

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique
Université Saad Dahleb Blida -1-
Institut D'aéronautique Et Des Etudes Spatiales
Département De Construction Aéronautique



Mémoire De Fin D'études
En Vue De L'obtenir Du Diplôme De Master En Aéronautique
Option : Structures d'avion

Thème :

Effet de la distribution linéaire et non linéaire de la température et humidité dans un composite métal/céramique

Représenté Par :

- ✓ Djouadi Nadjmeddine.
- ✓ Outouat Amar.

Encadré Par :

Mr. Khodjet Kesba Mohamed.

Co-Encadré Par :

Mr. Boukert Billel.

À Blida 2020-2021



Remerciements

Avant de rédiger ce mémoire, nous nous étions toujours demandé pourquoi les remerciements étaient placés au début du document plutôt qu'à la fin. Nous comprenons aujourd'hui que les remerciements ont leur place au début du document car sans les individus et organismes qui y sont mentionnés, force est d'admettre qu'il n'y aurait probablement aucun document à présenter.

Nous tenons à remercier DIEU qui nous a donné la volonté et la patience d'étudier et nous a aidé à réaliser ce travail ;

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui nous tenons à exprimer et témoigner toute nos reconnaissances.

Nous tenons dans un premier temps à exprimer nos plus vifs remerciements à notre encadreur et Co-encadreur de ce mémoire : Mr KHODJET Kesba et Mr BOUKERT Billel, Pour leurs patiences, leurs disponibilités et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter nos réflexions ;

Nos vifs remerciements vont aussi aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail.

Nous tenons à remercier aussi toutes les personnes qui m'ont aidée pour la réalisation de ce travail ainsi que toute l'équipe administrative d'Institut d'Aéronautique et des études spatiales Blida.

Nous tenons exprimer nos reconnaissances envers les amis et les collègues qui n'ont apporté leur support moral et intellectuelle tout au long de nos démarches ;

Mes salutations à mes camarades de la promotion 2019-2021 pour leurs encouragements.

Merci



Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ;

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, à qui tu m'as récompensé de son amour, à ma vie et mon bonheur ma chère mère.

A la personne qui j'aime, c'est mon père que dieu ait pitié de lui et fasse son lieu de repos du paradis. « **Mon chère père Guesmia** ».

A mes chères grand- parents **Aicha** et **Hadj Belaaredj** aucune dédicace ne saurait exprime mon respect, mon amour éternel, Merci pour tous vos efforts pour m'élever, que dieu les protèges et mon chère oncle **Mohamed** qui le j'aime beaucoup merci pour leur encouragement et votre sacrifice pour moi.

A mes oncles: M'hamed, Houari, Benchohra, Benmlouka.

A mes chères sœurs : Biba, Tasnim.

A mon binôme : Nedjmeddine.

A mes chères amis : Pour notre amitié et tous les bons moments passés et à venir et nos fous rires partagés : Ali, Ayoub, Mostapha, Soheib, Hakim, Fadi, Kader, Rayen, Lakhdar.

Amar



Dédicace

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut... Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance... Aussi, c'est tout simplement que Je dédie ce modeste travail en témoignage de toute mon affection et mon respect à :

A ma sublime et très chère maman et mon père KHALED qui n'ont jamais cessé de m'encourager et me soutenir.

A mon frère MOUNKID et ma chère sœur MEISSOUNE.

A mon binôme AMAR.

A tous les membres de ma famille.

A *tous* mes amis : Pour notre amitié et tous les bons moments passés et à venir et nos fous rires partagés.

Et spécialement : Adel, Soheib, Djalel, Fadi, Karim, Rayane, Liza, Fairouz, Nihad.

Nedjmeddine

Résumé :

Notre étude porte sur l'évolution des contraintes dans une plaque sandwich métal/céramique avec une fissure transversale soumise à des effets des distributions linéaires et non linéaires de la température et de la concentration d'humidité. En premier lieu la modélisation de la fissuration transverse pour un composite hybride sera soumise à une traction uni-axiale. Et à la fin, nous verrons l'impact de la distribution non linéaire de la température et humidité sur le comportement des contraintes dans un composite hybride métal/céramique fissuré.

Summary:

Our study focuses on the stress evolution in a metal/ceramic sandwich plate with transverse cracking subjected to the effects of linear and non-linear temperature and moisture concentration distributions. First, the modeling of transverse cracking for a hybrid composite will be subjected to uniaxial tension. And finally, we will see the impact of the nonlinear distribution of temperature and humidity on the stress behavior in a cracked metal/ceramic hybrid composite.

ملخص:

تركز دراستنا على تطور الضغوط في صفيحة مركبة من (معدن / سيراميك) مع صدع عرضي يتعرض لتأثيرات التوزيعات الخطية وغير الخطية لدرجة الحرارة وتركيز الرطوبة. في المقام الأول، ستخضع نمذجة المركب الهجين ذو صدع عرضي الى توتر أحادي المحور. وفي النهاية، سنرى تأثير التوزيع غير الخطي لدرجة الحرارة والرطوبة على سلوك الإجهاد في المركب المتصدع (المعدن / السيراميك).

Mots clés : fissure transversales, hybride, effet hygrothermique

Liste des symboles

(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.

ΔT : Température d'opération – température de cuisson.

t : Temps.

h_1 : Epaisseur de la couche 0° .

h_2 : Demi-épaisseur de la couche 90° .

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

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

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

Liste des symboles

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

x : Coordonnée longitudinale.

x, y, z : Repère du pli.

δ : Rapport d'épaisseur.

σ_{x1} : Contraintes longitudinale dans la couche 0° .

σ_{x2} : Contraintes longitudinale dans la couche 90° .

σ_{y1} : Contraintes transversal dans la couche 0° .

σ_{y2} : Contraintes transversal dans la couche 90° .

τ_{xy1} : Contrainte de cisaillement dans la couche 0° .

τ_{xy} : Contrainte de cisaillement dans la couche 90° .

ν_{xy} : Coefficient de poisson longitudinale.

ν_{yz} : Coefficient de poisson transverse.

$F^{(i)}(x, y)$: La fonction de contrainte.

σ_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.

P_m : pourcentage de métal.

P_c : pourcentage de céramique.

T_t : La température de la surface supérieure.

T_b : la température de la surface inférieure.

Liste des symboles

C_t : la concentration en humidité de la surface supérieure.

C_b : la concentration en humidité de la surface inférieure.

Table des matières

Remerciements

Dédicace

Résumé

Tables des symboles

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale : 15

Chapitre I : Recherche bibliographique.

I.1. Introduction : 18

I.2. Problématique : 19

I.3. Travaux effectués : 19

I.4. Définition du sujet : 21

Chapitre II : Modélisation de la fissuration transverse dans un matériau composite hybride.

II.1. Introduction : 24

II.2. Analyse généralisée : 24

II.2.1. Choix des fonctions de contrainte pour un composite hybride croisé : 24

II.2.2. Le modèle Shear-lag pour le stratifié hybride : 28

II.2.3. Expressions des contraintes dans le stratifié hybride : 32

Chapitre III : Simulation et résultats des stratifiés hybrides fissures avec chargement mécanique.

III.1. Introduction : 35

III.2. Organigramme : 35

III.3. Choix du matériau de simulation : 38

III.4. Distribution des contraintes sous chargement mécanique : 39

III.4.1. Distribution de la contrainte longitudinale dans la couche 0° : 39

III.4.2. Distribution de la contrainte transversale : 41

III.4.3. Distribution de la contrainte de cisaillement à l'interface : 44

III.4.4. Distribution de la contrainte longitudinale dans la couche 90° : 47

III.5. Conclusion : 49

Table des matières

Chapitre IV : Simulation et résultats de la distribution non linéaire de la température et humidité sur le comportement des contraintes dans un composites fissurée métal/céramique.

IV.1. Introduction :	51
IV.2. Organigramme :.....	51
IV.3. Effets de la concentration thermique non linéaire et de l'humidité sur la distribution des contraintes :.....	54
IV.3.1. Choix de matériau de simulation :	54
IV.4. Conclusion :	69
Conclusion générale :	71
Références bibliographiques:	73

Liste des figures

Chapitre II : Modélisation de la fissuration transverse dans un matériau composite hybride.

Figure II.1 : fissuration transverse et cellule élémentaire.....	25
Figure II.2 : Système de coordonnées du modèle analytique.....	26
Figure II.3 : Représentation des contraintes dans les différentes couches.....	28
Figure II.4 : Distributions de la température dans le sens de l'épaisseur.....	31

Chapitre III : Simulation et résultats des stratifiés hybrides fissurés avec chargement mécanique.

Figure III.1 : Organigramme du MICAFISS.....	37
Figure III.2 : Configuration du stratifié hybride.....	38
Figure III.3 : Distribution de la contrainte inter-laminaire à l'interface 0/90 dans la couche 0° pour le stratifié [0/90 ₂] _s et pour différentes densités de fissuration.....	39
Figure III.4 : Distribution de la contrainte inter-laminaire à l'interface 0/90 dans la couche 0° pour différents rapports d'épaisseur et S=0.5mm.....	40
Figure III.5 : Distribution de la contrainte normale à l'interface 0/90 dans la couche 0° pour un stratifié hybride et différentes densités de fissures avec $\delta = 2$	41
Figure III.6 : Distribution de la contrainte transversale à l'interface 0/90 dans la couche 90° pour un stratifié hybride et différentes densités de fissures avec $\delta = 2$	41
Figure III.7 : Distribution de la contrainte normale à l'interface 0/90 pour un stratifié hybride et différents rapports d'épaisseur avec S =0.5 mm.....	42
Figure III.8 : Distribution de la contrainte normale à l'interface 0/90 dans la couche 90° pour un stratifié hybride et différents rapports d'épaisseur avec S =0.5 mm.....	43
Figure III.9 : Distribution de la contrainte de cisaillement à l'interface 0/90 pour un stratifié hybride et différentes densités de fissuration avec $\delta = 2$	44
Figure III.10 : Distribution de la contrainte de cisaillement à l'interface 0/90 dans la couche 90° pour un stratifié hybride et différentes densités de fissuration avec $\delta = 2$	44
Figure III.11 : Distribution de la contrainte de cisaillement à l'interface 0/90 pour un stratifié hybride et différents rapports d'épaisseur avec S =0.5mm.....	45
Figure III.12 : Distribution de la contrainte de cisaillement à l'interface 0/90 dans la couche 90° pour un stratifié hybride et différents rapports d'épaisseur avec S =0.5mm.....	46
Figure III.13 : Distribution de la contrainte inter-laminaire à l'interface 0/90 dans la couche 90° pour le stratifié [0/90 ₂] _s pour différentes densités de fissuration.....	47

Liste des figures

Figure III.14 : Distribution de la contrainte inter-laminaire à l'interface 0/90 dans la couche 90° pour différents rapports d'épaisseur et $S=0.5\text{mm}$	48
Chapitre IV : Simulation et résultats de la distribution non linéaire de la température et humidité sur le comportement des contraintes dans un composites fissurée métal/céramique.	
Figure IV.1 : Organigramme du MICAZHN.....	53
Figure IV.2 : Modèle géométrique d'une plaque sandwich métal/céramique avec fissures transversales.....	54
Figure IV.3 : Distribution de la contrainte normale inter laminaire dans la couche adhésive entre deux fissures ($s = 0,5 \text{ mm}$) avec différentes conditions environnementales et une proportion différente de matériaux ($\sigma_x = 100 \text{ MPa}$).....	56
Figure IV.4 : Distribution la Contrainte transversale dans la couche céramique de la plaque sandwich métal/céramique entre deux fissures ($s = 0,5 \text{ mm}$) avec différentes conditions environnementales et une proportion différente de matériaux ($\sigma_x = 100 \text{ MPa}$).....	58
Figure IV.5 : Distribution de la contrainte de cisaillement inter laminaire dans la couche adhésive entre deux fissures ($s = 0,5 \text{ mm}$) avec différentes conditions environnementales et une proportion différente de matériaux ($\sigma_x = 100 \text{ Mpa}$).....	60
Figure IV.6 : Distribution de de la Contrainte de cisaillement dans la couche céramique de la plaque sandwich métal/céramique entre deux fissures ($s = 0,5 \text{ mm}$) avec différentes conditions environnementales et une proportion différente de matériaux ($\sigma_x = 100 \text{ Mpa}$).....	62
Figure IV.7 : Distribution de la contrainte normale inter laminaire à l'interface entre deux fissures avec une distribution linéaire et non linéaire de la température et de la concentration en humidité.....	67
Figure IV.8 : Distribution de de la Contrainte transversale dans la couche céramique de la plaque sandwich métal/céramique entre deux fissures avec une distribution linéaire et non linéaire de la température et de la concentration en humidité.....	67
Figure IV.9 : Distribution de la contrainte de cisaillement inter laminaire à l'interface entre deux fissures avec une distribution linéaire et non linéaire de la température et de la concentration en humidité.....	68
Figure IV.10 : Distribution la contrainte de cisaillement dans la couche céramique entre deux fissures avec une distribution linéaire et non linéaire de la température et de la concentration en humidité.....	69

Liste des tableaux

Chapitre III : Simulation et résultats des stratifiés hybrides fissures avec chargement mécanique.

Tableau III.1 : Propriétés élastiques des matériaux.....38

Chapitre IV : Simulation et résultats de la distribution non linéaire de la température et humidité sur le comportement des contraintes dans un composites fissurée métal/céramique.

Tableau IV.1 : Distribution de la contrainte transversale à l'interface de la plaque sandwich métal/céramique entre deux fissures avec une distribution linéaire et non linéaire de la température et de la concentration en humidité. (n=1, n=2) entre deux fissures (s=0.5mm) dans la couche adhésive.....63

Tableau IV.2 : Distribution de la contrainte de cisaillement à l'interface de la plaque sandwich métal/céramique entre deux fissures avec une distribution linéaire et non linéaire de la température et de la concentration en humidité. (n=1, n=2) entre deux fissures (s=0.5mm) dans la couche adhésive.....64

Tableau IV.3 : Distribution de la contrainte transversale dans la couche céramique de la plaque sandwich métal/céramique entre deux fissures avec une distribution linéaire et non linéaire de la température et de la concentration en humidité. (n=1, n=2) entre deux fissures (s=0.5mm).....65

Tableau IV.4 : Distribution de la Contrainte de cisaillement dans la céramique de la plaque sandwich métal/céramique entre deux fissures avec une distribution linéaire et non linéaire de la température et de la concentration en humidité. (n=1, n=2) entre deux fissures (s=0.5mm).....66

Introduction générale

Introduction générale

Dans les industries aéronautiques et spatiales, la conception des structures, qu'ils s'agissent d'aéronefs, 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 (des températures et humidités cycliques, à des radiations ultraviolettes, à des immersions salines et alcalines, et aux chargements statiques et dynamiques), 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° , beaucoup de recherche ont été développées qui tentent d'évaluer la répartition des contraintes et la dégradation de la rigidité due à des micros fissures dans les stratifiés.

L'esprit de cette recherche, doit tenir compte dans un premier temps du comportement des contraintes d'un matériau hybride avec une fissuration transversale soumis à une traction uniaxiale. Une validation des résultats sera faite avec des travaux publiés par Belmana et Zhang. Ensuite, l'évolution des contraintes sous conditions hygrothermique sera étudiée pour le matériau hybride métal/céramique fissurés.

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

- 1- Une étude bibliographique sur les matériaux composites, et nous avons présenté notre problème avec des travaux déjà publiés liés à notre recherche. Cette étude nous a permis d'orienter notre recherche.
- 2- Le deuxième chapitre présente la modélisation de la fissuration transverse dans un composite hybride avec un schéma appelé modèle de transfert du chargement par cisaillement (Shear-lag).
- 3- Dans le troisième chapitre, nous représenterons les résultats obtenus par la simulation du comportement mécanique d'un composite hybride fissuré et sous sollicitation.

Introduction générale

4- Dans le quatrième chapitre, on donne la représentation du comportement de contraintes dans un matériau composite métal/céramique fissuré, soumis à des sollicitations de traction et sous différentes conditions hygrothermiques.

5- Nous terminerons par une conclusion générale et des perspectives futures.

Chapitre I

Recherche bibliographique

Chapitre I : Recherche Bibliographique

I.1. Introduction :

Les matériaux jouent un rôle important dans la vie des êtres humains depuis le premier homme sur Terre. À différentes époques, l'homme a utilisé différents matériaux ou fabriqué des composites en raison de leur facilité d'utilisation dans de nombreuses applications. Au départ, on utilisait fréquemment le bronze, qui est en fait un alliage d'étain et de cuivre. Le fer a également été découvert et a continué à intéresser les gens pour produire différents objets. Par la suite, un certain nombre d'alliages différents de métaux et de non-métaux ont été conçus à des fins multiples. Les matériaux composites ont ensuite attiré l'attention des chercheurs en raison de leur large éventail d'applications. Les matériaux composites sont plus légers et plus solides et peuvent également offrir une certaine souplesse de conception. Ils offrent une résistance à la corrosion et à l'usure.

Les matériaux composites sont largement utilisés dans les applications structurelles pour diverses raisons. Cependant, le comportement de déformation, les mécanismes de défaillance et la tolérance aux dommages des composites ne sont pas facilement quantifiables en raison des caractéristiques hétérogènes des matériaux. L'un des modes de défaillance les plus courants dans les matériaux composites est l'apparition de multiples fissures de la matrice dans des couches à 90°. Bien que la fissuration de la matrice provoque rarement la défaillance finale des composites, elle peut fortement nuire aux performances des laminés. Les tests montrent que la rigidité du stratifié est réduite à cause de la fissuration de la matrice. De plus, avec la croissance des fissures de la matrice, d'autres modes d'endommagement tels que la délamination et la microfissuration (les microfissures s'étendent aux couches adjacentes à une couche qui a subi une fissuration de la matrice) apparaissent.

Ces mécanismes d'endommagement peuvent conduire à la rupture du stratifié. Pour mettre le suivi des processus d'endommagement des composites il est nécessaire de prévoir les effets de la fissuration de la matrice sur la réduction de la rigidité, les matériaux composites à matrice céramique pouvaient être fortement altérés par les facteurs environnementaux tels que la température, l'humidité ambiante, les rayons ultraviolets, l'évolution de ses 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

Chapitre I : Recherche Bibliographique

recherches scientifiques, en vue de connaître avec précision la durabilité de la structure composite et de garantir ainsi sa fiabilité.

