

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



**Université Saad Dahleb Blida 1**  
**Faculté des Sciences et Technologies**  
**Département de mécanique**

Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du Diplôme de Master en  
**Génie des matériaux**

**Thème :**

**Analyse numérique du comportement de fissures dans  
Un bimatériau métal-céramique.**

Réaliser par :  
**CHKAIMI Yacine**  
**ZOUAOUI Isaam**

Encadré par :  
**Dr. RAMDOUM Sara**

**Promotion : 2022/2023**

## Remerciement

Tout d'abord, je remerciai ALLAH de m'avoir offert l'opportunité de faire des études supérieures, de m'avoir guidé à cette spécialité et de m'avoir donné tout ce dont j'ai besoin pour mener ce travail à bon escient.

Avec un cœur rempli de gratitude et de joie, j'écris ces mots afin de montrer du plus que je peux mes reconnaissances envers les personnes qui ont participé de près ou de loin, à l'élaboration de ce travail en particulier, et en général à tous ceux qui ont fait partie de mon parcours éducatifs.

Je tiens à remercier en premier lieu mon encadreur **Dr. RAMDOUM Sara** qui a bien voulu nous superviser, son grand appui au long de ce travail, autant technique que moral, nous a permis de concrétiser ce mémoire.

Je n'oublie pas de remercier **le président du jury** qui a accepté d'examiner ce travail et **les membres** qui a bien voulu juger ce travail et les enseignants de Département Génie mécanique, en particulier ceux de la spécialité science des matériaux, qui nous ont fourni les outils nécessaires à la réussite de nos études universitaires. Merci pour la qualité des connaissances transmises, merci pour leurs patiences.

Ensuite je remercie chaleureusement mes collègues d'études et tous les gens que je côtoyés à l'université de Saad Dahleb. Merci pour cette belle aventure.

Dernier remerciement, mais non des moindres vient du fond du cœur, en premier, à mes **chers parents et mon frère**, merci pour vous de m'avoir éduqué et d'avoir fait de moi d'hommes que je suis aujourd'hui. Quoi que je fasse ne me saurais vous rendre vos sacrifices pour moi.

Et en second lieu, merci à toutes ma famille, mes amis et tous les gens qui m'aime pour leurs encouragements, leur amour, leur confiance, leur soutien inconditionnel et surtout pour leur présence dans ma vie.

**CHKAIMI Yacine**

## Remerciement

C'est avec un grand plaisir que je réserve ces quelques lignes en signe de gratitude et de profonde reconnaissance à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation et l'aboutissement de ce travail.

Je tiens tout d'abord à remercier **Dr. RAMDOUM Sara** pour son soutien, son sérieux sa gentillesse et surtout pour son aide précieuse tout au long de l'élaboration de ce travail

Mes remerciements au le président de jury, Et aussi bien sur aux membres de jury

Mes remerciements à mes très **chers parents** de m'avoir toujours donné le courage et d'être l'une des raisons qui me pousse à me battre face à chaque obstacle.

Je m'acquitte, enfin, volontiers d'un devoir de gratitude et de remerciements à tous mes enseignants pour la qualité de l'enseignement qu'ils ont bien voulu me prodiguer durant mes études afin de me fournir une formation efficiente.

**ZOUAOUI Issam**

## Résumé

Ce travail est dédié à l'étude numérique tridimensionnelle du comportement de la fissuration du bimatérial Alliage d'Aluminium 6061/SiC (Carbure de silicium). La méthode des éléments finis a été retenue et des simulations numériques ont été réalisées à l'aide du code de calcul ABAQUS. Les propriétés mécaniques telles que le module de Young, le coefficient de Poisson et le coefficient de dilatation thermique ont été prises en compte lors de l'étude, Cette étude est appliquée à quatre différents effets tel que l'effet du chargement mécanique, l'orientation de la fissure, la taille de la fissure et enfin effet de chargement thermomécanique. Pour déterminer le facteur d'intensité de contrainte KI, KII et KIII en différents modes pour des différents chargements.

**Mots clé :** Facteur d'intensité de contrainte, Abaqus, fissure, bimatérial, MEF

## Abstract

This work is dedicated to the three-dimensional numerical study of the cracking behavior of the bimaterial Aluminum Alloy 6061/SiC (Silicon Carbide). The finite element method was chosen and numerical simulations were carried out using the ABAQUS calculation code. Mechanical properties such as Young's modulus, Poisson's ratio and coefficient of thermal expansion were taken into account during the study. This study is applied to four different effects such as the effect of mechanical loading, crack orientation, crack size and finally the effect of thermomechanical loading. To determine the stress intensity factor KI, KII and KIII in different modes for different loadings.

**Key words:** Stress intensity factor, Abaqus, crack, bimaterial, FEM

## ملخص

هذا العمل مخصص للدراسة العددية ثلاثية الابعاد لسلوك التكسير لثنائية المادة سبائك الالومنيوم 6061/ كربيد السيليكون. تم اختيار طريقة العناصر المحدودة وأجريت عمليات محاكاة عددية باستخدام كود حساب أباكوس. يجب أن تأخذ الخواص الميكانيكية مثل معامل يونج، نسبة بواسون ومعامل التمدد الحراري في الاعتبار أثناء الدراسة. تم تطبيق هذه الدراسة على أربع تأثيرات مختلفة مثل تأثير التحميل الميكانيكي، اتجاه الشق، حجم الشق وأخيرا تأثير التحميل الحراري الميكانيكي، لتحديد عامل شدة الاجهاد في أوضاع مختلفة على أحمال مختلفة.

**الكلمات الدالة:** عامل شدة الاجهاد، أباكوس، صدع، ثنائي المادة.

## Sommaire

Introduction générale .....	10
<b>Chapitre01 : Généralité sur les bimatériaux.</b>	
<b>I.1</b> Introduction .....	12
<b>I.2</b> Définition d'un bimatériau .....	12
<b>I.3</b> Elaboration des bimatériaux .....	13
<b>I.3.1</b> Métallurgie des poudres .....	13
<b>I.3.1.1</b> Procédés d'obtention des poudres : .....	14
<b>I.3.1.2</b> Mise en forme .....	15
<b>I.3.1.3</b> Frittage.....	15
<b>I.3.2</b> Assemblage des matériaux (métal-céramique) .....	18
<b>I.3.2.1</b> L'assemblage par soudage diffusion .....	18
<b>I.3.2.2</b> L'assemblage par soudage laser céramique-métal.....	20
<b>I.3.2.3</b> L'assemblage par thermocompression .....	20
<b>I.4</b> Propriétés des matériaux métallique et céramique.....	21
<b>I.4.1</b> Propriétés des matériaux métalliques .....	21
<b>I.4.1.1</b> L'essai de traction .....	22
<b>I.4.1.2</b> Déformation élastique. Élasticité .....	24
<b>I.4.1.3</b> Résistance à la fatigue .....	24
<b>I.4.1.4</b> La conductivité thermique .....	24
<b>I.4.2</b> Propriétés des céramiques : .....	25
<b>I.4.2.1</b> Coefficient de dilatation thermique : .....	25
<b>I.4.2.2</b> Conductivité thermique : .....	25
<b>I.4.2.3</b> Module de Young.....	26
<b>I.4.3</b> Les domaines d'application pour les assemblages métal-céramique .....	26
<b>Chapitre 02 : Les contraintes résiduelle dans les bimatériaux.</b>	
<b>II.1</b> Introduction .....	28
<b>II.2</b> Définition des contraintes résiduelles .....	30
<b>II.3</b> Origine des contraintes résiduelles .....	30
<b>II.4</b> Méthodes de détections les contraintes résiduelles .....	31
<b>II.4.1</b> Technique diffractométries (DRX) .....	32
<b>II.4.3</b> Méthodes numériques.....	33
<b>II.6</b> Conséquences des contraintes résiduelles .....	36
<b>II.7</b> Solutions pour diminuer les contraintes résiduelles .....	37

# Sommaire

## Chapitre 03 : La rupture des bimatériaux.

III.1 Introduction.....	39
III.2 La rupture des bimatériaux .....	39
III.3 Interaction fissure-interface .....	40
III.3.1 Fissure dans le plan de l'interface .....	41
III.3.2 Fissure perpendiculaire ou incliné au plan de l'interface.....	42
III.3.3 Fissure parallèle à l'interface .....	43

## Chapitre 04 : Analyse numérique Résultats et discussion.

IV.1 Introduction.....	46
IV.2 Modèle géométrique étudié .....	46
IV.2.2 Modélisation par élément finis .....	47
IV.2.2.1 Définition de code de calcul Abaqus .....	48
IV.2.2.2 Réalisation d'un modèle par simulation numérique.....	48
IV.3 Résultats et discussions .....	50
IV.3.1 Effet de chargement mécanique (traction) .....	51
IV.3.2 Effet de la taille de la fissure .....	52
IV.3.3 Etude de l'orientation de la fissure .....	54
IV.3.4 Effet de chargement thermomécanique.....	59
Conclusion Générale .....	61

## Liste des figures

### Chapitre I : Généralité sur les bimatériaux.

<b>Figure I. 1:</b> Les différents processus de la métallurgie des poudres. ....	14
<b>Figure I. 2:</b> Technique d'atomisation. ....	15
<b>Figure I. 3:</b> Représentation schématique des mécanismes de frittage pour un système de deux particules. ....	16
<b>Figure I. 4:</b> Évolution schématique d'une poudre compacte pendant le frittage en phase liquide. Les trois étapes dominantes se chevauchent de manière significative. ....	17
<b>Figure I. 5:</b> Séquence des événements pendant le collage par diffusion métal-céramique. ....	19
<b>Figure I. 6:</b> Les différents mécanismes de diffusion. ....	20
<b>Figure I. 7:</b> Schéma du principe du processus de soudage au laser. ....	20
<b>Figure I. 8:</b> Représentation schématique d'un assemblage métal/céramique réalisé dans un four-presse de thermocompression. ....	21
<b>Figure I. 9:</b> Courbes de traction nominale et rationnelle. ....	23
<b>Figure I. 10:</b> Apparition d'une zone de déformation plastique dans un matériau ductile ou partiellement ductile. ....	24

### Chapitre II : Les contraintes résiduelle dans les bimatériaux.

<b>Figure II. 1:</b> Superposition des contraintes de types I, II et III dans un domaine couvrant plusieurs grains. ....	29
<b>Figure II. 2:</b> Schéma triangulaire d'interaction thermique - métallurgie - mécanique en genèse des contraintes résiduelles. ....	31
<b>Figure II. 3:</b> a) Schéma de l'expérience DRX, b) Schéma de diffraction bidimensionnel enregistré dans le détecteur. Les anneaux d'intensité présentent des diffractions provenant de différents plans de réseau du cristal. ....	32
<b>Figure II. 4:</b> Schéma explicatif de la méthode de détermination des contraintes résiduelles par indentation Vickers. ....	33
<b>Figure II. 5:</b> Cartographie des contraintes résiduelles d'origine thermique obtenues par éléments finis. ....	34
<b>Figure II. 6:</b> Évolution de la tenue en traction d'un assemblage Ni <sub>3</sub> Si/acier en fonction du coefficient de dilatation du matériau composant une couche intermédiaire de 1.5 mm de différents métaux. ....	38

### Chapitre III : La rupture des bimatériaux.

<b>Figure III. 1:</b> Fissure dans un milieu continu. ....	39
--	----

## Liste des figures

<b>Figure III. 2:</b> Les trois modes de ruptures. ....	40
<b>Figure III. 3:</b> Fissure dans le plan de l'interface.....	41
<b>Figure III. 4:</b> a) fissure n'ayant pas atteint l'interface – b) fissure au droit de l'interface –c) fissure ayant traversé l'interface. ....	43
<b>Figure III. 5:</b> Fissure subinterfaciale au sein d'un bimatériau.....	44
<b>Chapitre IV : Analyse et résultats.</b>	
<b>Figure IV. 1:</b> Modèle tridimensionnelle étudié.....	46
<b>Figure IV. 2:</b> L'interface principale d'Abaqus. ....	49
<b>Figure IV. 3:</b> Maillage 3D de l'assemblage Al6061/SiC. ....	50
<b>Figure IV. 4:</b> Le maillage autour le fissure.....	50
<b>Figure IV. 5:</b> le bimatériaux Al6061/SiC avec une fissure de 4 $\mu\text{m}$ exposé à un chargement de traction.....	51
<b>Figure IV. 6:</b> Variation de KI en fonction de chargement mécanique (traction).....	52
<b>Figure IV. 7:</b> Variation de KI en fonction des tailles des fissures. ....	53
<b>Figure IV. 8:</b> Fissure de 4 $\mu\text{m}$ perpendiculaire à l'interface.....	54
<b>Figure IV. 9:</b> Fissure inclinée de 4 $\mu\text{m}$ . ....	55
<b>Figure IV. 10:</b> Fissure de 4 $\mu\text{m}$ parallèle par rapport à l'interface. ....	56
<b>Figure IV. 11:</b> La variation de KI en fonction de l'orientation de la fissure. ....	57
<b>Figure IV. 12:</b> la variation de KII en fonction de l'orientation de la fissure. ....	58
<b>Figure IV. 13:</b> La variation de KIII en fonction de l'orientation de la fissure. ....	59
<b>Figure IV. 14:</b> La variation de KI en fonction de chargement thermomécanique (Traction $\sigma=50\text{Mpa}$ ).....	60

## Liste des tableaux

### Chapitre I :

**Tableau I. 1:** Modules spécifiques : comparaison entre les céramiques et métaux. ....26

### Chapitre II :

**Tableau II. 1:** : Principales origines des contraintes résiduelles de premier ordre. ....31

**Tableau II. 2:** Principales méthodes de mesure des contraintes résiduelles.....35

### Chapitre IV :

**Tableau IV. 1:** Composition chimique de l'alliage Al 6061. ....47

## Introduction générale

Les bimatériaux sont des matériaux composés de deux matériaux distincts ayant des propriétés physiques et mécaniques différentes. Ces matériaux présentent une importance considérable dans l'industrie moderne car ils offrent des propriétés supérieures à celles d'un matériau homogène, Les domaines d'utilisation des bimatériaux sont larges et variés, allant de l'aéronautique à la médecine en passant par l'électronique et les revêtements, etc.

Les bimatériaux offrent une variété d'avantages, notamment leur capacité à combiner différentes propriétés telles que la résistance, la conductivité thermique, la conductivité électrique, la résistance à la corrosion et la résistance aux intempéries.

Cependant, les bimatériaux peuvent également présenter des défauts tels que des contraintes résiduelles et des fissures qui peuvent compromettre leur résistance structurelle, et le comportement des fissures dans les bimatériaux est l'un des aspects les plus importants à comprendre pour garantir leur intégrité structurelle. En effet, les fissures peuvent se propager dans les différentes couches du bimatériau de manière différente, ce qui peut entraîner des contraintes et des contraintes résiduelles qui se produisent lorsque les deux matériaux ont des coefficients de dilatation thermique différents, L'interface entre les deux matériaux est un autre facteur important à considérer car elle peut avoir une influence significative sur les propriétés du bimatériau.

Pour évaluer la résistance structurelle des bimatériaux, il est important de comprendre le facteur d'intensité des contraintes (KIC), qui mesure la résistance à la propagation des fissures. La relation entre le facteur d'intensité des contraintes et les fissures est cruciale pour évaluer la durabilité des bimatériaux.

En somme, les bimatériaux offrent des avantages considérables dans de nombreux domaines, mais leur utilisation nécessite une compréhension approfondie des contraintes résiduelles, des fissures, de l'interface des matériaux, et du facteur d'intensité des contraintes.

C'est pourquoi notre étude se concentrera sur l'analyse du comportement des fissures dans les bimatériaux et pour décrire cette démarche, ce mémoire comporte quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre nous présenterons des généralités sur les bimatériaux tels que l'élaboration des bimatériaux, les propriétés des matériaux métallique et céramique parce que notre étude consiste à un assemblage d'un métal alliage d'aluminium 6061 et une céramique carbure de silicium SiC.

- Le second chapitre portera sur les contraintes résiduelles dans ces bimatériaux.
- Le troisième chapitre est consacré pour la rupture des bimatériaux.
- Quant au quatrième chapitre, et à l'aide de logiciel ABAQUS nous avons fait une analyse numérique sur le comportement des fissures dans l'assemblage Al6061/SiC en déduisant le facteur d'intensité des contraintes, exposons le modèle a des charges de traction pour déduire le comportement de ces fissures.

**Chapitre I**  
**Généralité sur les bimatériaux.**

## Chapitre I : Généralité sur les bimatériaux.

### I.1 Introduction :

Les ingénieurs disposent de plus de 50 000 matériaux pour concevoir et fabriquer des produits destinés à diverses applications. Ces matériaux vont des matériaux ordinaires, disponibles depuis plusieurs centaines d'années, mais certain domaine besoin des nouveau matériaux, matériaux avancés, développés plus récemment (par exemple, **les composites, les céramiques** et les **aciers à haute performance**). En raison du large choix de matériaux, les ingénieurs d'aujourd'hui sont confrontés à un défi de taille : choisir le bon matériau et le bon procédé de fabrication pour une application donnée. Il est difficile d'étudier tous ces matériaux individuellement ; par conséquent, une classification générale est nécessaire pour simplifier et caractériser les matériaux

Et parmi ces nouveaux matériaux on a les bimatériaux, un bimatériau est défini comme un solide dans lequel au moins deux composants sont combinés pour obtenir un ensemble de propriétés originales qui ne peuvent être obtenues en utilisant ces composants seuls et pour être plus spécifique les combinaison métal céramique à cause des propriétés des matériaux métallique et céramique, Ils ont l'avantage de présenter une excellente combinaison de propriétés, résultant de l'association de leurs constituants, telles que l'amélioration des caractéristiques mécaniques à hautes températures, une densité réduite, une bonne résistance à La corrosion, une rigidité améliorée, un coefficient d'expansion thermique contrôlé, une amélioration des performances électriques et l'amélioration des capacités d'amortissement [1,2]

Dans ce chapitre on va voir des généralités dans les bimatériaux comme les méthodes d'élaboration des bimatériaux, les propriétés des matériaux métallique et céramique parce que notre étude numérique dans cette thèse traitée un bimatériaux composer **d'alliage d'aluminium 6061** et **Carbure de silicium (SiC)** et finalement l'assemblage entre un métal avec une céramique.

### I.2 Définition d'un bimatériau :

Un bimatériau est constitué d'une combinaison de deux matériaux de nature différente. Ils se complètent et le résultat est un matériau hétérogène dont les performances globales sont meilleures que celles des composants individuels. Le principal avantage de l'utilisation de matériaux composites réside dans leurs excellentes propriétés. Ils ont un avantage significatif sur les matériaux traditionnels.

## Chapitre I : Généralité sur les bimatériaux.

### I.3 Elaboration des bimatériaux :

Actuellement, dans la recherche de nouveaux matériaux répondant mieux aux exigences techniques nous rencontrons très souvent des incompatibilités qui font qu'il n'existe pas de solution monolithique adaptée. Pour pallier ce manque, il a fallu concevoir de nouveaux matériaux à partir de ceux existants et donner vie à des solutions bi-matières. Et parmi les problèmes que le concepteur rencontre, notamment techniques, notamment des problèmes liés à l'apparition de contraintes au niveau d'interface du contact entre matériaux.

#### I.3.1 Métallurgie des poudres :

La technologie d'aujourd'hui se doit d'être écologique et économique, par une réduction de la consommation d'énergie et des matières premières. L'élaboration de pièces bimatériaux par métallurgie des poudres est une des techniques pour atteindre cet objectif. Les pièces bimatériaux, c'est-à-dire des pièces composées de deux matériaux, peuvent répondre à différentes exigences fonctionnelles mécaniques ou physico-chimiques. Par exemple, **l'alliage d'aluminium 6061** et le **Carbure de silicium (SiC)**.

La réalisation classique de ce type de matériau passe généralement par plusieurs étapes de fabrication : l'élaboration des deux matériaux, l'assemblage, l'usinage... L'utilisation de la métallurgie des poudres permet de diminuer les temps et les coûts d'usinage. Les pièces peuvent ainsi être fabriquées en quelques étapes : Co-compression des poudres dans la forme souhaitée, cofrittage puis rectification des pièces. Série de processus technologiques qui permettent la production d'éléments façonnés spécifié par poudre (métallique, céramique ou composite) qui La granulométrie et la structure du sont contrôlées, d'abord la forme L'élément est guidé à travers la forme avec possibilité de décapage. Deuxième processus, divers paramètres sont impliqués, tels que la vitesse, température, liant. Le composant obtenu est densifié par frittage au four. Élément terminal ainsi réalisé la forme, les tolérances dimensionnelles et les propriétés mécaniques souhaitées.

La métallurgie des poudres peut être caractérisée par les trois mots clés suivants : poudre, pression et température [3].

Les étapes d'élaborer un bimatériau comme suivantes (Figure I.1) :

## Chapitre I : Généralité sur les bimatériaux.

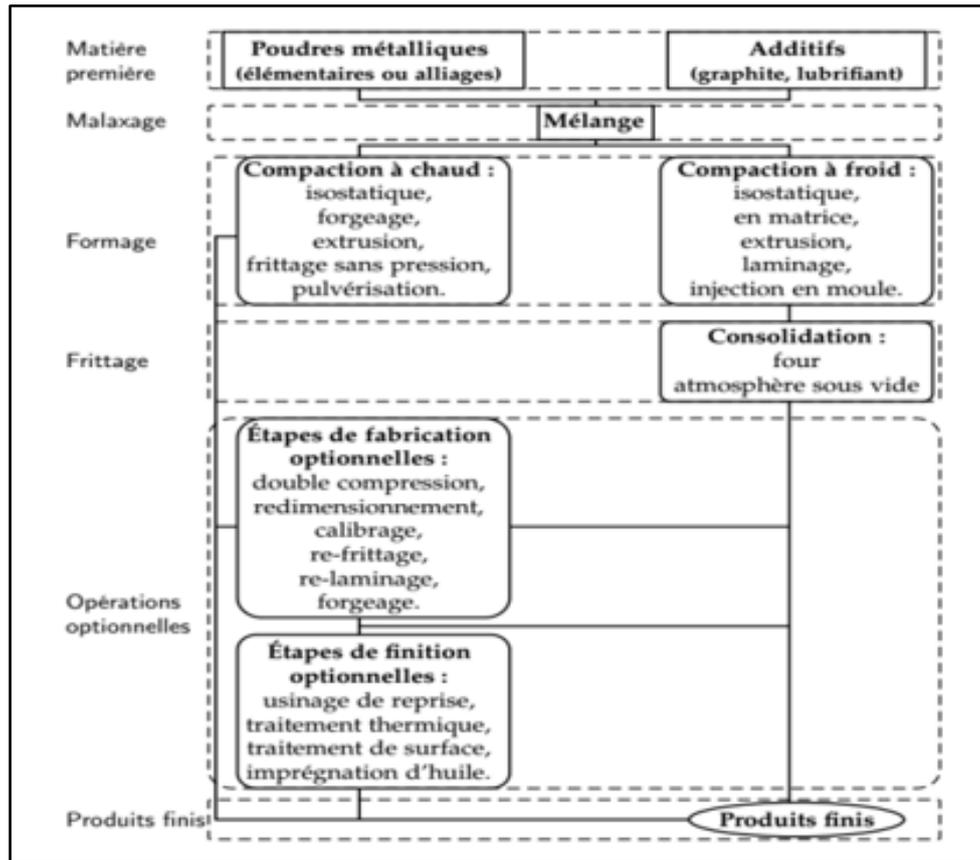


Figure I. 1: Les différents processus de la métallurgie des poudres. [3]

### I.3.1.1 Procédés d'obtention des poudres :

Une poudre peut être définie comme un ensemble de particules dont les dimensions sont généralement inférieures à 1 mm, Différentes techniques sont utilisées pour l'élaboration des poudres métalliques, trois grandes catégories sont appelées "procédés mécaniques, chimiques et d'atomisation" [4].

