.

L'approche principale de la recherche repose essentiellement sur la simulation numérique en utilisant le code ABAQUS. Des résultats ont été obtenus. Pour enrichir l'interprétation de ces résultats, il est pertinent de les comparer à ceux d'autres études réalisées.

2 Chapitre 02

MODELISATION DE LA FISSURATION TRANSVERSE, LONGITUDINALE ET DELAMINAGE

2.1 Introduction :

La fissuration transverse, également connue sous le nom de fissuration dans le plan, affecte les couches du composite où les fibres s'orientent perpendiculairement à la direction de la sollicitation. Ces fissures, qui se propagent parallèlement aux fibres, fragilisent la structure du matériau. Sous l'effet d'une contrainte appliquée suffisamment importante, ces fissures transverses peuvent déclencher un délaminage, un phénomène qui se manifeste par un décollement planaire entre les couches du stratifié, compromettant davantage son intégrité.

Le développement de la fissuration transverse et du délaminage subséquent est fortement influencé par plusieurs facteurs, dont le type et l'intensité du chargement appliqué, la qualité de l'interface entre les fibres et la matrice, et les contraintes résiduelles issues du processus de fabrication. Ces fissures prennent généralement naissance sur les bords du matériau, mais peuvent également être causées par des surcontraintes locales dues à des défauts dans la matrice.

Pour modéliser le comportement des composites fissurés, le modèle de transfert de charge par cisaillement (Shear-lag) est couramment utilisé. Ce modèle repose sur des hypothèses simplificatrices mais réalistes qui permettent d'appréhender les mécanismes en jeu lors de la rupture de ces matériaux.

Au cœur du modèle Shear-lag se trouve la distinction entre les rôles des fibres et de la matrice. Les fibres, en tant qu'éléments porteurs principaux, assument la charge de traction appliquée au composite. En cas de rupture de fibres, la matrice joue un rôle crucial en maintenant l'équilibre du matériau dans les zones adjacentes. Pour ce faire, elle transfère les charges des fibres rompues vers les fibres intactes voisines par le biais de contraintes de cisaillement.

Ce chapitre propose et applique un modèle de distribution de cisaillement parabolique et progressif (Shear-lag) qui prend en compte le délaminage induit par les fissures transversales. Ce modèle permet de modéliser et d'analyser le comportement des plaques stratifiées croisées soumises à une charge de traction uniaxiale.

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

L'approche analytique de Berthelot et Le Corre [16] permet d'évaluer les distributions de contraintes bidimensionnelles dans les stratifiés croisés présentant des délaminages initiés aux extrémités des fissures transversales. Cette méthode repose sur une hypothèse de déplacement, où les déplacements longitudinaux varient en fonction des coordonnées longitudinales et transversales au sein de chaque couche.

Dans les zones du stratifié exemptes de délaminage, le champ de déplacement adopte une forme de cisaillement progressif, comme décrit dans [16] pour le cas de la fissuration transverse. Cette hypothèse simplifie les calculs analytiques tout en préservant une précision adéquate. Le délaminage est modélisé par un transfert de charge par frottement de cisaillement entre les couches délaminées. Pour des raisons de symétrie, la longueur délaminée (l) est supposée identique sur les interfaces inférieure et supérieure entre les couches 0° et 90° . Cependant, pour une cellule élémentaire donnée entre deux fissures consécutives, la longueur délaminée peut différer entre la partie gauche (l_l) et la partie droite (l_r) (figure 2-1).

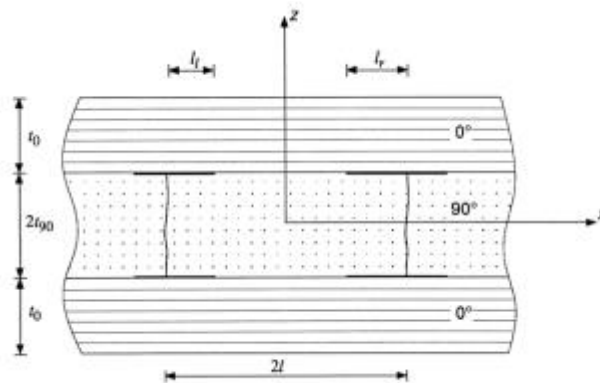


Figure 2-1: Stratifié croisé endommagé par fissuration transverse et délaminage [16]

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 transverse 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 par intégration sur l'épaisseur :

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

En conséquence de cette relation, on obtient :

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

On remarque que le paramètre de cisaillement est influencé par la variation du déplacement longitudinal dans l'épaisseur de la couche à 0°.

Introduisant la contrainte longitudinale moyenne dans la couche 90 :

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

Dans la zone délaminée, le transfert de charge mécanique s'effectue par frottement de cisaillement entre les couches délaminées. La contrainte de cisaillement à l'interface entre les couches délaminées est supposée indépendante de la coordonnée longitudinale.

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

Lorsque τ_f est positif, un signe positif est associé à $x > 0$ et un signe négatif à $x < 0$. Il est important de noter que τ_f doit être considéré comme une valeur moyenne sur la longueur du délaminage.

En supposant que la contrainte normale longitudinale dans la couche 90 au niveau des plans de fissures transversales est nulle, l'intégration de l'équation (2.3) conduit aux 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 :

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

On peut ensuite déduire la moyenne longitudinale dans les couches θ à partir de la relation suivante :

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

Où $\sigma(c)$ représente la contrainte longitudinale moyenne appliquée au stratifié à couches croisées et α désigne le rapport des épaisseurs de la couche à 0° et de la couche à 90° , tel que :

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

Les contraintes longitudinales moyennes dans les zones délaminées et non délaminées s'expriment comme suit :

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

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

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

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

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

2.2.1.1.1 Champ de déplacement :

L'analyse du champ de contraintes et de la répartition des déformations dans la partie du stratifié non sujette au délaminage peut s'effectuer en adoptant une approche similaire à celle employée pour l'analyse de la fissuration transversale avec délaminage, comme décrit dans la référence [16].

Dans le cadre de cette analyse, on considère que la variation du déplacement longitudinal dans les couches orientées à 0 degrés présente un caractère progressif, tandis que dans la couche orientée à 90 degrés, elle suit une distribution parabolique :

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

$$\mathbf{u}_{90}(x, z) = \bar{\mathbf{u}}_{90}(x) + \left(z^2 - \frac{t_{90}^2}{3} \right) \mathbf{A}_{90}(x) \quad (2.14)$$

Où $\bar{\mathbf{u}}_0(x)$ et $\bar{\mathbf{u}}_{90}(x)$ sont les valeurs moyennes respectives (estimées sur l'ensemble des épaisseurs de couche) de l'indice longitudinal déplacements $\mathbf{u}_0(x, z)$ et $\mathbf{u}_{90}(x, z)$ dans les couches 0 et 90. Les fonctions $\bar{\mathbf{u}}_0(x)$, $\bar{\mathbf{u}}_{90}(x)$, $\mathbf{A}_0(x)$, $\mathbf{A}_{90}(x)$, $f(z)$ 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]:

$$f(z) = \frac{\sinh \alpha \eta_t}{\alpha \eta_t} - \cosh \eta_t \left(1 + \alpha - \frac{z}{t_{90}} \right) \quad (2.15)$$

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

$$\eta_t = \frac{E_0}{G_{xx}^0} \frac{1}{a_m} \quad (2.16)$$

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

$$\mathbf{a}_m = \mathbf{a} - \frac{1}{2}(\mathbf{a}_l + \mathbf{a}_r) \quad (2.17)$$

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

$$\bar{\mathbf{u}}_0(x) + f(t_{90})\mathbf{A}_0(x) = \bar{\mathbf{u}}_{90}(x) + \frac{2}{3}t_{90}^2\mathbf{A}_{90}(x) \quad (2.18)$$

2.2.1.1.2 Contraintes de cisaillement :

Les contraintes de cisaillement dans les deux couches du stratifié, sont reliées à la déformation de cisaillement transversal par les relations suivantes :

$$\sigma_{xz}^i = G_{xz}^i \gamma_{xz}^i \quad \text{tel que } i = 0 ; 90 \quad (2.19)$$

Avec :

$$\gamma_{xz}^i = \frac{\partial u_i}{\partial z} + \frac{\partial w_i}{\partial x} \quad \text{tel que } i = 0 ; 90 \quad (2.20)$$

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 :

$$\sigma_x^i \approx G_{xz}^i \frac{\partial u_i}{\partial z} \quad \text{tel que } i = 0 ; 90 \quad (2.21)$$

Ainsi, les contraintes de cisaillement sont exprimées comme suit :

$$\sigma_{xz}^0 = G_{xz}^0 f'(z) \mathbf{A}_0(x) \quad (2.22)$$

$$\sigma_{xz}^{90} = 2G_{xz}^{90}zA_{90}(x) \quad (2.23)$$

Avec :

$$f'(z) = \frac{df}{dz} \quad (2.24)$$

La condition aux limites sur la surface latérale (la contrainte de cisaillement est nulle) est vérifiée par la fonction (2.15) et la continuité de la contrainte de cisaillement à l'interface entre les couches 0 et 90 conduit à la relation :

$$A_0(x) = 2 \frac{G_{xz}^{90}t_{90}}{G_{xz}^0 f'(t_{90})} A_{90}(x) \quad (2.25)$$

En combinant les équations (2.18) et (2.25), on obtient l'expression qui relie les déplacements longitudinaux moyens de des couches 0 et 90 :

$$\bar{u}_0(x) - \bar{u}_{90}(x) = \left[\frac{2}{3}t_{90}^2 - 2 \frac{G_{xz}^{90}t_{90}}{G_{xz}^0 f'(t_{90})} f(t_{90}) \right] A_{90}(x) \quad (2.26)$$

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

$$\tau(x) = \sigma_{xz}^{90}(x, t_{90}) \quad (2.27)$$

Et elle est exprimé à partir de (2.23) par :

$$\tau(x) = 2G_{xz}^{90}t_{90}A_{90}(x) \quad (2.28)$$

Enfin, en introduisant (2.26) dans l'expression (2.28), on obtient la relation entre la contrainte de cisaillement à l'interface et les déplacements longitudinaux moyens dans les couches θ et 90, qui peut s'écrire comme suit :

$$\tau(x) = \frac{3G}{t_{90}} [\bar{u}_0(x) - \bar{u}_{90}(x)] \quad (2.29)$$

Introduisons le paramètre de cisaillement :

$$G = \frac{G_{xz}^{90}}{1 + 3 \frac{\alpha \eta_t (\tanh \alpha \eta_t)^{-1} - 1 G_{xz}^{90}}{\alpha \eta_t^2 G_{xz}^0}} \quad (2.30)$$

2.2.1.1.3 Champs de contraintes et de déplacements :

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

$$\bar{\sigma}_{xx}^i = E_i \bar{\epsilon}_{xx}^i \quad \text{avec} \quad \bar{\epsilon}_{xx}^i = \frac{\partial u_i}{\partial x} \quad \text{tel que} \quad i = 0 ; 90 \quad (2.31)$$

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 (2.29) et (2.31) conduit à l'équation différentielle donnant la contrainte longitudinale moyenne $\bar{\sigma}_{xx}^{90}$ dans la couche 90 :

$$\frac{d^2 \bar{\sigma}_{xx}^{90}}{dx^2} - \lambda^2 \bar{\sigma}_{xx}^{90} = -\lambda^2 \frac{E_{90}}{E_x^0} \sigma_c \quad (2.32)$$

Avec :

$$\lambda^2 = \frac{3G(t_0 + t_{90})E_x^0}{t_{90}^2 t_0 E_0 E_{90}} \quad (2.33)$$

Et où E_0 x est le module d'Young du stratifié non endommagé, donné par la loi des mélanges :

$$E_x^0 = \frac{\alpha E_0 + E_{90}}{1 + \alpha} \quad (2.34)$$

La solution de l'équation différentielle (2.32) est :

$$\bar{\sigma}_{xx}^{90}(x) = \sigma_c \frac{E_{90}}{E_x^0} + A \exp(\lambda x) + B \exp(-\lambda x) \quad (2.35)$$

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 :

$$\bar{\sigma}_{xx}^{90}(x) = \sigma_{90} \left[1 - \frac{1}{\sinh 2\eta a_m} \varphi \left(\frac{x}{l} \right) \right] \quad (2.36)$$

Introduisant la fonction suivante de la coordonnée longitudinale réduite x/l :

$$\varphi \left(\frac{x}{l} \right) = \left(1 - \frac{\tau_f}{\sigma_{90}} a_r \right) \sinh \eta a \left(\frac{x}{l} + a_l \right) - \left(1 - \frac{\tau_f}{\sigma_{90}} a_l \right) \sinh \eta a \left(\frac{x}{l} - a_r \right) \quad (2.37)$$

Avec :

$$\sigma_{90} = \sigma_c \frac{E_{90}}{E_x^0} \quad (2.38)$$

$$\eta^2 = \lambda^2 t_{90}^2 = 3 \left(1 + \frac{1}{a} \right) \frac{G E_x^0}{E_0 E_{90}} \quad (2.39)$$

Avec :

$$\alpha_l = 1 - \frac{l_l}{l} \quad ; \quad \alpha_r = 1 - \frac{l_r}{l} \quad (2.40)$$

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 (2.36) dans l'équation d'équilibre (2.3), ce qui donne :

$$\tau(x) = \sigma_{90} \frac{\eta}{\sinh 2\eta a_m} \psi\left(\frac{x}{l}\right) \quad (2.41)$$

Avec :

$$\psi\left(\frac{x}{l}\right) = \left(1 - \frac{\tau_f}{\sigma_{90}} a_r\right) \cosh \eta a \left(\frac{x}{l} + a_l\right) - \left(1 - \frac{\tau_f}{\sigma_{90}} a_l\right) \cosh \eta a \left(\frac{x}{l} - a_r\right) \quad (2.42)$$

Enfin, la contrainte longitudinale moyenne dans la couche 0 est déduite de la relation (2.8) et peut s'écrire :

$$\bar{\sigma}_{xx}^0(x) = \sigma_0 \left[1 + \frac{1}{\alpha} \frac{E_{90}}{E_0} \frac{1}{\sinh 2\eta a_m} \psi\left(\frac{x}{l}\right) \right] \quad (2.43)$$

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

$$\sigma_0 = \sigma_c \frac{E_0}{E_x^0} \quad (2.44)$$

Ensuite, il est possible d'obtenir le champ de déplacement et la distribution des contraintes dans la cellule élémentaire. La comparaison des relations (2.28) et (2.41), associée à la relation (2.25) 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 (2.22), (2.23), on obtient les déplacements longitudinaux et les contraintes de cisaillement dans les couches 0 et 90 :

$$\mathbf{u}_0(x, z) = \bar{\mathbf{u}}_0(x) + \frac{\sigma_{90} t_{90}}{G_{xz}^0 \eta_t \sinh \alpha \eta_t \sinh 2\eta a_m} \frac{\eta}{f(z)} \psi\left(\frac{x}{l}\right) \quad (2.45)$$

$$u_{90}(x, z) = \bar{u}_{90}(x) + \frac{\sigma_{90}}{2G_{xx}^{90} t_{90}} \frac{\eta}{\sinh 2\eta a_m} \left(z^2 - \frac{t_{90}^2}{3}\right) \psi\left(\frac{x}{l}\right) \quad (2.46)$$

$$\sigma_{xz}^0 = \sigma_{90} \frac{\eta}{\sinh \alpha \eta_t \sinh 2\eta a_m} \sinh \eta_t \left(1 + \alpha - \frac{z}{t_{90}}\right) \psi\left(\frac{x}{l}\right) \quad (2.47)$$

$$\sigma_{xz}^{90} = \sigma_{90} \frac{\eta}{\sinh 2\eta a_m} \frac{z}{t_{90}} \psi\left(\frac{x}{l}\right) \quad (2.48)$$

Ensuite, les contraintes longitudinales dans les couches 0 et 90 peuvent être évaluées par les relations contrainte/déformation (2.31), donnant :

$$\sigma_{xx}^0(x, z) = \bar{\sigma}_{xx}^0(x) + \sigma_{90} \frac{E_0}{G_{xz}^0 \eta_t \sinh \alpha \eta_t \sinh 2\eta a_m} \frac{\eta^2}{f(z)} \psi\left(\frac{x}{l}\right) \quad (2.49)$$

$$\sigma_{xx}^{90}(x, z) = \bar{\sigma}_{xx}^{90}(x) + \sigma_{90} \frac{E_{90}}{2G_{xz}^{90}} \frac{\eta^2}{\sinh 2\eta a_m} \left(\frac{z^2}{t_{90}^2} - \frac{1}{3}\right) \psi\left(\frac{x}{l}\right) \quad (2.50)$$

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 :

Cette partie s'articule autour de deux études par éléments finis (2D) visant à explorer et analyser le comportement mécanique de stratifiés composites fissurés et délaminés.

L'étude débute par l'analyse d'un stratifié [0/90₂]s soumis à une traction uni-axiale. Le rapport d'épaisseur de couches est « $\alpha=1/2$ » et le rapport géométrique de fissuration « $a=10 ; 7,5$ et 6 ». Les résultats obtenus par la méthode des éléments finis sont confrontés à ceux de deux modèles existants, le modèle de Sadoudi [25] et le modèle analytique de Berthelot et Le Corre [16]. Cette comparaison vise à valider la précision de notre modèle et à identifier des pistes d'amélioration par rapport aux travaux antérieurs.

L'étude s'étend à une analyse paramétrique approfondie d'un quart de stratifié [$\theta_m/90_n$]. Les trois types de fissurations - transversale, longitudinale et délaminage - sont simultanément introduits dans le même plan. Le stratifié est soumis à une sollicitation bi-axiale pour des configurations variées, combinant des rapports d'épaisseur de couches $\alpha = 1 ; 1/2$ et $1/3$ avec des rapports géométriques de fissuration $a = 25 ; 10$ et $2,5$, ainsi que des angles d'orientation des couches $\theta = 0^\circ ; 30^\circ$ et 45° . L'objectif principal de cette analyse est d'étudier l'influence de ces paramètres, à savoir les rapports géométriques de fissuration « a », les rapports d'épaisseur de couches « α » et les angles d'orientation des couches « θ », sur le comportement mécanique du stratifié.

L'analyse d'un seul quart de stratifié se justifie par deux raisons principales, la condition de symétrie du composite est vérifiée car les longueurs délaminées ($l_r = l_l$) et l'utilisation d'un quart de stratifié permet de réduire le temps de calcul et la complexité du modèle tout en conservant la précision des résultats, ainsi que l'analyse d'un quart de stratifié permet de réduire les pourcentages d'erreur en raison de la diminution du nombre d'éléments finis nécessaires à la simulation.

Le logiciel Abaqus a été utilisé pour mener à bien l'analyse par simulation numérique. Abaqus est un outil puissant dédié à la résolution de problèmes d'ingénierie complexes dans divers domaines, notamment l'automobile et l'aéronautique. Il s'appuie sur la méthode des éléments finis pour fournir des solutions précises et fiables.

L'interface utilisateur d'Abaqus se compose de trois parties principales :

- a) **Modélisation** : Cette partie permet de définir la géométrie du modèle à étudier. La géométrie peut être créée directement dans Abaqus ou importée à partir de logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO). Les propriétés du matériau utilisé dans la simulation sont également définies dans cette section.
- b) **Configuration** : Après avoir créé le modèle, cette partie permet de définir les conditions aux limites du problème. Cela inclut la contrainte appliquée, les chargements, les degrés de liberté bloqués selon les différents axes et les résultats (valeurs et courbes) à afficher à la fin de la simulation.
- c) **Visualisation** : Cette dernière étape consiste à visualiser et analyser les courbes et les résultats obtenus lors de la simulation. Cette étape permet de comprendre le

comportement du stratifié fissuré et délaminé sous différentes conditions de chargement.

2.3.1 Conditions aux limites :

Afin d'observer l'évolution des dommages par fissuration transversale, longitudinale et délaminage, la plaque étudiée a été soumise à des essais de traction. Ces essais ont été réalisés en maintenant un déplacement nul dans les directions OX et OZ.

Les figures 2-2 jusqu'à 2-7 illustrent les conditions d'application des essais.

- Sollicitation en traction longitudinale : Un déplacement longitudinal est appliqué suivant l'axe OX (figure 2-3).
- Sollicitation en traction transversale : Un déplacement transversal est appliqué suivant l'axe OZ (figure 2-6).
- Les conditions de symétrie imposent un déplacement transversal nul ($v = 0$) et un déplacement longitudinal nul ($u = 0$) sur le quart de stratifié.
- Pour analyser le délaminage entre les couches 0 et 90 (figure 2-7), la couche fine délaminée est 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 est pris en compte en appliquant une contrainte transversale sur chaque élément de la zone délaminée (figure 2-6).
- La fissure transversale est modélisée de forme semi-elliptique (figure 2-3).
- Les fissures transversales et longitudinales sont modélisées de forme rectangulaire plane (figure 2-6).
- Les fissures transversales et longitudinale sont considérées comme des bords libres (figure 2-6).

2.3.2 Maillage :

Le maillage joue un rôle crucial dans la simulation numérique en permettant de discrétiser le système et de le décomposer en éléments plus petits. Cette étape est essentielle pour définir précisément la géométrie de la structure et garantir un processus de simulation précis et fiable.

Dans le cadre de cette étude, un maillage structuré quadratique de taille 0.01 mm a été choisi pour représenter fidèlement la structure du stratifié étudié. Ce choix de maillage fin

permet de capturer avec précision les détails géométriques et d'obtenir des résultats numériques fiables (figure 2-4).

