

**UNIVERSITÉ DE BLIDA 1**

**Institut d'aéronautique et des études spatiales**

**Département construction aéronautique**



## **MEMOIRE DE MASTER**

**Spécialité : structure**

### **Etude des matériaux composites hybrides fissurés Et soumis à des conditions hygrothermiques**

**Réalisé Par :**

**BelmanaRebiha  
Laghouati Meriem**

**Encadré par :**

**A. BENKHEDDA Maître de conférences, U. de Blida 1 Encadreur**

**M. KHODJET-KESBA Maître Assistant, U. de Blida 1 Co-Encadreur**

**Blida, septembre 2016**

## RESUME

L'étude présentée concerne l'évolution des propriétés élastiques (rigidité et contraintes) d'un matériau composite hybride soumis à des conditions hygrothermiques variables (avec la variation de la température et humidité). En premier lieu, la modalisation de la fissuration transverse pour les composites hybrides soumis à une traction uni-axiale sera développée. Les résultats trouvés seront validés avec l'expérimentales et des travaux publiés par El Meiche et Zhang. Par la suite, le comportement des contraintes (longitudinale, transversale et de cisaillement) et de la rigidité sera étudié avec la variation de la température et humidité. Finalement, les résultats représentent clairement la dépendance de la réduction des caractéristiques mécaniques en fonction de la densité de fissuration et aux conditions d'environnement.

## SUMMARY

The presented study concerns the elastic properties degradation (stiffness and stress distribution) for hybrid composite material under hygrothermal condition (variation of temperature and moisture). In the first part, the prediction of transverse crack for hybrid composite material under uniaxial tension is developed. The prediction shows better agreement with the experimental results and published works by El Meiche and Zhang. Next, the stress distribution (longitudinal, transversal and shear stress) and stiffness degradation are presented with the variation of temperature and moisture. Finally, the obtained results represent well the dependence of stress and stiffness on the crack density and hygrothermal conditions.

## ملخص

تتعلق هذه الدراسة بتطور خصائص المرونة (صلابة والقيود) للمواد المركبة الهجينة التي تكون قد تعرضت لحالة الرطوبة الحرارية المتغيرة (مع التغير في درجة الحرارة والرطوبة). أولاً، سوف يتم تطوير التصميم عراضي التشقق للمركبات الهجينة لتوتر أحادي المحوري. سيتم التحقق من صحة النتائج مع العمل التجريبي، لمنشورات نشرت من قبل أعمال أخرى. إن سلوك القيد (طولية، عرضية و القص) و تصلب سيتم دراستها مع التغير في درجة الحرارة والرطوبة. وأخيراً، فمن الواضح ان النتائج تعبر عن علاقة تدهور الخصائص المرنة للمواد المركبة بالانشقاق العمودي و الظروف البيئية

**Mots clé :** Fissuration transverse , hybride, rigidité , contraintes...

## REMERCIEMENTS

Nos vifs et respectueux remerciements vont tout d'abord à notre Encadreur Madame BENKHEDDA Amina, Docteur à l'université de Blida, à qui nous tiens à exprimer toute notre profonde reconnaissance, qui ont donné un encadrement de très haut niveau et de qualité dans la faisabilité de ce travail. Nous saluons en elle ses grandes qualités humaines, sa bonté, Modestie, son enthousiasme, son dévouement et son sens extraordinaire de la communication

Nous remercions également notre Co-Encadreur de Mémoire Monsieur khodjet-kesba Mohamed Maître à l'université de Blida pour son aide précieuse tout au long de cette années, pour les échanges et les conseils scientifiques qu'il nous avons prodiguées.surtout pour son disponibilité et ses prestigieux conseils dérivant de son très haute compétence

Enfin, notre vives pensées vont à toutes les personnes que nous avons côtoyées durant ce parcours et à toutes celles qui nous avons aidées et ont ainsi contribué par leurs présences au bon déroulement de notre mémoire de master.

## TABLE DES MATIÈRES

RESUME .....	2
REMERCIEMENTS.....	3
TABLE DES MATIERES.....	4
LISTE DES ILLUSTRATIONS GRAPHIQUE ET TABLEAUX.....	8
INTRODUCTION.....	13
CHAPITRE 1:RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE	
1-1 Introduction.....	15
1-2 Problématique.....	15
1-3 Travaux effectués.....	16
CHAPITRE 2 : MODELISATION DU VIEILLISSEMENT HYGROTHERMIQUE.	
2.1 Introduction .....	20
2.2 Phénomène hygrothermiques .....	20
2.3 Vieillissement hygrothermique .....	21
2.3.1 Vieillissement physique –plastification .....	21
2.3.2 Vieillissement chimique .....	22
2.3.3 Effets de l’humidité sur les fibres de verre .....	22
2.4 Caractérisation du matériau .....	23
2.4.1 Le module de Young dans la direction des fibres .....	23
2.4.2 Le module de Young transversal .....	23
2.4.3 Le module de cisaillement longitudinal .....	24
2.4.4 Le coefficient de Poisson .....	24
2.5 Introduction du vieillissement sur les propriétés mécaniques du matériau et le modèle de TSAI .....	24
2.5.1 Evolution de Tg au cours du vieillissement .....	25
2.5.2 Température adimensionnelle .....	26
2.5.3 Prise en compte du vieillissement dans les propriétés de la matrice .....	26



2.5.4	Prise en compte du vieillissement dans les propriétés des fibres .....	26
2.5.5	Organigramme .....	27
2.5.6	Propriétés du T300/5208 [15] .....	29
2.5.7	Conditions de simulation .....	30
2.5.8	Variation des modules mécaniques .....	31
2.6	Interprétations .....	33
2.6.1	Effets de la température .....	33
2.6.2	Effets de la concentration .....	34
2.7	Validation des résultats .....	36

### CHAPITRE 3 : MODELISATION DE LA FISSURATION TRANSVERSE POUR UN MATERIAU HYBRIDE .....

3.1	Introduction .....	37
3.2	Analyse généralisée .....	37
3.2.1	Choix des fonctions de contrainte pour un composite hybride croisé .....	37
3.2.1	Le modèle Shear-lag pour le stratifié hybride .....	42
3.2.2	Expressions des contraintes dans le stratifié hybride .....	45
3.2.3	Réduction de la rigidité .....	46

### CHAPITRE 4 : SIMULATION ET RESULTATS DES STRATIFIES HYBRIDES FISSURES AVEC CHARGEMENT MECANIQUE.....

4.1	Introduction.....	48
4.2	Organigramme.....	48
4.3	Choix du matériau de simulation.....	51
4.4	Distribution des contraintes sous chargement mécanique .....	52
4.4.1	Distribution de la contrainte longitudinale dans la couche 0°.....	52
a)	Comparaison entre les trois matériaux composites.....	52
b)-	Influence de la densité de fissuration pour un stratifié hybride.....	53
c)-	influence du rapport d'épaisseur pour un stratifié hybride.....	53

4.4.2 Distribution de la contrainte transversale .....	54
a) Comparaison entre les trois matériaux composites.....	54
b)- Influence de la densité de fissuration pour un stratifié hybride.....	55
c)- Influence du rapport d'épaisseur pour un stratifié hybride.....	55
4.4.3 Distribution de la contrainte de cisaillement à l'interface.....	56
a) Comparaison entre les trois matériaux composites.....	56
b)- Influence de la densité de fissuration pour un stratifié hybride.....	57
c)- Influence du rapport d'épaisseur pour un stratifié hybride.....	58
4.4.4 Distribution de la contrainte longitudinale dans la couche 90°.....	58
a) Comparaison entre les trois matériaux composites.....	58
b)- Influence de la densité de fissuration pour un stratifié hybride.....	59
c)- Influence du rapport d'épaisseur pour un stratifié hybride.....	60
4.5 Etude du module de Young longitudinale .....	61
a) Comparaison entre les trois matériaux composites .....	62
b)- Influence de la densité de fissuration pour un stratifié hybride .....	63
4.4 Conclusion.....	64
Chapitre 5 : Simulation et résultat des stratifier hybride fissurée avec chargement mécanique et avec une condition hygrothermique .....	
5.1 Introduction .....	65
5-2 Organigramme .....	65
5-3 choix de matériau de simulation .....	68
5-4 distributions de la contrainte sous condition hygrothermique .....	69
5-4-1 distribution des contraintes longitudinales sous condition hygrothermique.....	70
5-4-2 distribution de la contrainte transversale sous condition hygrothermique.....	75

5-4-3 distribution de la contrainte du cisaillement a l'interface .....	77
5-5 réductions de la rigidité sous condition hygrothermique .....	80
5-5-1 Réduction de la rigidité relative .....	80
5-5-2 réductions de la rigidité totale .....	83
5-6 Conclusion.....	86
CONCLUSION GENERALE.....	87
BIBLIOGRAPHIE.....	89
LISTE DES SYMBOLES.....	92

## **LISTE DES ILLUSTRATIONS GRAPHIQUE ET TABLEAUX**

Figure 2.1 : Organigramme du calcul des propriétés vieillies par MICATSAI .....	28
Figure 2.2 : Effet de la variation de température sur le module de Young longitudinal poule T300/5208 à différents niveaux de concentration.....	31
Figure 2.3 : Effet de la variation de température sur le module de Young transversal pour le T300/5208 à différents niveaux de concentration.....	32
Figure 2.4 : Effet de la variation de température sur le module de cisaillement longitudinal pour le T300/5208 à différents niveaux de concentration.....	32
Figure 2.5 : Effet de la variation de température sur le coefficient de Poisson longitudinal pour le T300/5208 à différents niveaux de concentration.....	33
Figure 3.1 fissuration transverse et cellule élémentaire.....	38
Figure 3.2 Système de coordonnées du modèle analytique.....	39
Figure 3.3 Représentation des contraintes dans les différentes couches.....	42
Figure 4.1 Organigramme du MICAFISS.....	49
Figure 4.2 : Configuration du stratifié hybride.....	51
Figure 4.3 : Distribution de la contrainte inter-laminaire à l'interface 0/90 dans la couche 0° pour différents stratifiés [0/90 <sub>2</sub> ] <sub>s</sub> avec S=1mm.....	52
Figure 4.4 : Distribution de la contrainte inter-laminaire à l'interface 0/90 dans la couche 0° pour le stratifié [0/90 <sub>2</sub> ] <sub>s</sub> pour différents densités de fissuration.....	53
Figure 4.5 : Distribution de la contrainte inter-laminaire à l'interface 0/90 dans la couche 0° pour différents rapport d'épaisseur et S=0.5mm.....	54
Figure 4.6 : Distribution de la contrainte normale à l'interface 0/90 pour différents stratifiés [0/90 <sub>2</sub> ] <sub>s</sub> avec S=1mm.....	54
Figure 4.7 : Distribution de la contrainte normale à l'interface 0/90 pour un stratifié hybride et différents densité de fissures avec $\delta = 2$ .....	55
Figure 4.8 : Distribution de la contrainte normale à l'interface 0/90 pour un stratifié hybride et différents rapports d'épaisseur avec S = 0.5 mm.....	56



Figure 4.9 : Distribution de la contrainte de cisaillement à l'interface 0/90 pour différents stratifiés $[0/90_2]_S$ avec $S=1\text{mm}$ .....	57
Figure 4.10 : Distribution de la contrainte de cisaillement à l'interface 0/90 pour un stratifié hybride et différents densité de fissuration avec $\delta =2$ .....	57
Figure 4.11 : Distribution de la contrainte de cisaillement à l'interface 0/90 pour un stratifié hybride et différents rapport d'épaisseur avec $S =0.5\text{mm}$ .....	58
Figure 4.12 : Distribution de la contrainte inter-laminaire à l'interface 0/90 dans la couche $90^\circ$ pour différents stratifiés $[0/90_2]_S$ avec $S=1\text{mm}$ .....	59
Figure 4.13 : Distribution de la contrainte inter-laminaire à l'interface 0/90 dans la couche $90^\circ$ pour le stratifié $[0/90_2]_S$ pour différents densités de fissuration.....	60
Figure 4.14 : Distribution de la contrainte inter-laminaire à l'interface 0/90 dans la couche $90^\circ$ pour différents rapport d'épaisseur et $S=0.5\text{mm}$ .....	60
Figure 4.15 : Comparaison de la réduction du module de Young en fonction de la densité de fissures pour $[0/90]_S$ graphite/époxy et l'expérimental [29].....	61
Figure 4.16 : Comparaison de la réduction du module de Young en fonction de la densité de fissures pour $[0/90_2]_S$ graphite/époxy et l'expérimental [29].....	61
Figure 4.17 : Comparaison de la réduction du module de Young en fonction de la densité de fissures pour $[0/90_3]_S$ graphite/époxy et l'expérimental [29].....	62
Figure 4.18: Comparaison entre la réduction du module de Young en fonction de la densité de fissures $[0/90_2]_S$ pour les trois stratifiés.....	63
Figure 4.19 : Comparaison entre la réduction du module de Young en fonction de la densité de fissures pour les trois rapports d'épaisseur.....	63
Figure 5.1 : Organigramme du MICAZHN .....	66
Figure 5.2 : configuration du stratifié T300/5208.....	68
Figure 5.3 : configuration du stratifié hybride 1.....	69
Figure 5.4 : configuration du stratifié hybride 2.....	69

Figure 5 .5: contrainte longitudinale $\sigma x1$ sous condition hygrothermique pour le (T300/5208) stratifié $[0/90_3]_s$ dans les trois environnements.....	70
Figure 5.6 : contrainte longitudinale $\sigma x1$ sous condition hygrothermique pour hybride 1 stratifié $[0/90_3]_s$ dans les trois environnements.....	71
Figure 5.7 : contrainte longitudinale $\sigma x1$ sous condition hygrothermique pour le hybride 2 stratifié $[0/90_3]_s$ .....	71
Figure 5.8 : contrainte longitudinale $\sigma x1$ sous condition hygrothermique pour les trois matériaux stratifié $[0/90_3]_s$ dans l'environnement $T=122^\circ\text{c}$ et $C=1,5\%$ .....	72
Figure 5 .9 : contrainte longitudinale $\sigma x2$ sous condition hygrothermique pour (T300/5208) stratifié $[0/90_3]_s$ dans les trois environnements.....	73
Figure 5 .10 : contrainte longitudinale $\sigma x2$ sous condition hygrothermique pour hybride 1 stratifié $[0/90_3]_s$ dans les trois environnements.....	73
Figure 5.11 : contrainte longitudinale $\sigma x2$ sous condition hygrothermique pour hybride 2 stratifié $[0/90_3]_s$ dans les trois environnements.....	74
Figure 5.12 : contrainte longitudinale $\sigma x2$ sous condition hygrothermique pour les trois matériaux stratifié $[0/90_3]_s$ dans l'environnement $T=122^\circ\text{c}$ et $C=1,5\%$ .....	74
Figure 5.13 : contrainte transversal $\sigma y1$ sous condition hygrothermique pour (T300/5208) stratifié $[0/90_3]_s$ dans les trois environnements.....	75
Figure 5 .14 : contrainte transversale $\sigma y1$ sous condition hygrothermique pour hybride 1 stratifié $[0/90_3]_s$ dans les trois environnements.....	76
Figure 5.15: contrainte transversal $\sigma y1$ sous condition hygrothermique pour hybride 2 stratifié $[0/90_3]_s$ dans les trois environnements.....	76
Figure 5.16 : contrainte de cisaillement a l'interface $\sigma y1$ sous condition hygrothermique pour les trois matériaux stratifié $[0/90_3]_s$ dans l'environnement $T=122^\circ\text{c}$ et $C=1,5\%$ .....	77
Figure 5.17 : contrainte de cisaillement a l'interface $\tau xy$ pour (T300/5208) stratifié $[0/90_3]_s$ dans les trois environnements.....	78

Figure 5.18 : contrainte du cisaillement a l'interface $\tau_{xy}$ pour hybride 1 stratifié $[0/90_3]_s$ dans les trois environnements .....	78
Figure 5.19 : contrainte de cisaillement a l'interface $\tau_{xy}$ pour hybride 2 stratifié $[0/90_3]_s$ dans les trois environnements.....	79
Figure 5.20 : contrainte longitudinale $\tau_{xy1}$ sous condition hygrothermique pour les trois matériaux stratifié $[0/90_3]_s$ dans l'environnement $T=122^\circ\text{c}$ et $C=1,5\%$ .....	79
Figure 5.21 : réduction de la rigidité relative pour le (T300/5208) stratifié $[0/90_3]_s$ dans les trois environnements En fonction de la densité de fissure.....	81
Figure 5.22 : réduction de la rigidité relative pour le hybride 1 stratifié $[0/90_3]_s$ dans les trois environnements En fonction de la densité de fissure.....	82
Figure 5.23 : réduction de la rigidité relative pour le hybride 2 stratifié $[0/90_3]_s$ dans les trois environnements En fonction de la densité de fissure.....	83
Figure 5.24 : réduction de la rigidité totale pour les trois matériaux de stratifié $[0/90_3]_s$ dans le premier environnement de $T=122^\circ\text{c}$ et $C=1,5\%$ En fonction de la densité de fissure .....	83
Figure 5.25 : réduction de la rigidité totale pour le T(300/5208) stratifié $[0/90_3]_s$ dans les trois environnements En fonction de la densité de fissure .....	84
Figure 5.26 : réduction de la rigidité totale pour hybride 1 stratifié $[0/90_3]_s$ dans les trois environnements En fonction de la densité de fissure .....	84
Figure 5.27 : réduction de la rigidité totale pour hybride 2 stratifié $[0/90_3]_s$ dans les trois environnements En fonction de la densité de fissure.....	85
Figure 5.28 : réduction de la rigidité totale pour les trois matériaux de stratifié $[0/90_3]_s$ dans le premier environnement de $T=122^\circ\text{c}$ et $C=1,5\%$ En fonction de la densité de fissure .....	86
Tableau 2.1 : Caractéristiques de fibres et matrice du T300/5208, [5].....	29
Tableau 2.2 Caractéristiques de variation de température et d'humidité, [5].....	29
Tableau 2.3 Propriétés du T300/5208 $T_r=22^\circ\text{C}$ , [5].....	29

Tableau 2.4 Caractéristiques de diffusion du T300/5208,[5].....	30
Tableau 2.5 : Choix des environnements.....	30
Tableau 2.6 : Taux de réduction des propriétés mécaniques T=60°C, C=0%, C=0.15%,C=1%, C=1.5%.....	35
Tableau 2.7 : Taux de réduction des propriétés mécaniques T=120°C, C=0%, C=0.15%,C=1%, C=1.5%.....	35
Tableau 4.1 : Propriétés élastiques des matériaux.....	51



## **INTRODUCTION**

Dans les industries aéronautiques et spatiales, la conception des structures, qu'ils s'agissent d'aéronefs, de lanceurs, de véhicules spatiaux, doit se conformer à des conditions de légèreté et de parfaite sécurité, la possibilité d'une rupture étant totalement exclue. L'apparition de fissures au cœur du matériau peut devenir de plus en plus importante en s'amplifiant sous de différentes conditions sollicitant les structures, ce qui conduit progressivement en fonction du temps à un phénomène d'endommagement pouvant être particulièrement dangereux.

Les stratifiés à fibres longues sont des composites particuliers, constitués d'un empilement de couches élémentaires ou plis à l'intérieur desquels les renforts fibreux, noyés dans une matrice, sont alignés selon une direction privilégiée. Lors d'une sollicitation de traction monotone ou cyclique, la dégradation de matériaux homogènes et isotropes est généralement localisée et se produit selon trois stades : l'amorçage, la propagation d'une fissure principale et la ruine finale. Le premier type d'endommagement qui apparaît est la fissuration transverse des couches orientées à  $90^\circ$ , beaucoup de recherche ont été développées [1-2] qui tentent d'évaluer la répartition des contraintes et la dégradation de la rigidité due à des micros fissures dans les stratifiés.

L'esprit dans lequel s'inscrit cette recherche, doit tenir compte dans un premier temps du comportement des propriétés élastiques d'un matériau hybride avec des fissurations transverses soumis à une traction uni-axiale. Une validation des résultats sera faite avec l'expérimental et d'autres travaux publiés par El Meiche [3] et Zhang [4]. En suite, l'évolution des propriétés élastiques sous conditions hygrothermique sera étudiée pour les matériaux hybrides fissurés.

Pour l'accomplissement de cette étude, les étapes successives suivantes ont été suivies:

1. Une étude bibliographique sur les différents modes de fissurations, qui sont générées par les effets de vieillissement hygrothermique des stratifiés croisés était nécessaire. Cette étude nous a permis d'orienter notre recherche.

2. le deuxième chapitre est représenté par la simulation du comportement mécanique d'un composite hybride fissuré et sous sollicitation. Le modèle de diffusion de cisaillement modifié par Zhang sera utilisé.

3. Il est judicieux de comprendre le processus hygrothermique au niveau microscopique de la matrice et des fibres. Ainsi le troisième chapitre présente une synthèse générale concernant l'influence de la reprise d'humidité et les effets de vieillissement qui sont dus à la température et à l'humidité, sur les composites à matrice polymère. Le modèle de Tsai modélisant le vieillissement est aussi donné ainsi des résultats sur les caractéristiques mécaniques vieillis.

4. Dans le quatrième chapitre, nous représenterons les résultats obtenus par la simulation du comportement mécanique d'un composite hybride fissuré et sous sollicitation.

5. Dans le cinquième chapitre, on donne la représentation du comportement de la rigidité et contraintes dans un matériau composite hybride croisé et fissuré, soumis à des sollicitations de traction et sous différentes conditions hygrothermiques.

Nous terminerons par une conclusion générale et des perspectives futures.

## CHAPITRE 1

### RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

#### 1.1 Introduction

Les matériaux composites sont caractérisés, par une forte hétérogénéité sur le plan microscopique et une anisotropie prononcée de leurs propriétés mécaniques sur le plan macroscopique. Une utilisation rationnelle de ces matériaux, de quelle nature soit-elle, exige une bonne compréhension et une modélisation réaliste de leurs propriétés directionnelles. Dans les années soixante dix, les études réalisées sur la tenue des matériaux composites utilisés dans le transport et le stockage de différents fluides, ont montré que malgré une très bonne tenue à la corrosion, les matériaux composites à matrice polymère pouvaient être fortement altérés par les facteurs environnementaux tels que la température, l'humidité ambiante, les rayons ultraviolets, l'immersion dans certains fluides. Dans le domaine aéronautique, le cas est d'autant important qu'illustratif. Les structures aéronautiques sont réalisées en grandes parties par des composites à matrice polymère, et elles évoluent dans des conditions d'environnement variables, en termes d'altitudes, de vitesses, de températures et d'humidité. En effet, il s'est avéré que les propriétés mécaniques de certaines matrices polymères pouvaient être modifiées, suite à une exposition prolongée dans une atmosphère humide et à température variable. L'évolution de ces propriétés avec le temps sous différentes conditions d'utilisation, conditions auxquelles les structures seront confrontées durant leur service, a grandement attisé la curiosité de nombreuses études et recherches scientifiques, en vue de connaître avec précision la durabilité de la structure composite et de garantir ainsi sa fiabilité.

#### 1.2 Problématique



A fin d'évaluer quantitativement le comportement mécanique d'un composite sous sollicitation, il est important de connaître le champ de contraintes dans le composite endommagé. Le problème à résoudre en premier lieu est celui de l'élasticité et de la rigidité en fonction de la densité de fissuration sur un stratifié croisé fissuré. Comme tout problème d'élasticité, sa résolution exacte consiste à rechercher, dans une cellule élémentaire, le champ des déplacements et le champ des contraintes qui satisfont en chaque point les équations d'équilibre, les relations déformations déplacements, et les conditions de compatibilité.