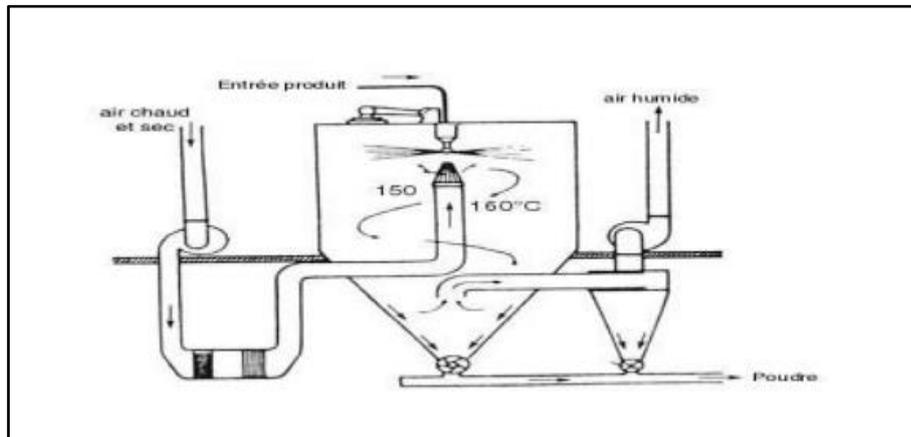
En général, le choix du procédé dépend du type de métal, des propriétés de la poudre, des coûts de fabrication et du domaine d'application.

Pour l'élaboration d'un bimatériaux par la méthode de métallurgie des poudres il faut d'abord la production de cette matière première que l'on compact par différentes méthodes, Ensuite il existe 3 méthodes de fabrication des poudres **mécanique**, **physique** et **chimique**.

En coté mécanique on a le **broyage** et **mécano synthèse** comme des techniques couramment utilisés, L'opération de broyage est la synthèse de plusieurs phénomènes telle la fracturation, la déformation et le soudage à froid [5].

## Chapitre I : Généralité sur les bimatériaux.

On aussi les techniques physiques, se réfèrent essentiellement au procédé d'atomisation (Figure I.2)



**Figure I. 2:** Technique d'atomisation. [5]

Et ce qu'il concerne les techniques chimiques, il existe beaucoup des méthodes de préparation des poudres, comme la réduction qu'est la méthode de production chimique la plus employée, et l'électrolyse qui consiste une réduction dans laquelle un ion métallique contenu dans une solution liquide du sel ou dans sel fondu (électrolyse ignée) du métal désiré [6].

### **I.3.1.2 Mise en forme :**

Le but principal de cette étape est d'amener la poudre à la forme cible de la pièce finale. Cette étape consiste généralement à compacter la poudre, généralement à température ambiante. Les techniques de pressage à froid les plus couramment utilisées sont : le pressage isostatique, le pressage uni axial, le moulage par injection, l'extrusion. En fin de mise en forme, la pièce dite "partie verte" présente une certaine densité, dite densité verte, mais reste encore très fragile mécaniquement. Il se compose uniquement de particules de poudre agglomérées maintenues ensemble par des liaisons mécaniques uniquement. Sa résistance mécanique (appelée résistance à cru) est juste suffisante pour permettre sa manipulation]. C'est pourquoi il faut entrer dans l'étape de frittage [7].

### **I.3.1.3 Frittage :**

Le frittage Est une opération de traitement thermique qui consiste à la consolidation des particules (les grains des poudres se soudent entre eux) des poudres sans atteindre la température de fusion de l'un des constituant qui peut être accompagné avec pression, pour le but d'avoir une densité presque égale à la densité théorique [7].

Et il existe 2 types de mécanismes de frittage

## Chapitre I : Généralité sur les bimatériaux.

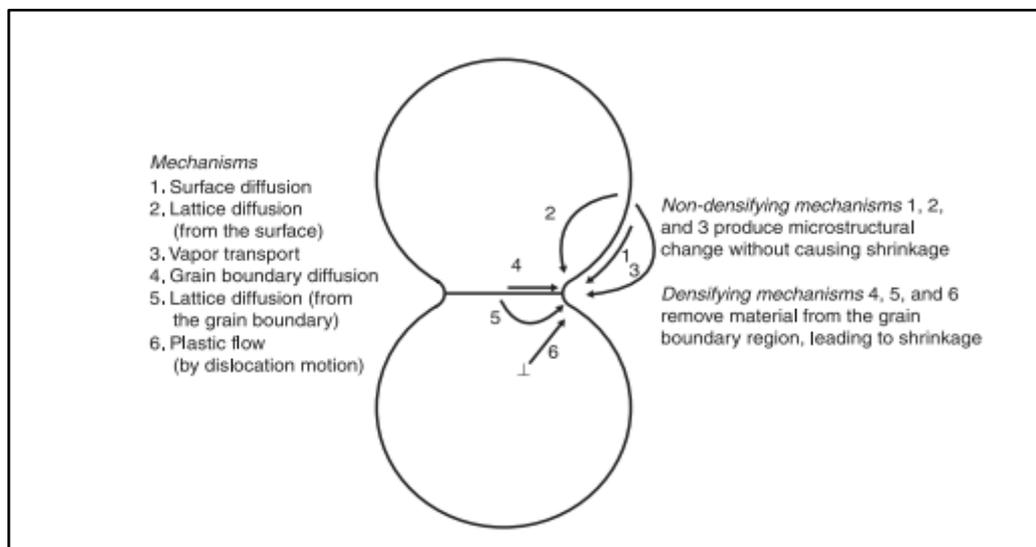
- **Frittage en phase solide :**

Le frittage des matériaux cristallins peut se produire par au moins six mécanismes ou voies :

Transport de vapeur (évaporation/condensation), diffusion de surface, diffusion de réseau (volume), la diffusion aux joints de grains et écoulement plastique. (Volume), La Figure I.3 montre une représentation schématique des voies de transport de matière pour deux particules de frittage.

Une distinction est communément faite entre les mécanismes densifiant et non densifiant. Le transport de vapeur, la diffusion de surface et la diffusion de réseau des surfaces des particules vers le col. Conduisent à la croissance du col et à l'augmentation de la taille des particules sans densification.

Les mécanismes de densification, la diffusion à la limite des grains, la diffusion du réseau de grains vers le col et l'écoulement plastique provoquent une croissance du col ainsi qu'une densification (retrait). Lorsque les mécanismes non densifiant dominant, le grossissement conduit à la production d'un article poreux, tandis qu'un article dense est favorisé dans des conditions où les mécanismes de densification dominant.[8]



**Figure I. 3:** Représentation schématique des mécanismes de frittage pour un système de deux particules.[8]

La diffusion aux joints de grains et la diffusion dans le réseau sont des mécanismes importants de densification dans les métaux et les céramiques. L'écoulement plastique, par le mouvement des dislocations en réponse à la contrainte de frittage, ne joue pratiquement aucun rôle dans le frittage des céramiques en raison de la faible densité de dislocations. L'apparition

## Chapitre I : Généralité sur les bimatériaux.

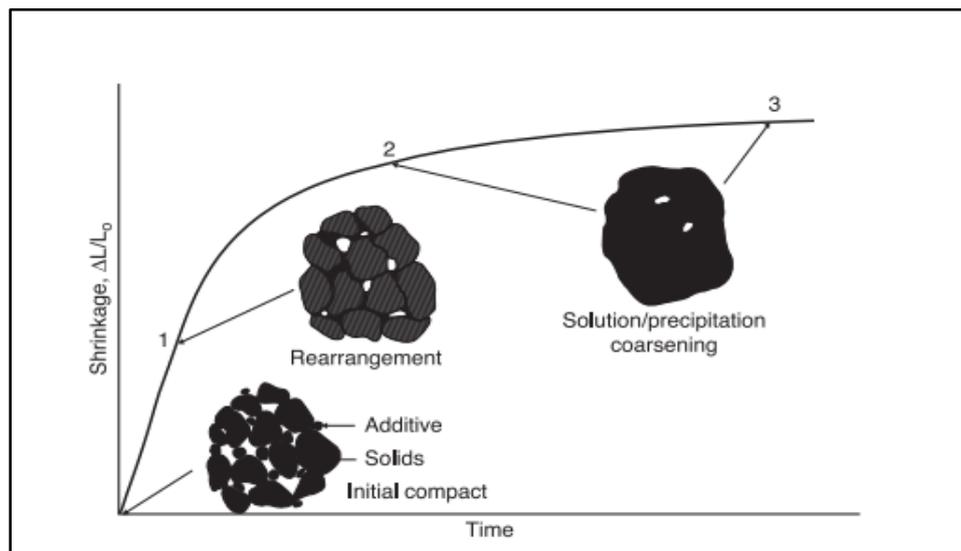
d'un écoulement plastique pendant le frittage des métaux est controversée, mais il est très probable que les dislocations participent à la phase initiale du frittage. L'analyse par éléments finis [9] et des expériences ([10] ; [11]) indiquent que l'écoulement plastique par le mouvement des dislocations est inactif dans le cas d'un frittage. Par le mouvement des dislocations est inactif dans les phases intermédiaires et finales du frittage.

- **Frittage en phase liquide :**

Dans de nombreux procédés de frittage, une phase liquide est couramment utilisée pour améliorer la densification, abaisser la température de frittage, accélérer la croissance des grains ou produire des propriétés spécifiques des joints de grains. Après la formation et la redistribution du liquide, le frittage en phase liquide est généralement considéré comme se déroulant selon une séquence d'étapes dominantes qui se chevauchent (Figure I.4) :

1. Réarrangement de la phase solide sous l'effet des gradients de contrainte capillaire.
2. Densification et adaptation de la forme des grains de la phase solide par précipitation en solution.
3. Densification au stade final sous l'effet de la porosité résiduelle dans la phase liquide, dans laquelle le mûrissement d'Ostwald domine l'évolution de la microstructure.

Malgré l'utilisation de plusieurs approches théoriques et expérimentales ([12] ; [13]), l'analyse du réarrangement dans un réseau de particules disposées de manière aléatoire est un problème difficile, et la compréhension du processus dans les systèmes réels est limitée.



**Figure I. 4:** Évolution schématique d'une poudre compacte pendant le frittage en phase liquide. Les trois étapes dominantes se chevauchent de manière significative. [12]

## **Chapitre I : Généralité sur les bimatériaux.**

### **I.3.2 Assemblage des matériaux (métal-céramique) :**

L'utilisation des céramiques a vu ces dernières années un développement particulier compte tenu de leur large champ d'application dans divers domaines. Elles présentent plusieurs avantages, à savoir :

- La réfractarité qui leur permet de se hisser au premier rang dans le domaine de la thermique et de la thermomécanique,
- Leur grande résistance à l'usure,
- Leur bonne résistance à la corrosion,
- Leur stabilité chimique,
- Leur faible dilatation thermique.

En revanche, leur grande fragilité a toujours limité leur utilisation. C'est pour cette raison, et aussi compte tenu de leurs propriétés souvent opposées aux métaux, que les liaisons métal-céramique sont souvent utilisées pour étendre leur domaine d'application.

Les avantages technologiques et industriels apportés par combinaison des matériaux céramiques et métalliques ont conduit à de nombreuses recherches sur le mécanisme de liaison métal/céramique [14,15,16]. Si l'on considère que les procédés techniques de finition sont assez bien maîtrisés à l'heure actuelle, les phénomènes qui en découlent lors de la formation du collage ne sont pas encore totalement compris et appréhendés.

L'assemblage des métaux massifs avec des céramiques massives reste toujours un problème d'actualité. Il est en effet relativement délicat de créer des liaisons entre des matériaux aux propriétés si différentes. Cependant, tout un éventail de techniques est proposé dans la littérature [17,18,19,20,21]. Ceci confère souvent à cette technologie un caractère empirique.

Les principales techniques de liaison métal/céramique sont les suivantes :

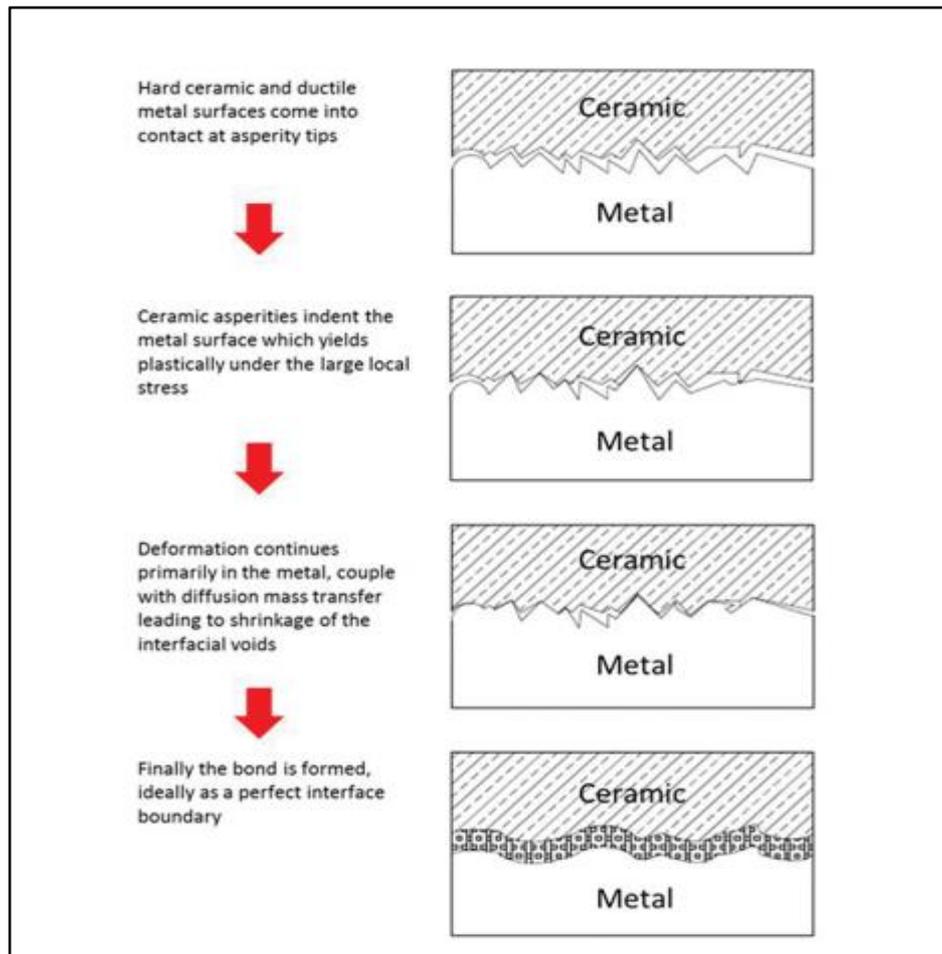
- L'assemblage par soudage diffusion.
- L'assemblage par thermo compression.
- L'assemblage par soudage laser céramique-métal.

Donc, on peut dire que l'élaboration d'un bimatériaux basé sur la réduction des contraintes résiduelles au niveau de l'interface céramique métal, et assurer une bonne liaison entre les types des matériaux utilisés [22].

#### **I.3.2.1 L'assemblage par soudage diffusion :**

## Chapitre I : Généralité sur les bimatériaux.

Le principe de ce procédé est de mettre en contact les surfaces de deux pièces à assembler convenablement préparées (physicochimie, micro géométrie et couplage de surface). Puis chauffage de l'ensemble, éventuellement sous vide ou sous atmosphère protectrice, à une température déterminée en fonction des propriétés physico-chimiques des matériaux ainsi que des contraintes techniques, pendant un temps suffisant en fonction d'autres paramètres opératoires et du résultat recherché.



**Figure I. 5:** Séquence des événements pendant le collage par diffusion métal-céramique.[23]

La diffusion peut se dérouler selon quatre mécanismes (Figure I.6) :

- Echange de lieux entre deux atomes adjacents.
- Mouvement des atomes interstitiels.
- Mouvement des lacunes.

d) Echange circulaire de quatre atomes

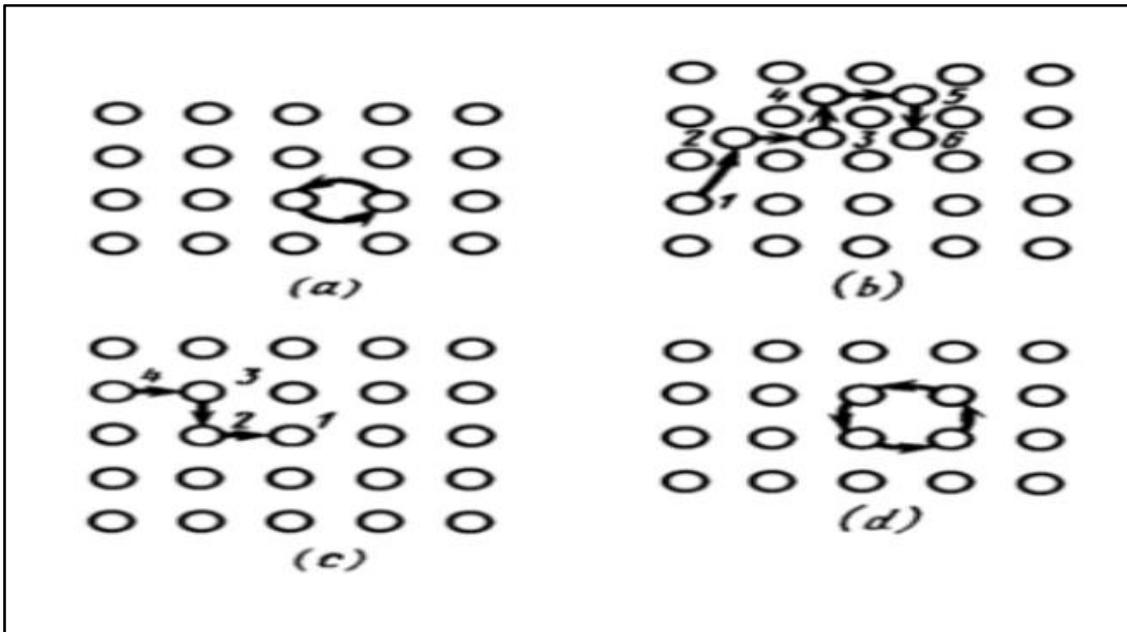


Figure I. 6: Les différents mécanismes de diffusion. [24]

### I.3.2.2 L'assemblage par soudage laser céramique-métal :

La technique de soudage au laser est un nouveau type de technologie de soudage [25]. Elle a été développée comme une alternative au collage. Le soudage au laser a une petite zone d'effet qui a peu d'effet sur la zone de collage [26, 27]. L'adhésif dans la zone de fusion se décompose pendant le processus de soudage au laser, ce qui a peu d'effet sur les propriétés du joint. On peut donc supposer que le soudage au laser et le collage n'ont guère d'influence l'un sur l'autre. S'influencent à peine l'un l'autre (Figure I.7)

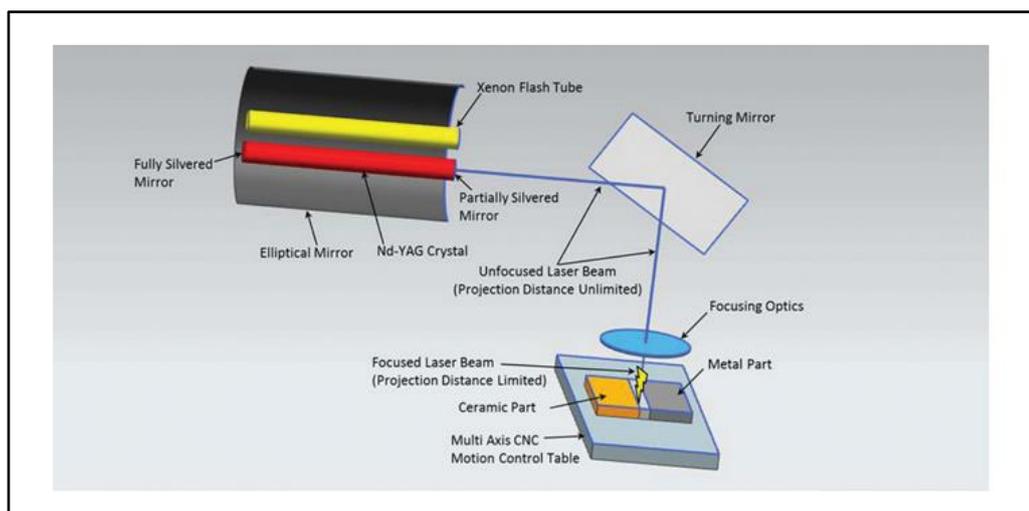


Figure I. 7: Schéma du principe du processus de soudage au laser. [28]

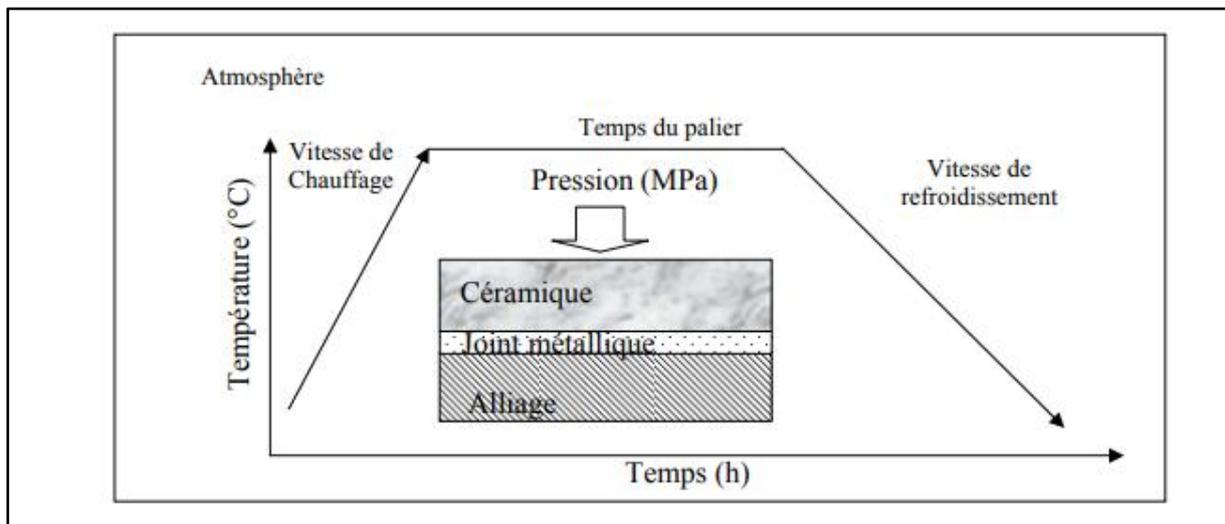
### I.3.2.3 L'assemblage par thermocompression :

## Chapitre I : Généralité sur les bimatériaux.

La thermocompression est une technologie qui permet d'assembler des matériaux hétérogènes sous l'action simultanée de la température et de la pression sans aucune phase liquide ne se forme au cours du processus d'assemblage, le tout dans une atmosphère variable selon les cas. Le contact des deux surfaces à lier est assuré par l'application d'une pression uni-axiale. Entre les deux surfaces à lier, est intercalé un joint métallique malléable pour favoriser l'adhérence métal/céramique. De nombreuses précautions doivent alors nécessairement être apportées dans le choix du joint. Ainsi, sa température de fusion doit être supérieure à la température d'utilisation du couple et inférieure aux températures de transformation de phase de la céramique et du métal.

