



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DAHLEB BLIDA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE MECANIQUE

**Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master II en génie
mécanique**

Option : génie des matériaux

Thème :

**Analyse numérique des contraintes internes d'un
multi-matériau type Métal-céramique.**

Présenté par :

AZZOUG ELBACHIR

OTHMANI HOUSSAM

Encadré par : Dr RAMDOUM Sara

Année universitaire : 2020/ 2021

Remerciement

Tout d'abord nous remercions DIEU le tout puissant et miséricorde de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail, Bien qu'un travail soit individuel, plusieurs personnes ont rendu possible la réalisation de ce modeste travail, que nous tenons à remercier vivement :

* Dr RAMDOUM S. pour avoir accepté de diriger ce travail. Nous n'oublions jamais les précieux conseils scientifiques qu'elle nous a prodigué, sa patience et ces encouragements nous a été d'un apport scientifique et moral considérable.

*Le Président du jury qui a accepté d'examiner ce travail,

* Le Membre qui a bien voulu juger ce travail,

* Mes amis qui nous ont exhortés à achever ce travail,

* Nous tenons à exprimer notre gratitude envers tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation,

* Nos familles respectives pour nous avoir encouragés et soutenus pendant les moments les plus difficiles,

Résumé

Ce travail est consacré à une étude numérique tridimensionnelle, par la méthode des éléments finis, des niveaux et de la distribution des contraintes résiduelles dans le multi matériau Al₂O₃/NI/HAYNES. Ces contraintes d'origine thermique et mécanique sont généralement néfastes à la durée de vie en service de ce type de composé. Effet de la nature de chargement, de leur combinaison, des propriétés mécanique et physique du métal, de la température, ont mis en évidence..

Abstract:

This work is devoted to the three -dimensional numerical study by finite element method the stress levels and distribution in the multi materials Al₂O₃/NI HAYNES . These thermal and mechanical stresses are generally harmful to the lifespan in service of this kind of multi materials . Effect of the mechanical and physical propertés of métal and the température are highlighted. The results interpreted in termes of damage, we have identified areas of risk.

ملخص

يهدف هذا العمل دراسة رقمية ثلاثية الأبعاد باستعمال طريقة لأجزاء المنتهية لأظهار المستويات و توزيع الإجهاد التي نجدها في هذا النموذج المكون من Al₂O₃/NI HAYNES .

لقد أخذنا بعين الإعتبار في هذه الدراسة تأثير نوعية القوة المطبقة على هذا النموذج , الرابطة الموجودة بين المواد , الخواص الميكانيكية و الفيزيائية للمعدن , درجة الحرارة المستعملة لإنشاء هذه الرابطة بين المواد , مستوى التصاق بين المواد

Sommaire

Partie bibliographique

CHAPITRE I: élaboration des bi-matériaux

Introduction générale

I.1 Introduction	12
I.2 Élaboration des bi-matériaux.....	13
I.2.1. métallurgie des poudres	13
I.2.1.1 Procédés d'obtention des poudres	14
I.2.1.2Mélange des poudres	14
I.2.1.3Mise en forme	14
I.2.1.4Frittage	15
I.2.1.4.1. Différentes types de frittage	16
I.2.1.4.1.1 frittage naturel	16
I.2.1.4.1.2 frittage sous charge	16
I.2.2.ASSEMBLAGE	17
I.2.2.1.L'assemblage par soudage diffusion.....	17
I.2.2.2.L'assemblage par thermo compression.....	18
I.2.2.3. Le brasage.....	22
I.2.2.4.assemblages par la méthode de l'eutectique gaz-métal ..	24
I.3. Les domaines d'application typiques pour les assemblages céramique- métal	2

Chapitre II :

Contraintes internes dans les multi-matériaux.