I.2. Problématique :

Afin d'évaluer quantitativement le comportement mécanique d'un composite sous sollicitation, le problème à résoudre est celui du comportement du matériau composite fissuré sous l'effet de la température et l'humidité. Le modèle Shear-lag modifié développé par Zhang [3] est utilisé pour déterminer le comportement mécanique du stratifié sous l'effet hygrothermique. Ce modèle Le modèle prédit est basé sur un critère de résistance de la couche transversale qui accepte que de nouvelles fissures transversales soient générées lorsque la contrainte axiale appliquée atteint la résistance à la traction transversale de la couche avec la même direction.

I.3. Travaux effectués :

Les constructions sandwich sont couramment utilisées dans de nombreux types de structures d'ingénierie en raison de leur rigidité exceptionnelle, de leur faible poids spécifique, de leurs qualités d'isolation supérieures, de leurs excellentes caractéristiques de vibration et de leurs bonnes propriétés de fatigue. Récemment, la construction en sandwich est devenue encore plus attrayante pour analyser le comportement thermo- mécanique des feuilles de surface des matériaux composites avancés [1-2]

Zhang et Zhu [3] ont proposé un modèle modifié de Shear-lag qui prend en considération la contrainte normale et de cisaillement inter laminaire transféré de la couche adhésive inter laminaire. Le modèle prédit est basé sur un critère de résistance de la couche transversale qui accepte que de nouvelles fissures transversales soient générées lorsque la contrainte axiale appliquée atteint la résistance à la traction transversale de la couche avec la même direction. Ensuite, El Meiche et al. [4] ont étudié le comportement des propriétés mécaniques, en utilisant le même modèle pour un stratifié composite hybride avec une fissuration de la matrice. Il est

Chapitre I : Recherche Bibliographique

montré que les propriétés des couches à 90° et 0° ont principalement un impact sur la distribution des contraintes et la réduction de la rigidité.

M. Kashtalyan et al. [5] ont modélisé un échantillon à domaine unique d'un composite métal/céramique avec une microstructure lamellaire en utilisant une combinaison de moyens analytiques et de calcul numérique. Le champ de contrainte dans l'échantillon contenant de multiples fissures transversales dans la couche de céramique était déterminé à l'aide d'une approche 2-D modifiée du décalage de cisaillement et d'une méthode par éléments finis. Ensuite, le modèle de contrainte équivalente a également été appliqué pour prédire la dégradation des propriétés de la rigidité due à la fissuration transversale multiple.

Megueni, Tounsi et Adda Bedia [6], 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 stratifiés 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 polymère/IM7 à fibres de carbone et le PETI5/IM7 à fibres de carbone, à une expérience de vieillissement dont la température varie de 35°C à 95°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

Chapitre I : Recherche Bibliographique

à l'apparition de microfissurations dans les plis à 90° en l'absence de tout chargement mécanique. L'eau absorbée induit des microfissurations au bout de 1000 heures à 80°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/époxy Thornel 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 [10] 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 [11] ont proposé un modèle mathématique basé sur la notion de la fonction de perturbation de contrainte appliquée sur les composites croisées et fissurées. 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.

Chapitre I : Recherche Bibliographique

M. Khodjet-Kesba [12] a étudié 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. Les résultats obtenue montrent la dépendance de la réduction des caractéristiques mécaniques en fonction de la densité de fissuration et aux conditions d'environnement.

R. Belmana et M. Laghouati [13] ont étudié 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 a été développée. Les résultats trouvés étaient validés avec l'expérimentale et des travaux publiés par El Meiche [4] et Zhang [3]. Par la suite, le comportement de la contrainte (longitudinale, transversale et de cisaillement) et de la rigidité été étudié avec la variation de la température et humidité. Finalement, les résultats trouvés représentaient clairement la dépendance de la réduction des caractéristiques mécaniques en fonction de la densité de fissuration et aux conditions d'environnement.

I.4. Définition du sujet :

L'objectif principal de notre travail est de voir l'effet de la distribution linéaire et non linéaire de la température et humidité dans un composite hybride métal/céramique fissuré. Tout d'abord, on doit traiter la modélisation de la fissuration transversale dans un composite métal/céramique soumis à une traction uni-axiale. Après ce dernier est sujet à l'influence des conditions hygrothermiques non linéaires.

La principale démarche de l'étude sera essentiellement la simulation numérique, par le code MAPLE

Chapitre II

Modélisation de la fissuration transverse dans un matériau composite hybride

II.1. Introduction :

Lorsqu'une structure composite est soumise à une charge statique ou à un certain nombre de cycles de fatigue, elle subit des dommages. Les types de dommages les plus courants dans les matériaux composites sont la fracture locale des fibres, Fissuration locale de la matrice, délamination locale et décollement local de l'interface. Les fissures transversales se produisent dans des couches où les fibres qui sont désordonnées par rapport à la direction de la contrainte appliquée. Des fissures apparaissent dans la matrice ou à l'interface entre les fibres de la 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° et 90° par l'intermédiaire d'une couche fine située à l'interface entre les couches. Les modèles de transfert du chargement par cisaillement supposent que le déplacement longitudinal est constant à travers tout l'épaisseur des couches orientées à 0° . 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 qui transfère les contraintes de cisaillement inter-laminaire et même les contraintes normales.

II.2. Analyse généralisée :

II.2.1. Choix des fonctions de contrainte pour un composite hybride croisé :

On considère un composite hybride avec des fissurations uniformes de distance $2s$ dans la couche (2) sous chargement mécanique uni-axiale σ_x (Fig. 2.1). Les deux couches extérieures

Chapitre II : Modélisation de la fissuration transverse dans un matériau composite hybride

(1) sont d'un matériau A avec une épaisseur constante h_1 et la couche centrale (2) est d'un matériau B avec une épaisseur h_2 . Pour cela les théories suivantes ont été adoptées :

- Chaque couche est considérée 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 contraintes soit indépendante d'elle.

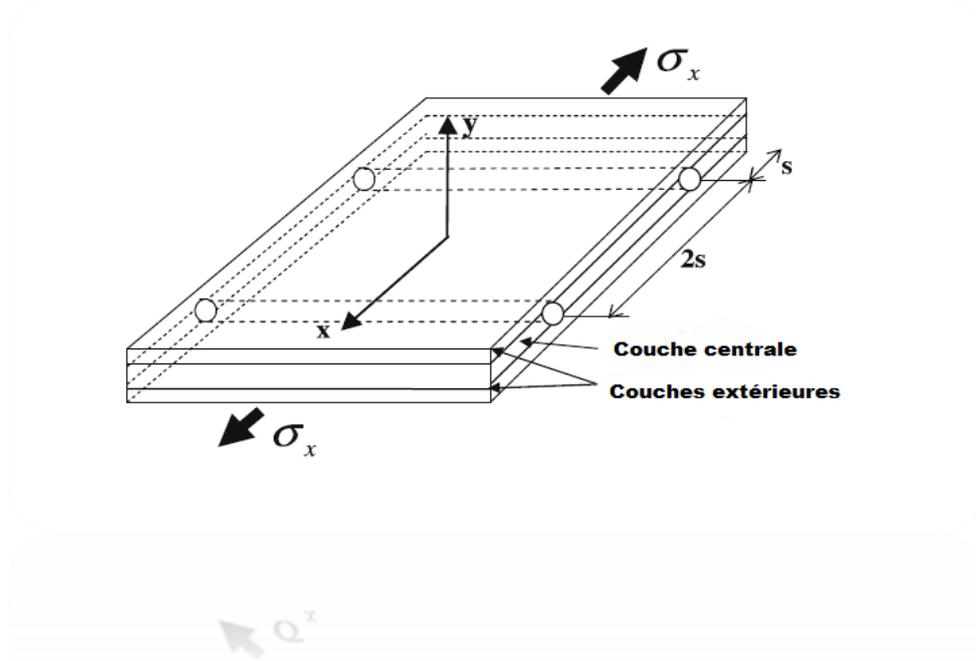


Figure II.1 : fissuration transverse et cellule élémentaire.

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

$$F^{(i)}(x, y) = f^{(i)}(x)g^{(i)}(y) \quad (\text{II.1})$$

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

$$g^{(2)}(y) = A^{(2)}y^2 + B^{(2)}y + C^{(2)} \quad (\text{II.3})$$

Où ($i= 1,2$) dénoté les couches extérieur et intérieur et h est la moitié de l'épaisseur du stratifié.

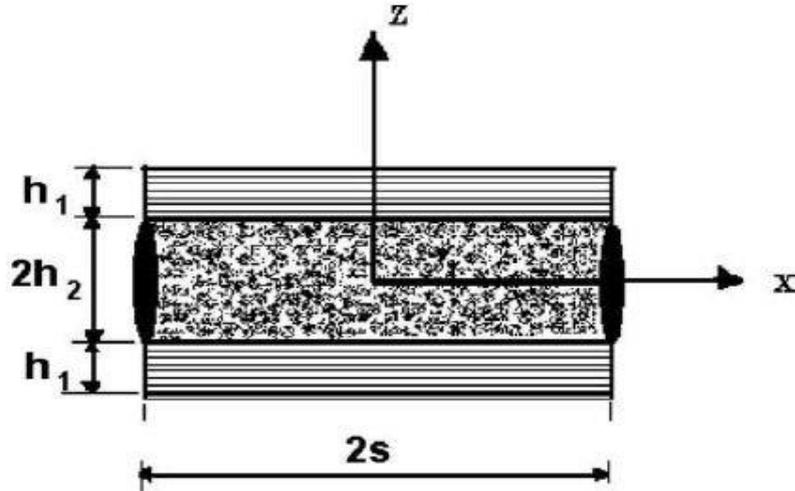


Figure II.2 : Système de coordonnées du modèle analytique.

À partir d'équation (1), les expressions des contraintes dans chaque couche sont obtenues à l'aide des équations suivantes [16] :

$$\sigma_x^{(i)} = \frac{\partial^2 F^{(i)}}{\partial y^2} \quad (\text{II.4})$$

$$\sigma_y^{(i)} = \frac{\partial^2 F^{(i)}}{\partial x^2} \quad (\text{II.5})$$

$$\tau_{xy}^{(i)} = -\frac{\partial^2 F^{(i)}}{\partial x \partial y} \quad (\text{II.6})$$

Les expressions ci-dessus des contraintes peuvent satisfaire automatiquement l'équation d'équilibre dans l'absence des forces dans le corps [16] :

$$\frac{\partial \sigma_x^{(i)}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}^{(i)}}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.7})$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}^{(i)}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y^{(i)}}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.8})$$

Pour la plaque sandwich, L'équilibre global du stratifié exige que :

$$\sigma_x^{(1)} h_1 + \sigma_x^{(2)} h_2 = \sigma_x h \quad (\text{II.9})$$

Les conditions limites, de symétrie et de la continuité illustrée à la Fig II.2 donnent :

$$\tau_{xy}^{(1)} = 0 \quad \text{à} \quad y=h \quad (\text{II.10})$$

$$\sigma_y^{(1)} = 0 \quad \text{à} \quad y=h \quad (\text{II.11})$$

$$\tau_{xy}^{(2)} = 0 \quad \text{à} \quad y=0 \quad (\text{II.12})$$

$$\tau_{xy}^{(1)} = \tau_{xy}^{(2)} \quad \text{à} \quad y=h_2 \quad (\text{II.13})$$

Chapitre II : Modélisation de la fissuration transverse dans un matériau composite hybride

$$\sigma y^{(1)} = \sigma y^{(2)} \quad \text{à} \quad y=h_2 \quad (\text{II.14})$$

$$\sigma x^{(2)} = 0 \quad \text{à} \quad x = \pm s \quad (\text{II.15})$$

$$\tau xy^{(1)} = \tau xy^{(2)} = 0 \quad \text{à} \quad x=0 \quad \text{ou} \quad x=\pm s \quad (\text{II.16})$$

$$u^{(1)} = u^{(2)} = 0 \quad \text{à} \quad x=0 \quad (\text{II.17})$$

$$v^{(1)} = 0 \quad \text{à} \quad y=0 \quad (\text{II.18})$$

On remplace les conditions des équations (II.10) à (II.18) dans les expressions des composantes de contraintes, on aura les équations suivantes :

$$A^{(1)} = 1 \quad (\text{II.19})$$

$$B^{(1)} = 0 \quad (\text{II.20})$$

$$C^{(1)} = 0 \quad (\text{II.21})$$

$$A^{(2)} = 1 \quad (\text{II.22})$$

$$B^{(2)} = 0 \quad (\text{II.23})$$

$$C^{(2)} = -h^2 h \quad (\text{II.24})$$

$$[f^{(1)}(x)]' = -\frac{h^2}{h_1} [f^{(2)}(x)]' \quad (\text{II.25})$$

$$[f^{(1)}(x)]'' = -\frac{h^2}{h_1} [f^{(2)}(x)]'' \quad (\text{II.26})$$

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

$$f^{(1)}(x) = -\frac{h^2}{h_1} f^{(2)}(x) + \frac{h}{2h_2} \sigma x \quad (\text{II.27})$$

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 (1) sont :

$$\sigma x^{(1)} = 2 \left[-\frac{h^2}{h_1} \varphi(x) + \frac{h}{2h_1} \sigma x \right] \quad (\text{II.28})$$

$$\sigma y^{(1)} = (y - h)^2 \left[-\frac{h^2}{h_1} \varphi''(x) \right] \quad (\text{II.29})$$

$$\tau xy^{(1)} = -2(y - h) \left[-\frac{h^2}{h_1} \varphi'(x) \right] \quad (\text{II.30})$$

Les éléments de la contrainte de la couche (2) sont :

$$\sigma x^{(2)} = 2\varphi(x) \quad (\text{II.31})$$

$$\sigma_y^{(2)} = (y^2 - h^2)\varphi''(x) \quad (\text{II.32})$$

$$\tau_{xy}^{(2)} = -2y\varphi'(x) \quad (\text{II.33})$$

Les déformations dans les couches (1) et (2) sont dérivées par :

$$\varepsilon_x^{(1)} = \frac{1}{E_x^{(1)}}\sigma_x^{(1)} - \frac{\nu_{xy}^{(1)}}{E_x^{(1)}}\sigma_y^{(1)} + \alpha_1 T(y) + \beta_1 C(y) \quad (\text{II.34})$$

$$\varepsilon_y^{(1)} = \frac{1}{E_y^{(1)}}\sigma_y^{(1)} - \frac{\nu_{xy}^{(1)}}{E_x^{(1)}}\alpha_x^{(1)} \quad (\text{II.35})$$

$$\varepsilon_x^{(2)} = \frac{1}{E_x^{(2)}}\sigma_x^{(2)} - \frac{\nu_{xy}^{(2)}}{E_x^{(2)}}\sigma_y^{(2)} + \alpha_2 T(y) + \beta_2 C(y) \quad (\text{II.36})$$

$$\varepsilon_y^{(2)} = \frac{1}{E_y^{(2)}}\sigma_y^{(2)} - \frac{\nu_{xy}^{(2)}}{E_x^{(2)}}\alpha_x^{(2)} \quad (\text{II.37})$$

A partir de l'équation (II.34) à l'équation (II.37) et des relations contraintes-déplacement, les champs de déplacement sont obtenus, en imposant les conditions limites de déplacement dans (II.17) et (II.18), comme suit :

$$u^{(1)} = \frac{2}{E_x^{(1)}} \left[-\frac{h^2}{h^1} \int \varphi(x) dx + \frac{h}{2h} \sigma_x X \right] - \frac{\nu_{xy}^{(1)}}{E_x^{(1)}} \left[-\frac{h^2}{h^1} \int \varphi''(x) dx \right] (y-h)^2 + (\alpha_1 T(y) + \beta_1 C(y))x \quad (\text{II.38})$$

$$v^{(1)} = -\frac{2\nu_{xy}^{(1)}}{E_x^{(1)}} \left[-\frac{h^2}{h^1} \varphi(x) + \frac{h}{2h^1} \sigma_x \right] y + \frac{1}{E_y^{(1)}} \left[-\frac{h^2}{h^1} \varphi''(x) \right] \frac{(y-h)^3}{3} + f(x) \quad (\text{II.39})$$

$$u^{(2)} = \left[\frac{2}{E_x^{(2)}} \left[\int \varphi(x) dx \right] - \frac{\nu_{xy}^{(2)}}{E_x^{(2)}} \right] \left[\int \varphi''(x) dx \right] (y-h)^2 + (\alpha_2 T(y) + \beta_2 C(y))x \quad (\text{II.40})$$

$$v^{(2)} = -\frac{2\nu_{xy}^{(2)}}{E_x^{(2)}} \varphi(x)y + \frac{1}{E_x^{(2)}} [\varphi''(x)] \left(\frac{1}{3}y^3 - h^2hy \right) \quad (\text{II.41})$$

Dans l'équation (II.39), $f(x)$ est une fonction qui est déterminée par les conditions de continuité à l'interface.

II.2.2. Le modèle Shear-lag pour le stratifié hybride :

Comme déjà modélisé par Zhang [3], Nous proposons l'existence d'une couche de résine inter-laminaire avec une épaisseur d qui sépare la couche extérieure et centrale (voir Fig. II.3).

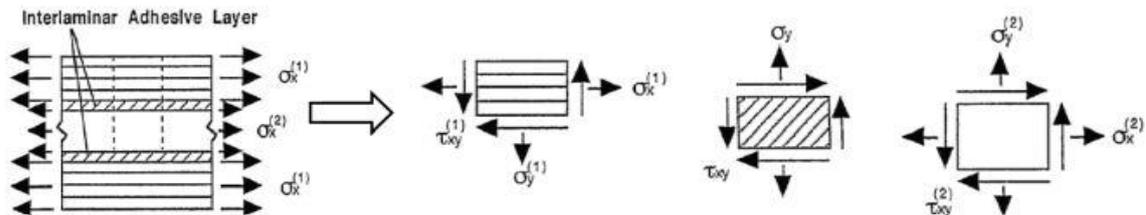


Figure II.3 : Représentation des contraintes dans les différentes couches.