De nombreuses études ont été effectuées pour déterminer l'influence des différents paramètres de réalisation, en particulier sur la tenue mécanique de la liaison selon le cycle de la Figure I.8 :

- La température,
- La pression,
- L'atmosphère,
- Le temps du palier,
- La vitesse de chauffage et de refroidissement.



**Figure I. 8:** Représentation schématique d'un assemblage métal/céramique réalisé dans un four-presse de thermocompression. [29]

### I.4 Propriétés des matériaux métallique et céramique :

#### I.4.1 Propriétés des matériaux métalliques :

## Chapitre I : Généralité sur les bimatériaux.

Les matériaux métalliques ont de nombreuses propriétés dont nous pouvons parler et en voici quelques-unes :

### I.4.1.1 L'essai de traction :

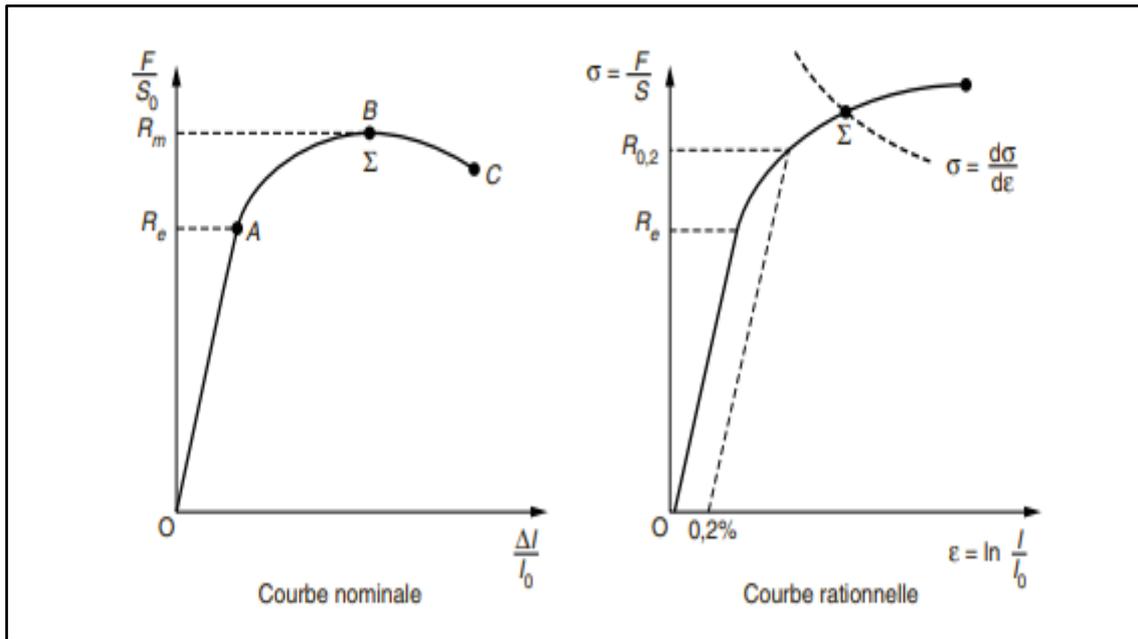
La Première chose simple pour caractériser le comportement d'un métal consiste à effectuer un effort de traction [30]. Une éprouvette axisymétrique, en général cylindrique, est soumise à une force de traction croissant. La forme de l'éprouvette est choisie de façon à ce que la contrainte et la déformation soient homogènes dans la partie utile de l'échantillon. Si **S initial** et **l initial** sont respectivement la section et la longueur utile initiales, on mesure les variations de :

- La contrainte nominale  $\sigma_n = F / S_0$ , avec F, la force appliquée ;
- La déformation nominale  $\epsilon_n = \Delta l / l_0$ , avec l, la longueur courante.

La courbe obtenue a la forme indiquée sur la Figure I.9 où l'on distingue trois régions différentes :

- De point O à A défini le domaine de déformation élastique. La contrainte est proportionnelle à la déformation :  $\sigma_n = E \epsilon_n$ . C'est la loi de Hooke ; E est appelé module d'élasticité (ou module d'Young). [30]
- La partie AB correspond au domaine de déformation plastique. Si l'on relâche la force on observe un retour élastique laissant une déformation plastique résiduelle ; [30]
- La partie BC résulte de la localisation de la déformation (striction). La force diminue lorsque l'allongement augmente, le système est instable ; c'est ce que l'on appelle l'instabilité plastique. La rupture se produit en C. [30]

## Chapitre I : Généralité sur les bimatériaux.



**Figure I. 9:** Courbes de traction nominale et rationnelle. [30]

La limite de la déformation élastique en point A définit la limite d'élasticité  $R_e$  exprimée en MPa. Dans certains cas, cette limite de la partie linéaire est difficile à définir ; on utilise alors une valeur conventionnelle  $R_{0,2}$  qui correspond à la contrainte entraînant une déformation plastique de 0,2 %.

On définit la résistance limite  $R_m$  correspondant à la force maximale. Les valeurs de striction et d'allongement à rupture sont mesurées en C. [30]

En réalité, lors de l'essai de traction, la section et la longueur de l'éprouvette varient, il est donc plus logique de se rapporter aux vraies valeurs de la contrainte et de l'allongement à chaque instant :

- La contrainte vraie est  $\sigma = \frac{F}{S}$ , avec  $S$ , la section courante,
- À chaque instant, la déformation instantanée est donnée par  $d\varepsilon = \frac{dl}{l}$ , soit pour un

$$\text{allongement donné } \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0}$$

La courbe rationnelle représente la variation de  $\sigma$  en fonction de  $\varepsilon$ . Son tracé nécessite de mesurer en continu la variation de  $l$  ou de  $S$  à l'aide d'un extensomètre. Cette courbe de traction rationnelle s'écarte de la courbe de traction nominale au fur et à mesure que  $\varepsilon$  augmente.

## Chapitre I : Généralité sur les bimatériaux.

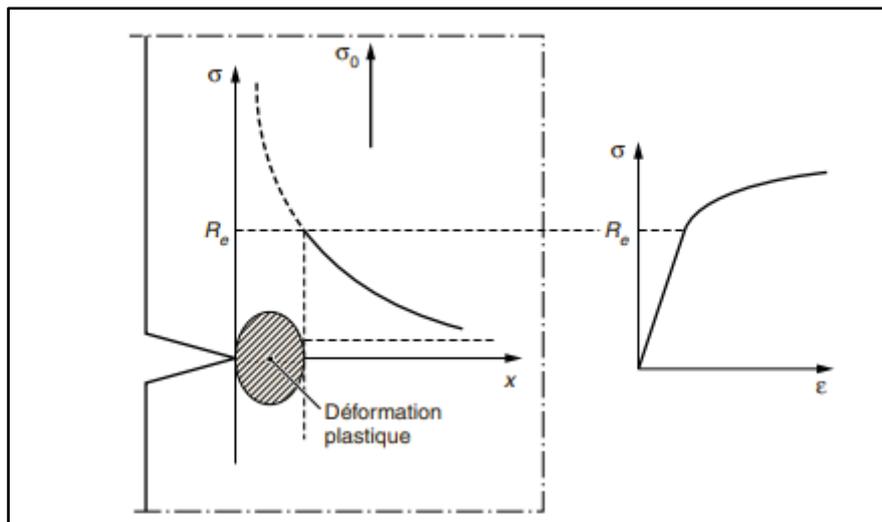
### I.4.1.2 Déformation élastique. Élasticité :

L'essai de traction montrent ainsi que pour de faibles déformations, on note d'abord un comportement élastique réversible au cours duquel contrainte et déformation sont proportionnelles ; cela définit le module d'élasticité ou module d'Young (en MPa ou GPa) [30] :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

### I.4.1.3 Résistance à la fatigue :

Jusqu'à présent, nous avons considéré l'effet des charges statiques, c'est-à-dire une amplitude constante. Cependant, l'application de contraintes variables plusieurs fois entraîne des valeurs beaucoup plus faibles et inférieures à la limite de la limite. L'élasticité, le phénomène dit de fatigue.



**Figure I. 10:** Apparition d'une zone de déformation plastique dans un matériau ductile ou partiellement ductile. [30]

En général, le chargement de fatigue consiste en une contrainte qui n'est pas nécessairement périodique et qui peut être aléatoire (cas d'un véhicule roulant sur route accidentée). Dans de nombreux cas cependant, les forces appliquées sont périodiques et même sinusoïdales (axes ou pièces de machines tournantes) [30].

### I.4.1.4 La conductivité thermique :

## Chapitre I : Généralité sur les bimatériaux.

La conductivité thermique est la quantité de flux de chaleur dans des conditions d'équilibre à travers une unité de surface par unité de gradient de température dans la direction perpendiculaire à la surface.

Le flux de chaleur à travers une paroi par unité de surface est appelé flux thermique,  $J$ , qui est proportionnel au gradient thermique, la constante de proportionnalité étant la conductivité thermique. L'équation est la suivante :

$$J = K \frac{\Delta T}{\Delta X}$$

$\Delta T/\Delta X$  est le gradient thermique (c'est-à-dire le changement de température) par unité d'épaisseur  $X$  et  $K$  est la conductivité thermique. La conductivité thermique est exprimée en  $\text{Btu ft/hr f} \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{°F}$  en unités anglaises et en  $\text{kcal m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}$  dans le système métrique. Ces valeurs sont utilisées pour calculer le transfert de chaleur à travers une paroi métallique.[31]

### I.4.2 Propriétés des céramiques :

Il existe deux types des céramique, céramique traditionnel et autre technique et notre étude concerne sur les céramiques techniques

Pour beaucoup d'applications, les céramiques sont en concurrence avec d'autres matériaux. Quelques propriétés importantes des céramiques sont données ci-dessous :

#### I.4.2.1 Coefficient de dilatation thermique :

Le coefficient de dilatation thermique linéaire  $\alpha$  est la variation relative de la longueur  $e$  pour une augmentation de température  $dT$  de  $1 \text{ K}$ . augmentation de température  $dT$  de  $1 \text{ K}$

$$\alpha = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT} \quad [32]$$

L'anisotropie de la dilatation thermique provoque des contraintes thermiques dans les matériaux polycristallins après le refroidissement de la température de frittage. Ces contraintes sont souvent à l'origine de microfissures, qui conduisent ensuite à une réduction des contraintes internes.

#### I.4.2.2 Conductivité thermique :

## Chapitre I : Généralité sur les bimatériaux.

Pour la définition de la conductivité thermique, nous considérons le flux de chaleur traversant une certaine zone est l'énergie thermique qui traverse une unité de surface dans l'unité de temps. Le flux de chaleur Q est proportionnel au gradient de température

$$Q = \frac{dQ}{dT} = -\lambda \frac{dT}{dn} \quad [33]$$

Où n est la normale intérieure à la zone. Pour un dT/dn négatif, il en résulte un flux de chaleur positif, c'est-à-dire que le corps augmente son contenu énergétique. Le facteur de proportionnalité A est appelé conductivité thermique et a pour dimensions

$$[\lambda] = \frac{\text{l'énergie}}{\text{Temps.Longueur.Température}} \quad [33]$$

### I.4.2.3 Module de Young :

Les céramiques comme les métaux, possèdent des modules de Young bien définis : leurs valeurs ne dépendent pas de la durée de vie de la charge (ou de la fréquence si le chargement est cyclique). Les modules de Young des céramiques sont en général supérieurs à ceux des métaux (Tableau I.1), ce qui reflète la grande raideur des liaisons ioniques dans les oxydes et des liaisons covalentes.

Matériau	Module de Young E(GPa)
Acier	210
Alliages d'aluminium	70
Alumine	300
Silice	60
Carbure de silicium	450

**Tableau I. 1:** Modules spécifiques : comparaison entre les céramiques et métaux.

### I.4.3 Les domaines d'application pour les assemblages métal-céramique :

- Haute tension.
- Courants forts.
- Détecteurs et appareils de mesures.
- Technologies sous atmosphère vide ou ultravide.
- Applications cryogéniques.
- Technologies médicales.

## Chapitre I : Généralité sur les bimatériaux.

- Radiothérapie.
- Technologies hautes fréquences.
- Ingénierie énergétique.
- Accélérateurs de particules.

## Chapitre I : Généralité sur les bimatériaux

### Références bibliographiques Chapitre I:

- [1]. A.M. HASSAN, A. ALRASHDAN, MOHAMMED T. HAYAJNEH, A.T. MAYYAS: WEAR BEHAVIOR OF AL–MG–CU–BASED COMPOSITES CONTAINING SIC PARTICLES. TRIBOLOGY INTERNATIONAL 42, PP 1230–1238, 2009
- [2]. S. K. GHOSH, P. SAHA: CRACK AND WEAR BEHAVIOR OF SIC PARTICULATE REINFORCED ALUMINUM-BASED METAL MATRIX COMPOSITE FABRICATED BY DIRECT METAL LASER SINTERING PROCESS. MATERIALS AND DESIGN 32, PP 139–145, 2011.
- [3] LE GRAND DICTIONNAIRE TERMINOLOGIQUE, OFFICE QUEBECOIS DU LANGE FRANÇAIS, QUEBEC
- [4] V.M.L. ANTONY; G. RAMANA «PROCESSES FOR PRODUCTION OF HIGH-PURITY METAL POWDERS »HIGH-PURITY METALS JOM, 2003
- [5] Y. BIENVENU, A.S. WRONSKI « ACIERS RAPIDES PRODUITS PAR METALLURGIE DES POUDRES » LA REVUE DE METALLURGIE-CIT/SCIENCE ET GENIE DES MATERIAUX, 1994.PP. 693-705
- [6] G.Z. CHEN, E. GORDO « DIRECT ELECTROLYTIC PREPARATION OF CHROMIUM POWDER» METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTION, 2004
- [7]. MODELISATION ET SIMULATION DU FRITTAGE DE MATERIAUX DOPES ET DE MULTI MATERIAUX A L'ECHELLE DE LA MICROSTRUCTURE. AUTRE. ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES DE SAINT-ETIENNE, 2013, HOWATCHINOU TOSSOUKPE
- [8] FANG, Z. Z. (2010). *SINTERING OF ADVANCED MATERIALS*. CAMBRIGE: WOODHEAD PUBLISHING LIMITED.
- [9] OGBUJI, L. U. J. T. (1986), 'FINITE ELEMENT ANALYSIS OF SINTERING STRESS', SCI SINTERING, 18, 21–31.
- [10] MORGAN, C. S. (1973), 'MATERIAL TRANSPORT BY DISLOCATION MOTION IN SINTERING', PHYS SINTERING, 5, 31–40.
- [11] BRETT, J. AND SEIGLE, L. (1963), 'SHRINKAGE OF VOIDS IN COPPER', ACTA METAL, 11, 467–74.

## Chapitre I : Généralité sur les bimatériaux

[12] KINGERY, W. D. AND NARASIMHAN, M. D. (1959), 'DENSIFICATION DURING SINTERING IN THE PRESENCE OF A LIQUID PHASE, II. EXPERIMENTAL', J APPL PHYS, 30, 307–10.

[13] HUPPMANN, W. J. AND RIEGGER, H. (1975), 'MODELING REARRANGEMENT PROCESSES IN LIQUID-PHASE SINTERING', ACTA METAL, 23, 965–71.

[14] D. TREHEUX, F. GAILLARD, AND M. ROMAND, BULL, CERCLE D'ETUDE DES METAUX, VOL. XVI, NO. 6, PP. 1.1-1.10, 1993.

[15] N. IKHLEF, "INFLUENCE DES ELEMENTS D'ADDITION DANS LE CUIVRE OU IMPLANTES DANS L'ALUMINE SUR L'ADHERENCE A L'ETAT SOLIDE DU SYSTEMES CUIVRE/ALUMINE," ECOLE CENTRALE DE LYON, LYON, THESE DE DOCTORAT 1991.

[16] M. COURBIERE, ECOLE CENTRALE DE LYON, LYON, THESE DE DOCTORAT 1991.

[17] G. LASCAR, "COLLOQUE LIAISONS CERAMIQUE-METAL," TARBES, 1987.

[18] G. LASCAR, SOUDAGE ET TECHNIQUES CONNEXES, PP. 9-20, 1987.

[19] C. BERAUD, INSA LYON, N° 86 ISAL 0017, THESE DE DOCTORAT 1986.

[20] J. PETIT, MATERIAUX ET TECHNIQUES, PP. 13-21, MARS 1989.

[21] G. LASCAR, VERRES REFRACTE, VOL. 39, NO. 4, PP. 569-585, 1985.

[22] V. GUIPONT, "DETERMINATIONS EXPERIMENTALES DE CONTRAINTES RESIDUELLES AU SEIN D'ASSEMBLAGES CERAMIQUE/METAL REALISES PAR BRASAGE : APPLICATION AU COUPLE NITRURE DE SILICIUM/ACIER DOUX," ECOLE CENTRALE DE LYON, LYON, THESE DE DOCTORAT 1994.

[23] LEMUS-RUIZ J, CEJA-CARDENAS L, BEDOLLA-BECERRIL E, LOPEZ-MORELOS VH. PRODUCTION, CHARACTERIZATION, AND MECHANICAL EVALUATION OF DISSIMILAR METAL/CERAMIC JOINTS. NANOCOMPOSITES WITH UNIQUE PROPERTIES AND APPLICATIONS IN MEDICINE AND INDUSTRY. INTECH, CROATIA. 2011: P. 205–24

[24] KAZAKOV, FEDOTOVICH N., DIFFUSION BONDING OF MATERIALS, MIR PUBLISHERS, MOSCOW, (2013).

## Chapitre I : Généralité sur les bimatériaux

[25] SUN, X., FAILURE MECHANISMS OF ADVANCED WELDING PROCESSES, WOODHEAD PUB, 2010, P. 190–212.

[26] ION, J., LASER PROCESSING OF ENGINEERING MATERIALS: PRINCIPLES, PROCEDURE AND INDUSTRIAL APPLICATION, BUTTERWORTH-HEINEMANN, 2005, P.1–259.

[27] MIKHAILOVA, G., MIKHAILOV, B., TROITSKII, A., LASER WELDING OF HTSC CERAMICS. LASER PHYSICS LETTERS, 2004. 1(10): P. 525–527.

[28] WELDING MINIATURE DEVICES, DECISIONS TO MAKE WHEN CHOOSING A JOINING PROCESS, AVAILABLE FROM: [HTTP://WWW.THEFABRICATOR.COM/ARTICLE/ARCWELDING/WELDING-MINIATUREDEVICESDECISIONS TO MAKE WHEN CHOOSING A JOINING PROCESS](http://www.thefabricator.com/article/arcwelding/welding-miniaturedevicesdecisions-to-make-when-choosing-a-joining-process).

[29] MESSAOUDI KHALID ANALYSE DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES DANS LES MULTI MATÉRIAUX TYPE SANDWICH 2010 MESSAOUDI KHALID.

[30] MICHEL , C. (2017). *MATERIAUX METALLIQUE 2EME EDITION*. PARIS: DUNOD

[31] PHILIP A.SCHWEITZER, P. (2003). *METALLIC MATERIALS: PHYSICAL, MECHANICAL, AND CORROSION PROPERTIES*. PENNSYLVANIA: MARKEL DEKKER,INC.

[32] KINGERY, W.D, (1966): INTRODUCTION TO CERAMICS, JOHN WILEY & SONS

[33] DEAN, E.A., LOPEZ, LA. (1983): EMPIRICAL DEPENDENCE OF ELASTIC MODULI ON POROSITY FOR CERAMIC MATERIALS, J. AM. CERAM. SOC. 66, 366--370.

## **Chapitre II**

**Les contraintes résiduelles dans les bimatériaux.**

## Chapitre II : Les contraintes résiduelles dans les bimatériaux.

### II.1 Introduction :

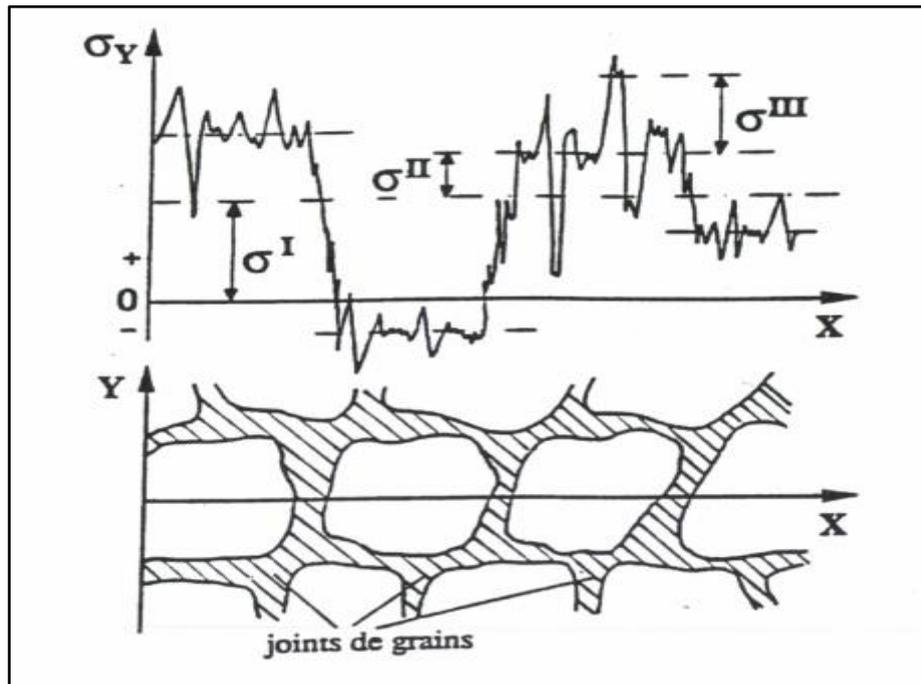
Les contraintes résiduelles, également connues sous le nom de contraintes piégées ou bloquées, sont des contraintes auto-équilibrées et non homogènes générées au cours des différents processus de fabrication des composants d'ingénierie. Une caractéristique unique de ces contraintes non linéaires est leur présence en l'absence de charges mécaniques ou thermiques externes dans les matériaux solides. En d'autres termes, il s'agit de contraintes spécifiques qui subsistent dans un matériau après l'étape de fabrication, lorsqu'il n'y a ni force extérieure ni gradient thermique [1]-[3]. Cela souligne que les contraintes résiduelles sont totalement différentes des contraintes normales qui résultent de processus dans lesquels les forces sont générées sur une condition limite fixe [4]-[6].