II.1.Introduction.....	29
II.2. Ordres de contraintes résiduelles.....	29
II.3. Les contraintes résiduelles dans les assemblages métal/céramique	32
II.4. Méthode de détections des contraintes internes.....	32
II.4.1. Techniques diffractométriques	32
II.4.1.1. Limite de l'analyse diffractométrique	33
II.4.2. Mesures par indentation Vickers	33
II.4.3. Méthodes numériques	34
II.4.4. Comparaison des méthodes	36
II.5. solution pour diminuer les contrainte résiduelles dans les liaisons métal céramiques ...	38
II.6 .Contraintes thermiques.....	39

Sommaire

III.1. Introduction.....	44
III.2. Modélisation par éléments finis.....	44
III.2.1 Définition de logiciel de calcul par éléments finis ABAQUS.....	44
III.2.2 Les éléments utilisés par ABAQUS.....	45
III.2.3 Réalisation d'un modèle par simulation numérique	45
III.3 Présentation du modèle	46
III.4 Le maillage.....	48
III.5 Résultats et discussions.....	49
III.5.1. Effet du chargement Mécanique.....	49
III.5.2. Effet du chargement thermique	52
III.5.3. Effet de la nature du joint (chargement thermique)	57
III.5.4. Effet de l'épaisseur du joint	60
III.5.5. Effet du joint	62
III.6. Conclusion Générale	65

Liste des figures

chapitre 01 :

figure I.1 : Les principales étapes de la métallurgie des poudres.....	13
Figure I.2 : Atomisation - Séchage d'un liquide sous forme de poudre.....	14
Figure I.3 : La base du processus de fabrication par le frittage.....	15
Figure I.4 : Représentation schématique des étapes nécessaires au frittage naturel de bi-matériaux.....	16
Figure I.5 : frittage sous charge SPS/hip.....	17
Figure I. 6 : des exemples pour le soudage entre (céramique, métal).....	18
Figure I. 7 : Représentation schématique d'un assemblage métal/céramique réalisé dans un four-presse de thermo compression.....	19.
Figure I. 8 : Schéma d'un cycle de thermo compression.....	19
Figure I.9 : Formation de l'interface métal-céramique.....	21
Figure I. 10 : exemple de Métallisation des céramiques.....	22
Figure I .11 : Exemples de brasage alumine métallisée moly-manganèse + métal.....	23
Figure I .12 : Brasure alumine / Cuivre (Passage HOM, Cavités 400 MHz).....	23
Figure I. 13 : Fenêtre Saphir, diamètre 114 mm sur Nb et anneaux d'alumine (Déecteur PET-HPT).....	24
Figure I. 14 : Diagramme d'équilibre Cu-O	25

chapitre 2 :

Figure . II.1 : Classification des contraintes résiduelles en pratique	29
Figure. II.2 :Définition schématique des différents ordres de contraintes.....	30
Figure II.3 : Schéma explicatif de la méthode de détermination des contraintes résiduelles par indentation Vickers.....	33

Listes des figures

Figure II.4 : Cartographie des contraintes résiduelles d'origine thermique obtenues par éléments finis.....	34
Figure II.5 : Comparaison de quatre méthodes de détermination des contraintes résiduelles dans la céramique (assemblage Si ₃ N ₄ /acier par brasure AgCuTi).....	36
Figure II.6 : Evolution de la tenue en traction d'un assemblage Ni ₃ Si/acier en fonction du coefficient de dilatation du matériau composant une couche intermédiaire de 1.5 mm de différents métaux.....	38
Chapitre 03	
Figure.III.1 : logiciel de calcul par éléments finis ABAQU.....	46
Figure.III.2 : Modèle tridimensionnelle étudié.....	48
Figure.III.3 :: Maillage 3D de l'assemblage Al ₂ O ₃ /Ni/HAYNES.....	49
Figure III.4 : Distribution des contraintes sous l'effet d'un chargement mécanique	50
Figure III.5 : Variation des contraintes normales en fonction de la distance	52
Figure III.6 : Distribution des contraintes (a) : principales radiales,(b) contrainte Circonférentielles,(c) contrainte longitudinales sous l'effet d'un chargement thermique....	53
Figure III.7 variation des contraintes principales pour un chargement thermique	55
Figure III.8 : Variation de la contrainte (σ_{yy} , σ_{xx}) en fonction de la température d'élaboration de la jonction.....	57.
Figure III.9 : Répartition et niveau des contraintes sous l'effet de changement la nature de joint.....	58
Figure III.10 : la variation des contraintes en fonction de changement de la nature de joint.....	59.
Figure III.11 . Variation des contraintes en fonction de la taille de l'épaisseur	61
Figure III.12 Distribution de contraintes pour les deux modèles de matériaux composés (avec et sans joints).....	63