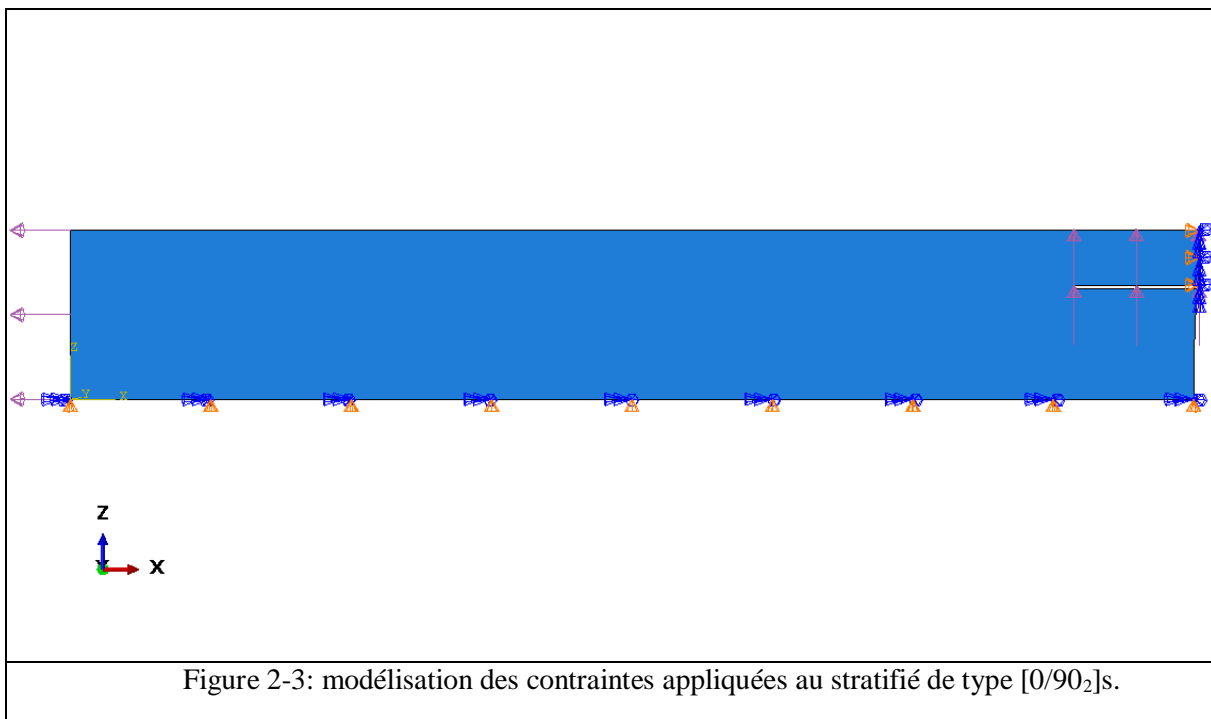
a) **Stratifié fissuré par fissure transverse et délaminage :**

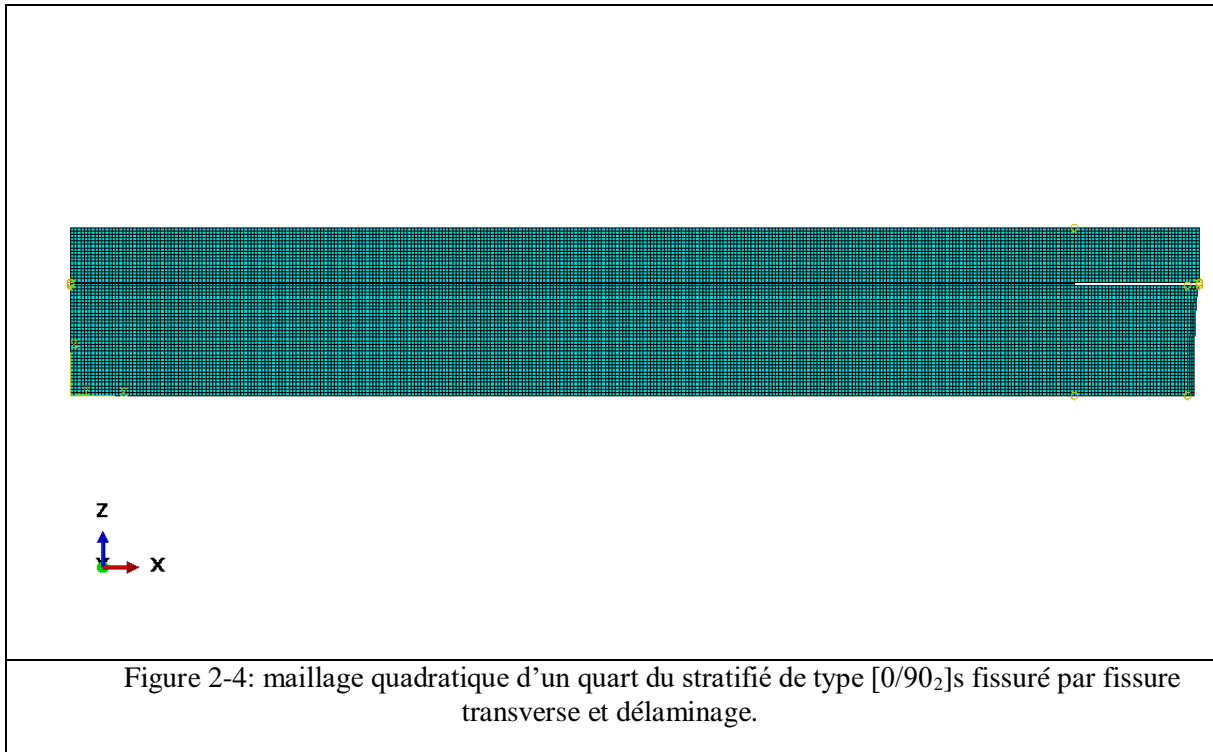
Pour cette étude, un stratifié de type $[0/90_2]_s$ a été modélisé. Chaque couche du stratifié a une épaisseur de 0.203mm. Le matériau choisi est l'époxyde 3502 fibre de carbone AS4. (figure 2-2)

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

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

Le stratifié est soumis à une contrainte uniaxiale dans la direction longitudinale (OX) et à une contrainte transversale au niveau du délaminage dans la direction transversale (OZ) (figure 2-3).





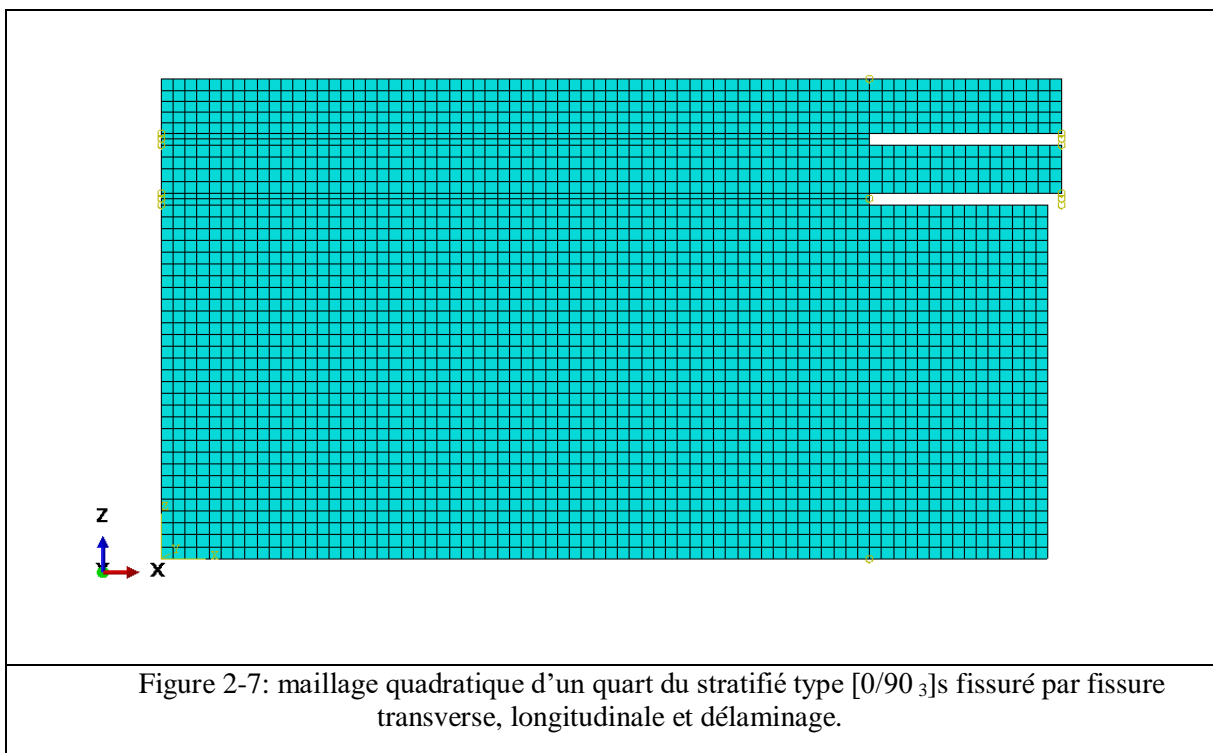
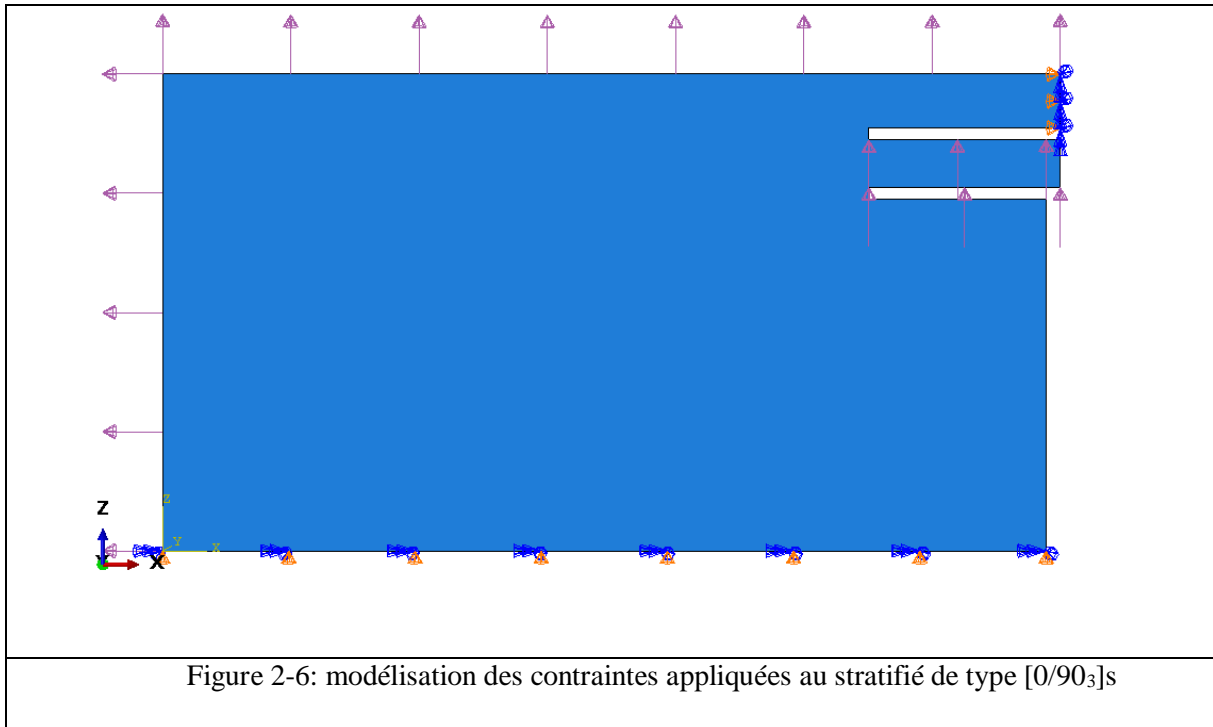
b) Stratifié fissuré par fissure transverse, longitudinale et délaminage :

Pour cette étude, un stratifié de type $[0/90_3]_s$ a été modélisé. Chaque couche de stratifié a une épaisseur de 0.125mm ayant une seule fissure longitudinale. Le matériau choisi est le composite époxy 914 fibre de Carbon T300 (figure 2-5).

		Ply Name	Region	Material	Thickness	CSYS	Rotation Angle	Integration Points
1	✓	Ply-1	(Picked)	T300_914	0.125	<Layup>	90	3
2	✓	Ply-2	(Picked)	T300_914	0.125	<Layup>	90	3
3	✓	Ply-3	(Picked)	T300_914	0.125	<Layup>	90	3
4	✓	Ply-4	(Picked)	T300_914	0.125	<Layup>	0	3

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

Le stratifié est soumis à une contrainte uniaxiale dans la direction longitudinale OX, ainsi qu'à une contrainte transversale dans la direction OZ, et à une contrainte transversale au niveau du délaminage dans la direction OZ (figure 2-6).



2.4 Conclusion :

Dans le cadre de ce chapitre, diverses approches analytiques et numériques ont été employées pour étudier le comportement mécanique des composites stratifiés $[0/90_n]_s$ soumis à un chargement uniaxial et endommagés par des fissures transversales et délaminage.

Ce chapitre expose deux méthodes de propagation de cisaillement, appelées modèles progressifs et paraboliques. Ces modèles permettent de modéliser le comportement de contrainte longitudinale dans la couche à 90° et le comportement de cisaillement longitudinal sous chargement mécanique. Ils constituent la base des travaux de Berthelot [16] et font l'objet d'une comparaison avec les résultats de la simulation présentés au début du chapitre 3.

Afin d'étudier le comportement mécanique des composites $[\theta_m/90_n]_s$ fissurés par des fissures transversales, longitudinales et délaminage et soumis à une contrainte biaxiale, des méthodes numériques ont été explorées.

3 Chapitre 03

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

3.1 Introduction :

Ce chapitre a pour objectif principal de déterminer la répartition des contraintes dans un stratifié [$\theta_m/90_n$]_s. Dans un premier temps, nous comparerons les résultats numériques obtenus pour un stratifié endommagé par délaminage et fissuration transverse, soumis à une contrainte de traction uniaxiale, avec les résultats analytiques. Cette comparaison permettra de valider notre modèle numérique.

Ensuite, nous introduirons un nouveau type d'endommagement dans notre modèle numérique qui est la fissure longitudinale. L'objectif est d'évaluer l'influence de cette dernière sur le comportement du stratifié endommagé. En utilisant le code de calcul Abaqus, nous effectuerons des simulations numériques et présenterons les résultats des comportements mécaniques sur la distribution des contraintes longitudinales et de cisaillement dans un composite fissuré par des fissures intralaminaires et interlaminaires sous l'influence de contraintes en traction biaxiale.

3.2 Simulation numérique :

Afin d'explorer plus en profondeur le comportement des stratifiés composites, nous avons mené une étude numérique détaillée à l'aide du logiciel Abaqus. Cette étude visait à comparer nos résultats avec le modèle par éléments finis Abaqus de Sadoudi [25] et les résultats d'analyse de Berthelot, J.-M. et Le Corre, J.-F. [16] présentés au chapitre 2 pour un stratifié fissuré avec des fissures transversales et délaminage. L'objectif principal de cette étude était de raffiner nos résultats afin d'obtenir une concordance plus étroite avec les conclusions de Berthelot.

Une fois notre modèle comparé et validé avec les modèles de Berthelot, J.-M. et Le Corre, J.-F. [16] et de Sadoudi [25], nous nous sommes intéressés à une nouvelle configuration. Celle-ci consistait à introduire une fissure longitudinale au niveau de la couche θ° et à étudier son influence sur le comportement du stratifié.

Notre étude visait à analyser de manière approfondie l'impact de divers types de dommages sur le comportement mécanique des stratifiés composites. Pour ce faire, nous avons introduit des fissures transversales, longitudinales et le délaminage dans les stratifiés. En créant ces fissures, nous avons pu affiner nos résultats et acquérir une meilleure compréhension du comportement des stratifiés endommagés. Les résultats de notre étude sont présentés sous forme de contraintes longitudinales et de cisaillement pour chaque type de stratifié $[\theta_m/90_n]_s$ en modifiant les différents paramètres étudiés, tels que les angles orientation des couches « θ », les valeurs du rapport d'épaisseur de couche « α » et les rapports géométriques de fissuration « a ».

3.2.1 Choix du matériau pour la simulation :

Pour mener à bien cette simulation numérique, nous avons opté pour le composite carbone-époxyde AS4-3502, qui présente 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 :

Dans leurs travaux sur la modélisation des fissures transversales dans les composites lors de simulations numériques, Doumaz, S et Touahri, R [17] ont privilégié la forme semi-elliptique. Cette configuration réaliste permet d'obtenir des corrélations étroites avec le modèle analytique de Berthelot [16], en particulier pour de faibles niveaux de fissuration géométrique.

Pour la modélisation du délaminage, Besbaci, N [41] a introduit une couche d'interface fictive. Placée le long de la jonction entre les couches du stratifié, cette couche possède sa propre limite de cisaillement (τ_f). Lors de la simulation du délaminage, cette couche est supprimée, laissant une zone délaminée de forme rectangulaire et d'épaisseur initiale négligeable. Cette approche rectangulaire s'est avérée plus pertinente pour reproduire le délaminage réel comparativement à une forme triangulaire (voir figures 3-1 et 3-2).

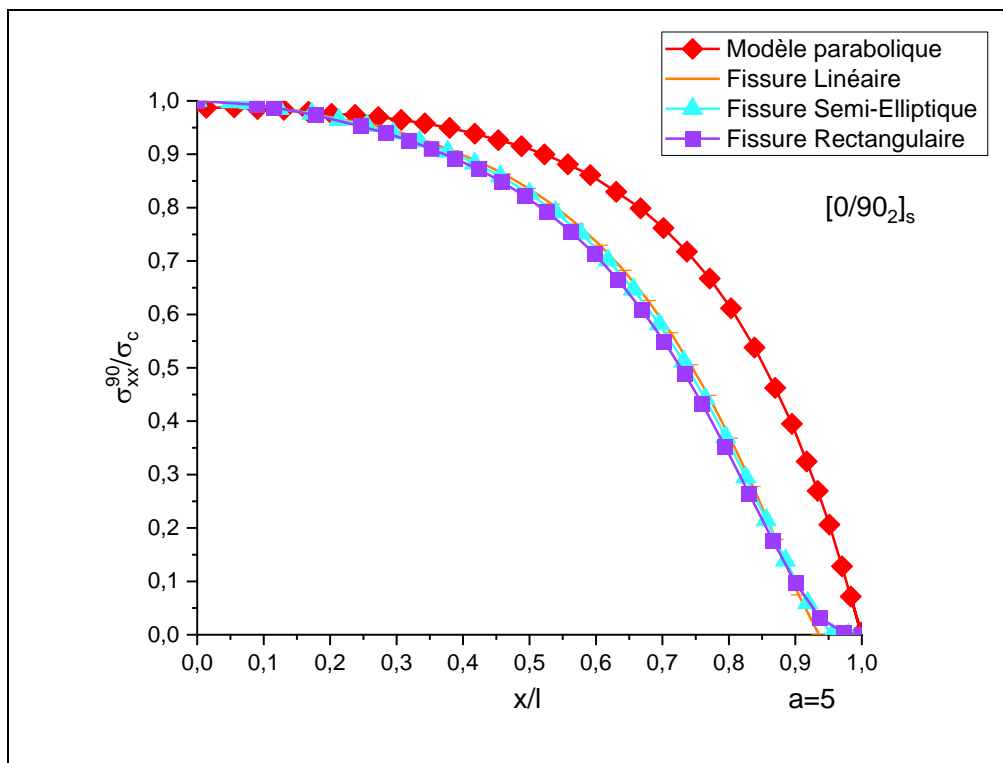


Figure 3-1 : Variation de la contrainte longitudinale pour un stratifié $[0/90_2]_s$ pour $\alpha=1/2$ et $a=5$ avec différents types de fissures.

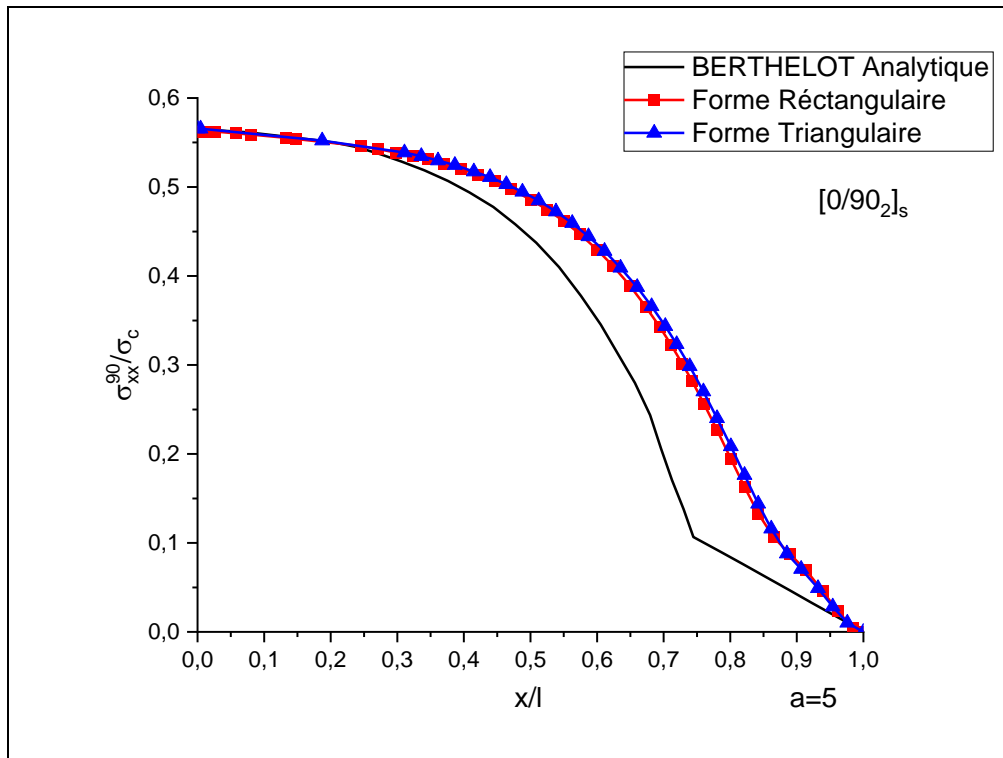


Figure 3-2: Variation de la contrainte longitudinale pour un stratifié $[0/90_2]_s$ pour $\alpha=1/2$ et $a=5$ avec différents forme de fissure transverse.

3.3 Résultats numériques :

3.3.1 Validation du modèle numérique :

S'appuyant sur les travaux de Berthelot [16], notre étude a adopté une approche simplifiée pour modéliser un stratifié composite fissuré et délaminé. Berthelot suggérait de représenter le stratifié entier par un quart de sa surface, contenant une fissure transversale semi-elliptique dans les couches à 90° et un délaminage rectangulaire à l'interface 0/90. Ce modèle simplifié est soumis à un chargement de traction uni-axiale.

Afin de garantir la robustesse et la validité de notre modèle numérique, nous avons rigoureusement comparé nos résultats à ceux obtenus par Berthelot [16] et Sadoudi, S [25]. Cet exercice de comparaison approfondie a confirmé la justesse et la fiabilité de notre modèle, démontrant sa capacité à reproduire fidèlement le comportement mécanique des stratifiés composites fissurés et délaminés.

Pour illustrer les performances de notre modèle et explorer l'influence de la géométrie sur la distribution des contraintes, nous avons utilisé le logiciel Abaqus. Nous avons simulé des chargements sur des stratifiés composites $[0/90_2]_s$ présentant différentes configurations géométriques ($\alpha = 1/2$ et $a = 10 ; 7,5$ et 6). Les contraintes longitudinales et de cisaillement obtenus pour chaque configuration sont présentés dans (les figures 3-3 et 3-4). Ces résultats

mettent en lumière l'impact significatif des paramètres géométriques sur la répartition des contraintes à l'intérieur des stratifiés.