Chapitre II : Modélisation de la fissuration transverse dans un matériau composite hybride

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

Les expressions des déformations moyennes sont obtenues en utilisant la déformation angulaire et la continuité du déplacement entre deux couches [4]

$$\overline{\varepsilon_y} = \frac{\overline{\partial v}}{\partial y} \approx \frac{v_1 - v_2}{d} \quad (\text{II.42})$$

$$\overline{\gamma_{xy}} = \frac{\overline{\partial u}}{\partial y} + \frac{\overline{\partial v}}{\partial x} \approx \frac{u_1 - u_2}{d} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_1}{\partial x} + \frac{\partial v_2}{\partial x} \right) \quad (\text{II.43})$$

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-laminaires sont :

$$\sigma_y = E \frac{v_1 - v_2}{d} \quad (\text{II.44})$$

$$\tau_{xy} = G \left[\frac{u_1 - u_2}{d} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_1}{\partial x} + \frac{\partial v_2}{\partial x} \right) \right] \quad (\text{II.45})$$

Où E et G sont les modules élastiques de la couche d'adhésive isotrope inter-laminaire. Mettrons l'Eqns. (II.39) et (II.41) dans l'équation (II.44) et $y = h/2$, la fonction $f(x)$ est trouvé. Incorporer ensuite Eqs. (II.38) à (II.41) et (II.45), nous obtenons :

$$\tau_{xy} = G \left[\frac{u_1 - u_2}{d} + \frac{\partial v_2}{\partial x} + \frac{d}{2E} \frac{\partial \sigma_y}{\partial x} \right] \quad (\text{II.46})$$

Remplaçons l'équation (II.38) à (II.41) et (II.29) ou (II.32) dans l'équation (II.46) et $y = h/2$, nous obtiendrons :

$$A\varphi'''(x) + B\varphi'(x) + C \int \varphi(x) dx = Dx \quad (\text{II.47})$$

Où

$$A = -\frac{G}{E_{y^{(2)}}} \left(\frac{1}{3} h^2 + h^2 \right) - \frac{d}{2E} G (h^2 - h^2) \quad (\text{II.48})$$

$$B = \frac{2\gamma_{xy}^{(2)}}{E_{x^{(2)}}} Gh - \left(\frac{\gamma_{xy}^{(1)} h_2 (h_2 - h)^2}{E_{x^{(1)}} h_1} - \frac{\gamma_{xy}^{(2)} (h^2 - h_2)}{E_{x^{(2)}}} \right) \frac{G}{d} - 2h \quad (\text{II.49})$$

$$C = \frac{2G}{d} \left(\frac{1}{E_{x^{(1)}}} \frac{h_2}{h_1} + \frac{1}{E_{x^{(2)}}} \right) \quad (\text{II.50})$$

$$D = \frac{G}{d} \left[\frac{1}{E_{x^{(1)}}} \frac{h}{h_1} \sigma_x + \left((\alpha_1 T(y) + \beta_1 C(y)) - (\alpha_2 T(y) + \beta_2 C(y)) \right) \right] \quad (\text{II.51})$$

Chapitre II : Modélisation de la fissuration transverse dans un matériau composite hybride

Les distributions de température et de concentration d'humidité sont supposées à travers l'épaisseur de la plaque avec deux cas :

a) Distribution linéaire de la température et de l'humidité :

La température de la surface supérieure est T_t et on considère qu'elle varie linéairement de T_t à la température de la surface inférieure T_b . La même considération est faite pour la concentration d'humidité. Par conséquent, l'augmentation de la température et de la concentration d'humidité à travers l'épaisseur est donnée par [17-18] :

$$T(y) = T_b + \Delta T \left(\frac{1}{2} + \frac{y}{h} \right) \quad (\text{II.52})$$

$$C(y) = C_b + \Delta C \left(\frac{1}{2} + \frac{y}{h} \right) \quad (\text{II.53})$$

Où $\Delta T = T_t - T_b$ et $\Delta C = C_t - C_b$ tels que C_t est la concentration en humidité de la surface supérieure et C_b est la concentration en humidité de la surface inférieure.

b) Distribution non linéaire de la température et de l'humidité :

Dans ce cas, on considère que la température et la concentration en humidité varient de la surface supérieure vers la surface inférieure selon la variation de la loi de puissance à travers l'épaisseur par [17-18] :

$$T(y) = T_b + \Delta T \left(\frac{1}{2} + \frac{y}{h} \right)^n \quad (\text{II.54})$$

$$C(y) = C_b + \Delta C \left(\frac{1}{2} + \frac{y}{h} \right)^n \quad (\text{II.55})$$

Où n est l'exposant de la température et de la concentration d'humidité ($1 < n < \infty$).

Les distributions linéaires et non linéaires de la température à travers la direction de l'épaisseur sont représentées dans la figure (II.4), les mêmes distributions sont attendues pour la concentration d'humidité.

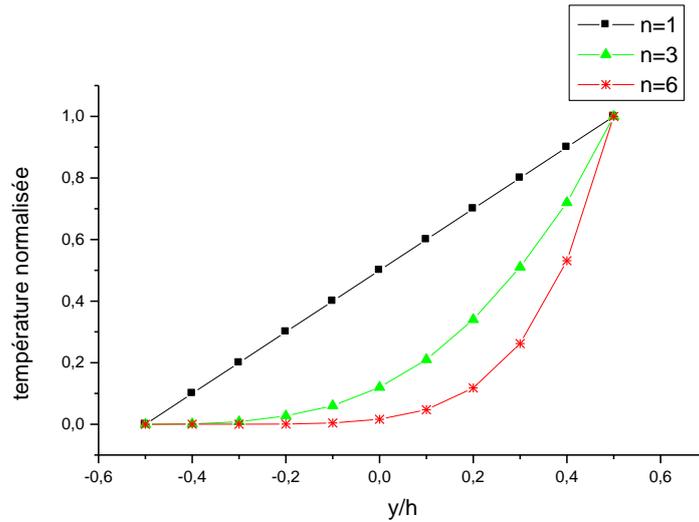


Figure II.4 : Distributions de la température dans le sens de l'épaisseur.

Dérivons l'équation. (II.47) par rapport à x et définissant $\xi = B/A$, $\eta = c/a$ et $\theta = D/A$, le résultat devient :

$$\varphi'''' + \xi\varphi'' + \eta\varphi = 0 \quad (\text{II.56})$$

La solution de l'équation (II.56) se trouve en résolvant l'équation caractéristique suivante :

$$\lambda^4 + \xi\lambda^2 + \eta = 0 \quad (\text{II.57})$$

Pour le stratifié hybride, les quatre racines de l'équation. (II.57) sont toujours complexes et la solution de λ est :

$$\lambda = \pm(a \pm bi) \quad (\text{II.58})$$

Où a et b sont positifs et exprimée par :

$$a = \eta^{1/4} \cos \frac{\beta}{2} \quad (\text{II.59})$$

$$b = \eta^{1/4} \sin \frac{\beta}{2} \quad (\text{II.60})$$

$$\beta = \arctan \sqrt{\left(\frac{4\eta}{\xi^2} - 1\right)} \quad (\text{II.61})$$

On voit que la solution λ est indépendante de l'espacement des fissures., la solution de l'équation (II.56) est :

$$\varphi(x) = M \cosh(ax) \cos(bx) + N \sinh(ax) \sin(bx) + \frac{D}{c} \quad (\text{II.62})$$

Chapitre II : Modélisation de la fissuration transverse dans un matériau composite hybride

On respecte les conditions aux limites (équations (2.15) et (2.16)), M et N sont donnés par :

$$M = \frac{a \cosh(as) \sin(bs) + b \sinh(as) \cos(bs)}{\Delta} \left(-\frac{D}{c}\right) \quad (\text{II.63})$$

$$N = \frac{a \sinh(as) \cos(bs) + b \cosh(as) \sin(bs)}{\Delta} \left(\frac{D}{c}\right) \quad (\text{II.64})$$

Où Δ et :

$$\Delta = \frac{1}{2} [b \sinh(2as) + a \sin(2bs)] \quad (\text{II.65})$$

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 [19-20], 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 (II.44) et pour $(u_1 - u_2)$ dans l'équation (II.45) sont proches de zéro. Cela signifie que le modèle de diffusion de cisaillement peut assurer l'approximation du déplacement à l'interface.

II.2.3. Expressions des contraintes dans le stratifié hybride :

A partir d'équations. (II.50) et (II.51), on a :

$$\frac{D}{c} = \frac{1}{2} (\sigma_{xm0}^{(2)} + \sigma_{xt0}^{(2)}) \quad (\text{II.66})$$

Où $\sigma_{xm0}^{(2)}$ est la contrainte mécanique dans la couche de 90° pour le stratifié non endommagé (c a d. $s \rightarrow \infty$) qui peut être trouvée par la théorie classique des stratifier [21]

$$\sigma_{x0}^{(2)} = \frac{E_x^{(2)}}{E_0} \sigma_x \quad (\text{II.67})$$

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

$$E_0 = \frac{E_x^{(1)} h_1 + E_x^{(2)} h_2}{h} \quad (\text{II.68})$$

Chapitre II : Modélisation de la fissuration transverse dans un matériau composite hybride

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

$$\sigma_x^{(1)} = \sigma_{xm0}^{(1)} \left(1 + \frac{E_x^{(2)} \delta}{E_x^{(1)} \Delta} \{ [a \cosh(as) \sin(bs) + b \sinh(as) \cos(bs)] \cosh(ax) \cos(bx) - [a \sinh(as) \cos(as) - b \cosh(as) \sin(bs)] \sinh(ax) \sin(bx) \} \right) \quad (\text{II.69})$$

$$\sigma_y^{(1)} = -\frac{\delta}{2\Delta} (\sigma_{xm0}^{(2)}) (a^2 + b^2) (y - h)^2 \{ \sinh(as) \cos(bs) [a \sinh(ax) \sin(bx) + b \cosh(ax) \cos(bx)] - \cosh(as) \sin(as) [a \cosh(ax) \cos(bx) - b \sinh(ax) \sin(bx)] \} \quad (\text{II.70})$$

$$\tau_{xy}^{(1)} = \frac{\delta}{\Delta} (\sigma_{xm0}^{(2)}) (a^2 + b^2) (y - h) [\sinh(as) \cos(bs) \cosh(ax) \sin(ax) - \cosh(as) \sin(bs) \sinh(ax) \cos(bx)] \quad (\text{II.71})$$

$$\sigma_x^{(2)} = (\sigma_{xm0}^{(2)}) \left(1 + \frac{1}{\Delta} \{ [a \sinh(as) \cos(bs) - b \cosh(as) \sin(bs)] \sinh(ax) \sin(bx) - [a \cosh(as) \sin(bs) + b \sinh(as) \cos(bs)] \cosh(ax) \cos(bx) \} \right) \quad (\text{II.72})$$

$$\sigma_y^{(2)} = \frac{1}{2\Delta} (\sigma_{xm0}^{(2)}) (a^2 + b^2) (y^2 - h^2) \{ \sinh(as) \cos(bs) [a \sinh(ax) \sin(bx) + b \cosh(ax) \cos(bx)] - \cosh(as) \sin(bs) [a \cosh(ax) \cos(bx) - b \sinh(ax) \sin(bx)] \} \quad (\text{II.73})$$

$$\tau_{xy}^{(2)} = -\frac{1}{\Delta} (\sigma_{xm0}^{(2)}) (a^2 + b^2) y [\sinh(as) \cos(bs) \cosh(ax) \sin(bx) - \cosh(as) \sin(bs) \sinh(ax) \cos(bx)] \quad (\text{II.74})$$

De même dans l'Equation (2.63), $\sigma_{xm0}^{(1)}$ est la contrainte mécanique pour la couche à 0° du stratifié non endommagé :

$$\sigma_{xm0}^{(1)} = \frac{E_x^{(1)}}{E_0} \sigma_x \quad (\text{II.75})$$

Chapitre III

Simulation et résultats des stratifiés hybrides fissures avec chargement mécanique.

III.1. Introduction :

Afin d'évaluer quantitativement le comportement mécanique d'un composite sous sollicitation, il est important de connaître le champ de déplacement 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.

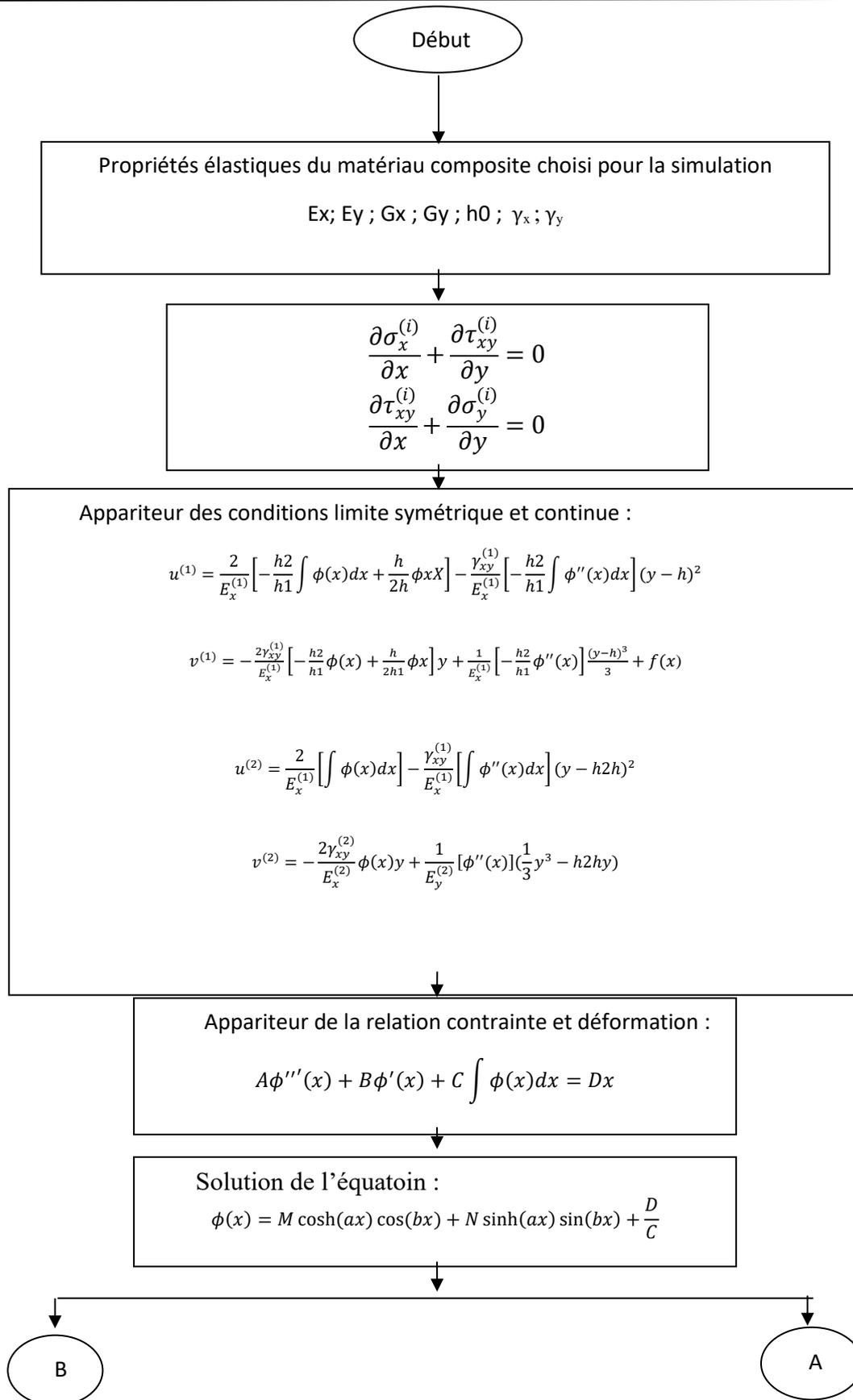
Premièrement, nous représentons les différents champs de contrainte suivant la longueur des stratifiés et le rapport d'épaisseur en utilisant le modèle Shear-lag modifié proposé par Zhang [3].

Finalement, une conclusion sera faite sur la variation de comportement des contraintes dans un matériau hybride avec fissuration transverse et notez les facteurs qui influencent cette variation.

III.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 cité précédemment. Notre programme est décrit à travers l'organigramme présenté ci-dessous.

Chapitre III : Simulation et résultats des stratifiés hybrides fissures avec chargement mécanique



Chapitre III : Simulation et résultats des stratifiés hybrides fissures avec chargement mécanique

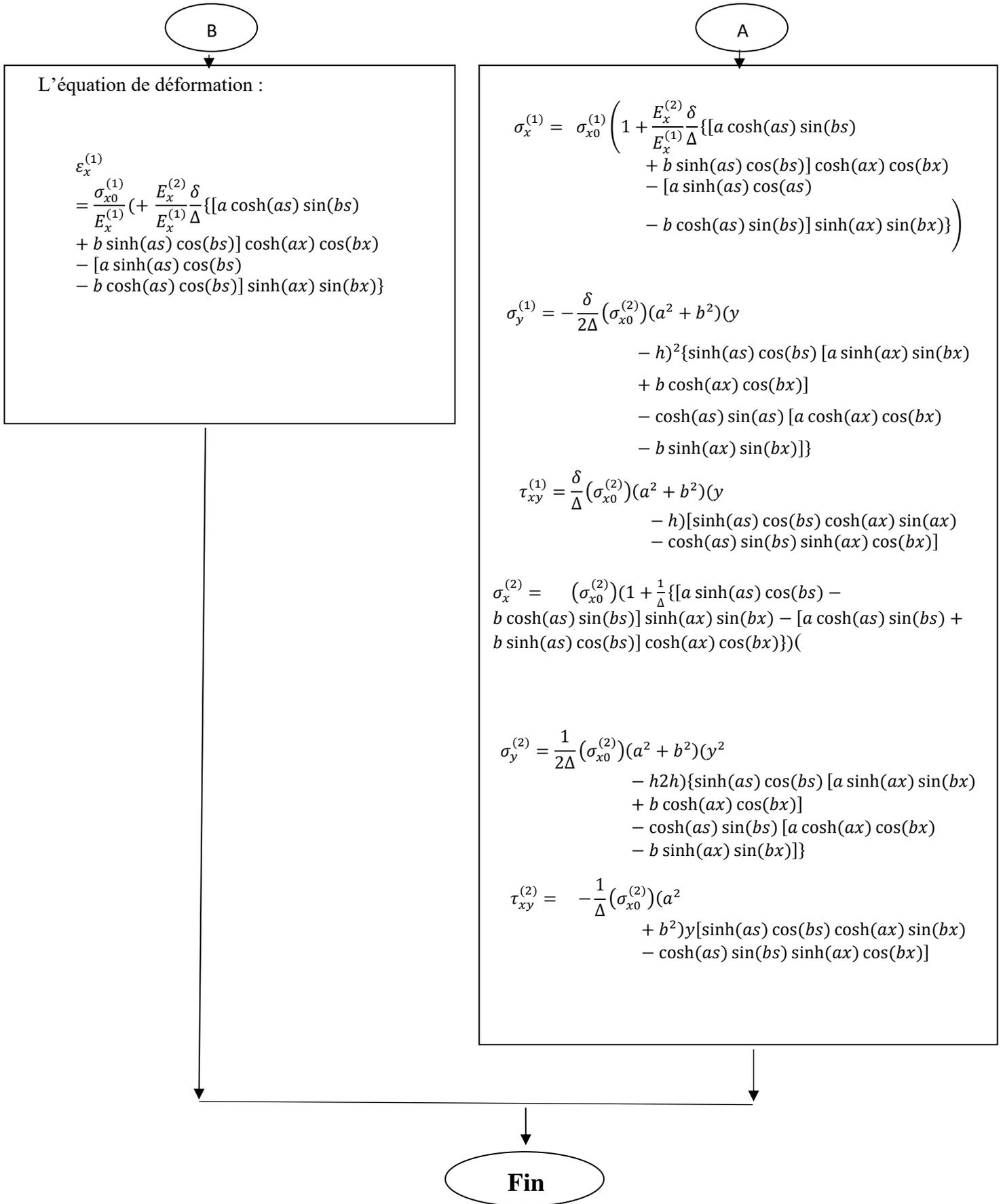


Figure III.1 : Organigramme du MICAFISS.