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Exemple de mesure de contraintes résiduelles à l'interface d'un assemblage métal/céramique par indentation Vickers.....	33
Tableau III.1 : Les propriétés mécaniques et physiques des matériaux.....	47

Introduction générale

La réalisation d'une liaison métal céramique aujourd'hui basée sur les plusieurs technique tels que : Électricité, Mécanique, Nucléaire. Parmi les procédés d'assemblage nous pouvons décrire plusieurs méthodes comme brasage, thermo compression, dépôt par projections, méthode de la barbotine.

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

Il est clair, que pour toute application le problème principal est la liaison céramique métal. Par conséquent, une meilleure connaissance des mécanismes de liaison métal céramique est essentielle pour appréhender la réalisation de liaisons adéquates. Alors, pour des besoins techniques il est obligé d'avoir un matériau qui présente des caractéristiques adéquat pour répondre aux exigences qui nous donne des solutions primaire de nos problèmes.

Par conséquent, notre étude portera plus particulièrement sur le rôle joué par les éléments du céramique et métal sur l'état de contraintes au niveau de la liaison métal céramique, nous nous intéressons plus particulièrement au cas des interfaces métal/ Al_2O_3 .Le plan de notre travail répond à une approche complémentaire des différentes propriétés recherchées.

Pour décrire cette démarche, ce mémoire comporte trois chapitres :

- Dans le premier chapitre, Nous présenterons un aperçu historique sur les liaisons métal céramique et les domaines d'utilisation
- le second chapitre portera sur les contraintes internes dans les multi-matériaux .
- Quant au chapitre trois, et à l'aide du logiciel ABAQUS nous ferons une analyse numérique des contraintes résiduelle au niveau de multi matériaux, ainsi l'effet des propriétés et l'épaisseur des matériaux sur les contraintes développées au niveau de l'interface.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale.

Chapitre 01

Élaboration des bi-matériaux.

I.1. Introduction :

Au début de 20^{ème} siècle les matériaux utilisés dans l'industriel étaient des matériaux simples ,par contre aux dernière années de ce siècle ,les domaines aéronautiques et spatiaux ont crée demande de nouvelles matières ,légères de haute rigidité et de haute résistance ,parmi ces matières les matériaux composite ou les bi matériaux qui sont des matériaux anisotropes[1] .Les composites et les structures bi-matériaux sont répandus dans une large gamme de matériaux naturels et systèmes d'ingénierie en raison de la capacité de ces systèmes à tirer parti des attributs positive des constituants individuels et de minimiser leurs faibles...[2],

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 réfractaire 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 limite toujours leurs utilisations. C'est pour cette raison, mais aussi compte tenu de leurs propriétés souvent opposées à celles des métaux que l'on a souvent recours aux liaisons métal-céramique pour étendre leurs champs d'application.