En deuxième lieu, le problème à résoudre est celui du comportement du matériau composite fissuré sous l'effet de la température et l'humidité. Le modèle de Tsai [5] est utilisé pour déterminer le comportement mécanique du stratifié sous l'effet hygrothermique. Ce modèle tient compte de l'évolution de la température de transition en fonction de l'humidité.

### **1.3 Travaux effectués**

Du fait même de leur aspect hétérogène et anisotrope, également de leur processus de fabrication, les matériaux composites à matrice organique sont sujets à des endommagements différents, dans leur nature et leur mode de développement, que ceux des matériaux classiques. De manière générale l'endommagement est défini comme un ensemble de changements microstructuraux au sein du matériau qui occasionne une détérioration irréversible plus ou moins importante.

En pratique l'étude du couplage, température- humidité- état de contraintes, est souvent abordée empiriquement par la réalisation de cycles dits de vieillissements, accélérant les effets de certaines conditions de service extrême sur un élément représentatif de la structure réelle. Ces essais, même s'ils peuvent conduire à une appréciation des dommages causés par l'environnement, ne fournissent cependant aucune information sur les mécanismes mis en jeu.

E.A Adda-Bedia, Bouazza, Tounsi et Benzair [6], ont étudié la prévision de la dégradation de la rigidité dans les matériaux composites fissurés. Les résultats



obtenus montrent que l'augmentation de la densité de fissuration dans les composites  $[\theta m \setminus 90 n]_s$ , engendre une perte de rigidité considérable surtout pour une densité de fissuration supérieure à  $1 \setminus mm$ .

A. Megueni, Tounsi et Adda Bedia [1], ont étudié l'évolution du facteur de contrainte sous différentes conditions hygrothermique pour un composite vieilli. Dans un premier temps, les résultats montrent que les caractéristiques mécaniques des stratifié vieillis ont un comportement linéaire en fonction de la température et de l'humidité. Pour la modélisation, ils ont étudié le cas d'une plaque 2D modélisée à l'aide d'un code élément fini Franc2D/L, développé à l'université de Kansas (1998). Par la suite, une analyse des effets de vieillissement du composite sur le facteur d'intensité de contrainte pour un matériau fissuré et son évolution selon les conditions environnementales, a été accomplie par cette même équipe.

V. Lietard (1998) [7], examina les effets du vieillissement hygrothermique sur le processus de rupture du composite verre/époxy avec et sans chargement mécanique, les résultats montrent que l'eau absorbée par la résine, induit différents mode de rupture : rupture avec déchaussement des fibres, rupture par délaminage avec séparation des couches, rupture partielle en flexion avec délaminage et rupture franche.

J. Nairn et autres [8] soumettent deux stratifiés composites à matrice polymère,  $[0/90_2]$ , utilisées en construction supersonique par Boeing, le Dupont Avimid K3B polymer/IM7 à fibres de carbone et le PETI5/IM7 à fibres de carbone, à une expérience de vieillissement dont la température varie de  $35^\circ C$  à  $95^\circ C$ . L'augmentation d'eau a un comportement obéissant à loi de Fick, après saturation un comportement non Fckien est observé. Cette augmentation est due à l'apparition de microfissurations dans les plis à  $90^\circ$  en l'absence de tout chargement mécanique. L'eau absorbée induit des microfissurations au bout de 1000 heures à  $80^\circ C$ . On note une dégradation dans la durabilité (résistance à la rupture) pour une exposition à l'eau à température élevée.

Kim [9], considéra l'effet de température sur la propagation des fissures dans les polymères, puis examina [10] l'effet de température et d'humidité sur un système

graphite/époxyThornel 300/Namco 5208. L'expérience a été faite sur les trois stratifiés suivants :  $[02/\pm45]_{2S}$  ,  $[90/\pm45]_{2S}$  , et  $[0/\pm45/90]_{2S}$  . Les résultats révélèrent que la rigidité à des essais humides à 260°F, est 40% plus faible à la même température mais à sec, l'effet d'humidité et de température combiné, a une influence sur la dégradation de la rigidité dans les stratifiés.

Mercier [11] a traité le vieillissement en milieu humide et l'endommagement par fissuration, de matériaux composites à matrice organique (CMO). La diffusion d'eau dans le matériau (matrice époxy renforcée par des fibres de verre) a été tout d'abord analysée expérimentalement, par détermination des cinétiques d'absorption sous différentes conditions d'humidité. Des baisses de différentes propriétés mécaniques en fonction de la quantité d'eau absorbée, ont été mises en évidence et quantifiées lors d'essais expérimentaux de traction. Les mécanismes physiques à l'origine de ces modifications ont été identifiés. Un mode d'endommagement particulier, la fissuration intra laminaire, ainsi que son couplage avec l'humidité, ont aussi été étudiés expérimentalement. Des différences entre évolutions réversibles et irréversibles des propriétés ont été mises en évidence et analysées en détail.

M. Bouazza, Tounsi, Benzair et Adda Bedia [12] ont proposé un modèle mathématique basé sur la notion de la fonction de perturbation de contrainte appliquée sur les composites croisés et fissurés. Les effets hygrothermiques ont été pris en considération pour évaluer la variation du module longitudinale due aux fissurations transverses. Les résultats obtenus montrent la dépendance de la dégradation des propriétés élastiques avec la densité de fissuration et les conditions hygrothermiques.

K. Amara, Tounsi, Megueni et Adda Bedia [13], ont suivi l'évolution de la fissuration transverse dans les stratifiés croisés vieillis, vu que l'évolution et l'état saturé des fissures transverses dépendent de plusieurs paramètres comme, les épaisseurs des couches, la nature du chargement et la séquence d'empilement. Ils ont constaté également que les modèles analytiques proposés par de nombreux auteurs, permettent la détermination du module longitudinal du stratifié endommagé, en fonction de la densité de fissures. Une partie aussi importante a été visée par cette étude, elle concerne l'analyse des fissures transverses dans les stratifiés croisés

vieillis. Les propriétés mécaniques de ces matériaux sont bien affectées par les variations de température et d'humidité.

L'évolution de la rigidité en fonction de la densité de fissuration dans les composites stratifiés croisés constitués de plis unidirectionnels à fibres longues et à matrice organique soumis à des conditions de température et d'humidité variables dans le temps a été étudié par M. Khodjet-kesba [ 14 ]. Deux approches analytiques ont été utilisées pour évaluer la perte de la rigidité, la Shear-Lag et le modèle d'HASHIN. Les résultats obtenue montrent la dépendance de la réduction des caractéristiques mécaniques en fonction de la densité de fissuration et aux conditions d'environnement.

La méthode Shear-lag modifié qui prend en considération le transfert des contraintes de cisaillement et normale inter-laminaire a été utilisée par El Meiche et autres [3] pour évaluer l'effet de la fissuration transverse sur la réduction de la rigidité pour le composite hybride verre/époxy and graphite/époxy. Les résultats ont montrés la distribution des contraintes et la réduction de la rigidité relative du composite hybride dépend largement des propriétés des couches à  $90^\circ$  et  $0^\circ$ .



## **CHAPITRE 2**

### **MODELISATION DU VIEILLISSEMENT HYGROTHERMIQUE**

#### **2.1 Introduction :**

Notre étude s'inscrit résolument dans le domaine des fissurations hygrothermiques. Dans ce chapitre nous citerons dans un premier temps les effets du vieillissement hygrothermique sur les matériaux composites à matrice organique. Nous évaluerons par la suite le comportement des propriétés mécaniques, sous l'effet de la température et l'humidité.

Notre approche pour résoudre le problème reste évidemment la simulation numérique. Le modèle qui nous permettra d'introduire le vieillissement et son évolution sur ces propriétés est le modèle de Tsai [5], qui tient compte de l'évolution de la température de transition en fonction de l'humidité. Le programme en Maple (MICATSAI) est établi qui pour accomplir cette partie.

#### **2.2 Phénomène hygrothermiques :**

Les polymères et composites à matrice polymère, absorbent l'eau quand ils sont immergés ou placés dans une atmosphère humide. L'absorption de l'eau, dépend essentiellement de la nature du polymère, de la température  $T$ , et du degré hygrométrique  $HR$  ou humidité relative, (par définition,  $HR$  est le rapport de la pression de vapeur d'eau à la Pression de la vapeur saturante à la même température  $T$ ). Elle s'effectue essentiellement à travers [15]:

- a. la matrice polymère : diffusion et absorption physique de l'eau moléculaire.
- b. les microfissures : transport d'eau liquide par condensation capillaire.



c. L'interface fibre/matrice : diffusion, absorption et condensation capillaire.

La molécule d'eau étant une molécule de petites dimensions (rayon atomique 0.096 nm), peut donc aisément, se déplacer à travers le réseau moléculaire du polymère sous l'influence d'un gradient de concentration ; c'est le phénomène de diffusion et les molécules d'eau sont dites diffusantes ou non liées. La molécule d'eau étant polarisée, elle peut se fixer aux groupements hydroxyles ; c'est le phénomène d'absorption physique et les molécules d'eau sont dites liées ou piégées.

La fixation des molécules d'eau sur les chaînes moléculaires a deux conséquences majeures : la diminution de la température de transition vitreuse, et le gonflement du polymère Springer [16].

L'absorption des molécules d'eau par liaison hydrogène, affaiblit la cohésion intermoléculaire et entraîne une réduction des propriétés mécaniques, traduite par une diminution de la température de transition vitreuse. En moyenne, chaque pour-cent du taux d'humidité, provoque une chute d'environ 20° C de la température de transition vitreuse.

## **2.3 Vieillissement hygrothermique :**

### **2.3.1 Vieillissement physique –plastification :**

Les molécules d'eau peuvent s'insérer dans le réseau tridimensionnel en brisant les liaisons secondaires, type van der Waals ou liaisons hydrogène, entre les groupes polaires des chaînes macromoléculaires voisines Peyser[17]. Les groupes polaires du polymère vont se lier préférentiellement à une molécule d'eau. La rupture des liaisons entre les chaînes, qui assuraient en bonne partie la rigidité du matériau, va permettre une augmentation de mobilité des chaînes ou des segments de chaînes macromoléculaires. On parle dans ce cas de plastification. Cette mobilité accrue va affecter les propriétés mécaniques et physico-chimiques du polymère. Les propriétés en traction ou cisaillement sont les plus étudiées (module d'Young et de cisaillement) pour l'aspect mécanique, ainsi que l'évolution de la température de transition vitreuse  $T_g$ . Dans la majorité des cas,

une diminution du module d'Young et du module de cisaillement est constatée ainsi qu'une baisse de  $T_g$ .

Le phénomène est réversible. La plastification s'accompagne aussi de gonflement, qui dans le cas des composites, peuvent être responsables de décohésions fibre/matrice.

### **2.3.2 Vieillessement chimique :**

Certaines études ont montré que la masse d'un échantillon peut augmenter continuellement lorsque celui-ci est placé dans un environnement très humide. Au cours de l'absorption, les molécules d'eau peuvent remplacer les liaisons hydrogène déjà existantes par des liaisons hydrogène entre l'eau et le polymère. Le résultat de ces interactions chimiques à long terme est la dégradation de la résine et de l'interface par hydrolyse[11].

### **2.3.3 Effets de l'humidité sur les fibres de verre :**

La corrosion par l'eau peut donc créer des défauts qui constituent autant de zones de faiblesse. D'autre part, la dissolution par l'eau de certains éléments de la fibre, ou de la résine, peut créer un milieu corrosif qui accentue la dégradation du verre. Cependant, les observations mentionnées ci-dessus concernent la plupart du temps les fibres de verre seules. Les fibres dans un matériau composite sont protégées par un agent de couplage et par la résine. Une attaque chimique du verre est donc rarement mise en évidence lors d'exposition à des environnements humides ou même en immersion. Cependant, certains auteurs mettent en cause les fibres dans la baisse des propriétés mécaniques en immersion dans de l'eau à 80°C.

Les processus de dégradation invoqués sont bien l'hydrolyse des fibres et l'attaque chimique de l'agent de couplage. De même Ashbee [18] a observé, dans des composites verre- polyester, des fibres de verre sévèrement attaquées, mais après des immersions de plusieurs centaines d'heures dans l'eau bouillante, ce qui représente un vieillissement très sévère.

## **2.4 Caractérisation du matériau :**

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

Nous allons devoir choisir les modèles des différents modules qui nous permettront de faire la caractérisation de notre matériau. Le module de Young longitudinal et le coefficient de Poisson sont pris d'après les modèles correspondant à ceux issus de la loi des mélanges. Le module de Young transversal et le coefficient de Poisson, sont pris selon le modèle correspondant à celui de la loi des mélanges modifiée par Hahn décrit en référence [5]. Ce modèle a également été adopté dans les travaux de Sereir et autres [19].

Soit ci-dessous le choix du modèle semi-empirique pour l'évaluation des propriétés du composite en fonction des volumes des fibres [20].

### **2.4.1 Le module de Young dans la direction des fibres :**

$$E_x = E_m \cdot V_m + E_f x \cdot V_f \quad (2.1)$$

### **2.4.2 Le module de Young transversal :**

La relation micromécanique modifiée par Hahn [5] pour le graphite époxy T300/5208 du module de Young transversal est :



$$E_x = \frac{1+0.516\left(\frac{V_m}{V_f}\right)}{\frac{1}{E_{fy}} + \frac{0.516\left(\frac{V_m}{V_f}\right)}{E_m}} \quad (2.2)$$

#### **2.4.3 Le module de cisaillement longitudinal :**

De même la relation micromécanique modifiée par Hahn [5] pour le graphite époxy T300/5208 du module de Young transversal est :

$$G_{xy} = \frac{1+0.316\left(\frac{V_m}{V_f}\right)}{\frac{1}{G_{fx}} + \frac{0.316\left(\frac{V_m}{V_f}\right)}{G_m}} \quad (2.3)$$

$$\text{Avec } G_m = \frac{E_m}{2.(1+\nu_m)} \quad (2.4)$$

#### **2.4.4 Le coefficient de Poisson :**

$$\nu_{xy} = \nu_m.V_m + \nu_{fx}.V_f \quad (2.5)$$

La comparaison des valeurs des modules obtenues par ces modèles avec ceux donnés par Tsai [5], donne d'excellents résultats voir tableau 2.3.

### **2.5 Introduction du vieillissement sur les propriétés mécaniques du matériau et le modèle de TSAI :**

Cette partie constitue un aspect fondamental de notre recherche. Le but à travers ce qui suit est la quantification du vieillissement puis l'observation de ses effets sur les propriétés mécaniques du matériau. On va devoir présenter le modèle qui nous permettra d'introduire le vieillissement et son évolution sur ces propriétés.

Le modèle correspond à celui décrit par Tsai [5] et tient compte de l'évolution de la température de transition en fonction de l'humidité, puis l'évolution des propriétés élémentaires des fibres et de la matrice en fonction de la température et de l'humidité.



La particularité du modèle est que le vieillissement de la fibre est bien pris en considération. Cependant, la plupart des études considèrent cette dégradation comme négligeable, notamment par rapport à la dégradation de la matrice et de l'interface. L'établissement d'une loi globale à toutes les conditions de vieillissement, particulièrement la quantité d'eau absorbée, permet de relier la baisse des constants élastiques du matériau composite à une propriété physico-chimique du matériau (de la résine époxy) et faire le lien entre différentes échelles d'observations. L'aspect relationnel décrivant les mécanismes physiques à l'origine de ces évolutions est décrit ci-dessous.

### **2.5.1 Evolution de Tg au cours du vieillissement :**

Le paramètre Tg est un paramètre quantitatif du phénomène de vieillissement, c'est aussi une caractéristique importante des polymères et représente la transition entre le domaine vitreux et le domaine caoutchoutique du matériau[21]. La technique qui permet de suivre l'évolution de la température de transition vitreuse au cours du vieillissement hygrothermique est la DMTA (Differential Mechanical Thermal Analysis), Mercier [11]. Evidemment cette technique est souvent utilisée dans les études expérimentales de vieillissement, pour le suivi de Tg.

La transition vitreuse est une des caractéristiques les plus importantes des polymères, pendant laquelle le matériau passe progressivement d'un état vitreux (rigide) à un état caoutchouteux. Cette transition du second ordre s'étale sur un domaine de température de 10°C à 20°C. La température de transition vitreuse Tg est fortement influencée par la composition, l'état de cuisson de la résine mais aussi par des facteurs extérieurs telle que la présence de liquide dans le réseau moléculaire.

L'application de notre étude se fera sur le graphite époxyde T300/5208. La température de transition vitreuse à une température de référence de 22°C est de Tg=160°C, Tsai[22]. On sait que l'absorption d'humidité entraîne la diminution de la température de transition. Les observations de nombreux auteurs tel que Ghorbel [21], confirment une baisse de la Tg d'environ 20°C en humidité

relative et de 30°C en immersion. Cette température est d'autant plus décalée vers des températures plus faibles que les conditions de vieillissement sont sévères. La première partie d'analyse doit permettre de suivre l'évolution de la température de transition vitreuse  $T_g$  au cours du vieillissement. Tsai [22] n'assume qu'une absorption d'humidité induit une diminution de la température de transition d'une quantité  $gc$ :

$$T_g = T_g^o - gc \quad (2.6)$$

### **2.5.2 Température adimensionnelle :**

Tsai [22] propose la notion de la température adimensionnelle  $T^*$ , qui est un élément essentiel pour l'évaluation des caractéristiques du composite :

$$T^* = \frac{T_g - T_{opr}}{T_g - T_{rm}} \quad (2.7)$$

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

### **2.5.3 Prise en compte du vieillissement dans les propriétés de la matrice :**

Tsai [5] relie la température adimensionnelle  $T^*$ , pour déterminer empiriquement les expressions des propriétés de la matrice, en fonction de la température et de l'humidité avant et après le vieillissement, pour le carbone époxyde T300/5208.

$$\frac{E_m}{E^o_m} = (T^*)^a \quad (2.8a)$$

$$\frac{G_m}{G^o_m} = (T^*)^a \quad (2.8b)$$

$$\frac{v_m}{v^o_m} = (T^*)^a \quad (2.8c)$$

$a$  : étant une constante semi empirique [5], donnée dans le tableau 2.2.

#### **2.5.4 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.

$$\frac{E_{fx}}{E^{\circ}_{fx}} = (T^*)^f \quad (2.9a)$$

$$\frac{E_{fy}}{E^{\circ}_{fy}} = (T^*)^f \quad (2.9b)$$

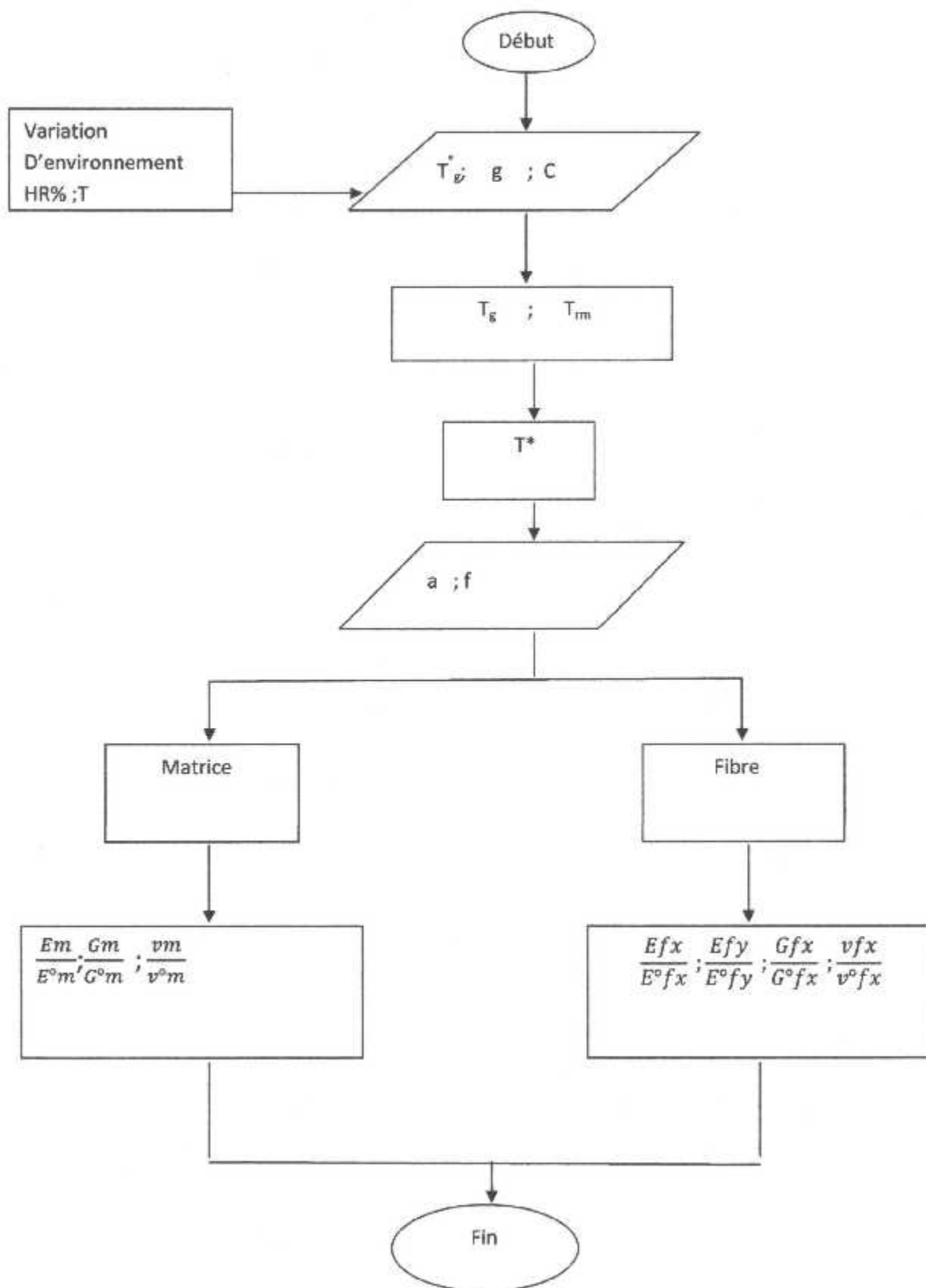
$$\frac{G_{fx}}{G^{\circ}_{fx}} = (T^*)^f \quad (2.9c)$$

$$\frac{\nu_{fx}}{\nu^{\circ}_{fx}} = (T^*)^f \quad (2.9d)$$

$f$  : étant une constante,  $a$  étant une constante semi-empirique [5], donnée dans le tableau 2.2

#### **2.5.5 Organigramme :**

On a élaboré notre programme de simulation numérique en se basant sur l'organigramme présenté ci-dessous.





**Figure 2.1 : Organigramme du calcul des propriétés vieilles par MICATSAI**

Après le choix du modèle, nous avons établi un programme en Maple qui permet l'évaluation des propriétés mécaniques lors du vieillissement hygrothermique, appelé MICATSAI .for. Ce programme correspond à l'organigramme en figure 2.1.