3.3.2 Variation de la contrainte longitudinale :

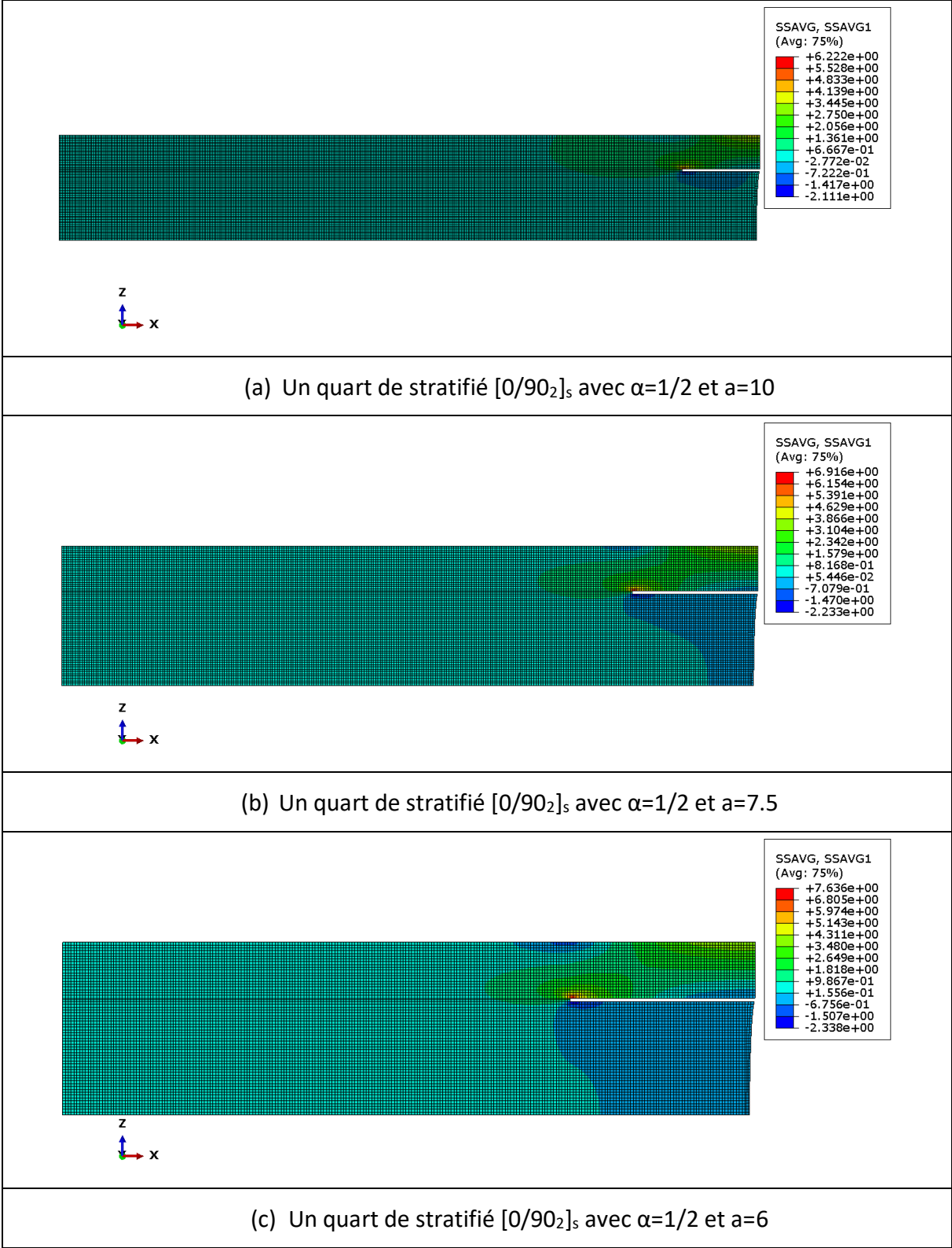


Figure 3-3 : Variation de la contrainte longitudinale dans un composite stratifié $[0/90_2]_s$ endommagé par fissuration transverse et délaminage.

3.3.3 Variation de la contrainte de cisaillement :

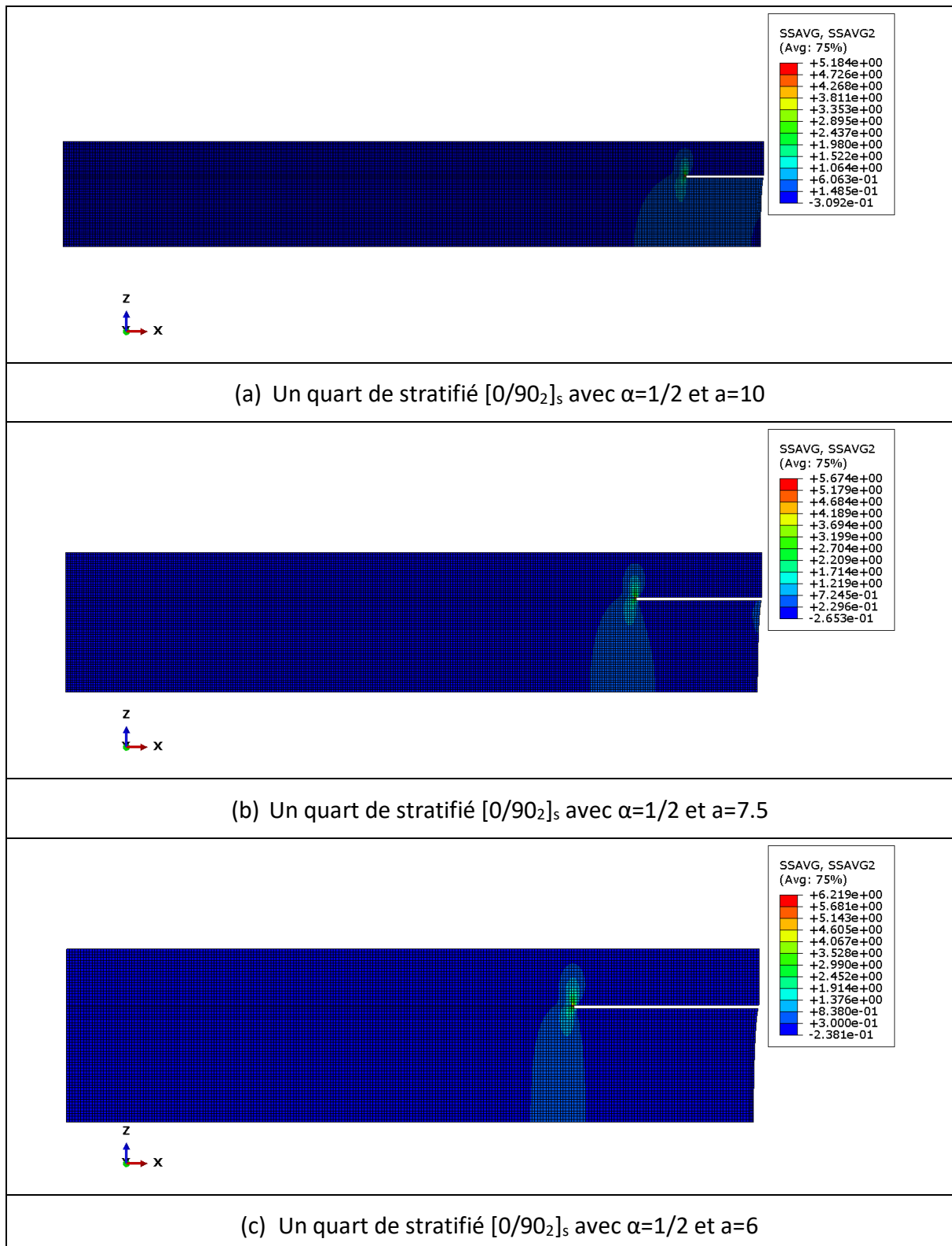
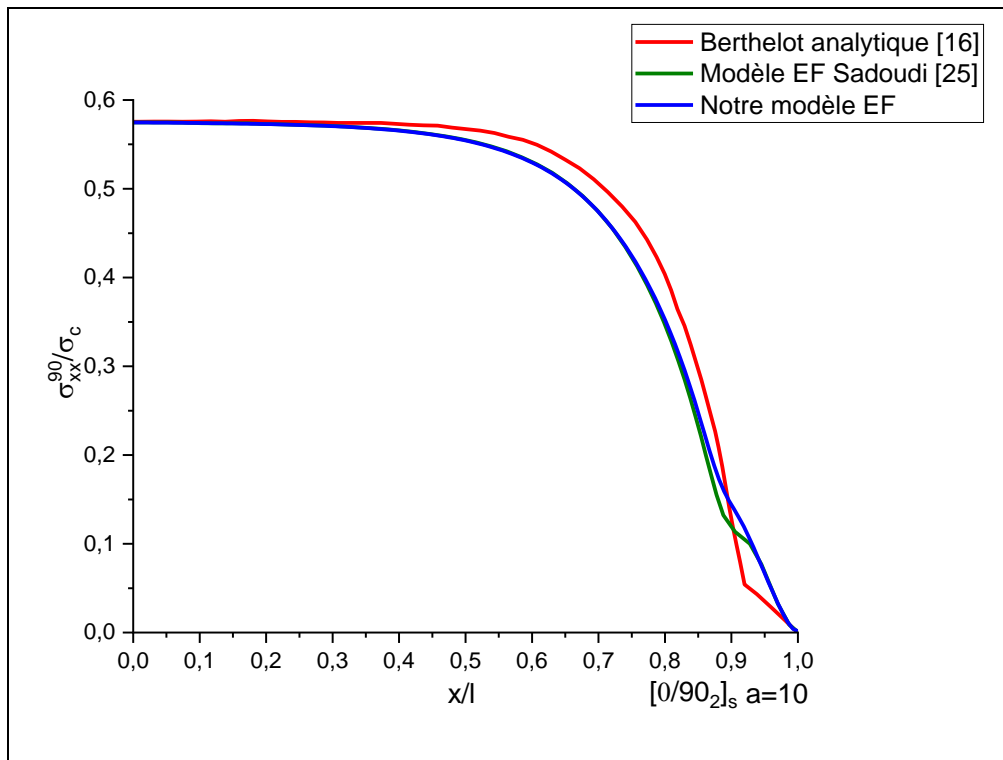


Figure 3-4: Variation de la contrainte cisaillement dans un composite stratifié $[0/90_2]_s$ endommagé par fissuration transverse et délaminage.

3.3.4 Validation de la contrainte longitudinale par le modèle MEF :

Les résultats obtenus par la méthode des éléments finis (simulée par Abaqus) ont été comparés à ceux obtenus par Berthelot [16].

Les figures suivantes présentent les contraintes longitudinales dans le sens de la longueur dans le stratifié $[0/90_2]_s$ pour différents rapports géométriques de fissuration $a = 10 ; 7,5$ et 6 et un rapport d'épaisseur de couches $\alpha = 1/2$ (voir figure 3-5).



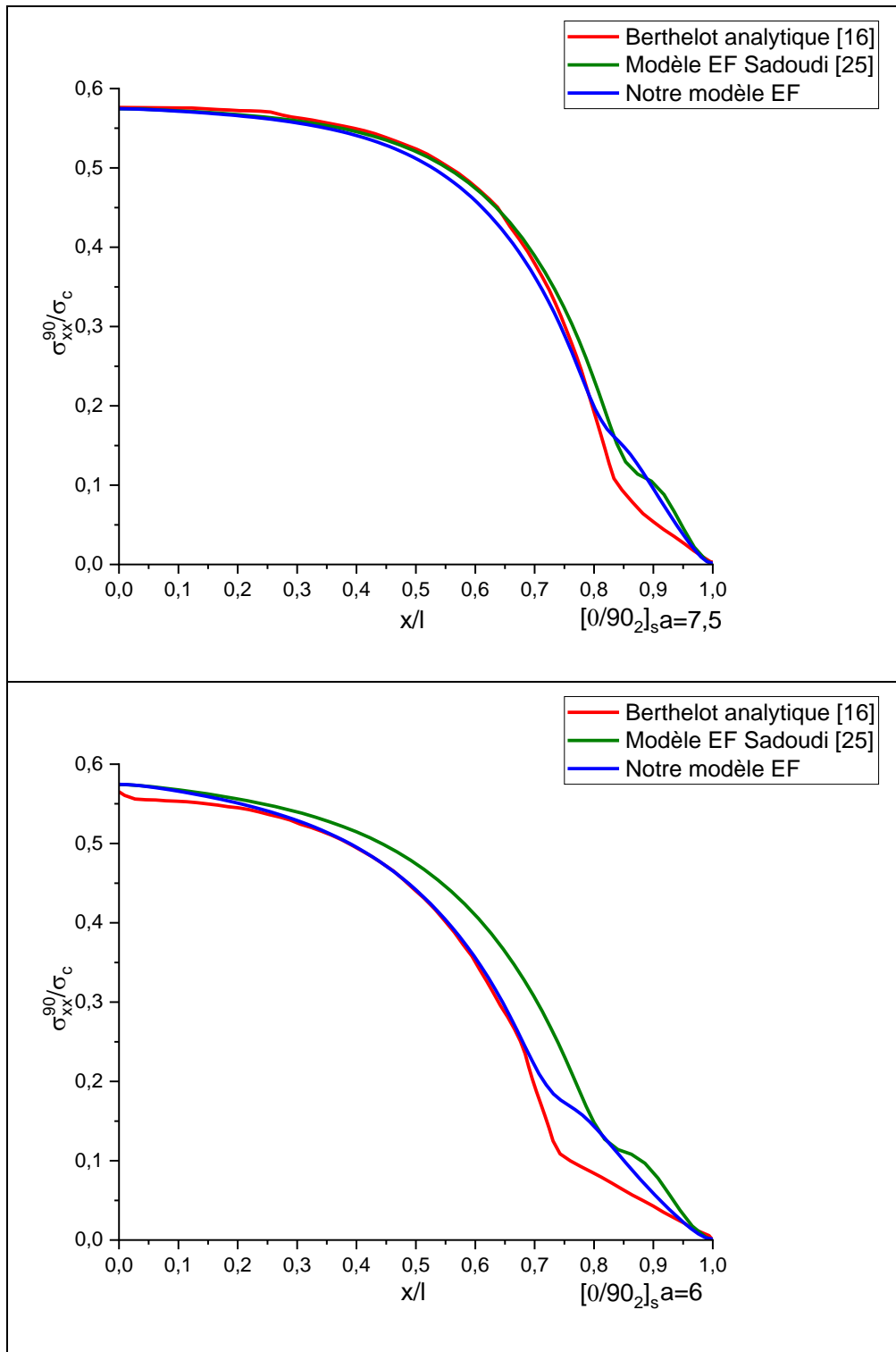
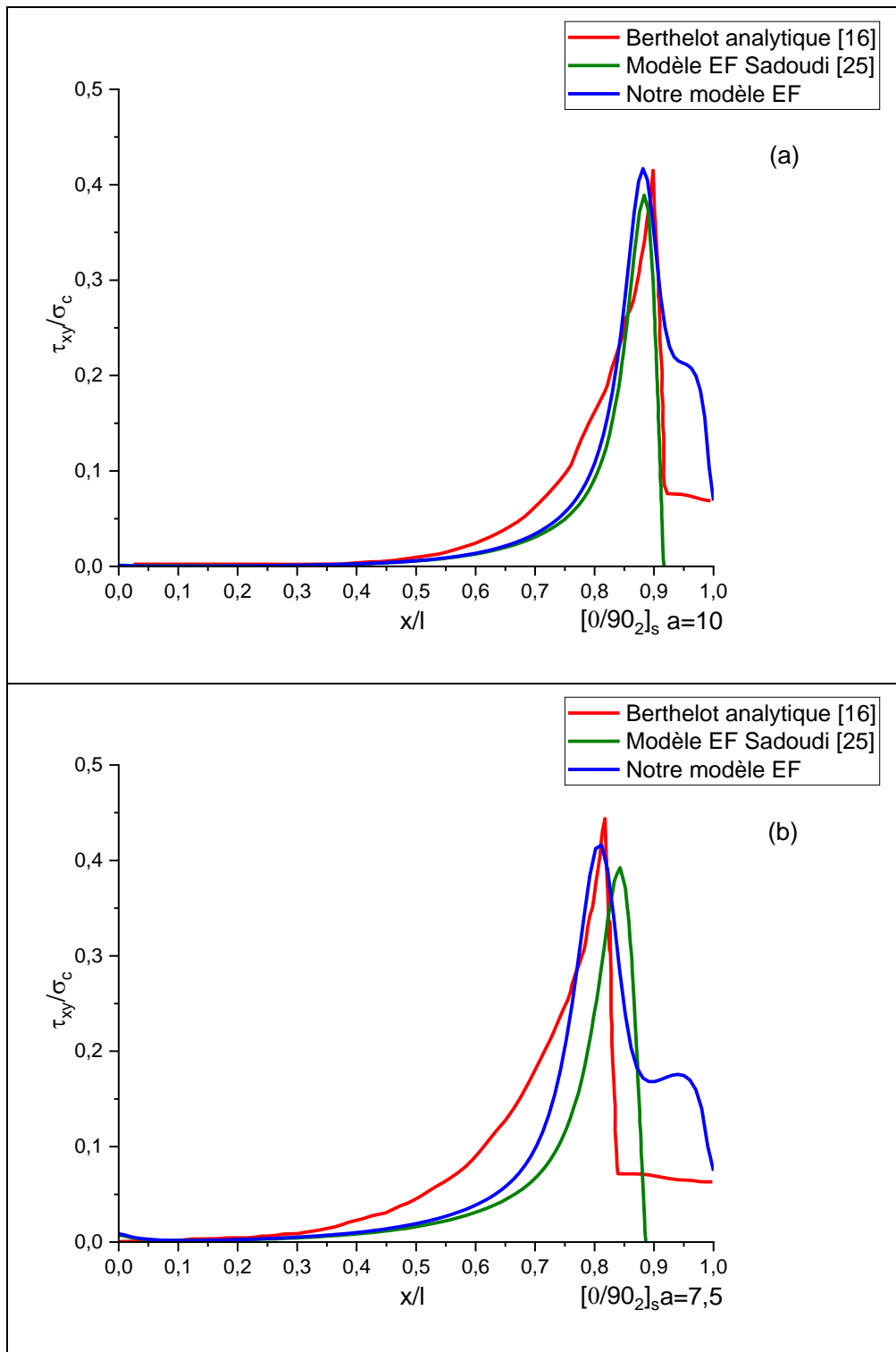


Figure 3-5: Validation de la contrainte longitudinale d'un stratifié $[0/90_2]_s$ fissuré par fissuration transverse et délaminage avec le modèle analytique.

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

Les figures suivantes illustrent la distribution des contraintes de cisaillement longitudinales dans un stratifié $[0/90_2]_s$. Ces figures présentent les résultats pour différents

rapports géométriques de fissuration ($a = 10 ; 7,5$ et 6) et un rapport d'épaisseur de couches constant de $\alpha = 1/2$ (voir figure 3-6).



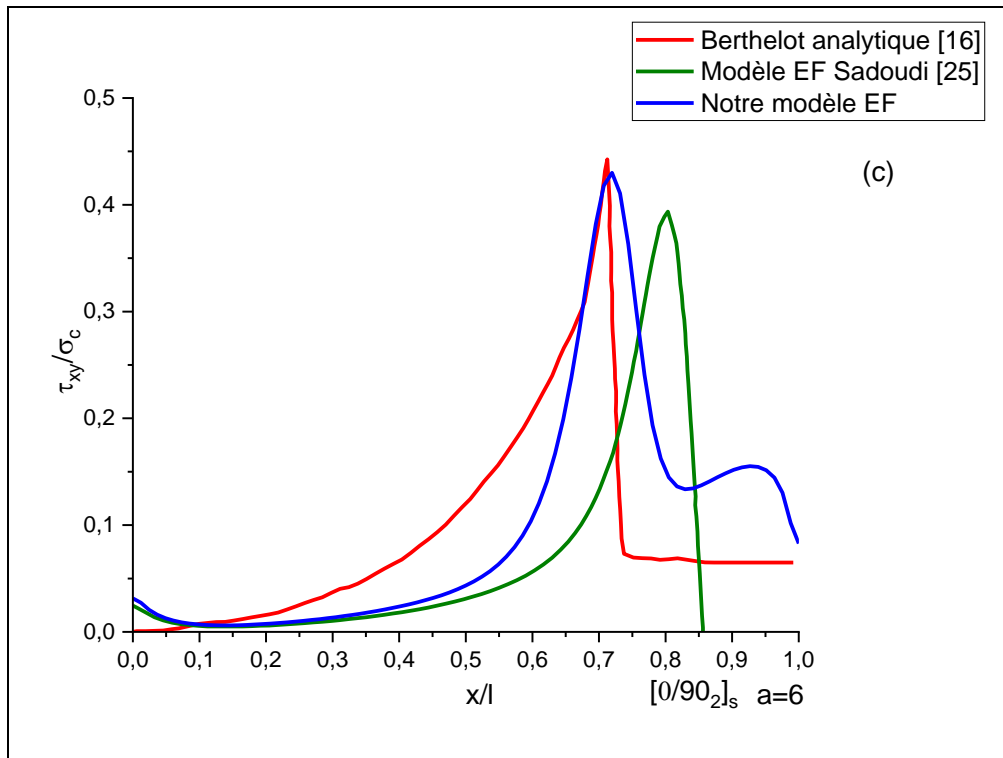


Figure 3-6: Validation de la contrainte de cisaillement d'un stratifié $[0/90_2]_s$ fissuré par fissuration transverse et délaminage avec le modèle analytique.

3.3.6 Interprétation des résultats :

Pour un stratifié $[0/90_2]_s$ fissuré avec fissure transverse et délaminage soumis à une traction uniaxiale, les figures (3-5 et 3-6) illustrent la variation des contraintes longitudinales et de cisaillement tout au long du stratifié. Dans cette étude, nous avons amélioré les résultats du modèle numérique de Sadoudi [25] pour trois valeurs différentes du rapport géométrique « $a=10 ; 7,5$ et 6 », tout en maintenant un rapport d'épaisseur de couches constant de « $\alpha=1/2$ ».

La contrainte longitudinale est maximale au milieu de la distance entre deux fissures transversales successives. En s'approchant du plan de fissure, la contrainte diminue progressivement jusqu'à devenir nulle au niveau du plan de fissure. On observe une distribution constante de la contrainte de cisaillement à l'exception d'une zone proche du plan de fissure ($x/l = 0,8$) où elle connaît une augmentation due à la discontinuité de la matière entre les zones délaminée et non délaminée. Au niveau du plan de fissure lui-même, la contrainte de cisaillement diminue progressivement pour atteindre une valeur positive à l'extrémité de la fissure ($x/l = 1$). Concernant les courbes de contraintes longitudinales et de cisaillement, le

modèle numérique génère des résultats similaires à ceux de Berthelot [16], et ce pour diverses densités de fissuration.

La comparaison des graphes des contraintes longitudinales et de cisaillement obtenu par notre modèle MEF avec ceux issus de l'étude analytique de Berthelot [16] révèle une concordance notable. Cette similitude des résultats constitue une validation solide de notre modèle.

3.4 Modélisation de la fissuration longitudinale :

3.4.1 Modélisation :

Dans cette partie on va considérer un modèle aux éléments finis ou on va prendre un quart de stratifié $[\theta_m/90_n]_s$ soumis à une contrainte de traction bi axiale et endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage, ayant un rapport géométrique de fissuration « $a=2,5 ; 10 ; 25$ ».