Les avantages technologiques et industriels amenés par la combinaison de matériaux céramiques et métalliques ont suscité de nombreuses études sur les mécanismes de liaison métal/céramique. Si on considère qu'actuellement les procédés techniques d'élaboration sont assez bien maîtrisés, les phénomènes qui en découlent lors de la formation de la liaison ne sont pas parfaitement connus et compris. un bi matériaux est défini comme étant un solide dans lequel au moins deux constituants sont associés afin d'obtenir un ensemble de propriétés originales que les constituants pris séparément ne permettent pas d'atteindre

I.2. Elaboration des bi-matériaux

I.2.1. métallurgie des poudres

La métallurgie des poudres est un ensemble de science et de technologie de pièces métalliques poreuses obtenues par frittage d'amalgame de poudre métallique. Comme il n'y a pas de fusion (le frittage implique généralement le brasage des grains par diffusion et fusion locale), cette technologie permet moins de chauffage (donc économie d'énergie), rétrécit très peu et a un faible refroidissement. Par conséquent, la surface fonctionnelle peut être utilisée comme frittage brut sans usinage ultérieur, économisant ainsi des matériaux et du travail, réduisant ainsi les coûts et l'impact environnemental.

L'utilisation de la métallurgie des poudres réduit le temps de traitement et les coûts. Par conséquent, la pièce peut être fabriquée en plusieurs étapes. Différentes géométries de deux matériaux issus de la métallurgie des poudres ont été étudiées: multicouche, inclusions matricielles, film sur la matrice, composition du gradient, etc. D'autres études ont également mis en évidence la difficulté d'utiliser ce type de pièce:

- métal/métal (316L/17-4PH, Ti/Al3Ti, acier/acier),
 - céramique/céramique (PZT/PZT, Al2O3/Ti3SiC2 [YON'03], Al2O3/ZrO2
 - métal/céramique (W/Al2O3, Ti/TiB2/B [FEN'05], Ni Cr /ZrO2 [JIN'01], acier/Al2O3
- [1]

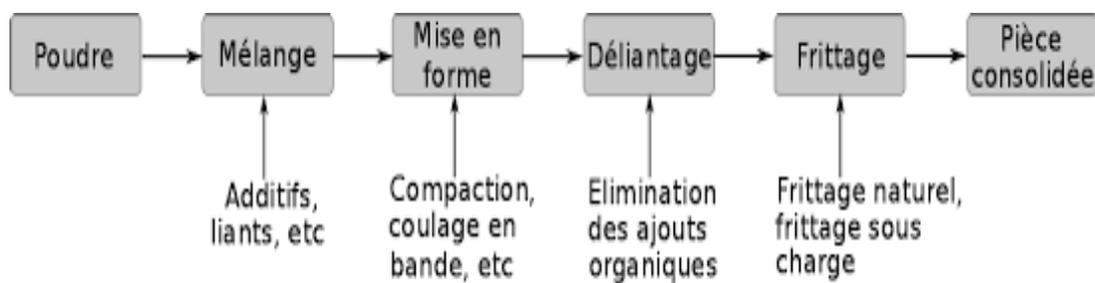


figure I.1 : Les principales étapes de la métallurgie des poudres[1]

I.2.1.1. Procédés d'obtention des poudres :

L'élaboration des bi-matériaux massifs par métallurgie des poudres nécessite d'abord la production de cette matière première que l'on compacte par différents procédés. En pratique, il existe trois méthodes de fabrication des poudres : mécanique physique et chimique. Chacune

de ces méthodes a une influence sur la taille des grains solides, leur répartition, leur forme, leur microstructure et le coût des poudres obtenues. Du point de vue mécanique, les techniques couramment utilisées sont celles du broyage et de la mécano synthèse. Le broyage mécanique est une technique largement utilisée permettant de produire une poudre métallique composite ayant une fine microstructure. Des broyeurs dotés d'une enceinte fermée contenant des éléments broyant (billes ou galets), animés d'un mouvement rotatif ou vibratoire permettent la fracturation des particules de poudre par choc. Le broyage implique simultanément et de façon répétitive la fracture, la déformation et le soudage à froid des particules soumises à des impacts violents à l'intérieur de l'enceinte [3]. Les méthodes physiques se réfèrent essentiellement aux techniques d'atomisations dont le principe est de faire couler le métal en fusion et de le soumettre aux jets d'un fluide (eau, gaz, huile) dont le but est d'isoler les gouttelettes qui se cristallisent en fines particules.

