

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département Génie Mécanique



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en :Génie Mécanique
Domaine : Science et Technologie
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Construction Mécanique
Thème

Analyse Numérique des contraintes thermomécaniques dans les matériaux composites

Présenté Par :

- 1) Zenasni Mohammed Amine**
- 2) Bouhacida Mohammed**

Devant le jury composé de :

Dr Belhenini Soufiane

UAT.B.B (Ain Temouchent)

Examineur

Pr Oudad Wahid

UAT.B.B (Ain Temouchent)

Président

Pr Bouafia Farida

UAT.B.B (Ain Temouchent)

Encadrant

Année Universitaire 2020/2021



Remerciements

En premier lieu, nous tenons à remercier notre **DIEU**, notre

Créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

Nous adressons nos vifs remerciements à notre promoteur

Consultant **Dr. BOUAFIA FARIDA** pour nous avoir diligentés tout au long de ce travail, par sa compréhension, sa patience, sa compétence, et ses remarques qui nous ont été précieuses.

Nous tenons à remercier également, les membres du jury pour

L'honneur qu'ils nous font en acceptant de juger et d'évaluer notre travail.

Nous présentons nos chaleureux remerciements à tous ceux

Qui ont contribué de près ou de loin pour l'aboutissement de ce travail

Amine & Mohammed ...



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes très chère parentes

A Mes frère Yousouf, Abdessamed, Zakaria et Mon prince Ayoub

A mon binôme Amine

*A Mes très chers amis : Amine, Salah, Aissa, Hamid, Aymen, Djafar,
Mohammed, Yousouf, Karim*

A Mes chers cousins et cousines

A toute ma famille ...

*Et à tous ceux qui m'ont aide de près ou de loin et contribue par leur précieux
apport à la réalisation de ce travail.*

Mohammed...



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents

A Mes sœurs

A mon binôme Mohammed

A Mes très chers amis(e)

A Mes chers cousins et cousines

A toute ma famille ...

Et à tous ceux qui m'ont aide de près ou de loin et contribue par leur précieux apport à la réalisation de ce travail.

Amine ...

Abstract

During the last decades, composite materials have been used a lot because of their low density, their high resistance and their excellent resistance over time.

The objective of this study is to analyze numerically, by the Abaqus finite element code, the distribution and the level of thermal, mechanical and thermo mechanical residual stresses at the matrix / fiber interface. Residual stresses can affect the longevity of the composite structure (cracking). The effect of the nature of the loading, their combination, the thermal and mechanical property of the matrix has been demonstrated.

Résumé

Durant ces dernières décennies les matériaux composites ont beaucoup été utilisés en raison de leur faible densité, de leur haute résistance et de leur excellente tenue dans le temps.

L'objectif de cette étude est d'analyser numériquement, par le code d'élément fini Abaqus, la distribution et le niveau des contraintes résiduelles thermique, mécanique et thermomécanique à l'interface matrice / fibre. Les contraintes résiduelles peuvent ruine à la longévité de la structure composite (fissuration). L'effet de la nature de chargement, de leur combinaison, de la propriété thermique et mécanique de la matrice ont mis en évidence.

Sommaire

Sommaire

Remerciements	i
Dédias	ii
Abstract	iv
Sommaire	v
Introduction général	1
<i>Chapitre I : Généralité sur les matériaux composites</i>	
I.1.Introduction	2
I.2.Définition des composites	2
I.3.Constituants de base	3
I.3.1.Renfort	3
I.3.2.Matrices	8
I.4.Interface	10
I.5.Avantages et inconvénients des matériaux composites	12
1.5.1. Avantage des matériaux composites	12
1.5.2. Inconvénients des matériaux composites	12
I.6.Applications des matériaux composites	12
I.6.1.Industrie aérospatiale	13
<i>Chapitre II : Les contraintes résiduelles</i>	
II.1. Introduction	15
II.2. Ordres de contraintes résiduelles	16
II.3. Méthode de détections des contraintes internes	18
II.3.1. Techniques diffractométriques	18
II.3.2. Mesures par indentation Vickers	19
II.3.3. Méthodes numériques	20
II.4. solution pour diminue les contrainte résiduelles dans les liaisons métal céramiques	20
<i>Chapitre III: Simulation Numérique</i>	
III.1. Homogénéisation des matériaux composites	21
III.2. Modélisation par élément finis	22
III.2.1. Présentation du logiciel	22
III.3. Modèle utilisé	24
III.4. Résultats et analyse	26
III.4.1. Effet du chargement Mécanique	26
III.4.2. Effet du chargement thermique	30
III. 4.3. Effet du chargement thermomécanique	33
III.5. Effet des proprietes physiques des materiaux (coefficient de dilatation thermique)	35
Conclusion Générale	38
Référence Bibliographies	39

Introduction

Introduction

Depuis le début du vingtième siècle, l'usage des matériaux composites sous la forme de plaques et de poutres s'est considérablement développé jusqu'à nos jours que ce soit dans l'industrie automobile, la construction, et plus récemment en aéronautique.

Les matériaux composites sont des matériaux révolutionnaires qui disposent d'atouts importants. Contrairement aux matériaux traditionnels, ils apportent de nombreux avantages fonctionnels: légèreté, résistance mécanique et thermique, maintenance réduite. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et thermiques. Ils offrent une meilleure tenue aux chocs et au feu ainsi qu'une excellente isolation thermique ou phonique et pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique. Ils permettent d'alléger des structures et de réaliser des formes complexes, aptes à remplir plusieurs fonctions.

Une structure présente des matériaux de nature différents, peut décrire un problème au niveau de l'interface, ce qui donne la naissance des contraintes résiduelle causée par la discontinuité de la nature du matériau. Ce que nous constatons que les propriétés des matériaux jouent un rôle très important de la génération des contraintes.

Par conséquent, notre étude portera plus particulièrement sur le rôle joué par les éléments du céramique et métal sur l'état de contraintes au niveau de la liaison métal-céramique, nous nous intéressons plus particulièrement au cas des interfaces métal/ Al_2O_3 .

Le manuscrit de mémoire est articulé en trois chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à une étude bibliographique sur les matériaux composites et ses composantes, à savoir la matrice et les renforts.

Le deuxième chapitre est consacré à étudier les problèmes des contraintes résiduelles dans ce genre des matériaux.

La dernière partie du manuscrit, chapitre trois, portera sur une simulation numérique, et à l'aide du logiciel **ABAQUS** nous faisons une analyse des contraintes résiduelle au niveau de la structure composée par des matériaux de nature différente.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale

Chapitre I

Généralité sur les matériaux composites

Introduction :

Les origines des matériaux composites sont inconnues mais tous les écrits historiques contiennent des références à certaines formes des matériaux [1]. Par exemple, la paille a été utilisée par les arabes pour renforcer les briques ; le contreplaqué a été utilisé par les anciens Egyptiens afin d'obtenir une meilleure résistance tant aux chargements mécaniques qu'à l'environnement, les épées et les armures médiévales ont été fabriquées par des couches des différents matériaux. Aujourd'hui, les matériaux composites font partie courante de notre vie que cela soit des objets très excitants et à la mode comme la canne de golf et le kayak, ou beaucoup plus usuels tels que le contreplaqué et le béton.

Définition des composites :

Un matériau composite peut être défini comme une combinaison d'au moins deux matériaux différents à l'échelle macroscopique ou plusieurs matériaux non miscibles (mais ayant une forte capacité d'adhésion), l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. Les composites sont le plus souvent constitués d'une matrice dans laquelle on a dispersé de façon contrôlée des renforts (fig.I.1). La matrice maintient les renforts et assure les transferts de charge, tandis que les renforts apportent principalement leurs caractéristiques mécaniques élevées (modules et limite d'élasticité, résistance mécanique...) [2]. Cette association a pour but d'obtenir un matériau dont les propriétés spécifiques (propriétés mécaniques rapportées à la masse volumique) sont supérieures à celles de la matrice non renforcée. Le concept de matériau composite, par le choix des constituants et de leurs proportions respectives, ainsi que par le choix de la forme des dimensions et de la disposition des renforts, permet donc de concevoir un matériau présentant les caractéristiques spécifiques recherchées.

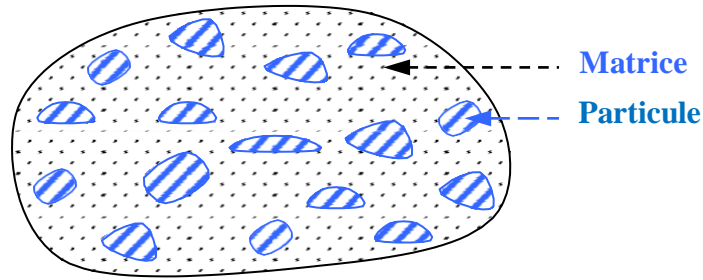


Figure I.1 : représentation schématique d'une microstructure d'un matériau composite [1]

Constituants de base :

Les matériaux composites sont constitués principalement :

- ✓ d'une matrice
- ✓ d'un renfort.

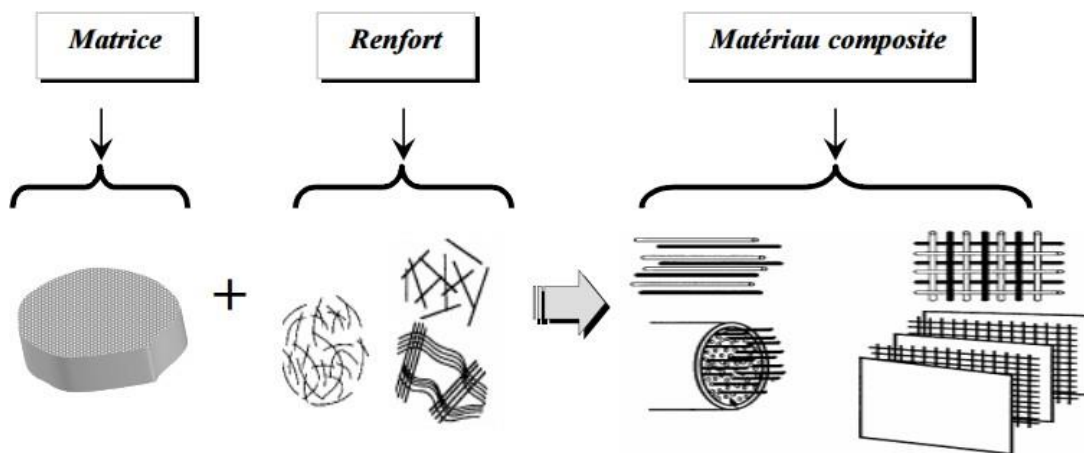


Figure I.2 Constituants d'un matériau composite

Renfort :

Est une armature, ou squelette de la structure qui il assure la tenue mécanique (résistance à la traction et rigidité). Il peut se présenter sous de nombreuses formes : fibres ou particules.

On distingue les fibres courtes (longueur : 0,1 mm à 1mm), longues (longueur : 1 mm à 50 mm) et continues (longueur supérieure à 50 mm). Dans le chapitre III, nous ne nous intéresserons qu'à la famille de composites faisant l'objet de ce travail : fibre longue et matrice métallique.

Le renfort a pour rôle de supporter l'essentiel de l'effort mécanique appliqué au matériau composite grâce à ses caractéristiques mécaniques élevées (modules et limite d'élasticité, résistance mécanique [2]).

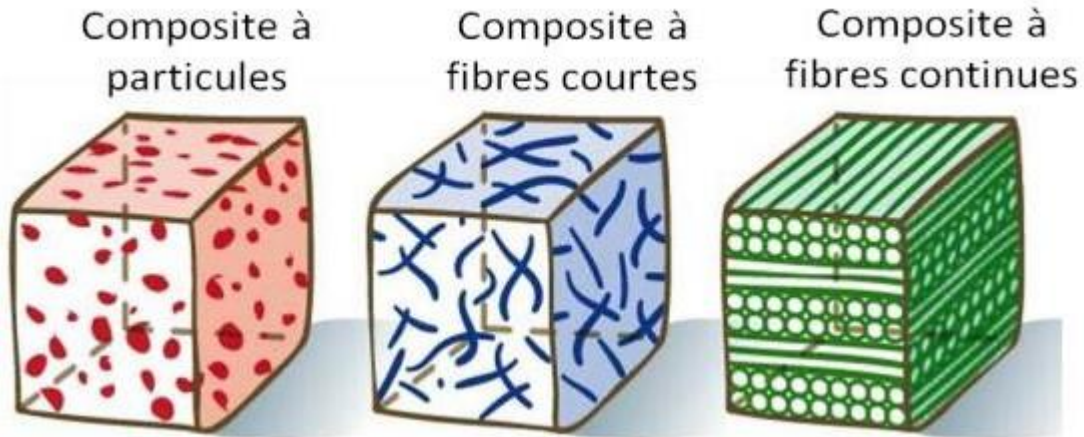


Figure 1.3: Représentation schématique d'un matériau composite de type particule matrice, fibres courtes-matrice et fibres continues matrice [3].

✓ Composites à fibres :

On appelle composite à fibre, si le renfort se trouve sous forme de fibre (soit fibres continues, soit fibres discontinues, coupées ou courtes)

✓ Composites à particules :

On appelle composite à particule, lorsque le renfort se trouve sous forme de particule. Au contraire à une fibre, la particule n'a pas de dimension privilégiée. Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion...etc. mais dans de nombreux cas, les particules sont simplement utilisées comme charges pour réduire le coût du matériau, sans en diminuer les caractéristiques.

Ce type de composite recouvre un domaine étendu dont le développement s'accroît sans cesse [4].