Les trois types d'endommagement sont modélisés dans le même plan. Une étude paramétrique est effectuée pour évaluer l'influence du rapport d'épaisseur des couches « α » et de l'orientation des couches extérieures à (θ) sur le comportement d'un stratifié endommagé par des fissures transversale, longitudinale et délaminage.

3.4.2 Choix de la géométrie de fissuration :

La forme des fissures intralaminaires (longitudinales et transversales) est choisie selon le modèle validé par MAATALLAH [32]. Ce modèle considère que les fissures sont toutes de forme rectangulaire.

3.4.3 Choix du matériau :

Dans le cadre de cette étude, un composite à fibres de carbone T300-914 et matrice époxyde a été utilisé, présentant les propriétés élastiques suivantes :

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

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

3.5 Paramètres influençant le comportement d'un stratifié fissuré par fissuration transverse, longitudinale et délaminage :

Afin de comprendre le comportement mécanique d'un stratifié présentant des fissures transversales, longitudinales et de délaminage, une étude paramétrique est menée. Cette étude vise à analyser l'effet de deux paramètres clés : le rapport d'épaisseur des couches (α) et l'orientation des couches extérieures (θ).

3.5.1 Variation de la contrainte longitudinale σ_{xx} :

3.5.1.1 Influence des différents rapports d'épaisseur $\ll \alpha \gg$ sur le comportement d'un stratifié $[0_m/90_n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différents rapports géométriques :

a) Pour $\theta=0^\circ$:

Tableau 3-4: Variation de la contrainte longitudinale dans un stratifié $[0_m/90_n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « α ».

x/l	σ_{xx}/σ_c				Écart $\sigma_{\alpha=3}-\sigma_{\alpha=1/3}$	σ_{xx}/σ_c				Écart $\sigma_{\alpha=3}-\sigma_{\alpha=1/3}$	σ_{xx}/σ_c				Écart $\sigma_{\alpha=3}-\sigma_{\alpha=1/3}$
	$\theta=0^\circ$			a=25		$\theta=0^\circ$			a=10		$\theta=0^\circ$			a=2,5	
	$\alpha=1/3$	$\alpha=1$	$\alpha=3$			$\alpha=1/3$	$\alpha=1$	$\alpha=3$			$\alpha=1/3$	$\alpha=1$	$\alpha=3$		
[0,0-0,1]	0,360	0,300	0,260	-10,00%	0,360	0,300	0,260	-10,00%	0,360	0,300	0,260	-10,00%			
[0,1-0,2]	0,360	0,300	0,260	-10,00%	0,359	0,299	0,259	-10,01%	0,346	0,286	0,249	-9,74%			
[0,2-0,3]	0,360	0,300	0,260	-10,00%	0,358	0,297	0,258	-10,02%	0,320	0,258	0,226	-9,36%			
[0,3-0,4]	0,360	0,300	0,260	-10,00%	0,356	0,294	0,256	-10,01%	0,288	0,225	0,198	-9,05%			
[0,4-0,5]	0,360	0,300	0,260	-10,00%	0,353	0,289	0,253	-9,97%	0,251	0,187	0,163	-8,82%			
[0,5-0,6]	0,360	0,300	0,260	-10,01%	0,346	0,280	0,247	-9,84%	0,208	0,145	0,121	-8,67%			
[0,6-0,7]	0,359	0,299	0,259	-10,03%	0,333	0,265	0,237	-9,57%	0,157	0,098	0,070	-8,64%			
[0,7-0,8]	0,357	0,295	0,257	-10,04%	0,308	0,236	0,217	-9,11%	0,100	0,050	0,013	-8,71%			
[0,8-0,9]	0,346	0,280	0,247	-9,85%	0,258	0,182	0,173	-8,50%	0,056	0,023	-0,007	-6,32%			
[0,9-1,0]	0,289	0,214	0,200	-8,83%	0,134	0,067	0,051	-8,31%	0,025	0,014	0,015	-1,05%			
1	0,000	0,000	0,000	0,00%	0,000	0,000	0,000	0,00%	0,000	0,000	0,000	0,00%			

b) Pour $\theta = 30^\circ$:

Tableau 3-5: Variation de la contrainte longitudinale dans un stratifié $[30_m/90_n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « α ».

x/l	σ_{xx}/σ_c			Écart $\sigma_{\alpha=3}-\sigma_{\alpha=1/3}$	σ_{xx}/σ_c			Écart $\sigma_{\alpha=3}-\sigma_{\alpha=1/3}$	σ_{xx}/σ_c			Écart $\sigma_{\alpha=3}-\sigma_{\alpha=1/3}$
	$\theta=30^\circ$		a=25		$\theta=30^\circ$		a=10		$\theta=30^\circ$		a=2,5	
	$\alpha=1/3$	$\alpha=1$	$\alpha=3$		$\alpha=1/3$	$\alpha=1$	$\alpha=3$		$\alpha=1/3$	$\alpha=1$	$\alpha=3$	
[0,0-0,1]	0,360	0,300	0,261	-9,91%	0,360	0,300	0,261	-9,91%	0,357	0,299	0,260	-9,63%
[0,1-0,2]	0,354	0,297	0,261	-9,31%	0,355	0,298	0,262	-9,33%	0,311	0,277	0,253	-5,77%
[0,2-0,3]	0,354	0,296	0,261	-9,32%	0,354	0,297	0,261	-9,31%	0,271	0,247	0,238	-3,30%
[0,3-0,4]	0,354	0,296	0,261	-9,32%	0,354	0,296	0,261	-9,32%	0,230	0,201	0,218	-1,17%
[0,4-0,5]	0,354	0,296	0,261	-9,32%	0,354	0,296	0,261	-9,32%	0,190	0,138	0,193	0,37%
[0,5-0,6]	0,354	0,296	0,261	-9,32%	0,354	0,297	0,262	-9,24%	0,152	0,079	0,154	0,23%
[0,6-0,7]	0,354	0,296	0,261	-9,32%	0,354	0,301	0,266	-8,78%	0,114	0,038	0,048	-6,55%
[0,7-0,8]	0,354	0,296	0,261	-9,33%	0,345	0,300	0,273	-7,14%	0,074	0,012	-0,045	-11,90%
[0,8-0,9]	0,354	0,301	0,273	-8,06%	0,266	0,248	0,242	-2,39%	0,044	0,007	-0,009	-5,28%
[0,9-1,0]	0,322	0,291	0,268	-5,40%	0,114	0,040	0,056	-5,84%	0,021	0,005	0,002	-1,87%
1	0,000	0,000	0,000	0,00%	0,000	0,000	0,000	0,00%	0,000	0,000	0,000	0,00%

c) Pour $\theta=45^\circ$:

Tableau 3-6: Variation de la contrainte longitudinale dans un stratifié $[45_m/90_n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « α ».

x/l	σ_{xx}/σ_c			Écart $\sigma_{\alpha=3}-\sigma_{\alpha=1/3}$	σ_{xx}/σ_c			Écart $\sigma_{\alpha=3}-\sigma_{\alpha=1/3}$	σ_{xx}/σ_c			Écart $\sigma_{\alpha=3}-\sigma_{\alpha=1/3}$
	$\theta=45^\circ$		a=25		$\theta=45^\circ$		a=10		$\theta=45^\circ$		a=2,5	
	$\alpha=1/3$	$\alpha=1$	$\alpha=3$		$\alpha=1/3$	$\alpha=1$	$\alpha=3$		$\alpha=1/3$	$\alpha=1$	$\alpha=3$	
[0,0-0,1]	0,360	0,300	0,260	-9,94%	0,360	0,300	0,260	-9,94%	0,359	0,300	0,261	-9,82%
[0,1-0,2]	0,356	0,298	0,261	-9,52%	0,357	0,299	0,261	-9,60%	0,348	0,300	0,270	-7,82%
[0,2-0,3]	0,356	0,298	0,261	-9,52%	0,356	0,298	0,261	-9,52%	0,330	0,295	0,272	-5,74%
[0,3-0,4]	0,356	0,298	0,261	-9,52%	0,356	0,298	0,261	-9,52%	0,297	0,280	0,268	-2,83%
[0,4-0,5]	0,356	0,298	0,261	-9,52%	0,356	0,298	0,261	-9,52%	0,243	0,245	0,255	1,15%
[0,5-0,6]	0,356	0,298	0,261	-9,52%	0,356	0,298	0,261	-9,52%	0,178	0,166	0,226	4,86%
[0,6-0,7]	0,356	0,298	0,261	-9,52%	0,356	0,298	0,261	-9,46%	0,121	0,062	0,170	4,85%
[0,7-0,8]	0,356	0,298	0,261	-9,52%	0,355	0,301	0,266	-8,86%	0,076	0,017	-0,022	-9,80%
[0,8-0,9]	0,356	0,298	0,261	-9,52%	0,326	0,295	0,275	-5,12%	0,043	0,007	-0,022	-6,54%
[0,9-1,0]	0,350	0,302	0,275	-7,44%	0,123	0,065	0,174	5,16%	0,020	0,004	0,001	-1,95%
1	0,000	0,000	0,000	0,00%	0,000	0,000	0,000	0,00%	0,000	0,000	0,000	0,00%

d) Interprétation :

La variation des contraintes longitudinales dans la couche 90° d'un stratifié $[\theta_m/90_n]_s$ fissuré par des fissures transverses, longitudinales et délaminages soumis à une sollicitation bi axiale est représentée dans les tableaux (3-4 à 3-6) en fonction des coordonnées longitudinales (x/l) pour différents rapports d'épaisseur « $\alpha = 1/3 ; 1 ; 3$ », différents rapports géométriques « a=25 ; 10 ; 2,5 » et différents angles d'orientation « $\theta^\circ=0^\circ ; 30^\circ ; 45^\circ$ ».

Dans un stratifié croisé de type $[0_m/90_n]_s$, la contrainte longitudinale présente une valeur maximale constante à mi-distance entre deux fissures transversales. Elle diminue ensuite brusquement pour s'annuler au niveau du plan de fissure transverses (conditions aux limites respectées), plus la distance entre deux fissures transversales est rapprochée (densité de fissuration élevée $a=10$ ou 2.5), plus la contrainte longitudinale diminue de manière significative. On observe également que la contrainte dans un stratifié avec plus de couches à 90° « $\alpha=1/3$ » est plus importante que celle d'un stratifié avec plus de couches à 0° « $\alpha=3$ », avec un écart d'environ 10% (Tableau 3-4). Cependant, cet écart diminue avec l'augmentation de la densité de fissures. En effet, pour une densité de fissure très faible « $a=25$ », l'écart est important, tandis qu'il devient moins notable pour une densité de fissuration élevée. Autrement dit, l'influence du rapport d'épaisseur « α » sur la contrainte longitudinale est plus importante lorsque la densité de fissuration est faible et devient moins significative lorsque les fissures sont plus rapprochées (densité de fissuration élevée).

Le comportement est identique pour $\theta=30^\circ$ (tableau 3-5), sauf dans le cas où la densité de fissuration est faible « $a=25$ ou 10 », on observe une augmentation de la contrainte longitudinale près du plan de fissure lorsque le rapport d'épaisseur de couche est élevé « $\alpha = 1 ; 3$ ». Cette augmentation est d'environ 1.2%, ainsi que pour une forte densité de fissuration « $a=2.5$ » (Il y a peu d'espace entre les deux fissures transversales), on constate que la distribution des contraintes dans le stratifié n'est pas uniforme et présente une certaine instabilité. En effet, les contraintes dans un stratifié avec plus de couches à 90° « $\alpha=1/3$ » sont moins importantes que celles d'un stratifié avec plus de couches à 0° « $\alpha=3$ ». Cette différence est particulièrement notable dans la zone mis distance entre deux fissures transversales (x/l comprise entre 0,4 et 0,6) où l'écart de contrainte atteint environ 0,37%.

Le stratifié $[45_m/90_n]_s$ présente une variation de contrainte longitudinale semblable à celle du stratifié $[30_m/90_n]_s$, mais avec des variations légèrement plus significatives lorsque le rapport géométrique « a » est petit, on observe dans la zone x/l comprise entre 0.4 et 0.7 que la contrainte dans un stratifié avec plus de couches à 90° « $\alpha=1/3$ » est inférieure à celle d'un stratifié avec plus de couches à 0° « $\alpha=3$ ». Cette différence est d'environ 4.85% comme le montre le Tableau 3-6.

L'analyse des répartitions des contraintes normales σ_{xx} révèle que la fissuration transversale est d'autant plus facile de se produire lorsque le rapport d'épaisseur α est faible « $\alpha = 1 ; 1/3$ ». Cela s'explique par le fait que dans un stratifié où le rapport d'épaisseur est élevé

(avec plus de couches à θ° qu'à 90°), la charge est principalement supportée par les couches à θ° , ainsi que plus l'angle θ est petit, plus ces couches supportent une charge importante.

3.5.1.2 Influence des différents angles d'orientation « θ » sur le comportement d'un stratifié $[\theta_m/90_n]$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différents rapports géométriques :

a) Pour $\alpha=1/3$:

Tableau 3-7: Variation de la contrainte longitudinale dans un stratifié $[\theta_m/90_n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « θ ».

x/l	σ_{xx}/σ_c				Écart $\sigma_{\theta=45^\circ}-\sigma_{\theta=0^\circ}$	σ_{xx}/σ_c				Écart $\sigma_{\theta=45^\circ}-\sigma_{\theta=0^\circ}$	σ_{xx}/σ_c				Écart $\sigma_{\theta=45^\circ}-\sigma_{\theta=0^\circ}$
	$\alpha=1/3$		a=25			$\alpha=1/3$		a=10			$\alpha=1/3$		a=2,5		
	$\theta=0^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=45^\circ$	$\theta=0^\circ$		$\theta=30^\circ$	$\theta=45^\circ$	$\theta=0^\circ$	$\theta=30^\circ$		$\theta=45^\circ$	$\theta=0^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=45^\circ$	
[0,0-0,1]	0,360	0,360	0,360	-0,04%	0,360	0,360	0,360	-0,04%	0,360	0,357	0,359	-0,05%			
[0,1-0,2]	0,360	0,354	0,356	-0,39%	0,359	0,355	0,357	-0,24%	0,346	0,311	0,348	0,21%			
[0,2-0,3]	0,360	0,354	0,356	-0,39%	0,358	0,354	0,356	-0,19%	0,320	0,271	0,330	0,98%			
[0,3-0,4]	0,360	0,354	0,356	-0,39%	0,356	0,354	0,356	-0,01%	0,288	0,230	0,297	0,86%			
[0,4-0,5]	0,360	0,354	0,356	-0,39%	0,353	0,354	0,356	0,35%	0,251	0,190	0,243	-0,82%			
[0,5-0,6]	0,360	0,354	0,356	-0,38%	0,346	0,354	0,356	1,04%	0,208	0,152	0,178	-3,01%			
[0,6-0,7]	0,359	0,354	0,356	-0,34%	0,333	0,354	0,356	2,32%	0,157	0,114	0,121	-3,52%			
[0,7-0,8]	0,357	0,354	0,356	-0,12%	0,308	0,345	0,355	4,65%	0,100	0,074	0,076	-2,39%			
[0,8-0,9]	0,346	0,354	0,356	1,03%	0,258	0,266	0,326	6,82%	0,056	0,044	0,043	-1,32%			
[0,9-1,0]	0,289	0,322	0,350	6,12%	0,134	0,114	0,123	-1,10%	0,025	0,021	0,020	-0,54%			
1	0,000	0,000	0,000	0,00%	0,000	0,000	0,000	0,00%	0,000	0,000	0,000	0,00%			

b) Pour $\alpha=1$:

Tableau 3-8: Variation de la contrainte longitudinale dans un stratifié $[\theta_m/90_n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « θ ».

x/l	σ_{xx}/σ_c				Écart $\sigma_{\theta=45^\circ}-\sigma_{\theta=0^\circ}$	σ_{xx}/σ_c				Écart $\sigma_{\theta=45^\circ}-\sigma_{\theta=0^\circ}$	σ_{xx}/σ_c				Écart $\sigma_{\theta=45^\circ}-\sigma_{\theta=0^\circ}$
	$\alpha=1$		a=25			$\alpha=1$		a=10			$\alpha=1$		a=2,5		
	$\theta=0^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=45^\circ$	$\theta=0^\circ$		$\theta=30^\circ$	$\theta=45^\circ$	$\theta=0^\circ$	$\theta=30^\circ$		$\theta=45^\circ$	$\theta=0^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=45^\circ$	
[0,0-0,1]	0,300	0,300	0,300	-0,03%	0,300	0,300	0,300	-0,03%	0,300	0,299	0,300	0,03%			
[0,1-0,2]	0,300	0,297	0,298	-0,20%	0,299	0,298	0,299	-0,01%	0,286	0,277	0,300	1,39%			
[0,2-0,3]	0,300	0,296	0,298	-0,21%	0,297	0,297	0,298	0,13%	0,258	0,247	0,295	3,64%			
[0,3-0,4]	0,300	0,296	0,298	-0,21%	0,294	0,296	0,298	0,41%	0,225	0,201	0,280	5,53%			
[0,4-0,5]	0,300	0,296	0,298	-0,20%	0,289	0,296	0,298	0,91%	0,187	0,138	0,245	5,76%			
[0,5-0,6]	0,300	0,296	0,298	-0,18%	0,280	0,297	0,298	1,78%	0,145	0,079	0,166	2,10%			
[0,6-0,7]	0,299	0,296	0,298	-0,09%	0,265	0,299	0,298	3,37%	0,098	0,038	0,062	-3,58%			
[0,7-0,8]	0,295	0,296	0,298	0,27%	0,236	0,300	0,301	6,42%	0,050	0,012	0,017	-3,31%			
[0,8-0,9]	0,280	0,297	0,298	1,78%	0,182	0,248	0,295	11,33%	0,023	0,007	0,007	-1,60%			
[0,9-1,0]	0,214	0,298	0,302	8,73%	0,067	0,040	0,065	-0,18%	0,014	0,005	0,004	-0,97%			
1	0,000	0,000	0,000	0,00%	0,000	0,000	0,000	0,00%	0,000	0,000	0,000	0,00%			

c) Pour $\alpha=3$:

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

x/l	σ_{xx}/σ_c				Écart $\sigma_{\theta=45^\circ}-\sigma_{\theta=0^\circ}$	σ_{xx}/σ_c				Écart $\sigma_{\theta=45^\circ}-\sigma_{\theta=0^\circ}$	σ_{xx}/σ_c				Écart $\sigma_{\theta=45^\circ}-\sigma_{\theta=0^\circ}$
	$\alpha=3$		$a=25$			$\alpha=3$		$a=10$			$\alpha=3$		$a=2,5$		
	$\theta=0^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=45^\circ$	$\theta=0^\circ$		$\theta=30^\circ$	$\theta=45^\circ$	$\theta=0^\circ$	$\theta=30^\circ$		$\theta=45^\circ$	$\theta=0^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=45^\circ$	
[0,0-0,1]	0,260	0,261	0,260	0,02%	0,260	0,261	0,260	0,02%	0,260	0,260	0,261	0,13%			
[0,1-0,2]	0,260	0,261	0,261	0,09%	0,259	0,262	0,261	0,17%	0,249	0,253	0,270	2,12%			
[0,2-0,3]	0,260	0,261	0,261	0,09%	0,258	0,261	0,261	0,30%	0,226	0,238	0,272	4,60%			
[0,3-0,4]	0,260	0,261	0,261	0,09%	0,256	0,261	0,261	0,48%	0,198	0,218	0,268	7,08%			
[0,4-0,5]	0,260	0,261	0,261	0,09%	0,253	0,261	0,261	0,80%	0,163	0,193	0,255	9,15%			
[0,5-0,6]	0,260	0,261	0,261	0,11%	0,247	0,262	0,261	1,35%	0,121	0,154	0,226	10,51%			
[0,6-0,7]	0,259	0,261	0,261	0,17%	0,237	0,266	0,261	2,44%	0,070	0,048	0,170	9,96%			
[0,7-0,8]	0,257	0,261	0,261	0,40%	0,217	0,273	0,266	4,91%	0,013	-0,045	-0,022	-3,48%			
[0,8-0,9]	0,247	0,262	0,261	1,35%	0,173	0,242	0,275	10,22%	-0,007	-0,009	-0,022	-1,54%			
[0,9-1,0]	0,200	0,273	0,275	7,50%	0,051	0,056	0,174	12,37%	0,015	0,002	0,001	-1,44%			
1	0,000	0,000	0,000	0,00%	0,000	0,000	0,000	0,00%	0,000	0,000	0,000	0,00%			

d) Interprétation :

Les tableaux (3-7 à 3-9) montrent la variation des contraintes longitudinales dans la couche 90° dans un stratifié soumis à une sollicitation biaxiale en fonction des coordonnées longitudinales et endommagé par des fissures transversales, longitudinales et délaminage, est présenté pour différents angles d'orientation des couches « $\theta = 0^\circ ; 30^\circ$ et 45° », différents rapports d'épaisseur « $\alpha = 1/3 ; 1$ et 3 » et différents rapports géométriques « $a=25 ; 10 ; 2,5$ ».

Au milieu de la zone comprise entre deux fissures transversales, dans un stratifié endommagé par des fissures transversales, longitudinales et délaminage avec plus de couche à 90° (stratifié $[\theta/90_3]_s$), la contrainte longitudinale présente une valeur maximale constante, cette valeur décroît ensuite subitement et s'annule à $x/l=1$ (conditions aux limites respectées). Loin du plan de fissure, lorsque la distance entre deux fissures transversales est grande (faible densité de fissuration $a=25 ; 10$), la contrainte dans un stratifié avec des couches orientées à 45° est presque égale à celle d'un stratifié avec des couches orientées à 0° , avec un écart d'environ 0,3%. Cet écart augmente à proximité du plan de fissure pour atteindre environ 6% (tableaux 3-7). Cela signifie que pour des angles d'orientation faibles des couches extérieures, la contrainte diminue plus rapidement que pour des angles d'orientation élevés, où la contrainte reste maximale le long du stratifié. En revanche, pour une densité de fissuration élevée, la contrainte dans un stratifié avec des angles d'orientation élevés diminue rapidement.

Un comportement qui se manifeste de la même manière pour un stratifié où les couches orientées à 90° et θ ont la même épaisseur (rapport d'épaisseur $\alpha=1$). Cependant, on observe un

écart significatif de 8,73 % « $a=25$ » et 11,33 % « $a=10$ » (tableau 3-8) près du plan de fissure pour une faible densité de fissuration « $a=25$ et 10 ». On peut l'expliquer par le fait que la contrainte dans un stratifié avec des couches orientées à 45° augmente de 0,4 % à proximité du plan de fissure, tandis que la contrainte dans un stratifié avec des couches orientées à 0° diminue rapidement dans la même zone et quand la densité de fissuration est élevée avec « $a=2.5$ », la contrainte à mi-distance entre deux fissures dans un stratifié avec un angle d'orientation de $\theta=45^\circ$ est supérieure à celle dans un stratifié avec $\theta=0^\circ$ avec une différence de 5 %. Cela signifie que dans un stratifié avec un rapport d'épaisseur $\alpha=1$, l'influence de l'orientation des couches devient plus notable lorsque la densité de fissures est élevée.