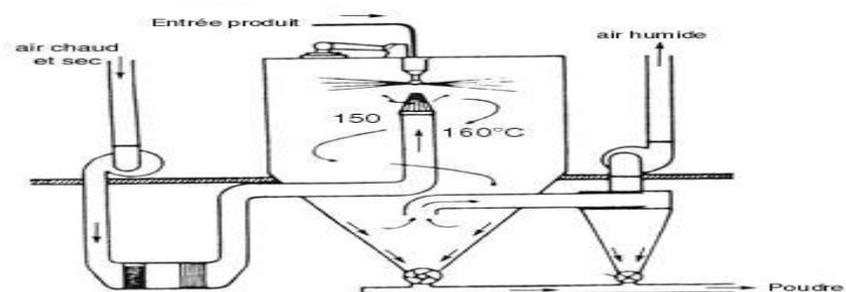


Figure I.2 : Atomisation - Séchage d'un liquide sous forme de poudre [3]

En technologie chimique, diverses méthodes de préparation de poudre peuvent être distinguées, y compris l'utilisation de réactifs et de réactifs (par exemple, la réduction des oxydes métalliques avec du carbone solide ou de l'hydrogène [2].

I.2.1.2. Mélange des poudres :

Après l'étape de préparation de la poudre, les particules peuvent être facilement séparées les unes des autres. Pour surmonter ce problème, la poudre est généralement dispersée dans un milieu liquide pour former une suspension colloïdale. D'autres éléments additifs tels que des dispersants, des liants et des plastifiants peuvent également être ajoutés à la suspension pour améliorer son uniformité. Ces additifs généralement organiques seront éliminés lors de l'étape de décapage

I.2.1.3. Mise en forme :

L'objectif principal de cette étape est de réaliser une forme visée pour la pièce finale à partir de la poudre. Cette étape consiste souvent en la compaction de la poudre, généralement à température ambiante. Les techniques de compaction à froid les plus utilisées sont : la compression isostatique, la compression uni axiale, le moulage par injection, l'extrusion. A l'issue de la mise en forme, la pièce dite "pièce à vert" possède une certaine densité appelée densité à vert, mais est encore mécaniquement très fragile. Elle n'est constituée que de grains de poudres agglomérés, uniquement maintenus entre eux par accrochage mécanique. Sa tenue mécanique (appelée tenue à vert) est juste suffisante pour lui permettre d'être manipulée]. C'est pourquoi il faut procéder à l'étape de frittage.[3]

I.2.1.4.Frittage :

Le frittage est une étape très importante du procédé de la métallurgie des poudres (céramique, métallique) Il sera rappelé succinctement ci-après les principales étapes de la métallurgie des poudres [3]. L'opération consiste à chauffer le comprimé à une température telle que les grains de poudre se soudent entre eux par des déplacements d'atomes à l'état solide, ou par une sorte de brasure lorsqu'il existe une certaine quantité de liquide dans le comprimé au cours de l'opération.

il permet de maîtriser la densité de la matière ; comme on part d'une poudre et que celle-ci ne fond pas, on peut maîtriser la taille des grains de poudre (granulométrie) et la densité du matériau, selon le degré de compactage initial des poudres ou l'utilisation de dopants, ou l'adjonction de liants.

il permet de maîtriser les dimensions des pièces produites : comme il n'y a pas de changement d'état, les variations de volume, de dimensions, sont peu importantes par rapport à la fusion (absence de phénomène de retrait)