En ce qui concerne les causes des contraintes résiduelles, les alliages métalliques et céramiques doivent être pris en compte [7]. Les contraintes résiduelles sont principalement générées par la couche superficielle en raison de l'usinage, du soudage, du traitement thermique, etc. il existe trois niveaux de contrainte sont souvent définis, comme présenté ici :

- Type-1 : Macro-contraintes résiduelles générées à une échelle supérieure à la taille des grains du matériau au cours de la procédure de fabrication.
- Type-2 : micro-contraintes résiduelles, qui varient à l'échelle du grain individuel, provoquées par la procédure de fabrication.
- Type 3 : micro-contraintes résiduelles causées par des défauts cristallins à l'intérieur d'un grain.

La figure II.1 illustre schématiquement comment se superposent ces trois ordres de contrainte dans un matériau [8]. La courbe, qui représente la contrainte dans la direction Y en fonction de l'abscisse X, traverse plusieurs grains.

## Chapitre II : Les contraintes résiduelles dans les bimatériaux.



**Figure II. 1:** Superposition des contraintes de types I, II et III dans un domaine couvrant plusieurs grains. [08]

De nombreuses recherches ont établi que les contraintes résiduelles peuvent altérer les performances mécaniques et fonctionnelles de différents systèmes d'ingénierie [9]-[11]. En effet, lorsque des contraintes résiduelles sont créées dans les structures, une partie de leur résistance est utilisée pour surmonter ces contraintes piégées à l'intérieur, ce qui entraîne une défaillance catastrophique plus tôt que prévu. Outre la résistance à la fatigue, la stabilité dimensionnelle, la résistance à la corrosion, la distorsion, le délaminage des fissures matricielles et le gauchissement peuvent être fortement influencés par la présence de contraintes résiduelles [12][13]. D'un point de vue plus général, les contraintes résiduelles jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement des biosystèmes tels que les vaisseaux sanguins [14]. Il est possible de tirer parti de ces contraintes, en provoquant à dessein des contraintes résiduelles de compression dans la couche superficielle des composants afin d'améliorer la durée de vie en fatigue. En conséquence, ces contraintes peuvent avoir des effets à la fois néfastes et bénéfiques, et leur quantification et leur analyse sont d'une grande importance dans de nombreux secteurs [15]

Et dans ce chapitre puisque nous parlerons des contraintes résiduelles w notre étude sur les bimatériaux spécialement combinaison métal-céramique donc on va parler sur les contraintes

## **Chapitre II : Les contraintes résiduelles dans les bimatériaux.**

résiduelles dans les assemblages métal-céramique, les solutions comment diminuer ces contraintes et aussi les contraintes résiduelles au niveau des interfaces.

### **II.2 Définition des contraintes résiduelles :**

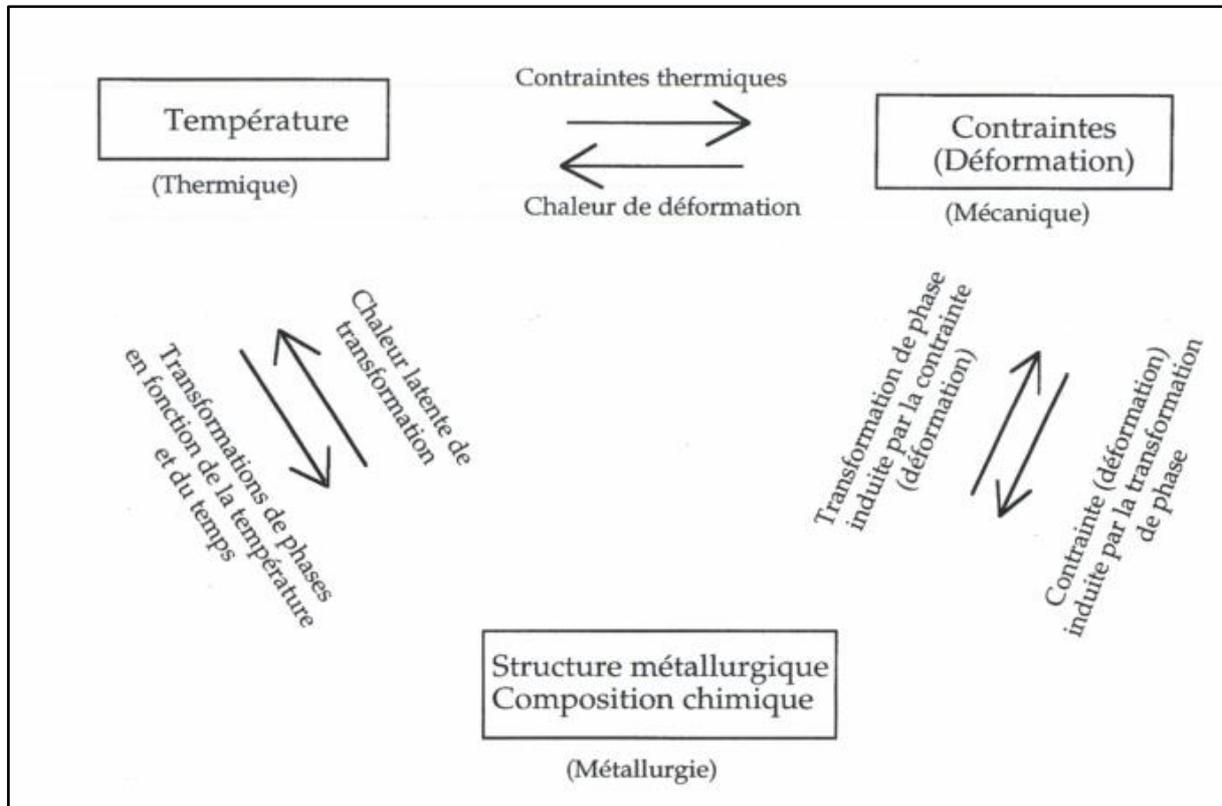
Les contraintes résiduelles sont généralement définies comme les contraintes qui subsistent dans les pièces mécaniques qui ne sont pas soumises à des contraintes extérieures. Les contraintes résiduelles existent dans pratiquement toutes les pièces rigides, qu'elles soient métalliques ou non (bois, polymère, verre, céramique, etc.), Elles résultent de l'histoire métallurgique et mécanique de chaque point de la pièce dans son ensemble lors de sa fabrication. Elle existe à différents niveaux, généralement divisés en trois, selon l'échelle à laquelle la contrainte est observée.

### **II.3 Origine des contraintes résiduelles :**

De nombreux procédés d'élaboration de traitements thermiques, thermo-chimiques, thermomécaniques et mécaniques génèrent des contraintes résiduelles d'ordre I. Ces contraintes résiduelles peuvent apparaître lorsque le matériau est sollicité thermiquement, lorsqu'il est soumis à des changements de composition et/ou des changements de structure et lorsqu'il est sollicité mécaniquement. Ces différentes origines de contraintes résiduelles agissent seules dans de nombreux procédés ou interagissent entre elles.

La figure II.2 reprend le diagramme triangulaire d'interaction thermique-métallurgie-mécanique qui explique la complexité de la genèse des contraintes résiduelles lors du traitement des matériaux. Ainsi, chaque traitement mécanique, thermique, chimique et toute combinaison de ces traitements provoque l'apparition de contraintes internes dans le matériau. Si ces contraintes provoquent des déformations plastiques non homogènes, qui subsistent à la fin du traitement, la pièce traitée présentera des contraintes résiduelles. Dans le tableau II.1, nous avons porté les principaux procédés d'élaboration de traitement et de mise en œuvre des matériaux qui provoquent des contraintes résiduelles [16]. Dans certains cas, ces procédés sont utilisés pour générer des contraintes résiduelles favorables aux propriétés d'emploi du matériau, par exemple le grenailage. Dans d'autres cas, le procédé génère des contraintes résiduelles bénéfiques ou non, par exemple dans le cas du traitement thermique.

## Chapitre II : Les contraintes résiduelles dans les bimatériaux.



**Figure II. 2:** Schéma triangulaire d'interaction thermique - métallurgie - mécanique en genèse des contraintes résiduelles. [16]

Chargement élastoplastique : flexion, torsion, traction, compression
Usinage : polissage, fraisage, tournage, rectification, perçage
Assemblage et multimatériaux : soudage, brasage, collage, composites
Mise en forme : laminage, tréfilage, forgeage, galetage, martelage, grenailage
Traitements thermique et thermochimique superficiels : trempe, durcissement par transformation de phase, cémentation, carbonituration, nitruration
Revêtements : dépôts, glaçage, plaquage, galvanisation, PVD, CVD

**Tableau II. 1:** Principales origines des contraintes résiduelles de premier ordre. [16]

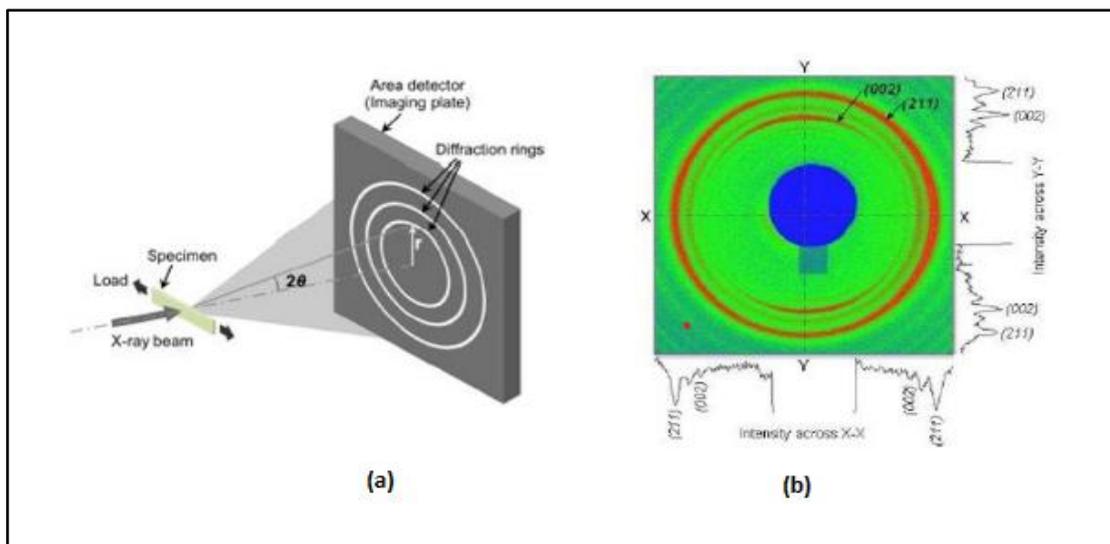
### II.4 Méthodes de détections les contraintes résiduelles :

## Chapitre II : Les contraintes résiduelles dans les bimatériaux.

L'évaluation des contraintes résiduelles suscite un grand intérêt parmi les chercheurs de la communauté des ingénieurs. Plusieurs méthodes sont utilisées pour déterminer les contraintes résiduelles dans les bimatériaux,

### II.4.1 Technique diffractométriques (DRX) :

La technique de diffraction est considérée comme la plus appropriée pour examiner les combinaison métalliques/céramiques. Donc la DRX est une méthode pratique et non destructive utilisée pour déterminer les déformations in situ dans un matériau dans lequel les plans cristallins sont considérés comme des jauges de contrainte. Dans cette méthode, les déformations et les contraintes sont corrélées sur la base de la théorie classique de l'élasticité, et l'équation de la loi de Bragg est l'idée de base de toutes les mesures de contraintes résiduelles utilisant les méthodes de diffraction des rayons X [17]-[19]. Les cônes apparaissent sous la forme d'anneaux d'intensité circulaires dans les faisceaux diffractés transmis, connus sous le nom d'anneaux de Debye. Un détecteur bidimensionnel normal au faisceau incident enregistre les anneaux (Figure II.3). L'application d'une contrainte modifie la distance inter planaire, ce qui entraîne une distorsion de ces anneaux de Debye au niveau du détecteur. Le degré de déformation dans la direction de la contrainte appliquée fournit une estimation raisonnable de la déformation du réseau. Le schéma de la mesure de la déformation dans la méthode DRX est illustré à la figure II.3.

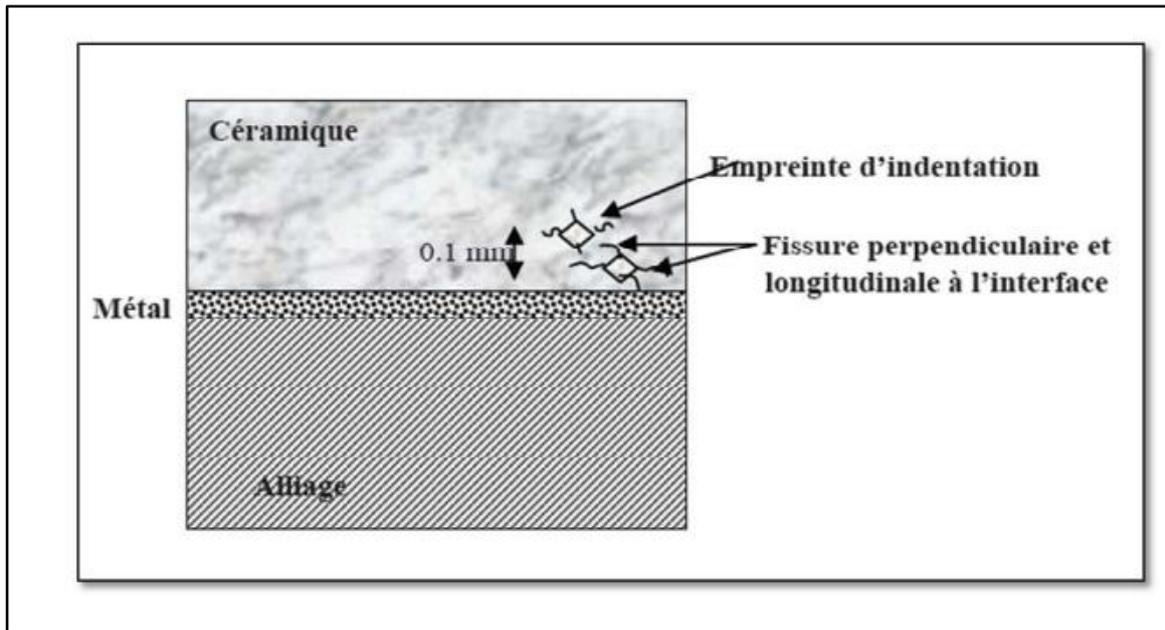


**Figure II. 3:** a) Schéma de l'expérience DRX, b) Schéma de diffraction bidimensionnel enregistré dans le détecteur. Les anneaux d'intensité présentent des diffractions provenant de différents plans de réseau du cristal. [20]

### II.4.2 Mesures par indentation Vickers :

## Chapitre II : Les contraintes résiduelles dans les bimatériaux.

La méthode d'indentation Vickers est moins courante que la diffraction des rayons X, mais elle est toujours facilement utilisée pour étudier les liaisons métal-céramique et peut être utilisée pour évaluer les contraintes résiduelles dans le matériau céramique près de l'interface (Figure II.4).[21] consiste à réaliser des indentations successives dans la céramique en s'éloignant de l'interface en chaque point d'un pas de 0,1 mm La longueur de fissure mesurée dans la céramique composite correspond à la fissure dans la direction parallèle à l'interface.



**Figure II. 4:** Schéma explicatif de la méthode de détermination des contraintes résiduelles par indentation Vickers.[23]

### II.4.3 Méthodes numériques :

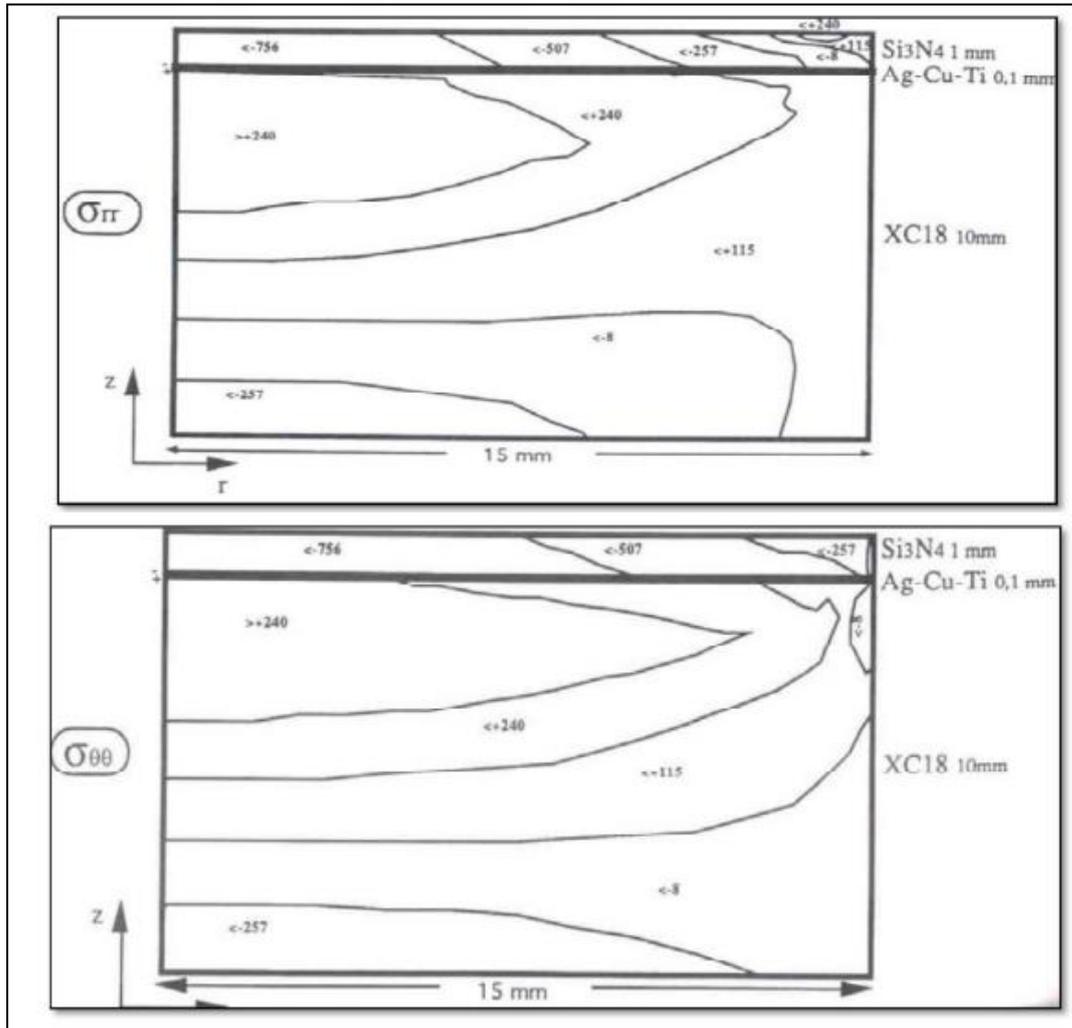
La simulation numérique par éléments finis [23] est un outil puissant dont l'utilisation devrait permettre de prédire la distribution spatiale des contraintes résiduelles lorsque les méthodes analytiques sont inefficaces. Le résultat du calcul des contraintes résiduelles lors de l'examen du joint soudé Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ag-Cu-Ti/XC18 en mode élasto-plastique donne :

distribution spatiale des contraintes résiduelles dans toute la pièce [24]. (Figure II.5) trace les composantes radiale  $\sigma_{rr}$  et circonférentielle  $\sigma_{\theta\theta}$

Ces représentations donnent un aperçu global du niveau de contraintes résiduelles. La céramique est intégralement en compression avec des valeurs élevées au centre, ce qui est bénéfique pour la tenue de la céramique. En revanche, près du bord, la céramique présente

## Chapitre II : Les contraintes résiduelles dans les bimatériaux.

une zone en tension. L'acier est en tension en sous couche de la brasure tandis que la base est en compression.



**Figure II. 5:** Cartographie des contraintes résiduelles d'origine thermique obtenues par éléments finis. [24]

Et voici d'autres méthode pour la détection des contraintes résiduelles sont principalement utilisés sur le tableau II.2

## Chapitre II : Les contraintes résiduelles dans les bimatériaux.

Méthode	Type de mesure	Type de contraintes résiduelles	Caractère
Mécanique	Déformation macroscopique superficielle	1 <sup>er</sup> ordre	Destructif ou semi-destructif (mesures en surface)
Diffraction des rayons X	Déformation homogène de réseau	Principalement 1 <sup>er</sup> ordre, 2 <sup>e</sup> ordre, parfois 3 <sup>e</sup> ordre	Non destructif (mesures en surface)
Diffraction de neutrons	Déformation homogène de réseau	1 <sup>er</sup> et 2 <sup>e</sup> ordres	Non destructif
Ultrasons	Vitesse de propagation des ondes ultrasonores	1 <sup>er</sup> , 2 <sup>e</sup> et 3 <sup>e</sup> ordres	Non destructif
Magnétique	Bruit Barkhausen	1 <sup>er</sup> et 2 <sup>e</sup> ordres	Non destructif

**Tableau II. 2:** Principales méthodes de mesure des contraintes résiduelles.

### II.5 Les contraintes résiduelles dans les assemblages métal/céramique :

La génération de liaisons entre céramiques et métaux s'accompagne toujours de la génération de champs de contraintes résiduelles multiaxiales. Différentes origines physiques et mécaniques expliquent la génération de contraintes résiduelles interfaciales Collage, dans les céramiques et les métaux lors de la formation de la liaison céramique métal [25] :

- Les contraintes d'origine thermiques issues du gradient thermique de l'environnement expérimental (loi de refroidissement). Dans ce contexte, un gradient thermique est généré au niveau de l'éprouvette du fait de la différence de conductibilité thermique qui existe entre la céramique et le métal,
- Les contraintes issues de la formation de nouvelles phases à l'interface (liaisons réactives), provoquant une augmentation de volume et le blocage des dislocations à courte distance,
- Les contraintes générées par une transformation de phase de l'alliage métallique lors du refroidissement,
- Les contraintes liées à l'effet de la création de charges électrostatiques d'espace dans la céramique, - les contraintes d'origine purement mécanique générées par la différence des propriétés physiques ( $\alpha$  : coefficient de dilatation thermique,  $E$  : module d'élasticité).

L'expérience a montré que les contraintes résiduelles sont critiques dans les composants en céramique, entraînant une rupture du matériau en l'absence de charges externes (rupture cohésive). Lors de la réalisation d'un assemblage, le champ de contrainte interne existant se

## Chapitre II : Les contraintes résiduelles dans les bimatériaux.

superpose au champ appliqué, contribuant ainsi aux qualités de résistance mécanique de l'assemblage Lien. Le contrôle des contraintes résiduelles doit permettre d'améliorer les performances et la fiabilité des composants à long terme. Dans ce cas, l'évaluation de ces contraintes est précieuse pour la réalisation de la pièce. Plusieurs approches expérimentales existent actuellement qui peuvent être soutenues analytiquement et/ou numériquement.