Il en va de même pour un stratifié endommagé comportant plus de couches à θ° [$\theta_3/90$]_s. Pour une faible densité de fissuration, on observe une augmentation plus significative de la contrainte près du plan de fissure avec une augmentation d'environ 1.4% dans un stratifié comportant des couches orientées à $\theta=45^\circ$. Lorsque la densité de fissuration est élevée, la contrainte dans un stratifié avec $\theta=45^\circ$ est significativement supérieure à celle dans un stratifié avec $\theta=0^\circ$, avec un écart d'environ 10% (tableau 3-9). On observe également une contrainte de compression près du plan de fissure. Cela démontre que l'orientation des couches « θ » joue un rôle de plus en plus crucial dans le comportement du stratifié à mesure que le rapport d'épaisseur augmente « $\alpha=1 ; 3$ ».

Selon l'étude des contraintes longitudinales, on note que plus l'angle d'orientation des couches « θ° » augmente, plus la contrainte est importante. En effet, les couches extérieures avec des angles d'orientation élevés supportent moins de charge que celles avec des angles faibles, ce qui fragilise le stratifié et facilite l'apparition de fissures.

3.5.2 Variation de la contrainte de cisaillement τ_{xy} :

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

a) Pour $\theta=0^\circ$:

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

x/l	τ_{xy}/σ_c				Écart $\tau_{\alpha=3}-\tau_{\alpha=1/3}$	τ_{xy}/σ_c				écart $\tau_{\alpha=3}-\tau_{\alpha=1/3}$	τ_{xy}/σ_c				Écart $\tau_{\alpha=3}-\tau_{\alpha=1/3}$
	$\theta=0^\circ$			a=25		$\theta=0^\circ$			a=10		$\theta=0^\circ$			a=2,5	
	$\alpha=1/3$	$\alpha=1$	$\alpha=3$			$\alpha=1/3$	$\alpha=1$	$\alpha=3$			$\alpha=1/3$	$\alpha=1$	$\alpha=3$		
[0,0-0,1]	0,360	0,300	0,260	-10,00%	0,361	0,302	0,261	-10,04%	0,633	0,518	0,380	-25,31%			
[0,1-0,2]	0,360	0,300	0,260	-10,00%	0,360	0,300	0,260	-10,00%	0,449	0,382	0,313	-13,58%			
[0,2-0,3]	0,360	0,300	0,260	-10,00%	0,360	0,300	0,260	-10,01%	0,410	0,348	0,297	-11,33%			
[0,3-0,4]	0,360	0,300	0,260	-10,00%	0,361	0,301	0,260	-10,02%	0,416	0,345	0,296	-11,91%			
[0,4-0,5]	0,360	0,300	0,260	-10,00%	0,361	0,301	0,261	-10,05%	0,444	0,357	0,306	-13,82%			
[0,5-0,6]	0,360	0,300	0,260	-10,00%	0,362	0,302	0,261	-10,11%	0,496	0,383	0,327	-16,98%			
[0,6-0,7]	0,360	0,300	0,260	-10,00%	0,365	0,304	0,263	-10,22%	0,577	0,426	0,366	-21,08%			
[0,7-0,8]	0,360	0,301	0,260	-10,01%	0,371	0,310	0,266	-10,50%	0,660	0,508	0,486	-17,46%			
[0,8-0,9]	0,362	0,302	0,261	-10,11%	0,399	0,328	0,281	-11,79%	0,447	0,380	0,390	-5,77%			
[0,9-1,0]	0,665	0,507	0,454	-21,13%	0,670	0,522	0,511	-15,89%	0,043	0,120	0,122	7,89%			
1	-0,389	-0,034	0,046	43,51%	-0,389	-0,034	0,046	43,50%	-0,436	-0,063	0,042	47,86%			

b) Pour $\theta=30^\circ$:

Tableau 3-11: Variation de la contrainte de cisaillement dans un stratifié $[30_m/90_n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « α ».

x/l	τ_{xy}/σ_c				Écart $\tau_{\alpha=3}-\tau_{\alpha=1/3}$	τ_{xy}/σ_c				écart $\tau_{\alpha=3}-\tau_{\alpha=1/3}$	τ_{xy}/σ_c				Écart $\tau_{\alpha=3}-\tau_{\alpha=1/3}$
	$\theta=30^\circ$			a=25		$\theta=30^\circ$			a=10		$\theta=30^\circ$			a=2,5	
	$\alpha=1/3$	$\alpha=1$	$\alpha=3$			$\alpha=1/3$	$\alpha=1$	$\alpha=3$			$\alpha=1/3$	$\alpha=1$	$\alpha=3$		
[0,0-0,1]	0,347	0,282	0,247	-9,94%	0,347	0,282	0,247	-9,94%	0,508	0,312	0,224	-28,37%			
[0,1-0,2]	0,360	0,300	0,260	-10,00%	0,361	0,302	0,261	-9,96%	0,411	0,319	0,262	-14,88%			
[0,2-0,3]	0,360	0,300	0,260	-10,00%	0,360	0,300	0,260	-9,97%	0,418	0,338	0,282	-13,60%			
[0,3-0,4]	0,360	0,300	0,260	-10,00%	0,360	0,300	0,260	-10,01%	0,439	0,362	0,299	-14,02%			
[0,4-0,5]	0,360	0,300	0,260	-10,00%	0,360	0,300	0,260	-10,01%	0,467	0,388	0,318	-14,93%			
[0,5-0,6]	0,360	0,300	0,260	-10,00%	0,360	0,300	0,259	-10,06%	0,505	0,412	0,350	-15,43%			
[0,6-0,7]	0,360	0,300	0,260	-10,00%	0,360	0,299	0,258	-10,25%	0,557	0,443	0,414	-14,27%			
[0,7-0,8]	0,360	0,300	0,260	-10,00%	0,367	0,301	0,259	-10,83%	0,664	0,526	0,485	-17,82%			
[0,8-0,9]	0,360	0,300	0,259	-10,06%	0,414	0,335	0,283	-13,14%	0,498	0,407	0,398	-9,96%			
[0,9-1,0]	0,638	0,500	0,459	-17,94%	0,657	0,520	0,483	-17,43%	0,044	0,120	0,120	7,59%			
1	-0,385	0,004	0,075	45,98%	-0,385	0,004	0,075	46,00%	-0,387	0,003	0,074	46,15%			

c) Pour $\theta=45^\circ$:

Tableau 3-12: Variation de la contrainte de cisaillement dans un stratifié $[45_m/90_n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « α ».

x/l	τ_{xy}/σ_c				Écart $\tau_{\alpha=3}-\tau_{\alpha=1/3}$	τ_{xy}/σ_c				Écart $\tau_{\alpha=3}-\tau_{\alpha=1/3}$	τ_{xy}/σ_c				Écart $\tau_{\alpha=3}-\tau_{\alpha=1/3}$
	$\theta=45^\circ$			a=25		$\theta=45^\circ$			a=10		$\theta=45^\circ$			a=2,5	
	$\alpha=1/3$	$\alpha=1$	$\alpha=3$			$\alpha=1/3$	$\alpha=1$	$\alpha=3$			$\alpha=1/3$	$\alpha=1$	$\alpha=3$		
[0,0-0,1]	0,345	0,283	0,249	-9,59%	0,345	0,283	0,249	-9,59%	0,419	0,273	0,195	-22,41%			
[0,1-0,2]	0,360	0,300	0,260	-10,01%	0,361	0,301	0,261	-9,96%	0,392	0,303	0,247	-14,52%			
[0,2-0,3]	0,360	0,300	0,260	-10,00%	0,360	0,300	0,260	-9,98%	0,408	0,321	0,266	-14,17%			
[0,3-0,4]	0,360	0,300	0,260	-10,00%	0,360	0,300	0,260	-10,01%	0,442	0,345	0,286	-15,66%			
[0,4-0,5]	0,360	0,300	0,260	-10,00%	0,360	0,300	0,260	-10,00%	0,495	0,388	0,314	-18,08%			
[0,5-0,6]	0,360	0,300	0,260	-10,00%	0,360	0,300	0,260	-10,01%	0,550	0,460	0,357	-19,25%			
[0,6-0,7]	0,360	0,300	0,260	-10,00%	0,360	0,300	0,259	-10,11%	0,595	0,510	0,443	-15,20%			
[0,7-0,8]	0,360	0,300	0,260	-10,00%	0,363	0,299	0,256	-10,70%	0,672	0,546	0,571	-10,14%			
[0,8-0,9]	0,360	0,300	0,260	-10,01%	0,403	0,317	0,266	-13,71%	0,493	0,388	0,375	-11,81%			
[0,9-1,0]	0,654	0,538	0,570	-8,36%	0,668	0,545	0,565	-10,31%	0,024	0,102	0,113	8,87%			
1	-0,398	0,007	0,086	48,39%	-0,398	0,007	0,086	48,41%	-0,399	0,007	0,086	48,50%			

d) Interprétation :

La variation des contraintes de cisaillement d'un stratifié fissuré par des fissures transverses, longitudinales et délaminage soumis à une sollicitation bi axiale est représentée dans les tableaux (3-10 à 3-12) en fonction des coordonnées longitudinales et cela pour divers rapports d'épaisseur des couches « $\alpha=1/3 ; 1 ; 3$ », différents rapports géométriques « $a=25 ; 10 ; 2,5$ » et différents angles d'orientation des couches extérieures « $\theta = 0^\circ ; 30^\circ$ et 45° ».

Dans un stratifié croisé de type $[0_m/90_n]_s$, la contrainte de cisaillement reste constante dans les trois cas des rapports d'épaisseur « α » lorsqu'on est loin de la fissure. Cependant, en s'approchant du plan de fissure, la contrainte de cisaillement (τ_{xy}) augmente considérablement pour atteindre un maximum proche du plan de fissure et cette valeur maximale dépend du rapport d'épaisseur « α ». Après avoir atteint ce pic, la contrainte de cisaillement commence à diminuer progressivement. À mi-distance entre deux fissures transverses, la contrainte de cisaillement dans un stratifié avec plus de couches à 90° « $\alpha=1/3$ » est environ 10% plus élevée que dans un stratifié avec plus de couches à 0° (tableau 3-10). Cet écart augmente remarquablement, atteignant environ 20% lorsque les contraintes atteignent leur pic près du plan de fissure. On observe que plus la densité de fissuration est élevée (les deux fissures transverses sont rapprochées), plus l'écart varie de manière notable, ce qui signifie une influence plus importante du rapport d'épaisseur. De plus, on constate une réduction importante de la contrainte de cisaillement au niveau du plan de fissure lorsque le rapport d'épaisseur diminue (plus de couches à 90° que de couches à 0°).

Pour un stratifié comportant des couches à $\theta=45^\circ$, on peut voir qu'avec une faible densité de fissuration, le pic de contrainte augmente de manière notable lorsque le rapport d'épaisseur est élevé « $\alpha=3$ ». Ainsi, l'écart diminue atteignant environ 8% (tableau 3-12). Par conséquent, l'influence de l'orientation des couches est plus importante dans un stratifié avec une proportion plus élevée de couches à $\theta \ll \alpha=3$ ».

L'analyse de la distribution des contraintes de cisaillement τ_{xy} montre que des rapports d'épaisseur plus faibles entraînent des contraintes de cisaillement plus élevées. Ces contraintes de cisaillement élevées favorisent ensuite l'amorçage et la propagation du délaminage dans le stratifié.

3.5.2.2 Influence des différents angles d'orientation « θ » et différents rapports géométriques « a » sur le comportement d'un stratifié $[\theta_m/90_n]$ fissuré avec fissures intralaminaires et délaminage :

a) Pour $\alpha=1/3$:

Tableau 3-13: Variation de la contrainte de cisaillement dans un stratifié $[\theta_m/90_n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « θ ».

x/l	τ_{xy}/σ_c			Écart $\tau_{\theta=45^\circ}-\tau_{\theta=0^\circ}$	τ_{xy}/σ_c			Écart $\tau_{\theta=45^\circ}-\tau_{\theta=0^\circ}$	τ_{xy}/σ_c			Écart $\tau_{\theta=45^\circ}-\tau_{\theta=0^\circ}$
	$\alpha=1/3$		$a=25$		$\alpha=1/3$		$a=10$		$\alpha=1/3$		$a=2,5$	
	$\theta=0^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=45^\circ$		$\theta=0^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=45^\circ$		$\theta=0^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=45^\circ$	
[0,0-0,1]	0,360	0,347	0,345	-1,50%	0,361	0,347	0,345	-1,64%	0,633	0,508	0,419	-21,42%
[0,1-0,2]	0,360	0,360	0,360	-0,02%	0,360	0,361	0,361	0,06%	0,449	0,411	0,392	-5,74%
[0,2-0,3]	0,360	0,360	0,360	0,00%	0,360	0,360	0,360	-0,07%	0,410	0,418	0,408	-0,24%
[0,3-0,4]	0,360	0,360	0,360	0,00%	0,361	0,360	0,360	-0,07%	0,416	0,439	0,442	2,67%
[0,4-0,5]	0,360	0,360	0,360	0,00%	0,361	0,360	0,360	-0,12%	0,444	0,467	0,495	5,04%
[0,5-0,6]	0,360	0,360	0,360	0,00%	0,362	0,360	0,360	-0,24%	0,496	0,505	0,550	5,36%
[0,6-0,7]	0,360	0,360	0,360	-0,01%	0,365	0,360	0,360	-0,47%	0,577	0,557	0,595	1,79%
[0,7-0,8]	0,360	0,360	0,360	-0,04%	0,371	0,367	0,363	-0,86%	0,660	0,664	0,672	1,20%
[0,8-0,9]	0,362	0,360	0,360	-0,23%	0,399	0,414	0,403	0,42%	0,447	0,498	0,493	4,54%
[0,9-1,0]	0,665	0,638	0,654	-1,16%	0,670	0,657	0,668	-0,21%	0,043	0,044	0,024	-1,82%
1	-0,389	-0,385	-0,398	-0,89%	-0,389	-0,385	-0,398	-0,91%	-0,436	-0,387	-0,399	3,76%

b) Pour $\alpha=1$:

Tableau 3-14: Variation de la contrainte de cisaillement dans un stratifié $[\theta_m/90_n]_s$ endommagé par fissuration transversale, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « θ ».

x/l	τ_{xy}/σ_c				Écart $\tau_{\theta=45^\circ}-\tau_{\theta=0^\circ}$	τ_{xy}/σ_c				Écart $\tau_{\theta=45^\circ}-\tau_{\theta=0^\circ}$	τ_{xy}/σ_c				Écart $\tau_{\theta=45^\circ}-\tau_{\theta=0^\circ}$
	$\alpha=1$		$a=25$			$\alpha=1$		$a=10$			$\alpha=1$		$a=2,5$		
	$\theta=0^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=45^\circ$	$\theta=0^\circ$		$\theta=30^\circ$	$\theta=45^\circ$	$\theta=0^\circ$	$\theta=30^\circ$		$\theta=45^\circ$	$\theta=0^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=45^\circ$	
[0,0-0,1]	0,300	0,282	0,283	-1,71%	0,302	0,282	0,283	-1,91%	0,518	0,312	0,273	-24,51%			
[0,1-0,2]	0,300	0,300	0,300	-0,03%	0,300	0,302	0,301	0,12%	0,382	0,319	0,303	-7,86%			
[0,2-0,3]	0,300	0,300	0,300	0,00%	0,300	0,300	0,300	-0,08%	0,348	0,338	0,321	-2,66%			
[0,3-0,4]	0,300	0,300	0,300	0,00%	0,301	0,300	0,300	-0,09%	0,345	0,362	0,345	0,05%			
[0,4-0,5]	0,300	0,300	0,300	0,00%	0,301	0,300	0,300	-0,13%	0,357	0,388	0,388	3,16%			
[0,5-0,6]	0,300	0,300	0,300	0,00%	0,302	0,300	0,300	-0,23%	0,383	0,412	0,460	7,69%			
[0,6-0,7]	0,300	0,300	0,300	-0,01%	0,304	0,299	0,300	-0,49%	0,426	0,443	0,510	8,43%			
[0,7-0,8]	0,301	0,300	0,300	-0,05%	0,310	0,301	0,299	-1,09%	0,508	0,526	0,546	3,79%			
[0,8-0,9]	0,302	0,300	0,300	-0,23%	0,328	0,335	0,317	-1,10%	0,380	0,407	0,388	0,79%			
[0,9-1,0]	0,507	0,500	0,538	3,10%	0,522	0,520	0,545	2,28%	0,120	0,120	0,102	-1,80%			
1	-0,034	0,004	0,007	4,16%	-0,034	0,004	0,007	4,16%	-0,063	0,003	0,007	7,06%			

c) Pour $\alpha=3$:

Tableau 3-15: Variation de la contrainte de cisaillement dans un stratifié $[\theta_m/90_n]_s$ endommagé par fissuration transversale, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « θ ».

x/l	τ_{xy}/σ_c				Écart $\tau_{\theta=45^\circ}-\tau_{\theta=0^\circ}$	τ_{xy}/σ_c				Écart $\tau_{\theta=45^\circ}-\tau_{\theta=0^\circ}$	τ_{xy}/σ_c				Écart $\tau_{\theta=45^\circ}-\tau_{\theta=0^\circ}$
	$\alpha=3$		$a=25$			$\alpha=3$		$a=10$			$\alpha=3$		$a=2,5$		
	$\theta=0^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=45^\circ$	$\theta=0^\circ$		$\theta=30^\circ$	$\theta=45^\circ$	$\theta=0^\circ$	$\theta=30^\circ$		$\theta=45^\circ$	$\theta=0^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=45^\circ$	
[0,0-0,1]	0,260	0,247	0,249	-1,09%	0,261	0,247	0,249	-1,19%	0,380	0,224	0,195	-18,51%			
[0,1-0,2]	0,260	0,260	0,260	-0,02%	0,260	0,261	0,261	0,10%	0,313	0,262	0,247	-6,68%			
[0,2-0,3]	0,260	0,260	0,260	0,00%	0,260	0,260	0,260	-0,04%	0,297	0,282	0,266	-3,08%			
[0,3-0,4]	0,260	0,260	0,260	0,00%	0,260	0,260	0,260	-0,05%	0,296	0,299	0,286	-1,08%			
[0,4-0,5]	0,260	0,260	0,260	0,00%	0,261	0,260	0,260	-0,07%	0,306	0,318	0,314	0,78%			
[0,5-0,6]	0,260	0,260	0,260	0,00%	0,261	0,259	0,260	-0,14%	0,327	0,350	0,357	3,08%			
[0,6-0,7]	0,260	0,260	0,260	-0,01%	0,263	0,258	0,259	-0,36%	0,366	0,414	0,529	16,32%			
[0,7-0,8]	0,260	0,260	0,260	-0,03%	0,266	0,259	0,256	-1,06%	0,488	0,485	0,573	8,43%			
[0,8-0,9]	0,261	0,259	0,260	-0,14%	0,281	0,283	0,266	-1,50%	0,390	0,398	0,375	-1,50%			
[0,9-1,0]	0,454	0,459	0,570	11,6%	0,511	0,483	0,565	5,36%	0,122	0,120	0,113	-0,84%			
1	0,046	0,075	0,086	3,99%	0,046	0,075	0,086	3,99%	0,042	0,074	0,086	4,40%			

d) Interprétation :

Les tableaux (3-13 à 3-15) illustrent la variation des contraintes de cisaillement dans un stratifié fissuré par fissure transversale, longitudinale et délaminage, soumis à une sollicitation biaxiale, en fonction des coordonnées longitudinales, pour différents angles d'orientation des couches « $\theta = 0^\circ ; 30^\circ ; 45^\circ$ », rapports d'épaisseur « $\alpha = 1/3 ; 1 ; 3$ » et rapports géométriques « $a=25 ; 10 ; 2,5$ ».

Loin de la zone de fissure dans un stratifié ayant plusieurs couches à 90° [$\theta/90_3$]_s, on remarque une contrainte uniforme et constante pour toutes les valeurs de l'angle « θ ». La contrainte τ_{xy} s'accroît de manière remarquable à proximité du plan de fissure, atteignant un maximum proche du plan de fissure. La valeur maximale de cette contrainte dépend de l'angle d'orientation des couches « θ ». Une fois ce pic atteint, la contrainte de cisaillement commence à décroître progressivement. Pour une faible densité de fissuration « $a=25 ;10$ », la contrainte de cisaillement est presque similaire pour tous les angles d'orientation « θ » avec des écarts de contrainte très faibles (tableau 3-13). Cela indique que, dans le cas d'un faible rapport d'épaisseur et d'un rapport géométrique élevé (faible densité de fissuration), l'angle d'orientation a peu d'influence sur la contrainte de cisaillement. En revanche, pour un faible rapport géométrique (densité de fissuration élevée), la contrainte dans un stratifié avec des couches orientées à des angles élevés « $\theta=45^\circ$ » est plus importante que dans celui avec des couches orientées à des angles faibles « $\theta=0^\circ$ », avec un écart d'environ 5%. Cela indique donc que l'influence de l'angle d'orientation des couches extérieures augmente avec la densité de fissures transverses.

Dans le cas d'un stratifié avec un rapport d'épaisseur $\alpha=1$ (où le nombre de couches à 90° est égal au nombre de couches à θ) et une faible densité de fissuration, on constate une augmentation de l'écart de contrainte près du plan de fissure. Plus précisément, dans un stratifié avec des couches orientées à 45° , le pic de contrainte de cisaillement est supérieur de 3% à celui d'un stratifié avec des couches à 0° (tableau 3-14). Cette différence devient plus marquée avec une densité de fissures élevée, où l'écart de contrainte le long du stratifié augmente d'environ 8%. Ces observations montrent que l'influence de l'angle d'orientation des couches devient plus significative avec l'augmentation du rapport d'épaisseur des couches.

On peut voir le même comportement pour un stratifié ayant un nombre de couches « θ » plus élevée (un rapport d'épaisseur important $\alpha=3$) [$\theta_3/90$]_s. Les écarts de contraintes sont plus importants, atteignant environ 11% pour une faible densité de fissures et 16% pour une densité de fissures élevée (tableau 3-15). L'influence de l'orientation des couches devient de plus en plus notable à mesure que le rapport d'épaisseur des couches augmente.

L'influence de l'orientation des fibres sur la résistance à la traction du stratifié est cruciale. En effet, plus l'angle entre les fibres et la direction de la force appliquée est important, plus la résistance à la traction diminue. Cette désorientation des fibres rend le stratifié plus fragile et facilite l'apparition de fissures. Ce phénomène est d'autant plus important pour les

stratifiés avec un rapport d'épaisseur élevé (Il y a plus de couches à θ qu'à 90°), où l'orientation des fibres joue un rôle encore plus déterminant dans leur comportement mécanique.

3.6 Conclusion :

Un modèle numérique du stratifié $[0/90_2]_s$ a été créé sous logiciel Abaqus pour simuler le comportement des contraintes pour un composite sous traction uni-axiale, en tenant compte des fissures transverses et du délaminage. La comparaison avec le modèle de Berthelot et Sadoudi a permis de valider notre approche, grâce à l'obtention de résultats concordants.