### **2.5.6 Propriétés du T300/5208 [15] :**

L'application de notre étude se fera sur le T300/5208. Le T300 est la fibre de carbone et le N5208 est la résine. Nous présentons ci-dessous sous forme de tableaux les caractéristiques de ce type de matériau, ainsi que les caractéristiques de la matrice époxyde et des fibres de carbone :

**Tableau 2.1 : Caractéristiques de fibres et matrice du T300/5208, [5]**

$E_{fx}(Gpa)$	$E_{fy}(Gpa)$	$\nu_{fx}$	$E_m(Gpa)$	$\nu_m$	$G_m(Gpa)$	$G_{fx}(Gpa)$	$V_f$
259	18.69	0.25	3.14	0.35	1.26	19.69	0.7

**Tableau 2.2 Caractéristiques de variation de température et d'humidité, [5]**

$T^o g(^oC)$	$Trm(^oC)$	$g(^o \frac{C}{c})$	$a$	$f$
160	22	2000	0.5	0.04

**Tableau 2.3 Propriétés du T300/5208  $Tr=22^oC$ , [5]**

	$E_x(Gpa)$	$E_y(Gpa)$	$\nu_{xy}$	$G_{xy}(Gpa)$	$\sigma_x$ ( $10^{-6}K^{-1}$ )	$\sigma_y$ ( $10^{-6}K^{-1}$ )	$\sigma_x$	$\sigma_y$
TSAI	181	10.3	0.28	7.17	0.02	22.5	0	0.6

Loi des mélanges modifiée	181.1	10.305	0.28	7.169	0.023	23.5	0	0.6
---------------------------	-------	--------	------	-------	-------	------	---	-----

**Tableau 2.4 Caractéristiques de diffusion du T300/5208,[5]**

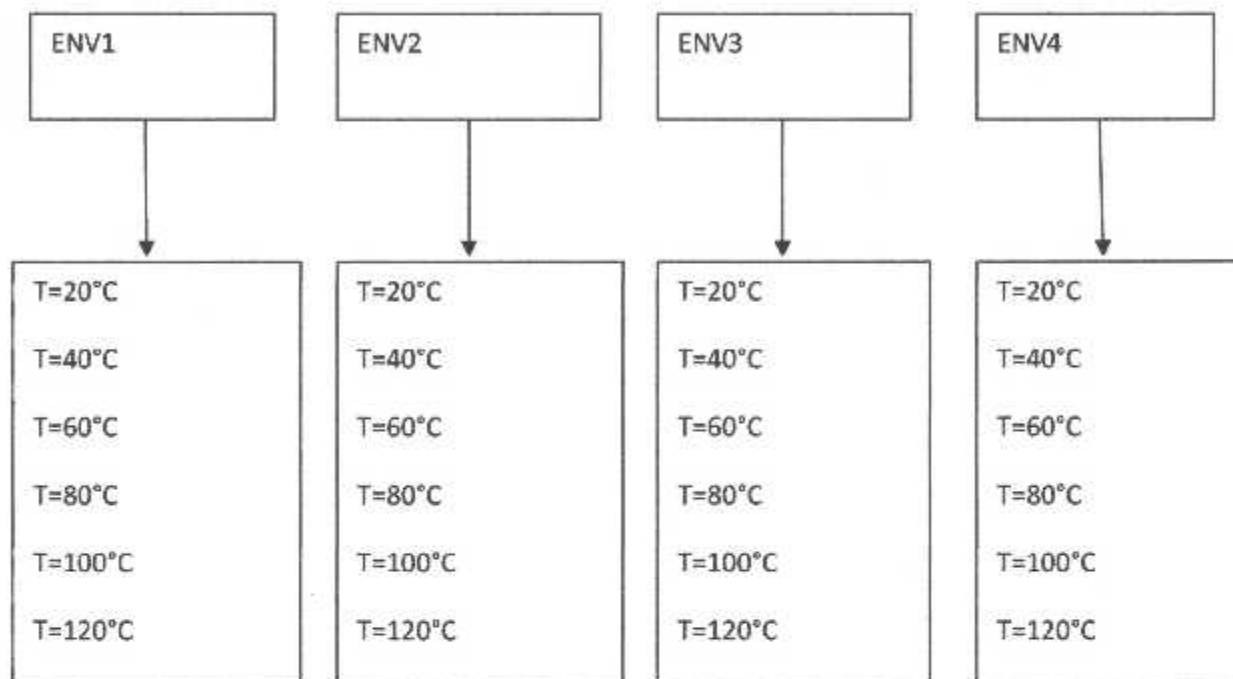
Type de matériau	température	Humidité relative	$D(mm^2/s)$	$c_{max}$
T 300/5208	20°	100	$2.27 * 10^{-8}$	1.5

### 2.5.7 Conditions de simulation :

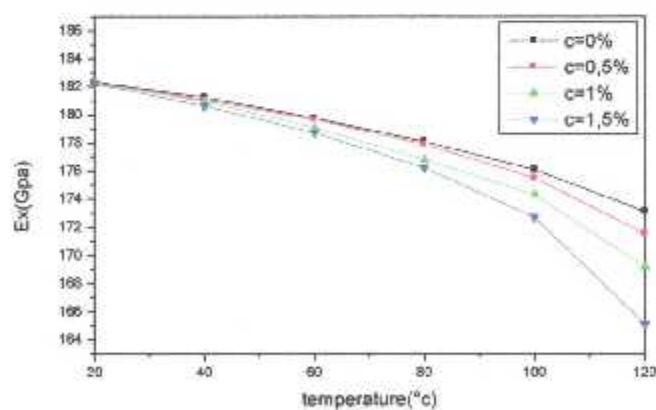
Nous choisissons quatre environnements différents en termes d'humidité relative. Chaque environnement considère des températures d'utilisation variables de 20°C à 120°C et cette dernière correspond aussi à la température de post cuisson pris par Tsai [5].

**Tableau 2.5 : Choix des environnements**

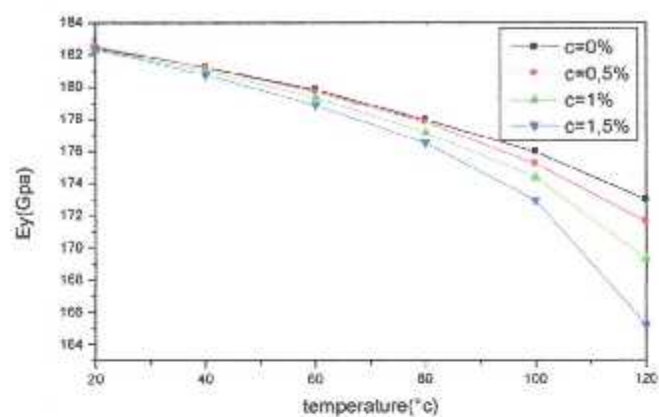
Environnement	Humidité relative	Concentration
ENV 1	HR 1= 0%	C=0
ENV 2	HR 2=33%	C=0.005
ENV 3	HR 3=66%	C=0.01
ENV 4	HR 4=100%	C=0.015



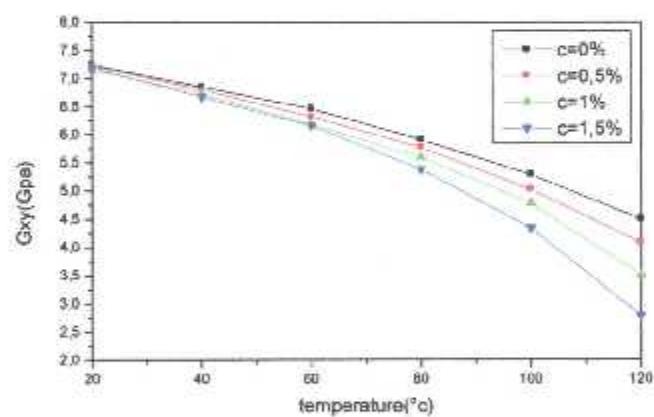
### 2.5.8 Variation des modules mécaniques :



**Figure 2.2 : Effet de la variation de température sur le module de Young longitudinal poule T300/5208 à différents niveaux de concentration.**

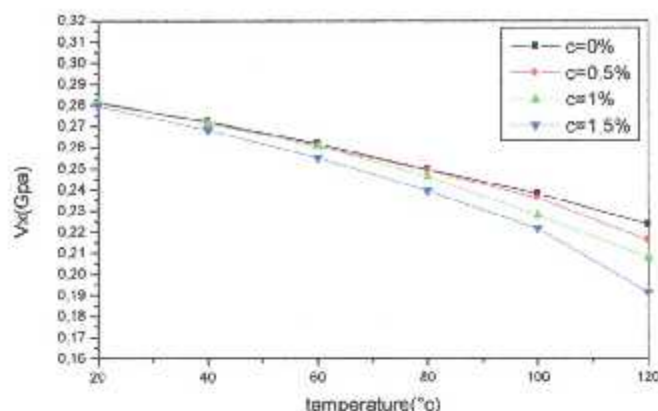


**Figure 2.3 : Effet de la variation de température sur le module de Young transversal pour le T300/5208 à différents niveaux de concentration.**



**Figure 2.4 : Effet de la variation de température sur le module de cisaillement longitudinal pour le T300/5208 à différents niveaux de concentration.**





**Figure 2.5 : Effet de la variation de température sur le coefficient de Poisson longitudinal pour le T300/5208 à différents niveaux de concentration.**

## 2.6 Interprétations :

### 2.6.1 Effets de la température :

Afin d'affiner l'analyse des effets d'humidité et de température, nous avons déterminé le taux de réduction des modules mécaniques à différentes températures pour différentes concentrations. Les figures 2.2 à 2.5 montrent clairement que les réductions du module d'élasticité transversale et le module de cisaillement plan sont amplement plus importantes que les réductions du module d'élasticité longitudinal et du coefficient de Poisson. Le module de Young longitudinal est le moins affecté.

L'augmentation de la température engendre une chute des différents modules d'élasticité; le module de Young longitudinal, le module de Young transversal, le module de cisaillement et le coefficient de Poisson, voir figures 2.2 à 2.5. Sur les différentes figures nous observons une accélération de la réduction des caractéristiques mécaniques à partir de 80°C. Le module de Young transversal et le module de cisaillement longitudinal sont les plus affectés par l'effet de température.

En fait, ces réductions représentent la chute de rigidité. Nous constatons une réduction de la rigidité transversale de l'ordre de 56% lorsque la température

atteint 120°C à une concentration initiale  $C=0.015$ . La rigidité en cisaillement se réduit considérablement aussi, elle est autour de 61% pour une température de 120°C et une concentration de  $C=0.015$ . Ces résultats sont en accord avec les obtenus dans la référence[5].

### **2.6.2 Effets de la concentration :**

Pour une même température et à différents niveaux de concentration voir tableau 2.6, pour  $T=60^{\circ}\text{C}$  et à  $C=0\%$ ,  $C=0.05\%$ ,  $C=1\%$ ,  $C=1.5\%$ , plus la concentration est élevée, plus le taux de dégradation est élevé, exemple le cisaillement longitudinal chute de 3.58 % lorsque la concentration passe de  $C=0\%$  à  $C=1.5\%$ . Le module de Young transversal quand à lui chute de 3.1% lorsque la concentration passe de  $C=0\%$  à  $C=1.5\%$ .

Le tableau 2.7 montre une comparaison à une température de 120°C des taux de dégradation des modules à différentes concentrations. La combinaison d'une température et d'un haut niveau d'humidité contribuent à réduire les propriétés mécaniques du graphite/époxyde T300/5208. L'effet de température est plus prononcé pour une concentration élevée.

L'influence de la concentration d'humidité et celle de la température sont similaires. Les tableaux des résultats montrent, que pour une concentration d'humidité donnée, plus la température est élevée plus la dégradation est importante. Les caractéristiques mécaniques les plus sensibles sont l'élasticité transversale et le cisaillement longitudinal. Ceci permet de prévoir que l'effet combiné température humidité aura une conséquence visible sur les contraintes transversales et sur le cisaillement plan.

**Tableau 2.6 : Taux de réduction des propriétés mécaniques T=60°C, C=0%,  
C=0.15%,C=1%, C=1.5%**

Conditions	Ex%	Ey%	Gxy%	vXY %
60°C,C=0%	1.41654513	9.61359376	11.38891074	6.6642201
60°C,C=0.5%	1.54185898	10.45378259	12.36480522	7.21428609
60°C,C=1%	1.69303811	11.46469627	13.53503984	7.86972382
60°C,C=1.5%	1.87915523	12.70499889	14.96465225	8.66453978

**Tableau 2.7 : Taux de réduction des propriétés mécaniques T=120°C, C=0%,  
C=0.15%,C=1%, C=1.5%**

Conditions	Ex%	Ey%	Gxy%	vXY %
120°C ,C=0%	5.12217920	33.31734193	37.76045046	20.57481815
120°C,C=0.5%	5.95285691	38.21068394	42.91190310	23.10510406
120°C ,C=1%	7.20129699	45.20230029	50.10431180	26.57025634
120°C,C=1.5%	9.47314897	56.69454191	61.50655874	31.97231014

La matrice et les interfaces fibre matrice sont les plus attaquées par l'eau, alors que les fibres semblent garder la majorité de leur intégrité. Les baisses du module transversal sont donc attribuées au phénomène de plastification de la matrice par les molécules d'eau, décrit précédemment. C'est en effet la matrice qui est sollicitée, de même le module de cisaillement GXY qui baisse de manière importante, caractérise la dégradation des liaisons au niveau de l'interface fibre matrice.

### **2.7 Validation des résultats :**

Nos résultats sont en bon accord avec les résultats obtenus par Benkhedda [15] où il apparaît communément une baisse de rigidité dans le sens transversal et en cisaillement des composites unidirectionnels. Les résultats sont aussi en bon accord avec les expérimentaux de Ghorbel [21] ; Shen et Springer [23].

Nous avons exposé un modèle qui permet la simulation du vieillissement. Les propriétés mécaniques du composite peuvent être obtenues pour n'importe quelle condition de température et d'humidité. L'interprétation physico-chimique des résultats des effets de température et d'humidité sur les propriétés mécaniques est assez complexe. Nos résultats montrent que pratiquement chaque propriété du matériau est susceptible d'être affectée par un vieillissement humide et thermique. Cependant l'aspect micro analytique ne pourra déterminer ce qui se passe au cœur du matériau. Les conditions hygrothermiques peuvent elles avoir un effet sur l'évolution des microfissures, c'est dans ce sens que l'on orientera cette étude dans les prochains chapitres.



## CHAPITRE3

### MODELISATION DE LA FISSURATION TRANSVERSE POUR UN MATERIAU HYBRIDE

#### 3.1 Introduction :

La fissuration transverse se manifeste dans les couches dont les fibres sont désorientées par rapport à la direction de sollicitation. Les fissures apparaissent dans la matrice ou à l'interface entre fibre matrice, et se propagent parallèlement aux fibres. En conséquence, la qualité de l'interface fibre matrice joue un rôle important dans le développement de la fissuration transverse. Les fissures partent le plus souvent des bords du matériau, bien que les sur-contraintes locales dues à un défaut dans la matrice puissent à l'occasion en être la cause. Les contraintes résiduelles de cuisson, dues au processus de fabrication du stratifié, peuvent également être à l'origine de la création de nouvelles fissures transverses.

La modélisation de la fissuration transverse est proposée par un schéma appelé modèle de transfert du chargement par cisaillement (Shear-lag), schéma qui est en fait l'application à la fissuration transverse de l'analyse de transfert de charge entre fibre et matrice. Ces analyses sont basées sur des hypothèses que le chargement mécanique est transféré entre les couches  $0^\circ$  et  $90^\circ$  par l'intermédiaire d'une couche fine située à l'interface entre les couches. Les modèle de transfert du chargement par cisaillement supposent que le déplacement longitudinal est constant à travers tout l'épaisseur des couches orientées à  $0^\circ$ . Ils conduisent à des contraintes de cisaillement transverse nulles. Ce modèle est modifié pour prendre en considération une couche d'adhésive entre deux couches voisine transfert les contraintes de cisaillement inter-laminaire et même les contraintes normal.

#### 3.2Analyse généralisée :

##### 3.2.1Choix des fonctions de contrainte pour un composite hybride croisé :

On considère un composite hybride croisé avec des fissurations uniformes de distance  $2s$  dans la couche à  $90^\circ$  sous chargement mécanique uni-axiale  $\sigma_x$  (Fig. 3.1). Les deux couches extérieures à  $0^\circ$  sont d'un matériau A avec une épaisseur constant  $h_1$  et la couche centrale à  $90^\circ$  est d'un matériau B avec une épaisseur  $h_2$ . Pour cela les théories suivantes ont été adoptées :

- Chaque couche est considérées homogène ;
- La distribution de la contrainte axiale dans chaque couche est uniforme à travers l'épaisseur ;
- La largeur du stratifié est suffisamment grande pour que la distribution des contrainte soit indépendante d'elle.

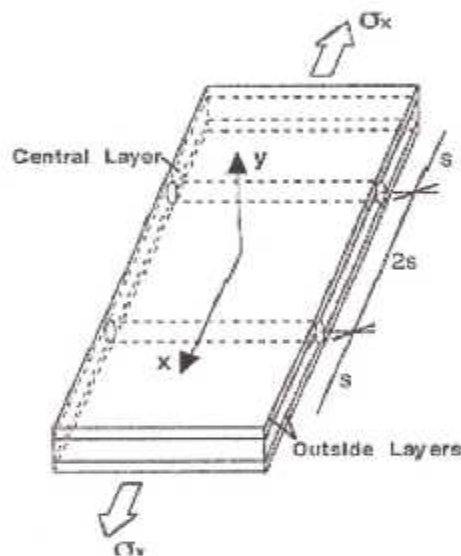


Figure 3.1 fissuration transverse et cellule élémentaire

On Suppose que la fonction de contrainte  $F^{(i)}(x,y)$  pour chaque couche peut être prise comme suite :

$$F^{(i)}(x,y) = f^{(i)}(x)g^{(i)}(y) \quad (3.1)$$

$$g^{(1)}(y) = A^{(1)}(y-h)^2 + B^{(1)}(y-h) + C^{(1)} \quad (3.2)$$

$$g^{(2)}(y) = A^{(2)}y^2 + B^{(2)}y + C^{(2)} \quad (3.3)$$

Où  $(i=1,2)$  dénoté la couche  $0^\circ$  et  $90^\circ$  et  $h$  est la moitié de l'épaisseur du stratifié.

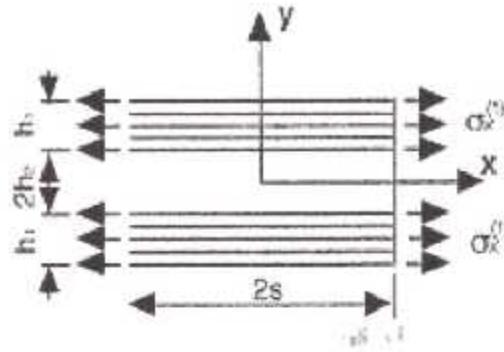


Figure 3.2 Système de coordonnées du modèle analytique.

À partir d'Eq. (1), les expressions des contraintes dans chaque couche sont obtenue par :

$$\sigma_x^{(i)} = \frac{\partial^2 F^{(i)}}{\partial y^2} \quad (3.4)$$

$$\sigma_y^{(i)} = \frac{\partial^2 F^{(i)}}{\partial x^2} \quad (3.5)$$

$$\tau_{xy}^{(i)} = -\frac{\partial^2 F^{(i)}}{\partial x \partial y} \quad (3.6)$$

Les expressions ci-dessus des contraintes peuvent satisfaire automatiquement l'équation d'équilibre dans l'absence des forces dans le corps :

$$\frac{\partial \sigma_x^{(i)}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}^{(i)}}{\partial y} = 0 \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}^{(i)}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y^{(i)}}{\partial y} = 0 \quad (3.8)$$

L'équilibre global du stratifié exige que :

$$\sigma_x^{(1)} h_1 + \sigma_x^{(2)} h_2 = \sigma_x h \quad (3.9)$$

Les conditions limites, de symétrie et de la continuité illustrée à la Fig. 3.2 donnent :

$$\tau xy^{(1)} = 0 \quad \text{à} \quad y=h \quad (3.10)$$

$$\sigma y^{(1)} = 0 \quad \text{à} \quad y=h \quad (3.11)$$

$$\tau xy^{(2)} = 0 \quad \text{à} \quad y=0 \quad (3.12)$$

$$\tau xy^{(1)} = \tau xy^{(2)} \quad \text{à} \quad y=h_2 \quad (3.13)$$

$$\sigma y^{(1)} = \sigma y^{(2)} \quad \text{à} \quad y=h_2 \quad (3.14)$$

$$\sigma x^{(2)} = 0 \quad \text{à} \quad x=\pm s \quad (3.15)$$

$$\tau xy^{(1)} = \tau xy^{(2)} = 0 \quad \text{à} \quad x=0 \quad \text{ou} \quad x=\pm s \quad (3.16)$$

$$u^{(1)} = u^{(2)} = 0 \quad \text{à} \quad x=0 \quad (3.17)$$

$$v^{(1)} = 0 \quad \text{à} \quad y=0 \quad (3.18)$$

On remplace les conditions des Eqs.(3.10) à (3.18) dans les expressions des composantes de contraintes, on aura les équations suivantes :

$$A^{(1)} = 1 \quad (3.19)$$

$$B^{(1)} = 0 \quad (3.20)$$

$$C^{(1)} = 0 \quad (3.21)$$

$$A^{(2)} = 1 \quad (3.22)$$

$$B^{(2)} = 0 \quad (3.23)$$

$$C^{(2)} = -h_2^2 h \quad (3.24)$$

$$[f^{(1)}(x)]' = -\frac{h_2}{h_1} [f^{(2)}(x)]' \quad (3.25)$$

$$[f^{(1)}(x)]'' = -\frac{h_2}{h_1} [f^{(2)}(x)]'' \quad (3.26)$$

Compte tenu de l'équation de self-équilibre (eqn(7)), eqns (11) deviennent :

$$f^{(1)}(x) = -\frac{h_2}{h_1} f^{(2)}(x) + \frac{h}{2h_2} \sigma x \quad (3.27)$$

A partir de l'analyse précédente, on peut conclure que les fonctions de deux contraintes peuvent être exprimées en termes de fonction indéterminée  $f^{(2)}(x) = \varphi(x)$ . Les éléments de la contrainte de la couche de 0° sont :



$$\sigma x^{(1)} = 2 \left[ -\frac{h^2}{h_1} \phi(x) + \frac{h}{2h_1} \sigma x \right] \quad (3.28)$$

$$\sigma y^{(1)} = (y - h)^2 \left[ -\frac{h^2}{h_1} \phi''(x) \right] \quad (3.29)$$

$$\tau xy^{(1)} = -2(y - h) \left[ -\frac{h^2}{h_1} \phi'(x) \right] \quad (3.30)$$

Les éléments de la contrainte de la couche de  $90^\circ$  sont :

$$\sigma x^{(2)} = 2\phi(x) \quad (3.31)$$

$$\sigma y^{(2)} = (y^2 - hh_2) \phi''(x) \quad (3.32)$$

$$\tau xy^{(2)} = -2y \phi'(x) \quad (3.33)$$

Les déformations dans les couches  $0^\circ$  et  $90^\circ$  couches sont dérivées par :

$$\varepsilon x^{(1)} = \frac{1}{E_x^{(1)}} \sigma x^{(1)} - \frac{\nu_{xy}^{(1)}}{E_x^{(1)}} \sigma y^{(1)} \quad (3.34)$$

$$\varepsilon y^{(1)} = \frac{1}{E_y^{(1)}} \sigma y^{(1)} - \frac{\nu_{xy}^{(1)}}{E_x^{(1)}} \sigma x^{(1)} \quad (3.35)$$

$$\varepsilon x^{(2)} = \frac{1}{E_x^{(2)}} \sigma x^{(2)} - \frac{\nu_{xy}^{(2)}}{E_x^{(2)}} \sigma y^{(2)} \quad (3.36)$$

$$\varepsilon y^{(2)} = \frac{1}{E_y^{(2)}} \sigma y^{(2)} - \frac{\nu_{xy}^{(2)}}{E_x^{(2)}} \sigma x^{(2)} \quad (3.37)$$

A partir de l'Eqs. (3.34) à (3.37) et les relations contraintes-déplacement, les champs de déplacement sont obtenus, On impose les conditions aux limites en Eqs. (3.17) et (3.18), on aura comme suit:

$$u^{(1)} = \frac{2}{E_x^{(1)}} \left[ -\frac{h^2}{h_1} \int \phi(x) dx + \frac{h}{2h_1} \sigma x \right] - \frac{\gamma_{xy}^{(1)}}{E_x^{(1)}} \left[ -\frac{h^2}{h_1} \int \phi''(x) dx \right] (y-h)^2 \quad (3.38)$$

$$v^{(1)} = -\frac{2\gamma_{xy}^{(1)}}{E_x^{(2)}} \left[ -\frac{h^2}{h_1} \phi(x) + \frac{h}{2h_1} \sigma x \right] y + \frac{1}{E_y^{(1)}} \left[ -\frac{h^2}{h_1} \phi''(x) \right] \frac{(y-h)^3}{3} + f(x) \quad (3.39)$$

$$u^{(2)} = \left[ \frac{2}{E_x^{(2)}} \int \phi(x) dx - \frac{\gamma_{xy}^{(2)}}{E_x^{(2)}} \right] \left[ \int \phi''(x) dx \right] (y-h)^2 \quad (3.40)$$

$$v^{(2)} = -\frac{2\gamma_{xy}^{(2)}}{E_x^{(2)}} \phi(x) y + \frac{1}{E_x^{(2)}} \left[ \phi''(x) \right] \left( \frac{1}{3} y^3 - h^2 h y \right) \quad (3.41)$$

Dans Eq. (3.41),  $f(x)$  est une fonction qui est déterminée par les conditions de continuité à l'interface.