Chapitre III : Simulation et résultats des stratifiés hybrides fissures avec chargement mécanique

III.3. Choix du matériau de simulation :

Les matériaux composites choisis pour la simulation numérique sont : graphite/époxy et glass/époxy avec les propriétés élastiques (voir tableau 3.1) [14,15]. La propriété de la résine qui représente l'adhésive entre les couches 0° et 90° sont [28] : $E=3.45$ GPa, $G=1.28$ GPa et $\nu=0.3$.

Propriété mécanique	graphite /époxy [29]	glass /époxy [30]
E_x	144.8 GPa	44.73 GPa
E_y	9.58 GPa	12.76 GPa
G_x	4.79 GPa	5.8 GPa
G_y	4.2 GPa	4.49 GPa
ν_x	0.31	0.297
ν_y	0.4	0.42
h_0	0.127 mm	0.144 mm

Tableau III.1 : Propriétés élastiques des matériaux.

Pour le cas Hybride :

La configuration du stratifié hybride est représenté ci-dessous (voir figure III.2) avec : la couche (1) est le graphite/époxy avec l'orientation des fibres à 0° et la couche (2) est le verre/époxy avec l'orientation des fibres à 90° .

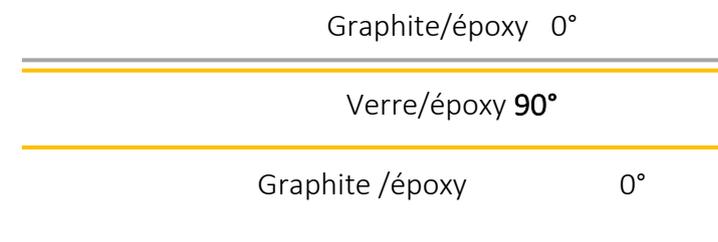


Figure III.2 : Configuration du stratifié hybride.

III.4. Distribution des contraintes sous chargement mécanique :

À travers les résultats présentés dans les figure III.3 à III.11 représentant les distributions des contraintes longitudinale, transversale et la contrainte de cisaillement à l'interface entre les couches 0° et 90° , et cela, pour différentes densités des fissurations ($s=0.5$ mm, $s=1$ mm et $s=2$ mm). La charge axile appliquée est égale à $\sigma_x = 100$ MPA.

III.4.1. Distribution de la contrainte longitudinale dans la couche 0° :

a) Influence de la densité de fissuration pour un stratifié hybride :

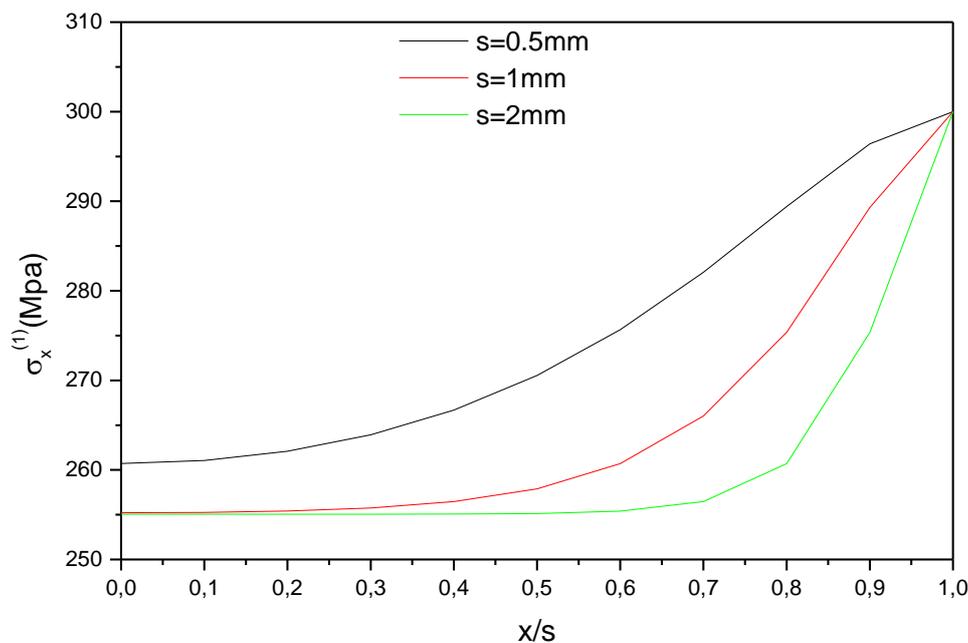


Figure III.3 : Distribution de la contrainte inter-laminaire à l'interface $0/90$ dans la couche 0° pour le stratifié $[0/90_2]_s$ et pour différentes densités de fissuration.

On note une augmentation de la contrainte longitudinale à l'interface $0/90$ dans la couche 0° 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 :

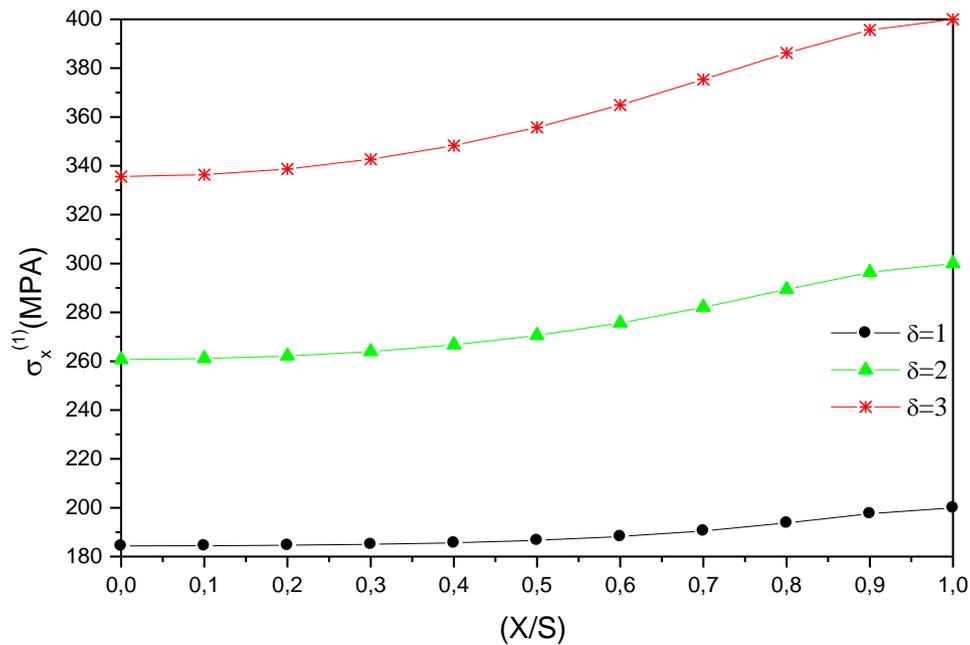


Figure III.4 : Distribution de la contrainte inter-laminaire à l'interface 0/90 dans la couche 0° pour différents rapports d'épaisseur et $S=0.5\text{mm}$.

Avec l'augmentation du rapport d'épaisseur (c a d le nombre de couche à 90°), on remarque une augmentation de la contrainte longitudinale à l'interface 0/90 pour un stratifié hybride avec $S=0.5\text{ mm}$ (figes III.4).

III.4.2. Distribution de la contrainte transversale :

a) Influence de la densité de fissuration pour un stratifié hybride :

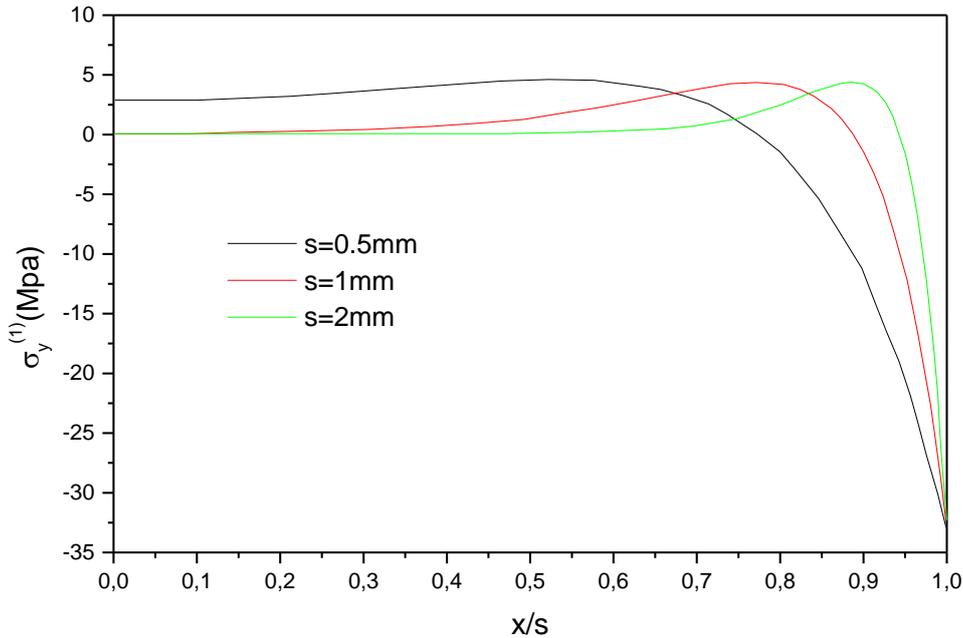


Figure III.5 : Distribution de la contrainte normale à l'interface 0/90 dans la couche 0° pour un stratifié hybride et différentes densités de fissures avec $\delta = 2$.

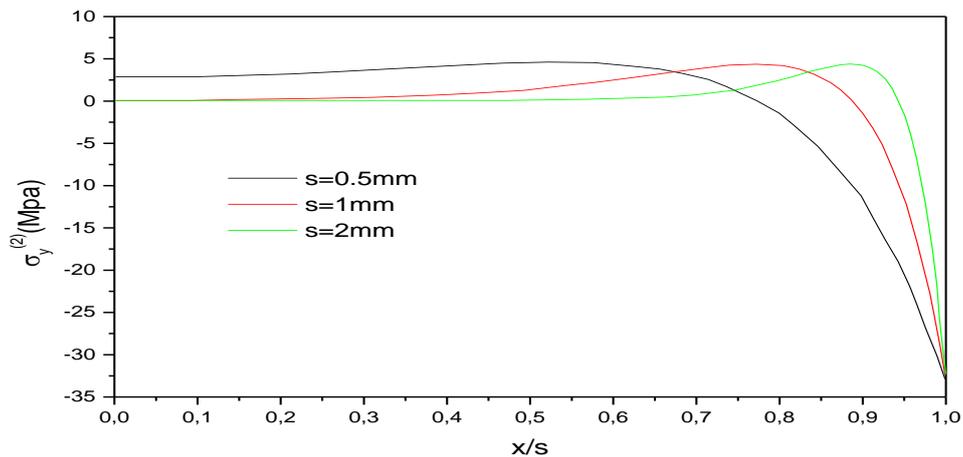


Figure III.6 : Distribution de la contrainte transversale à l'interface 0/90 dans la couche 90° pour un stratifié hybride et différentes densités de fissures avec $\delta = 2$.

Avec l'augmentation de la densité de fissuration (c a d S petit) on remarque que la contrainte normale existe même loin du plan de fissure (figure 3.5, figure 3.6). Par contre presque la même contrainte normale est observée pour différentes densités de fissuration, et cela, au plan de fissure. On note que le point de déformation est entre $0.6 < x/s < 0.9$.

b) Influence du rapport d'épaisseur pour un stratifié hybride :

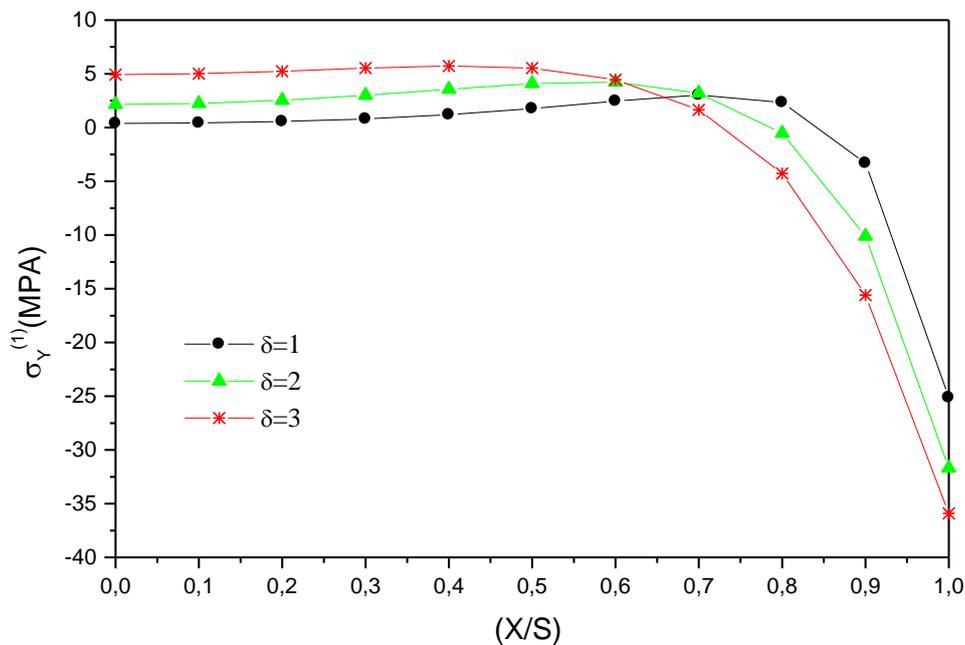


Figure III.7 : Distribution de la contrainte normale à l'interface 0/90 pour un stratifié hybride et différents rapports d'épaisseur avec $S = 0.5$ mm.

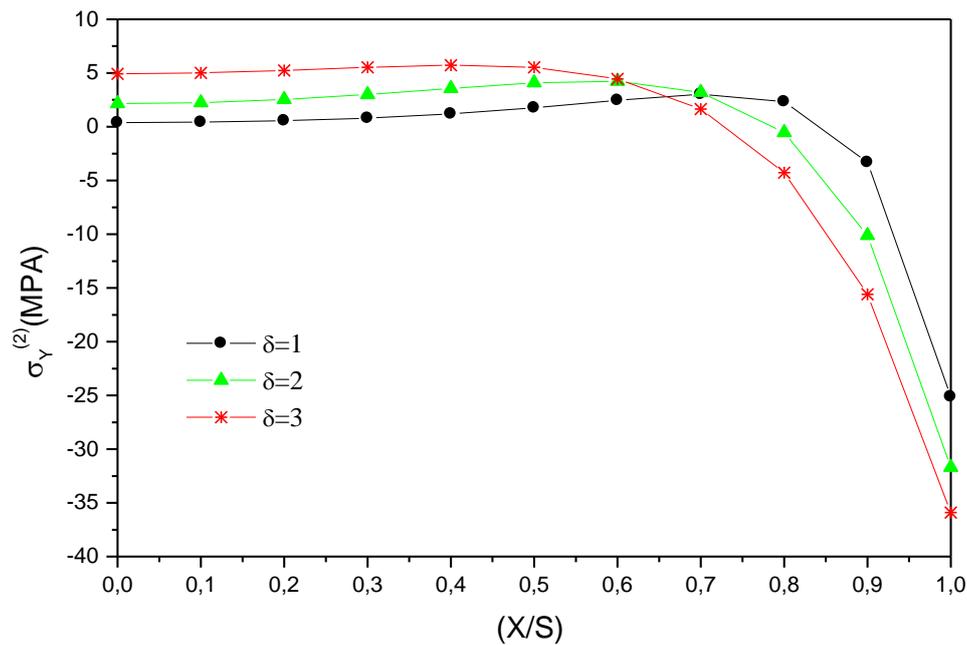


Figure III.8 : Distribution de la contrainte normale à l'interface 0/90 dans la couche 90° pour un stratifié hybride et différents rapports d'épaisseur avec $S=0.5$ mm.

La figure III.7 et la figure III.8 montrant une augmentation de la contrainte normale pour un stratifié hybride en traction, et cela, loin du plan de fissure avec l'augmentation du nombre de couche à 90°. Par contre presque la même contrainte normale est notée en compression au plan de fissure avec la variation du rapport d'épaisseur et ces courbes satisfont les conditions initiales. Le point de déformation est approximativement à 0.7.

III.4.3. Distribution de la contrainte de cisaillement à l'interface :

a) Influence de la densité de fissuration pour un stratifié hybride :

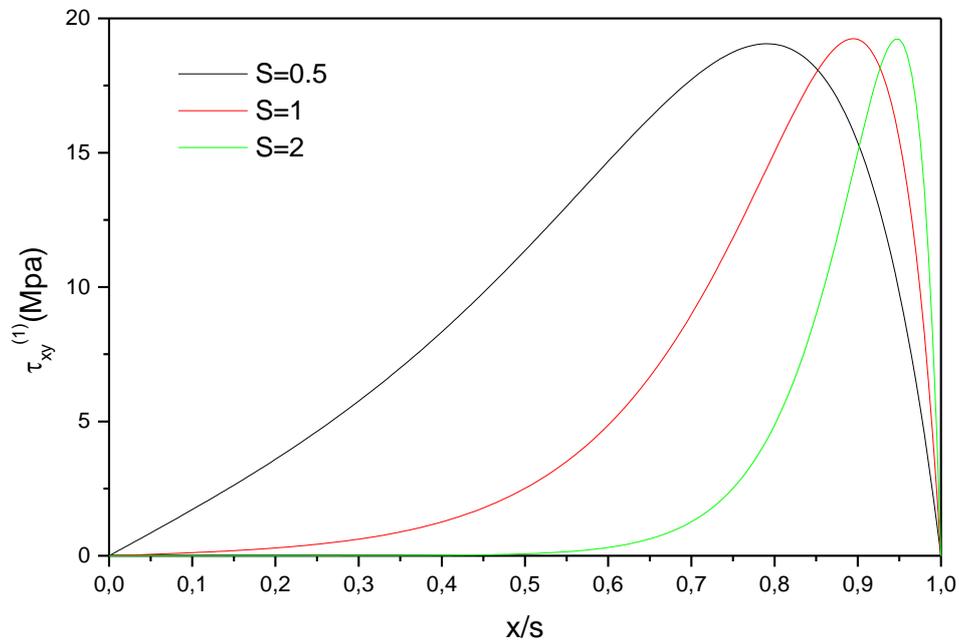


Figure III.9 : Distribution de la contrainte de cisaillement à l'interface 0/90 pour un stratifié hybride et différentes densités de fissuration avec $\delta = 2$.