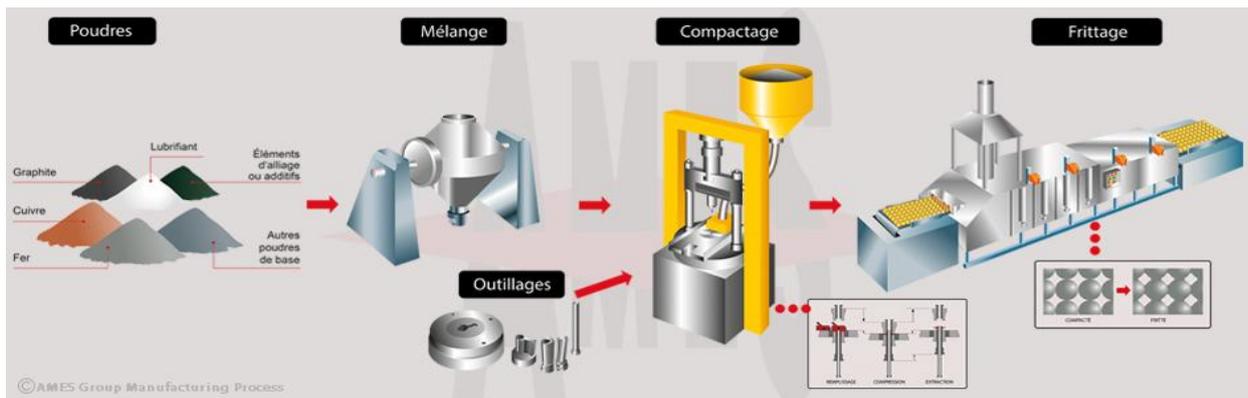


Figure I.3 : La base du processus de fabrication par le frittage(3)

I.2.1.4.1 Différentes types de frittage :

I.2.1.4.1.1 frittage naturel :

Le moule est rempli de poudre, qui est chauffée à la température de frittage ou la pièce moulée est chauffée. C'est un procédé économique, mais il y a généralement une grande quantité de porosité résiduelle. Afin de réduire cette porosité et d'éviter une croissance excessive, il est nécessaire d'utiliser des additifs et de contrôler l'atmosphère de frittage. Après traitement, une densité supérieure à 95% de la valeur de densité théorique peut être obtenue.

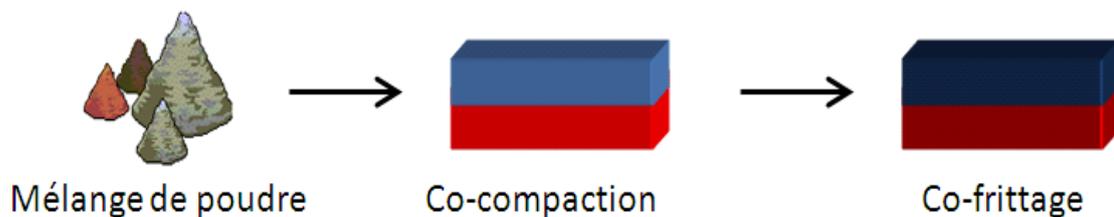


Figure I.4: Représentation schématique des étapes nécessaires au frittage naturel de bi-matériaux [1]

I.2.1.4.1.2. frittage sous charge :

* Le pressage à chaud (Hot Pressing, HP)

Le pressage à chaud (Hot Pressing, HP) ou le matériau est placé dans une enceinte où il est pressé de manière uni axiale au cours du frittage.

* La compaction isostatique à chaud (Hot Isostatique Pressing, HIP) :

Le frittage sous pression de gaz (Gaz Pressure sintering, GPS), Lors de ces procédés, la contrainte mécanique est appliquée de manière isotrope par l'intermédiaire d'un gaz. Dans le procédé HIP. L'échantillon est encapsulé préalablement au traitement et la contrainte est transmise par l'intermédiaire de cette enveloppe tandis que le procédé GPS implique l'application directe de la contrainte par le gaz environnant.

* Le frittage flash (Sparks Plasma Sintering, SPS)

La technique qui connaît le plus grand essor actuellement. Ce procédé se distingue du pressage à chaud par la source de chaleur, Le chauffage est réalisé par l'application d'un courant électrique (Continu, pulsé ou alternatif) à travers l'enceinte de pressage et parfois à travers l'échantillon. Le frittage en générale utilisé pour fabriquer des pièces pour de

nombreux domaines : Dans le médical, il intervient dans la fabrication des prothèses de hanches et dentaires. Dans le transport : les engrenages, les bougies d'allumage, sont quelques unes des applications. Le frittage trouve également des applications dans l'énergie, dans les applications structurales, dans la fabrication des pièces de filtration, des combustibles nucléaires, des aciers à outillages etc..