### 3.2.2 Le modèle Shear-lag pour le stratifié hybride :

Comme déjà modélisé par Zhang [ 4 ], Nous proposons l'existence d'une couche de résine inter-laminaire avec une épaisseur  $d$  qui sépare la couche extérieure et centrale (voir Fig. 3.3).

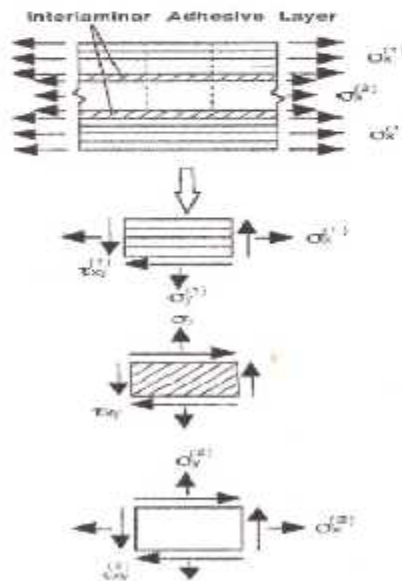


Figure 3.3 Représentation des contraintes dans les différentes couches.

On obtient les expressions de la déformation de la couche adhésive à partir de la déformation angulaire :

$$\bar{\varepsilon}_y = \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \approx \frac{v_1 - v_2}{d} \quad (3.42)$$

$$\bar{\gamma}_{xy} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \approx \frac{u_1 - u_2}{d} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_1}{\partial x} + \frac{\partial v_2}{\partial x} \right) \quad (3.43)$$

Où  $u_1$  et  $v_1$  sont les déplacements à l'interface entre la couche extérieure et la couche d'adhésive, et  $u_2$  et  $v_2$  sont les déplacements à l'interface entre la couche centrale et la couche adhésive. De la relation contrainte/déformation, les contraintes inter-laminaire sont :

$$\sigma_y = E \frac{v_1 - v_2}{d} \quad (3.44)$$

$$\tau_{xy} = G \left[ \frac{u_1 - u_2}{d} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_1}{\partial x} + \frac{\partial v_2}{\partial x} \right) \right] \quad (3.45)$$

Où  $E$  et  $G$  sont les modules élastiques de la couche d'adhésive isotrope inter-laminaire. Mettrons l'Eqs. (3.39) et (3.41) dans l'équation (3.44) et  $y = h_2$ , la fonction  $f(x)$  est trouvé. Incorporer ensuite Eqs. (3.38) à (3.41) et (3.45), nous obtenons :

$$\tau_{xy} = G \left[ \frac{u_1 - u_2}{d} + \frac{\partial v_2}{\partial x} + \frac{d}{2E} \frac{\partial \sigma_y}{\partial x} \right] \quad (3.46)$$

Remplaçons Eqs. (3.38) à (3.41) et (3.29) ou (3.32) dans l'équation (3.46) et  $y = h_2$ , nous obtiendrons :

$$A\phi'''(x) + B\phi'(x) + C \int \phi(x) dx = DX \quad (3.47)$$

Où

$$A = \frac{G}{E_{y^{(2)}}} \left( \frac{2}{3} h_2^3 + h_1 h_2^2 \right) + \frac{d}{2E} G h_1 h_2 \quad (3.48)$$

$$B = \frac{2\gamma_{xy}^{(2)}}{E_{x^{(2)}}} G h_2 - \left( \frac{\gamma_{xy}^{(1)}}{E_{x^{(1)}}} - \frac{\gamma_{xy}^{(2)}}{E_{x^{(2)}}} \right) \frac{G}{d} h_1 h_2 - 2h_2 \quad (3.49)$$

$$C = \frac{2G}{d} \left( \frac{1}{E_{x^{(1)}}} \frac{h_2}{h_1} + \frac{1}{E_{x^{(2)}}} \right) \quad (3.50)$$

$$D = \frac{\sigma}{d} \left[ \frac{1}{E_x^{(1)}} \frac{h}{h_1} \sigma x \right] \quad (3.51)$$

Dérivons l'Eq. (3.47) par rapport à  $x$  et définissant  $\xi = B / A$ ,  $\eta = c/a$  et  $\theta = D/A$ , le résultat devient :

$$\phi'''' + \xi \phi'' + \eta \phi = \theta \quad (3.52)$$

La solution de l'équation (3.52) se trouve en résolvant l'équation caractéristique suivante :

$$\lambda^4 + \xi \lambda^2 + \eta = 0 \quad (3.53)$$

Pour le stratifié hybride, les quatre racines de l'Eq. (3.53) sont toujours complexes et la solution de  $\lambda$  est :

$$\lambda = \pm(a \pm bi) \quad (3.54)$$

Où  $a$  et  $b$  sont positifs et exprimée par :

$$a = \eta^{1/4} \cos \frac{\beta}{2} \quad (3.55)$$

$$b = \eta^{1/4} \sin \frac{\beta}{2} \quad (3.56)$$

$$\hat{a} = \arctan \sqrt{\left(\frac{4\eta}{\xi^2} - 1\right)} \quad (3.57)$$

On voit que la solution  $\lambda$  est indépendante de l'espacement des fissures. Notant  $\phi(x)$  est une fonction de même, la solution de l'équation (3.52) est :

$$\phi(x) = M \cosh(ax) \cos(bx) + N \sinh(ax) \sin(bx) + \frac{D}{c} \quad (3.58)$$

On respecte les conditions aux limites (Eqs. (3.15) et (3.16)),  $M$  et  $N$  sont donnés par :

$$M = \frac{a \cosh(as) \sin(bs) + b \sinh(as) \cos(bs)}{\Delta} \left( -\frac{D}{c} \right) \quad (3.59)$$



$$N = \frac{a \sinh(as) \cos(bs) + b \cosh(as) \sin(bs)}{\Delta} \left(\frac{D}{c}\right) \quad (3.60)$$

Où  $\Delta$  est :

$$\Delta = \frac{1}{2} [b \sinh(2as) + a \sin(2bs)] \quad (3.61)$$

Les fonctions de contraintes ont été déterminées et garantie l'équation d'équilibre, conditions aux limites et continuité de la traction à l'interface. Dans ce modèle, nous utilisons le concept que la couche d'adhésive inter-laminaire a une épaisseur de deux fois le diamètre de la fibres [25,26], parce que le diamètre de la fibre est très petit et les contraintes inter-laminaire ont des valeurs limitées, les valeurs de  $(v_1 - v_2)$  dans l'équation (3.44) et pour  $(u_1 - u_2)$  dans l'équation (3.45) sont proches de zéro. Cela signifie que le modèle de diffusion de cisaillement peut assurer l'approximation du déplacement à l'interface.

### 3.2.1 Expressions des contraintes dans le stratifié hybride :

A partir d'Eqs. (3.50) et (3.51), on a :

$$\frac{D}{c} = \frac{1}{2} (\sigma_{xm0}^{(2)} + \sigma_{xt0}^{(2)}) \quad (3.62)$$

Où  $\sigma_{xm0}^{(2)}$  est la contrainte mécanique dans la couche de  $90^\circ$  pour le stratifié non endommagé (c a d.  $s \rightarrow \infty$ ) qui peut être trouvée par la théorie classique des stratifier [28]

$$\sigma_{xm0}^{(2)} = \frac{E_x^{(2)}}{E_0} \sigma_x \quad (3.63)$$

Où  $E_0$  est le module d'élasticité du stratifié non endommagé

$$E_0 = \frac{E_x^{(1)} h_1 + E_x^{(2)} h_2}{h} \quad (3.64)$$

Appliquer l'expression de la fonction  $\phi(x)$  et définissant  $\delta = h_2/h_1$  les expressions des contraintes de la couche de  $0^\circ$  et  $90^\circ$  sont :

$$\sigma_x^{(1)} = \sigma_{xm0}^{(1)} \left( 1 + \frac{E_x^{(2)} \delta}{E_x^{(1)} \Delta} \{ [a \cosh(as) \sin(bs) + b \sinh(as) \cos(bs)] \cosh(ax) \cos(bx) - [a \sinh(as) \cos(as) - b \cosh(as) \sin(bs)] \sinh(ax) \sin(bx) \} \right) \quad (3.65)$$

$$\sigma_y^{(1)} = -\frac{\delta}{2\Delta} (\sigma_{xm0}^{(2)}) (a^2 + b^2) (y - h)^2 \{ \sinh(as) \cos(bs) [a \sinh(ax) \sin(bx) + b \cosh(ax) \cos(bx)] - \cosh(as) \sin(as) [a \cosh(ax) \cos(bx) - b \sinh(ax) \sin(bx)] \} \quad (3.66)$$

$$\tau_{xy}^{(1)} = \frac{\delta}{\Delta} (\sigma_{xm0}^{(2)}) (a^2 + b^2) (y - h) \{ \sinh(as) \cos(bs) \cosh(ax) \sin(ax) - \cosh(as) \sin(bs) \sinh(ax) \cos(bx) \} \quad (3.67)$$

$$\sigma_x^{(2)} = (\sigma_{xm0}^{(2)}) \left( 1 + \frac{1}{\Delta} \{ [a \sinh(as) \cos(bs) - b \cosh(as) \sin(bs)] \sinh(ax) \sin(bx) - [a \cosh(as) \sin(bs) + b \sinh(as) \cos(bs)] \cosh(ax) \cos(bx) \} \right) \quad (3.68)$$

$$\sigma_y^{(2)} = \frac{1}{2\Delta} (\sigma_{xm0}^{(2)}) (a^2 + b^2) (y^2 - h^2) \{ \sinh(as) \cos(bs) [a \sinh(ax) \sin(bx) + b \cosh(ax) \cos(bx)] - \cosh(as) \sin(bs) [a \cosh(ax) \cos(bx) - b \sinh(ax) \sin(bx)] \} \quad (3.69)$$

$$\tau_{xy}^{(2)} = -\frac{1}{\Delta} (\sigma_{xm0}^{(2)}) (a^2 + b^2) y \{ \sinh(as) \cos(bs) \cosh(ax) \sin(bx) - \cosh(as) \sin(bs) \sinh(ax) \cos(bx) \} \quad (3.70)$$

De même dans l'Eq. (3.63),  $\sigma_{xm0}^{(1)}$  est la contrainte mécanique pour la couche à  $0^\circ$  du stratifié non endommagé :

$$\sigma_{xm0}^{(1)} = \frac{E_x^{(1)}}{E_0} \sigma_x \quad (3.71)$$

### 3.2.2 Réduction de la rigidité :

A partir des résultats précédents, la réduction de la rigidité de stratifiés peut être développée pour le cas d'un stratifié hybride. La déformation axiale moyenne  $\epsilon_x$ ,

entre deux fissures voisines avec un espacement de  $2s$ , qui est dénommé la déformation appliquée et justement mesurée sur la surface laminée par des expériences, est donnée par :

$$\varepsilon_x = \frac{\int_0^s \varepsilon_{xm^{(1)}} dx}{s} \text{ ou } y=h \quad (3.72)$$

A partir de la relation contrainte/déformation et les expressions des contraintes mécaniques dans l'Eq. (3.65) à (3.67) on obtient :

$$\varepsilon_x^{(1)} = \frac{\sigma_{xm0}^{(1)}}{E_x^{(1)}} \left( 1 + \frac{E_x^{(2)} \delta}{E_x^{(1)} \Delta} \{ [a \cosh(as) \sin(bs) + b \sinh(as) \cos(bs)] \cosh(ax) \cos(bx) - [a \sinh(as) \cos(bs) - b \cosh(as) \sin(bs)] \sinh(ax) \sin(bx) \} \right) \quad (3.73)$$

$$\sigma_x = \frac{E_0}{1 + \frac{E_x^{(2)} \delta}{E_x^{(1)} \Delta} \frac{2ab}{s(a^2 + b^2)} [\cosh^2(as) \sin^2(bs) + \sinh^2(as) \cos^2(bs)]} \varepsilon_x \quad (3.74)$$

$$\frac{E_x}{E_0} = \frac{1}{1 + \frac{E_x^{(2)} \delta}{E_x^{(1)} \Delta} \frac{2ab}{s(a^2 + b^2)} [\cosh^2(as) \sin^2(bs) + \sinh^2(as) \cos^2(bs)]} \quad (3.75)$$

## **CHAPITRE 4**

### **SUMILATION ET RESULTATS DES STRATIFIES HYBRIDES FISSURES AVEC CHARGEMENT MECANIQUE**

#### **4.1 Introduction**

A fin d'évaluer quantitativement le comportement mécanique d'un composite sous sollicitation, il est important de connaître le champ de contraintes et l'évolution du module de Young dans le composite endommagé. Nous nous intéressons à la fissuration des couches transverses représentée par des fissures planes de normale parallèle à la direction de traction.

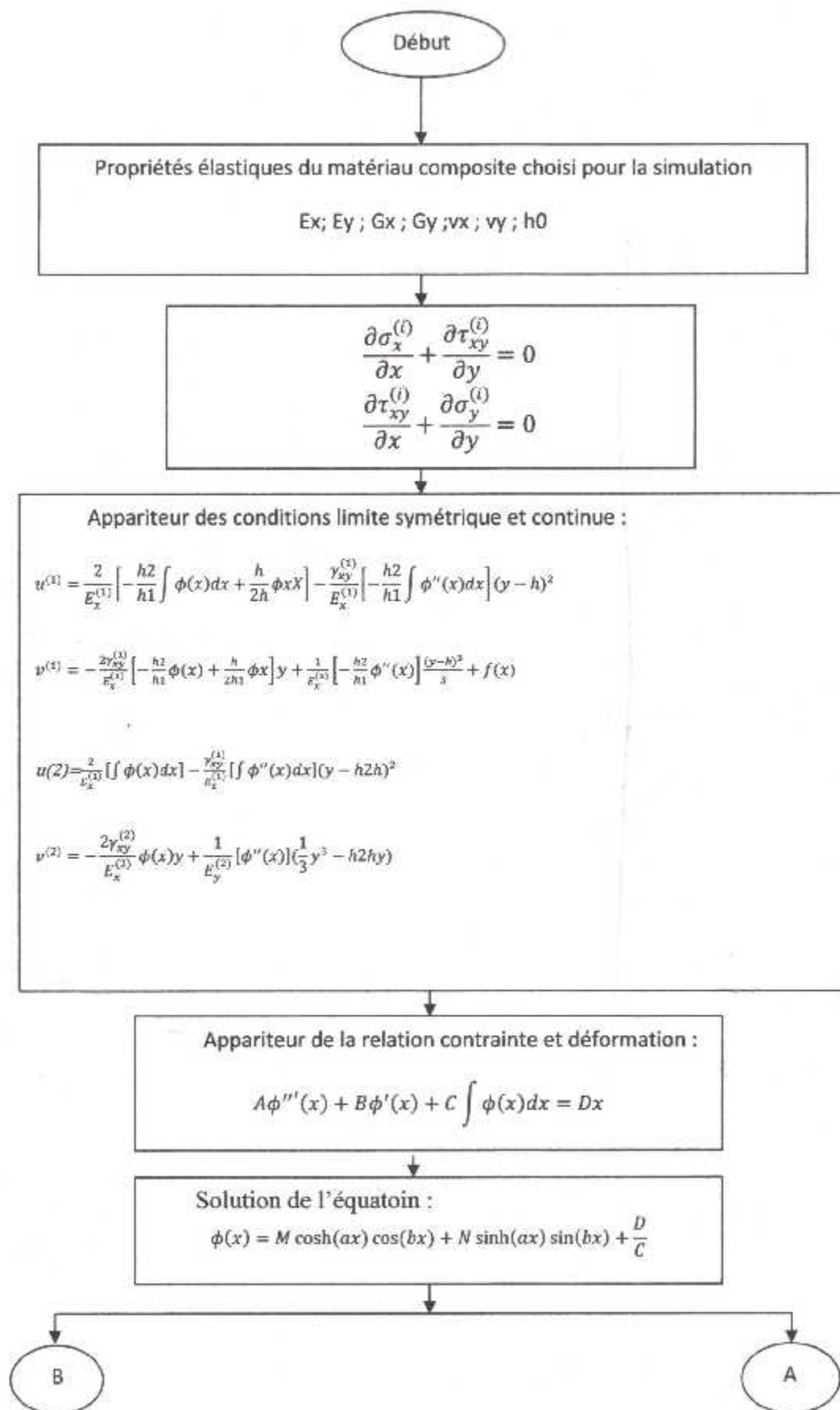
Premièrement, nous représentons les différents champs de contrainte suivant la longueur des stratifiés en utilisant le modèle Shear-lag modifié proposé par Zhang [4].

Deuxièmement, une étude du module de Young longitudinal en fonction de la densité des fissures transverses pour les modèles présentés précédemment est faite. Une représentation comparative entre ces modèles avec l'expérimental est établie.

#### **4.2 Organigramme**

Pour représenter le comportement du matériau composite fissuré soumis à une traction semi axiale, on a élaboré le programme MAPLE en se basant sur le modèle cités précédemment. Notre programme est décrit à travers l'organigramme présenté ci-dessous





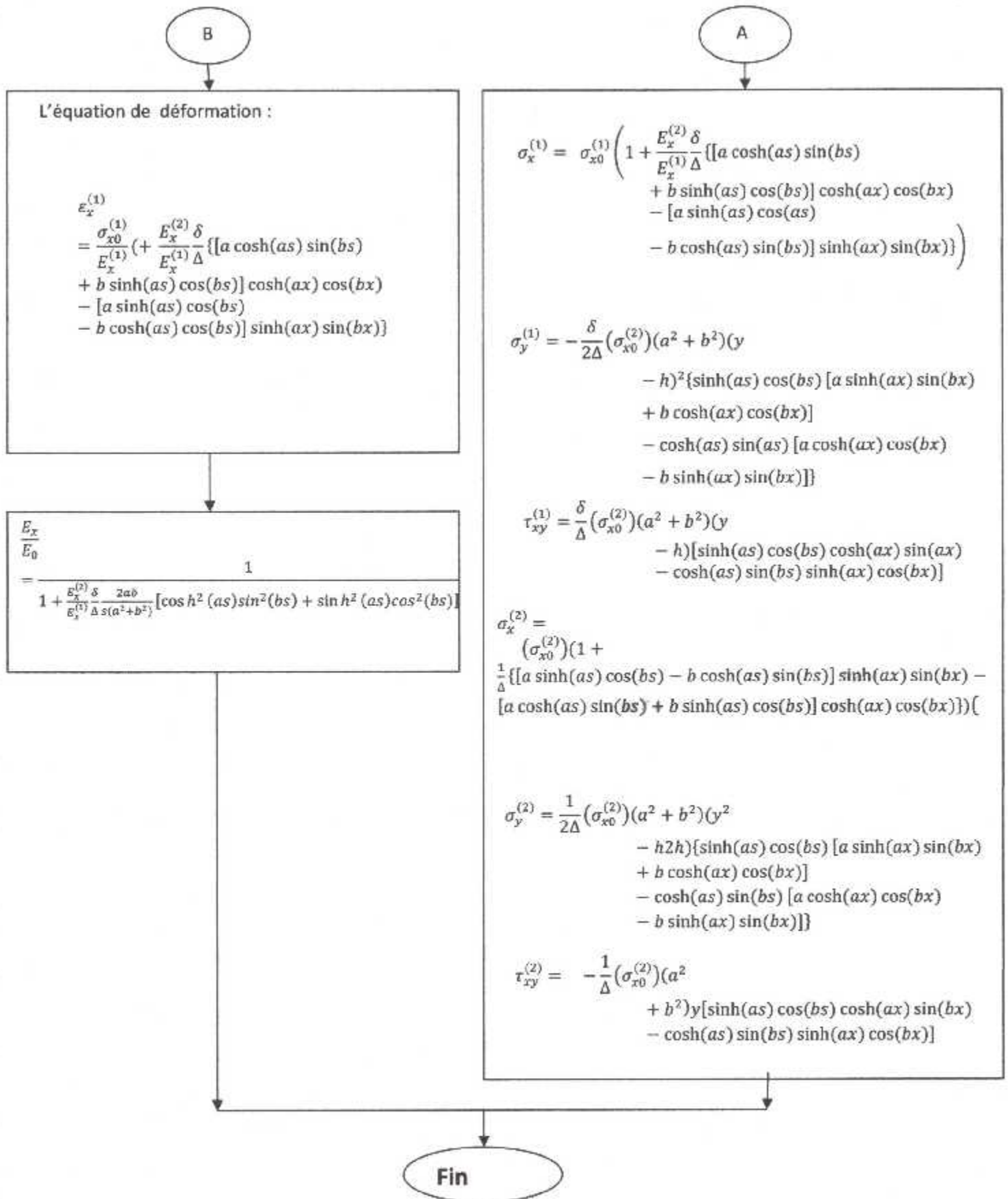


Figure 4.1 Organigramme du MICAFISS

### **4.3 Choix du matériau de simulation**

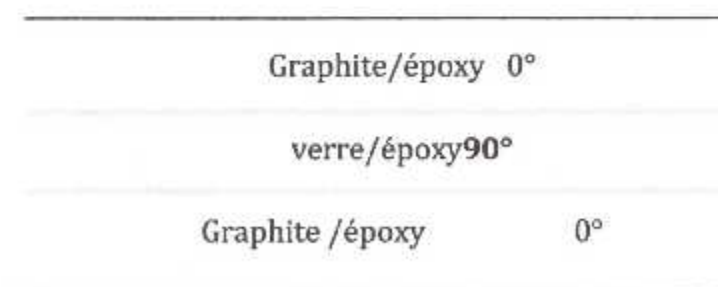
Les matériaux composites choisis pour la simulation numérique sont : graphite/époxy, glass/époxy et Hybride avec les propriétés élastiques (voir tableau 4.1) [29, 30]. La propriété du la résine qui représente l'adhésive entre les couches  $0^\circ$  et  $90^\circ$  sont [28] :  $E=3.45$  GPa,  $G=1.28$  GPa et  $\nu=0.3$ .