Suite à la validation du modèle, une série d'études a été effectuée pour analyser l'influence de différents paramètres sur le comportement des stratifiés $[\theta_m/90_n]_s$. Ces paramètres comprennent l'angle d'orientation des couches « θ », le rapport d'épaisseur « α » et la densité de fissuration « a ».

Les études ci-dessus ont contribué à approfondir la compréhension des impacts des fissures multiples dans différentes configurations, ainsi que l'influence de l'orientation des couches à θ sur les comportements mécaniques des stratifiés

La présence de fissurations intralaminaires et interlaminaire affecte le comportement des stratifiés composites, qui sont exposés à des conditions réelles telles que la température et l'humidité. Nous allons explorer dans le chapitre 4 comment ces conditions hygrothermiques peuvent influencer les comportements des stratifiés composites de type $[\theta_m/90_n]_s$.

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 :

L'objectif de cette section est d'évaluer l'impact du vieillissement hygrothermique, c'est-à-dire l'effet conjoint de la température et de l'humidité, sur les propriétés mécaniques des matériaux composites à matrice organique.

La deuxième partie de ce chapitre se concentre sur la simulation par éléments finis (EF) d'un stratifié fissuré présentant des fissures intralaminaires et interlaminaires. Ce stratifié sera soumis à une contrainte de traction bi-axiale sous diverses conditions hygrothermiques.

L'analyse du vieillissement hygrothermique s'appuiera sur une approche de simulation numérique. Le modèle de Tsai sera utilisé pour introduire l'effet du vieillissement et son évolution sur les propriétés mécaniques de ces matériaux. Ce modèle prend en compte l'influence conjointe de la température et de l'humidité à l'échelle fibre et matrice. L'étude sera effectuée par des modifications simultanées des paramètres de température et d'humidité afin d'évaluer la distribution des contraintes dans un stratifié fissuré avec fissuration transverse, longitudinale et délaminage.

4.2 Caractérisation du matériau :

Un matériau est principalement caractérisé par ses modules mécaniques, qui peuvent être déterminés par des essais expérimentaux. Par exemple, plusieurs essais de traction sont nécessaires pour déterminer les différents modules d'élasticité d'un pli élémentaire d'un composite à fibres continues. Le module de Young, ou module d'élasticité longitudinal, ainsi que le coefficient de Poisson sont mesurés par un essai de traction monotone sur un unidirectionnel avec un empilement à 0°. Le module d'élasticité transversal est déterminé par un essai de traction monotone sur un unidirectionnel avec un empilement à 90°. Enfin, le module de cisaillement est évalué par un essai de traction monotone sur un unidirectionnel avec un empilement à 45°. Il est nécessaire de choisir les modèles appropriés pour les différents modules afin de caractériser notre matériau. Le module de Young transversal et le coefficient de Poisson sont déterminés en utilisant le modèle de la loi des mélanges modifiée par Hahn,

décrit en référence [37], modèle également adopté dans les travaux de Sereir et al. [38]. Voici 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 approximativement décrit par la relation :

$$E_x = E_m V_m + E_f V_f \quad (4.1)$$

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

En pratique, ce module est fortement influencé par le module longitudinal de la fibre.

4.2.2 Le module de Young transversal :

Le module de Young transversal du composite graphite époxy T300/5208 est estimé par la relation micromécanique modifiée de Hahn [37] :

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

4.2.3 Le module de cisaillement longitudinal :

De même le module de cisaillement longitudinal du composite graphite époxyde T300/5208 est estimé par la relation micromécanique modifiée de Hahn [37] :

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

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

4.2.4 Le coefficient de Poisson :

Il décrit le rétrécissement dans la direction transversale (Y) du pli lorsqu'une force de traction est appliquée dans la direction longitudinale (X) :

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

Les valeurs des modules obtenus par ces modèles s'accordent remarquablement bien avec celles présentées par Tsai [40] (Tableau 4-3).

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

L'objectif de ce qui suit est de quantifier le vieillissement du matériau et d'en observer les effets sur ses propriétés mécaniques. Ce modèle s'inspire de celui de Tsai [40] et intègre l'effet de l'humidité sur la température de transition vitreuse, ainsi que l'influence de la température et de l'humidité sur les propriétés élémentaires des fibres et de la matrice. Sa particularité réside dans la prise en compte du vieillissement des fibres, souvent négligé dans d'autres études en comparaison de la dégradation de la matrice et de l'interface.

4.2.6 Evolution de Tg au cours du vieillissement :

Selon Tsai [40], la température de transition vitreuse diminue d'une valeur fixe (g.C) suite à l'absorption d'humidité :

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

4.2.7 Température adimensionnelle :

La notion de température adimensionnelle T^* , proposée par Tsai [40], est un outil essentiel pour analyser l'évolution des caractéristiques du composite :

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

T_{opr} , est la température d'utilisation, tandis que T_{rm} est la température de référence.

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

Tsai [40] établit une relation entre la température adimensionnelle T^* et les propriétés de la matrice en carbone époxyde T300/5208. Cette relation permet de déterminer empiriquement les expressions des propriétés de la matrice en fonction de la température et de l'humidité avant et après le vieillissement.

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

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

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

a : étant une constante semi empirique [référence], donnée dans le tableau 4-1-2.

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.

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

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

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

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

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

4.3 Choix du matériau :

Le matériau choisi pour les études à venir est le composite graphite-époxy T300/5208, caractérisé par les propriétés élastiques suivantes :

$$E_f=259 \text{ GPa}, G_f=19.69 \text{ GPa}, \nu_f=0.25, \nu_m=0.35 \text{ et } E_m=3.4 \text{ GPa}, C_0=0\%, T_0=22^\circ\text{C}.$$

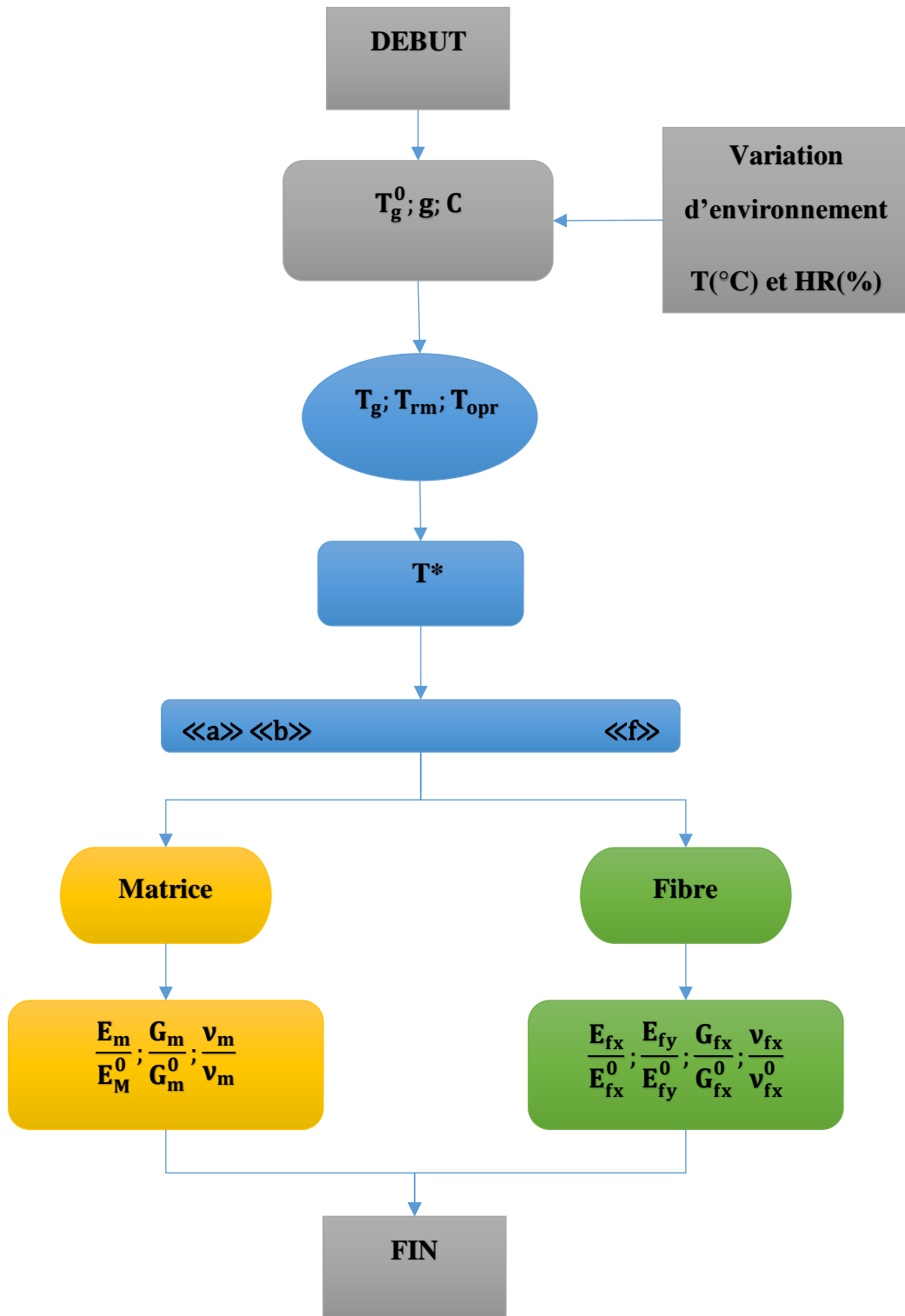


Figure 4-1: Organigramme du calcul des propriétés vieillis.

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 : Caractérisation de variation de température et d'humidité [40].

$T_g^0(^{\circ}C)$	$T_{rm} (^{\circ}C)$	$g(^{\circ}C/c)$	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 $T_{rm}=22^{\circ}C$ 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 mélanges 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	$2.27 \cdot 10^{-8}$	1.5

4.4 Conditions de simulation :

4.4.1 Effets des conditions hygrothermiques :

Les différentes propriétés du matériau T300/5208 sont calculées en faisant varier simultanément la température T(°C) et l'humidité HR (%).

Tableau 4-5: Propriétés élastiques du matériau T300/5208 en fonction des différentes conditions hygrothermiques [25].

Propriétés	$E_x(Gpa)$	$E_y(Gpa)$	$G_x(Gpa)$	$G_y(Gpa)$	ν_x	ν_y
Environnement						
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 :

- Une charge de traction est appliquée au stratifié par des déplacements longitudinaux le long de l'axe OX et des déplacements transversaux le long de l'axe OZ, comme illustré à la figure 4-3.
- En raison des conditions de symétrie, les déplacements transversaux du quart du stratifié sont éliminés, comme suit :
 - Le déplacement longitudinal le long de l'axe OX est nul : $u=0$
 - Le déplacement transversal le long de l'axe OZ est nul : $v=0$
- Le frottement entre le pli 0 et le pli 90 est introduit en imposant une contrainte transversale sur chaque élément de la zone délaminée, comme illustré à la figure 4-3.
- Les fissures transversales et longitudinale sont considérées comme des bords libres, comme illustré à la figure 4-3.
- Les fissures transversales et longitudinales sont modélisées sous forme d'éléments plans rectangulaires, comme illustré à la figure 4-3.

4.5.2 Modèle aux éléments finis :

Ce chapitre décrit la modélisation d'un stratifié $[0/90_3]_s$, où chaque couche a une épaisseur de 0,125 mm et présente des fissures longitudinales, transversales et de délaminage. Le stratifié est fabriqué en matériau T300/5208 (voir figure 4-2).

		Ply Name	Region	Material	Thickness	CSYS	Rotation Angle	Integration Points
1	✓	Ply-1	(Picked)	T300_5208	0.125	<Layup>	90	3
2	✓	Ply-2	(Picked)	T300_5208	0.125	<Layup>	90	3
3	✓	Ply-3	(Picked)	T300_5208	0.125	<Layup>	90	3
4	✓	Ply-4	(Picked)	T300_5208	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 OZ.
- Un chargement suivant l'axe OZ est appliquée au niveau du délaminage.

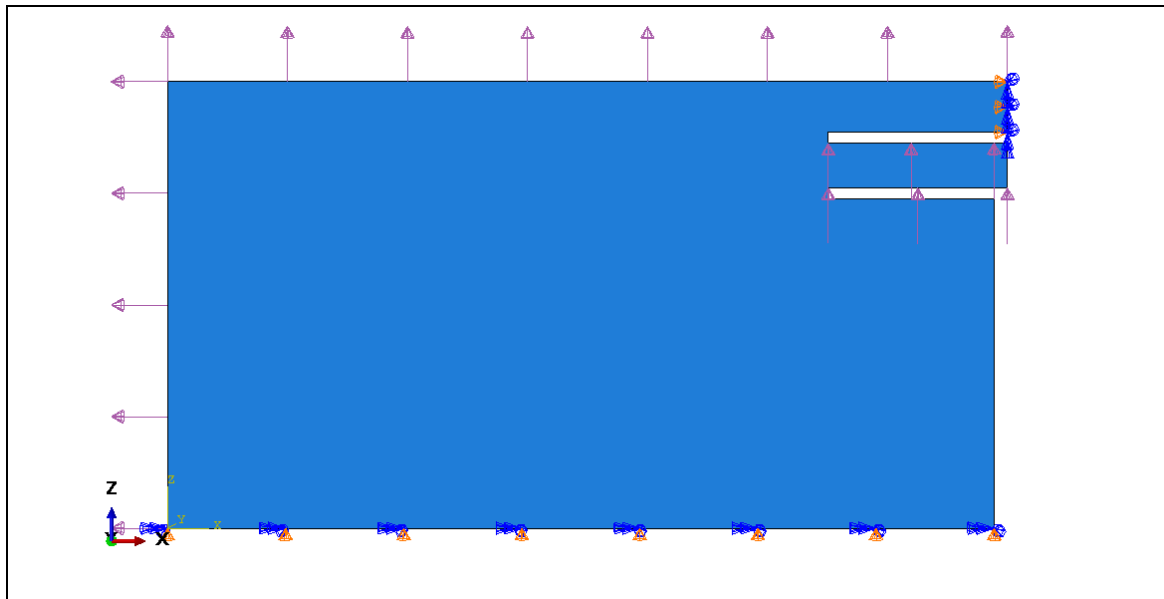
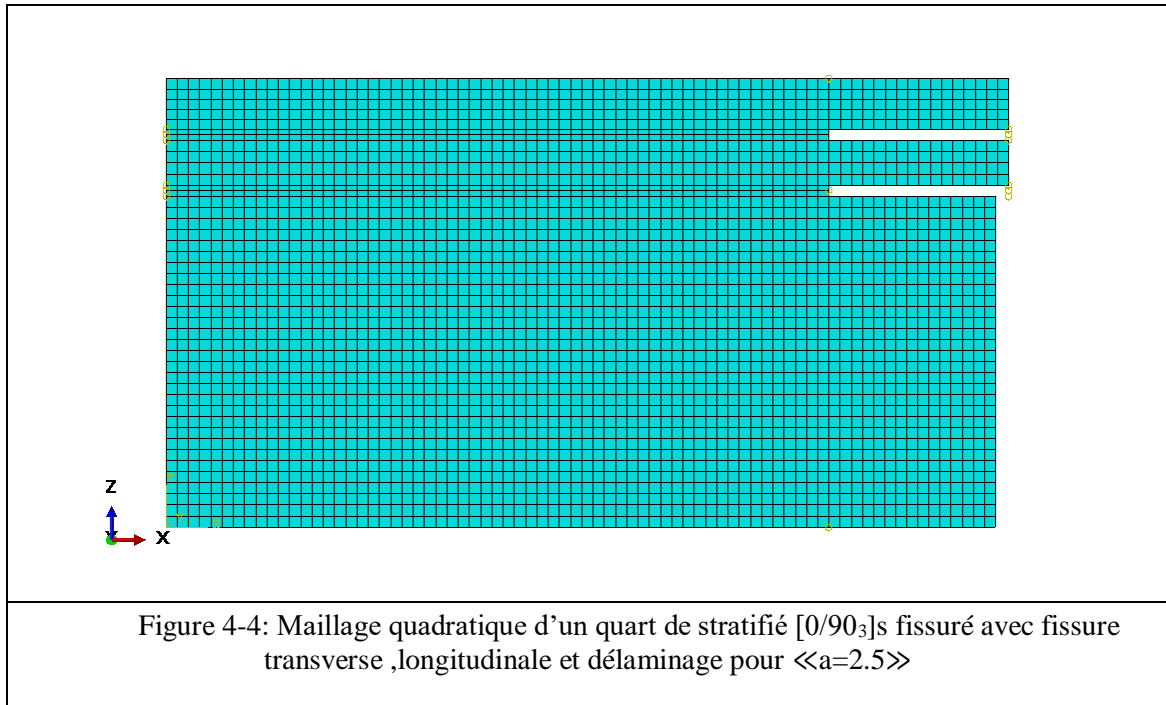


Figure 4-3: Modélisation des contraintes appliquées au stratifié de type $[0/90_3]_s$

- Un maillage structuré quadratique de taille 0,01 a été utilisé pour notre modèle.



4.6 Etude de l'évolution de la contrainte longitudinale dans un stratifié $[\theta_m/90_n]_s$ fragilisé par des fissures sous des conditions hygrothermiques variables et des sollicitations mécaniques :

Comment la température et l'humidité influencent-elles la contrainte longitudinale dans les stratifiés $[\theta_m/90_n]_s$ fissurés avec fissures intralaminaires et interlaminaire? Cette question sera étudiée pour deux angles d'orientation des couches ($\theta^\circ=0^\circ ; 30^\circ$), deux rapports d'épaisseurs de couche ($\alpha=1/3 ; 3$) et deux rapports géométriques de fissuration ($a=25 ; 2,5$).

a) Pour $\theta=0^\circ$:

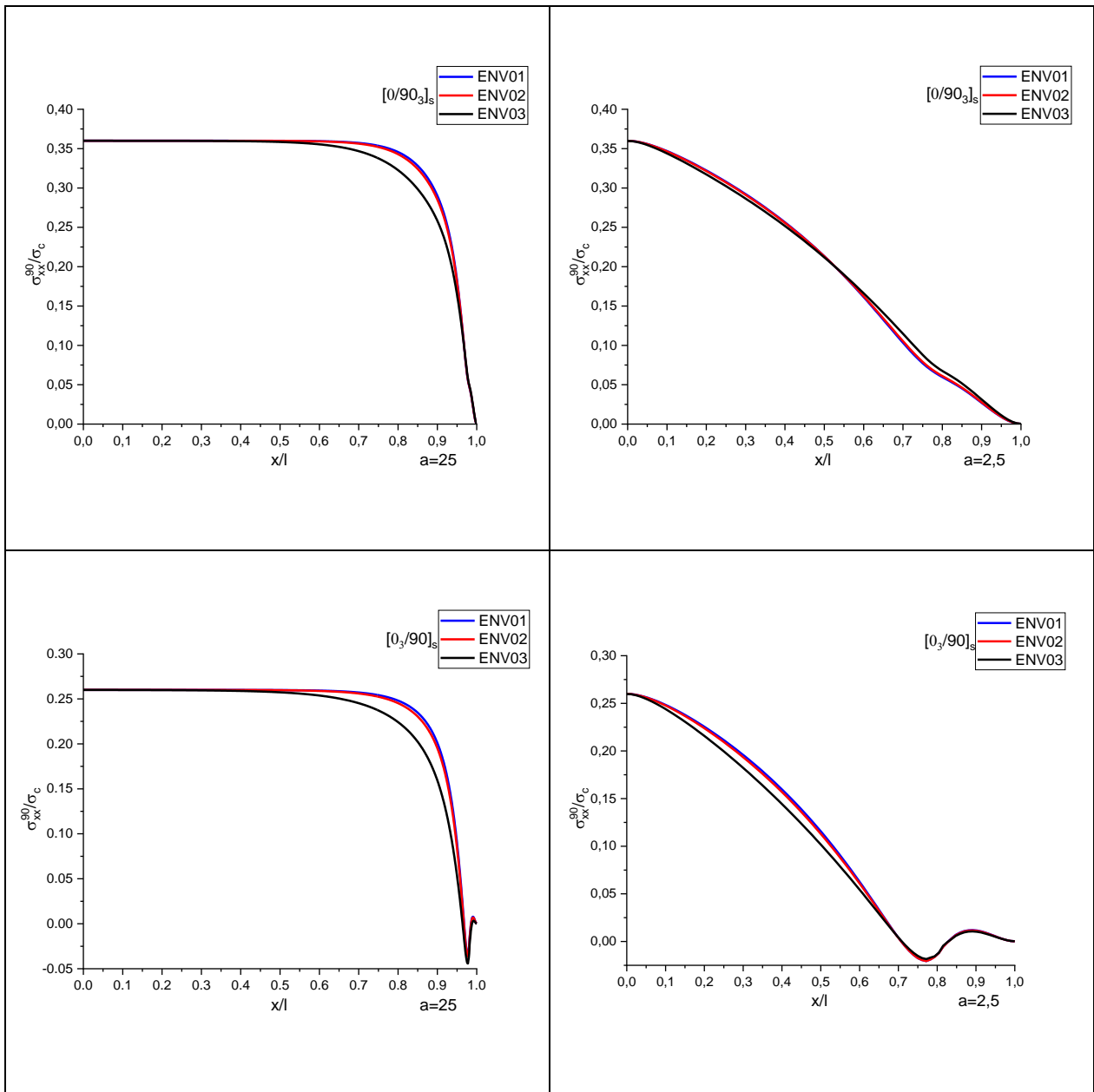


Figure 4-5: Variation de la contrainte longitudinale dans un stratifié $[0_m/90_n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « α » et différents environnements hygrothermiques.