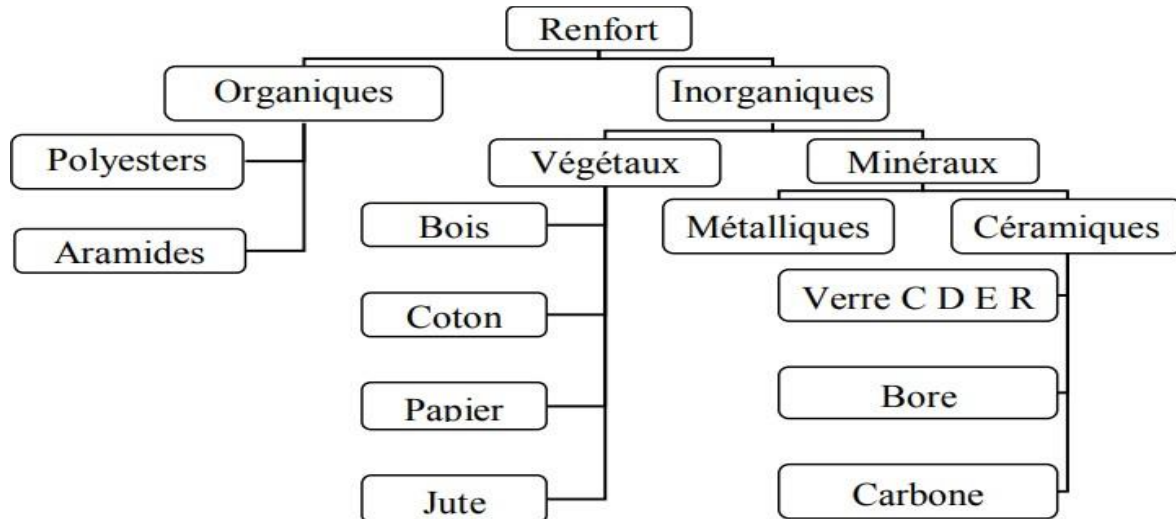


Figure I.4 : principaux matériaux de renforts [5]

❖ Fibres en carbure de silicium:

Les fibres de carbure de silicium sont une bonne réponse à l'oxydation du carbone dès 500°C. Ces fibres sont d'un usage très fréquent en particulier dans le domaine de l'aéronautique, et ceci à cause de leur bonne stabilité thermique, leurs propriétés mécaniques, et leurs diamètres importants. Elles sont destinées à des matrices métalliques ou céramiques [6]. Leur coût de production est très élevé ce qui limite donc leur utilisation.

❖ Fibres en Alumine:

L'alumine est à l'heure actuelle la céramique technique type oxyde la plus répandue. Dans les applications mécaniques et thermomécaniques l'alumine subit la concurrence des céramiques plus performantes (ZrO₂, SiC, Si₃N₄.....). C'est dans l'industrie électronique qu'elle garde toute sa compétitivité [7].

Les différentes propriétés mécaniques de l'alumine sont réunies dans le tableau I-1 [8].

Tableau I.1 : Propriétés mécanique des fibres en alumine

Module de Young	E (GPa)	360 à 440
Coefficient de poisson	(ν_m)	0.2
C.T.E	(α_m)	6.5E-6 °C ⁻¹
Résistance mécanique	(GPa)	2
Masse volumique	(g/cm ³)	3.8 à 3.9

❖ **Fibres en Carbone:**

Ce type de renfort est obtenu par carbonisation des fibres polymères (rayonne, et plus particulièrement polyacryloniriles), éventuellement tissées ou tressées au préalable [9]. L'utilisation des fibres de carbone s'est développée dans les matériaux composites utilisés comme matériaux à « hautes performances », destinés à des industries très exigeantes, en particulier l'aérospatial. La caractéristique la plus remarquable de ces fibres, est leur isotropie transversale du coefficient de dilatation thermique. Cette caractéristique qui a fait couler beaucoup d'encre ces dernières années est liée aux structures cristallines. Les propriétés des fibres de Carbone utilisées sont regroupées dans le tableau I.2 ci-dessus [9].

Tableau I-2 : Propriétés mécaniques des fibres en carbone

Module de Young	E_f	180 à 230GPa
Coefficient de poisson	ν_f	0.18
C.T.E	(α_f)	
Longitudinale (axial)		5E-007 °C ⁻¹
Transversal (radial)		8 E-006 °C ⁻¹
Température max d'utilisation		2000°C
Résistance a la traction		2.2(GPa)

❖ **Fibres en Bore :**

Le bore est actuellement un des matériaux de renfort les plus prometteurs. Il est très dur (comparable au carbure de silicium), et sa résistance mécanique est importante.

Pareils à la plupart des métaux, les fibres en bore possèdent un coefficient de dilatation thermique nettement supérieur à la fibre SiC. Les propriétés du bore sont regroupées dans le tableau I.3 [10]

Tableau I.3: Propriétés mécaniques des fibres en bore.

Module de Young	E_f	300 à 420GPa
Coefficient de poisson	ν_f	0.18
C.T.E	(α_f)	8.3 E-006 °C ⁻¹
Résistance a la traction		3(GPa)
Température max d'utilisation		500 à700°C

❖ **Fibres en verre :**

Le verre possède une très bonne résistance à la rupture dépassant même celle de certains métaux. Cependant, le verre est un matériau très fragile du fait de sa forte sensibilité aux microfissures. Cette fragilité diminue lorsque le verre est sous forme de fibre puisque les microfissures sont moins nombreuses, ce qui lui confère de bonnes performances.

Il existe différents types de verre : le verre E, C, D, R ou S, qui sont obtenus suivant une composition différente du mélange de préparation, par conséquent, leurs propriétés diffèrent également. Le tableau I.4 regroupe les différentes propriétés des fibres de verre.

Tableau I-4: Propriétés mécanique des fibres de verre [11]

Module de Young	E (GPa)	72
Coefficient de poisson	(ν_f)	0.22
C.T.E	(α_f)	5 E-6 °C ⁻¹
Résistance a la traction		3(GPa)

❖ **Fibres en Zirconie :**

Les fibres en zirconie se distinguent par d'excellentes caractéristiques (une grande dureté, inertie chimique et une bonne résistance aux attaques des métaux). En plus de ces propriétés, ces fibres ne sont pas altérées même à de températures élevées.

Tableau I.5: Propriétés mécanique des fibres en zirconie [12]

Module de Young	E_f (GPa)	180 à 210
Coefficient de poisson	ν_f	0.22
C.T.E	(α_f)	5 à16 E-6 °C ⁻¹
Température max d'utilisation		1500°C

Matrices :

La matrice est l'un des constituants de base des matériaux composites, qui revêt trois fonctions principales : la répartition de la charge mécanique sur tous les renforts, la cohésion des fibres pour une meilleure homogénéisation de l'ensemble et la protection des renforts vis à vis du milieu extérieur (chocs thermiques ou mécaniques) [13]. La matrice doit avoir une masse volumique faible afin de conserver au composite des caractéristiques mécaniques élevées. Plusieurs classes de matériaux composites peuvent être citées en fonction de la nature de leur matrice. Les plus développés sont les CMP (92% du marché mondial), viennent ensuite les CMC (7%), et loin derrière les CMM (1%).

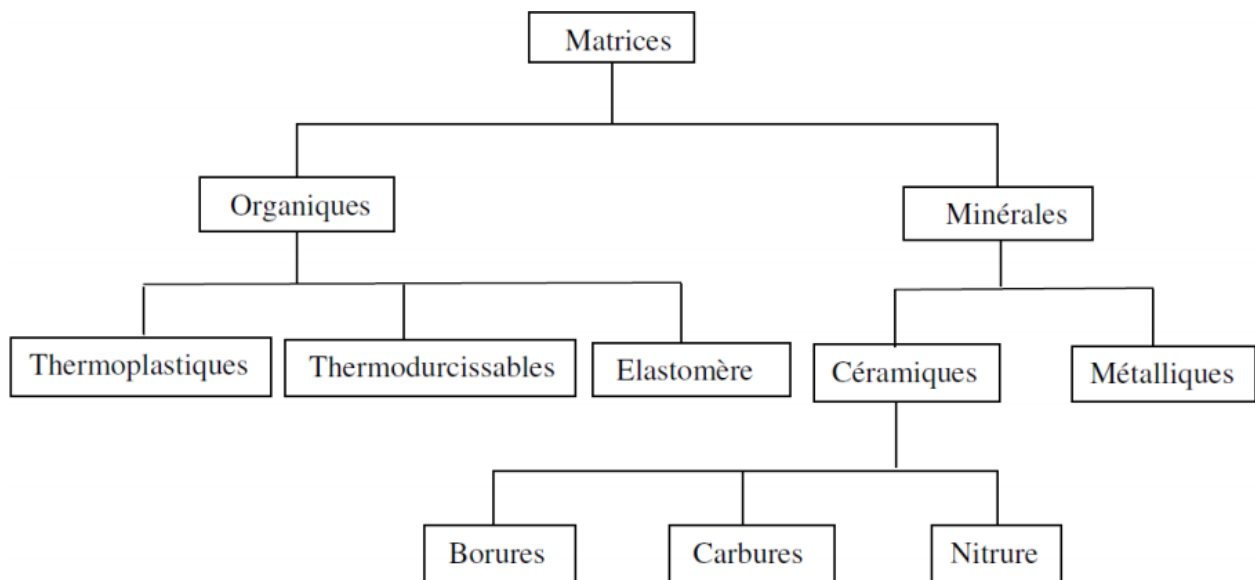


Figure I.5. Différentes Familles de Matrices [14].

❖ Matériaux composites à Matrice Polymères (CMP):

Les résines polymères les plus employées dans les matériaux composites sont les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques. Il existe d'autres catégories de résines : les résines thermostables et les polymères thermoplastiques qui peuvent résister à des sollicitations thermiques continues de 200°C et même plus.

❖ Matrices métalliques (CMM):

Pour un grand nombre d'applications et dans bien des secteurs d'activité, l'utilisation des matériaux composites à matrices métalliques présente un grand intérêt, quand il s'agit de bénéficier de propriétés mécaniques spécifiques accrues, à de meilleures tenues en température.

Les composites à matrices métalliques à fibres longues possèdent des propriétés mécaniques plus élevées que les autres composites à matrice métallique, mais leur coût de fabrication réduit leur champ d'application à des domaines très avancés. Le prix de revient d'un composite à matrice métallique à fibres longues se compose en parts égales entre le prix de la fibre d'un côté et le coût de la matrice et de l'élaboration du composite [15].

❖ Alliages d'Aluminium:

Les caractéristiques tout à fait particulières des alliages d'aluminium en font des matériaux de choix dans de nombreuses applications, notamment en aéronautique et en aérospatiale. De par leur nature métallique les alliages d'aluminium sont ductiles et tenaces. Ils ont une faible masse volumique (2700kg.m^{-3}), et leur point de fusion est relativement bas ($\sim 660\text{ }^\circ\text{C}$). Ces alliages possèdent un coefficient de dilatation thermique nettement supérieur à la plupart des métaux. Cependant les propriétés mécaniques des alliages d'aluminium s'avèrent insuffisantes pour supporter des niveaux de contraintes et de températures trop élevées. La solution serait d'améliorer leurs propriétés en les renforçant.

En général ce sont les alliages 6061-T3 (Al/Bal., Mg 1% poids, Si 0.6% poids) qui sont les plus utilisés. Leurs propriétés sont regroupées sur le tableau I-7.

Tableau I.7 : Propriétés de l'alliage AL6061-T3[16]

Module de Young	E (GPa)	72.5
Coefficient de poisson	(ν_m)	0.3
C.T.E	(α_m) (K^{-1})	23.6 E-6
Résistance mécanique	R_m (Mpa)	310

interface

L'interface renfort-matrice est souvent considérée comme une surface de contact, mais ce n'est pas une surface au sens géométrique du terme. Elle assure la compatibilité renfort/matrice, en transmettant les contraintes de l'un à l'autre, sans déplacement relatif (interphase). A cause de sa structure, l'interface, peut être considérée d'un point de vue mécanique, comme un point faible du composite [17] Dans le transfert d'effort orienté dans le sens de l'axe de la fibre, l'interface est considérée comme une couche de cisaillement. Lorsqu'il n'y a pas de décohésion inter faciale, le comportement est élastique : le cisaillement inter facial est linéairement proportionnel à la différence de déplacement entre la matrice et la fibre au niveau de leur paroi inter faciale .

a- L'interphase :

C'est un milieu continu qui peut être soit un corps résultant d'une réaction chimique entre les deux constituants du composite lors de son élaboration, soit une couche introduite volontairement dans le but de protéger la fibre, ou de contrôler la liaison inter faciale (Fig. I.6.b).

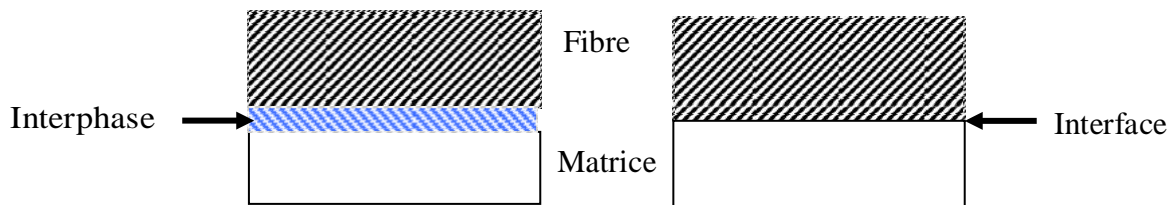
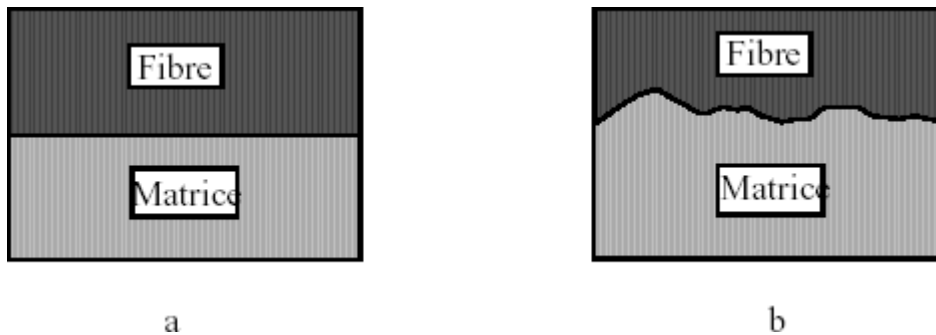


Figure I.6. Concept : (a) d'interphase. et (b) d'interface.

b- L'interface dans un composite fibreux :

Pour assurer le transfert de charge, un certain contact (adhésion) à l'interface entre les constituants est nécessaire. Généralement les interfaces sont prises comme des surfaces parfaitement planes (fig. I.7.a), ceci n'est pas totalement vrai et même le contraire, car les interfaces sont en réalité rugueuses (fig. I.7.b) ; ce qui nous mène à la nécessité d'introduire certains facteurs permettant de caractériser le contact (l'interface), dont les plus importantes sont

: La contrainte de décohésion (ζ_d), la contrainte de frottement (ζ_f), le coefficient de frottement (μ), la microstructure, l'énergie d'adhésion, et d'autres grandeurs physico-chimiques.