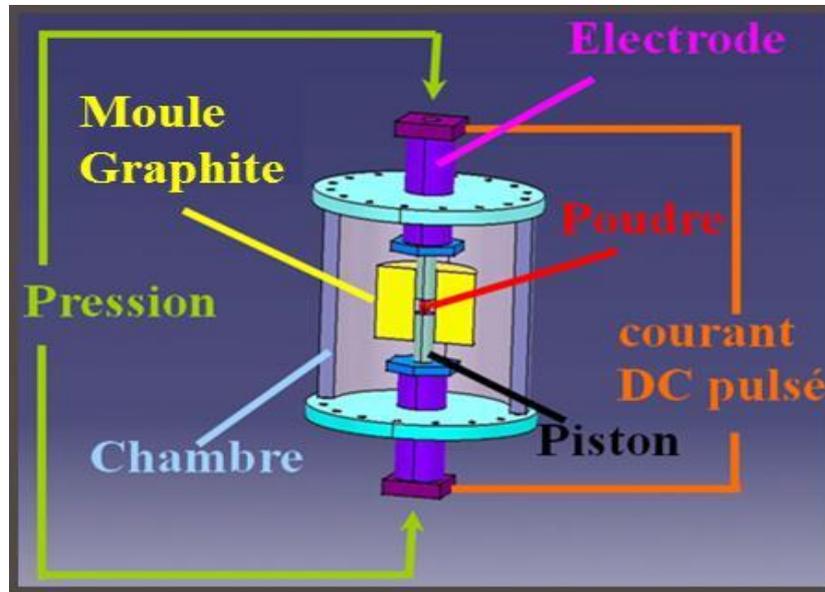


Figure I.5 ; frittage sous charge SPS/hip [5]

I.2.2 Assemblage

I.2.2.1: L'assemblage par soudage diffusion

Le principe de ce procédé est de mettre en contact les surfaces de deux pièces correctement préparées (au niveau de leur chimie physique, de leur géométrie microscopique et de leur réglage de surface). Ensuite, chauffez les composants dans un vide ou une atmosphère protectrice en option jusqu'à ce que la température atteigne une certaine température. En fonction des propriétés physiques et chimiques du matériau et des limites techniques, il sera déterminé dans un laps de temps suffisamment long, en fonction d'autres paramètres de fonctionnement et des résultats attendus. Parmi les procédés d'assemblages mécaniques, l'assemblage par soudage est le plus répandu dans la plupart des domaines industriels (transporte, industrie pétrolier et gazier, construction navale, aéronautique, automobile etc.). Des exemples pour l'assemblage par soudage :