### II.6 Conséquences des contraintes résiduelles :

Les contraintes résiduelles du premier ordre interviennent d'une part en altérant la géométrie de la pièce (ce sont les déformations et les défauts associés aux contraintes résiduelles et à toute l'histoire de la genèse des contraintes internes), d'autre part sur le comportement mécanique du matériau et de la pièce du fait que la sollicitation que subit localement le matériau est une « superposition » de la contrainte appliquée et de la contrainte résiduelle. Le premier aspect, qui concerne la modification de la géométrie de la pièce en associant un état de contrainte résiduel à un état de déformation résiduel, n'est pas à proprement parler une conséquence des contraintes résiduelles, mais est plutôt à rattacher à l'apparition des déformations de traitement. Ces déformations peuvent conduire à des ruptures locales de pièces ou à l'apparition de fissures localisées. Une manifestation spectaculaire de ce dernier effet peut se rencontrer lors de la trempe des aciers avec l'apparition de tapures. Le deuxième aspect se manifeste lors de la mise en œuvre de matériaux, pour deux types de sollicitation :

- La sollicitation mécanique qui produit une déformation plastique résultant d'une superposition de l'état de contrainte résiduelle et de la contrainte appliquée. La plastification progressive des pièces peut conduire à un état de contrainte résiduel totalement relaxe ;
- La sollicitation mécanique cyclique. Dans ce cas, les contraintes résiduelles ont un effet important sur la tenue en fatigue [26]. Une augmentation importante de la tenue en fatigue peut être obtenue en optimisant le profil de contrainte résiduelle dans la pièce. Ainsi, ce sont des contraintes résiduelles de compression en surface des pièces et produites par traitements thermiques superficiels, traitements thermo-chimiques ou mécaniques qui augmentent de façon importante la durée de vie de nombreuses pièces de mécanique. Il arrive également que des profils de répartition de contraintes résiduelles soient défavorables et provoquent une détérioration des propriétés de tenue en fatigue qui conduisent à des ruptures prématurées de pièce.

## Chapitre II : Les contraintes résiduelles dans les bimatériaux.

### II.7 Solutions pour diminuer les contraintes résiduelles :

De nombreuses solutions ont été développées pour diminuer les contraintes résiduelles dans les composants métal-céramique. Ils utilisent souvent des intercalaires dont le but est d'ajuster les coefficients de dilatation des deux matériaux. Les métaux tels que le cuivre et l'aluminium se sont bien comportés. En raison de sa malléabilité et de son faible point de fusion, l'aluminium peut former des liaisons solides avec des céramiques telles que l'alumine et le nitrure de silicium. [27,28]

La diminution des contraintes résiduelles 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). 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 [28] :

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

. Lors d'essais de traction sur des composants impliquant du nitrure de silicium, il a été montré que lorsque la différence de coefficient de dilatation thermique entre le nitrure de silicium et le substrat métallique augmente, la résistance électrique du composant diminue. Par conséquent, utilisez un intercalaire composé de matériaux à coefficients de dilatation thermique proches. La céramique doit limiter la contrainte résiduelle dans la céramique, augmentant ainsi la résistance du composant. D'autre part, la faible dilatation thermique est souvent associée à une limite d'élasticité importante, alors que plusieurs auteurs ont montré que l'usage de matériaux ductiles pouvait limiter les contraintes résiduelles

[30,33]. Plusieurs études ont montré que les liaisons Ni<sub>3</sub>Si/acier ont démontré l'avantage de l'utilisation d'un matériau à forte plastification tel que le cuivre doux, par rapport à un matériau à coefficient de dilatation intermédiaire. La figure II.6 montre l'évolution de la tenue en traction d'un assemblage Ni<sub>3</sub>Si/acier en fonction du coefficient de dilatation du matériau de la couche intermédiaire. Le cuivre doux en tant que couche intermédiaire donne un meilleur résultat que le tungstène ou le molybdène qui ont pourtant des coefficients de dilatation beaucoup plus proches de celui du Ni<sub>3</sub>Si.

Chapitre II : Les contraintes résiduelles dans les bimatériaux.

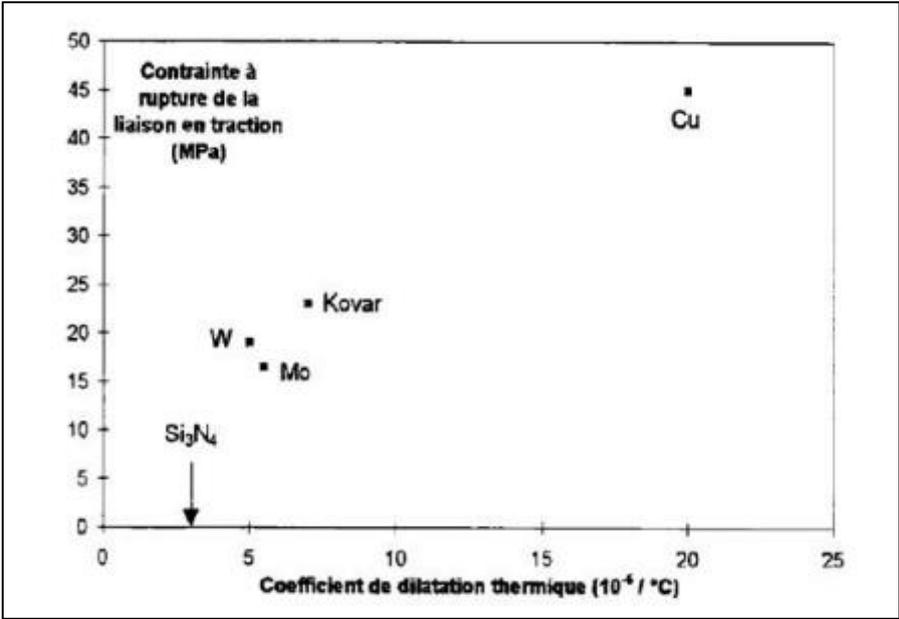


Figure II. 6: Évolution de la tenue en traction d'un assemblage Ni<sub>3</sub>Si/acier en fonction du coefficient de dilatation du matériau composant une couche intermédiaire de 1.5 mm de différents métaux. [31]

## Chapitre II : Les contraintes résiduelles dans les bimatériaux.

### Références bibliographiques Chapitre II :

- [1] S. AKBARI, F. TAHERI-BEHROOZ, M.M. SHOKRIEH, COMPOS. SCI. TECHNOL. 2014, 94, 8.
- [2] S. MIN AHN, S.Y. PARK, Y.C. KIM, K.S. LEE, J.Y. KIM, J. MATER. SCI. 2015, 50, 7752.
- [3] I. SERRANO-MUNOZ, T. FRITSCH, T. MISHUROVA, A. TROFIMOV, D. APEL, A. ULBRICHT, A. KROMM, R. HESSE, A. EVANS, G. BRUNO, J. MATER. SCI. 2021, 56, 5845.
- [4] H.W. CARPENTER, R.G. REID, R. PASKARAMOORTHY, INT. J. MECH. MATER. DES. 2015, 11, 455.
- [5] V. HAUK, STRUCTURAL AND RESIDUAL STRESS ANALYSIS BY NONDESTRUCTIVE METHODS, ELSEVIER, AMESTERDAM 1997.
- [6] G. SIH, E. SOMMER, W. DAHL, A. MCEVILY, 1985.
- [7] M.D. OLSON, M.R. HILL, B. CLAUSEN, M. STEINZIG, T.M. HOLDEN, EXP. MECH. 2015, 55, 1093.
- [8] MAEDER (G.). - INTERACTION ENTRE LES CONTRAINTES RESIDUELLES SUPERFICIELLES ET LE COMPORTEMENT DES MATERIAUX APPORTS DE LA DIFFRACTION X. ORIGIN, MEASUREMENT AND EVALUATION OF RESIDUAL STRESSES. REVUE FRANÇAISE DE MECANIQUE, N° 4 (1984), P. 223-298.
- [9] P. MANN, H.Y. MIAO, A. GARIÉPY, M. LÉVESQUE, R.R. CHROMIK, J. MATER. SCI. 2015, 50, 2284.
- [10] H. CHEN, H.Y. LEE, C.S. KU, A.T. WU, J. MATER. SCI. 2016, 51, 3600.
- [11] X. WANG, D. XU, H.Y. LIU, H. ZHOU, Y.W. MAI, J. YANG, E. LI, J. MATER. SCI. 2016, 51, 334.
- [12] M. BARAHENI, A. TABATABAEIAN, S. AMINI, A.R. GHASEMI, COMPOS. PART B ENG. 2019, 172, 612.
- [13] M. BARAHENI, A. TABATABAEIAN, A.R. GHASEMI, S. AMINI, MODARES MECH. ENG. 2020, 20, 1731.
- [14] M.X. YANG, R.G. LI, P. JIANG, F.P. YUAN, Y.D. WANG, Y.T. ZHU, X.L. WU, MATER. RES. LETT. 2019, 7, 433.
- [15] J.A. FRANCIS, J.A. FRANCIS, 2016, 0836.

## Chapitre II : Les contraintes résiduelles dans les bimatériaux.

- [16] MACHERAUCH (E.), KLOOS (K.H.). - RESIDUAL STRESSES IN SCIENCE AND TECHNOLOGY. EDITED BY E. MACHERAUCH AND V. HAUKE, DGM (1987), P. 3-26.
- [17] C. GENZEL, I.A. DENKS, M. KLAUS, MOD. DIFFR. METHODS 2012, 127.
- [18] C.J. BECHTOLDT, R.C. PLACIOUS, W.J. BOETTINGER, M. KURIYAMA, ADV. X-RAY ANAL. 1981, 25, 329.
- [19] A. LIEHR, W. ZINN, S. DEGENER, B. SCHOLTES, T. NIENDORF, C. GENZEL, HTM J. HEAT TREAT. MATER. 2017, 72, 115.
- [20] S. TADANO, B. GIRI, SCI. TECHNOL. ADV. MATER. 2011, 12, 064708.
- [21] G. LASCAR THESE DE L'UNIVERSITE DE METZ 1989
- [22] BENICHOU KHALED ET TAIBI ILYES ETUDE NUMERIQUE DES CONTRAINTES RESIDUELLES DANS LES BI-MATERIAUX CENTRE UNIVERSITAIRE BELHADJ BOUCHAIB D'AIN-TEMOUCHENT 2015/2016
- [23] J. CHASKALOVIC, METHODE PAR ELEMENTS FINIS POUR LES SCIENCES DE L'INGENIEUR. : ED. LAVOISIER ISBN, 2004.
- [24] V. GUIPONT, "DETERMINATIONS EXPERIMENTALES DE CONTRAINTES RESIDUELLES AU SEIN D'ASSEMBLAGES CERAMIQUE/METAL REALISES PAR BRASAGE : APPLICATION AU COUPLE NITRURE DE SILICIUM/ACIER DOUX," ECOLE CENTRALE DE LYON, LYON, THESE DE DOCTORAT 1994
- [25] AMINE HATALI CARACTERISATION ET MODELISATION THERMO-MECANQUES DES ASSEMBLAGES METAL-CERAMIQUE ELABORES PAR THERMOCOMPRESSION L'ECOLE CENTRALE DE LYON ANNEE 2009.
- [26] FLAVENOT (J.F.). - LES CONTRAINTES RESIDUELLES INDUITES PAR TRAITEMENT MECANIQUE DE SURFACE. REVUE DE METALLURGIE CIT/SGM, 94, N° 2 (1997), P. 187-197.
- [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.

## **Chapitre II : Les contraintes résiduelles dans les bimatériaux.**

[29] H. DE BRUIN, A. MOODIE, AND C. WARBLE, GOLD BULL, NO. 5, PP. 62-64, 1972.

[30] H. DE BRUIN, A. MOODIE, AND C. WARBLE, GOLD BULL, NO. 5, PP. 62-64, 1972.

[31] R. ALLEN AND W. BORBIDGE, J. MATER.SCIEN, VOL. 18, PP. 2835-2843, 1983.

[32] B. MBONGO, "LIAISONS METAL-CERAMIQUE PAR THERMOCOMPRESION, INFLUENCE DE L'ETAT INITIAL DES MATERIAUX ET DE LA PRESSION PARTIELLE D'OXYGENE," ECOLE CENTRALE DE LYON, LYON, THESE DE DOCTORAT 1991

[33] D. JOSHUA ET AL., J.EURO.CERA.SOC, VOL. 26, PP. 363-372, 2006.

## **Chapitre III**

### **La rupture des bimatériaux.**

## Chapitre III : La rupture des bimatériaux.

### III.1 Introduction :

Actuellement, l'analyse des structures endommagées ou fissurées, soumises aux chargements statiques ou dynamiques, prend une grande importance. La présence de discontinuités dans ces structures : les fissures, les interfaces, les inclusions et les vides posent des problèmes par leurs singularités lors de sa modélisation numérique. Plusieurs méthodes de modélisation sont proposées par les chercheurs parmi lesquelles on distingue la méthode des éléments finis utilisant le code de Calcul ABAQUS, les structures composées de plusieurs matériaux (structures multi-matériaux) sont actuellement de plus en plus utilisées dans diverses applications industrielles telles que les bi-matériaux et les composites céramiques, ... etc. Quelle que soit l'application visée, la tenue de ces structures bi-matériaux ne peut être assurée que si la cohésion est préservée le long des interfaces qui sont considérées minces comparées à la taille des structures étudiées.

La présence des défauts dans ces structures comme les microfissures ou les pores peuvent compliquer la modélisation de ces derniers. Donc, contrairement au comportement des mono-matériaux, le changement brusque des propriétés mécaniques à l'interface est une source de défaillance et un mécanisme d'échec typique [1]. Et d'autre part ces interfaces restent souvent comme une région critique, ce qui limite les performances globales de ces structures.

### III.2 La rupture des bimatériaux :

Localement, la rupture est caractérisée par la séparation irréversible d'un milieu continu ( $\Omega$ ) en deux parties distinctes [2]. On définit alors une fissure dans un milieu continu comme elle est représentée sur la figure III.1.

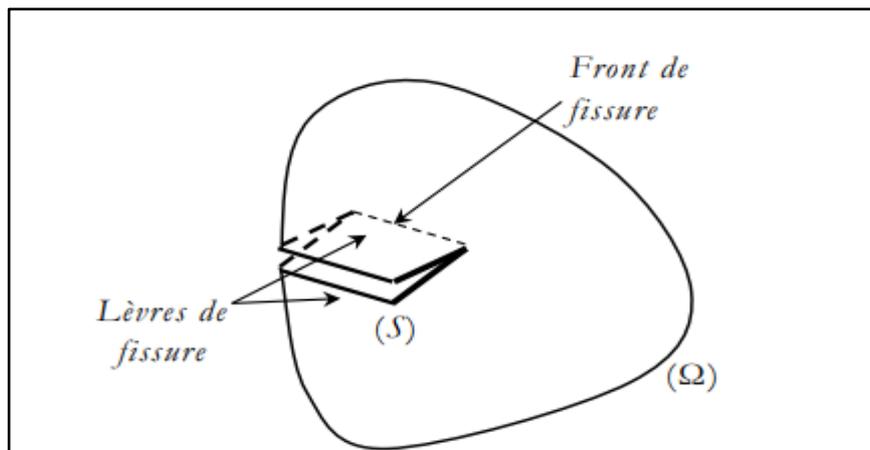


Figure III. 1: Fissure dans un milieu continu. [2]

D'un point de vue purement cinématique, on peut définir trois modes de ruptures comme

## Chapitre III : La rupture des bimatériaux.

Sur la figure III.2 :

- Mode I ou mode d'ouverture : le déplacement est perpendiculaire au plan de la fissure.
- Mode II ou mode de cisaillement plan : le déplacement est parallèle au plan de la fissure et normal au front.
- Mode III ou mode de cisaillement anti plan : le déplacement est parallèle au plan de la fissure et parallèle au front.

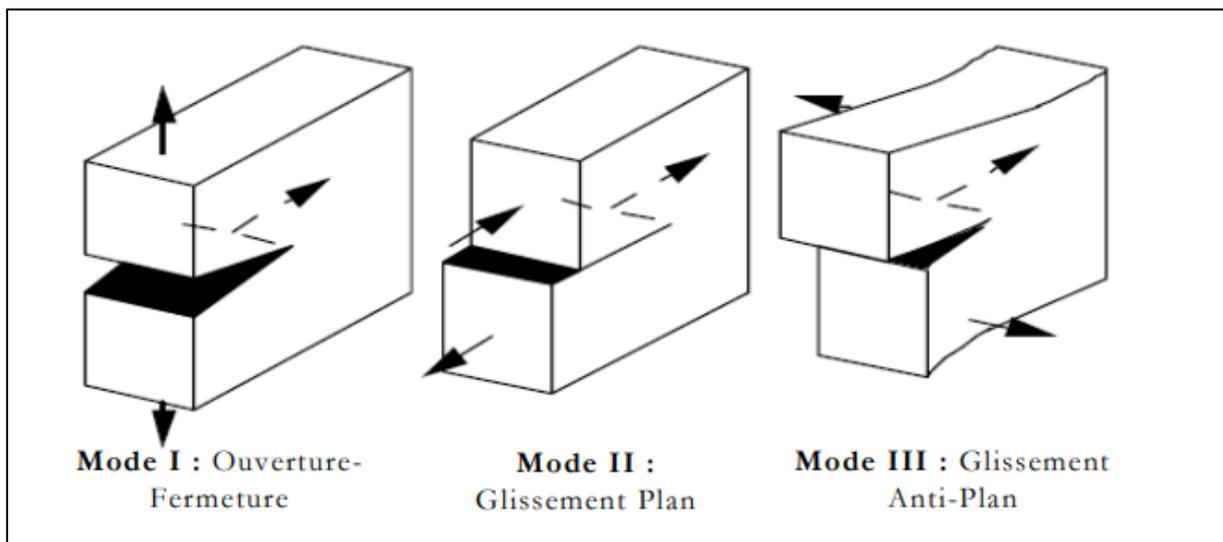


Figure III. 2: Les trois modes de ruptures. [2]

Le cas réel est une superposition de ces modes, autrement dit le mode mixte.

### III.3 Interaction fissure-interface :

Le phénomène d'interaction fissure - interface peut être rapproché au mécanisme de déviation d'une fissure dans un matériau présentant une hétérogénéité des propriétés élastiques et des caractéristiques de rupture. La présence d'une fissure au voisinage ou dans l'interface d'un bimatériau peut éviter la rupture catastrophique du matériau en favorisant la déviation des fissures [3].

Des efforts ont été entrepris pour analyser la déviation d'une fissure par une interface [4,5] Les premières études des phénomènes d'interaction fissure -interface datent de 1963 avec Zack et Williams [6], Ces auteurs ont résolu le problème de singularité en pointe d'une fissure perpendiculaire à l'interface dont la pointe se termine à l'interface. Ils ont étudié la détermination de la puissance de singularité pour diverses combinaisons de matériaux. Sur la base des travaux de Zack et Williams, plusieurs travaux ont été menés par Cook et Erdogan

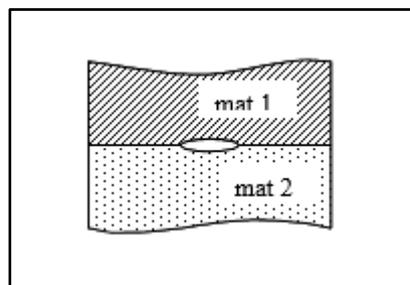
### Chapitre III : La rupture des bimatériaux.

[7] ; Erdogan et Biricikoglu [8]. Ces auteurs ont déterminé le champ de contraintes ainsi que le facteur d'intensité de contraintes en pointe de fissure, loin et au voisinage de l'interface.

La propagation d'une fissure se propageant dans une structure bimatériaux est influencée par de nombreux paramètres tels que le rapport des modules d'Young des deux matériaux, la nature du contact entre les matériaux. Sih en 1964 [9], Erdogan en 1965 [10], puis Comninou en 1977 [11], ont été parmi les premiers à étudier la mécanique de la rupture au voisinage d'interfaces entre deux matériaux. Toutes les formulations obtenues alors sont analytiques ; elles sont intéressantes dans la mesure où elles peuvent nous donner une idée de la singularité en pointe de fissure. Malheureusement, elles sont difficilement utilisables car elles sont restreintes à des géométries assez simples, et bien souvent pour des matériaux purement élastiques.

Lorsque l'on étudie la rupture dans des structures bi matériaux, on différencie deux types de fissure dont les comportements à la rupture sont différents : les fissures dans le plan de l'interface, et celles qui sont perpendiculaires ou inclinées par rapport à l'interface

#### III.3.1 Fissure dans le plan de l'interface :



**Figure III. 3:** Fissure dans le plan de l'interface. [9]

Les études réalisées sur ce type de fissures ont montré que, dans le cas de deux matériaux isotropes, la singularité du champ de contraintes en pointe de fissure reste d'ordre  $\frac{1}{2}$ , comme c'était le cas pour un matériau homogène.

Les formulations analytiques proposées sont restreintes à des configurations géométriques simples, et font intervenir une constante  $\epsilon$ , appelée constante bi-élastique. Cette constante dépend du type de configuration (déformation plane ou contrainte plane), des coefficients de Poisson de chaque matériau, et du module de cisaillement de chaque matériau [9].