*Figure. I.7 : Aspect d'une interface.
(a) Interface lisse, (b) interface réelle ou rugueuse.*

I.5. Avantages et inconvénients des matériaux composites :

Avantage des matériaux composites:

Les matériaux composites sont préférés à d'autres matériaux parce qu'ils offrent des atouts liés à :

- Leur légèreté.
- Leur résistance à la corrosion et aussi à la fatigue.
- Leur insensibilité aux produits comme les graisses, les liquides hydrauliques, les peintures et les solvants.
- Leur possibilité de prendre plusieurs formes, d'intégrer des accessoires et permettre la réduction de bruit [18].

Inconvénients des matériaux composites:

Cependant certains inconvénients freinent leur diffusion :

- les coûts des matières premières et des procédés de fabrication.
- la gestion des déchets engendrés et la réglementation de plus en plus stricte.

Applications des matériaux composites

Les composites à fibres présentent des caractéristiques particulièrement intéressantes pour l'industrie. Ils à conservent d'excellentes propriétés mécaniques à haute température, c'est pourquoi on les utilise notamment dans des aubes de compresseur pour étages chauds de réacteurs. À l'avenir, ce type de composite pourrait remplacer le titane dans le fuselage et les ailes des avions supersoniques [5]. À très haute température, on préfère les composites à matrice et à fibres de carbone, en particulier dans les nez de fusées intercontinentales. Mais les composites à fibres les plus employés restent les composites à matrice organique, qui possèdent une souplesse d'élaboration et de réparation, ainsi qu'une excellente isolation thermique. Ils sont utilisés à température ambiante en aéronautique, en médecine comme prothèses, ou dans la fabrication d'articles de sport (raquettes de tennis, skis). Les propriétés des composites à fibres sont remarquables, mais souvent *anisotropes*. Autrement dit, le matériau ne présente pas les mêmes propriétés selon les directions de l'espace. En outre, tous les matériaux composites sont délicats à mettre en œuvre, et donc coûteux. L'avenir de ces matériaux dépendra donc du développement de leurs techniques de fabrication.

Industrie aérospatiale :

Au début des années 1960, une évaluation de l'impact de la fibre de bore et ses matériaux composites a été effectuée par l'armée de l'air des Etats-Unis. Un stratifié unidirectionnel de fibres de bore a été estimé avoir une rigidité supérieure à celle de l'acier pour seulement un quart de la masse. Cela a provoqué une fameuse prévision que les immeubles construits avec un tel matériau pourraient être cinq fois plus hauts et la travée des ponts cinq fois plus Longues. Bien que cette prévision a lancé les matériaux composites dans des applications aéronautiques sérieuses. Une nouvelle classe de composites appelée les composites hautes performances (Advanced composites), basée sur les fibres de bore et subséquentement les fibres de carbone, a été en développement intensif depuis.

Les composites à « haute performance » sont les composites à fibres très résistantes et très rigides comme le bore et le carbone. Les composites carbone/époxy ont connu une grande réputation dans cette classe. Tandis que les fibres de verre sont également très résistantes, leur rigidité n'est pas suffisamment élevée pour l'usage des structures primaires d'avions.

La première utilisation majeure du composite bore/époxy fut l'empennage horizontal du Grumman [19]. Dès lors, l'usage des éléments structuraux en composites a continué à augmenter autant en aviation militaire que civile. La Figure I.8 présente la croissance rapide de l'utilisation des matériaux composites dans les structures d'avions. Dans la génération actuelle des avions civils, contient des matériaux composites jusqu'à 22% de la masse structurale.

L'illustration la plus marquante concerne la comparaison entre le Boeing 777 et le 787. En pourcentage de la masse structurale, le 777 contient 12% de composites et 50% d'aluminium tandis que le 787 contient 50% de composites et 20% d'aluminium. La répartition des matériaux sur le Boeing 787 est montrée dans la Figure I.8. [17].

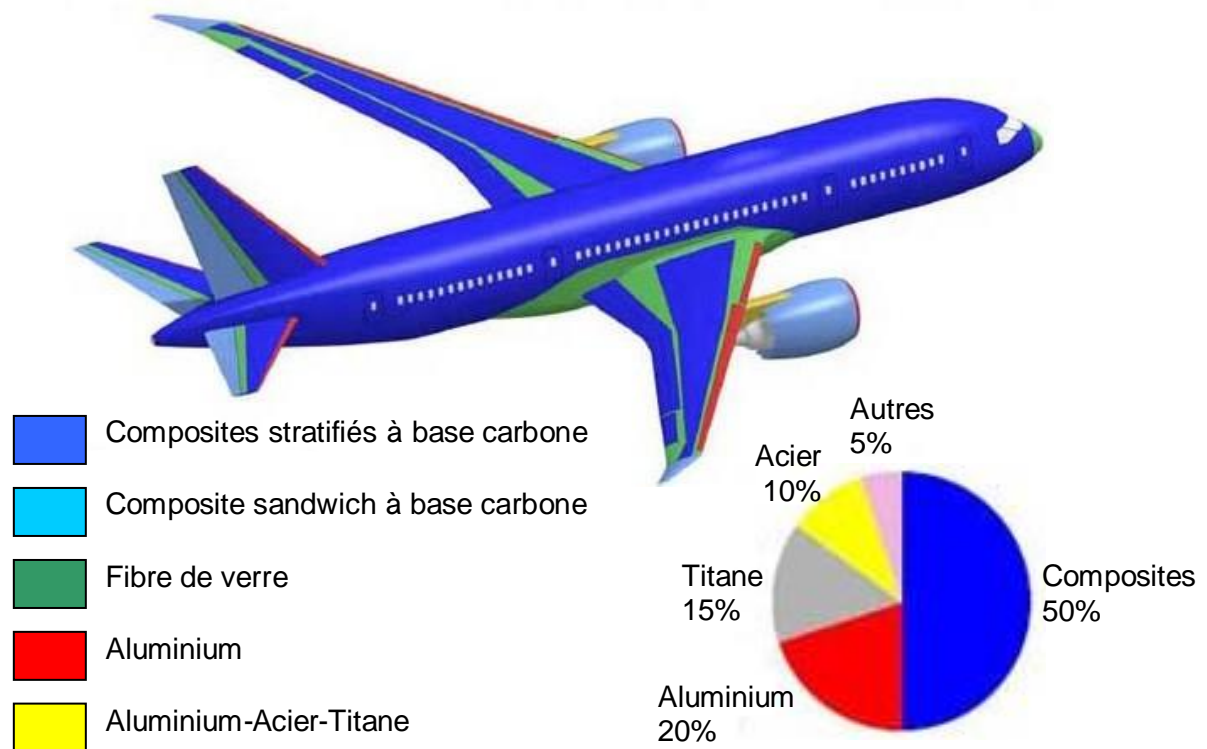


Figure I.8. Répartition des matériaux sur le Boeing 787.

La transition des matériaux composites de l'expérience de laboratoire à l'usage pratique dans la production des avions militaires et civils est une réalité. Des progrès ont passé de l'aviation militaire à l'aviation commerciale, et aujourd'hui à la communauté d'aviation générale. Ces progrès représentent la croissance de la confiance en l'usage des composites et la reconnaissance des avantages en termes de coût et de performance associés à ces matériaux.

Chapitre II:

Les contraintes résiduelles

Introduction :

Les contraintes résiduelles sont des contraintes multiaxiales statiques. Elles existent dans un système isolé, soumis à aucune force ni moment extérieur et, qui se trouve en équilibre mécanique. Elles peuvent avoir différentes origines :

- Après un traitement thermique, la surface se refroidit plus vite que le cœur, ce qui provoque l'apparition de contraintes de traction en surface et de compression à cœur. En fin de refroidissement la pièce comporte des contraintes de compression en surface et de traction à cœur.

- D'origine métallurgique : transformation de phase. Ex. austénite-martensite dans le cas des aciers.

Dans le cas des assemblages céramique-métal les contraintes résiduelles proviennent de la différence entre les propriétés des matériaux en particulier des coefficients de dilatation.

Lors d'un changement de température, la différence de coefficients de dilatation thermique (généralement $\alpha_m > \alpha_c$) crée un champ de contraintes. Son intensité et sa forme dépendent des caractéristiques des matériaux. Il induit une zone de tension dans la céramique proche de l'interface et sur les bords de l'éprouvette. Les autres parties de la céramique sont en compression

Plus, la limite élastique du métal sera faible plus l'étendue de cette zone et l'intensité des contraintes à l'intérieur de cette zone seraient faibles.

Lors d'une sollicitation, le champ de contraintes effectivement subies est la superposition du champ des contraintes appliquées et résiduelles.

L'énergie élastique emmagasinée à l'interface de liaison et dans la céramique, issue du champ de contraintes résiduelles, augmente la fragilité de la céramique. Cette fragilisation de l'interface et de la céramique est néfaste à la durée de vie des assemblages, pour des sollicitations fonctionnelles statiques ou dynamiques (fatigue thermique, choc thermique).

Plusieurs méthodes d'investigations sont développées pour déterminer le niveau des contraintes résiduelles macroscopiques, générées dans la céramique et à l'interface de liaison dans les assemblages. Citons:

- l'analyse numérique (par éléments finis),
- la diffraction X,
- l'indentation Vickers ou Knoop.

Colin a montré qu'il existe une corrélation entre les contraintes résiduelles, calculées par éléments finis (modèle thermo-élasto plastique), et celles déterminées par diffraction X. Cet accord entre les deux approches concerne les contraintes axiales en fonction de la distance à l'interface. L'ordre de grandeur des valeurs des contraintes est environ 400MPa pour le calcul plastique et au 900MPa pour le calcul élastique.

Ordres de contraintes résiduelles :

Nous pouvons constater trois ordres de contraintes résiduelles liés à l'échelle d'observation [20-21]:

- **les contraintes résiduelles du 1er ordre (σ_I)** : ou macroscopiques sont homogènes sur un très grand domaine du matériau (plusieurs grains : quelques 1/10 de mm). Les forces internes liées à ces contraintes sont en équilibre dans chaque section, et les moments liés à ces forces sont nuls autour de tout axe.

- **les contraintes résiduelles du 2ème ordre (σ_{II})** : sont homogènes sur de petits domaines du matériau (un grain ou une phase : quelques 1/10 de μm). Les forces internes et les moments liés à ces contraintes sont en équilibre dans un assez grand nombre de grains.

- **les contraintes résiduelles du 3ème ordre (σ_{III})** : ou microscopiques sont inhomogène sur les plus petits domaines du matériau (quelques distances interatomiques : quelques 1/10 de nm). Les forces internes et les moments liés à ces contraintes sont en équilibre dans de très petits domaines.

Dans le cas de matériaux réels, l'état des contraintes résiduelles résulte de superposition des contraintes d'ordre I, II et III comme ceci est schématisé sur la figure II.1 dans le cas d'un matériau monophasé [22-23]. La courbe des contraintes sur la figure II.1 est représentée par la contrainte sigma y en fonction de l'abscisse x traversant plusieurs grains. Les contraintes d'ordre 1 s'étendent par définition sur plusieurs grains. Les contraintes d'ordre 2 s'étendent sur un seul grain et existent du fait des incompatibilités des déformations plastiques des grains. Les contraintes d'ordre 3 oscillent autour de la valeur moyenne des contraintes dans un grain et représentent la variation locale de la déformation due à de nouvelles discontinuités apparaissant à l'intérieur des grains ou sous-grains.

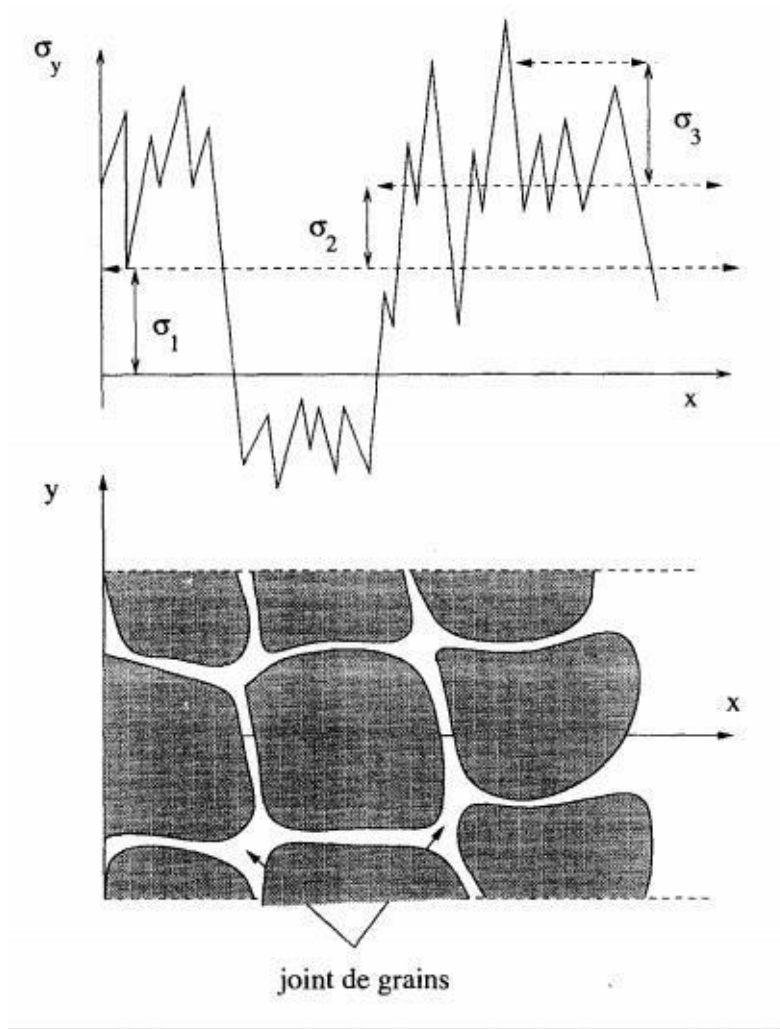


Figure II.1: Définition schématique des différents ordres de contraintes pour un matériau monophasé [22-23].