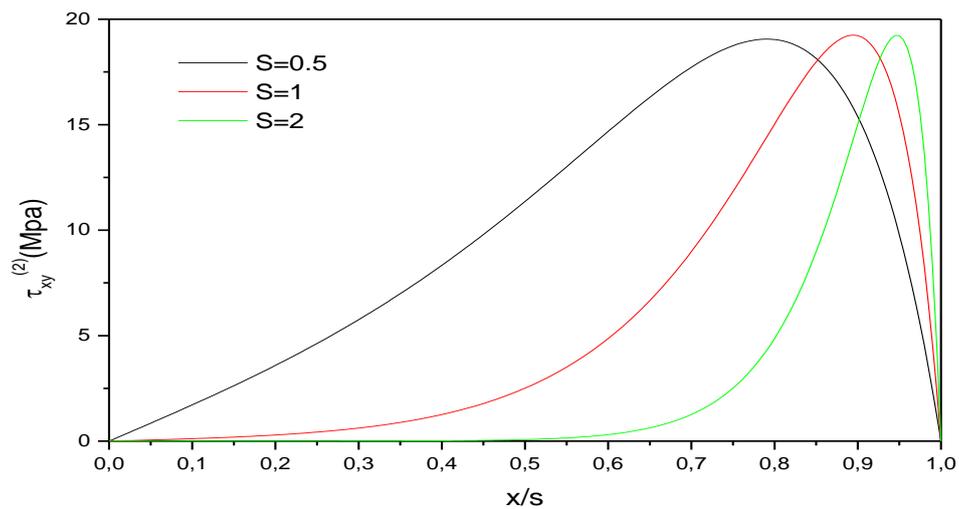


Figure III.10 : Distribution de la contrainte de cisaillement à l'interface 0/90 dans la couche 90° pour un stratifié hybride et différentes densités de fissuration avec $\delta = 2$.

Chapitre III : Simulation et résultats des stratifiés hybrides fissures avec chargement mécanique

La Figure III.9 et la Figure III.10 représentant la distribution de la contrainte de cisaillement pour différentes densités 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 et ces courbes satisfont les conditions aux limites.

C) Influence du rapport d'épaisseur pour un stratifié hybride :

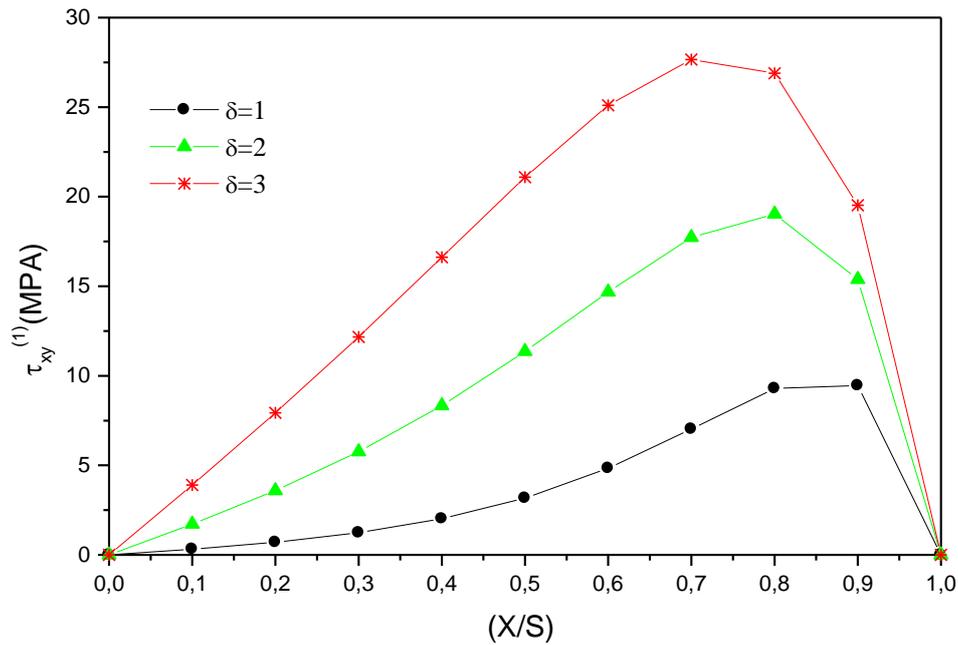


Figure III.11 : Distribution de la contrainte de cisaillement à l'interface 0/90 pour un stratifié hybride et différents rapports d'épaisseur avec $S = 0.5 \text{ mm}$.

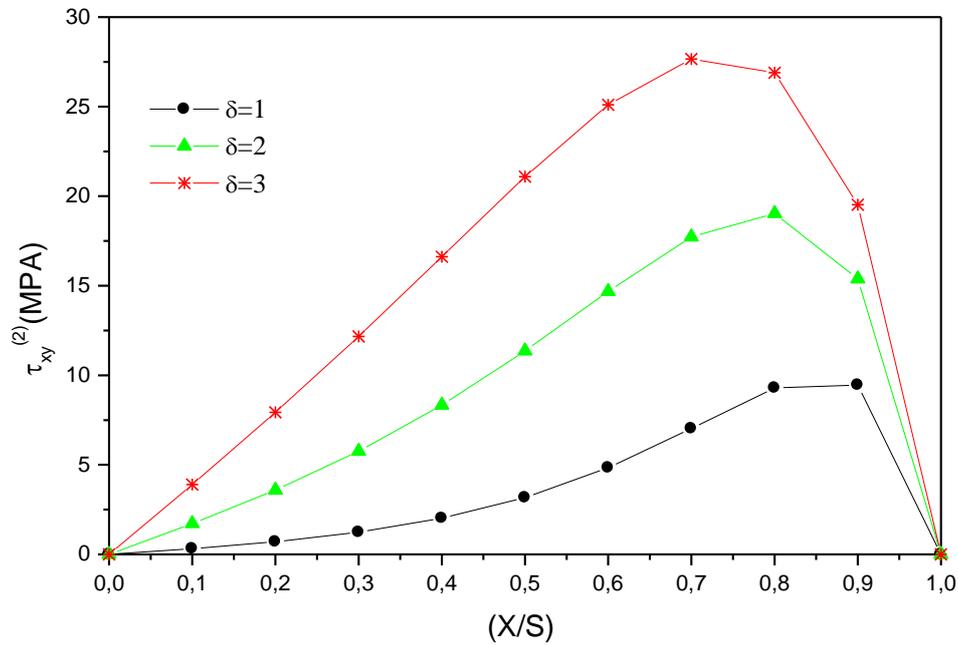


Figure III.12 : Distribution de la contrainte de cisaillement à l'interface 0/90 dans la couche 90° pour un stratifié hybride et différents rapports d'épaisseur avec $S=0.5\text{mm}$.

Une augmentation importante de la contrainte de cisaillement pour un stratifié hybride lorsque on augmente le nombre de couche fissuré à 90° (Fig. III.11-Fig. III.12). La valeur maximale de cette contrainte est notée lorsque δ est grand. Ces courbes satisfont les conditions aux limites.

III.4.4 Distribution de la contrainte longitudinale dans la couche 90° :

a) Influence de la densité de fissuration pour un stratifié hybride :

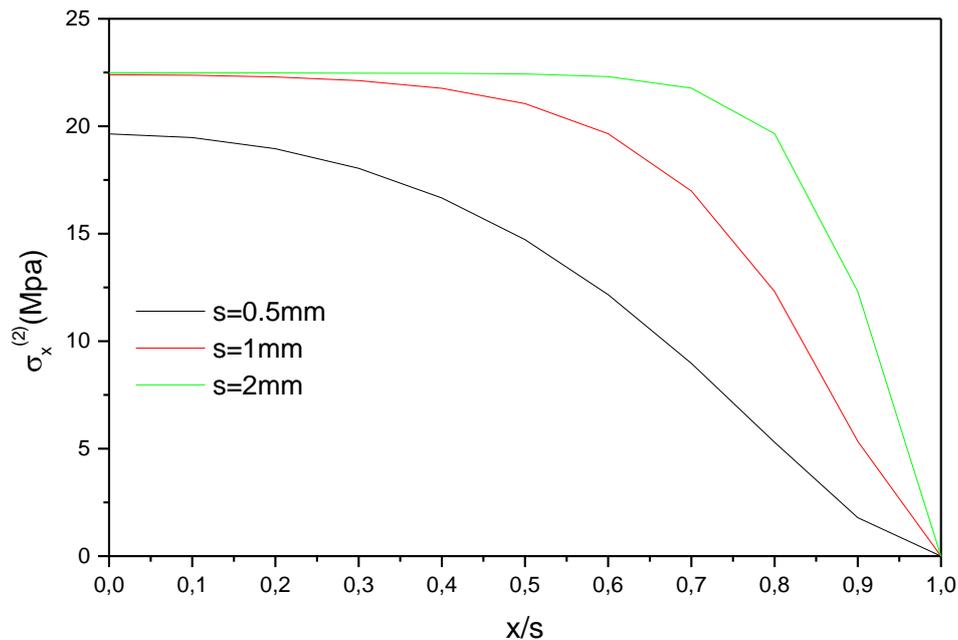


Figure III.13 : Distribution de la contrainte inter-laminaire à l'interface 0/90 dans la couche 90° pour le stratifié $[0/90_2]_s$ pour différentes densités de fissuration.

On note une diminution de la contrainte longitudinale à l'interface 0/90 (figure III.14) dans la couche 90° 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 nulle pour les différentes densités de fissures.

b) Influence du rapport d'épaisseur pour un stratifié hybride :

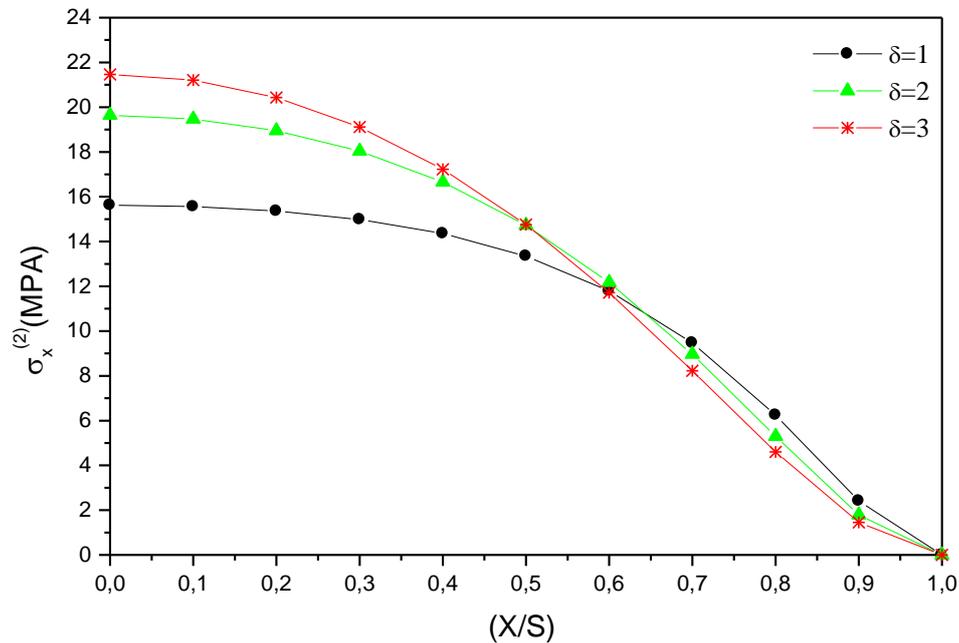


Figure III.14 : Distribution de la contrainte inter-laminaire à l'interface 0/90 dans la couche 90° pour différents rapports d'épaisseur et S=0.5mm.

La figure III.15 montre une augmentation de la contrainte longitudinale à l'interface 0/90 pour un 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 proche du plan de fissure.

III.5. 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, transversales et de cisaillement dépend de plusieurs paramètres à savoir :

- Le rapport géométrique (rapport d'épaisseur), la densité de la fissure.
- Une réduction de la contrainte longitudinale et transversale caractérise le comportement du matériau composite, soumis à des sollicitations en fonction de la densité de fissurations.

Et ce chapitre sera le début d'une étude de l'influence de la distribution linéaire et non-linéaire de la température et de la concentration d'humidité sur la distribution des contraintes pour les plaques sandwich métal/céramique avec des fissures transversales.

Chapitre IV

Simulation et résultats de la distribution non linéaire de la température et humidité sur le comportement des contraintes dans un composites fissurée métal/céramique

IV.1. Introduction :

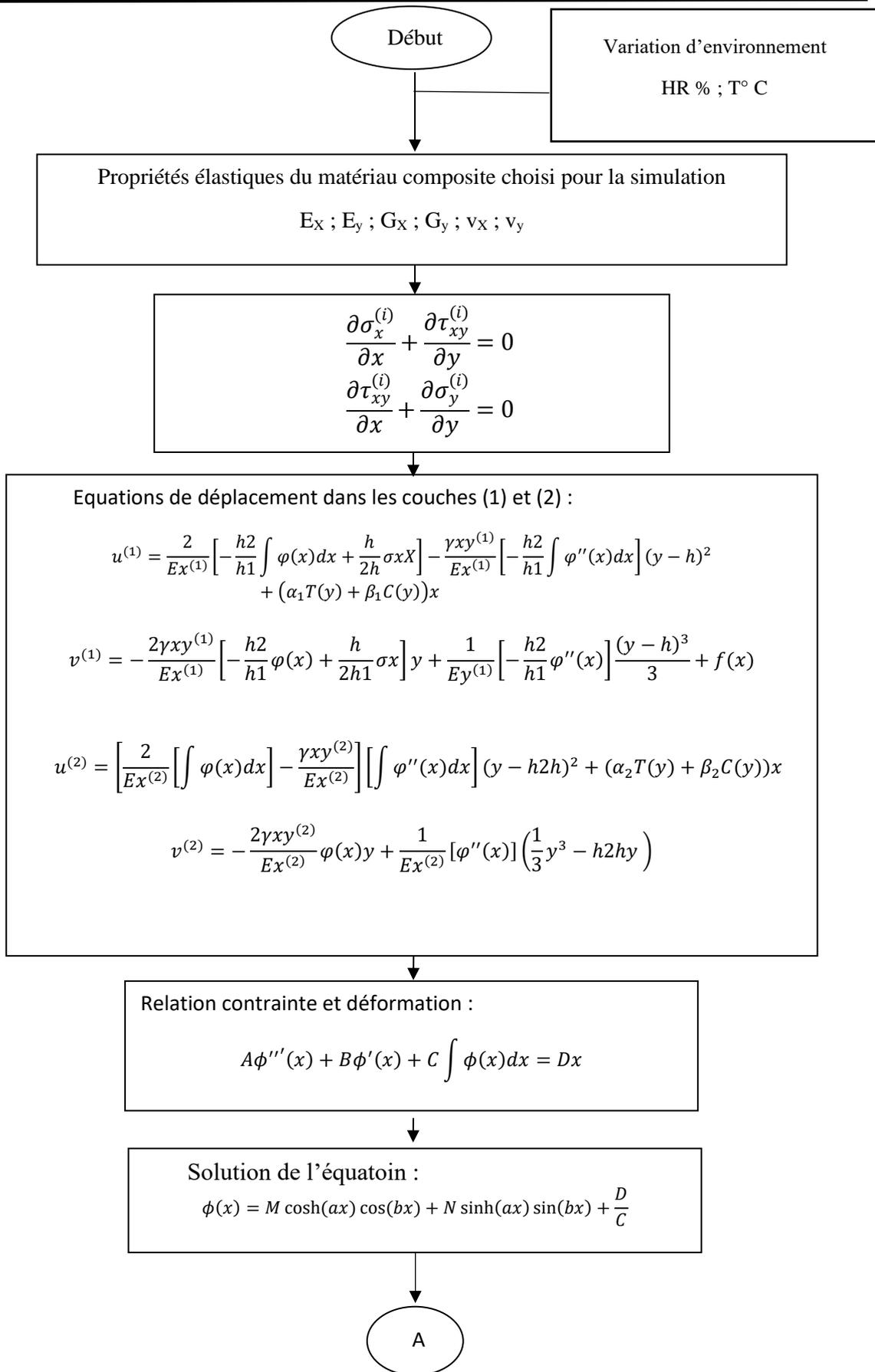
Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'influence de la distribution linéaire et non linéaire de la température et de la concentration d'humidité avec une variation de pourcentage de métal P_m sur le comportement des contraintes pour les plaques sandwich métal/céramique avec des fissures transversales.

Dans un premier temps, les résultats tenant compte de chargement hygrothermique et pour différentes couches sont représentés. Une comparaison de comportement des contraintes dans les différentes couches avec des conditions hygrothermique et pourcentage de métal P_m variables. Finalement, une conclusion sera faite sur le comportement des contraintes dans un matériau hybride métal/céramique avec fissuration transverse et sous conditions hygrothermique variables.

IV.2. Organigramme :

Pour modéliser la distribution de la contrainte longitudinale, transversale et de cisaillement à l'interface 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 :

Chapitre IV : Simulation et résultats de la distribution non linéaire de la température et humidité sur le comportement des contraintes dans un composites fissurée métal/céramique



A

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

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

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

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

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

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

Fin

Figure IV.1 : Organigramme du MICAZHN.

IV.3. Effets de la concentration thermique non linéaire et de l'humidité sur la distribution des contraintes :

IV.3.1. Choix de matériau de simulation :

Les propriétés des matériaux de la plaque sandwich sont l'aluminium et l'alumine avec un module de Young $E_m = 70$ GPa, $E_c = 380$ GPa et des coefficients thermiques $\alpha_1 = 23 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\alpha_2 = 7.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ respectivement. Pour les deux matériaux, le coefficient de Poisson est supposé être constant $\nu = 0,3$ (Figure 4.2).