Propriété mécanique	graphite /époxy[29]	glass /époxy [30]
Ex	144.8 GPa	44.73 GPa
Ey	9.58 GPa	12.76 GPa
Gx	4.79 GPa	5.8 GPa
Gy	4.2 GPa	4.49 GPa
Vx	0.31	0.297
Vy	0.4	0.42
h0	0.127 mm	0.127 mm

**Tableau 4.1 : Propriétés élastiques des matériaux**

#### **Pour le cas Hybride**

La configuration du stratifié hybride est représentée ci-dessous (voir figure 4.2) avec : la couche (1) est le graphite/époxy avec l'orientation des fibres à  $0^\circ$  et la couche (2) est le verre/époxy avec l'orientation des fibres à  $90^\circ$ .



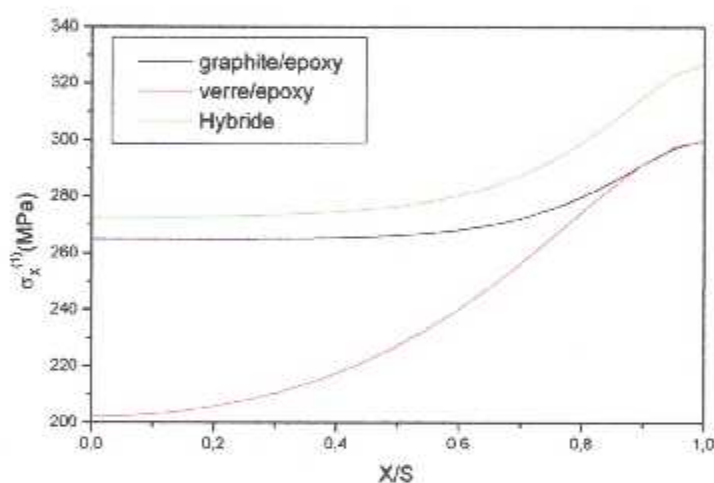
**Figure 4.2 : Configuration du stratifié hybride**

#### **4.4 Distribution des contraintes sous chargement mécanique**

A travers les résultats présentés dans les figures 4.3- 4.11 représentant les distributions des contraintes longitudinale, transversale et la contrainte de cisaillement à l'interface entre les couches  $0^\circ$  et  $90^\circ$  et cela pour différents matériaux (verre/époxy, graphite/époxy et Hybride), différentes densité des fissurations ( $s=0.5$  mm ,  $s=1$  mm et  $s=2$  mm) et différentes rapport d'épaisseur ( $\delta =1$  ,  $\delta =2$  et  $\delta =3$  ). La charge axiale appliqué est égale à ( $\sigma_x = 100$  MPa).

##### **4.4.1 Distribution de la contrainte longitudinale dans la couche $0^\circ$**

###### **a) Comparaison entre les trois matériaux composites**

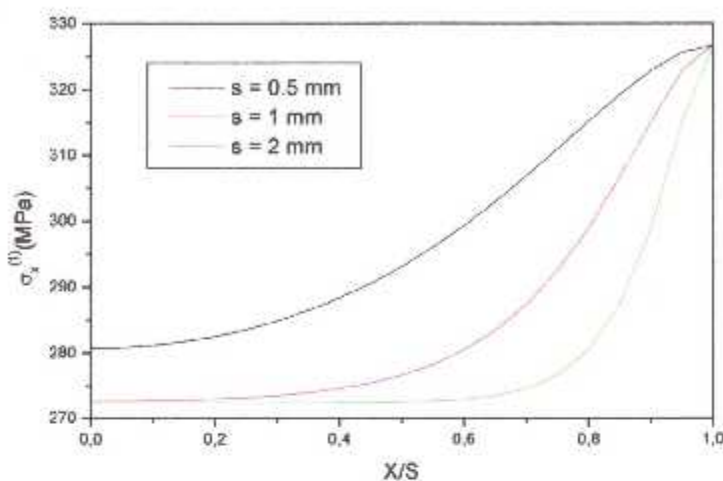


**Figure 4.3 : Distribution de la contrainte Inter-laminaire à l'interface  $0/90$  dans la couche  $0^\circ$  pour différents stratifiés  $[0/90_2]_s$  avec  $S=1$ mm.**

Fig. 4.3 représente la contrainte longitudinale à l'interface  $0/90$  pour les trois différents matériaux (verre/époxy, graphite/époxy et hybride) pour le stratifié  $[0/90_2]_s$  et une charge axiale appliquée ( $\sigma_x = 100$  MPa). La contrainte longitudinale pour le stratifié graphite/époxy donne une distribution entre verre/époxy et Hybride. On note une contrainte maximale à l'interface du plan de fissure ( $X/S=1$ ).



### **b)- Influence de la densité de fissuration pour un stratifié hybride**

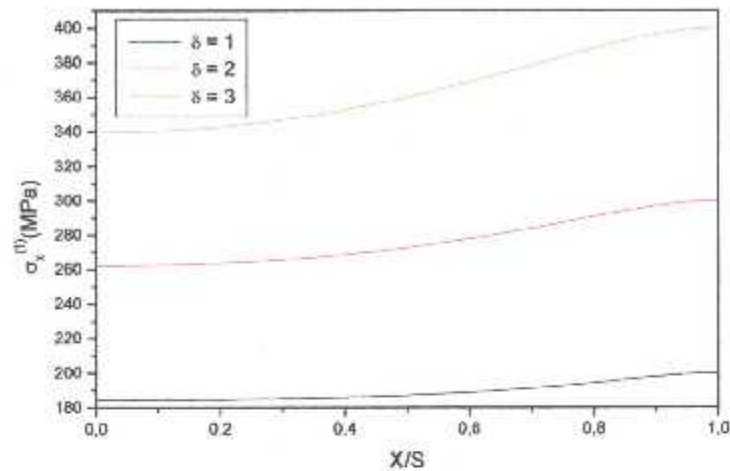


**Figure 4.4 : Distribution de la contrainte inter-laminaire à l'interface 0/90 dans la couche  $0^\circ$  pour le stratifié  $[0/90_2]_s$  pour différents densités de fissuration.**

On note une augmentation de la contrainte longitudinale à l'interface 0/90 dans la couche  $0^\circ$  pour le stratifié  $[0/90_2]_s$  avec l'augmentation de la densité de fissuration (c a d avec  $S$  petit). Au plan de fissure on a la même contrainte longitudinale pour les différentes densités de fissures.

### **c)- influence du rapport d'épaisseur pour un stratifié hybride**

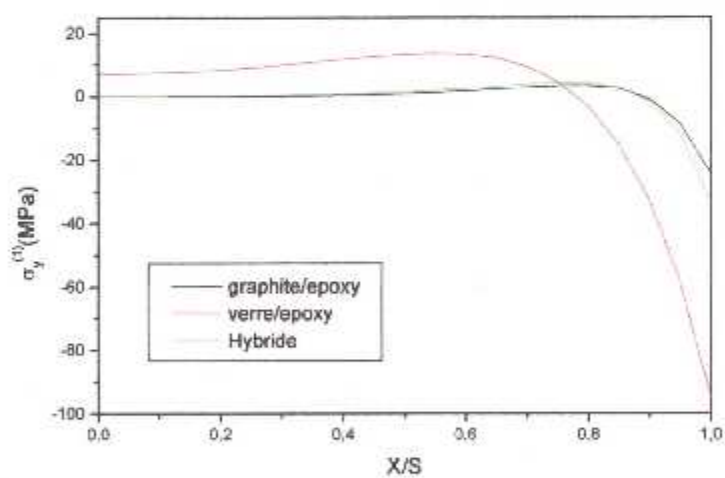
Avec l'augmentation du rapport d'épaisseur (c a d le nombre de couche à  $90^\circ$ ), on remarque une augmentation de la contrainte longitudinale à l'interface 0/90 pour un stratifié hybride avec  $S=0.5$  mm (figues 4.5).



**Figure 4.5 : Distribution de la contrainte inter-laminaire à l'interface 0/90 dans la couche 0° pour différents rapport d'épaisseur et S=0.5mm.**

#### 4.4.2 Distribution de la contrainte transversale

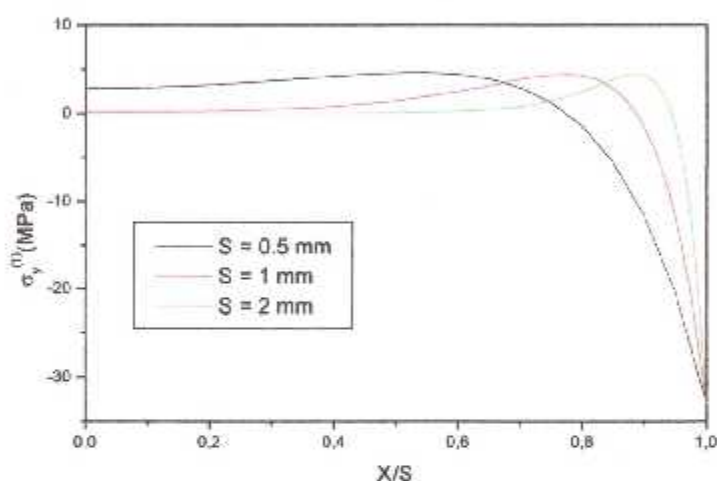
##### a) Comparaison entre les trois matériaux composites



**Figure 4.6 : Distribution de la contrainte normale à l'interface 0/90 pour différents stratifiés  $[0/90_2]_s$  avec S=1mm.**

La contrainte normale à l'interface entre les couches 0/90 pour différents stratifiés  $[0/90_2]_s$  est représentée dans la figure 4.6. On observe que la contrainte normale à l'interface est en compression et maximale lorsque on est au plan de fissure c a d  $x/s=1$ . On remarque aussi que le stratifié graphite/époxy et hybride ont la même distribution.

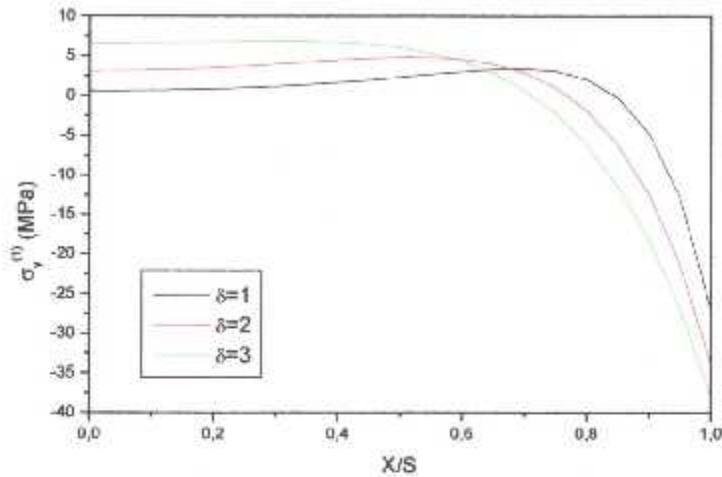
### **b)- Influence de la densité de fissuration pour un stratifié hybride**



**Figure 4.7 : Distribution de la contrainte normale à l'interface 0/90 pour un stratifié hybride et différents densité de fissures avec  $\delta = 2$ .**

Avec l'augmentation de la densité de fissuration (c a d  $S$  petit) on remarque que la contrainte normale à l'interface 0/90 existe même loin du plan de fissure (fig. 4.7). Par contre presque la même contrainte normale est observée pour différentes densité de fissuration et cela au plan de fissure.

### **c)- Influence du rapport d'épaisseur pour un stratifié hybride**



**Figure 4.8 : Distribution de la contrainte normale à l'interface 0/90 pour un stratifié hybride et différents rapports d'épaisseur avec  $S = 0.5$  mm.**

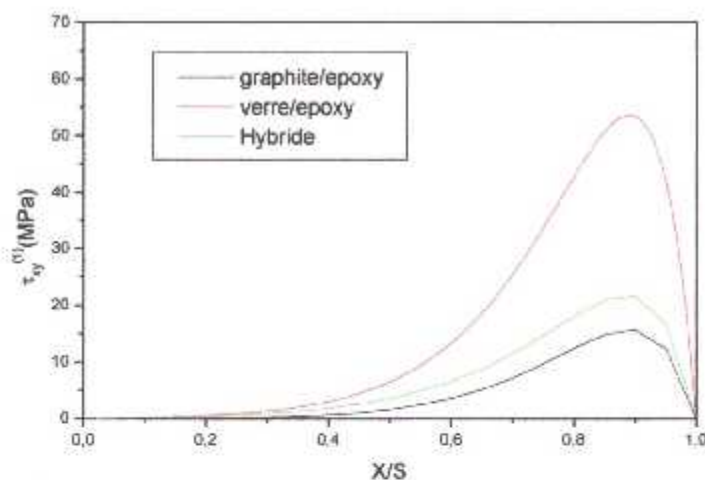
La figure 4.8 montre une augmentation de la contrainte normale pour stratifié hybride en traction et cela loin du plan de fissure avec l'augmentation du nombre de couche à  $90^\circ$ . Par contre presque la même contrainte normale est notée en compression au plan de fissure avec la variation du rapport d'épaisseur.

#### **4.4.3 Distribution de la contrainte de cisaillement à l'interface**

##### **a) Comparaison entre les trois matériaux composites**

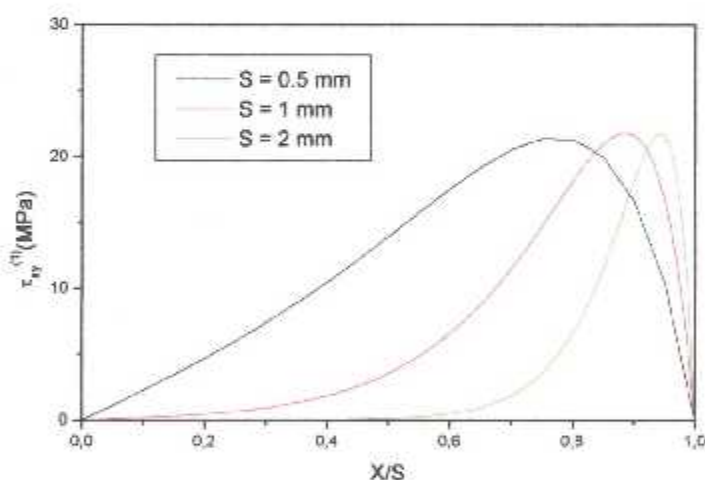
La contrainte de cisaillement à l'interface 0/90 pour les différents stratifiés  $[0/90_2]_s$  est représenté dans la figure 4.9. La contrainte de cisaillement à l'interface pour le stratifié hybride donne une distribution entre les deux autres matériaux. Une valeur maximale de cette distribution est notée proche du plan de fissure, après on remarque cette dernière tant vers zéro en accord avec la condition au limite de la contrainte libre. Au plan de fissure à  $x/s=0$ ,  $(\tau_{xy})$  est égale zéro à cause de la non symétrie avec l'axe  $(y)$ .





**Figure 4.9 : Distribution de la contrainte de cisaillement à l'interface 0/90 pour différents stratifiés  $[0/90_2]_s$  avec  $S=1$  mm.**

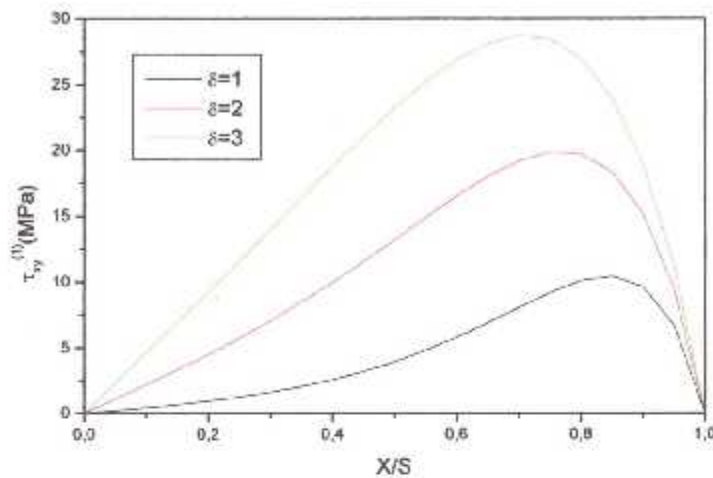
**b)- Influence de la densité de fissuration pour un stratifié hybride**



**Figure 4.10 : Distribution de la contrainte de cisaillement à l'interface 0/90 pour un stratifié hybride et différents densité de fissuration avec  $\delta = 2$  .**

La Fig. 4.10 représente la distribution de la contrainte de cisaillement à l'interface 0/90 pour différent densité de fissuration. On remarque que cette dernière existe seulement lorsqu'on s'approche du plan de fissure et lorsqu'on a une densité de fissure importante. On peut dire aussi que la valeur maximale de la contrainte de cisaillement est la même pour différents densité de fissures.

### c)- Influence du rapport d'épaisseur pour un stratifié hybride

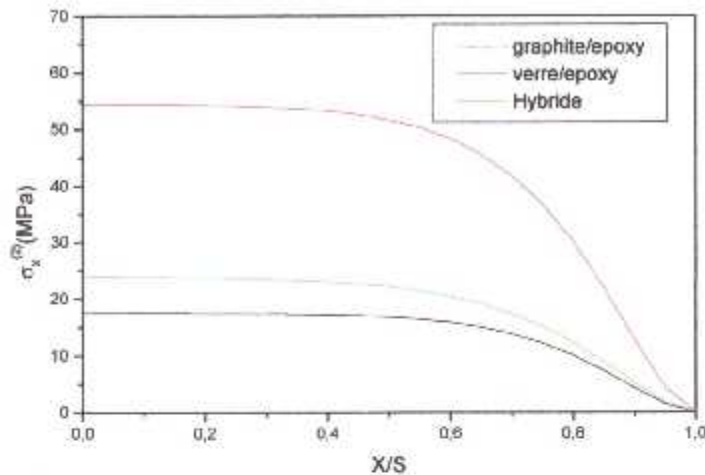


**Figure 4.11 : Distribution de la contrainte de cisaillement à l'interface 0/90 pour un stratifié hybride et différents rapport d'épaisseur avec  $S = 0.5\text{mm}$ .**

Une augmentation importante de la contrainte de cisaillement à l'interface pour stratifié hybride lorsque on augmente le nombre de couche fissuré à  $90^\circ$  (Fig. 4.11). La valeur maximale de cette contrainte est notée lorsque  $\delta$  est grand.

#### **4.4.4 Distribution de la contrainte longitudinale dans la couche $90^\circ$**

##### **a) Comparaison entre les trois matériaux composites**

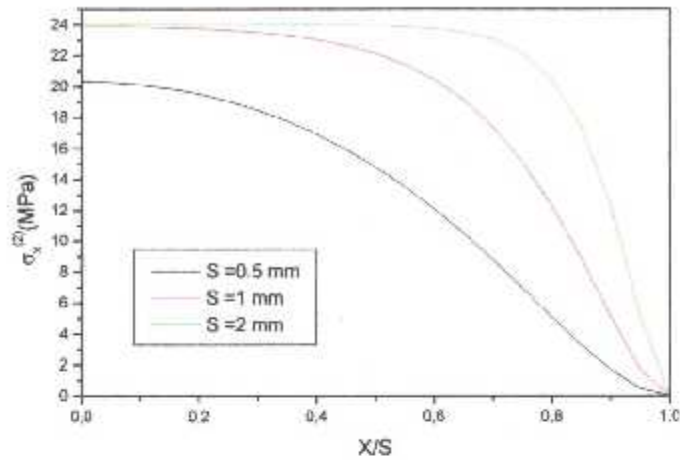


**Figure 4.12 : Distribution de la contrainte inter-laminaire à l'interface 0/90 dans la couche 90° pour différents stratifiés [0/90<sub>2</sub>]<sub>s</sub> avec S=1mm**

Fig. 4.12 représente la contrainte longitudinale à l'interface 0/90 pour les trois différents matériaux (verre/époxy, graphite/époxy et hybride) pour le stratifié [0/90<sub>2</sub>]<sub>s</sub> et une charge axiale appliquée ( $\sigma_x = 100$  MPa). La contrainte longitudinale pour le stratifié Hybride donne une distribution entre verre/époxy et graphite/époxy. On note une contrainte maximale à au milieu du plan de fissure, ce que génère des nouvelles fissurations transverses.

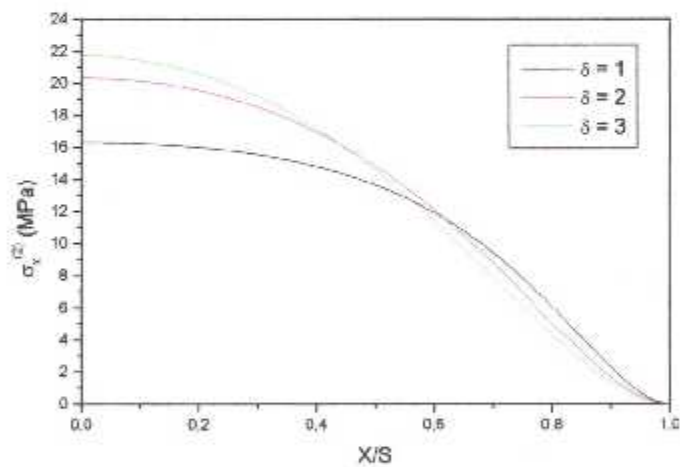
#### **b)- Influence de la densité de fissuration pour un stratifié hybride**

On note une diminution de la contrainte longitudinale à l'interface 0/90 dans la couche 90° pour le stratifié [0/90<sub>2</sub>]<sub>s</sub> avec l'augmentation de la densité de fissuration (c a d avec S petit). Au plan de fissure on a la même contrainte longitudinale nulle pour les différentes densités de fissures.



**Figure 4.13 : Distribution de la contrainte inter-laminaire à l'interface 0/90 dans la couche 90° pour le stratifié [0/90<sub>2</sub>]<sub>s</sub> pour différents densités de fissuration.**

**c)- Influence du rapport d'épaisseur pour un stratifié hybride**



**Figure 4.14 : Distribution de la contrainte inter-laminaire à l'interface 0/90 dans la couche 90° pour différents rapport d'épaisseur et S=0.5mm.**

La figure 4.14 montre une augmentation de la contrainte longitudinale à l'interface 0/90 pour stratifié hybride avec l'augmentation du rapport



d'épaisseur et cela loin du plan de fissure. Par contre on a toujours presque la même contrainte longitudinale nulle au plan de fissure.

#### 4.5 Etude du module de Young longitudinale

Une comparaison des résultats obtenues avec la méthode Shear-lag modifié et l'expérimental pour le graphite/époxy est présentée dans les figures 4.15 à 4.17.

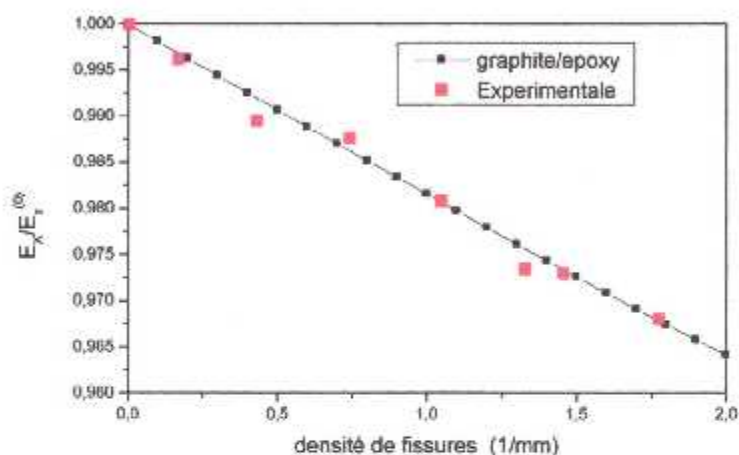


Figure 4.15 : Comparaison de la réduction du module de Young en fonction de la densité de fissures pour  $[0/90]_s$  graphite/époxy et l'expérimental [29].