Localement, la contrainte totale est la résultante des contraintes des ordres I, II et III

$$\sigma_{\text{Totale résiduelle}} = \sigma_{\text{I}} + \sigma_{\text{II}} + \sigma_{\text{III}} \quad \text{II.1}$$

Méthode de détections des contraintes internes :

Les assemblages métal-céramique peuvent être examinés par diverses méthodes d'analyses des contraintes résiduelles qui sont non destructives (diffraction des rayons X, diffraction des neutrons, interférométrie optique) ou destructives (méthode du trou, enlèvement de couches, indentation Vickers ou méthode de la flèche). Les calculs par des méthodes analytiques sont réalisables dans des cas simples. L'utilisation de codes de calculs par éléments finis s'avère indispensable pour des modélisations complètes de la répartition spatiale des contraintes résiduelles au sein d'assemblages plus complexes. Les possibilités et les limites des méthodes utilisées sont décrites à la lumière des données bibliographiques concernant l'étude des liaisons métal/céramique.

Techniques diffractométriques :

La technique diffractométrique est considérée comme la plus appropriée à l'étude des assemblages métal/céramique. Cette technique permet d'apprécier le signe, le niveau et la répartition spatiale des contraintes résiduelles au sein d'un assemblage. Seule la diffraction neutronique permet un contrôle totalement non destructif de pièces jointes épaisses du fait de la grande profondeur de pénétration des neutrons [24-25]. Les volumes analysés sont beaucoup plus importants (plusieurs mm³), ce qui requière un équipement lourd avec des temps de comptages très longs. Pour cette raison, la diffraction des rayons X est plus employée malgré la faible pénétration des photons. Son principe consiste à utiliser le paramètre cristallin comme jauge de déformation.

Mesures par indentation Vickers :

Moins répandue que la diffraction X mais pourtant aisée à mettre en œuvre pour l'étude des liaisons métal/céramique, la méthode par indentation Vickers peut être appliquée pour évaluer les contraintes résiduelles dans le matériau céramique près de la zone interfaciale (Figure II.2).

Lascaz consiste à effectuer des indentations successives dans la céramique en s'éloignant de l'interface d'un pas de 0.1 mm à chaque point. La longueur de la fissure mesurée sur la céramique assemblée correspond à la fissuration dans la direction parallèle à l'interface.

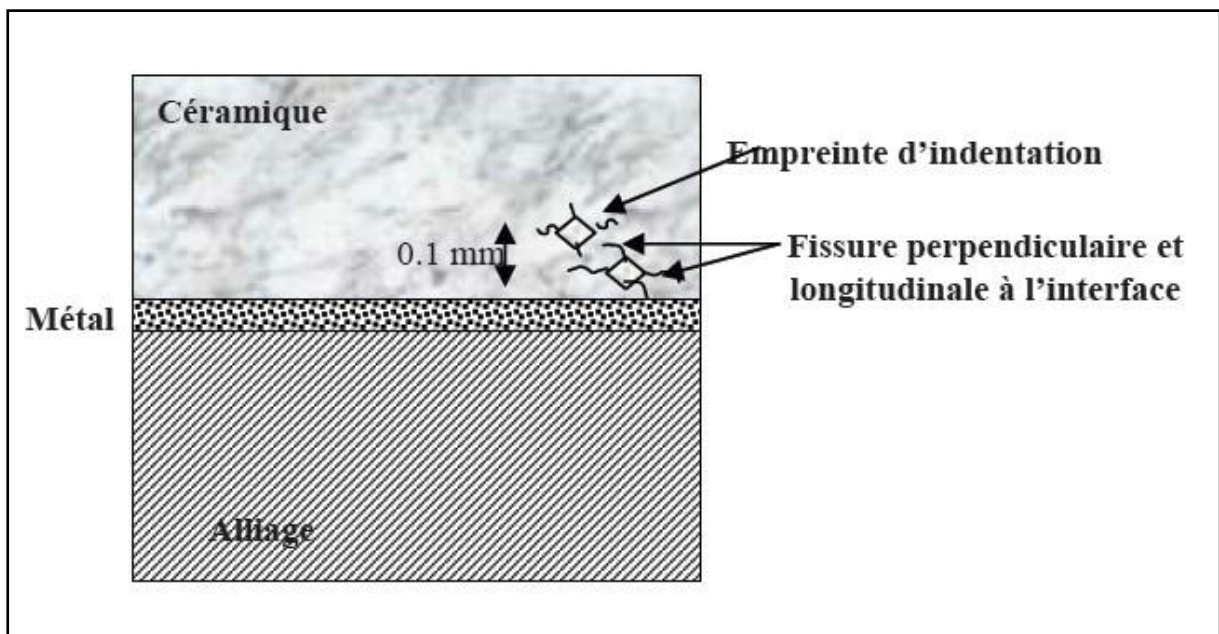


Figure II.2 : Schéma explicatif de la méthode de détermination des contraintes résiduelles par indentation Vickers.

Le (tableau II.1) donne des valeurs ainsi mesurées pour différents assemblages métal/céramique. Les longueurs de fissures mesurées sont toutes plus grandes après liaison ce qui vérifie effectivement que les contraintes estimées sont systématiquement en traction. Les valeurs des contraintes estimées doivent être prises avec précaution pour plusieurs raisons. Il s'agit d'une valeur moyenne superficielle entachée d'une erreur liée à la difficulté d'apprécier précisément les longueurs de fissures.

<i>Couple</i>	<i>Technique de la liaison</i>	<i>σ_r calculée (MPa)</i>
ZrO ₂ (TZP)/XC18	Brasage (Ag-Cu-Ti)	142
ZrO ₂ + Al ₂ O ₃ /Ti	Thermocompression	131
ZrO ₂ + Al ₂ O ₃ /Zircaloy	Thermocompression	334

Tableau II.1 : Exemple de mesure de contraintes résiduelles à l'interface d'un assemblage métal/céramique par indentation Vickers.

Méthodes numériques :

La simulation numérique par éléments finis [26] est un outil puissant dont l'utilisation doit permettre la prédiction de la répartition spatiale des contraintes résiduelles lorsque les méthodes analytiques sont inefficaces.

solution pour diminuer les contraintes résiduelles dans les liaisons métal céramiques :

De nombreuses méthodes ont été développées afin de minimiser les contraintes résiduelles d'un assemblage métal-céramique. Elles font souvent appel à des couches intermédiaires dont le but est d'ajuster les coefficients de dilatation des deux matériaux.

Des métaux tels que le cuivre et l'aluminium ont donné de bons résultats. De part sa plasticité et son faible point de fusion, l'aluminium peut donner des liaisons fortes avec les céramiques telles que l'alumine et le nitrure de silicium [27-28].

Un autre métal, le niobium a été étudié [29-30-31]. Il a été utilisé comme couche intermédiaire pour l'élaboration par thermo compression des jonctions alumine/acier.

La réduction des contraintes inter faciales peut être assurée par une autre technique, qui consiste à réaliser une couche intermédiaire de type cermet (composée d'un mélange des deux matériaux à assembler) [31]. La méthode de multicouche métallique composée de métal (a) et métal (b) déposée entre les matériaux à assembler (céramique, métal) peut minimiser les contraintes internes à condition que les coefficients de dilatation thermique remplissent les conditions suivantes [31] :

$$\alpha_{\text{céramique}} \approx \alpha_{\text{métal (a)}} > \alpha_{\text{métal (b)}} \text{ et } \alpha_{\text{métal (b)}} > \alpha_{\text{métal}}$$

II .2

Chapitre III:

Analyse Numérique

III.1. Modélisation par élément finis :

III.1.1. Présentation du logiciel :

ABAQUS est un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés en mécanique. Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants de problèmes non-linéaires. ABAQUS est donc un progiciel de calcul éléments finis qui se compose de trois produits : ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE.

- ABAQUS/Standard est un solveur généraliste qui recourt à un schéma traditionnel d'intégration implicite.
- ABAQUS/Explicit est un solveur qui emploie un schéma d'intégration explicite pour résoudre des problèmes dynamiques ou quasi-statiques non-linéaires.
- ABAQUS/CAE constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour les dits solveurs. Chacun de ces produits est complété par des modules additionnels et/ou optionnels, spécifiques à certaines applications.

Le logiciel de calcul Abaqus [32] offre l'avantage de présenter une très grande capacité de calcul et permet l'analyse de structures assez complexes.

Abaqus propose le module Abaqus.cae, permettant de générer l'ensemble des propose les dix sous modules.

Le post-processeur du logiciel Abaqus est assez puissant puisqu'il permet de donner plusieurs types de résultats

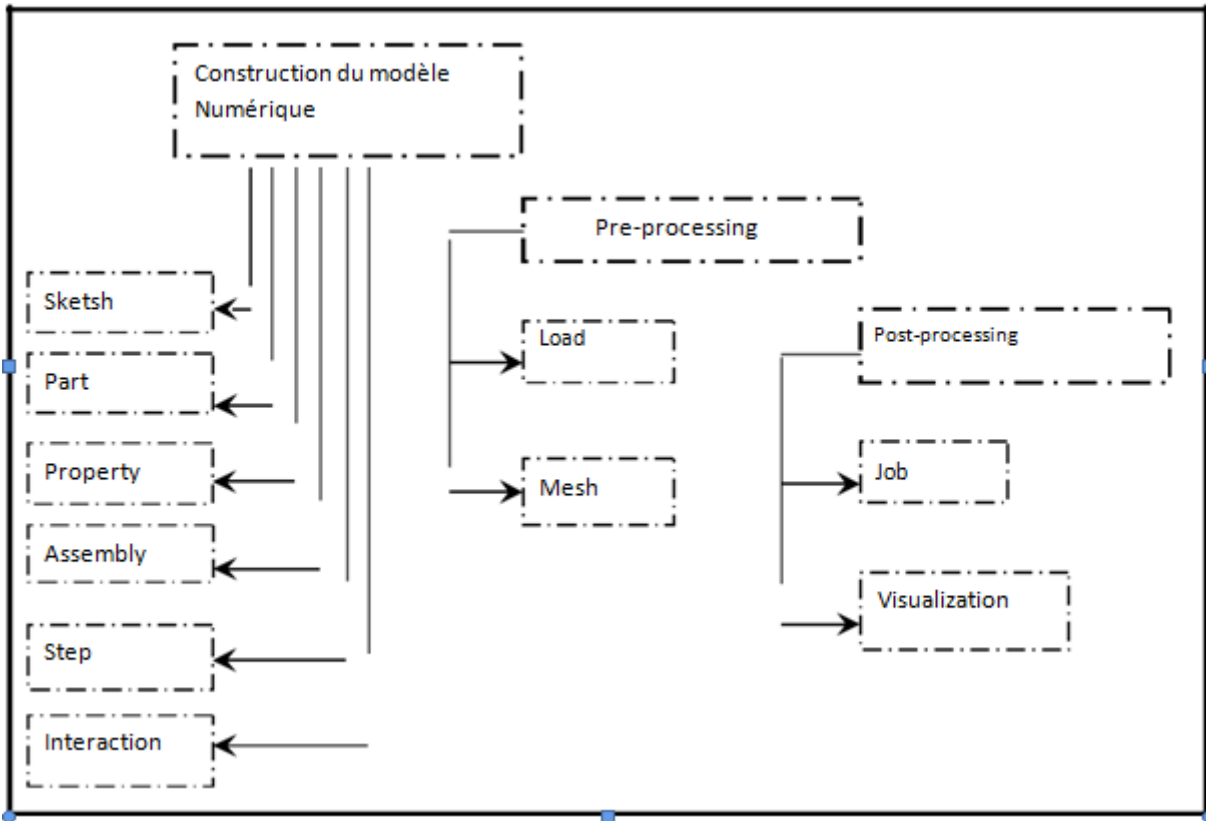


Figure III.2 : Organigramme : ABAQUS CAE

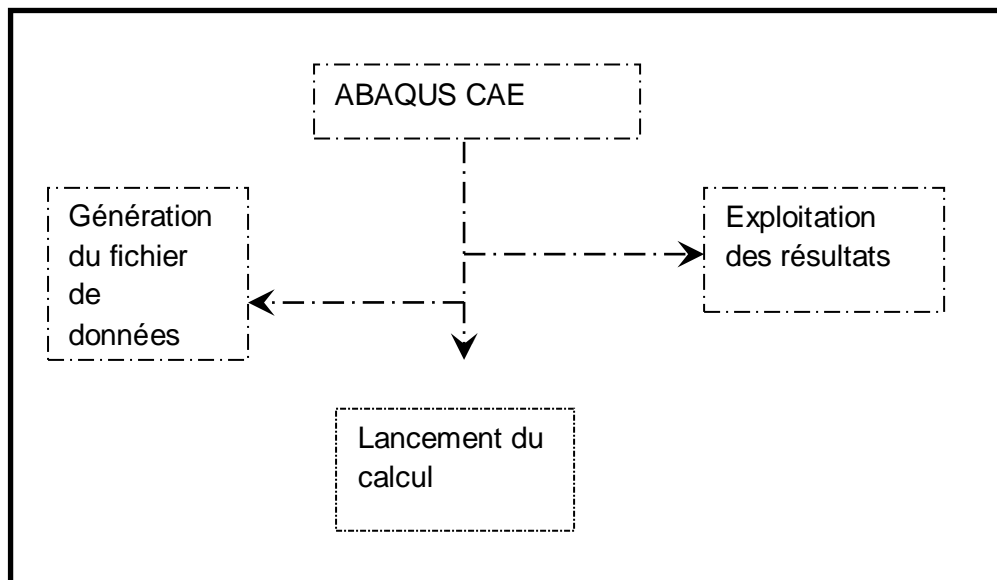


Figure III.3 : Organigramme de simulation

III.2. Modèle utilisé

Dans cette partie d'étude, la méthode des éléments finis a été utilisée pour analyser la distribution et le niveau des contraintes thermiques et mécaniques à l'interface dans le composite Al/Al₂O₃.

L'étude a été menée à l'échelle qui distingue les fibres et la matrice. A cette échelle, des hypothèses simplificatrices permettent d'assimiler le composite à un milieu périodique la distribution des fibres au sein de la matrice est relativement régulière. Par conséquent, la description du V.E.R (Volume Élémentaire Représentatif) est réduite à sa plus simple représentation et nous parlerons alors de cellule élémentaire.