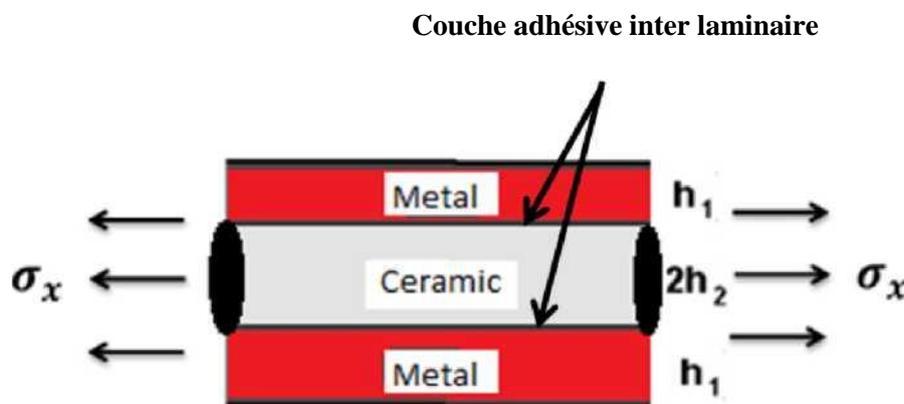
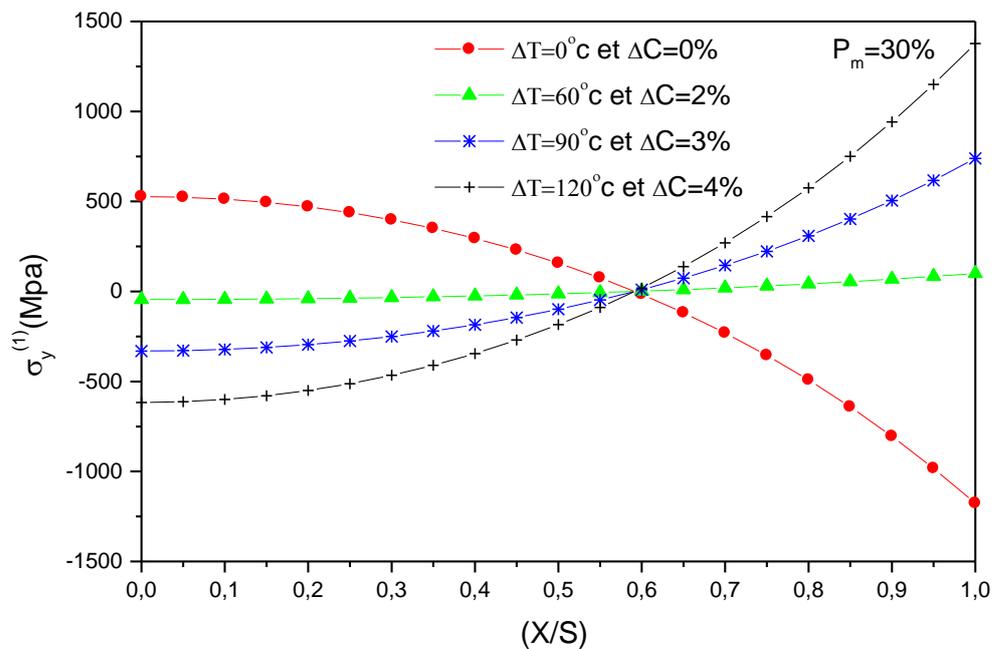
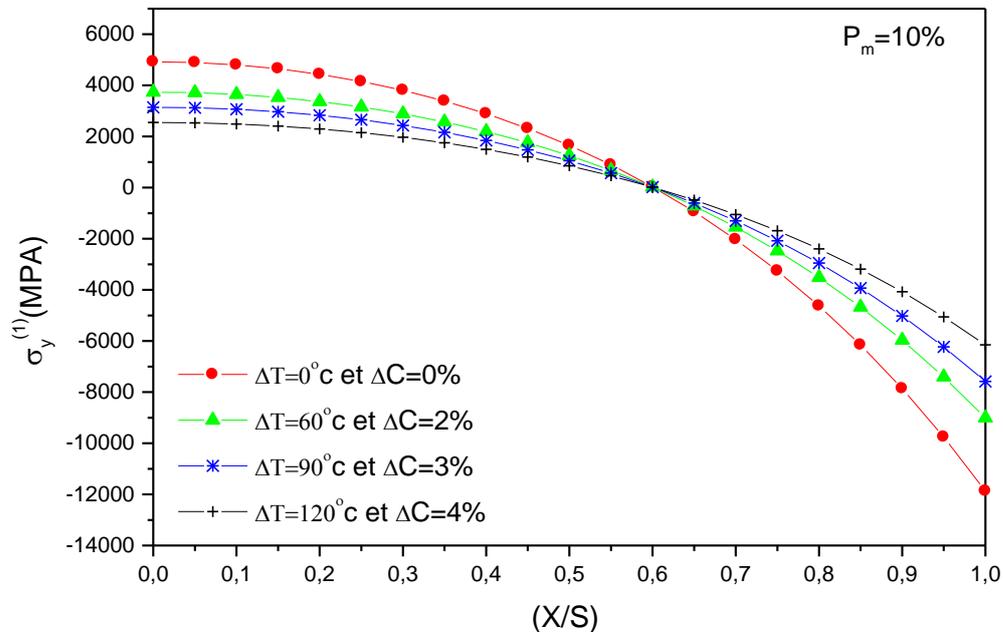


Figure IV.2 : Modèle géométrique d'une plaque sandwich métal/céramique avec fissures transversales.

La contrainte normale inter laminaire dans la couche d'adhésif entre deux fissures ($s = 0,5$ mm) avec différentes conditions environnementales et une proportion différente de matériaux sont présentées dans la Figure (IV.3). La contrainte normale inter laminaire σ_y , est maximale et tendue au niveau du plan médian ($x=0$) avec un faible pourcentage de métal ($P_m = 10\%$) et dans des conditions environnementales standard ($\Delta T = 0^\circ\text{C}$ et $\Delta C = 0\%$). Aucune contrainte normale inter laminaire n'est notée à ($x/s = 0,6$) et c'est un point de déformation en raison de l'intersection des courbes, ce qui signifie que le déplacement dans la couche de céramique est le même que dans une couche métallique. A la surface de la fissure, une contrainte normale inter laminaire maximale et compressive est observée (effet secondaire) avec une variation des conditions environnementales où le déplacement $V_2 \gg V_1$, ce qui conduit à une fissure de délamination entre les couches céramique et métallique. Le comportement opposé de la

Chapitre IV : Simulation et résultats de la distribution non linéaire de la température et humidité sur le comportement des contraintes dans un composites fissurée métal/céramique

contrainte normale inter laminaire est observé lorsque le pourcentage de métal est important ($P_m=50\%$). On note un comportement symétrique à $P_m=30\%$ et avec différentes conditions environnementales dont l'axe de symétrie est $\Delta T=60^\circ\text{C}$ et $\Delta C=2\%$.



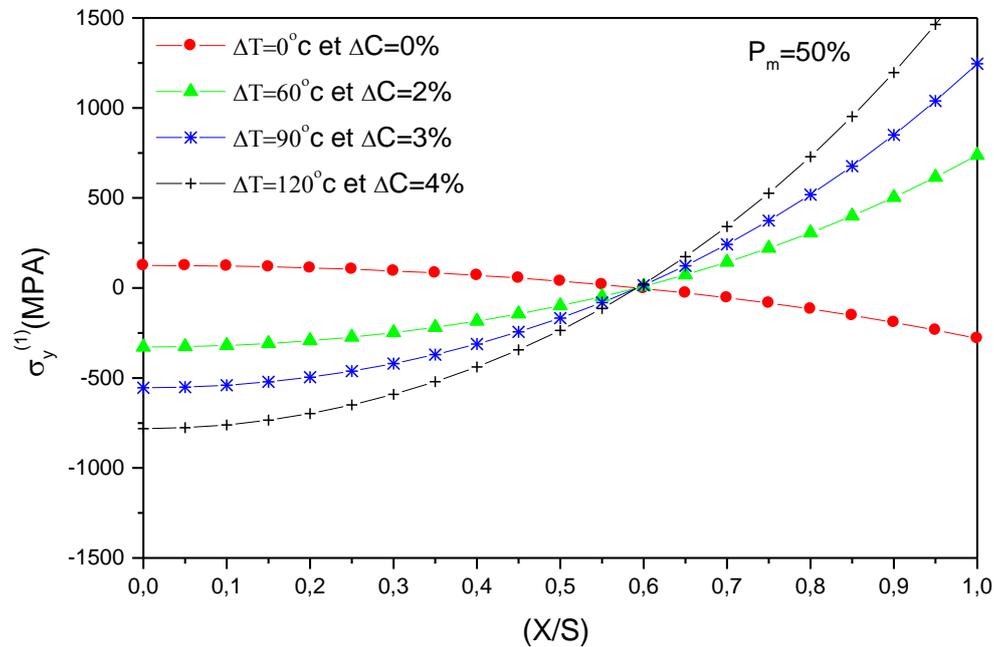
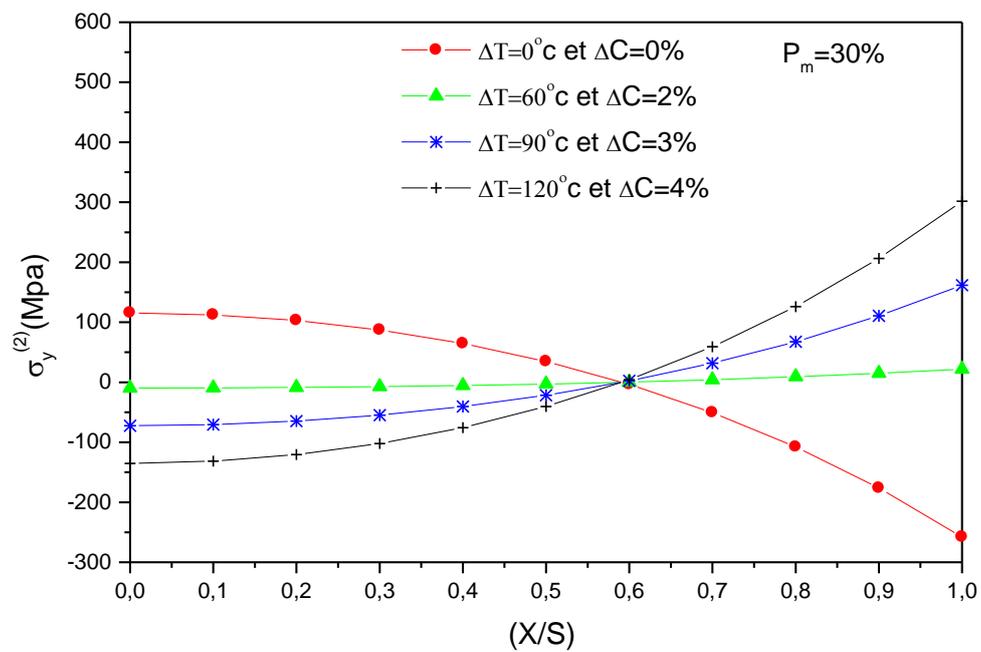
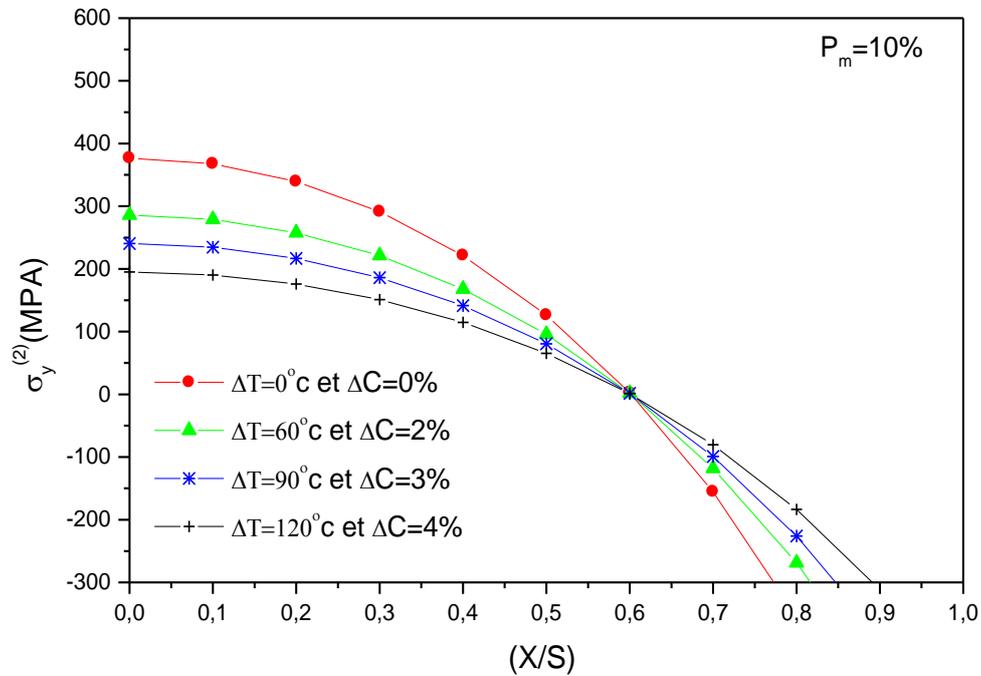


Figure IV.3 : Distribution de la contrainte normale inter laminaire dans la couche adhésive entre deux fissures ($s = 0,5 \text{ mm}$) avec différentes conditions environnementales et une proportion différente de matériaux ($\sigma_x = 100 \text{ MPa}$).

Figure IV.4 représente la distribution de la contrainte transversale dans la couche céramique de la plaque sandwich métal/céramique dans les différentes conditions environnementales et une proportion différente de matériaux sont présentées. La contrainte transversale σ_y , est maximale et en traction au niveau du plan médian ($x=0$) avec un faible pourcentage de métal ($P_m=10\%$) et dans des conditions environnementales standard ($\Delta T=0^\circ\text{C}$ et $\Delta C=0\%$). Aucune contrainte normale inter laminaire n'est notée à ($x/s=0,6$) et c'est un point de déformation en raison de l'intersection des courbes, ce qui signifie que le déplacement dans la couche céramique est le même que dans une couche métallique. A la surface de la fissure, une contrainte normale inter laminaire maximale et compressive est observée (effet secondaire) avec une variation des conditions environnementales où le déplacement $V_2 \gg V_1$, ce qui conduit à une fissure de délamination entre les couches céramique et métallique. Le comportement opposé de la contrainte normale est observé lorsque le pourcentage de métal est important ($P_m=50\%$). On

Chapitre IV : Simulation et résultats de la distribution non linéaire de la température et humidité sur le comportement des contraintes dans un composites fissurée métal/céramique

note un comportement symétrique à $P_m=30\%$ et avec différentes conditions environnementales dont l'axe de symétrie est $\Delta T=60^\circ\text{C}$ et $\Delta C=2\%$.



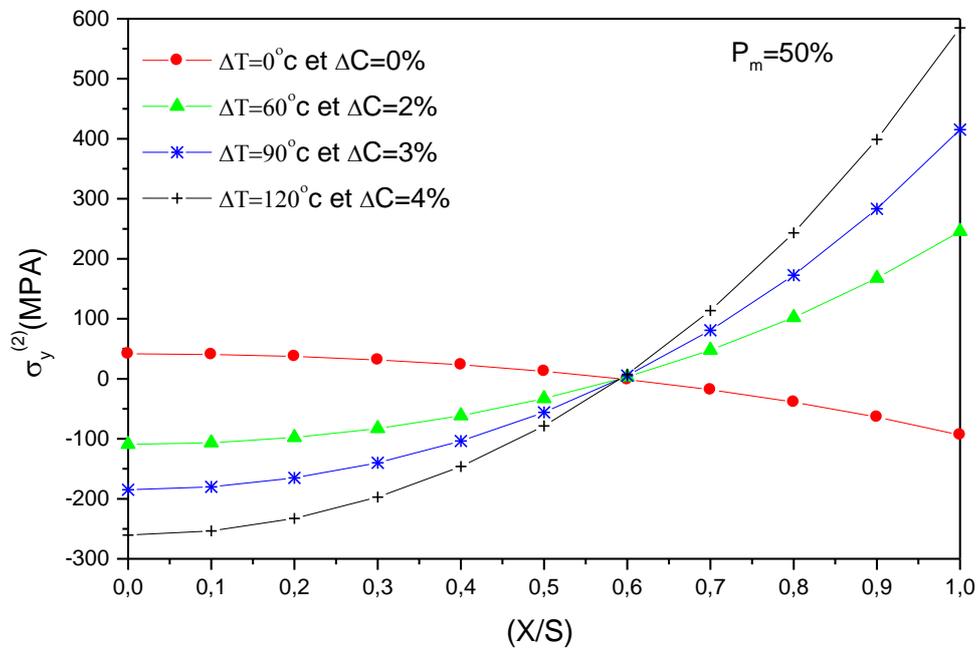
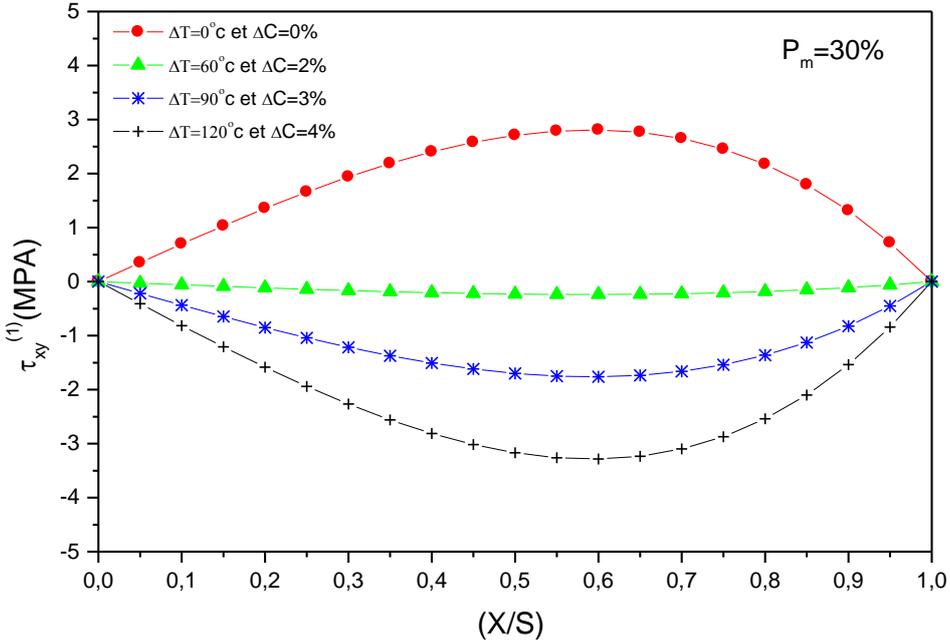
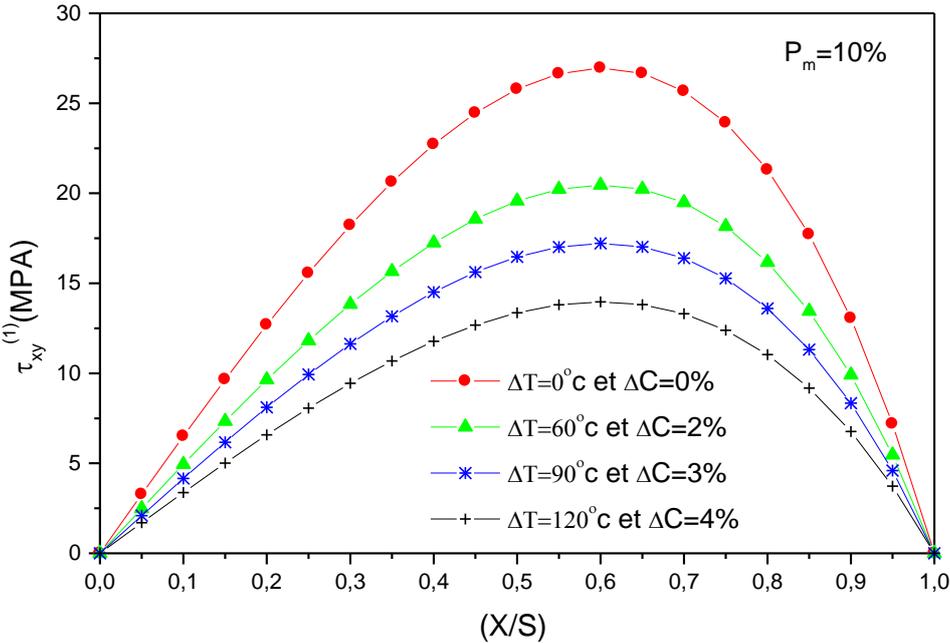


Figure IV.4 : Distribution la Contrainte transversale dans la couche céramique de la plaque sandwich métal/céramique entre deux fissures ($s = 0,5 \text{ mm}$) avec différentes conditions environnementales et une proportion différente de matériaux ($\sigma_x = 100 \text{ MPa}$).