Tableau 4-6: Variation de la contrainte longitudinale σ_{xx} en fonction de a , α et des conditions hydrothermiques dans un stratifié $[0/90_3]_s$ fissuré.

x/l	θ	α	σ_{xx}/σ_c			Écart	σ_{xx}/σ_c			Écart
			a=25				a=2,5			
			ENV01	ENV02	ENV03	$\sigma_{ENV03}-\sigma_{ENV01}$	ENV01	ENV02	ENV03	$\sigma_{ENV03}-\sigma_{ENV01}$
[0,0-0,1]	0°	1/3	0,360	0,360	0,360	0,00%	0,360	0,360	0,360	0,00%
[0,1-0,2]	0°	1/3	0,360	0,360	0,360	0,00%	0,345	0,345	0,342	-0,32%
[0,2-0,3]	0°	1/3	0,360	0,360	0,360	-0,01%	0,321	0,320	0,315	-0,52%
[0,3-0,4]	0°	1/3	0,360	0,360	0,360	-0,02%	0,291	0,290	0,285	-0,57%
[0,4-0,5]	0°	1/3	0,360	0,360	0,359	-0,05%	0,255	0,255	0,251	-0,47%
[0,5-0,6]	0°	1/3	0,360	0,360	0,358	-0,14%	0,213	0,213	0,212	-0,14%
[0,6-0,7]	0°	1/3	0,359	0,359	0,355	-0,40%	0,157	0,158	0,162	0,55%
[0,7-0,8]	0°	1/3	0,357	0,356	0,347	-1,05%	0,100	0,102	0,111	1,16%
[0,8-0,9]	0°	1/3	0,346	0,343	0,323	-2,30%	0,059	0,060	0,066	0,78%
[0,9-1,0]	0°	1/3	0,289	0,284	0,258	-3,18%	0,026	0,027	0,030	0,42%
1	0°	1/3	0,000	0,000	0,000	0,01%	0,000	0,000	0,000	0,01%

Tableau 4-7: Variation de la contrainte longitudinale σ_{xx} en fonction de a , α et des conditions hydrothermiques dans un stratifié $[0_3/90]_s$ fissuré.

x/l	θ	α	σ_{xx}/σ_c			Écart	σ_{xx}/σ_c			Écart
			a=25				a=2,5			
			ENV01	ENV02	ENV03	$\sigma_{ENV03}-\sigma_{ENV01}$	ENV01	ENV02	ENV03	$\sigma_{ENV03}-\sigma_{ENV01}$
[0,0-0,1]	0°	3	0,260	0,260	0,260	0,00%	0,260	0,260	0,260	-0,01%
[0,1-0,2]	0°	3	0,260	0,260	0,260	-0,01%	0,247	0,246	0,242	-0,49%
[0,2-0,3]	0°	3	0,260	0,260	0,260	-0,02%	0,224	0,222	0,214	-1,00%
[0,3-0,4]	0°	3	0,260	0,260	0,260	-0,05%	0,194	0,192	0,181	-1,37%
[0,4-0,5]	0°	3	0,260	0,260	0,259	-0,11%	0,159	0,156	0,143	-1,53%
[0,5-0,6]	0°	3	0,260	0,260	0,257	-0,25%	0,116	0,113	0,102	-1,39%
[0,6-0,7]	0°	3	0,259	0,259	0,254	-0,55%	0,058	0,056	0,050	-0,76%
[0,7-0,8]	0°	3	0,257	0,256	0,245	-1,19%	0,000	0,000	0,001	0,06%
[0,8-0,9]	0°	3	0,248	0,245	0,224	-2,39%	-0,012	-0,012	-0,012	0,02%
[0,9-1,0]	0°	3	0,200	0,194	0,158	-4,18%	0,012	0,011	0,010	-0,13%
1	0°	3	0,000	0,000	0,000	0,00%	0,000	0,000	0,000	0,00%

b) Pour $\theta = 30^\circ$:

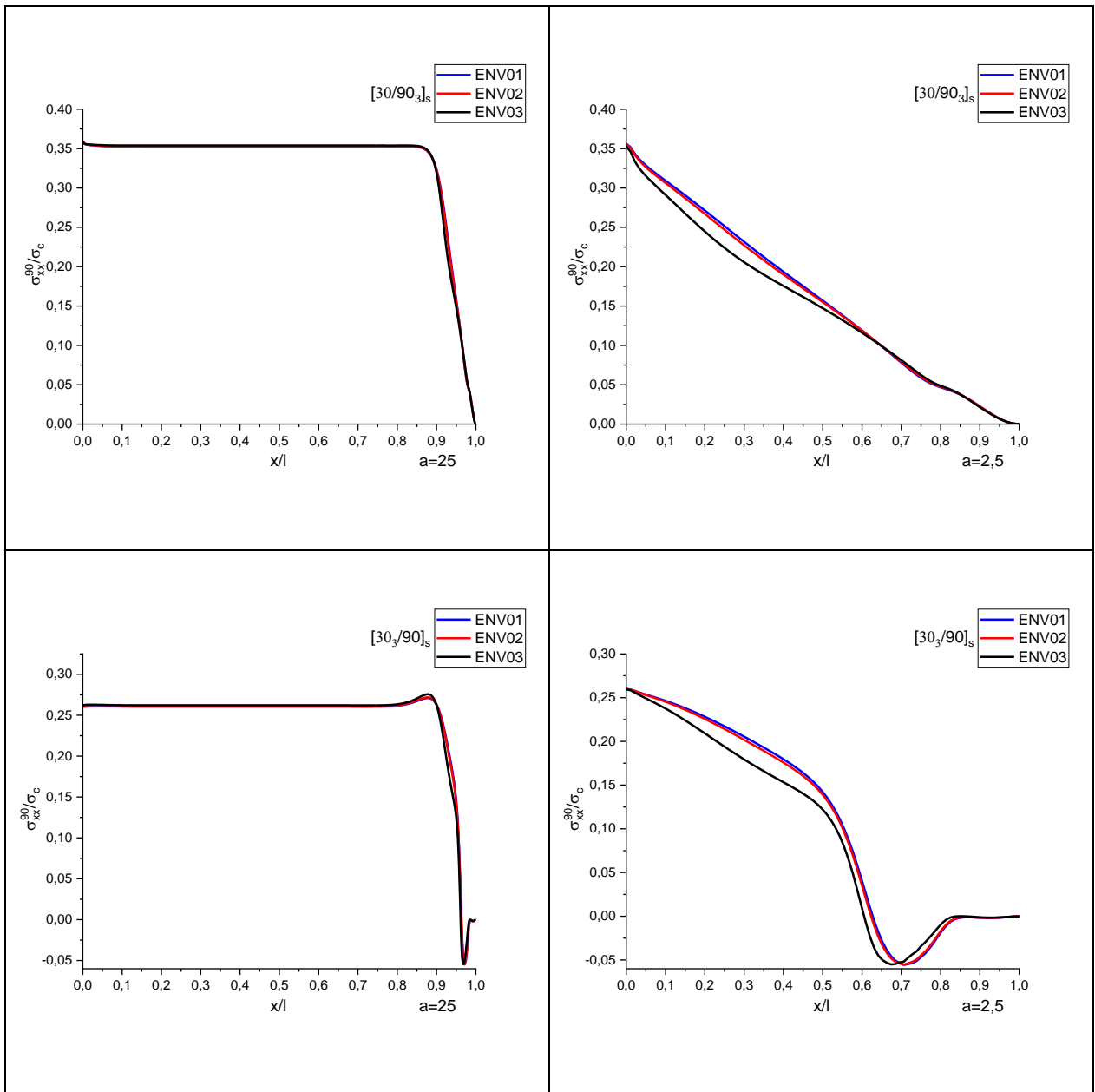


Figure 4-6: Variation de la contrainte longitudinale dans un stratifié $[0_m/90_n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « α » et différents environnements hygrothermiques.

Tableau 4-8: Variation de la contrainte longitudinale σ_{xx} en fonction de a , α et des conditions hygrothermiques dans un stratifié $[30/90_3]_s$ fissuré.

x/l	θ	α	σ_{xx}/σ_c			Écart	σ_{xx}/σ_c			Écart
			a=25				a=2,5			
			ENV01	ENV02	ENV03	$\sigma_{ENV03}-\sigma_{ENV01}$	ENV01	ENV02	ENV03	$\sigma_{ENV03}-\sigma_{ENV01}$
[0,0-0,1]	30°	1/3	0,359	0,359	0,359	-0,02%	0,356	0,356	0,353	-0,30%
[0,1-0,2]	30°	1/3	0,353	0,353	0,354	0,12%	0,306	0,303	0,287	-1,89%
[0,2-0,3]	30°	1/3	0,353	0,353	0,354	0,13%	0,269	0,264	0,242	-2,69%
[0,3-0,4]	30°	1/3	0,353	0,353	0,354	0,13%	0,230	0,225	0,204	-2,57%
[0,4-0,5]	30°	1/3	0,353	0,353	0,354	0,13%	0,193	0,189	0,175	-1,78%
[0,5-0,6]	30°	1/3	0,353	0,353	0,354	0,13%	0,157	0,155	0,147	-0,97%
[0,6-0,7]	30°	1/3	0,353	0,353	0,354	0,14%	0,116	0,115	0,113	-0,23%
[0,7-0,8]	30°	1/3	0,353	0,353	0,354	0,13%	0,075	0,077	0,079	0,34%
[0,8-0,9]	30°	1/3	0,353	0,353	0,354	0,11%	0,046	0,047	0,048	0,19%
[0,9-1,0]	30°	1/3	0,322	0,321	0,317	-0,52%	0,022	0,022	0,021	-0,08%
1	30°	1/3	0,000	0,000	0,000	0,00%	0,000	0,000	0,000	0,00%

Tableau 4-9: Variation de la contrainte longitudinale σ_{xx} en fonction de a , α et des conditions hygrothermiques dans un stratifié $[30_3/90]_s$ fissuré.

x/l	θ	α	σ_{xx}/σ_c			Écart	σ_{xx}/σ_c			Écart
			a=25				a=2,5			
			ENV01	ENV02	ENV03	$\sigma_{ENV03}-\sigma_{ENV01}$	ENV01	ENV02	ENV03	$\sigma_{ENV03}-\sigma_{ENV01}$
[0,0-0,1]	30°	3	0,261	0,261	0,261	0,05%	0,260	0,260	0,260	-0,04%
[0,1-0,2]	30°	3	0,261	0,261	0,262	0,15%	0,245	0,244	0,235	-0,97%
[0,2-0,3]	30°	3	0,261	0,261	0,262	0,16%	0,227	0,224	0,207	-1,96%
[0,3-0,4]	30°	3	0,261	0,261	0,262	0,16%	0,204	0,201	0,178	-2,62%
[0,4-0,5]	30°	3	0,261	0,261	0,262	0,16%	0,179	0,175	0,153	-2,63%
[0,5-0,6]	30°	3	0,261	0,261	0,262	0,16%	0,142	0,139	0,122	-2,01%
[0,6-0,7]	30°	3	0,261	0,261	0,262	0,16%	0,027	0,022	-0,006	-3,30%
[0,7-0,8]	30°	3	0,261	0,261	0,262	0,16%	-0,056	-0,055	-0,052	0,37%
[0,8-0,9]	30°	3	0,271	0,272	0,276	0,45%	-0,016	-0,015	-0,008	0,86%
[0,9-1,0]	30°	3	0,262	0,262	0,261	-0,09%	-0,002	-0,002	-0,001	0,05%
1	30°	3	0,000	0,000	0,000	0,00%	0,000	0,000	0,000	0,00%

4.6.1 Interprétation des résultats :

La variation des contraintes longitudinales d'un stratifié fissuré par des fissures transverses, longitudinales et délaminages soumis à une sollicitation bi axiale est représentée dans les figures (4-5 et 4-6) en fonction des coordonnées longitudinales (x/l) et pour différents rapports d'épaisseur « $\alpha = 1/3 ; 3$ », angles d'orientation des couches « $\theta = 0^\circ ; 30^\circ$ » et rapports géométriques « $a = 25 ; 2,5$ », et pour divers environnements hygrothermiques.

Les tableaux (4-6 à 4-9) exposent la variation et l'écart ($\sigma_{xxENV03} - \sigma_{xxENV01}$) des contraintes longitudinales dans un stratifié soumis à une sollicitation bi axiale en fonction des coordonnées longitudinales (x/l) et endommagé par des fissures transversales, longitudinales et

délamination, et est présenté pour différents rapports d'épaisseur « $\alpha = 1/3,3$ », angles d'orientation de couches « $\theta = 0^\circ ; 30^\circ$ » et rapports géométriques « $a=25 ; 2,5$ », et pour divers environnements hygrothermiques.

Dans un stratifié croisé $[0_m/90_n]_s$, la contrainte longitudinale tend à rester uniforme et maximale entre deux fissures transversales, puis elle diminue brusquement à proximité du plan de fissures. Cette diminution est encore plus marquée lorsque la densité de fissuration est élevée (avec un rapport géométrique $a=2,5$). Lorsque le stratifié comporte plus de couches à 90° que de couches à 0° (faible rapport d'épaisseur « $\alpha=1/3$ »), la contrainte longitudinale dans des conditions hygrothermiques ENV01 est supérieure de 3 % à celle observée dans des conditions hygrothermiques ENV03 en présence d'une faible densité de fissuration $a=25$ (tableau 4-6). En revanche, lorsque la densité de fissuration est élevée « $a=2,5$ », la contrainte longitudinale près du plan de fissure transversale dans des conditions hygrothermiques ENV03 est supérieure de 1 % à celle dans des conditions hygrothermiques ENV01. D'autre côté, quand le stratifié a un rapport d'épaisseur élevé « $\alpha=3$ » (avec plus de couches à 0° qu'à 90°), la contrainte longitudinale dans des conditions hygrothermiques ENV01 est supérieure de 4 % à celle dans des conditions hygrothermiques ENV03 pour une faible densité de fissuration, et de 1 % pour une forte densité de fissuration (tableau 4-7). On remarque donc que l'influence des conditions hygrothermiques augmente avec l'augmentation du rapport d'épaisseur (α).

Dans un stratifié où les couches sont orientées à 30 degrés $[30_m/90_n]_s$, les contraintes longitudinales présentent des valeurs quasi-similaires et un écart minimal le long de l'axe longitudinal (x/l) pour divers rapports d'épaisseur de couches (α) et densités de fissuration (a) (tableau 4-8 et 4-9). Sauf ou l'effet de compression est remarqué proche du plan de fissures lorsque le nombre de couches extérieures est supérieur aux couches intérieures et pour des densités de fissures importantes. Cette observation met en évidence l'effet réduit des conditions hygrothermiques sur les contraintes longitudinales lorsque l'angle d'orientation des couches extérieures (θ) est élevé.

À partir des figures (4-5 et 4-6) et des tableaux (4-6 à 4-9), on constate que la contrainte longitudinale dans le stratifié $[\theta_m/90_n]_s$ diminue avec l'augmentation des effets hygrothermiques (température et humidité). Cette diminution est d'autant plus marquée quand l'angle d'orientation des couches θ° est faible et lorsque le rapport d'épaisseur (α) est élevé.

4.7 Étude de l'évolution de la contrainte de cisaillement dans un stratifié $[0_m/90_n]_s$ fragilisé par des fissures sous des conditions hygrothermiques variables et des sollicitations mécaniques :

L'influence de la température et de l'humidité sur la contrainte de cisaillement dans des stratifiés $[\theta_m/90_n]_s$ ($\theta=0^\circ ; 30^\circ$) sera analysée pour des rapports d'épaisseurs de couche $\alpha=1/3$ et $\alpha=1$, et des rapports géométriques de fissuration $a=25$ et $a=2,5$.

a) Pour $\theta=0^\circ$:

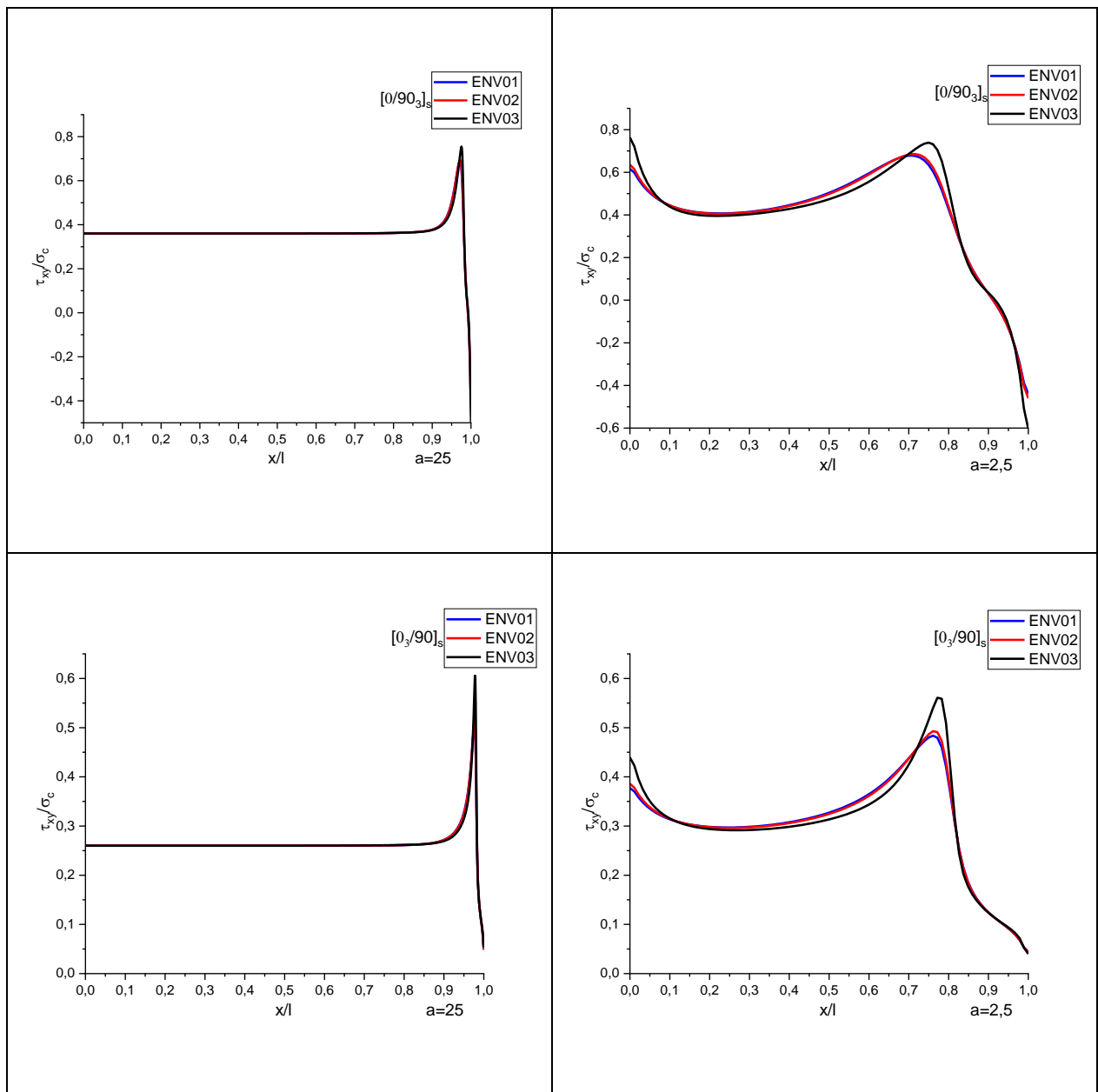


Figure 4-7: Variation de la contrainte de cisaillement dans un stratifié $[0_m/90_n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « α » et différents environnements hygrothermiques.

Tableau 4-10: Variation de la contrainte de cisaillement τ_{xy} en fonction de a , α et des conditions hygrothermiques dans un stratifié $[0/90_3]_s$ fissuré.

x/l	θ	α	τ_{xy}/σ_c			Écart $\tau_{ENV03}-\tau_{ENV01}$	τ_{xy}/σ_c			Écart $\tau_{ENV03}-\tau_{ENV01}$
			a=25				a=2,5			
			ENV01	ENV02	ENV03		ENV01	ENV02	ENV03	
[0,0-0,1]	0°	1/3	0,360	0,360	0,360	0,00%	0,616	0,635	0,763	14,65%
[0,1-0,2]	0°	1/3	0,360	0,360	0,360	0,00%	0,438	0,438	0,430	-0,81%
[0,2-0,3]	0°	1/3	0,360	0,360	0,360	0,00%	0,408	0,406	0,396	-1,18%
[0,3-0,4]	0°	1/3	0,360	0,360	0,360	0,00%	0,415	0,413	0,404	-1,15%
[0,4-0,5]	0°	1/3	0,360	0,360	0,360	0,00%	0,447	0,443	0,429	-1,75%
[0,5-0,6]	0°	1/3	0,360	0,360	0,360	0,01%	0,504	0,498	0,474	-3,01%
[0,6-0,7]	0°	1/3	0,360	0,360	0,360	0,02%	0,605	0,599	0,566	-3,88%
[0,7-0,8]	0°	1/3	0,360	0,361	0,361	0,05%	0,679	0,685	0,739	6,04%
[0,8-0,9]	0°	1/3	0,362	0,363	0,363	0,05%	0,403	0,413	0,486	8,28%
[0,9-1,0]	0°	1/3	0,688	0,695	0,756	6,75%	0,024	0,025	0,031	0,64%
1	0°	1/3	-0,392	-0,406	-0,498	-10,60%	-0,440	-0,460	-0,604	-16,43%

Tableau 4-11: Variation de la contrainte de cisaillement τ_{xy} en fonction de a , α et des conditions hygrothermiques dans un stratifié $[0_3/90]_s$ fissuré.

x/l	θ	α	τ_{xy}/σ_c			Écart $\tau_{ENV03}-\tau_{ENV01}$	τ_{xy}/σ_c			Écart $\tau_{ENV03}-\tau_{ENV01}$
			a=25				a=2,5			
			ENV01	ENV02	ENV03		ENV01	ENV02	ENV03	
[0,0-0,1]	0°	3	0,260	0,260	0,260	0,00%	0,377	0,386	0,439	6,21%
[0,1-0,2]	0°	3	0,260	0,260	0,260	0,00%	0,311	0,312	0,312	0,06%
[0,2-0,3]	0°	3	0,260	0,260	0,260	0,00%	0,298	0,297	0,293	-0,45%
[0,3-0,4]	0°	3	0,260	0,260	0,260	0,00%	0,299	0,297	0,292	-0,65%
[0,4-0,5]	0°	3	0,260	0,260	0,260	0,00%	0,308	0,306	0,299	-0,93%
[0,5-0,6]	0°	3	0,260	0,260	0,260	0,01%	0,327	0,325	0,313	-1,38%
[0,6-0,7]	0°	3	0,260	0,260	0,260	0,02%	0,369	0,366	0,348	-2,17%
[0,7-0,8]	0°	3	0,260	0,260	0,261	0,03%	0,484	0,493	0,561	7,70%
[0,8-0,9]	0°	3	0,261	0,261	0,262	0,03%	0,365	0,372	0,509	14,40%
[0,9-1,0]	0°	3	0,508	0,519	0,606	9,79%	0,123	0,123	0,122	-0,08%
1	0°	3	0,048	0,049	0,053	0,44%	0,044	0,044	0,040	-0,42%

b) Pour $\theta = 30^\circ$:

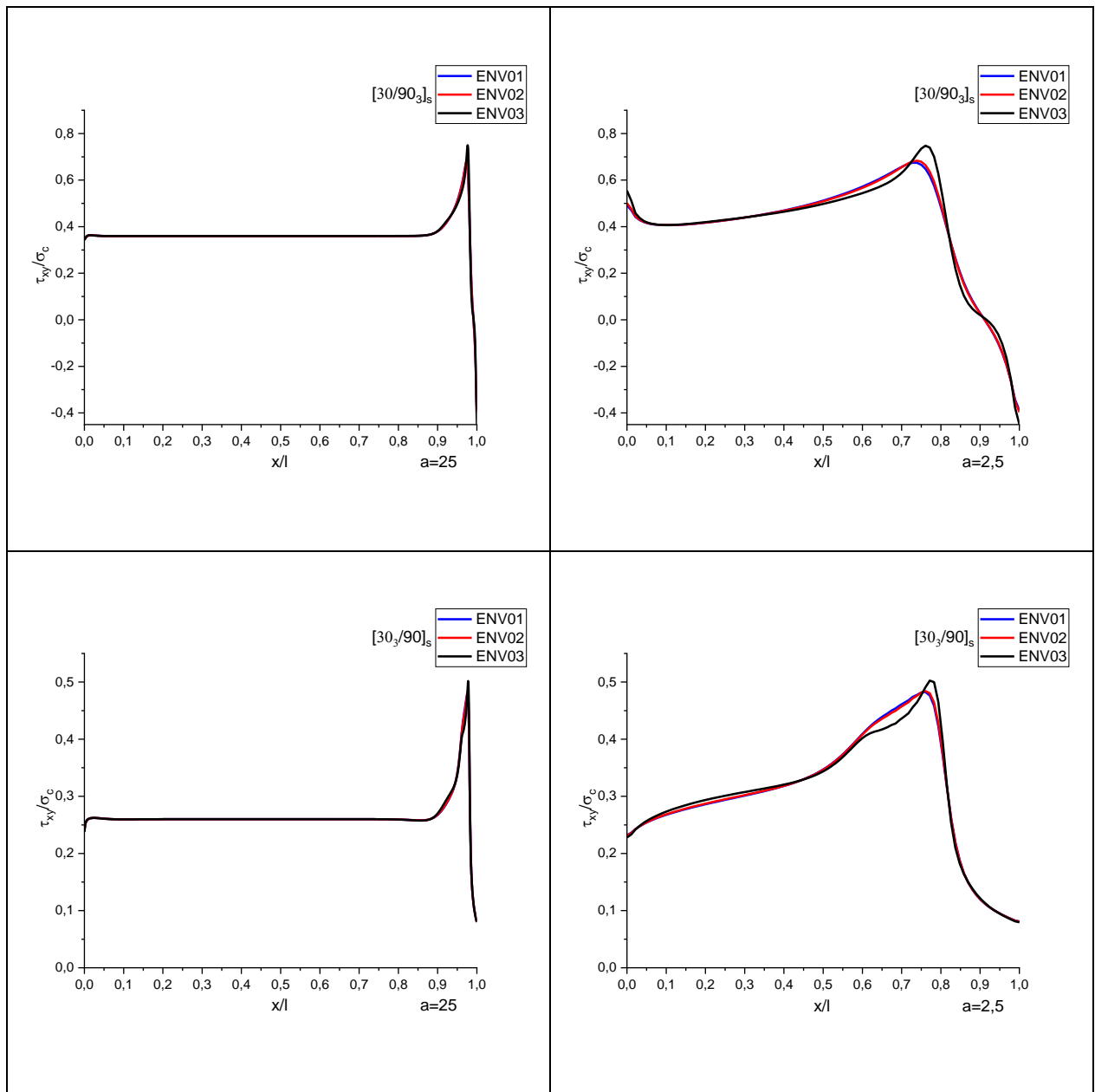


Figure 4-8: Variation de la contrainte de cisaillement dans un stratifié $[0m/90n]_s$ endommagé par fissuration transverse, longitudinale et délaminage pour différentes valeurs de « a » et « α » et différents environnements hygrothermiques.