Afin de satisfaire le compromis entre la complexité de la géométrie de la cellule et le souci d'obtenir une représentation fidèle du matériau nous avons opté pour un modèle 3D unidirectionnel à une seule fibre [33]. Le modèle géométrique a été modélisé par un cylindre (matrice) avec un creux capillaire (fibre) le long de son axe (figure III.4).

L'interface entre la matrice et la fibre est considérée parfaite et continue. Le code de calcul utilisé pour cette analyse est ABAQUS [32] Standard.

Sur la figure III.4 est représenté le modèle géométrique analysé et le maillage utilisé. En raison de la symétrie de la structure étudiée, le VER sera réduit à son quart, ce qui a permis de réduire le temps de calcul.

Le maillage a été raffiné de telle sorte que les résultats obtenus convergent avec un temps optimal. Le nombre d'éléments utilisés est de 10400 (C3D8R, élément à huit nœuds de type iso paramétrique). Plus le maillage est fin, plus la solution est fiable.

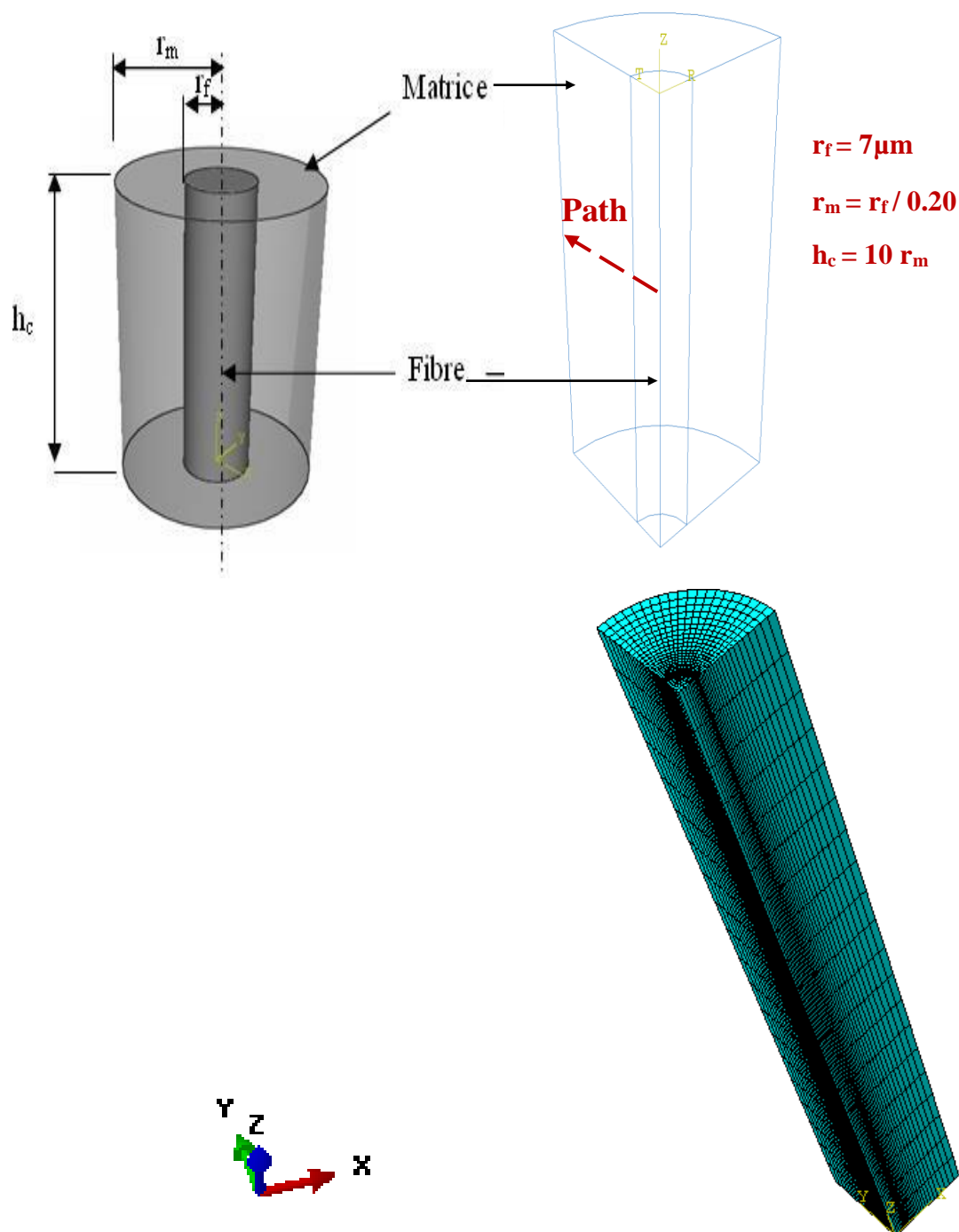


Figure III.4. Représentation schématique du modèle, Maillage du modèle.

Le comportement mécanique de la matrice et de la fibre analysé est purement élastique. Les propriétés thermomécaniques du métal et de la céramique sont regroupées dans les Tableaux suivants :

Le Métal Al:

	Module de Young E (GPa)	Coefficient de poisson	Coefficient de dilatation thermique α (K ⁻¹)
Métal AL	70	0.34	24 10 ⁻⁶

*Tableau III.1 : Les propriétés mécanique et thermique du métal (Al).***La Céramique (Al₂O₃) :**

Température(c°)	Module de Young (E) (GPa)	Coefficient de Poisson (ν)	Coefficient de dilatation thermique (α) (K ⁻¹)
24.85	375	0.28	6.9 10 ⁻⁶
524.85	350	0.30	6.9 10 ⁻⁶
824.85	340	0.32	6.9 10 ⁻⁶
924.85	314	0.35	6.9 10 ⁻⁶
1024.85	305	0.37	6.9 10 ⁻⁶

*Tableau III.2: Les propriétés mécanique et thermique de la céramique (Al₂O₃)***III.4. Résultats et analyse :****III.4.1. Effet du chargement Mécanique :**

La structure composite est soumise à un chargement mécanique (traction uni axiale). L'effet du chargement mécanique sur le niveau et la distribution de la contrainte équivalente de Von Mises et des contraintes normales (radiales, circonférentielles et longitudinales) dans Al/Al₂O₃ le long de la direction définie par « path » (figure III.4) est représenté sur la figure III.5 et III.6. Ces figures montrent clairement qu'un chargement plus intense induit une contrainte plus forte dans la structure composite, dont le niveau atteint son maximum à l'interface matrice/fibre.

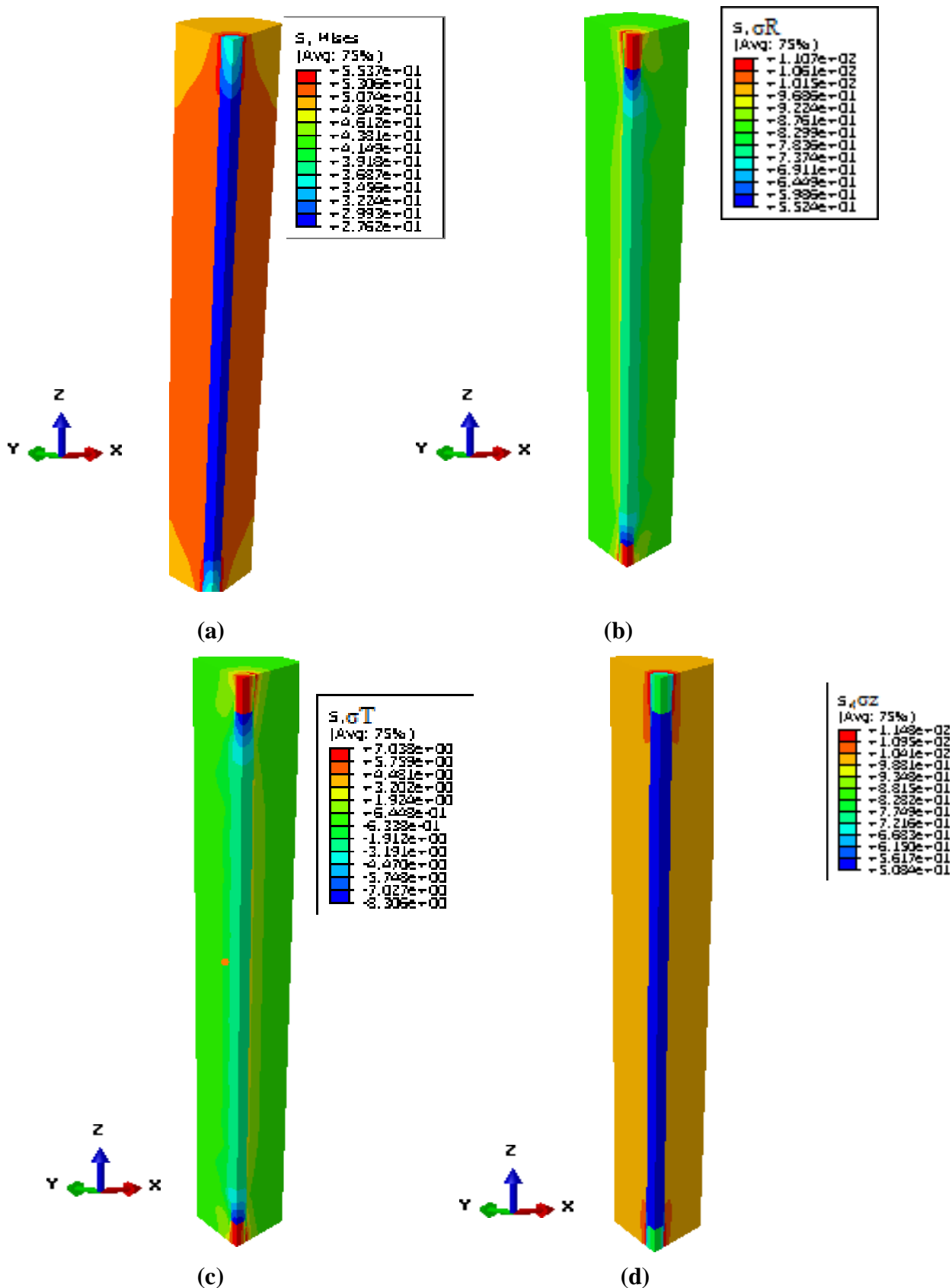
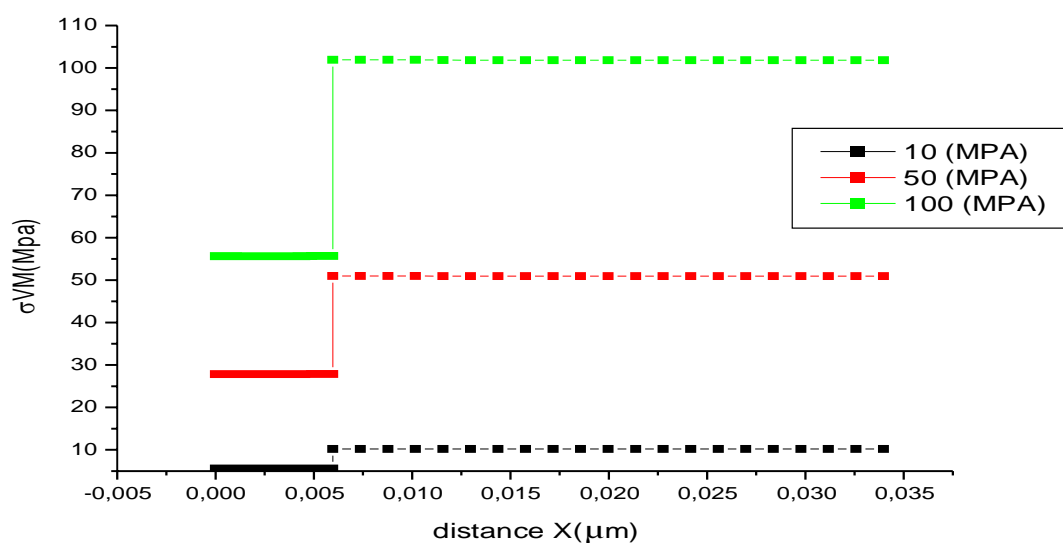


Figure III.5. Distribution des contraintes de Von Mises développées dans le composite Al/Al₂O₃ sous l'effet d'un chargement mécanique $P=50$ MPa.

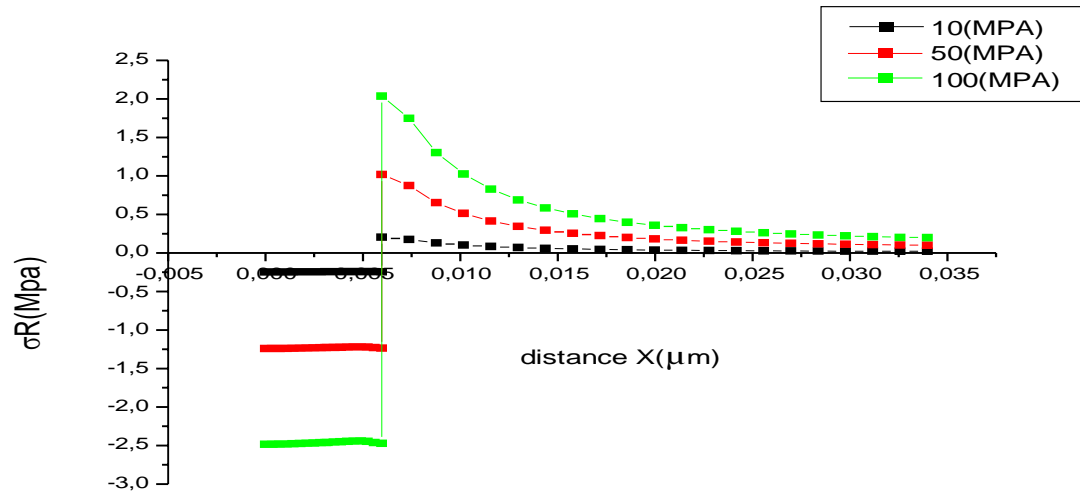
La variation de la contrainte de Von mises et de la contrainte normale induite selon la direction ZZ montre clairement qu'une augmentation de ces charges engendre dans la matrice des contraintes plus fortes et des contraintes plus faibles dans la fibre. Loin de la matrice, le niveau de la contrainte locale correspond à celui de la contrainte appliquée.