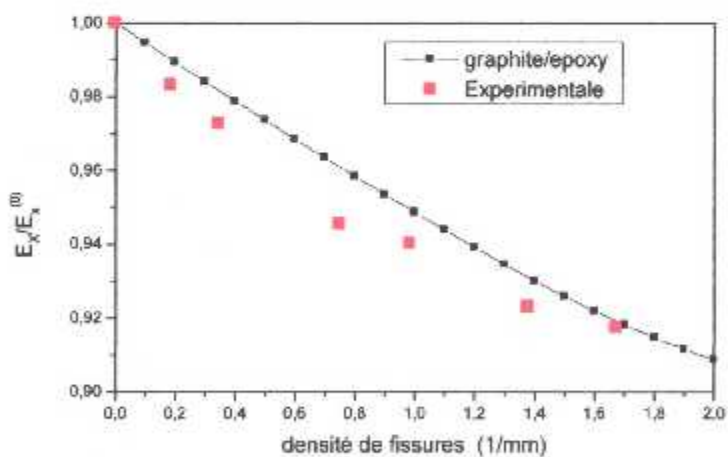
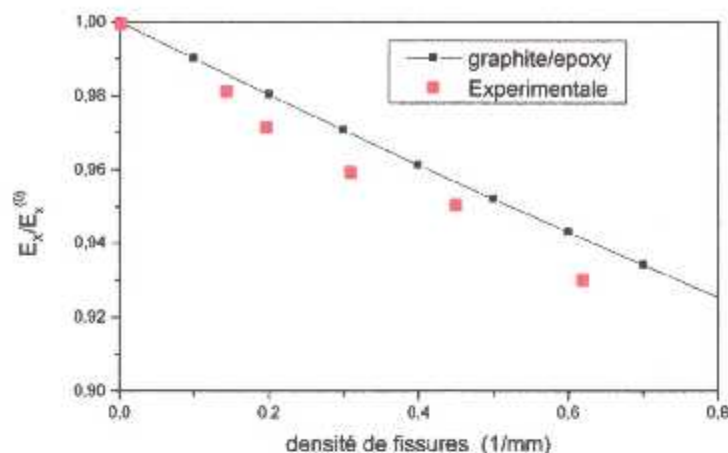


Figure 4.16 : Comparaison de la réduction du module de Young en fonction de la densité de fissures pour  $[0/90]_2s$  graphite/époxy et l'expérimental [29].

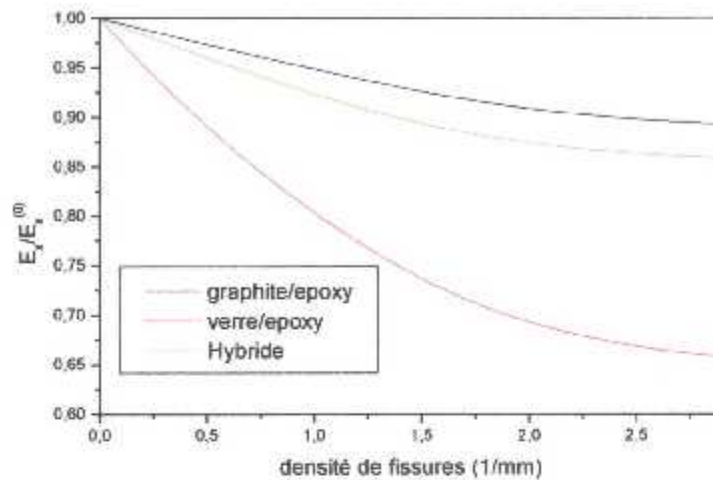


**Figure 4.17 : Comparaison de la réduction du module de Young en fonction de la densité de fissures pour  $[0/90_3]_S$  graphite/époxy et l'expérimental [29].**

On remarque que nos résultats sont plus proches des résultats expérimentaux [29] et validés avec les résultats publiés par El Meiche et autres [3], cela pour graphite/époxy. Une réduction du module de Young longitudinal est notée avec l'augmentation de la densité de fissures et le nombre de couche à  $90^\circ$ .

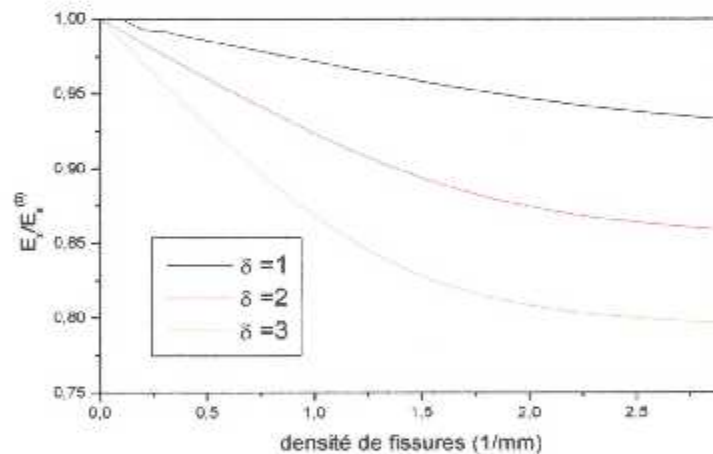
#### **a) Comparaison entre les trois matériaux composites**

La réduction de la rigidité longitudinale en fonction de la densité de fissures pour les trois stratifiés est représentée dans la Fig. 4.18. On observe que la rigidité du stratifié augmente avec la dés-hybridation. Ce qui laisse la rigidité de ce stratifié hybride entre le verre/époxy et graphite/époxy.



**Figure 4.18: Comparaison entre la réduction du module de Young en fonction de la densité de fissures  $[0/90_2]_s$  pour les trois stratifiés.**

**b)- Influence de la densité de fissuration pour un stratifié hybride**



**Figure 4.19 : Comparaison entre la réduction du module de Young en fonction de la densité de fissures pour les trois rapports d'épaisseur.**

Avec l'augmentation du nombre de couche fissurée à  $90^\circ$  d'orientation on remarque une réduction assez importante de la rigidité en fonction de la densité de fissures (Fig. 4.19).

#### **4.4 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons analysé la fissuration transverse dans les stratifiés hybrides où il a été remarqué que la variation des contraintes longitudinales et transversales dépendent de plusieurs paramètres à savoir :

- Le rapport géométrique (rapport d'épaisseur), la densité de fissures.
- Une réduction de la contrainte longitudinale et du transversal caractérise le comportement du matériau composite, soumis à des sollicitations en fonction de la densité de fissurations.
- La réduction du module de Young dépend principalement de la densité de fissuration, rapport d'épaisseur et surtout les propriétés du matériau choisi (Hybride, graphite/époxy et verre/époxy).



## Chapitre 5

### **Simulation et résultats des stratifiés hybrides fissurés avec chargement mécanique et conditions hygrothermiques**

#### **5.1 Introduction :**

Dans ce chapitre, nous nous intéressons au comportement des contraintes et de la rigidité dans un matériau composite croisé et fissuré, soumis à des sollicitations de traction et sous différentes conditions hygrothermiques.

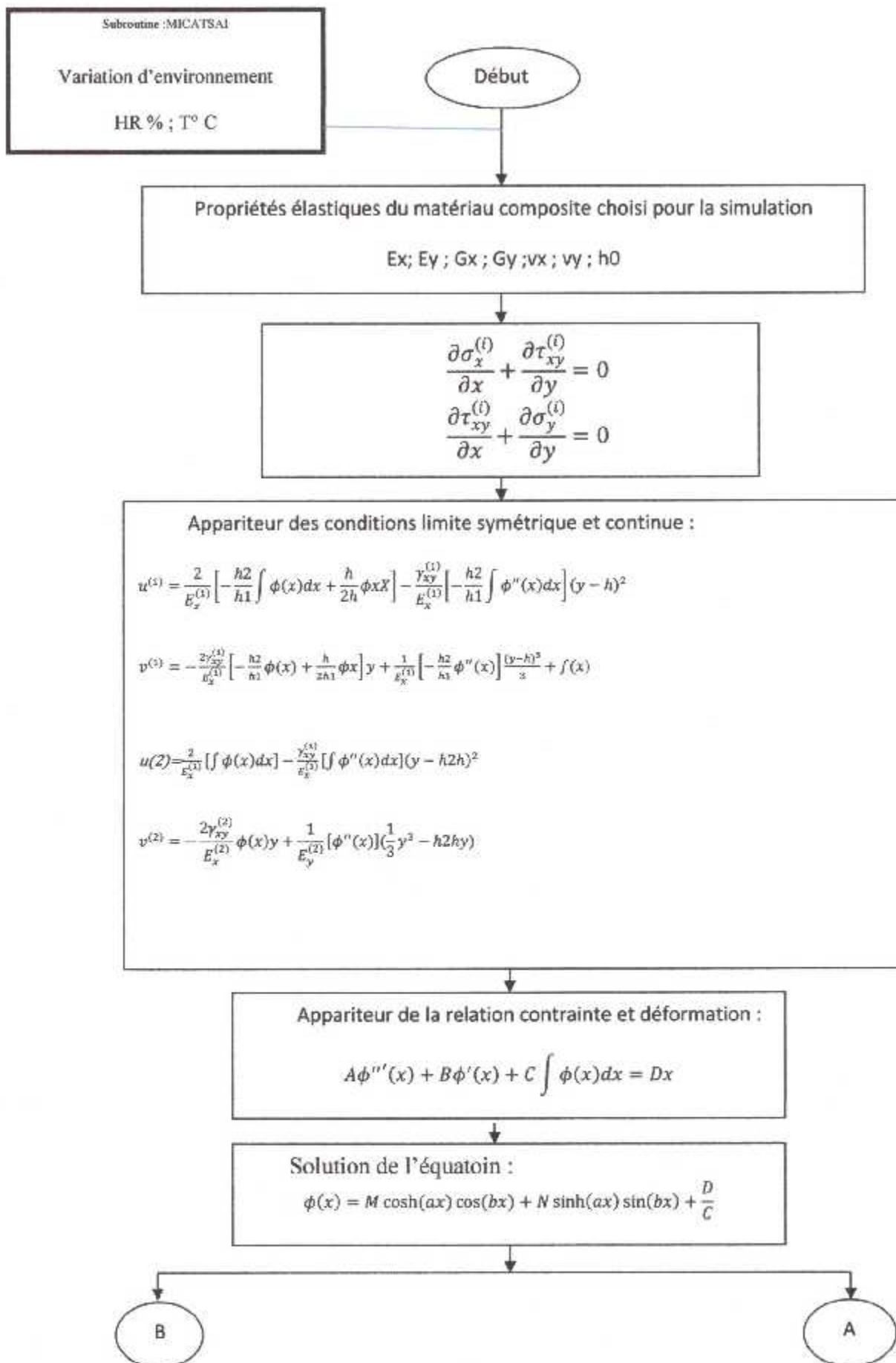
Dans un premier temps, les résultats tenant compte de chargement hygrothermique et pour différents stratifiés sont représentés. Une comparaison entre les différents stratifiés dans les conditions hygrothermique extrême sera faite.

Dans un deuxième temps, la réduction de la rigidité relative et totale sera faite pour différents matériaux. Une comparaison entre les différents stratifiés sera donnée pour représenter au mieux le stratifié le plus adéquat pour la conception.

Finalement, une conclusion sera faite sur le comportement des contraintes et rigidité dans un matériau hybride avec fissuration transverse et sous conditions hygrothermique.

#### **5-2 Organigramme :**

Pour modéliser la distribution de la contrainte longitudinale, transversale et de cisaillement à l'interface ainsi que la rigidité dans un matériau composite soumis à une traction semi axiale en fonction de la densité de fissuration et sous condition hygrothermique, un programme MICAZHN a été établi comme suit :



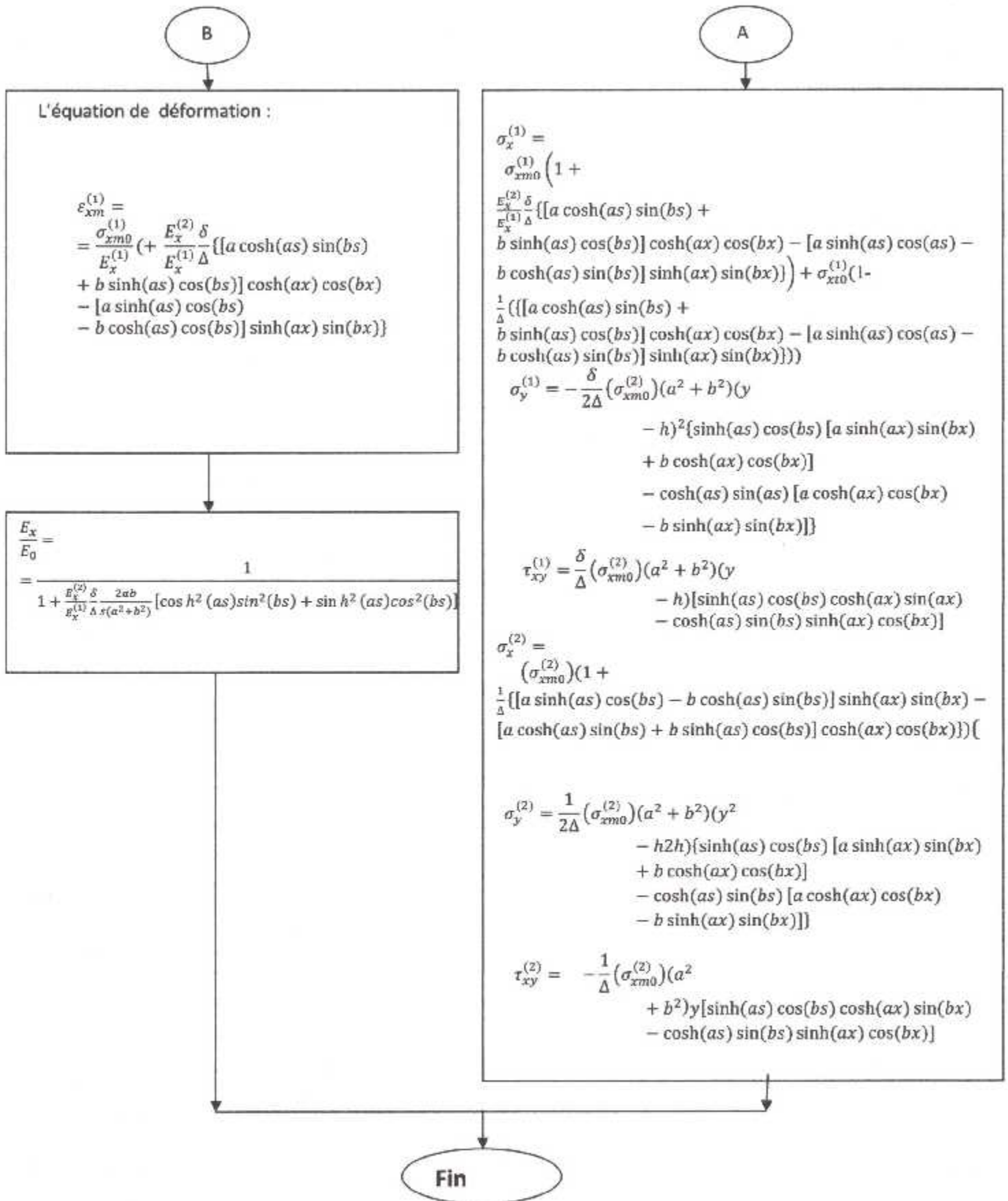


Figure 5.1 Organigramme du MICAZHN

### **5-3 choix de matériau de simulation :**

Les stratifiés choisis pour la simulation numérique sont (T300 /5208), hybride 1(glass /époxy, T300/5208, glass/époxy), hybride2 (graphite/époxy, T300/5208, graphite/époxy)

- Le premier matériau est le (T300/5208) :

La configuration du stratifié composite est représenté ci-dessous (voir la figure (5-2)). Avec la couche (1)est le T300/5208 avec l'orientation des fibres à 0° et la couche (2) est T300/5208 avec l'orientation des fibres à 90°. Une couche d'adhésive de résine 3502 entre les couches sera prise en considération.

graphite/époxy (T300/5208)	0°
graphite/époxy (T300/5208)	90°
graphite/époxy (T300/5208)	0°

Figure 5.2 : configuration du stratifié T300/5208

- Le 2eme matériau est l'hybride 1 :

La configuration du stratifié composite est représenté ci-dessous (voir la figure (5-3)). Avec la couche (1) est le verre/époxy avec l'orientation des fibres a 0° et la couche (2) est T300/5208 avec l'orientation des fibres a 90°. La même couche d'adhésive que le stratifié précédent sera prise en considération.



Verre /époxy	0°
graphite/époxy (T300/5208)	90°
Verre /époxy	0°

Figure 5.3 : configuration du stratifié hybride 1

➤ Le 3eme matériau et du hybride2 :

La configuration du stratifié composite est représenté ci-dessous (voir la figure (5-4)). Avec : la couche (1) est le graphite/époxy avec l'orientation des fibres a 0° et la couche (2) est T300/5208 avec l'orientation des fibres a 90°.

Graphite /époxy	0°
graphite/époxy (T300/5208)	90°
Graphite /époxy	0°

Figure 5.4 : configuration du stratifié hybride 2

#### **5-4 distributions des contraintes sous condition hygrothermique :**

A travers les résultats présentés dans les figures 5.5 jusqu'à 5.20 représentant les distributions des contraintes longitudinale, transversale et la contrainte de cisaillement à l'interface entre les couches 0° et 90° et cela pour différents stratifiés (T300/5208, hybride 1 et hybride2), avec densité des fissurations  $s=0.5$  mm et rapport d'épaisseur de  $\delta=3$ .

### 5-4-1 distribution des contraintes longitudinales sous conditions hygrothermique :

a- Pour  $\sigma_{x1}$

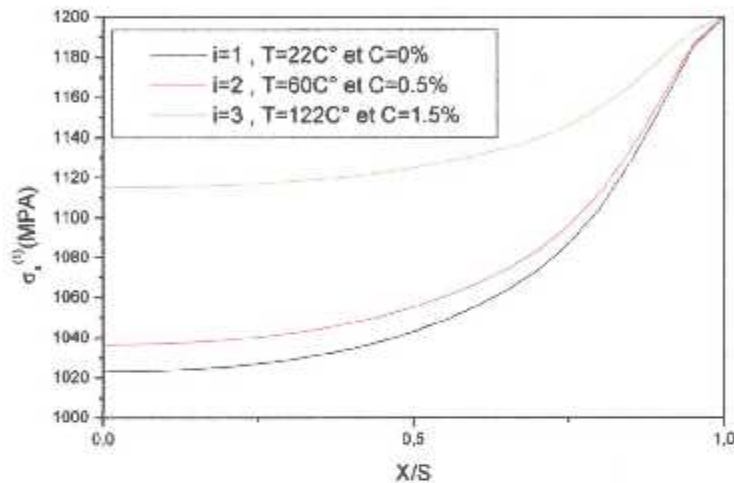


Figure 5 .5: Contrainte longitudinale  $\sigma_{x1}$  sous condition hygrothermique pour le (T300/5208) stratifié  $[0/90]_3$  dans les trois environnements.

Fig. 5.5 représente la distribution de la contrainte longitudinale pour le stratifié  $[0/90]_3$  T300/5208 sous différents conditions hygrothermiques. On note une augmentation de la contrainte longitudinale à l'interface du stratifié T300/5208 avec la variation de l'environnement (augmentation de la température et d'humidité). Au plan de fissure on a la même contrainte longitudinale pour les différents environnements.

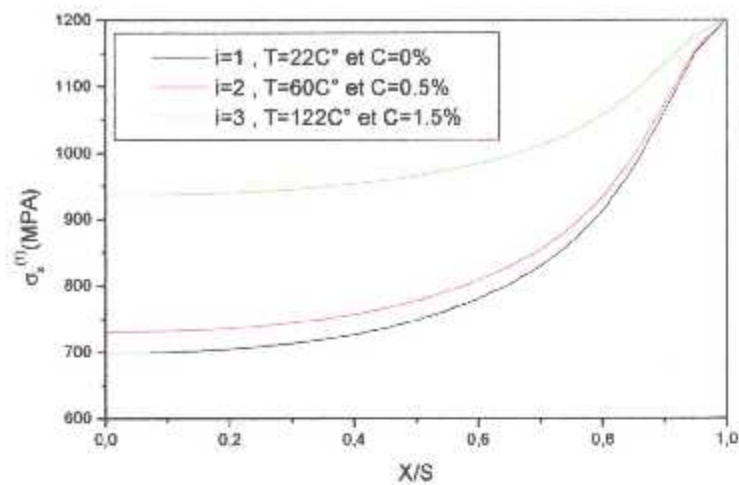


Figure 5.6 : contrainte longitudinale  $\sigma_x1$  sous condition hygrothermique pour hybride 1 stratifier  $[0/90_3]_s$  dans les trois environnements.

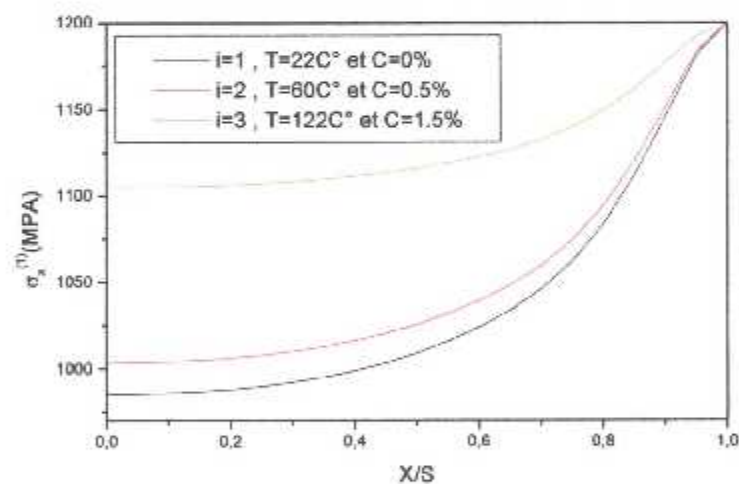


Figure 5.7 : Contrainte longitudinale  $\sigma_x1$  sous condition hygrothermique pour le hybride 2 stratifié  $[0/90_3]_s$

Fig.5.6et 5.7 représentent la contrainte longitudinale pour les stratifiés  $[0/90]_3$ hybride 1 et 2 sous condition hygrothermique. Le même comportement est remarqué pour ces deux stratifié que le premier matériau.

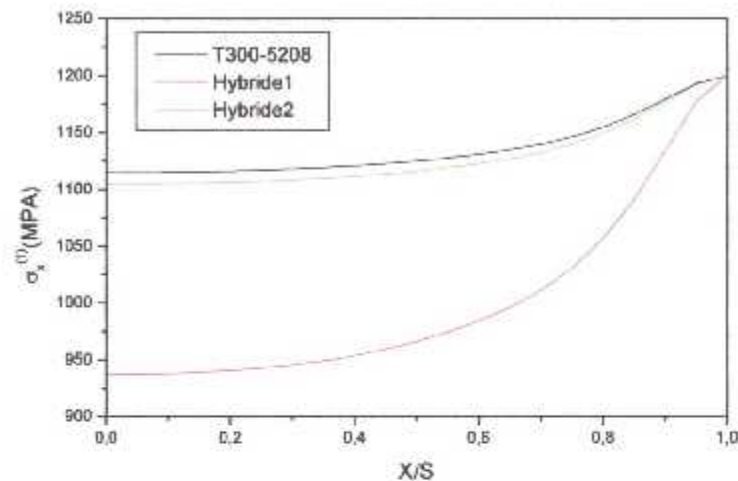


Figure 5.8 : Contrainte longitudinale  $\sigma x1$  sous condition hygrothermique pour les trois stratifiés  $[0/90]_3$  dans l'environnement  $T=122^\circ\text{C}$  et  $C=1,5\%$ .