Tableau 4-12: Variation de la contrainte de cisaillement τ_{xy} en fonction de a , α et des conditions hygrothermiques dans un stratifié $[30/90_3]_s$ fissuré.

x/l	θ	α	τ_{xy}/σ_c			Écart $\tau_{ENV03}-\tau_{ENV01}$	τ_{xy}/σ_c			Écart $\tau_{ENV03}-\tau_{ENV01}$
			a=25				a=2,5			
			ENV01	ENV02	ENV03		ENV01	ENV02	ENV03	
[0,0-0,1]	30°	1/3	0,347	0,347	0,344	-0,35%	0,492	0,501	0,555	6,30%
[0,1-0,2]	30°	1/3	0,360	0,360	0,360	0,01%	0,406	0,407	0,407	0,08%
[0,2-0,3]	30°	1/3	0,360	0,360	0,360	0,00%	0,418	0,419	0,421	0,25%
[0,3-0,4]	30°	1/3	0,360	0,360	0,360	0,00%	0,440	0,440	0,441	0,03%
[0,4-0,5]	30°	1/3	0,360	0,360	0,360	0,00%	0,470	0,469	0,465	-0,56%
[0,5-0,6]	30°	1/3	0,360	0,360	0,360	0,00%	0,512	0,509	0,498	-1,43%
[0,6-0,7]	30°	1/3	0,360	0,360	0,360	0,00%	0,578	0,573	0,549	-2,91%
[0,7-0,8]	30°	1/3	0,360	0,360	0,360	0,00%	0,674	0,683	0,748	7,36%
[0,8-0,9]	30°	1/3	0,360	0,360	0,360	0,01%	0,459	0,469	0,527	6,81%
[0,9-1,0]	30°	1/3	0,676	0,685	0,750	7,40%	0,023	0,022	0,018	-0,55%
1	30°	1/3	-0,386	-0,396	-0,448	-6,13%	-0,388	-0,397	-0,449	-6,13%

Tableau 4-13: Variation de la contrainte de cisaillement τ_{xy} en fonction de a , α et des conditions hygrothermiques dans un stratifié $[30_3/90]_s$ fissuré.

x/l	θ	α	τ_{xy}/σ_c			Écart $\tau_{ENV03}-\tau_{ENV01}$	τ_{xy}/σ_c			Écart $\tau_{ENV03}-\tau_{ENV01}$
			a=25				a=2,5			
			ENV01	ENV02	ENV03		ENV01	ENV02	ENV03	
[0,0-0,1]	30°	3	0,243	0,242	0,238	-0,51%	0,232	0,231	0,228	-0,42%
[0,1-0,2]	30°	3	0,260	0,260	0,260	0,00%	0,270	0,270	0,275	0,59%
[0,2-0,3]	30°	3	0,260	0,260	0,260	0,00%	0,287	0,288	0,295	0,75%
[0,3-0,4]	30°	3	0,260	0,260	0,260	0,00%	0,302	0,303	0,308	0,62%
[0,4-0,5]	30°	3	0,260	0,260	0,260	0,00%	0,319	0,319	0,321	0,23%
[0,5-0,6]	30°	3	0,260	0,260	0,260	0,00%	0,347	0,346	0,344	-0,34%
[0,6-0,7]	30°	3	0,260	0,260	0,260	0,00%	0,415	0,414	0,406	-0,91%
[0,7-0,8]	30°	3	0,260	0,260	0,260	0,00%	0,482	0,484	0,502	2,01%
[0,8-0,9]	30°	3	0,259	0,259	0,259	-0,01%	0,373	0,377	0,398	2,58%
[0,9-1,0]	30°	3	0,481	0,483	0,502	2,04%	0,118	0,119	0,120	0,17%
1	30°	3	0,081	0,081	0,080	-0,14%	0,081	0,081	0,080	-0,15%

4.7.1 Interprétation des résultats :

Les figures (4-7 et 4-8) illustrent la variation des contraintes de cisaillement dans un stratifié fissuré par fissure transversale, longitudinale et délaminage, soumis à une sollicitation bi axiale, en fonction des coordonnées longitudinales(x/l), pour différents angles d'orientation des couches $\theta^\circ \ll \theta = 0^\circ ; 30^\circ \gg$, rapports d'épaisseur « $\alpha = 1/3 ; 3$ » et rapports géométriques « $a=25 ; 2,5$ », et pour divers environnements hygrothermiques.

La variation et l'écart ($\tau_{xyENV03}-\tau_{xyENV01}$) des contrainte de cisaillement en fonction des coordonnées longitudinales d'un stratifié $[\theta_m/90_n]_s$ fissuré avec fissures intralaminaires et interlaminaire ayant un rapport d'épaisseur « $\alpha=1/3$ » et « $\alpha=3$ » sont représentées dans les

tableaux (4-10 à 4-13) et cela pour différents angles d'orientation des couches θ « $\theta = 0^\circ ; 30^\circ$ » et rapports géométriques « $a=25 ; 2,5$ », et pour divers environnements hygrothermiques.

En dehors de la zone de fissure d'un stratifié croisé $[0_m/90_n]_s$ fissuré, une contrainte de cisaillement uniforme et constante est observée. Cependant, près du plan de fissure, la contrainte τ_{xy} augmente considérablement, atteignant son maximum à un point spécifique. Cette valeur maximale dépend de l'environnement hygrothermique. Après avoir atteint ce pic, la contrainte de cisaillement commence à diminuer progressivement. Dans le cas où le stratifié est faiblement fissuré (rapport de géométrie $a=25$) et qu'il est composé de plus de couches orientées à 90° que de couches orientées à 0° (rapport d'épaisseur faible « $\alpha=1/3$ »), on observe que la contrainte de cisaillement maximale dans des conditions hygrothermiques ENV03 est supérieure de 6,7 % à celle observée dans des conditions hygrothermiques ENV01 (tableau 4-10). Au contraire, lorsque le stratifié est fortement fissuré (rapport de géométrie $a=2,5$), la contrainte de cisaillement maximale dans des conditions hygrothermiques ENV03 est supérieure de 8,2 % à celle observée dans des conditions hygrothermiques ENV01. D'autre part, quand le stratifié présente un rapport d'épaisseur élevé ($\alpha=3$), avec plus de couches à 0° qu'à 90° , la contrainte de cisaillement maximale dans des conditions hygrothermiques ENV03 est supérieure de 9,7 % à celle observée dans des conditions hygrothermiques ENV01 pour une faible densité de fissuration ($a=25$), et de 14,4 % pour une forte densité de fissuration (tableau 4-11). Ainsi, on observe que l'effet des conditions hygrothermiques s'accroît à mesure que le rapport d'épaisseur (α) augmente.

On observe un comportement similaire dans un stratifié où les couches θ sont orientées à 30 degrés $[30_m/90_n]_s$, si le stratifié présente une faible densité de fissuration (rapport de géométrie $a=25$) et contient plus de couches orientées à 90° qu'à 30° (rapport d'épaisseur faible $\alpha=1/3$), dans ce cas, sous conditions hygrothermiques ENV03, la contrainte de cisaillement maximale est observée comme étant supérieure de 7,4 % à celle observée sous conditions hygrothermiques ENV01 (tableau 4-12). Par contre, lorsque le stratifié présente une forte densité de fissuration (rapport de géométrie $a=2,5$), la contrainte de cisaillement maximale sous conditions hygrothermiques ENV03 est supérieure de 7,3 % à celle observée sous conditions hygrothermiques ENV01. De plus, si le stratifié présente un rapport d'épaisseur élevé ($\alpha=3$), avec plus de couches à 30° qu'à 90° , la contrainte de cisaillement maximale sous conditions hygrothermiques ENV03 est supérieure de 2% à celle observée sous conditions hygrothermiques ENV01 pour une faible densité de fissuration ($a=25$), et de 2,5 % pour une forte densité de fissuration (tableau 4-13). Ainsi, l'écart de contrainte dans ce stratifié est moins

significatif que celui observé dans un stratifié croisé, ce qui démontre que les conditions hygrothermiques ont un effet réduit sur les contraintes de cisaillement lorsque l'angle d'orientation des couches extérieures (θ) est élevé.

Les résultats des tableaux (4-10 à 4-3) ainsi que des figures (4-7 et 4-8) montrent clairement que les conditions hygrothermiques (humidité et température) influencent significativement la contrainte de cisaillement. En effet, cette contrainte atteint des valeurs plus élevées dans des conditions hygrothermiques extrêmes (ENV03). Cet effet est particulièrement prononcé lorsque l'angle d'orientation des couches (θ°) est faible et que le rapport d'épaisseur (α) est élevé.

4.8 Conclusion :

Nous avons examiné l'influence des conditions hygrothermiques sur le comportement mécanique des composites $[\theta_m/90_n]_s$ sous tension bi axiale, endommagés par des fissures transversales et longitudinales ainsi que par un délaminage. Pour modéliser le vieillissement hygrothermique, nous avons employé le modèle de Tsai.

L'effet de vieillissement hygrothermique a été abordé pour représenter l'impact des conditions environnementales sur la variation des contraintes mécaniques d'un matériau composite $[\theta_m/90_n]_s$. Ce composite est soumis à une traction biaxiale et endommagé par des fissurations transversales, longitudinales et le délaminage.

L'impact des conditions hygrothermiques sur les contraintes dans les stratifiés est significatif. En effet, une augmentation de ces conditions provoque une réduction des contraintes longitudinales et une augmentation des contraintes de cisaillement. Cet effet est d'autant plus marqué pour les stratifiés dont les couches (θ) sont orientées à un faible angle et dont le rapport d'épaisseur(α) est élevé.

En conclusion, l'influence de la température et de l'humidité est primordiale pour représenter le comportement mécanique le plus réaliste des stratifiés composites utilisés principalement dans l'industrie aéronautique et aérospatiale.

5 CONCLUSION GENERALE

Dans le cadre de cette recherche, nous avons réalisé une étude pour évaluer quantitativement le comportement des matériaux composites stratifiés de type $[\theta_m/90_n]_s$ soumis à une traction uniaxiale, puis à une sollicitation biaxiale. Le processus d'endommagement est caractérisé par des fissures transversales dans la couche orientée à 90° , des fissures longitudinales dans la couche orientée à θ° , ainsi que par un délaminage interlaminaire à l'interface fibre/matrice.

Afin de décrire avec précision le comportement mécanique des stratifiés endommagés, nous avons adopté deux types d'approches dans notre étude : une approche analytique et une approche numérique par éléments finis utilisant le logiciel ABAQUS. Notre étude permet de détailler la répartition des champs de contraintes, des déplacements et des déformations dans le composite endommagé, ainsi que les variations des propriétés élastiques en fonction de la densité de fissuration.

Dans un second lieu, l'intérêt s'est principalement focalisé sur l'étude et l'amélioration de la contrainte longitudinale à travers le stratifié et la contrainte de cisaillement inter laminaire. Pour cela, une modélisation de la fissuration transverse avec délaminage a été adoptée, basée 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 a été effectuée sur un stratifié endommagé par trois types de fissures afin d'analyser l'influence de la fissuration longitudinale et de divers paramètres, tels que l'orientation des couches extérieures (θ) et le rapport d'épaisseur des couches (α), sur le comportement mécanique du matériau composite.

Pour quantifier l'évolution des propriétés mécaniques, un modèle de vieillissement à l'échelle micro-analytique a été établi, utilisant le modèle de Tsai. Ce modèle prend en compte l'effet de la concentration d'humidité et de la température sur les propriétés des fibres et de la matrice.

L'analyse par éléments finis de la distribution et de l'évolution des champs de contraintes au sein des stratifiés $[\theta_m/90_n]_s$ soumis à un vieillissement hygrothermique, à une traction biaxiale, ainsi qu'à des dégradations sous forme de fissures transversales, longitudinales et de délaminage revêt une importance cruciale pour la compréhension de leur comportement mécanique et la prédiction de leur durée de vie en service dans des environnements agressifs.

En s'appuyant sur cette modélisation analytique et l'étude numérique par éléments finis, on peut synthétiser les résultats de la manière suivante :

- Pour le modèle analytique, la modélisation repose sur une approche par déplacement, ce qui signifie que l'équilibre ne peut être vérifié qu'en moyenne. En effet, si l'on souhaite considérer la variation de la contrainte normale longitudinale en fonction de l'épaisseur dans la couche à 90° et la contrainte 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 des fissures transversales et du délaminage, les résultats améliorés montrent une bonne concordance avec ceux obtenus par Berthelot. Ces résultats nous permettent de mieux comprendre le comportement mécanique du stratifié endommagé à l'échelle locale. Cependant, il est important de noter que ces prédictions restent discutables et ne peuvent pas être considérées comme entièrement fiables.
- La contrainte normale longitudinale dans la couche orientée à 90° , qui pilote l'endommagement par fissuration transverse, longitudinale et délaminage, atteint des valeurs maximales à mi-distance entre deux fissures transversales consécutives, et s'annule au niveau du plan de fissures transversales, respectant ainsi les conditions aux limites.
- La contrainte de cisaillement atteint son maximum à proximité des plans de fissures (longitudinale et du délaminage), puis diminue progressivement après avoir atteint ce pic.
- L'amorçage et La propagation des fissures transversales, longitudinales et du délaminage est favorisée dans un stratifié ayant un nombre élevé de plis orientés à 90° par rapport à ceux orientés à 0° . Ce phénomène est amplifié par un angle élevé entre les fibres du pli extérieur (θ) et la direction de la charge appliquée.
- Le rapport d'épaisseur des couches (α) ainsi que l'orientation des couches extérieures (θ) constituent des paramètres cruciaux pour optimiser la résistance aux dommages et garantir la conformité aux exigences du cahier des charges.
- Le modèle de simulation sur Abaqus, employé pour modéliser le comportement des stratifiés soumis à des conditions de vieillissement hygrothermiques, semble adéquat pour représenter les contraintes en fonction de la densité de fissuration dans diverses 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 dans un stratifié composite dépendent de plusieurs paramètres, tels que le rapport d'épaisseur des couches, l'orientation des fibres, la densité de fissuration, la température et l'humidité.

En conclusion, il est possible de dire que la présence de trois fissures dans un stratifié composite de type $[\theta_m/90_n]_s$ influence les variations des contraintes mécaniques, en tenant compte de l'architecture du stratifié et du rapport géométrique de fissuration. En outre, la température et l'humidité exercent un impact significatif sur les propriétés mécaniques des stratifiés endommagés.

Dans le cadre des perspectives futures de notre recherche, nous proposons de développer un modèle aux éléments finis en trois dimensions (3D) d'un stratifié fissuré. Ce modèle prendra en compte la fissuration transversale, le délaminage et la fissuration longitudinale. Il permettra d'analyser l'influence conjointe de l'orientation des couches à θ° et à 90° sur le comportement mécanique du stratifié. Par la suite, l'étude s'étendra à l'effet des conditions hygrothermiques sur le comportement mécanique d'un stratifié composite $[\theta_m/\beta_n]_s$. Ce stratifié, endommagé par des fissurations transversales, longitudinales et un délaminage, sera soumis à une traction uniaxiale. Pour cette analyse, en utilisant deux approches, analytique et numérique.

6 LA 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 a la rupture de la fibre (GPa)

(a) : Rapport géométrique de fissuration

(α) : Rapport d'épaisseur de couches

(θ) : Angle de la couche (degré)

n : Nombre de couches à 90°

m : Nombre de couches orientées à 0° ou à un angle θ

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

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

x : Coordonnée longitudinale

z : Coordonnée transversale

x, y, z : Repère du pli

l : Demi distance entre deux fissures consécutives (mm)

σ_c : Contraintes de traction appliquée (GPa)

τ : Contrainte de cisaillement (Gpa)

ν_{xy} : Coefficient de poisson longitudinal

ν_{xz} : Coefficient de poisson transverse

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

E_{fy} : Module transversale de Young dans la direction de la fibre

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 (%)

$u_0(x, z)$: Déplacement longitudinal dans la couche a 0° (mm)

$\bar{u}_0(x)$: Déplacement longitudinale moyen dans la couche a 0° (mm)

$u_{90}(x, z)$: Déplacement longitudinal dans la couche a 90° (mm)

$\bar{u}_{90}(x)$: Déplacement longitudinal moyen dans la couche a 90° (mm)

$u_\theta(x, z)$: Déplacement longitudinal dans la couche a θ° (mm)

$\bar{u}_\theta(x)$: Déplacement longitudinale moyen dans la couche a θ° (mm)

σ_{xz}^i : Contrainte de cisaillement dans une couche ($0^\circ, 90^\circ, \theta^\circ$) (GPa)

γ_{xx}^i : Déformation relative dans une couche ($0^\circ, 90^\circ, \theta^\circ$)

w_1 : Déplacement transverse (mm)

∂_{xx}^0 : La contrainte moyenne longitudinale dans la couche a 0° (GPa)

∂_{xx}^{90} : La contrainte moyenne longitudinale dans la couche a 90° (GPa)

∂_{xx}^θ : La contrainte moyenne longitudinale dans la couche a θ° (GPa)

T(x) : La contrainte de cisaillement à l'interface entre les couches (GPa)

σ_ε : Contraintes de traction appliquée (GPa)

$\sigma_{zz}^i(x, z)$: Contrainte normale transverse (GPa)

G : Paramètre de cisaillement (GPa)

a, c, f, h, b, e : constantes empiriques.

α_1 : La demi-longueur du délaminage (mm)

C : Concentration de l'humidité (%)

7 BIBLIOGRAPHIE

- [1] "An Introduction to Composite Materials" (Aerospace Engineering Blog, July 3, 2012). <https://aerospaceengineeringblog.com/composite-materials/> (accessed May 28, 2023).
- [2] L. Gornet, "Généralités sur les matériaux composites" (2011). [Online]. Available at: <https://cel.hal.science/cel-00470296v2>.
- [3] J.-M. Berthelot, "Mécanique des Matériaux et Structures Composites".
- [4] J.-L. Rebière, M.-N. Maatallah, and D. Gamby, "Analysis of damage mode transition in a cross-ply laminate under uniaxial loading" *Compos. Struct.* 55, no. 1 (January 2002): 115-126, doi:10.1016/S0263-8223(01)00133-7.
- [5] J. Wang and B. L. Karihaloo, "Matrix crack-induced delamination in composite laminates" [Online]. Available at: [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" [Online]. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/281271683>.
- [7] Y. Mimoune, "MODELISATION DYNAMIQUE DES STRUCTURES COMPOSITES ENDOMMAGEES" (Thesis, Univ M'sila, 2020). Consulted on: May 28, 2023. [Online]. Available at: <http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/22030>.
- [8] R. M. Jones, *Mechanics Of Composite Materials*, 2nd ed. (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). Consulted on: May 28, 2023. [Online]. Available at: <https://theses.hal.science/tel-01223982>.
- [11] L'endommagement dans le cas d'un matériau stratifié à différents (Scientific Diagram). https://www.researchgate.net/figure/3-Lendommagement-dans-le-cas-dun-materiau-stratifie-a-differents-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", thèse de doctorat, 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", Thèse, 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", Thèse 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", Thèse 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.blidal, 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: [\[https://di.univ-blida.dz/jspui/handle/123456789/5\]](https://di.univ-blida.dz/jspui/handle/123456789/5)
- [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] S. Sadoudi, « Modélisation de la fissuration transverse, longitudinale et délaminage dans un matériau

composite sous l'effet des conditions hygrothermiques», Thesis, univ Blida, 2023. Consulté le: 22 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur:
<https://di.univblida.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, no 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, no 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 crossply laminates: Part 1. Analysis », *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 27, no 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 », Thèse 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. Benkaddad, « Conception d'un logiciel d'analyse des plaques stratifiées avec prise en compte des contraintes hygrothermiques transitoires », Thèse 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, no 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, no 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, no 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, no 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.
- [41] N. Besbaci, « Modélisation de la fissuration transverse et délaminage dans un matériau composite sous l'effet des conditions hygrothermiques », Thesis, univ Blida, 2021. Consulté le: 22 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://di.univblida.dz/jspui/handle/123456789/11912>