La variation des contraintes normales σ_R en fonction de la distance et la contrainte appliquée mécaniquement est illustrée sur la figure III.6.b. Ces contraintes, fortement concentrées à l'interface et de niveau comparable à celles engendrées selon l'axe ZZ , compriment la fibre et élongent la matrice.

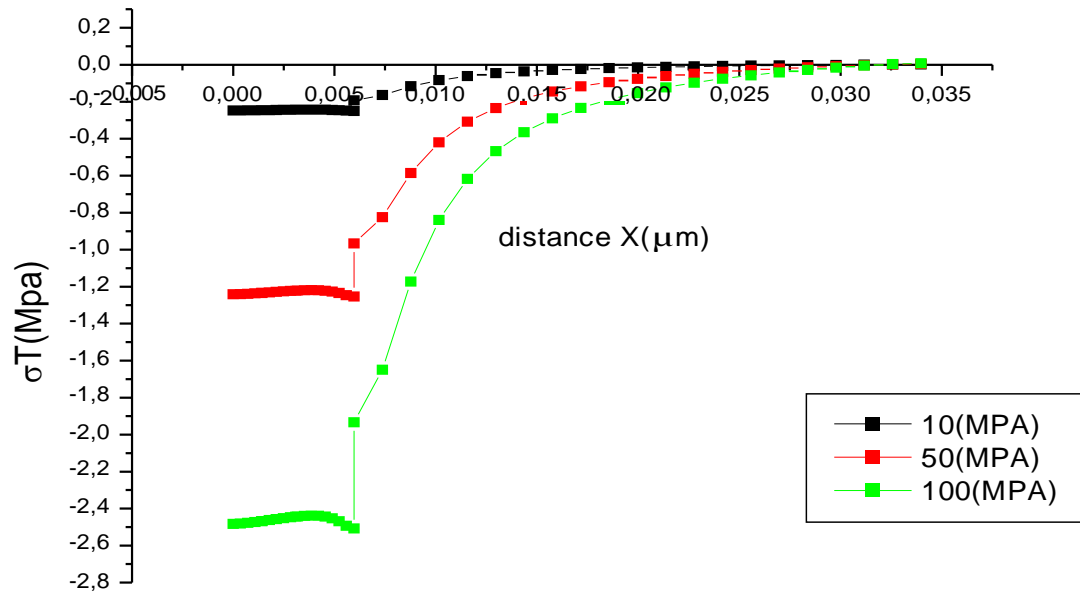
Les contraintes développées dans la direction y de le composite, dont l'intensité croît avec l'augmentation des chargements mécaniques appliqués, mettent la matrice et la fibre en compression.



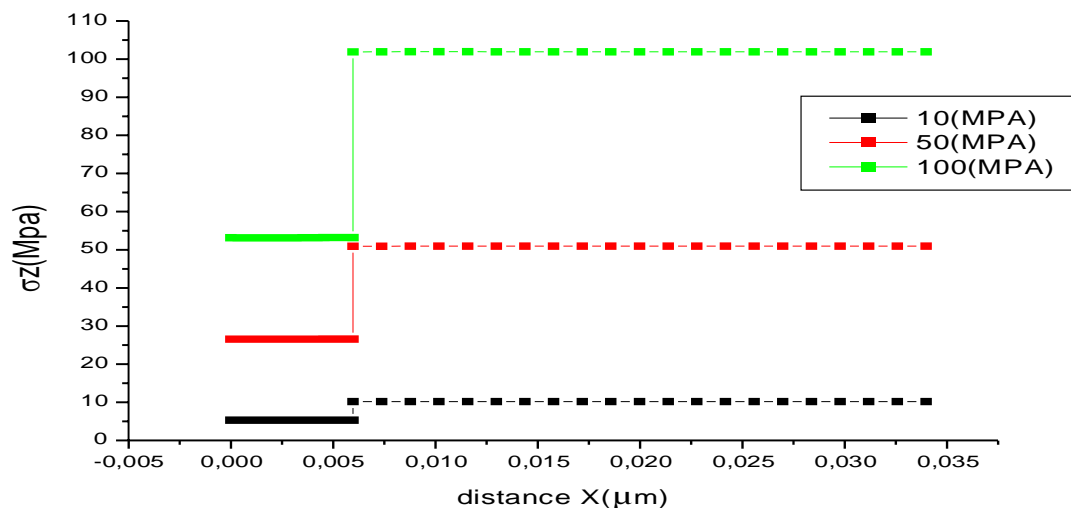
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure III.6 : Variation des contraintes de Von Misses en fonction de la distance et de la contrainte appliquée

III.4.2. Effet du chargement thermique :

Les matériaux composites sont généralement élaborés à des températures élevées. Les contraintes résiduelles proviennent de la différence entre les propriétés des matériaux en particulier des coefficients de dilatation. Lors d'un changement de température, la différence de coefficients de dilatation thermique ($\alpha_m > \alpha_c$) crée un champ de contraintes.

Ces contraintes peuvent conduire à la ruine des matériaux composites. Leur étude est d'une grande importance pour la durabilité de ces matériaux.

Dans cette partie d'étude, le cycle thermique (chargement thermique) utilisé, pour déterminer les contraintes résiduelles, consiste en un chauffage à une température donnée élevée suivi d'un refroidissement jusqu'à la température ambiante de 25°C.

Les résultats obtenus à partir de cette analyse sont représentés sur les figures **III.7** et **III.8**.

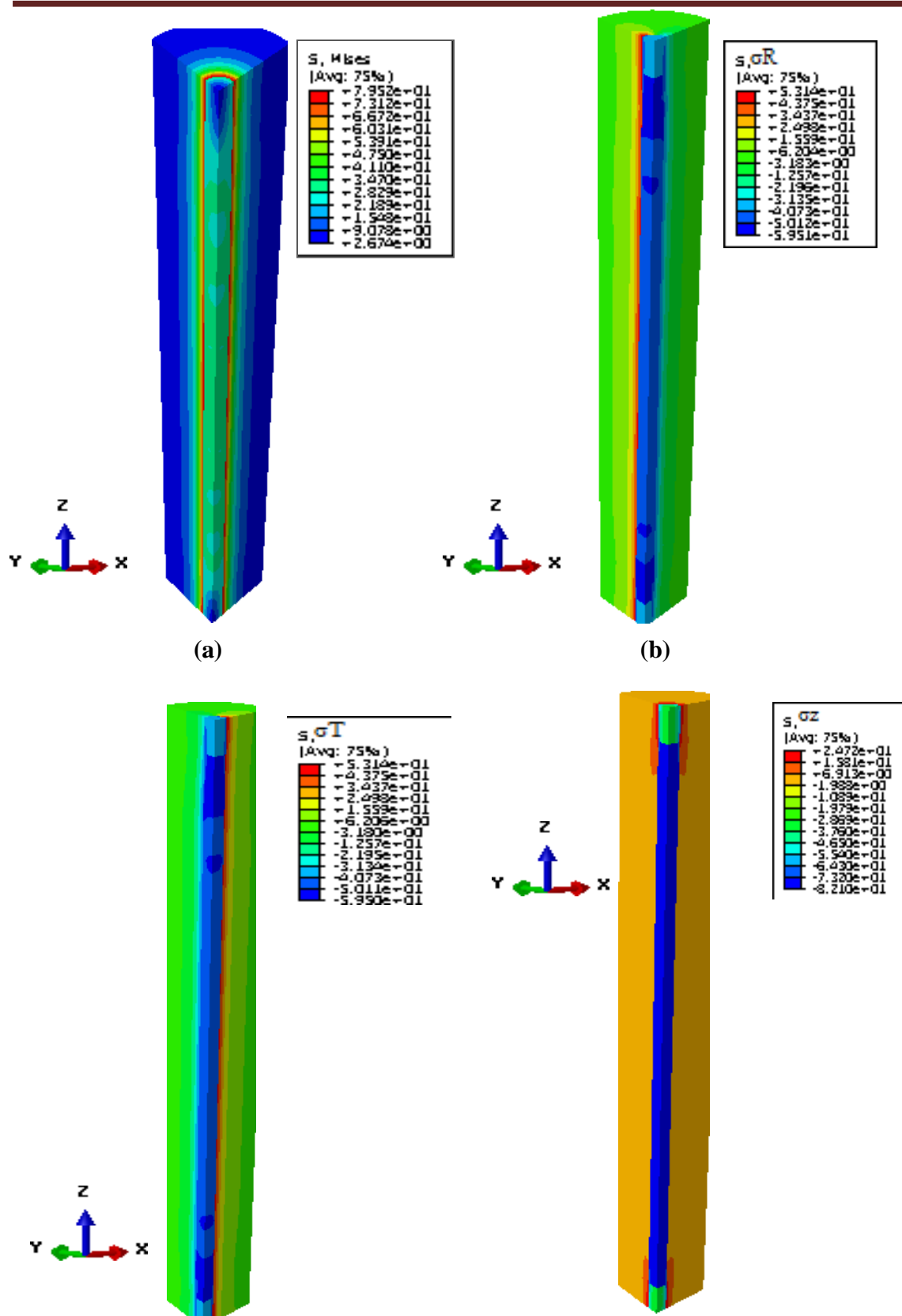


Figure III.7 : Distribution des contraintes de Von Mises sous l'effet d'un chargement thermique ($T= 100\text{ C}^\circ$).

Cette figure présente les variations des contraintes résiduelles en fonction de la distance x du path pour le composite Al/Al₂O₃ avec différentes températures.

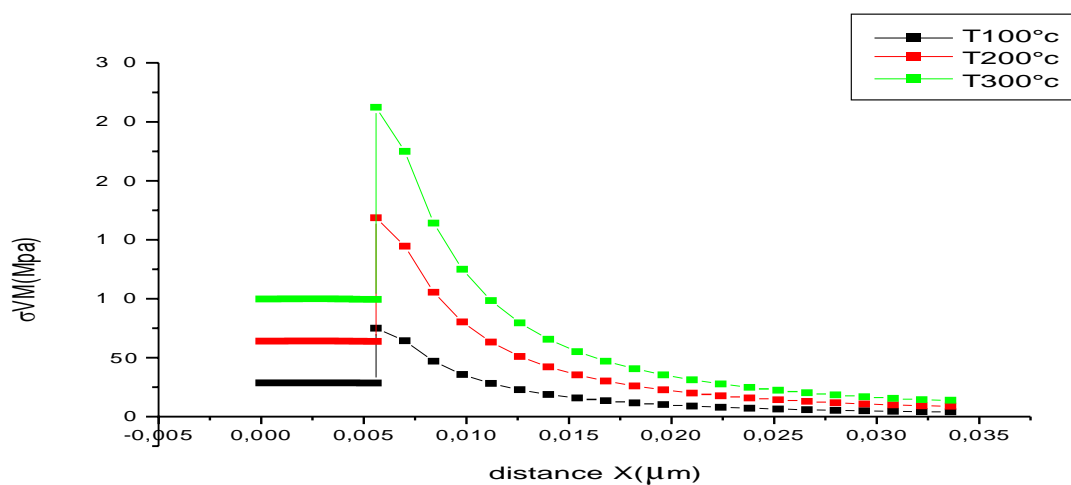
On observe que les contraintes dans cette partie de travail sont assez fortes et de niveau comparable à celles engendrées dans le chargement mécanique.

Elles sont fortement localisées au voisinage très proche de l'interface métal/céramique. Loin de cette dernière, le métal est totalement relaxé de ces contraintes.

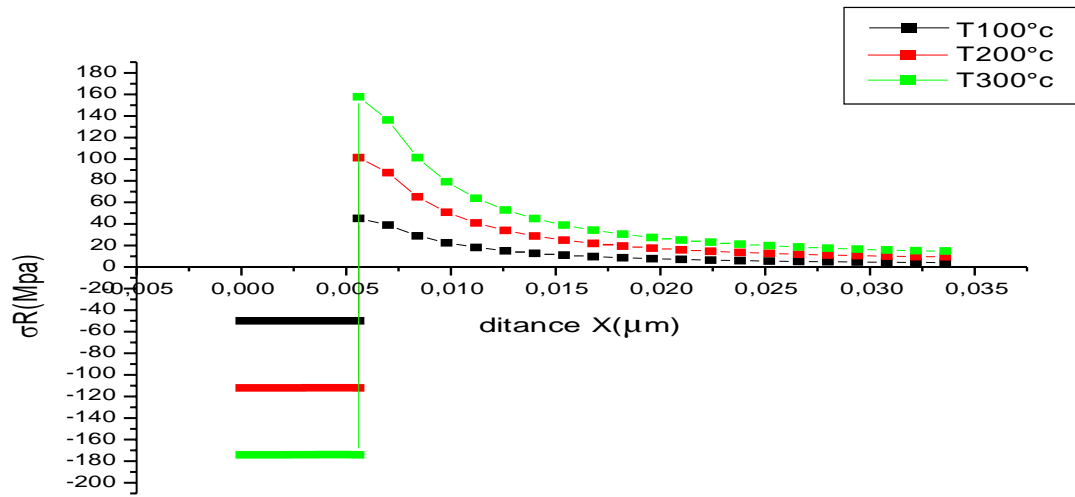
Ces figures montrent qu'une augmentation de la température induit des contraintes plus intenses au voisinage de l'interface Al/Al₂O₃.

L'étude de la figure III.8.b montre que, les contraintes résiduelles σ_R sont positives dans la fibre et négatives dans la matrice. Loin de l'interface, la matrice se relaxe totalement de ces contraintes.