### Chapitre III : La rupture des bimatériaux.

$$\varepsilon = \frac{1}{2\pi} \log \left[ \frac{\frac{\kappa_1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2}}{\frac{\kappa_2}{\mu_2} + \frac{1}{\mu_1}} \right] \quad \text{Où} \quad \begin{cases} \kappa_i = 3 - 4\nu_i & \text{En déformations planes} \\ \kappa_i = \frac{3 - \nu_i}{1 + \nu_i} & \text{En contraintes planes} \\ \nu_i & \text{Coefficient de Poisson du matériau } i \\ \mu_i & \text{Module de cisaillement du matériau } i \end{cases}$$

#### III.3.2 Fissure perpendiculaire ou incliné au plan de l'interface :

Les études portant sur le comportement d'une fissure perpendiculaire au plan de l'interface se décomposent généralement en trois catégories :

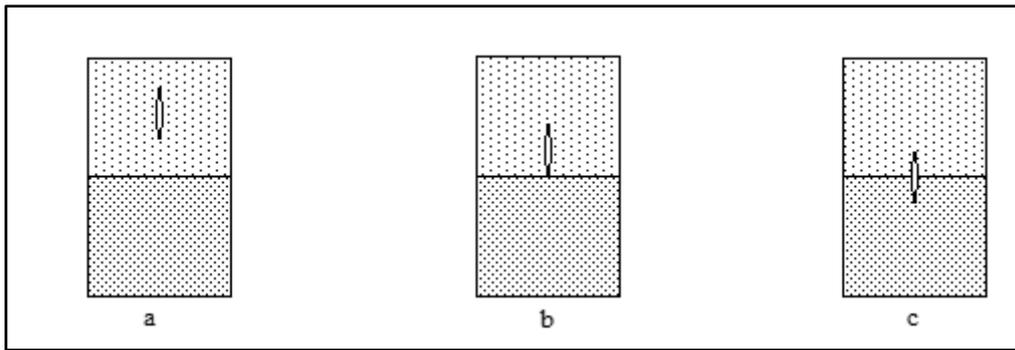
- Une fissure n'ayant pas atteint l'interface (Figure III.4.a) : il est possible d'exprimer les facteurs d'intensité de contraintes en fonction des paramètres classiques (module de cisaillement du matériau dans lequel se trouve la fissure, coefficient de Poisson, etc...), mais aussi à partir d'une fonction  $f(r)$ ,  $r$  étant la distance par rapport à la pointe de fissure. Cette fonction ne peut être déterminée analytiquement que pour des cas classiques et simples, ou elle peut être approchée numériquement comme nous le verrons par la suite ;
- Une fissure dont la pointe est au droit de l'interface (Figure III.4.b) : les facteurs d'intensité de contraintes prennent la forme suivante [12] :

$$K_1 = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2} \mu^* r^\omega f(r)$$

Par rapport à la pointe de fissure,  $\mu^*$  est un paramètre dépendant des modules de cisaillement et des coefficients de Poisson des deux matériaux,  $f(r)$  est une fonction de  $r$  de la configuration géométrique et  $\omega$  est la nouvelle puissance de la singularité en pointe de fissure. En effet, lorsque la fissure est au droit de l'interface, la singularité ne vaut plus  $\frac{1}{2}$  (sauf si les deux matériaux ont le même module d'Young), mais elle varie entre 0 et 1 suivant le rapport des modules d'Young [13] ;

- Une fissure ayant traversé l'interface (Figure III.4.c) : dans ce cas, Lu et Erdogan [14] proposent de traiter le problème en considérant deux fissures situées de part et d'autre de l'interface. Là encore, la puissance de la singularité peut être différente de  $\frac{1}{2}$ , et la fissure a la possibilité de se propager le long de l'interface.

### Chapitre III : La rupture des bimatériaux.



**Figure III. 4:** a) fissure n'ayant pas atteint l'interface – b) fissure au droit de l'interface –c) fissure ayant traversé l'interface. [12]

Toutes ces formulations analytiques étant restreintes aux géométries et aux matériaux idéaux, l'approche numérique, abordée à la fin des années 1970, semble préférable pour étudier des cas plus réalistes.

#### III.3.3 Fissure parallèle à l'interface :

Les fissures subinterfaciale ont été largement étudiées analytiquement, numériquement et même expérimentalement. Ces études ont montré que la nature de la singularité est liée à l'inter distance fissure - interface. En effet, une faible inter distance conduit à une singularité de type  $r^{-1/2+ie}$ .

Dans ce cas, les champs de contraintes et déplacements sont oscillatoires et l'étude du problème est équivalente à celle d'une fissure interfaciale. Loin de l'interface, le problème se réduit à l'étude d'un matériau homogène dont la singularité des contraintes est de forme  $r^{-1/2}$

En déterminant le facteur d'intensité de contraintes d'une fissure subinterfaciale, Hutchinson [15] a montré que pour de très courtes distances comparées à la taille de la fissure, le facteur d'intensité de contraintes est équivalent à celui d'une fissure interfaciale (de nature complexe).

Dans le cas d'un essai de cisaillement le champ de contraintes dépend non seulement de l'inter distance fissure – interface mais également des deux paramètres de Dundurs  $\alpha$  et  $\beta$  [16].

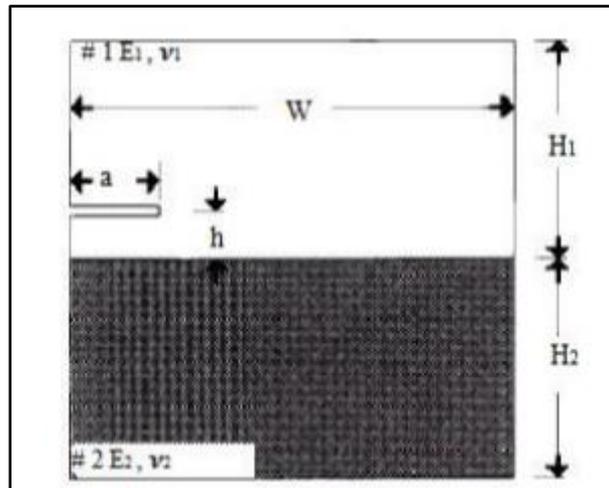
Cette étude montre que loin de l'interface, l'effet d'interaction caractérisé par un facteur d'intensité de contraintes nul en mode I ( $K_I = 0$ ) disparaît. Lu et Lardner [17] ont montré numériquement que, loin de l'interface le facteur d'intensité de contraintes et le taux de restitution d'énergie normalisés tendent vers l'unité, ceci montre que l'effet d'interaction est négligeable. D'autres travaux [18] confirment ces résultats. En effet, l'énergie de rupture

### Chapitre III : La rupture des bimatériaux.

d'une fissure est invariable loin de l'interface et cette énergie augmente doublement au voisinage proche de l'interface. Beom et Atluri [19], Chai et Earmme [20] ont observé que, pour une distance égale à 4 fois la taille de la fissure le facteur d'intensité de contraintes normalisé en mode I tend vers l'unité ; celui correspondant en mode II s'annule. Huang et Kardomateas [21] ont confirmé ce comportement pour un chargement en mode mixte. En généralisant leur étude en mode III, Chai et Earmme [21], Kwon et al [22] ont montré que loin de l'interface, la variation de  $K_{III}$  se stabilise à une distance égale à 6 fois la taille de la fissure.

- Facteur d'intensité de contraintes et taux de restitution d'énergie :

Pour déterminer le facteur d'intensité de contraintes et le taux de restitution d'énergie, on considère une fissure subinterfaciale d'un bimatériau. L'inter-distance fissure – interface est notée par  $h$  (Figure III.5).



**Figure III. 5:** Fissure subinterfaciale au sein d'un bimatériau. [22]

Pour la configuration représentée sur la figure III.11, Hutchinson [15] a exprimé le facteur d'intensité de contraintes par :

$$K_1 + iK_2 = \left( \frac{1 - \beta^2}{1 + \alpha} \right) K h^{i\varepsilon} e^{i\omega}$$

Où :

$h$  : est la distance entre la fissure et l'interface ;

$\omega$  : est un angle dont les valeurs sont comprises entre  $-15^\circ$  et  $5^\circ$ , il dépend des paramètres de Dundurs  $\alpha$  et  $\beta$ .

### Chapitre III : La rupture des bimatériaux.

$\varepsilon$  : est la constante biélastique.

Ainsi, l'énergie de rupture s'exprime par :

$$G = \frac{1}{E_2} \left( \frac{k_1^2}{K_2^2} \right) \frac{1-\beta^2}{E_*} |K^2|$$

En se basant sur la définition de Hutchinson [15], Choi et Earmme [20] et Kwon et al [22] ont exprimé le facteur d'intensité de contraintes pour un rapport  $h/a=0,01$  par :

$$|K| = \sigma \left( \sqrt{\frac{\pi a}{2}} \right) (1 + 4\varepsilon^2)$$

Avec :  $|K| = k_1^2 + K_2^2$

$$K_1 = \left[ \frac{1-\beta^2}{1+\alpha} \right]^{1/2} |K|. \cos \Psi$$

$$K_2 = \left[ \frac{1-\beta^2}{1+\alpha} \right]^{1/2} |K|. \sin \Psi$$

$\sigma$  : est la contrainte appliquée et  $\Psi$  est l'angle de déphasage, défini par :

$$\Psi = \tan^{-1} \left( \frac{K_2}{K_1} \right) = 2\varepsilon + \omega + \varepsilon \cdot \ln \left( \frac{h}{a} \right)$$

### Références bibliographiques Chapitre III:

- [1] HUTCHINSON, J.W., SUO, Z., MIXED MODE CRACKING IN LAYERED MATERIALS, IN: HUTCHINSON JW, WU TY (EDS) ADVANCES IN APPLIED MECHANICS, 1992, P-63–191
- [2] GREGOIRE, D., INITIATION, PROPAGATION, ARRET ET REDEMARRAGES DE FISSURE SOUS IMPACT. THESE DE DOCTORAT, SOUTENUE LE 24 OCTOBRE 2008 A INSA-LYON, FRANCE.
- [3] R. NASLAIN. FIBRE–MATRIX INTERPHASES AND INTERFACE IN CERAMIC MATRIX COMPOSITE PROCESSED BY CVI. COMPOSITE INTERFACE, VOL.1, N°3, PP.253-286,1993.
- [4] M.Y. HE. AND J.W. HUTCHINSON. CRACK DEFLECTION AT AN INTERFACE BETWEEN DISSIMILAR ELASTIC MATERIALS, INTERNATIONAL JOURNAL OF SOLIDS AND STRUCTURE VOL.25, PP. 1053–1067, 1989.
- [5] D. MARTINEZ. AND V. GUPTA. ENERGY CRITERIUM FOR CRACK DEFLECTION AT AN INTERFACE BETWEEN TWO ORTHOTROPIC MEDIA, JOURNAL OF MECHANICS AND PHYSICS SOLIDS VOL.2, PP.1247–1271,1994.
- [6] A.R. ZAK. AND M.L. WILLIAMES. CRACK POINT STRESS SINGULARITIES AT BIMATERIAL INTERFACES, J. APPL. MECH., VOL.30, P.142, 1963.
- [7] T.S. COOK .AND F. ERDOGAN. STRESS IN BONDED MATERIALS WITH A CRACK PERPENDICULAR TO THE INTERFACE, INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCE VOL.10 PP. 677– 697, 1972.
- [8] F. ERDOGAN. AND V. BIRICIKOGLU. TWO BONDED HALF PLANES WITH A CRACK GOING THROUGH THE INTERFACE., INT. J. ENGNG. SC. VOL.11, PP.745-766, 1973.
- [9] G.C.SIH, J.R. RICE – THE BENDING OF PLATES OF DISSIMILAR MATERIALS WITH CRACKS, J. APPL. MECH., PP. 477-482, 1964.
- [10] F. ERDOGAN – STRESS DISTRIBUTION IN BONDED DISSIMILAR MATERIALS WITH CRACKS, J.APPL. MECH., 32, PP. 418, 1965.
- [11] M. COMNINOU – THE INTERFACE CRACK, J. APPL. MECH., PP. 631-636, 1977

- [12] T.S. COOK ET F. ERDOGAN – STRESSES IN BONDED MATERIALS WITH A CRACK PERPENDICULAR TO THE INTERFACE, INT. J. ENGRG SC., VOL. 10, PP. 677-697, 1972.
- [13] X.B. ZHANG – ETUDE NUMERIQUE DE LA PROPAGATION DE FISSURES PAR LA MECANIQUE DE LA RUPTURE, THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE CLERMONT-FERRAND II, JUIN 1992.
- [14] F. ERDOGAN – STRESS INTENSITY FACTORS. J. OF APPL. MECH., VOL. 50, PP. 992-1002, 1983.
- [15] J.W. HUTCHINSON., M.E. MEAR. AND J.R. RICE. CRACK PARALLELING AN INTERFACE BETWEEN DISSIMILAR MATERIALS, J.APPL. MECH., VOL.54, PP.828-832, 1987.
- [16] M. YANG AND K.S. KIM. THE BEHAVIOR OF SUBINTERFACE CRACKS WITH CRACK-FACE CONTACT. ENGINEERING FRACTURE MECHANICS, VOL.60, N°1, PP. 155-165, 1993.
- [17] H. LU AND T.J LARDNER. MECHANICS OF SUBINTERFACIAL CRACKS IN LAYERD MATERIAL. INT. JOURNAL OF SOLIDS AND STRUCTURES VOL.29, N°6, PP.669-688, 1992.
- [18] K.S. VENKATESHA, T.S. RAMAMURTHY AND B. DATTA GURU. A STUDY OF THE BEHAVIOUR OF SUBINTERFACE CRACKS IN BIMATERIAL PLATES. ENGINEERING FRACTURE MECHANICS, VOL.59, N02, PP.241-252, 1998.
- [19] H.G. BEOM, S.N. ATLURI. NEAR-TIP FIELDS AND INTENSITY FACTORS FOR INTERFACIAL CRACKS IN DISSIMILAR ANISOTROPIC PIEZOELECTRIC MEDIA, INT. J. FRACT. VOL.75, PP. 163-183, 1996.
- [20] S.Y. CHOI ET Y.Y EARMME. AN ALTERNATING TECHNIQUE FOR SOLVING SUBINTERFACE CRACK PROBLEMS. INT.J. OF FRACTURE 78: R61-R69, 1996.
- [21] H. HUANG ET G.A. KARDOMATEAS. MIXED MODE STRESS INTENSITY FACTORS FOR CRACKS LOCATED AT OR PARALLEL TO THE INTERFACE IN BIMATERIAL HALF PLANES. INT. JOURNAL OF SOLIDS AND STRUCTURES, VOL.38, PP. 3719-3734, 2001.

[22] Y. S. KWON, S.R. CHOI ET Y.S. CHAI. PROCEEDING OF THE KSME FALL ANNUAL MEETING, PP.73-78, 1994.

## **Chapitre IV**

### **Analyse numérique**

### **Résultats et discussions.**

## Chapitre IV : Analyse numérique, Résultats et discussion.

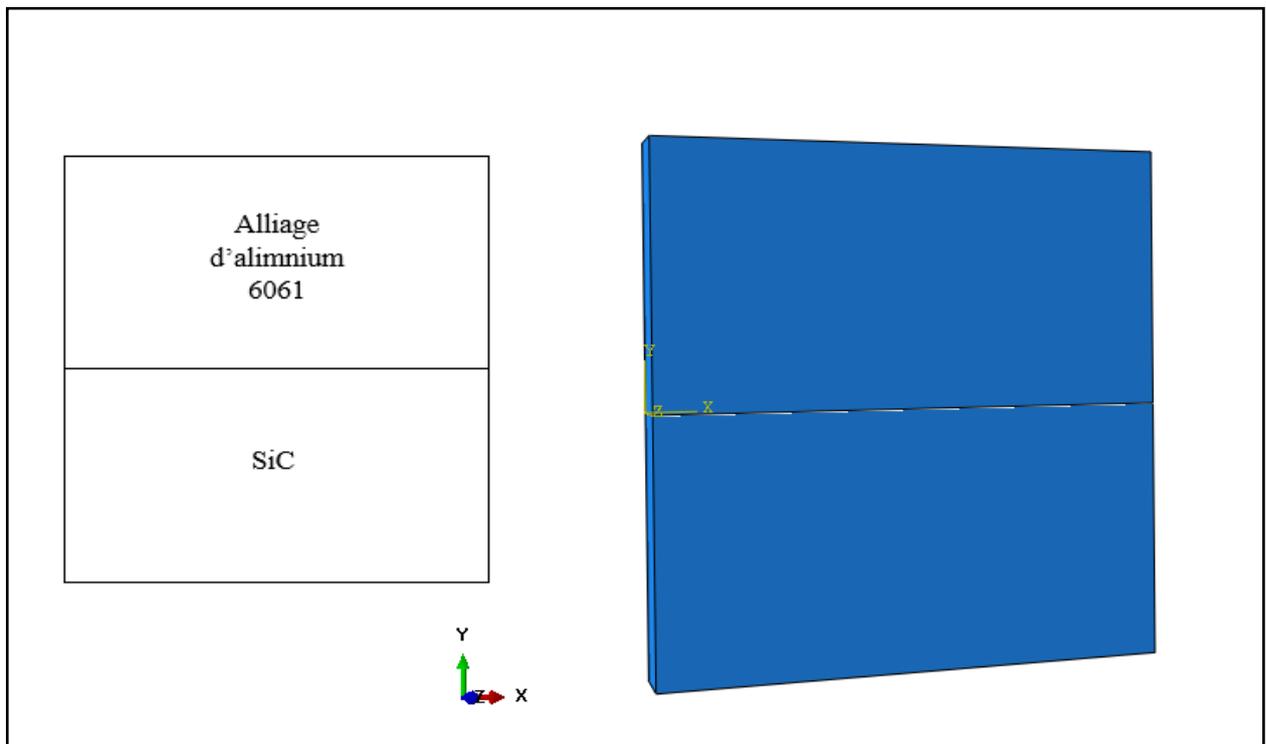
### IV.1 Introduction :

Les recherches actuelles effectuées au cours des dernières décennies ont concentré sur l'assemblage de deux matériaux, plusieurs auteurs ont développé différentes méthodes afin de modéliser le comportement des fissures.

L'objectif de ce travail est d'étudier et analyser le comportement des fissures dans un bi matériaux l'alliage d'aluminium 6061 assembler avec une céramique Carbone de Silicium "SiC" utilisant la méthode des éléments finis fournie par le code de calcul Abaqus pour une modélisation complète, dans cette étude on va examiner notre modèle avec la méthode des éléments finis afin de déterminer le facteur d'intensité des contraintes en fonction de la taille des fissures, les charges appliquées... etc.

### IV.2 Modèle géométrique étudié :

Le **Figure IV.1** présente le modèle numérique d'un assemblage de bi matériaux **Al6061/SiC** développé pour cette étude. Cet assemblage de largeur (1 mm), de hauteur (1 mm) et d'épaisseur (0.1 mm) soumis à des efforts de traction uni axiale d'amplitude  $\sigma$ .



**Figure IV. 1:** Modèle tridimensionnelle étudié.

- **L'alliage d'aluminium 6061 :**

## Chapitre IV : Analyse numérique, Résultats et discussion.

L'alliage 6061 est un alliage d'aluminium durci par précipitation, les principaux éléments de cet alliage sont le magnésium et le silicium. Il a été mis au point en 1935 [1]. Il présente de bonnes propriétés mécaniques, une bonne soudabilité et est très couramment extrudé [2]. Il s'agit de l'un des alliages d'aluminium les plus courants pour un usage général.

Eléments	Quantité (% wt)
Aluminium	96.85
Magnésium	0.9
Silicium	0.7
Fer	0.6
Cuivre	0.30
Chrome	0.25
Zinc	0.20
Titane	0.10
Manganèse	0.05
Autres	0.05

**Tableau IV. 1:** Composition chimique de l'alliage Al 6061 [3].

### - Carbure de silicium SiC :

Le carbure de silicium (SiC) est le nom générique d'un matériau produit par de nombreux procédés qui donnent lieu à une multitude de microstructures externes et internes différentes et, par conséquent, à un large éventail de propriétés. Dans un cristal de SiC, les atomes de Si et de C forment des liaisons covalentes tétraédriques très fortes, grâce au partage de paires d'électrons dans des orbitales hybrides  $sp^3$ . Les propriétés du SiC qui en résultent permettent une grande variété et un grand nombre d'applications, en particulier dans des conditions difficiles. [4]

### IV.2.2 Modélisation par élément finis :

Une simulation par élément finis par le code de calcul Abaqus nous a permis de déterminer le coefficient d'intensité de contraintes **KIC** dans ce type d'assemblage, et faire une comparaison entre 4 modèles :

- Modèle 1 : on a créé une fissure de  $4 \mu\text{m}$  et appliqué 3 forces de traction différentes (50 Mpa, 100 Mpa, 150 Mpa).

## Chapitre IV : Analyse numérique, Résultats et discussion.

- Modèle 2 : on a créé 3 fissures différentes de (3  $\mu\text{m}$ , 4  $\mu\text{m}$ , 7  $\mu\text{m}$ ), et fixée la force de traction de 50 Mpa.
- Modèle 3 : on a créé une fissure de 4  $\mu\text{m}$  et appliqué une force de traction 50 Mpa sur les 4 cotés.
- Modèle 4 : on a créé une fissure inclinée de 4  $\mu\text{m}$  et appliqué 3 forces de traction différentes (50 Mpa, 100 Mpa, 180 Mpa).

### IV.2.2.1 Définition de code de calcul Abaqus :

**ABAQUS** est un logiciel de calcul en éléments finis développé par DASSAULT. Il est composé de trois produits qui sont : ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE. La gamme de logiciels d'ABAQUS est particulièrement réputée pour sa technologie, sa qualité et sa fiabilité. Elle s'est imposée comme partie intégrante des processus de conception de sociétés de renommée mondiale dans tous les secteurs industriels. ABAQUS offre les meilleures solutions pour des problèmes linéaires, non linéaires, explicites et dynamiques. Le logiciel fournit un environnement inégalé pour l'analyse par éléments finis, proposant un grand nombre d'alternatives aux opérations impliquant des fournisseurs et des produits multiples.