Fig.5.8 représenté une comparaison de distribution de la contrainte longitudinale pour les stratifiés  $[0/90]_3$  (hybride 1, hybride2 et T300/5208) sous condition hygrothermique dans environnement  $i=3$ . La contrainte longitudinale pour le stratifié hybride 2 donne une distribution entre T300/5208 et Hybride 1. On note une contrainte maximale à l'interface du plan de fissure ( $X/S=1$ ).

#### b- Pour $\sigma x2$

Fig .5.9 représente la contrainte longitudinale  $\sigma x2$  pour le T300/5208 stratifié  $[0/90]_3$  sous différents conditions hygrothermiques. On note une diminution de la contrainte longitudinale pour le stratifié  $[0/90]_3$  avec l'augmentation de température et humidité (un taux de réduction de presque 50%). Ce qui traduit par la réduction des propriétés élastique de ce dernier par l'influence des conditions hygrothermique.



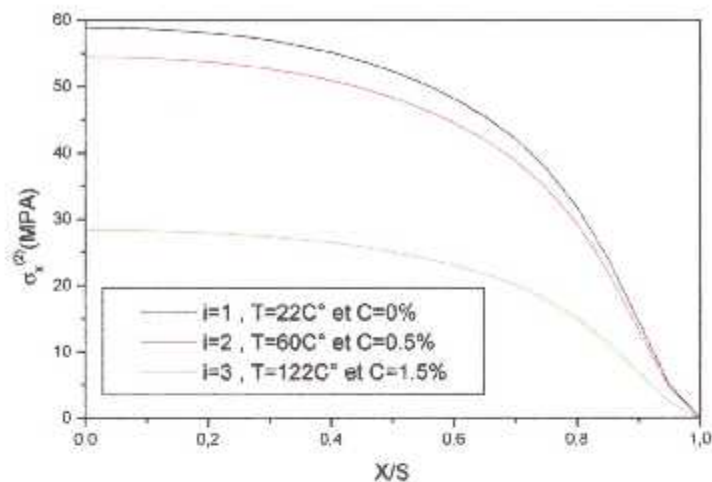


Figure 5.9 : Contrainte longitudinale  $\sigma_x^{(2)}$  sous condition hygrothermique pour (T300/5208) stratifié  $[0/90_3]_s$  dans les trois environnements.

Le même comportement de la contrainte longitudinale  $\sigma_x^{(2)}$  est noté pour les stratifiés  $[0/90_3]_s$  hybride 1 et 2 (Fig. 5.10 et 5.11).

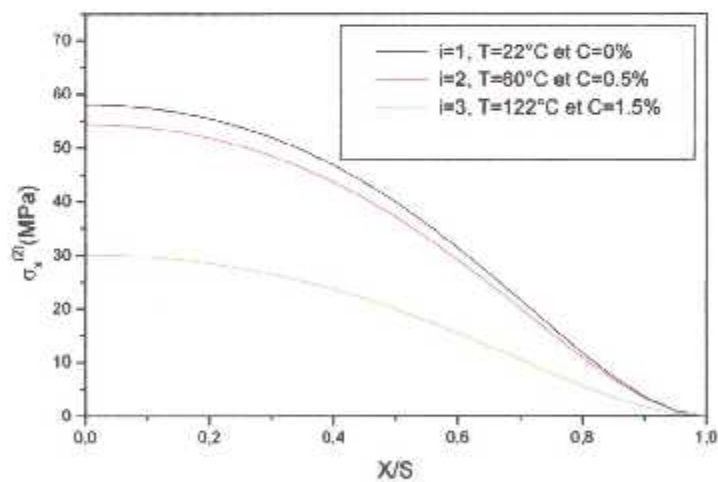


Figure 5.10 : Contrainte longitudinale  $\sigma_x^{(2)}$  sous condition hygrothermique pour hybride 1 stratifié  $[0/90_3]_s$  dans les trois environnements.

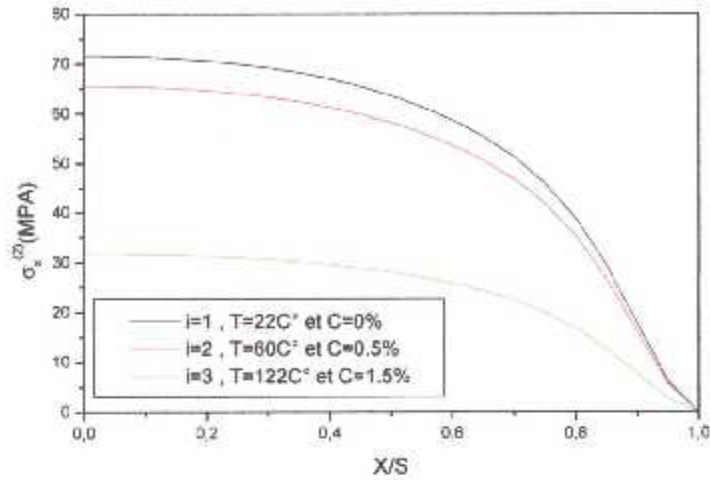


Figure 5.11 : contrainte longitudinale  $\sigma_x$  sous condition hygrothermique pour hybride 2 stratifié  $[0/90_3]_s$  dans les trois environnements.

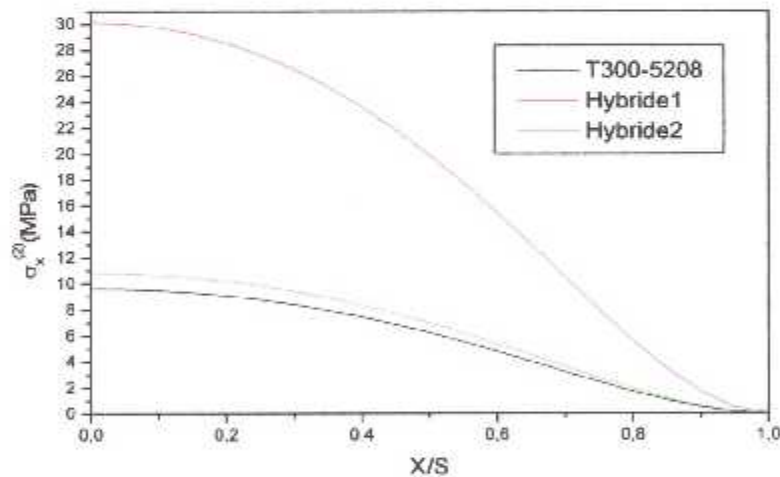


Figure 5.12 : Contrainte longitudinale  $\sigma_x$  sous condition hygrothermique pour les trois stratifiés  $[0/90_3]_s$  dans l'environnement  $T=122^\circ\text{C}$  et  $C=1,5\%$ .

Fig.5.12 représente une comparaison de la distribution de la contrainte longitudinale pour les différents stratifiés sous conditions hygrothermique de  $T=122^\circ\text{C}$  et  $C=1,5\%$ . L'hybride 1 donne une distribution de la contrainte

maximale de l'ordre de 30 MPa par rapport au deux stratifiés ce que retard l'appariation des fissurations transverse.

#### 5-4-2 distribution de la contrainte transversale sous condition hygrothermique

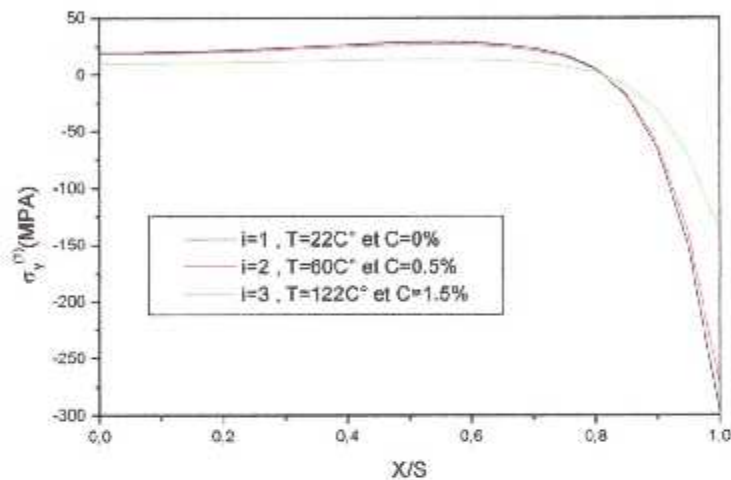


Figure 5 .13 : Contrainte transversale  $\sigma_y^1$  sous condition hygrothermique pour le stratifié (T300/5208)  $[0/90_3]_s$  dans les trois environnements.

La distribution de la contrainte transversale  $\sigma_y^1$  sous condition hygrothermique pour le stratifié T300/5208  $[0/90_3]_s$  dans les différents environnements est donnée dans la figure 5.13. Avec l'augmentation de l'effet hygrothermique on remarqué une réduction très importante de la contrainte de compression près du plan de fissure (de l'ordre de 60%) ce qui fragilise beaucoup notre matériau.

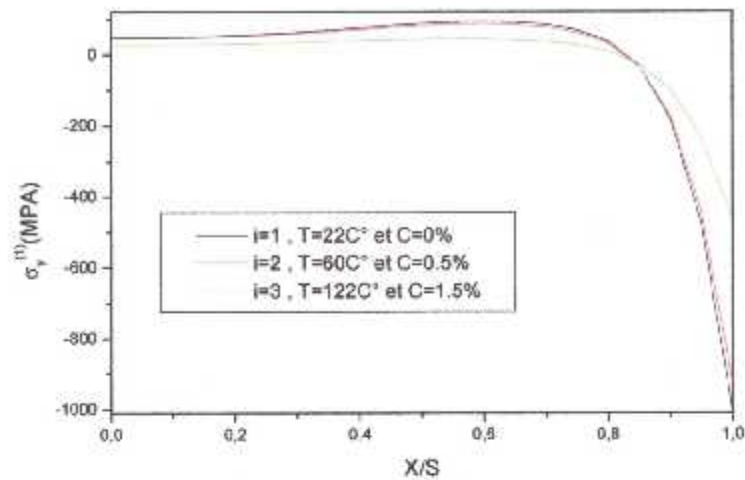


Figure 5. 14 : contrainte transversale  $\sigma_y1$  sous condition hygrothermique pour hybride 1 stratifié  $[0/90_3]_s$  dans les trois environnements

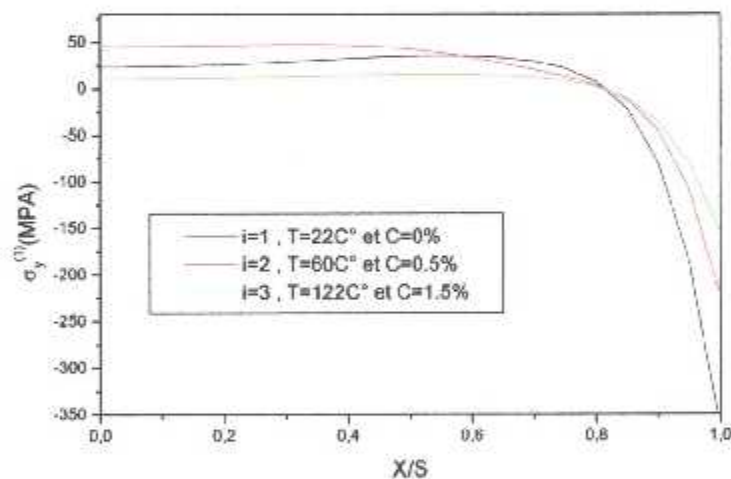


Figure 5.15: Contrainte transversale  $\sigma_y1$  sous condition hygrothermique pour hybride 2 stratifié  $[0/90_3]_s$  dans les trois environnements

Presque le même comportement de la contrainte transversale est noté pour les deux autres matériaux (hybride 1 et 2) sous différents condition hygrothermique (voir fig. 4.14 et 4.15).



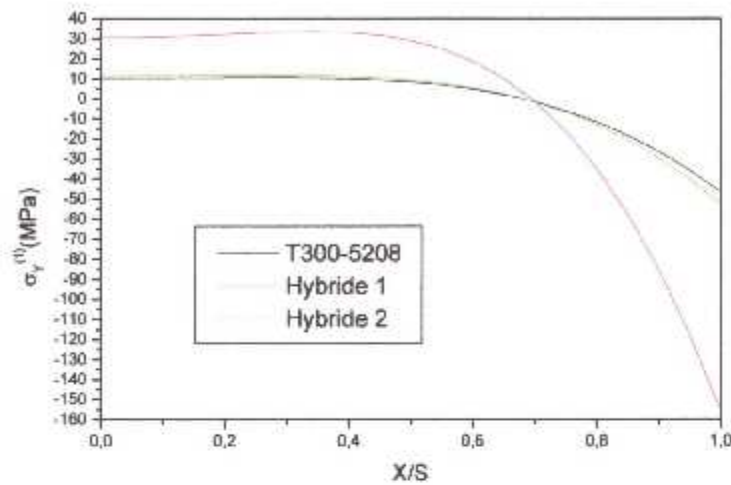


Figure 5. 16 : Contrainte transversale à l'interface  $\sigma_y$  sous condition hygrothermique pour les trois stratifiés  $[0/90_3]_s$  dans l'environnement  $T=122^\circ\text{C}$  et  $C=1,5\%$ .

Fig.5.16 représente une comparaison de la distribution de la contrainte transversale pour les trois différents stratifiés  $[0/90_3]_s$  (hybride 1, hybride 2 et T300/5208) dans l'environnement  $T=122^\circ\text{C}$  et  $C=1,5\%$ . L'hybride 1 représente une contrainte de compression la plus importante par rapport au deux autres stratifié et cela au plan de fissure.

#### **5-4-3 Distribution de la contrainte du cisaillement a l'interface**

Fig .5.17 donne la distribution de la contrainte de cisaillement à l'interface pour le stratifié  $[0/90_3]_s$  T300/5208 dans les trois environnements. Une augmentation importante de la contrainte de cisaillement à l'interface pour le stratifié T300/5208 lorsque la température et l'humidité diminue. Ce maximum est toujours proche du plan de fissure qui va s'annulé lorsque  $(x=s)$  ce qui s'accord avec la condition de la contrainte libre au limite.

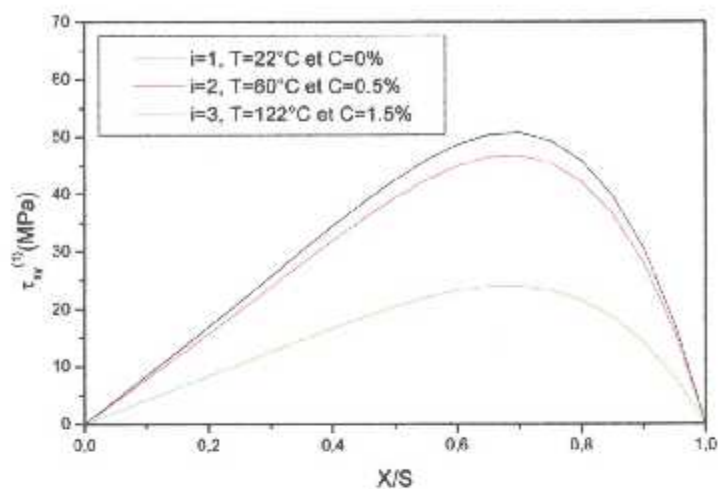


Figure 5.17 : Contrainte de cisaillement à l'interface  $\tau_{xy}$  pour (T300/5208) stratifié  $[0/90_3]_s$  dans les trois environnements.

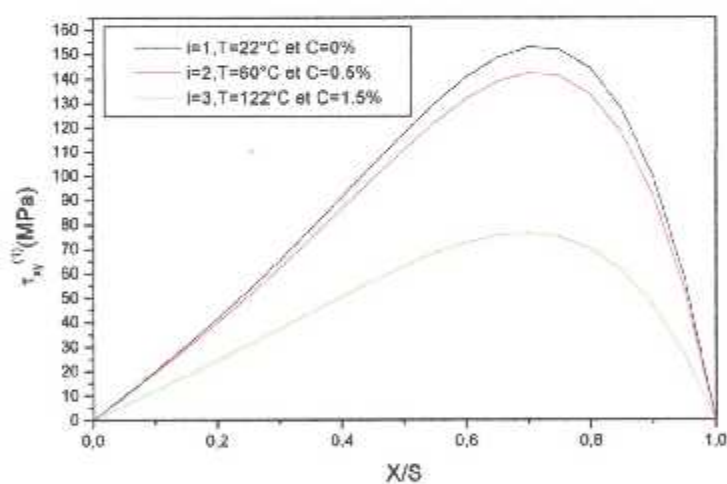


Figure 5.18 : contrainte du cisaillement à l'interface  $\tau_{xy}$  pour le stratifié hybride 1  $[0/90_3]_s$  dans les trois environnements

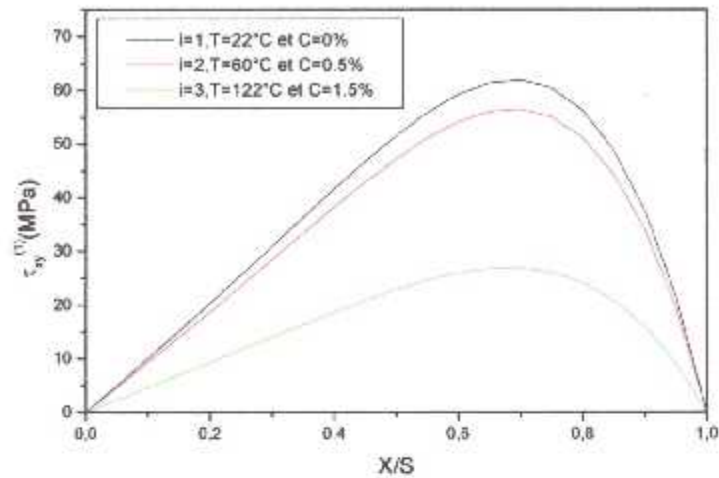


Figure 5.19 : contrainte de cisaillement a l'interface  $\tau_{xy}$  pour le stratifiéhybride 2  $[0/90_3]_s$  dans les trois environnements

Fig .5.18et 5.19 représente le même comportement de la contrainte de cisaillement à l'interface pour les deux stratifiés hybride 1 et 2.

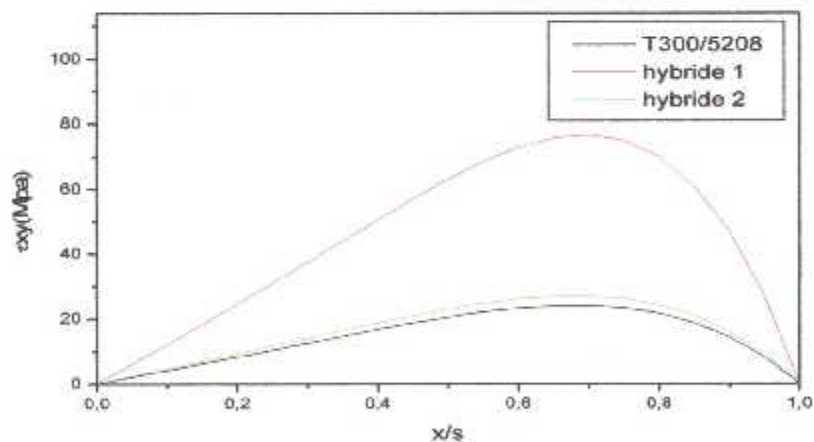


Figure 5.20 : Contrainte de cisaillement à l'interface  $\tau_{xy1}$  sous condition hygrothermique pour les trois matériaux  $[0/90_3]_s$  dans l'environnement  $T=122^\circ\text{c}$  et  $C=1,5\%$ .

L'hybride 1 donne une distribution de la contrainte de cisaillement entre T300/5208 et l'hybride 2 sous condition hygrothermique  $T=122^{\circ}\text{C}$  et  $C=1,5\%$  (voir Fig. 5.20).

## **5-5 Réductions de la rigidité sous condition hygrothermique :**

### **5-5-1 Réduction de la rigidité relative :**

Dans cette section, on calcul la perte de la rigidité relative du stratifié croisé qui est déjà soumis initialement à un vieillissement hygrothermique. La réduction de la rigidité du stratifié croisé due à la densité de fissuration est évaluée par rapport à la rigidité initiale du stratifié non endommagé, soumis lui aussi aux mêmes conditions hygrothermiques. Pour cela l'équation (3.73) devient :

$$\frac{E_x(i)}{E_x^{(0)}} = \frac{1}{1 + \frac{E_x^{(2)}}{E_x^{(1)} \Delta(i)} \frac{\delta}{s(a(i)^2 + b(i)^2)} [\cosh^2(a(i)s) \sin^2(b(i)s) + \sinh^2(a(i)s) \cos^2(b(i)s)]} \quad (5.1)$$

L'indice « i » représente les différents types de conditions d'environnement considéré.

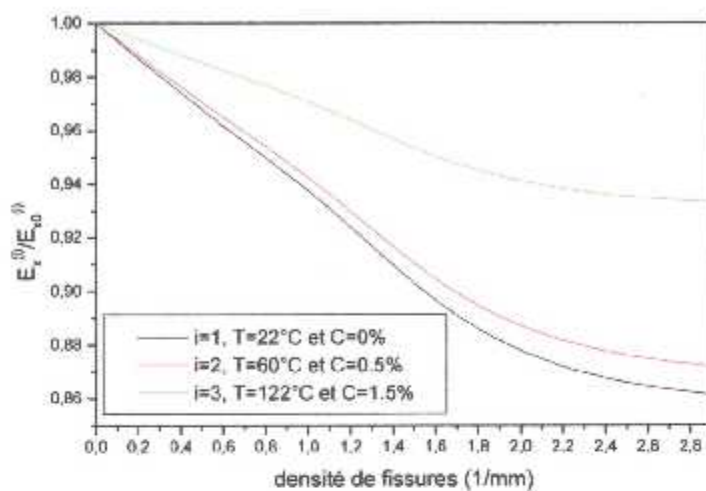


Figure 5.21 : Réduction de la rigidité relative pour le stratifié (T300/5208)  $[0/90_3]_s$  dans les trois environnements en fonction de la densité de fissures.

Fig.5.21 donne la variation de la rigidité relative du stratifié  $[0/90_3]_s$  T300 /5208 pour les différents environnements ( $T=22^\circ\text{C}$  et  $C=0\%$ ,  $T=60^\circ\text{C}$  et  $C=0.5\%$ ,  $T=122^\circ\text{C}$  et  $C=1.5\%$ ). On remarque que plus la température et l'humidité «  $T$ ,  $C$  » devient grande, la variation de la rigidité relative devient importante mais elle se diminue avec la densité de fissuration.