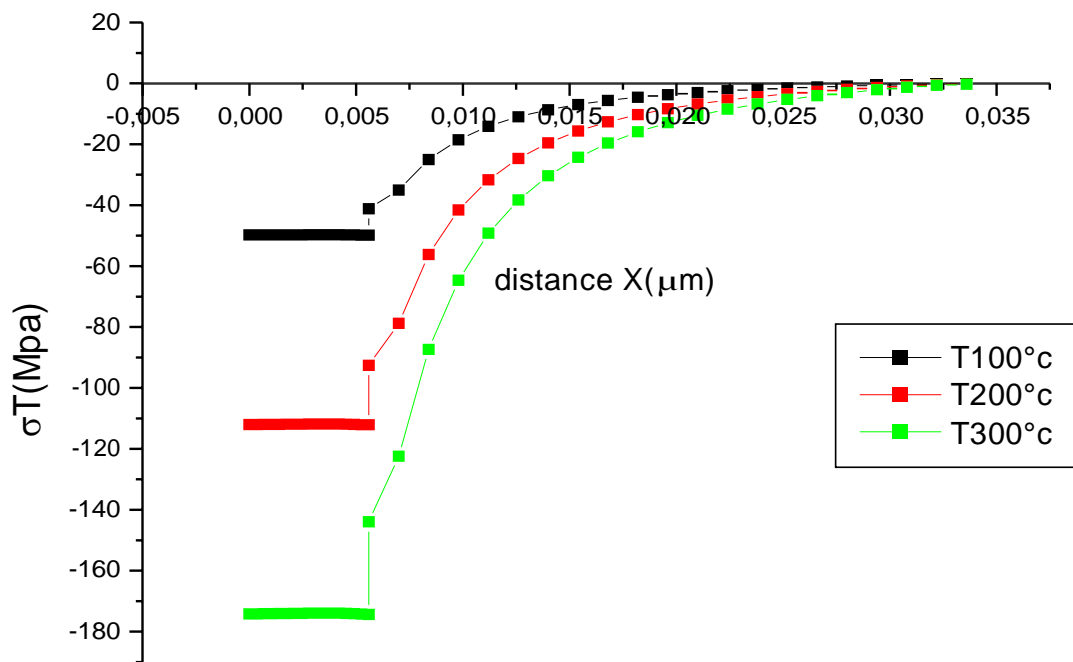
Les contraintes normales résiduelles développées dans les deux directions X et Y dans la fibre sont d'un niveau faible que celles induites dans la direction Z. La relaxation totale de ces contraintes est observée dans la matrice loin de l'interface



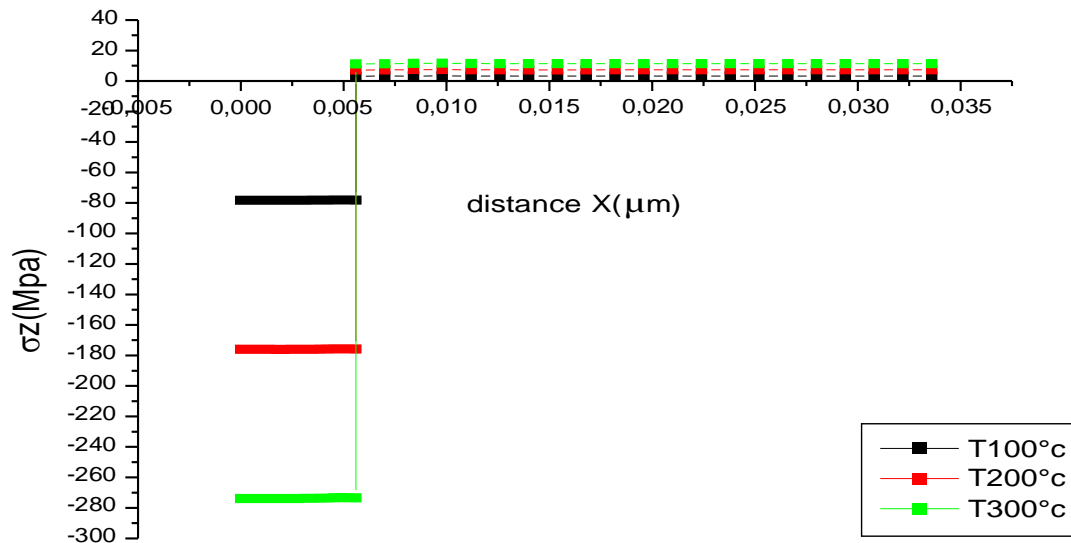
(a)



(b)



(c)



(d)

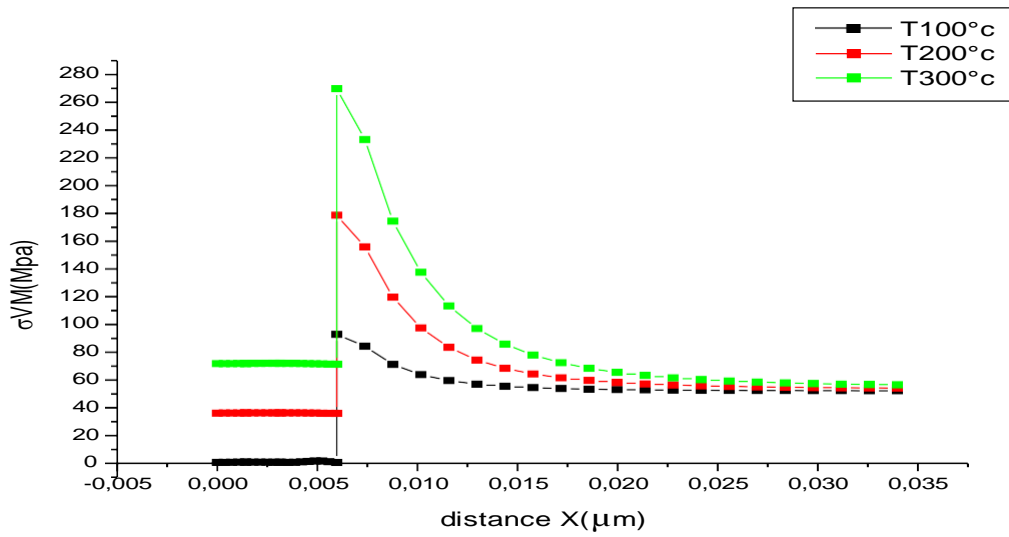
Figure III.8: Variation des contraintes de Von Mises en fonction de la distance et de la température

III. 4.3. Effet du chargement thermomécanique :

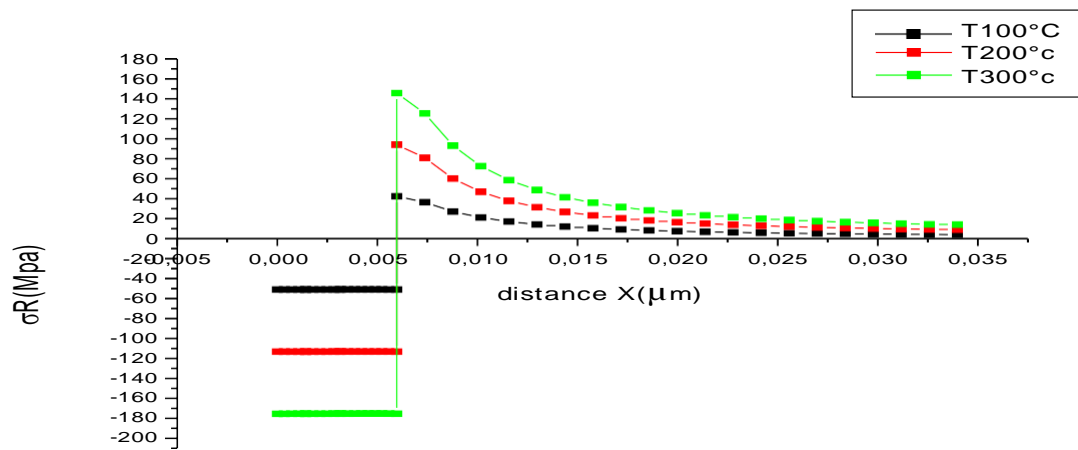
Dans cette partie d'étude, nous analysons numériquement l'effet combiné du chargement thermique et du chargement mécanique.

En effet comme le montre la figure III.9, une élévation de la température T , à un chargement constant, entraîne un accroissement de l'amplitude des contraintes résiduelles.

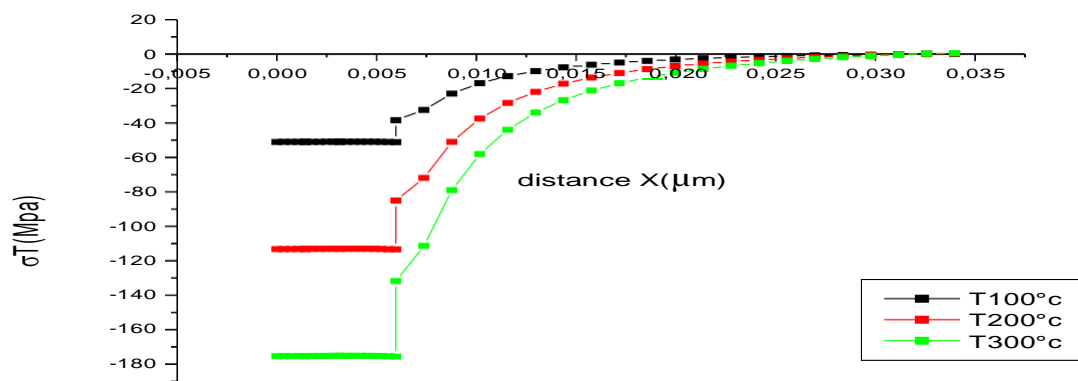
Comparativement au chargement mécanique, les contraintes engendrées par des chargements thermomécaniques sont légèrement plus élevées que les contraintes engendrées par un chargement purement mécanique. Ceci est dû à l'évolution des contraintes résiduelles d'origine thermique due à l'écart des coefficients de dilatation thermique α de la matrice et de la fibre.



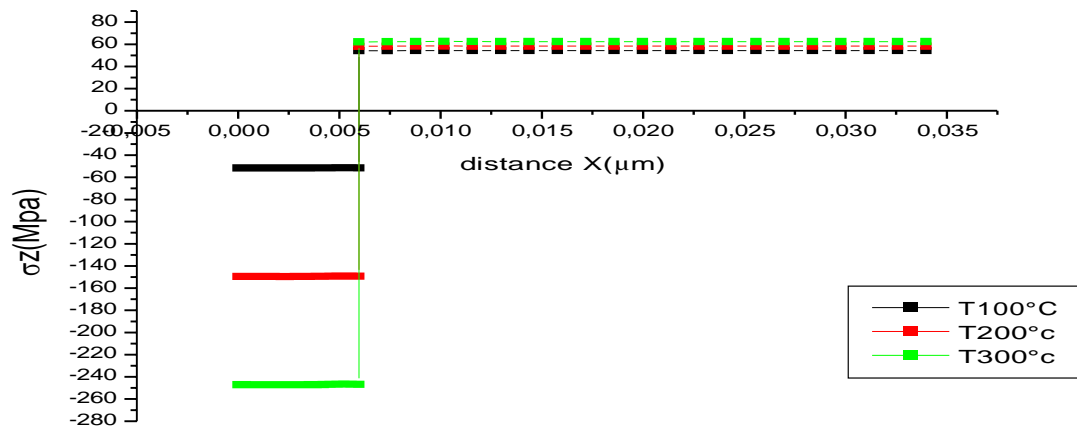
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure III.9 : Variation des contraintes de Von Mises en fonction de la distance et de la température : $P=50$ MPa

III.5. Effet des propriétés physiques des matériaux (coefficient de dilatation thermique) :

La dilatation thermique des matériaux est l'augmentation de volume d'un corps lors de l'élévation de sa température, à pression constante. Cette dilatation s'explique par l'augmentation de l'agitation thermique des particules qui constituent le corps.

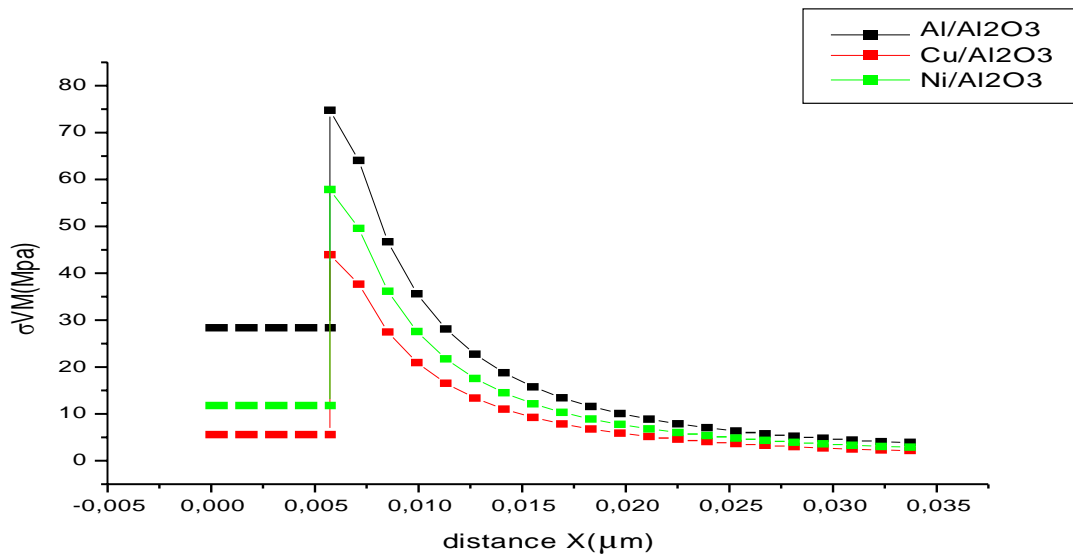
La dilatation thermique de la matrice et de la fibre joue un rôle déterminant sur le niveau et la distribution des contraintes dans ces matériaux. Pour ce faire, nous avons analysé l'effet du coefficient de dilatation thermique du métal sur l'intensité des contraintes thermiques induites dans la matrice et la fibre pour $\Delta T=100^\circ\text{C}$ et :

$$\alpha (\text{Al}) > \alpha (\text{Cu}) > \alpha (\text{Ni})$$

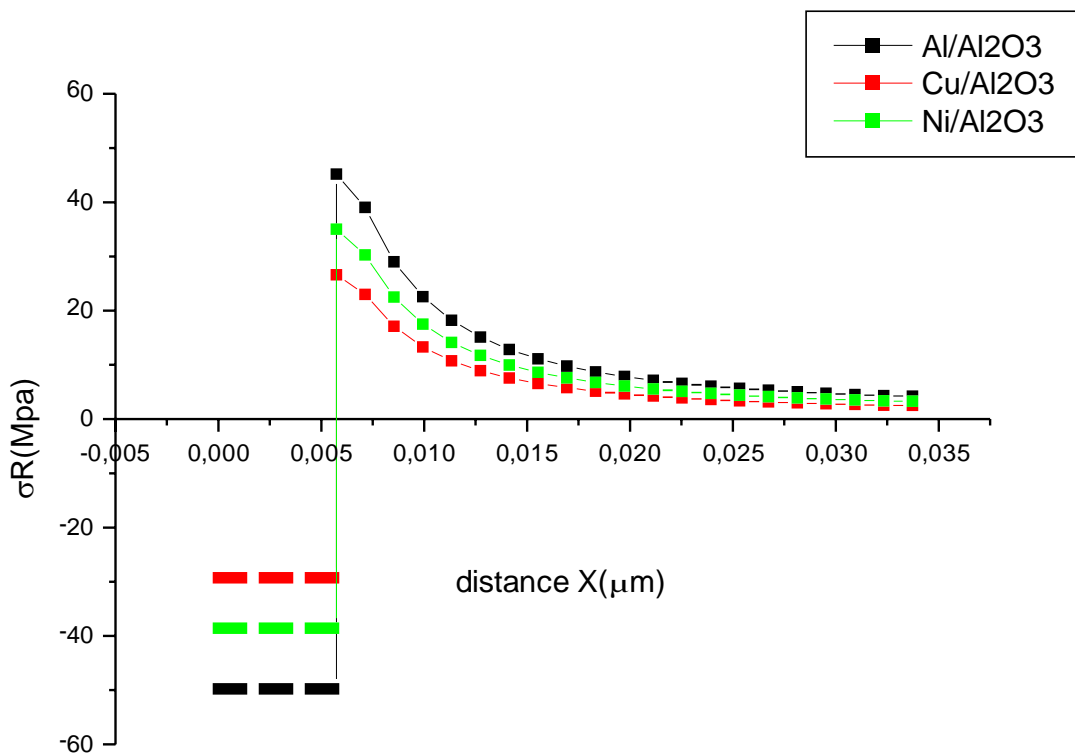
L'effet de la nature de la matrice sur les contraintes normales internes et de Von mises est représenté sur la figure **III.10**.