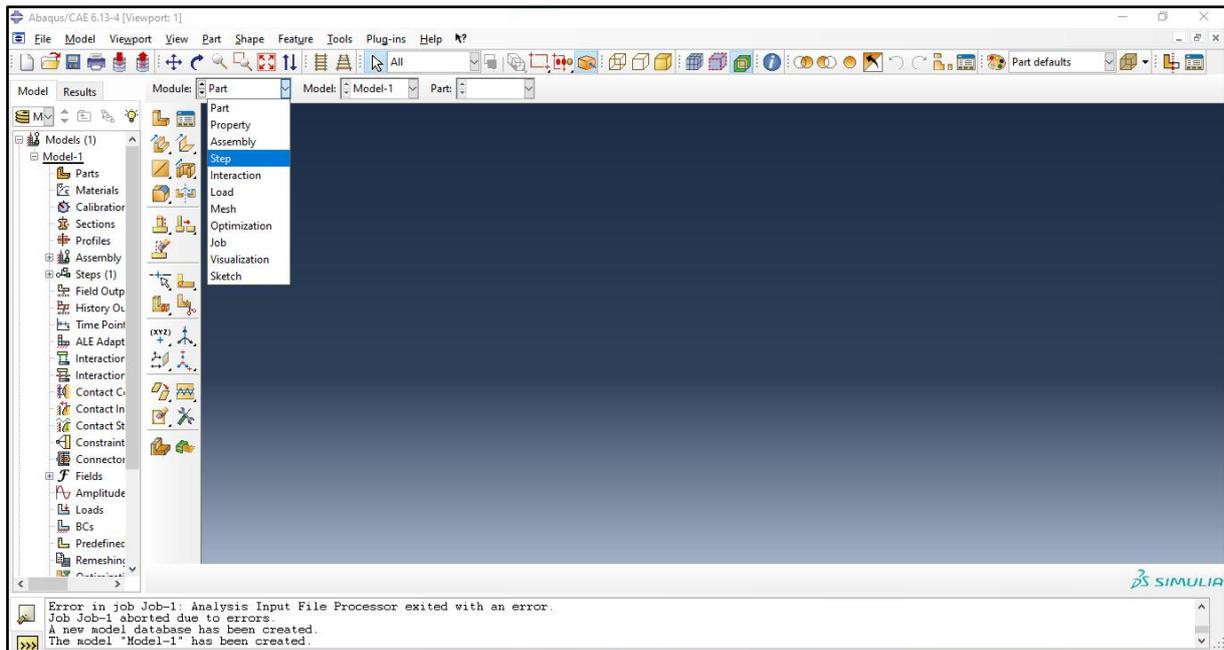
### IV.2.2.2 Réalisation d'un modèle par simulation numérique :

La réalisation de modèle par logiciel Abaqus s'effectue après un passage successif sur les étapes de réalisation

- **Part** : pour créer les parts de bimatériaux **l'alliage d'aluminium 6061** et **carbure de silicium** séparément, et en peut créer des fissures dans cette étape mais après avoir assemblé les deux parts.
- **Property** : Pour donner les propriétés de chaque matériaux (dans notre cas Module de Young et Coefficient de poisson).
- **Assembly** : Pour assembler les deux parts et avoir notre modèle bimatériaux.
- **Step** : Pour créer un step dans notre cas (Static, General)
- **Interaction** : pour montrer les interactions entre les deux parts ou bien sur le fond des fissures...etc.
- **Load** : Pour appliquer des charges soit traction compression...etc. dans notre cas on utilise traction et compression
- **Mesh** : pour faire un maillage sur le modèle

## Chapitre IV : Analyse numérique, Résultats et discussion.

- **Job** : pour lancer les calculs



**Figure IV. 2:** L'interface principale d'Abaqus.

### IV.2.2.3 Le maillage :

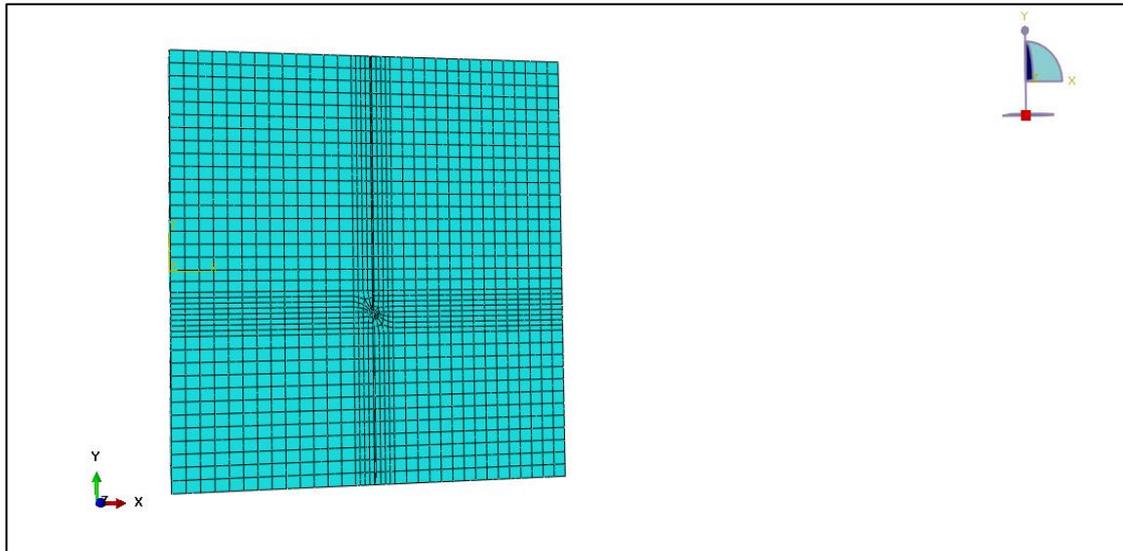
Par défaut, Abaqus/CAE génère des maillages avec des éléments linéaires, quadrilatéraux ou hexaédriques de premier ordre. Fusionnez les maillages de toutes les régions en un seul maillage. Généralement, Abaqus/CAE fusionne les nœuds le long des limites communes des régions voisines en un seul ensemble de nœuds.

On a utilisé un type d'élément quadratique pour les quatre modèles, et ce qu'il concerne le nombre d'élément a toujours été entre 7000 et 9000 éléments.

Il est important d'utiliser un maillage suffisamment raffiné surtout autour des fissures et à l'interface pour garantir que les résultats de la simulation Abaqus sont adéquats. Les maillages grossiers peuvent produire des résultats inexacts dans les analyses utilisant des méthodes implicites ou explicites.

Nous nous sommes concentrés sur le maillage parce qu'il est important et peut affecter les résultats, C'est pourquoi nous y avons travaillé bien et intensément pour obtenir de fiables bons résultats.

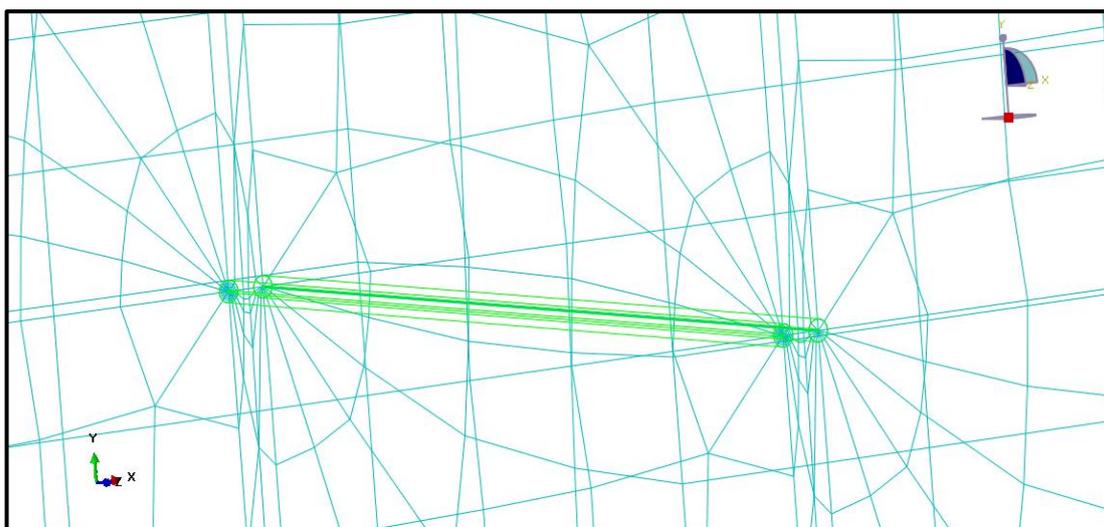
## Chapitre IV : Analyse numérique, Résultats et discussion.



**Figure IV. 3:** Maillage 3D de l'assemblage Al6061/SiC.

Un maillage peut être caractérisé par plusieurs éléments :

- Sa dimension : 3D.
- Son volume.
- Sa finesse : surface ou volume moyen des cellules.
- La géométrie des cellules.
- Le degré de l'élément, c'est-à-dire le degré du polynôme servant à décrire les côtés ou arêtes des éléments. Nous ne travaillerons qu'avec un degré 1, soit avec des arêtes rectilignes.



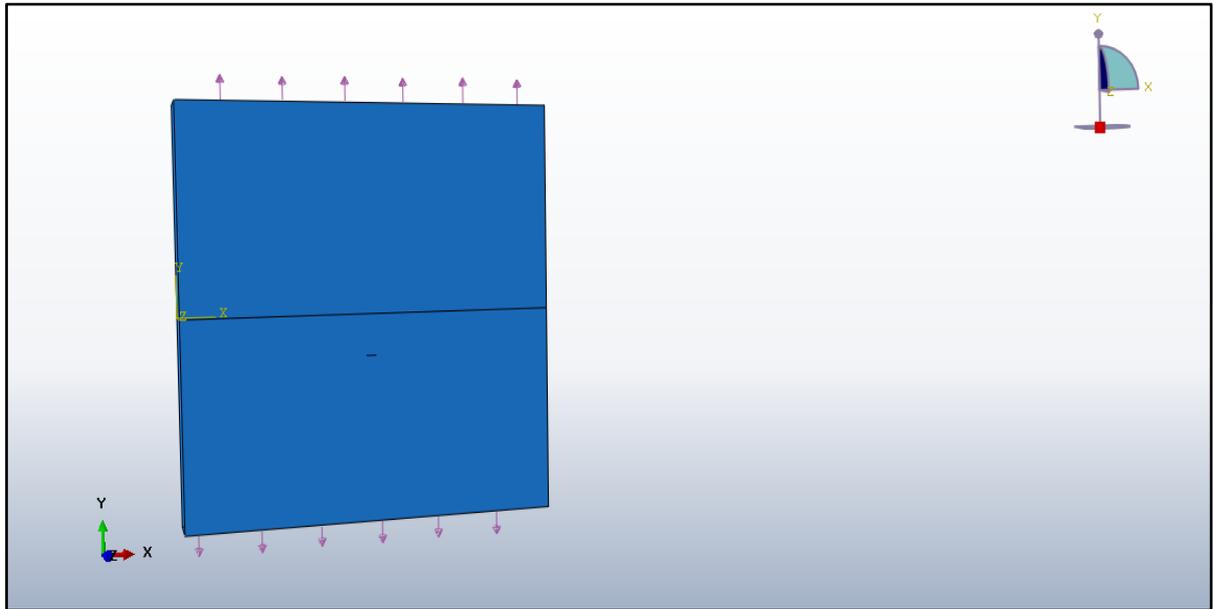
**Figure IV. 4:** Le maillage autour le fissure.

### IV.3 Résultats et discussions :

## Chapitre IV : Analyse numérique, Résultats et discussion.

### IV.3.1 Effet de chargement mécanique (traction) :

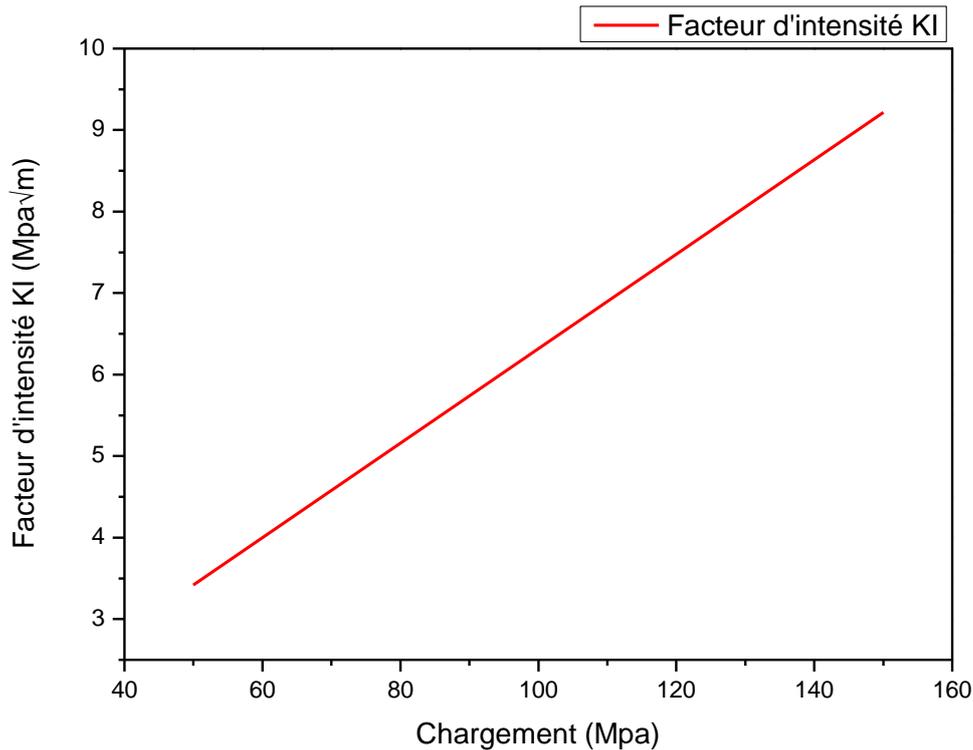
Dans cette étude on a traité trois exemples, nous pouvons dire que les trois sont similaires parce qu'on a fixé les dimensions de notre modèle et on a créé une fissure de 4 micromètres dans les trois exemples et nous les avons exposés à différents effets de chargement mécanique (traction) de 50 Mpa, 100 Mpa et 150 Mpa (figure IV.5), afin de calculer le KI (Coefficient d'intensité de contrainte) en fonction des charges appliquées pour avoir remarqué la variation de KI lors de changement de charge.



**Figure IV. 5:** le bimatériaux Al6061/SiC avec une fissure de 4  $\mu\text{m}$  exposé à un chargement de traction.

Le chargement mécanique est l'un des aspects clés de la simulation numérique par ABAQUS car il permet de modéliser et d'analyser la réponse d'une structure soumise à des forces comme la traction, et de prédire le comportement d'une structure sous différentes conditions de chargement, et aussi optimiser sa conception et d'assurer sa sécurité.

## Chapitre IV : Analyse numérique, Résultats et discussion.



**Figure IV. 6:** Variation de KI en fonction de chargement mécanique (traction).

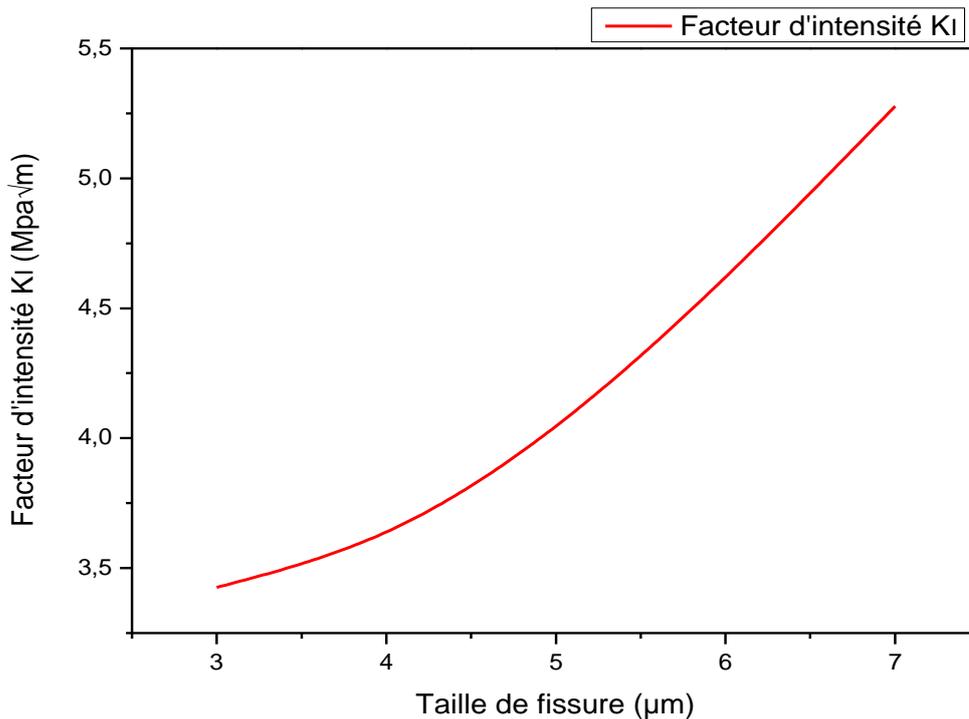
Le **Figure IV.6** Représente la variation de FIC KI mode d'ouverture en fonction des charges appliqué et on remarque qu'à chaque fois la valeur de charge est élevé la valeur de KI est plus grande.

### IV.3.2 Effet de la taille de la fissure :

Dans cette étude on a examiné trois exemples aussi et toujours on a fixé les dimensions de notre modèle mais nous avons remarqué l'effet de la taille de la fissure «  $a$  », en fixant la charge mécanique de traction sur 50 Mpa afin de déterminer le KI en fonction des tailles des fissures, pour avoir déterminer la variation de KI lors du changement des tailles des fissures.

La **Figure IV.7** Représente la variation de FIC KI mode d'ouverture en fonction des tailles des fissures (3  $\mu\text{m}$ , 4  $\mu\text{m}$ , 7  $\mu\text{m}$ ) et on remarque qu'à chaque fois la taille de fissure augmente la valeur de KI est plus grand.

## Chapitre IV : Analyse numérique, Résultats et discussion.



**Figure IV. 7:** Variation de KI en fonction des tailles des fissures.

L'étude numérique de l'effet de la taille de fissure des bimatériaux par Abaqus est important car il nous permet de modéliser le comportement mécanique des matériaux. Donc on peut mieux comprendre comment les fissures se propagent et comment cela influe sur le comportement global des bimatériaux. En plus il est aussi possible d'optimiser la conception des structures afin de minimiser les risques de propagation de fissures et contribuer à améliorer la durabilité et la fiabilité des produits.

D'outre Les études numériques peuvent également servir de base pour la validation expérimentale. En comparant les résultats des simulations avec des données expérimentales, on peut évaluer la précision et la validité des modèles numériques utilisés dans Abaqus.

Aussi, les études numériques permettent de réduire les coûts et le temps nécessaires à la réalisation d'essais physiques. En simulant l'effet de la taille de fissure avec Abaqus, on peut obtenir rapidement des informations précieuses sans avoir à construire et tester des prototypes physiques

## Chapitre IV : Analyse numérique, Résultats et discussion.

En résumé, on peut dire que l'étude numérique de l'effet de la taille de fissure des bi matériaux par Abaqus offre une meilleure compréhension du comportement des matériaux, permet l'optimisation de la conception, contribue à l'évaluation de la sécurité des structures.

### IV.3.3 Etude de l'orientation de la fissure :

L'orientation de la fissure aussi peut montrer une autre forme de résultats car elle nous permet de comparer le facteur d'intensité de contrainte en trois modes différents KI, KII et KIII, dans cette étude avec les mêmes dimensions du modèle précédent mais cette fois on a joué sur l'orientation, d'abord une fissure de 4  $\mu\text{m}$  parallèle à l'interface ( $0^\circ$ ) (figure IV.10), une fissure de 4  $\mu\text{m}$  inclinée par rapport à l'interface ( $45^\circ$ ) (figure IV.9) et une fissure de 4  $\mu\text{m}$  perpendiculaire à l'interface (figure IV.8).

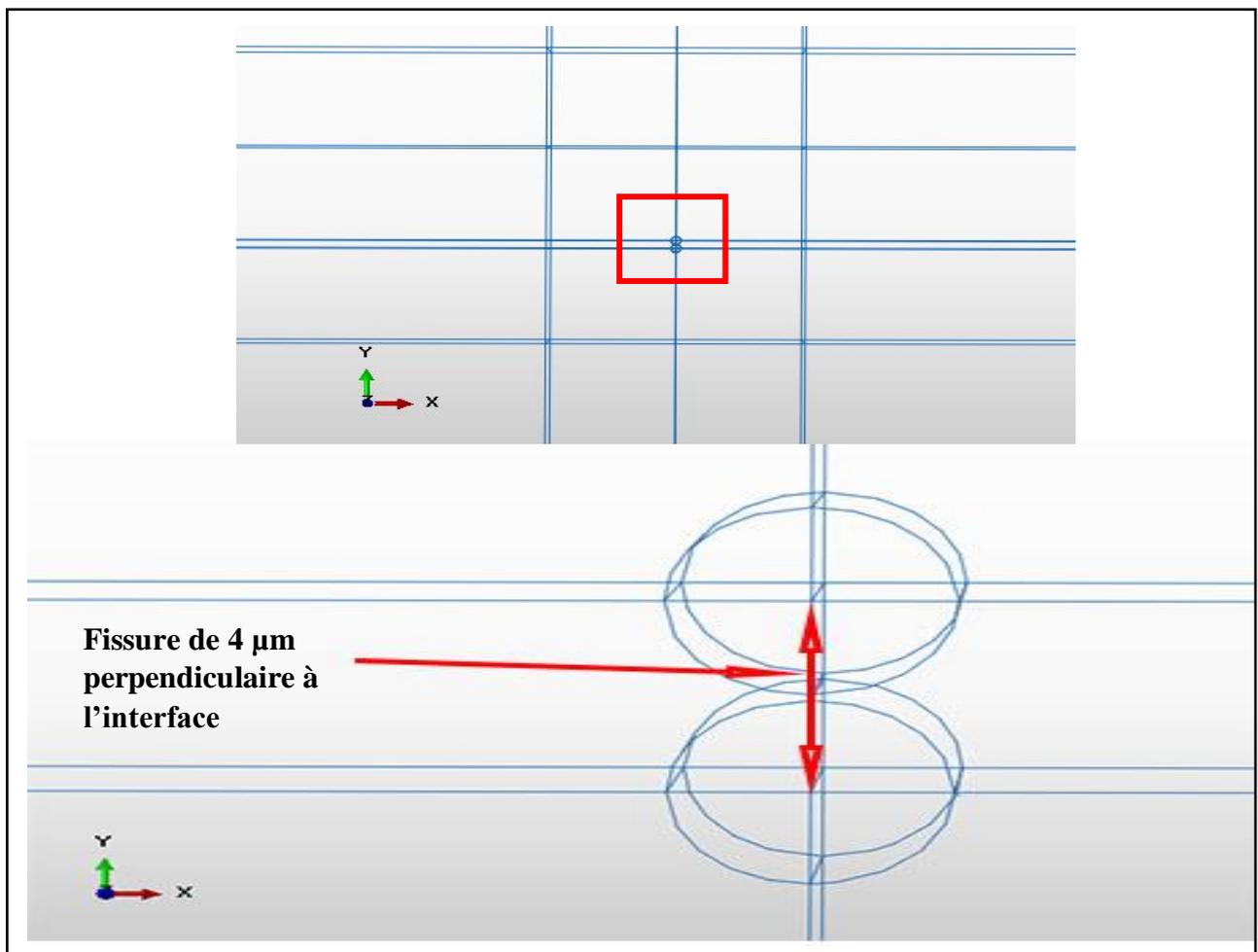


Figure IV. 8: Fissure de 4  $\mu\text{m}$  perpendiculaire à l'interface.