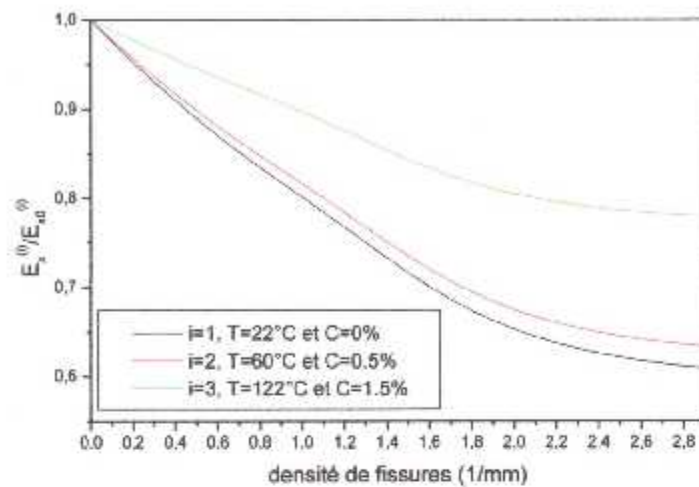


Figure 5.22 : Réduction de la rigidité relative pour le stratifié hybride 1  $[0/90_3]_s$  dans les trois environnements en fonction de la densité de fissures.

Le même comportement de réduction de la rigidité relative est notée pour les deux autres stratifiés hybride 1 et 2 (voir Fig. 5.22 et 5.23).

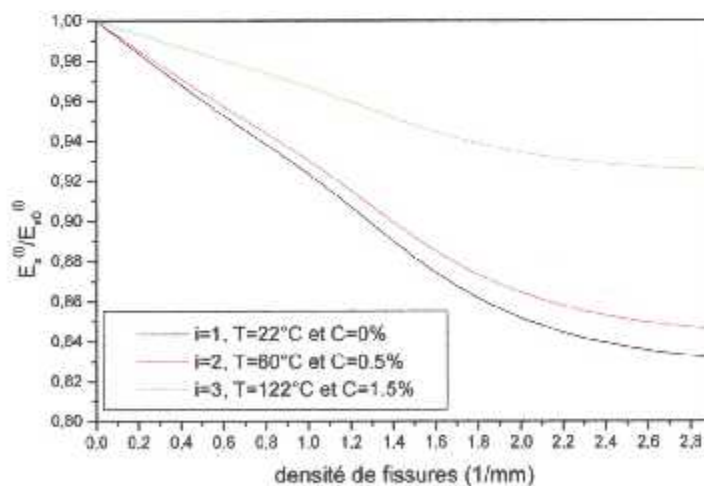


Figure 5.23 : Réduction de la rigidité relative pour le stratifié hybride 2  $[0/90_3]_s$  dans les trois environnements en fonction de la densité de fissures.

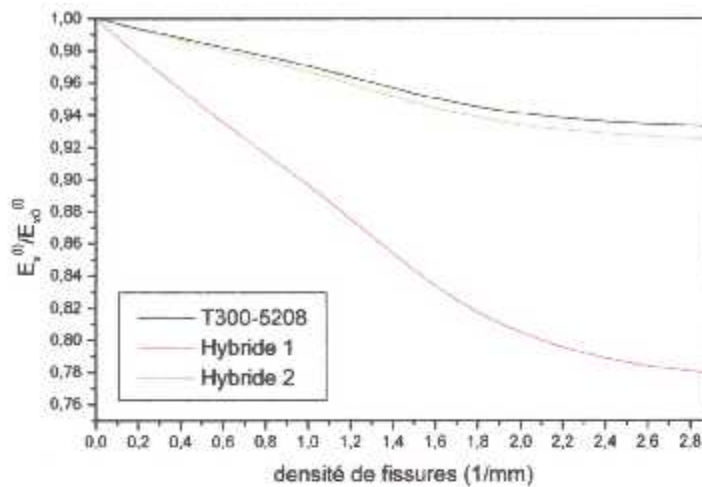


Figure 5.24: Réduction de la rigidité relative pour les trois matériaux  $[0/90_3]_s$  dans l'environnement  $T=122^\circ\text{C}$  et  $C=1,5\%$  en fonction de la densité de fissures.

L'hybride 2 représente une rigidité relative entre les deux autres stratifié hybride 1 et T300/5208. L'hybride 1 semble représenter une dégradation très importante de la rigidité relative (un taux de réduction de presque 15%) en fonction de la densité de fissures.

### 5 5-2 réductions de la rigidité totale :

La réduction de la rigidité totale du stratifié croisé due à la densité de fissuration est évaluée par rapport à la rigidité initiale du stratifié non endommagé, soumis lui aux conditions hygrothermiques standard. Pour cela l'équation (5.1) devient :

$$\frac{E_x(i)}{E_x(0)} = \frac{1}{1 + \frac{E_x E_x^{(2)} \delta}{E_x^{(1)} \Delta s (a^2 + b^2)} \frac{zab}{\cosh^2(as) \sin^2(bs) + \sinh^2(as) \cos^2(bs)}} \frac{E_x^{(1)} h_1 + E_x^{(2)} h_2}{E_x^{(1)} h_1 + E_x^{(2)} h_2} \quad (5.2)$$

L'indice « i » représente les différents types de conditions d'environnement considéré.

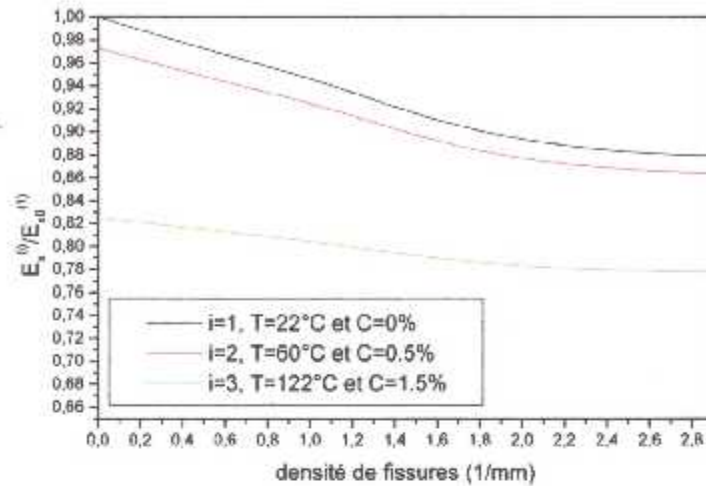


Figure 5.25 : Réduction de la rigidité totale pour le (T300/5208) stratifié  $[0/90_3]_s$  dans les trois environnements en fonction de la densité de fissures.

Une réduction très importante de la rigidité totale le stratifié (T300/5208) stratifié  $[0/90_3]_s$  (de l'ordre de 17 %) avec une densité de fissure nulle. Par contre ce taux de réduction se réduit avec l'augmentation de la densité de fissures avec un taux d'ordre 10% (Fig. 5.25). Ce qui se traduit par l'effet hygrothermique sur la réduction des propriétés élastique du matériau fissuré et non fissuré.

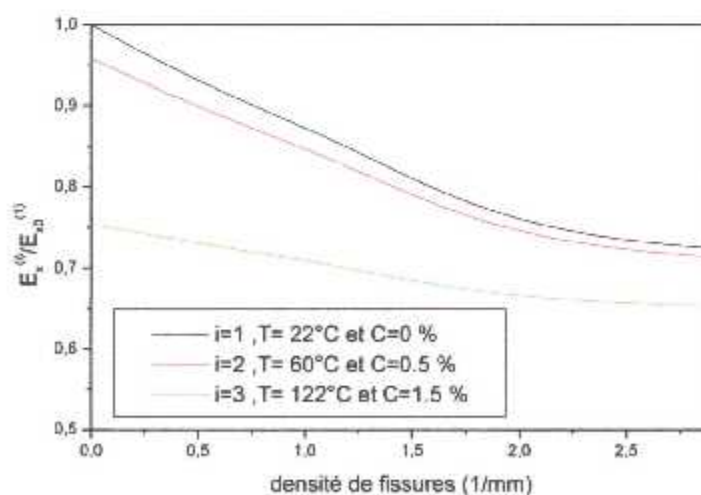


Figure 5.26 : Réduction de la rigidité totale pour le stratifié hybride 1  $[0/90_3]_s$  dans les trois environnements en fonction de la densité de fissures.

Une réduction très importante de la rigidité totale le stratifié hybride 1 stratifié  $[0/90_3]_s$  ( de l'ordre de 23 %) avec une densité de fissure nulle. Par contre ce taux de réduction se réduit avec l'augmentation de la densité de fissures avec un taux d'ordre 7 % (Fig. 5.26).

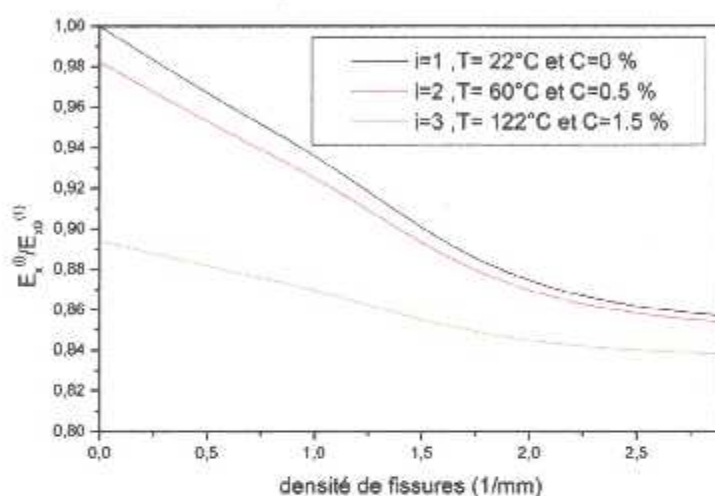


Figure 5.27 : Réduction de la rigidité totale pour le stratifié hybride 2  $[0/90_3]_s$  dans les trois environnements en fonction de la densité de fissures.

Une réduction très importante de la rigidité totale le stratifié hybride 2 stratifié  $[0/90_3]_s$  ( de l'ordre de 10 %) avec une densité de fissure nulle. Par contre ce taux de réduction se réduit avec l'augmentation de la densité de fissures avec un taux d'ordre de 1 % (Fig. 5.27). Ce qui se traduit par l'effet hygrothermique sur la réduction des propriétés élastique du matériau fissuré et non fissuré.

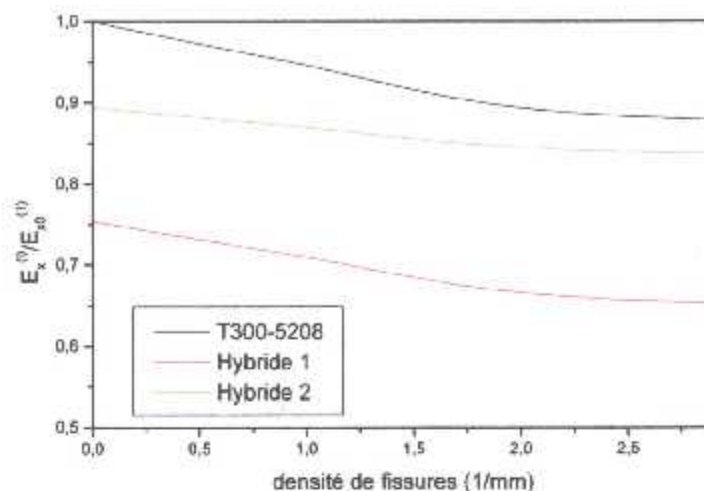


Figure 5.28 : Réduction de la rigidité totale pour les trois matériaux  $[0/90_3]_s$  dans l'environnement de  $T=122^\circ\text{C}$  et  $C=1,5\%$  en fonction de la densité de fissures.

L'hybride 2 semble représenter une réduction de la rigidité totale au milieu des autres stratifiés (T300/5208 et hybride 1) ce qui favorise ce matériau au autre dans une conception (Fig. 5.28). Par contre le stratifié hybride 1 représente une dégradation de la rigidité totale très importante (de l'ordre de 12%) en fonction de la densité de fissures.

## 5.6 Conclusion

Nous avons étudiés en premier lieu, l'effet des conditions hygrothermiques en termes de température et d'humidité sur la variation de contrainte longitudinale, transversale et de cisaillement à l'interface en fonction de la densité de fissuration. Les résultats montrent une dépendance de la distribution des contraintes avec les conditions hygrothermique. Au final, la réduction de la rigidité relative et totale est étudiée en fonction de la densité de fissures et avec la variation des conditions environnementales. Ce qu'on a put conclure, que la rigidité dépende totalement de la variation de température et humidité.



## CONCLUSION GENERALE

Les groupes inorganiques ou les nanoparticules avec des propriétés optiques, électroniques ou magnétiques spécifiques peuvent être incorporés dans des matrices polymériques organiques.

Contrairement au solide pour les matériaux inorganiques qui exigent souvent un traitement à haute température pour leur traitement, des matériaux hybrides montrent un traitement plus semblable au polymère, à cause de leur grand contenu organique ou à cause de la formation de réseaux inorganiques réticulés de petits précurseurs moléculaires comme dans des réactions de polymérisation.

La dispersion de la lumière dans le matériel hybride homogène peut être évitée et la transparence donc optique des matériaux d'hybride résultant et nano-composites peut être réalisée.

Au cours de ce travail de recherche, nous avons procédé à une étude quantitative sur le comportement des matériaux composites hybrides et fissurés soumis à des conditions hygrothermiques. L'intérêt a porté essentiellement sur l'étude de la distribution des contraintes à travers le stratifié, et l'évolution de la rigidité en fonction de la densité de fissuration.

Tout d'abord les équations déterminant les champs des contraintes dans le composite endommagé, ainsi que celles donnant la rigidité longitudinale en fonction de la densité de fissurations, ont été établies en utilisant le modèle Shear-lag modifié développé par Zhang.

Dans un deuxième temps, la modélisation du vieillissement a été établie selon un modèle à l'échelle micro-analytique, choisi à partir d'un modèle semi-empirique qui prend en considération l'effet de la concentration d'humidité et de la température sur les propriétés des fibres et de la matrice. Ceci a permis de quantifier l'évolution des propriétés mécaniques.

L'originalité du travail réside dans le fait que les propriétés mécaniques des matériaux composites hybrides et fissurés, sont déterminées à partir d'un environnement variable, prenant en compte une variation de la température et humidité. Les résultats les plus significatifs peuvent être rappelés de la manière suivante :

- Les variations des contraintes et du module de Young longitudinal dépendent, de plusieurs paramètres à savoir : le rapport géométrique, la densité de fissures, le nombre de couches, volume des fibres.
- Une réduction des contraintes et du module de Young longitudinal caractérise le comportement du matériau composite hybride, soumis à des sollicitations en fonction de la densité de fissures.
- La distribution des contraintes longitudinale, transversale et de cisaillement à l'interface dépende totalement des conditions hygrothermiques.
- La réduction de la rigidité relative et totale dépende totalement de la variation de température et humidité en fonction de la densité de fissures.

Comme perspective, nous proposons d'étudier le comportement de la distribution de contrainte et de la rigidité pour un stratifié hybride et fissuré soumis à des conditions hygrothermique transitoire. Il serait aussi intéressant d'examiner la variation des contraintes et rigidité pour un stratifié hybride fissuré avec des fissurations transverse et délaminage sous différentes conditions environnementales.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. Megueni, A. Tounsi, E. AddaBedia, « Evolution of the stress intensity factor for patched crack with bonded hygrothermal aged composite repair », *Materials and Design*, Volume 28, Issue 2007, Pages 287-293, June 2005.
- [2] A. Tounsi, K.H. Amara, E.A. AddaBedia, « Analysis of transverse cracking and stiffness loss in cross-ply laminates with hygrothermal conditions », *Computational Materials Science*, Volume 23, Issue 2005, Pages 167-174, June 2004.
- [3] N. El Meiche, A. Tounsi, E.A. Adda-bedia et A. Megueni "Analysis of the transverse cracking in hybrid cross-ply composite laminates" , *computational Materials science* , 2009 , 46 , 1102-1108.
- [4] Zhang et T. Zhu , On inter-relationship of elastic moduli and strains in cross ply laminated composites , *composite science and technology* ,1996 ,56,135-145.
- [5] S. W. Tsai, « Composites Design » Think Composites, Dayton, Paris, Tokyo, 1987.
- [6] E.A. Adda-bedia, M. Bouazza, A. Tounsi, A. Benzair et M. Maachou, "Prediction of stiffness degradation in hygrothermal aged [0m/90n]scomposite laminates with transverse cracking" *Journal of Materials processing*, vol199, pp 199-205, 2008.
- [7] V.Lietard , « étude des effets séparés et couplés d'un environnement hygrothermique et d'un chargement mécanique sur la déformabilité et la ténacité à long terme de composites verre/résine », thèse de doctorat obtenu à l'institut des sciences et technologie de Lille ; 1998
- [8] M.H. Han et J. A. Nairn « Hygrothermal aging of polyimide matrix composite laminates» *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 34, Issue 10, Pages 979-986 October 2003
- [9] H.S. Kim, X. M. Wang et N.A.H NikAbbdulah, « Effect of temperature on fatigue crack growth in the polymer ABS » , *J fatigue & fracture of engineering materials & structures* , vol 17.n°3, pp361-367, 1994
- [10] R.Y.Kim, « Effect of temperature and moisture on pin bearing strength of composite laminates », *J. Composite materials*, Vol.10 April pp. 149-155, 1976



- [11] J. Mercier, A. Bunsell, P. Castaing, et J. Renard, « prise en compte du vieillissement et de l'endommagement dans le dimensionnement de structures en matériaux composites », Thèse de Doctorat, Mines Paris, France, 20 septembre 2006.
- [12] M. Bouazza, A. Tounsi, A. Benzair et E.A. Adda-bedia « Effect of transverse cracking on stiffness reduction of hygrothermal aged cross-ply laminates » *Materials and Design*, Vol 28, pp 1116-1123, 2007
- [13] K. Amara, A. Tounsi, A. Megueni et E. Adda Bedia « Evolution de la fissuration transverse dans les stratifiés croisés vieilliss », Laboratoire des matériaux et hydrologie, Sidi bel Abbés, 2003
- [14] M. Khodjet-kesba, « Effet et analyse des fissurations dans les matériaux composites vieilliss », Mémoire de magister, Institut d'aéronautique et des études spatiales, 2011.
- [15] A. Benkhedda, « Etude hygrothermique des matériaux composites à matrice polymère avec la prise en compte de l'effet de vieillissement lors de la désorption transitoire », thèse de doctorat obtenu au département d'aéronautique de Blida, 2008
- [16] C.H. Shen et G.S. Springer « Moisture absorption and desorption of composite materials », C.H. Shen, G.S. Springer, *Environmental effects on composite materials*, ed. G.S. Springer, Technomic Publishing Co., Lancaster, PA, 1981.
- [17] P. Peyseret W. D. Bascom, *Journal of Materials Science* 16, 75-83, 1981.
- [18] K. Ashbee, "Water damage in glass fibre/resin composites", *Proc. Roy. Soc. A* 312, pp 553-564, 1969.
- [19] Z. Sereir, E. AddaBedia et A. Tounsi, « Effect of the accelerated moisture diffusivity on the hygrothermal behavior laminated plate with symmetrical environmental conditions », *Journal of thermal stresses*, Taylor & Francis Edition, Vol 28, pp 889- 908, 2005
- [20] X. Wang, K. Dong et X.Y. Wang "Hygrothermal effect on dynamic interlaminar stresses in laminated plates with piezoelectric actuators" *Composite Structure*, vol 71, pp 220-228, 2005.
- [21] I. Ghorbel, " Mécanismes d'endommagement des tubes verre-resine pour le transport d'eau chaude" influence de la ductilité de la matrice, thèse de doctorat Ecole des Mines de Paris, Juillet 1990.

- [22] R. Byron Pipes, J. R.Vinson et T.W. Chou; "On the hygrothermal response of laminated composite systems", *J,CompositeMaterials*,vol 10 April pp.129-149, 1976.
- [23] C.H. Shen et G. Springer, « Moisture absorption and desorption of composite materials » *J. of composite materials*, Vol.10, pp.2-20, January 1976.
- [24] Highsmith, A.L.&Reifsnider, K.L ; damage in composite . ASTM STP , 775 (1982) 103-16.
- [25] Fan , J.H.& Zhang et J.Q; In-situ damage evolution and micro /macro transition for laminated composites *Comp . Sci .Technol* ; 47 (1993) 107-18 .
- [26] Highsmith, A.L. et Reifsnider, K.L ; damage in composite . ASTM STP , 775 (1982) 103-16.
- [27] Peters , P.W.M.& Chou , T. W ; On cross-ply cracking in glass and carbon fiber-reinforced epoxy laminates *Composites* , 18 (1987) 40-6.
- [28] Tsai , S.W. et Hanh , H.T ; Introduction to composite Materials . Technomic, Lancaster, PA , 1980.
- [29] S.E. Groves, C.E. Harris, A.L. Highsmith, D.H. Allen, R.G. Norvell, *Experimental Mechanics* 27 (1987) 73-79.
- [30]R. Joffe, A.Krasnikovs, J. Varna, *Composites science and Technology* 6 (200) 637-656.

## LISTE DES SYMBOLES

a, f : constantes empiriques



(s) : Rapport géométrique de fissuration

C : Concentration de l'humidité

D : Diffusivité

$E_{fx}$  : Module longitudinal de Young dans la direction de la fibre

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

$E_x$  : Module longitudinal de Young dans le pli fissuré

$E_{x0}$  : Module longitudinal de Young dans le pli non fissuré

$E_y$  : Module transversal de Young dans le pli

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

$G_{fx}$  : Module de cisaillement de la fibre

$G_{xz_{90}}$  : Module de cisaillement longitudinal

$G_{xz_0}$  : Module de cisaillement transversal

$G_m$  : Module de cisaillement de la matrice

$G_{xy}$  : Module de cisaillement dans le pli

$G_{0xy}$  : Module de cisaillement du stratifié à la température de référence

h : Demi épaisseur du stratifié

l : Demi longueur entre deux fissures consécutives

$\Delta T$  : Température d'opération – température de cuisson

$T_{opr}$  : Température d'utilisation

$T_g$  : Température de transition

$T_{0g}$  : Température de transition à la température de référence

$T_{rm}$  : Température de référence

$t$  : Temps

$h_1$ : Epaisseur de la couche  $0^\circ$

$h_2$ : Demi-épaisseur de la couche  $90^\circ$

$U^{(1)}$ : Déplacement longitudinale dans la couche à  $0^\circ$

$V^{(1)}$  : Déplacement transversal dans la couche à  $0^\circ$

$U^{(2)}$  : Déplacement longitudinale e dans la couche à  $90^\circ$

$V^{(2)}$ :Déplacement transversal dans la couche à  $90^\circ$

$x$  : Coordonnée longitudinale

$x, y, z$  : Repère du pli

$\delta$ : Rapport d'épaisseur

$\sigma_{x1}$ : Contraintes longitudinale dans la couche  $0^\circ$

$\sigma_{x2}$ : Contraintes longitudinale dans la couche  $90^\circ$

$\sigma_{y1}$ : Contraintes transversal dans la couche  $0^\circ$

$\sigma_{y2}$ : Contraintes transversal dans la couche  $90^\circ$

$\tau_{xy1}$ : Contrainte de cisaillement dans la couche  $0^\circ$

$\tau_{xy}$ : Contrainte de cisaillement dans la couche  $90^\circ$

$\nu_{xy}$ : Coefficient de poisson longitudinale

$\nu_{yz}$ : Coefficient de poisson transverse

$F^{(i)}(x, y)$  : la fonction du contrainte

$\sigma_x$ : Contraintes de traction appliquée

$\sigma^{(i)}$ : Contraintes de traction dans le couche (i)

$\tau^{(i)}$ : Contraintes de cisaillement dans le couche (i)

$\{\sigma\}_m$  : Contrainte mécanique

$\{\sigma\}_t$  : Contrainte thermique

$\{\varepsilon\}_m$  : Déformation mécanique

$\{\varepsilon\}_t$  : Déformation thermique