D'autre part, la contrainte de cisaillement inter laminaire τ_{xy} a une valeur maximale à ($x/s=0,6$) avec un faible pourcentage de rapport métallique et dans des conditions hygrothermiques standard pour la figure IV.5 Cette dernière diminue jusqu'à zéro à la surface de la fissure ($x=s$) puisqu'elle est sans contrainte. τ_{xy} est également égal à zéro à ($x=0$) car il est antisymétrique pour l'axe y , il y a donc un état de contrainte principale au milieu entre deux fissures voisines dans le présent système de coordonnées. Une contrainte de cisaillement inter laminaire compressive est observée avec l'augmentation du pourcentage de métal ($P_m=50\%$) et des conditions environnementales, ce qui favorise la propagation du délaminage. Le comportement symétrique est également noté à $P_m=30\%$ avec le même axe de symétrie.

Chapitre IV : Simulation et résultats de la distribution non linéaire de la température et humidité sur le comportement des contraintes dans un composites fissurée métal/céramique



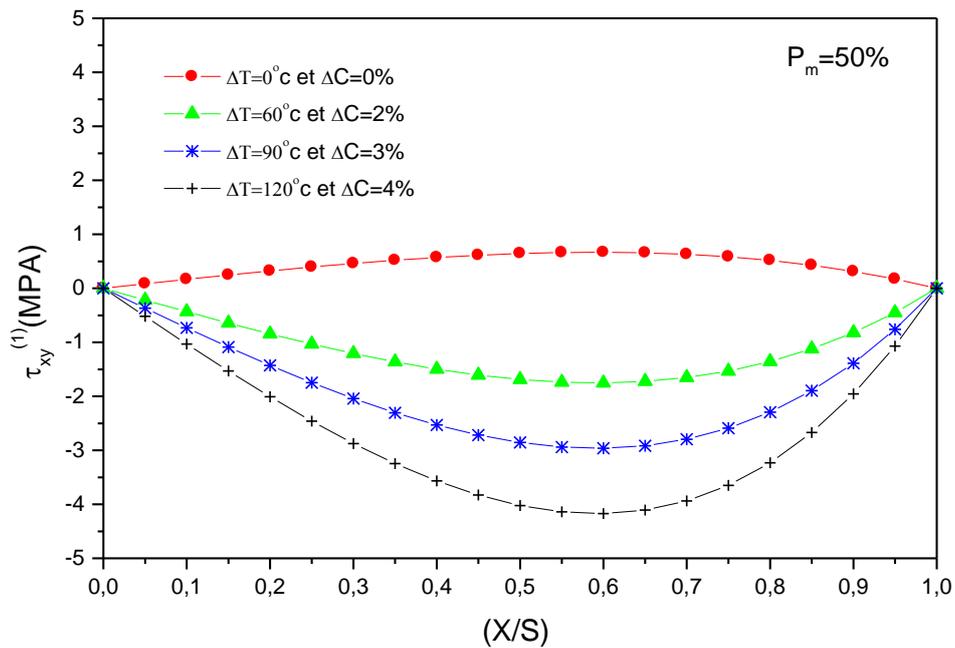
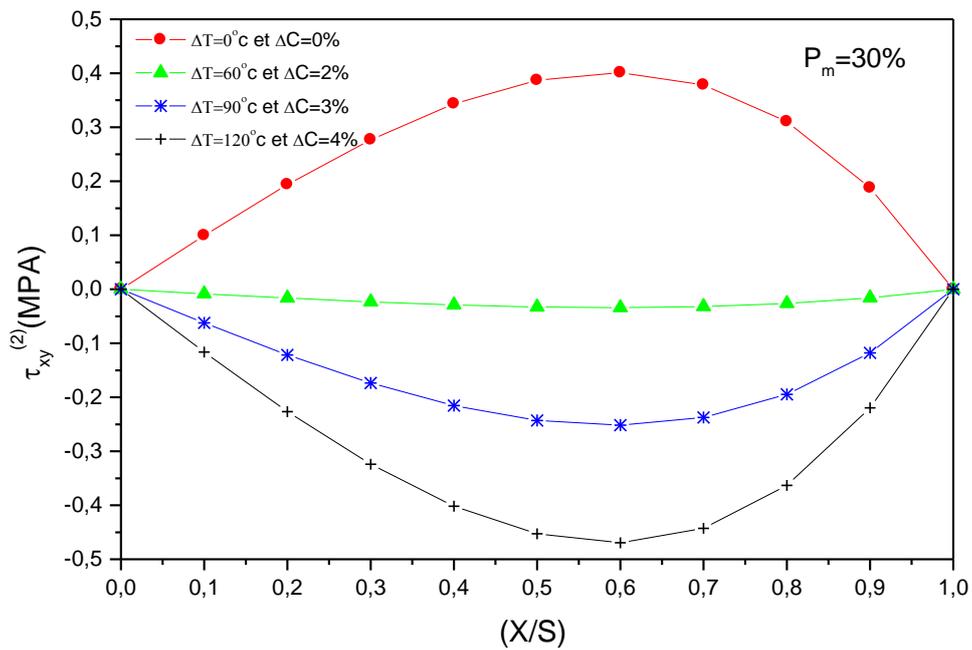
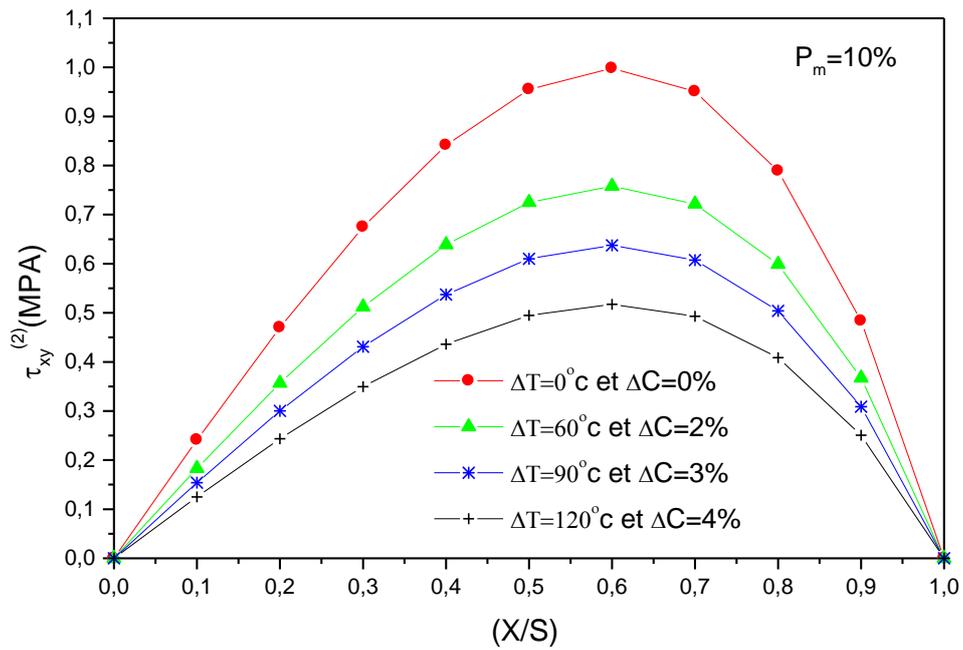


Figure IV.5 : Distribution de la contrainte de cisaillement inter laminaire dans la couche adhésive entre deux fissures ($s = 0,5 \text{ mm}$) avec différentes conditions environnementales et une proportion différente de matériaux ($\sigma_x = 100 \text{ Mpa}$).

Et pour la figure IV.6 qui représente la distribution de la contrainte de cisaillement dans la couche céramique de la plaque sandwich métal/céramique, nous avons observé que la contrainte de cisaillement a une valeur maximale à ($x/s=0,6$) avec un faible pourcentage de rapport métallique ($P_m=10\%$) et dans des conditions hygrothermiques standard ($\Delta T=0^\circ\text{C}$ et $\Delta C=0\%$). Cette dernière diminue jusqu'à zéro à la surface de la fissure ($x=s$) puisqu'elle est sans contrainte. τ_{xy} est également égal à zéro à ($x=0$) car il est antisymétrique pour l'axe y , il y a donc un état de contrainte principale au milieu entre deux fissures voisines dans le présent système de coordonnées. Une contrainte de cisaillement inter laminaire compressive est observée avec l'augmentation du pourcentage de métal ($P_m=50\%$) et des conditions environnementales, ce qui favorise la propagation du délaminage. Le comportement symétrique est également noté à $P_m=30\%$ avec le même axe de symétrie.

Chapitre IV : Simulation et résultats de la distribution non linéaire de la température et humidité sur le comportement des contraintes dans un composites fissurée métal/céramique



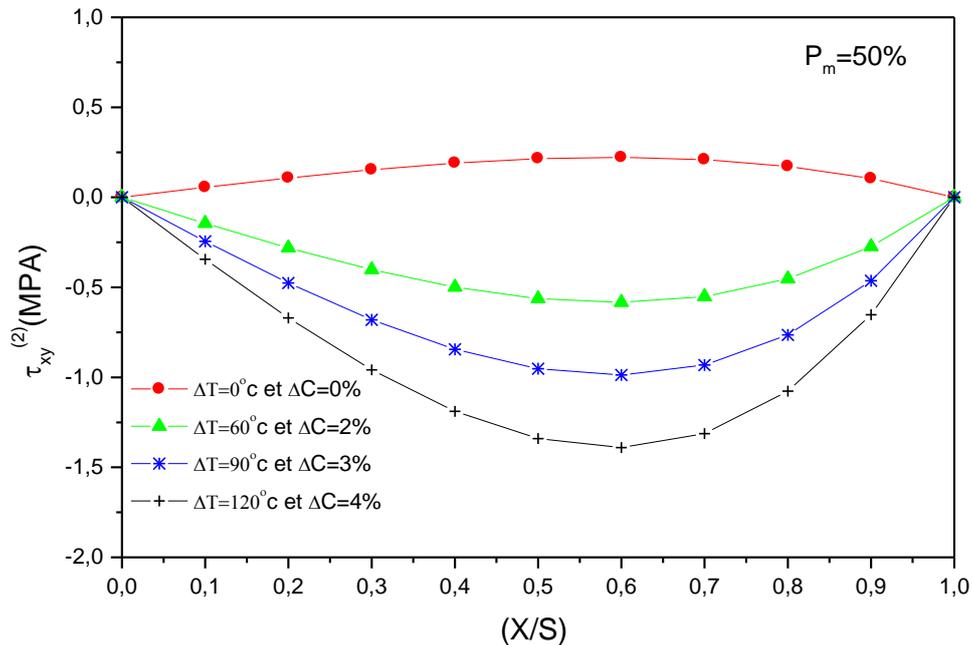


Figure IV.6 : Distribution de de la Contrainte de cisaillement dans la couche céramique de la plaque sandwich métal/céramique entre deux fissures ($s = 0,5 \text{ mm}$) avec différentes conditions environnementales et une proportion différente de matériaux ($\sigma_x = 100 \text{ Mpa}$).

Les 4 tableaux suivants représentent les résultats de la distribution des contraintes de la plaque sandwich métal/céramique avec une distribution linéaire et non linéaire de la température et de la concentration d'humidité pour différents pourcentages du rapport métal. Pour la contrainte normale (Tableau IV.1, Tableau IV.2), elle a une valeur importante pour le cas de distribution non linéaire par rapport le cas de distribution linéaire à ($x=0$) du plan médian. Enfin, une séparation très importante est prédite avec la distribution non linéaire de la température et de l'humidité pour la contrainte de cisaillement inter laminaire à la position $x/s=0.6$ (Tableau IV.3, Tableau IV.4).

Chapitre IV : Simulation et résultats de la distribution non linéaire de la température et humidité sur le comportement des contraintes dans un composites fissurée métal/céramique

Pm %	ΔT (°C), ΔC (%)	x/s	linéaire	Non linéaire	$ n=2/n=1 $
			$\sigma_y^{(1)}$ (Mpa)	$\sigma_y^{(1)}$ (Mpa)	$\sigma_y^{(nl)}/\sigma_y^{(l)}$
10%	120° , 4%	0	2550,628	3143,481	1,232433994
		0,2	2298,224	2832,408	1,232433828
		0,4	1498,476	1846,771	1,232432934
		0,6	16,61907	20,47808	1,232203964
		0,8	-2397,05	-2954,21	1,232437107
		1	-6149,24	-7578,54	1,232436128
20%	90° , 3%	0	169,95	448,2358	2,637457595
		0,2	151,9624	400,794	2,637455919
		0,4	96,03929	253,2985	2,637446697
		0,6	-3,91366	-10,3246	2,638086725
		0,8	-158,789	-418,804	2,637486914
		1	-385,464	-1016,65	2,637477999
30%	60° , 2%	0	-44,8214	98,17024	-2,19025616
		0,2	-39,9983	87,60657	-2,1902584
		0,4	-25,0734	54,91755	-2,19027083
		0,6	1,363264	-2,98504	-2,18962497
		0,8	41,80925	-91,5713	-2,19021755
		1	100,0855	-219,21	-2,19022918
40%	30° , 1%	0	8,810889	70,17516	7,964594804
		0,2	7,861207	62,61136	7,964598252
		0,4	4,923824	39,21638	7,964617327
		0,6	-0,27449	-2,18591	7,963650292
		0,8	-8,21725	-65,4466	7,96453568
		1	-19,6432	-156,45	7,964553478
50%	30° , 1%	0	-101,651	-44,9931	0,442624188
		0,2	-90,7744	-40,179	0,442624328
		0,4	-57,0636	-25,2578	0,442625101
		0,6	2,83387	1,254217	0,442581155
		0,8	94,87419	41,99338	0,44262177
		1	228,2096	101,0107	0,442622501

Tableau IV.1 : Distribution de la contrainte transversale à l'interface de la plaque sandwich métal/céramique entre deux fissures avec une distribution linéaire et non linéaire de la température et de la concentration en humidité. (n=1, n=2) entre deux fissures (s=0.5mm) dans la couche adhésive.

Chapitre IV : Simulation et résultats de la distribution non linéaire de la température et humidité sur le comportement des contraintes dans un composites fissurée métal/céramique

Pm %	ΔT (°C), ΔC (%)	x/s	linéaire	Non linéaire	$ n=2/n=1 $
			$\tau_{xy}^{(1)}$ (Mpa)	$\tau_{xy}^{(1)}$ (Mpa)	$\tau_{xy}(nl)/\tau_{xy}(L)$
10%	120° , 4%	0	0	0	
		0,2	6,578552	8,10763	1,232433945
		0,4	11,77335	14,50987	1,232433668
		0,6	13,96744	17,21394	1,232433238
		0,8	11,03826	13,60391	1,232431881
		1	-6,6E-05	-0,00013	2,015151515
20%	90° , 3%	0	0	0	
		0,2	0,437268	1,153276	2,637456924
		0,4	0,776866	2,04895	2,637456924
		0,6	0,910481	2,401348	2,637450485
		0,8	0,707349	1,865587	2,637435166
		1	1,29E-05	1,9E-06	0,147286822
30%	60° , 2%	0	0	0	
		0,2	-0,11525	0,252427	-2,19025695
		0,4	-0,20437	0,447629	-2,19025952
		0,6	-0,23877	0,522978	-2,1902658
		0,8	-0,18469	0,40452	-2,1902862
		1	8,7E-06	-7,6E-06	-0,87356322
40%	30° , 1%	0	0	0	
		0,2	0,022654	0,180431	7,964596742
		0,4	0,040165	0,319898	7,964600384
		0,6	0,046911	0,373628	7,964609778
		0,8	0,036269	0,28887	7,964642029
		1	-1,1E-06	-5,2E-06	4,770642202
50%	30° , 1%	0	0	0	
		0,2	-0,26143	-0,11572	0,442624261
		0,4	-0,4639	-0,20533	0,442624431
		0,6	-0,54257	-0,24016	0,44262482
		0,8	-0,42031	-0,18604	0,4426262
		1	1,11E-05	3,3E-06	0,297297297

Tableau IV.2 : Distribution de la contrainte de cisaillement à l'interface de la plaque sandwich métal/céramique entre deux fissures avec une distribution linéaire et non linéaire de la température et de la concentration en humidité. (n=1, n=2) entre deux fissures (s=0.5mm) dans la couche adhésive.