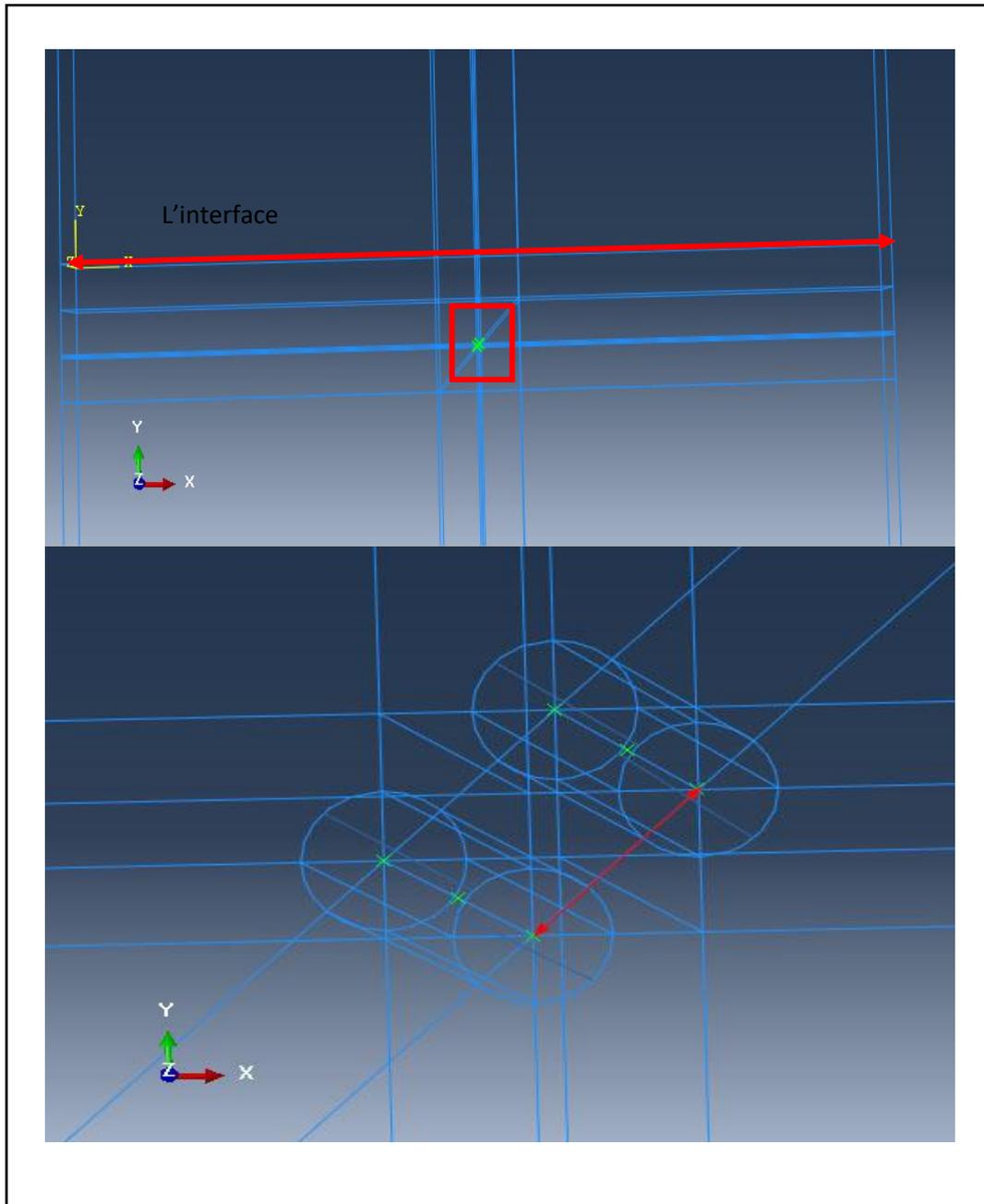
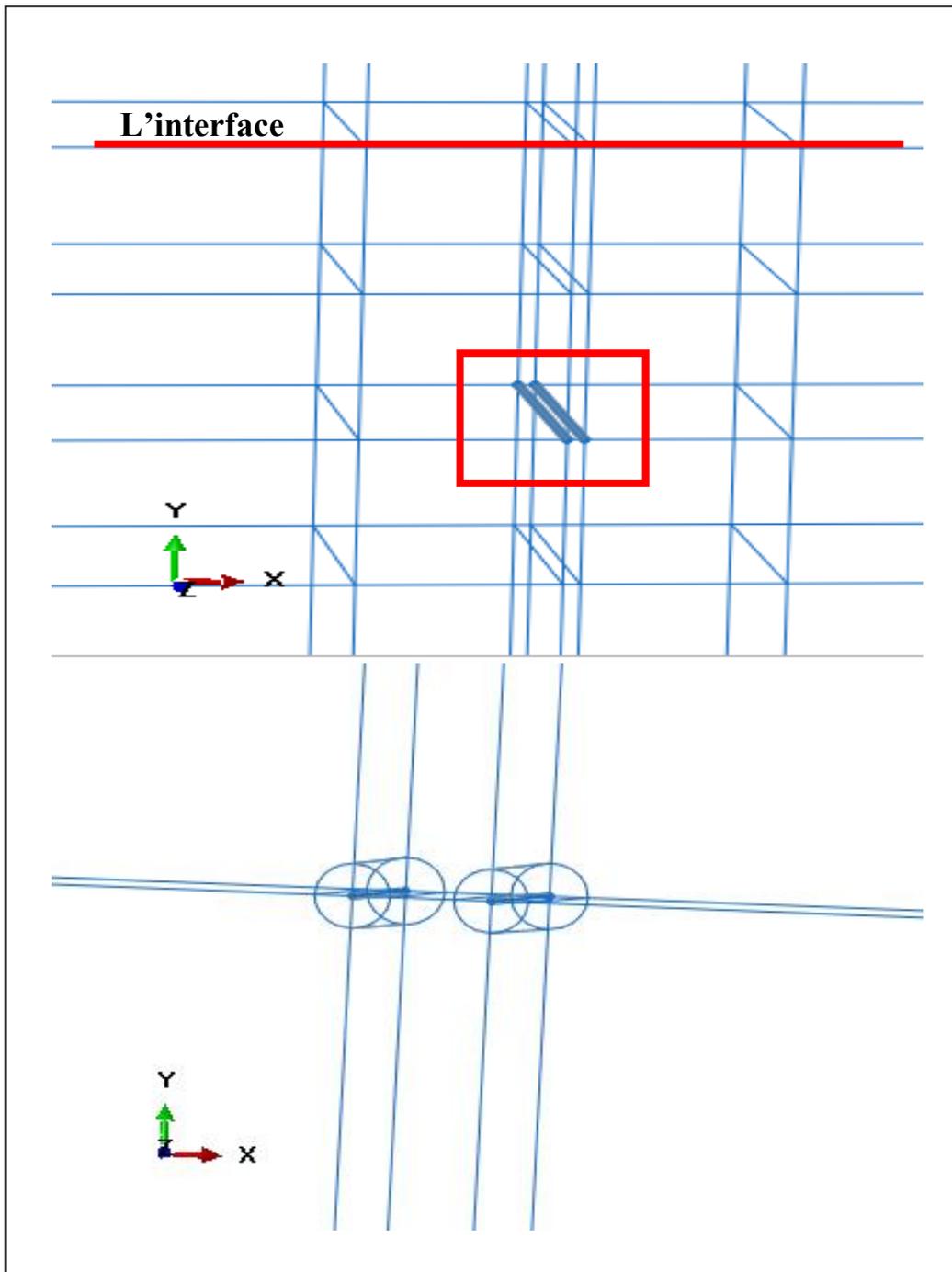


Figure IV. 9: Fissure inclinée de 4  $\mu\text{m}$ .

Les figures IV.8, IV.9 et IV.10 représente les 3 types des fissures qu'on a étudié, le but de cette étude et de voir le comportement du bimatériau Al6061/SiC Avec différents angles des fissures pour un chargement mécanique (traction) de 50 Mpa en fonction de la variation de facteur d'intensité.



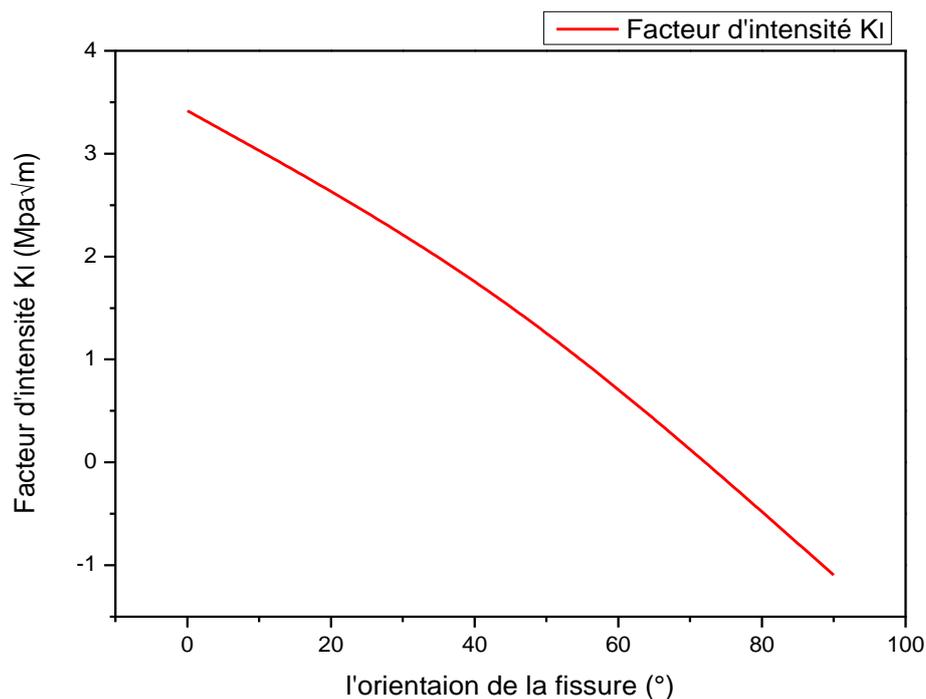
**Figure IV. 10:** Fissure de 4  $\mu\text{m}$  parallèle par rapport à l'interface.

L'orientation de la fissure peut avoir un impact significatif sur le comportement mécanique des bimatériaux. En étudiant numériquement l'effet de l'orientation de la fissure, on peut mieux comprendre comment cela influence la propagation de la fissure, la résistance mécanique et la stabilité de la structure. Cela permet d'obtenir des informations sur la fissure la plus dangereuse pour éviter la ruine fatale pour un tel assemblage.

## Chapitre IV : Analyse numérique, Résultats et discussion.

N'en seulement, prédire la trajectoire de propagation de la fissure dans les bimatériaux. Cela est particulièrement utile pour évaluer la durée de vie résiduelle des structures et pour prendre des décisions quant à la maintenance ou au remplacement de ces composants.

En outre, L'orientation de la fissure peut avoir des conséquences sur la sécurité des structures. Par exemple, dans les structures soumises à des contraintes cycliques, une orientation de fissure particulière peut entraîner une propagation rapide de la fissure et une défaillance prématurée. En utilisant Abaqus pour étudier numériquement l'effet de l'orientation de la fissure, on peut évaluer les risques potentiels et prendre des mesures pour prévenir les défaillances et comme pour l'étude de l'effet de la taille de fissure, l'utilisation d'Abaqus pour étudier l'effet de l'orientation de la fissure permet de réduire les coûts et le temps nécessaires à la réalisation d'essais physiques. Les simulations numériques offrent la possibilité d'explorer rapidement différentes configurations et de prévoir le comportement des matériaux sans avoir à construire et tester des prototypes physiques.

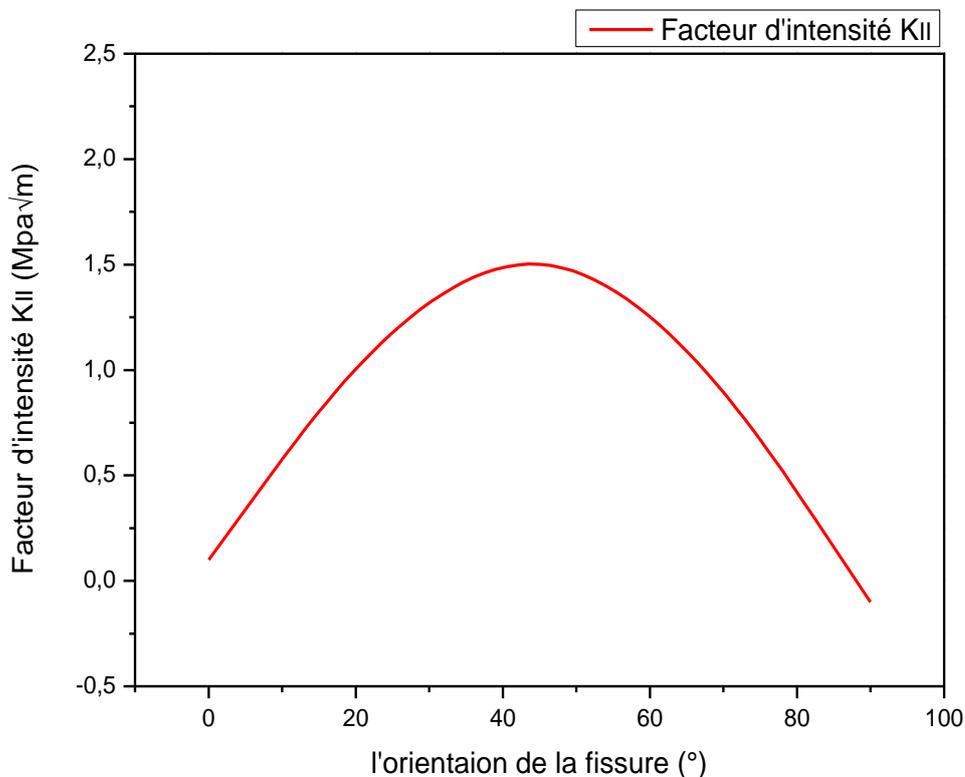


**Figure IV. 11:** La variation de KI en fonction de l'orientation de la fissure.

**La figure IV.11** présente la variation de FIC KI en fonction de l'orientation de la fissure et montre que le facteur d'intensité KI est plus grand quand la fissure est parallèle par rapport à

## Chapitre IV : Analyse numérique, Résultats et discussion.

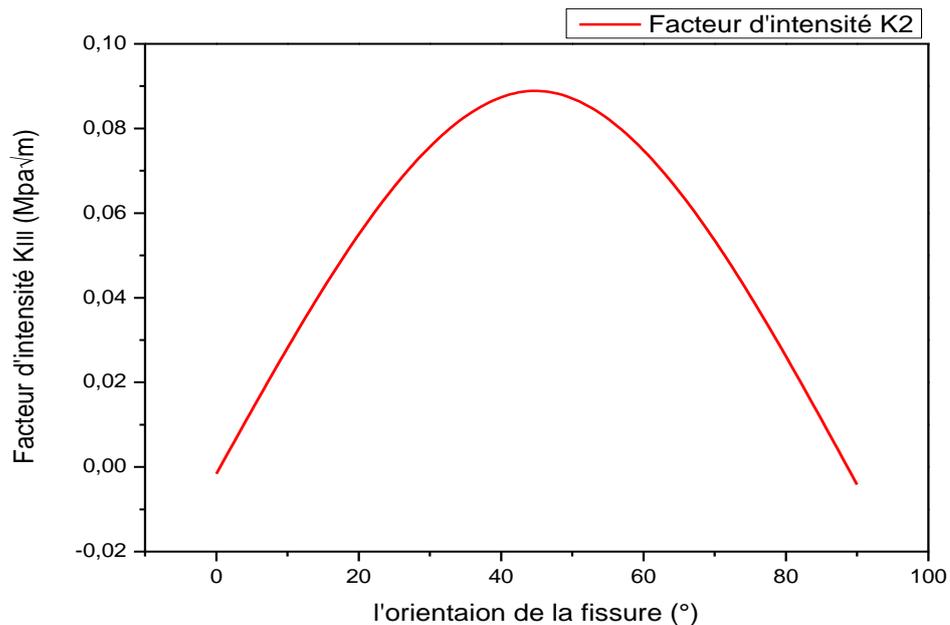
l'interface au contraire quand la fissure est perpendiculaire à l'interface est plus petit que zéro par ce qu'il est en mode de fermeture de fissure.



**Figure IV. 12:** la variation de  $K_{II}$  en fonction de l'orientation de la fissure.

Et Pour  $K_{II}$  nous notons que le facteur d'intensité  $K_{II}$  est proche de zéro dans les fissures parallèle et perpendiculaire au contraire dans la fissure inclinée ce qui nous donne la figure IV.12, les surfaces opposées de la fissure glissent l'une sur l'autre dans une direction perpendiculaire au front de fissure

## Chapitre IV : Analyse numérique, Résultats et discussion.



**Figure IV. 13:** La variation de K<sub>III</sub> en fonction de l'orientation de la fissure.

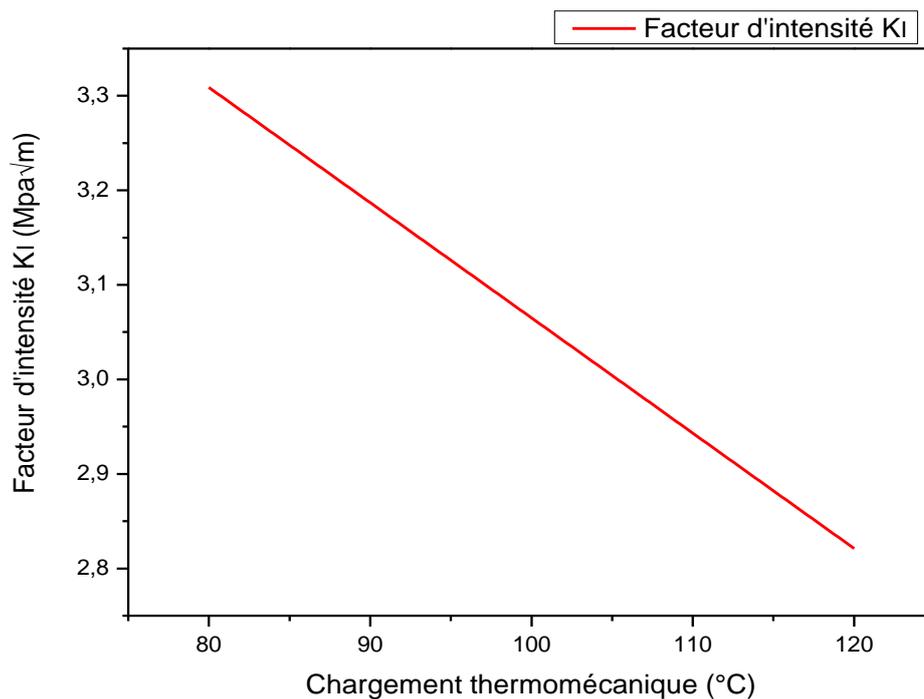
Le **K<sub>III</sub>** est un mode de déchirement (cisaillement anti-plan) où les surfaces opposées de la fissure se déplacent l'une par rapport à l'autre parallèlement au front de fissure, Comme le montre la **figure IV.13** on observe que le FIC **K<sub>III</sub>** dans la fissure inclinée est un peu plus grand par rapport à la fissure parallèle et perpendiculaire.

En conclusion, l'étude numérique de l'effet de l'orientation de la fissure du bimatériau par Abaqus permet de mieux comprendre le comportement des matériaux, de prédire la trajectoire de la fissure, d'évaluer la sécurité des structures, d'optimiser la conception et de réaliser des économies de coûts et de temps.

### IV.3.4 Effet de chargement thermomécanique :

Dans cette étude on a examiné trois exemples aussi et toujours on a fixé les dimensions de notre modèle mais nous avons étudié l'effet du chargement thermomécanique donc on a appliqué un chargement thermique de 80°C ,100°C, 120°C avec un chargement mécanique de traction 50 Mpa pour avoir la variation de KI entre les trois exemples.

## Chapitre IV : Analyse numérique, Résultats et discussion.



**Figure IV. 14:** La variation de  $K_I$  en fonction de chargement thermomécanique (Traction  $\sigma=50\text{Mpa}$ ).

**La figure IV.14** représente la variation de  $K_I$  en fonction de chargement thermomécanique, On a appliqué un chargement thermique de  $80^{\circ}\text{C}$ ,  $100^{\circ}\text{C}$  et  $120^{\circ}\text{C}$  sur les trois exemples avec un chargement mécanique de  $50\text{ Mpa}$  toujours. Et en remarque que, à chaque fois la température augmente la valeur de facteur d'intensité des contraintes diminué.

Lorsque l'augmentation de la température dans notre modèle, le FIC  $K_I$  diminue ce qui explique de la dilatation du métal et la compression de la céramique qui provoque la fermeture de la fissure.

#### **Références bibliographiques Chapitre IV :**

- [1] ROBERT E. SANDERS JR. (2001). "TECHNOLOGY INNOVATION IN ALUMINUM PRODUCTS". JOM. 53 (2):21–25. BIBCODE:2001JOM.53B..21S. DOI:10.1007/S11837-001-0115-7. S2CID 111170376.
- [2] "ALUMINUM ALLOYS". MATERIALS MANAGEMENT INC. 23 DECEMBER 2015. ARCHIVED FROM THE ORIGINAL ON 31 JULY 2016. RETRIEVED 2016-07-25.
- [3] SRINIVASAN EKAMBARAM, N. M. (2015). SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF ALUMINIUM ALLOY AA6061-ALUMINA METAL MATRIX COMPOSITE. INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY.
- [4] BALIGA, B.J., 2006. SILICON CARBIDE POWER DEVICES. SINGAPORE : WORLD SCIENTIFIC

## **Conclusion Générale :**

En conclusion, notre étude numérique du comportement d'un fissures dans un bimatériau à l'aide du logiciel Abaqus a fourni des informations précieuses sur plusieurs aspects clés. Nous avons réalisé quatre études distinctes pour approfondir notre compréhension du phénomène : l'étude du chargement mécanique en fonction de KI, l'étude de la taille de fissure en fonction de KI, l'étude de l'orientation de la fissure en fonction de KI, KII et KIII et finalement l'étude thermomécanique en fonction de KI.

Dans la première étude, nous avons examiné l'effet du chargement mécanique en variant les contraintes de traction à 50 MPa, 100 MPa et 150 MPa. Les résultats ont démontré que les contraintes appliquées ont un impact significatif sur la propagation de la fissure, avec une augmentation proportionnelle du facteur d'intensité de contrainte KI.

Dans la deuxième étude, nous avons analysé l'effet de la taille de fissure sur le facteur d'intensité de contrainte KI, en maintenant une contrainte de traction constante à 50 MPa. Les résultats ont mis en évidence une relation directe entre la taille de la fissure et le niveau de contrainte, avec une augmentation exponentielle du facteur d'intensité de contrainte lorsque la taille de fissure augmente.

Dans notre troisième étude, nous nous sommes concentrés sur l'effet de l'orientation de la fissure en considérant les facteurs d'intensité de contrainte KI, KII et KIII, toujours avec une contrainte de traction de 50 MPa. Les résultats ont révélé des variations significatives du comportement de la fissure en fonction de son orientation, mettant en évidence l'importance de prendre en compte ces paramètres dans l'analyse du bimatériau.

Enfin, la quatrième étude on a appliqué un chargement thermomécanique sur le bimatériau pour voir la variation de facteur d'intensité KI en fonction de changement de température et toujours avec une contrainte de traction 50 Mpa, les résultats explique la dilatation de métal et compression de céramique parce que la valeur de FIC KI diminue à chaque fois la température augmente.

Dans l'ensemble, ces études numériques nous ont permis de mieux comprendre le comportement d'une fissure dans un bimatériau et son interaction avec différents paramètres tels que le chargement mécanique, la taille de fissure, l'orientation de la fissure te chargement thermomécanique. Les résultats obtenus ont fourni des informations essentielles pour

l'optimisation de la conception, l'évaluation de la sécurité des structures et la prise de décisions éclairées concernant la maintenance et le remplacement des composants critiques.

Il convient de noter que notre travail de recherche présente certaines limites, notamment la simplification des modèles utilisés dans les simulations numériques et l'absence de validation expérimentale approfondie. Cependant, les résultats obtenus constituent une base solide pour des études ultérieures et des investigations plus approfondies.

En conclusion, cette étude numérique approfondie réalisée avec le logiciel Abaqus nous a permis d'acquérir de nouvelles connaissances sur le comportement d'une fissure dans un bi matériau. Les résultats obtenus ouvrent la voie à de nouvelles opportunités de recherche dans ce domaine et apportent des contributions significatives à l'ingénierie des structures et à la sécurité des matériaux.