Les contraintes résiduelles induites dans les trois directions dans la matrice et la fibre sont d'autant plus importantes que le coefficient de dilatation thermique α est forte . Ces contraintes, de signe opposé, sollicite le métal en tension et la céramique en compression.

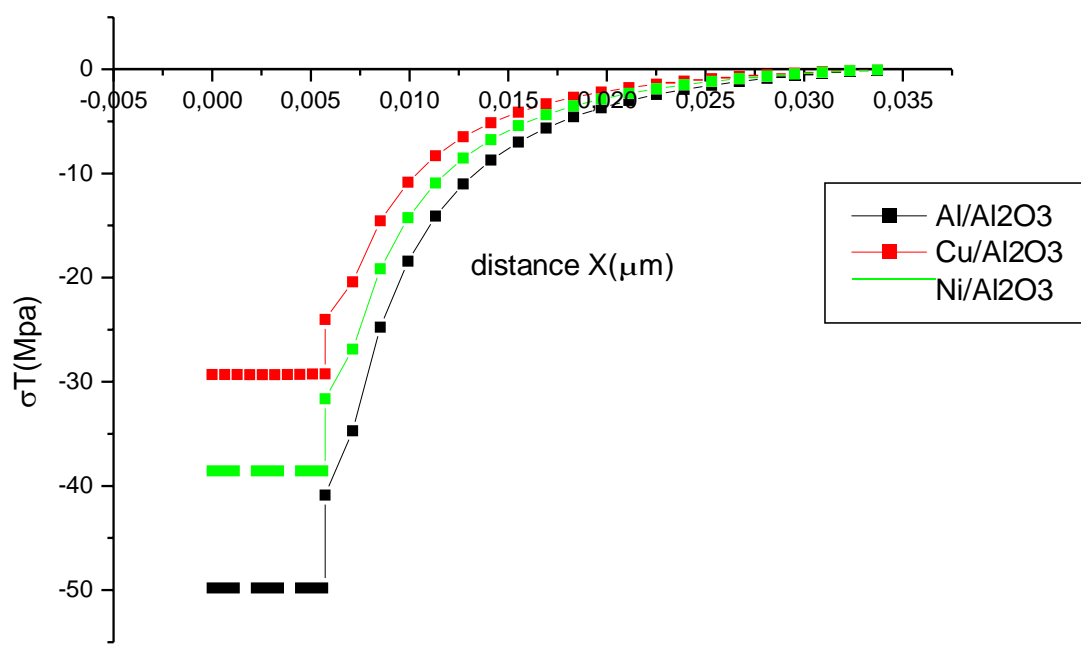
Cette figure montre clairement que les contraintes les plus fortes sont localisées à l'interface matrice / fibre.



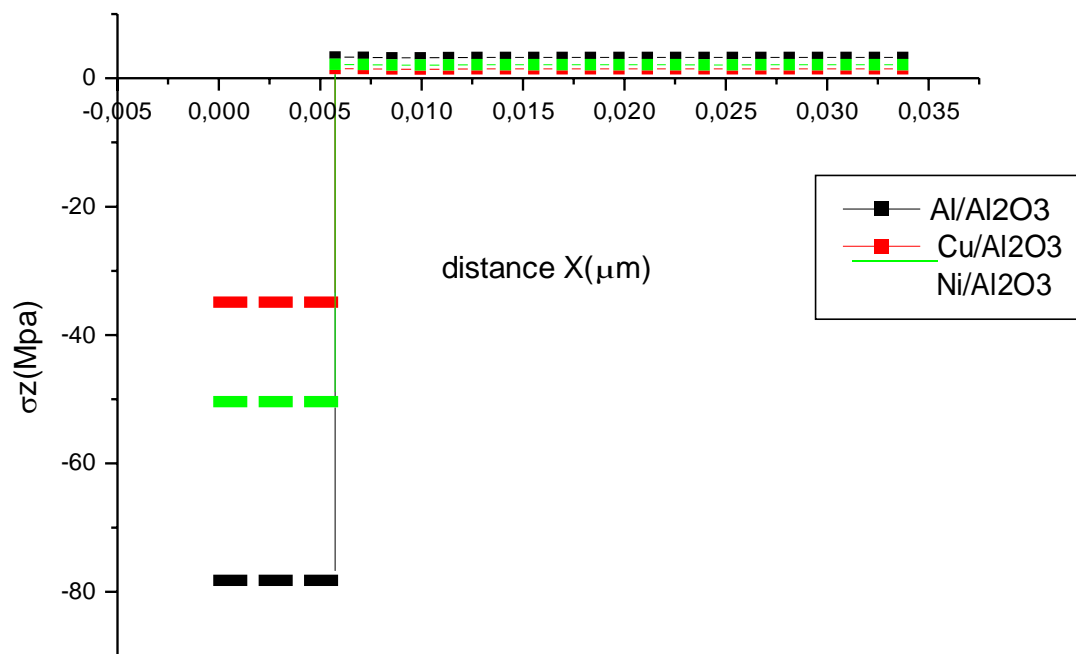
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure III. 10 : Variation des contraintes de Von Mises en fonction du coefficient de dilatation thermique de la matrice et la fibre : $T=100^\circ\text{C}$

Conclusion

Conclusion Générale

L'étude de la distribution et le niveau des contraintes résiduelles et mécanique dans les composites à matrice métallique a été abordée dans le cadre de cette mémoire. Les résultats obtenus dans cette étude nous montre que :

-L'étude numérique par la méthode des éléments finis d'effet du chargement mécanique sur le niveau et la distribution des contraintes internes d'origine mécanique a été analysée. Il montre clairement qu'un chargement plus intense induit une contrainte plus forte dans la structure composite, dont le niveau atteint son maximum à l'interface matrice/fibre.

-Le composite Al/Al₂O₃, engendre au cours de son refroidissement, des contraintes résiduelles radiales, des contraintes circonférentielles de compression et longitudinales. Une augmentation de la température d'élaboration entraîne un accroissement de l'amplitude des contraintes résiduelles. Ce comportement favorise la ruine des matériaux par rupture fragile des fibres.

- Les contraintes sont fortement localisées à l'interface métal/céramique, donc l'interface est le siège de concentration de contraintes, le niveau de ces contraintes doit être limité afin d'éviter l'endommagement de la fibre.

- Une matrice de coefficient de dilatation thermique élevé lié à la fibre induit des contraintes résiduelles plus intenses.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Berthelot J.M., Matériaux composites - Comportement mécanique et analyse des structures, Ed. Tec & Doc, Lavoisier, Paris, 2005.
- [2] D. Matériaux composites. 3^e édition. Paris : Hermès, 1991. 569 p. Hhll.D. An introduction to composite materials : combridge university press,1985.
- [3] J. Jordan, K. I. Jacob, R. Tannenbaum, M. A. Sharaf, and I. Jasiuk, "Experimental trends in polymer nanocomposites—a review," Mater. Sci. Eng. A, vol. 393, no. 1– 2, pp. 1–11, Feb. 2005.
- [4] Baroumes L. " Comportement de composites à matrice métallique: du processus de fabrication à la tenue en service " .Thèse de doctorat, Université Paris VI, 1998.
- [5] Nadia Bahlouli, Cours Composites sur le site Interne <http://www.wipst.ustrasbg.fr/cours/materiaux-composites> " .
- [6] Cherouali.H, Reynaud. P, Rouby. D, Cardinal. S, R'Mili. M & Merle. P, " Elaboration de Composites Monofilamentaires à Matrice Céamique et à Matrice Méallique" , numéro hors-serie de la Revue des Composites et des Matériaux Avancée, Vol. 7, p. 13-30, novembre 1997.
- [7] Courbiere. M." Etude des liaisons céramique-métal, application au couple cuivre alumine " . Thèse doctorat, école centrale de Lyon, 1986.
- [8] REYNE, M. Technologie des composites. 2^e édition. Paris: Hermès, 1995.190 p.
- [9] MAIRE, E. Relations entre les propriétés mécaniques statiques et la microstructure de composites à matrice métallique à renforts particuliers élaborés par OspreyTM. Thèse de doctorat : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1995. 186 p.
- [10] Bahlouli N. " Cours Matériaux Composites". DESS Mécanique avancée et Stratégie industrielle, 2000.
- [11] Cauchoisj. P." Fibres de verre de renforcement". A 2 110, Traité Plastiques et Composites,08 – 1995.
- [12] Smith. P.R and Froes. F.H "Developments in titanium metal matrix composites". Journal of Metals, 1984, vol. 36, mars, pp 19-26.
- [13] CHEVALIER, Y. Comportement élastique et viscoélastique des composites. In : Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et composites, vol. A7. Paris Techniques de l'ingénieur, 1990.
- [14] Stephen W. Tsai – Introduction to Composite Materials . A T echnomic Publishing Company book Includes index p.453. Congress Card n° 80-51965 Lancaster, Pennsylvania 17604 U.S.A 1980
- [15] VAUTHIER, E. Durabilité et vieillissement hygrothermique de composites verre-epoxy soumis à des sollicitations de fatigue. Thèse de doctorat : Ecole Centrale de Lyon, 1996. 182 p.
- [16] KHAVANDI, A. Etude de la déformation non élastique de composites unidirectionnels verre-résine époxyde : prévision du comportement mécanique (module dynamique, fluage). Thèse de doctorat : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1997. 187 p.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIES

- [17] Luyckx. J. – "Fibres de carbone ". A 2 210, Technique De L'ingénieurs, Traité Plastiques et Composites, 02 – 1994.
- [18] Stephen W. Tsai – Introduction to Composite Materials . A Technomic Publishing Company book Includes index p.453. Congress Card n° 80-51965 Lancaster, Pennsylvania 17604 U.S.A 1980
- [19] Desrumaux F., Meraghni G., Benzeggagh M.L., "Micromechanical modeling coupled to a reliability approach for damage evolution prediction in composite materials", Appl. Comp. Mater., vol. 7, pp. 231-250, 2000.
- [20] D. TREHEUX, P. LOURDIN, and D. JUVE, J.Phys, vol. 3, no. 4, pp. 1883-1898, 1994.
- [21] A. EVANS, M. RUHLE, B. DALGLEISH, and CHARALAMBIDES, J.Mater.Sci and Eng, vol. A126, pp. 53-64, 1990.
- [22] V. GUIPONT, "Déterminations expérimentales de contraintes résiduelles au sein d'assemblages céramique/métal réalisés par brasage: Application au couple nitrure de silicium/acier doux," Ecole Centrale de Lyon, Lyon, Thèse de doctorat 1994.
- [23] A. E1426-94, Standard test method for determining the effective elastic parameter for X-ray measurements of residual stress., 1994.
- [24] W. REIMERS and R. DUPKE, "Colloque contraintes résiduelles," in Current and future activities in residual stress analysis by diffraction methods in HMI, Portugal, 1992, pp.1-23
- [25] E. WELLE and W. REIMERS, "International conference on residual stresses," in Investigations of residual stress states in brazed meta/ceramic compound, USA, 1994, pp. 8-10.
- [26] J. CHASKALOVIC, Méthode par éléments finis pour les sciences de l'ingénieur. Ed. Lavoisier ISBN, 2004.
- [27] M. NICHOLAS and R. CRISPIN, Proc.Brit.Ceram.Soc, vol. 32, pp. 33-40, 1982.
- [28] K. SAGANUMA, T. OKAMOTO, M. KOIZUMI, and M. SHIMADA, J.Mater.Sci, pp.648-650, 1985.
- [29] K. SUGANUMA, T. OKMATO, M. KOIZUMI, and M. SHIMADA, J.Amer. Ceram. Soc, 1983.
- [30] K. SUGANUMA, T. OKMATO, M. KOIZUMI, and M. SHIMADA, J.Amer. Ceram. Soc, pp. 256-257, 1984.
- [31] K. SUGANUMA, T. OKMATO, M. KOIZUMI, and M. SHIMADA, J.Amer. Ceram. Soc, pp. 648-650, 1985.
- [32] ABAQUS, User's Manual, 6.13, Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc.F.
- [33] Choo H., Bourke A.M., Nash P.G., «Evolution of thermal residual stress in intermetallic matrix composites during heating», Ceramic Engineering & Science Proc, Acers, vol.21(3), p. 627-634, 2000.