Chapitre IV : Simulation et résultats de la distribution non linéaire de la température et humidité sur le comportement des contraintes dans un composites fissurée métal/céramique

Pm %	ΔT (°C), ΔC (%)	x/s	linéaire	Non linéaire	n=2/n=1
			$\sigma_y^{(2)}$ (Mpa)	$\sigma_y^{(2)}$ (Mpa)	$\sigma_y^{(nl)}/\sigma_y^{(l)}$
10%	120° , 4%	0	195,2333	240,6121	1,232434
		0,2	175,9134	216,8016	1,232434
		0,4	114,6982	141,3578	1,232433
		0,6	1,272077	1,567458	1,232204
		0,8	-183,478	-226,125	1,232437
		1	-470,682	-580,086	1,232437
20%	90° , 3%	0	25,49249	67,23537	2,637458
		0,2	22,79435	60,1191	2,637456
		0,4	14,40589	37,99477	2,637447
		0,6	-0,58705	-1,54868	2,638072
		0,8	-23,8183	-62,8206	2,637493
		1	-57,8196	-152,498	2,637479
30%	60° , 2%	0	-9,81801	21,50396	-2,19026
		0,2	-8,76153	19,19001	-2,19026
		0,4	-5,49227	12,02956	-2,19027
		0,6	0,29862	-0,65387	-2,18964
		0,8	9,158216	-20,0585	-2,19022
		1	21,92348	-48,0175	-2,19023
40%	30° , 1%	0	2,480102	19,75301	7,964596
		0,2	2,212784	17,62394	7,9646
		0,4	1,385965	11,03868	7,964617
		0,6	-0,07726	-0,61529	7,963888
		0,8	-2,313	-18,422	7,964548
		1	-5,52921	-44,0377	7,964556
50%	30° , 1%	0	-33,8836	-14,9977	0,442624
		0,2	-30,2581	-13,393	0,442625
		0,4	-19,0212	-8,41926	0,442625
		0,6	0,944623	0,418072	0,442581
		0,8	31,62473	13,99779	0,442622
		1	76,06988	33,67024	0,442622

Tableau IV.3 : Distribution de la contrainte transversale dans la couche céramique de la plaque sandwich métal/céramique entre deux fissures avec une distribution linéaire et non linéaire de la température et de la concentration en humidité. (n=1, n=2) entre deux fissures (s=0.5mm).

Chapitre IV : Simulation et résultats de la distribution non linéaire de la température et humidité sur le comportement des contraintes dans un composites fissurée métal/céramique

Pm %	ΔT (°C), ΔC (%)	x/s	linéaire	Non linéaire	$ n=2/n=1 $
			$\tau_{xy}^{(2)}$ (Mpa)	$\tau_{xy}^{(2)}$ (Mpa)	$\tau_{xy}(nl)/\tau_{xy}(L)$
10%	120° , 4%	0	0	0	
		0,2	0,24365	0,300283	1,232434
		0,4	0,43605	0,537403	1,232434
		0,6	0,517313	0,637553	1,232433
		0,8	0,408825	0,503848	1,232432
		1	-2,4E-06	-4,8E-06	2
20%	90° , 3%	0	0	0	
		0,2	0,036439	0,096106	2,637457
		0,4	0,064739	0,170746	2,637455
		0,6	0,075873	0,200112	2,637451
		0,8	0,058946	0,155466	2,637435
		1	1,08E-06	1,70E-07	1,57E-01
30%	60° , 2%	0	0	0	
		0,2	-0,01646	0,036061	-2,19026
		0,4	-0,0292	0,063947	-2,19026
		0,6	-0,03411	0,074711	-2,19027
		0,8	-0,02638	0,057789	-2,19029
		1	1,23E-06	-1,1E-06	-9,02E-01
40%	30° , 1%	0	0	0	
		0,2	0,005034	0,040096	7,964596
		0,4	0,008926	0,071088	7,964598
		0,6	0,010425	0,083028	7,964609
		0,8	0,00806	0,064193	7,964639
		1	-2,40E-07	-1,2E-06	4,88E+00
50%	30° , 1%	0	0	0	
		0,2	-0,08714	-0,03857	0,442624
		0,4	-0,15463	-0,06844	0,442624
		0,6	-0,18086	-0,08005	0,442625
		0,8	-0,1401	-0,06201	0,442626
		1	3,66E-06	1,09E-06	2,98E-01

Tableau IV.4 : Distribution de la Contrainte de cisaillement dans la céramique de la plaque sandwich métal/céramique entre deux fissures avec une distribution linéaire et non linéaire de la température et de la concentration en humidité. (n=1, n=2) entre deux fissures (s=0.5mm).

Chapitre IV : Simulation et résultats de la distribution non linéaire de la température et humidité sur le comportement des contraintes dans un composites fissurée métal/céramique

Les figures suivantes représentent les résultats de la distribution des contraintes de la plaque sandwich métal/céramique avec une distribution linéaire et non linéaire de la température et de la concentration d'humidité.

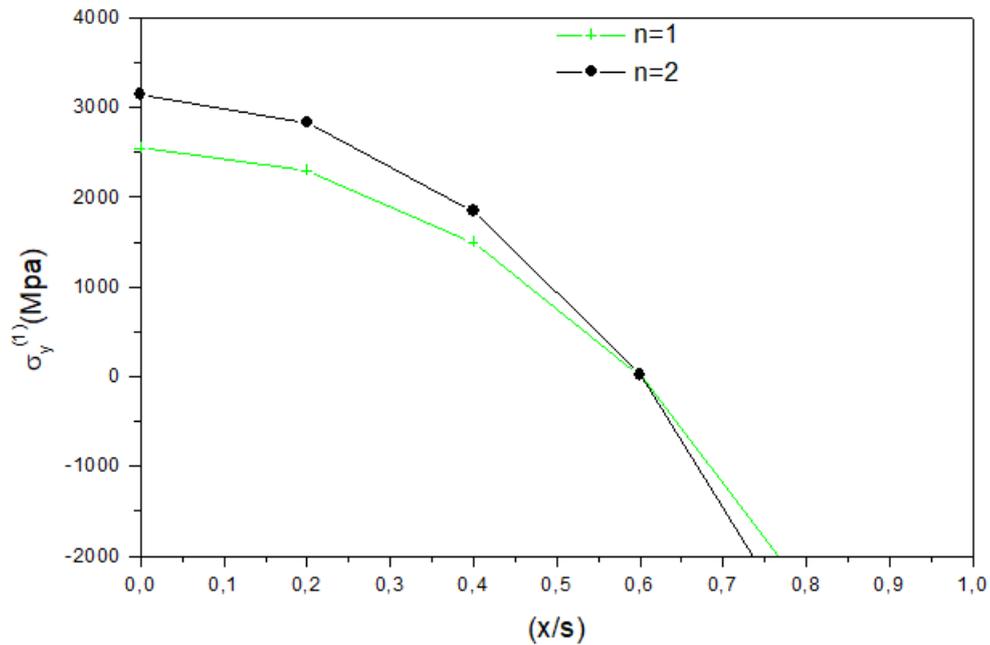


Figure IV.7 : Distribution de la contrainte normale inter laminaire à l'interface entre deux fissures avec une distribution linéaire et non linéaire de la température et de la concentration en humidité.

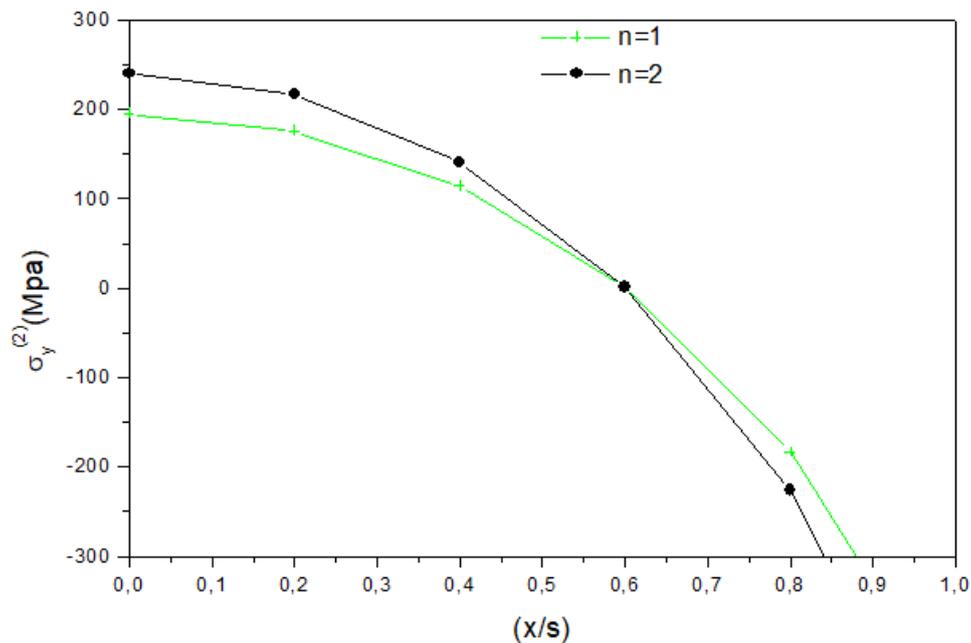


Figure IV.8 : Distribution de de la Contrainte transversale dans la couche céramique de la plaque sandwich métal/céramique entre deux fissures avec une distribution linéaire et non linéaire de la température et de la concentration en humidité.

Chapitre IV : Simulation et résultats de la distribution non linéaire de la température et humidité sur le comportement des contraintes dans un composites fissurée métal/céramique

Pour la contrainte normale, la distribution non linéaire de la température et humidité donne une contrainte normale plus importante par rapport à la distribution linéaire. Par contre un comportement inverse et remarqué à partir du point de déformation et on s'approchant du plan de fissure.

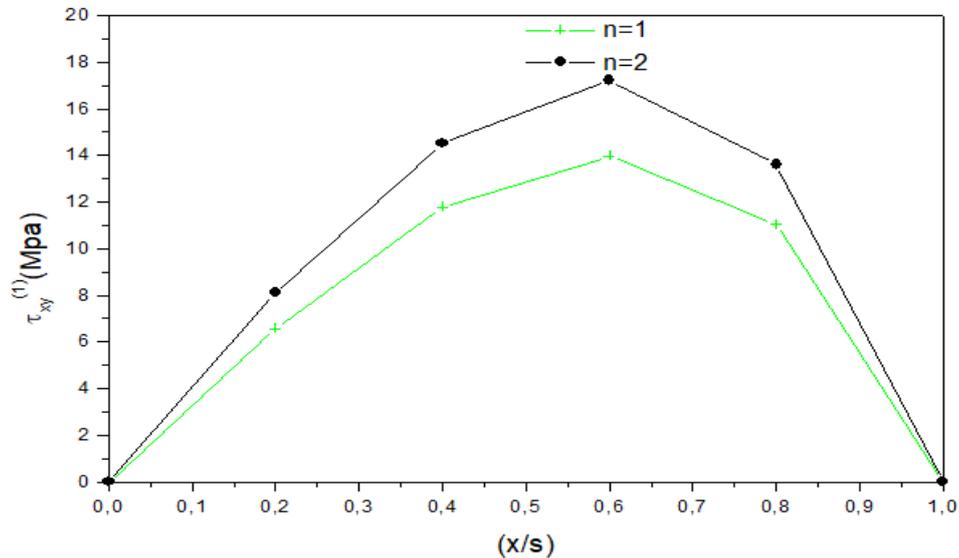


Figure IV.9 : Distribution de la contrainte de cisaillement inter laminaire à l'interface entre deux fissures avec une distribution linéaire et non linéaire de la température et de la concentration en humidité.

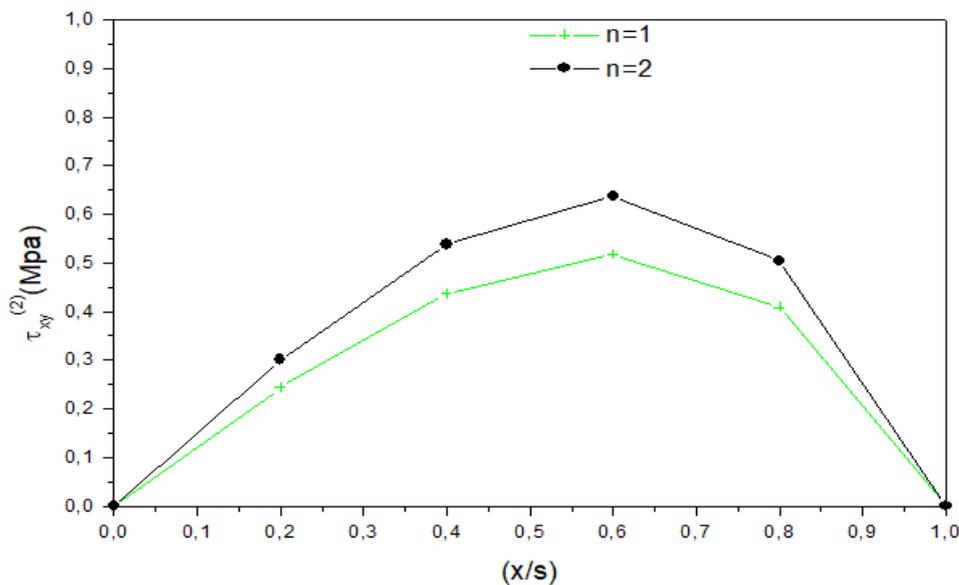


Figure IV.10 : Distribution la contrainte de cisaillement dans la couche céramique entre deux fissures avec une distribution linéaire et non linéaire de la température et de la concentration en humidité.

Enfin, une séparation très importante est prédite avec la distribution non linéaire de la température et de l'humidité pour la contrainte de cisaillement inter laminaire à la position $x/s=0.6$ (point de déformation).

IV.4. Conclusion :

Nous avons étudié en premier lieu, l'effet des conditions hygrothermiques en termes de température et d'humidité sur la variation de contrainte transversale et de cisaillement à l'interface et à la couche céramique.

Ensuite, la variation de la température et de la concentration d'humidité est étudiée en utilisant la distribution linéaire et non linéaire autour des fissures pour prédire les distributions de contraintes le long de l'axe x. Enfin, il a été observé à travers cette étude que les variations de la concentration thermique et d'humidité impactent largement la distribution des contraintes pour une plaque sandwich avec des fissures transversales et avec des propriétés mécaniques différentes de chaque couche.

Conclusion générale

Conclusion générale

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

Tout d'abord les équations déterminantes le champ des contraintes dans le composite endommagé, ont été établies en utilisant le modèle Shear-lag modifié développé par Zhang.

L'originalité de ce 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 linéaire et non-linéaire de la température et humidité. Les résultats les plus significatifs peuvent être rappelés de la manière suivante :

- Les variations des contraintes dépendent, de plusieurs paramètres à savoir : le rapport géométrique des couches, la densité de fissures, l'orientation des fibres, la température et l'humidité.
- Une variation des contraintes au point de déformation caractérise le comportement du matériau composite hybride, soumis à des sollicitations en fonction de la densité de fissures.
- L'influence des conditions hygrothermiques est assez importante et significative dans l'étude de l'évolution des propriétés mécaniques dans un composite hybride avec fissuration transverse.
- La distribution des contraintes longitudinale, transversale et de cisaillement à l'interface dépende totalement des conditions hygrothermiques.
- La distribution non linéaire de la température et humidité donne un comportement largement différencié de celui d'une distribution linéaire ce qu'il nous laisse toujours à chercher la distribution hygrothermique la plus proche d'un cycle de vol d'un avion.

Comme perspectives futures de cette recherche, nous proposons d'étaler cette étude à une distribution cyclique des conditions hygrothermique et cela pour différents types de matériaux sandwich et différents types de fissures (longitudinale, transversale et délaminage).

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] M. Khodjet Kesba, N.El Meiche² et A. Benkhedda¹, Stress Distribution on the Cracked Sandwich Plate with Non-Linear Thermal and Moisture Concentration, *2297-3400(2021)*.
- [2] A. Tounsi, S.U. Al-Dulaijan, M. A. Al-Osta, A. Chikh, M.M. Al-Zahrani, A. Sharif, A. Tounsi, A four variable trigonometric integral plate theory for hygro-thermo-mechanical bending analysis of AFG ceramic-metal plates resting on a two-parameter elastic foundation, *St. and Comp. Struc.* 34(2020) 511-524.
- [3] C. Zhang, T. Zhu, on inter-relationships of elastic moduli and strains in cross-ply laminated Composites, *Com. Sc. and Tech.* 56(1996) 135-146.
- [4] N. El Meiche, A. Tounsi, E.A. Adda-Bedia et A. Megueni, Analysis of the transverse cracking in hybrid cross-ply composite laminates, *Comp. Mat. Sci.* 46(2009) 1102-1108.
- [5] M. Kashtalyan, Yuriy Sinchuk, Romana Piat, I. Guz, Analysis of multiple cracking in metal/ceramic composites with lamellar microstructure, *Archive of Applied Mechanics*, 86(2015) 177-188.
- [6] A. Megueni, A. Tounsi, E. Adda Bedia, « 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.
- [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] Man-Hee Han John 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 Nik Abdullah, « 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] 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.
- [11] 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.
- [12] M. Khodjet-Kesba, « Effet et analyse des fissurations dans les matériaux composites vieillis », Mémoire de magister, Institut d'aéronautique et des études spatiales, 2011.

Références bibliographiques

- [13] R.Belmana, M.Laghouati, «Etude des matériaux composites hybrides fissurés et soumis à des conditions hygrothermiques», Mémoire de master, Institut d'aéronautique et des études spatiales, 2016.
- [14] S.E. Groves, C.E. Harris, A.L. Highsmith, D.H. Allen, R.G. Norvell, *Experimental Mechanics* 27 (1987) 73–79.
- [15] R. Joffe, A. Krasnikovs, J. Varna, *Composites science and Technology* 6 (200) 637-656.
- [16] S.G Lekhnitskii, *Anisotropic plates*, Gordon and Breach, New York, 1968.
- [17] A. Zenkour et M. Sobhy, Thermal buckling of various types of FGM sandwich plates, 2010, *Composite Structures* 93(1):93-102
- [18] F. A. Fazzolari et E. Carrera, Thermal Stability of FGM Sandwich Plates under Various Through-the-Thickness Temperature Distributions, *Jr. of There. Stress.* 37(2014) 1449-1481.
- [19] Fan, Jing Hong; Zhang, Junqian; In-situ damage evolution and micro/macro transition for laminated composites *Comp. Composites Science and Technology*; 47 (1993) 107-118.
- [20] Highsmith, A .L. & Reifsnider, K.L; damage in composite. *ASTM STP*, 775 (1982) 103-16.
- [21] Tsai, S.W. & Hanh, H.T; *Introduction to composite Materials*. Technomic, Lancaster, PA, 1980.