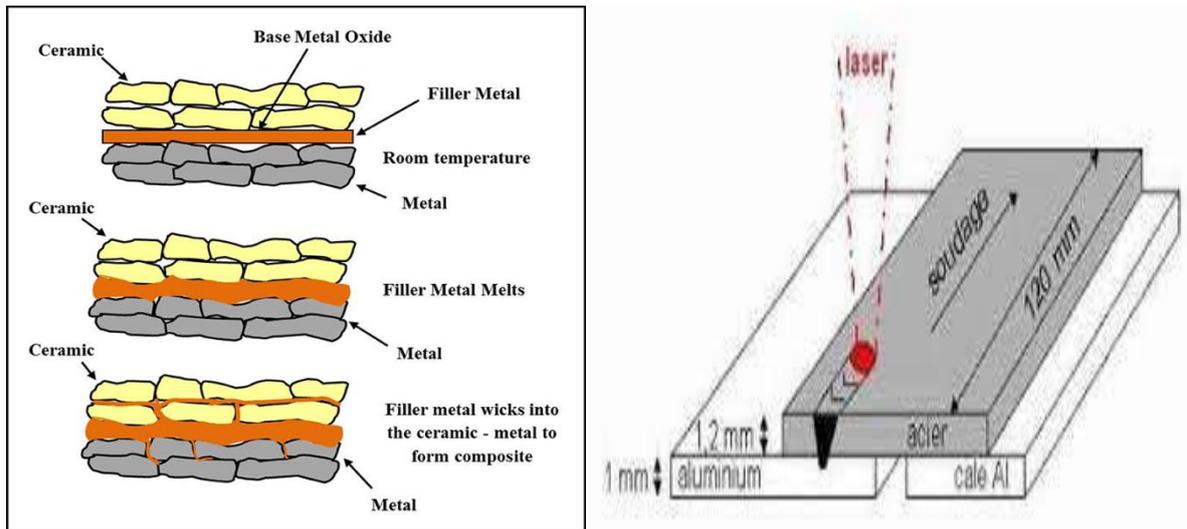


Figure I. 6: des exemples pour le soudage entre (céramique, métal)[6]

I.2.2.2.L'assemblage par thermo compression :

Tout comme le soudage par diffusion, la technologie de pressage à chaud est également une technologie qui permet d'assembler des matériaux hétérogènes à l'état solide du point de vue de ses propriétés physiques, chimiques et mécaniques .

Assurer le contact entre les deux surfaces à coller en appliquant une pression Axe unique. Entre les deux surfaces à coller, un joint métallique malléable est inséré pour favoriser la liaison métal / céramique. Par conséquent, de nombreuses précautions doivent être prises lors de la sélection des phoques. Par conséquent, sa température de fusion doit être supérieure à la température d'utilisation du couple, et inférieure à la température de transition de phase des céramiques et des métaux. Évitez d'utiliser des métaux ou des alliages qui peuvent former certains composés ou le composé intermétallique entre le substrat à connecter pour éviter le risque de fragilisation de la jonction à l'interface de connexion [4].

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 figure8.

- la température,
- la pression,
- l'atmosphère,
- le temps du palier,
- la vitesse de chauffage et de refroidissement

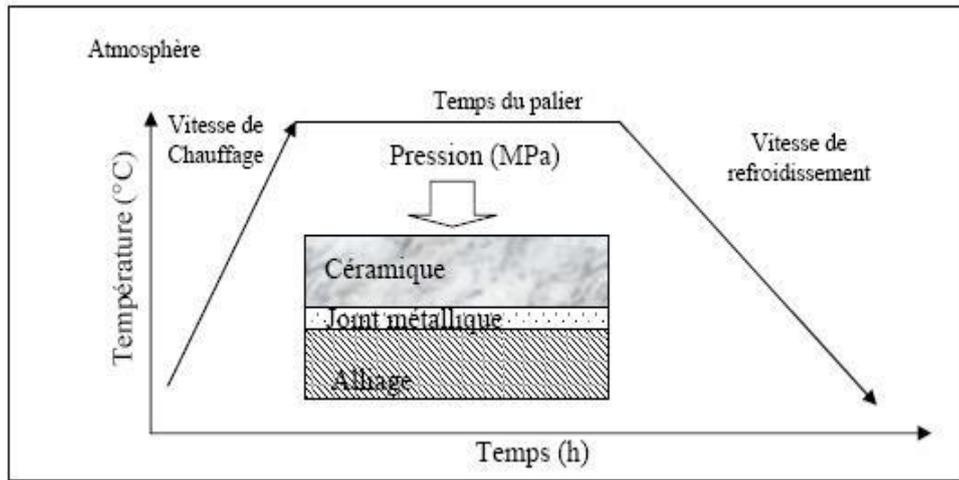


Figure I. 7 : Représentation schématique d'un assemblage métal/céramique réalisé dans un four-presse de thermo compression[7]

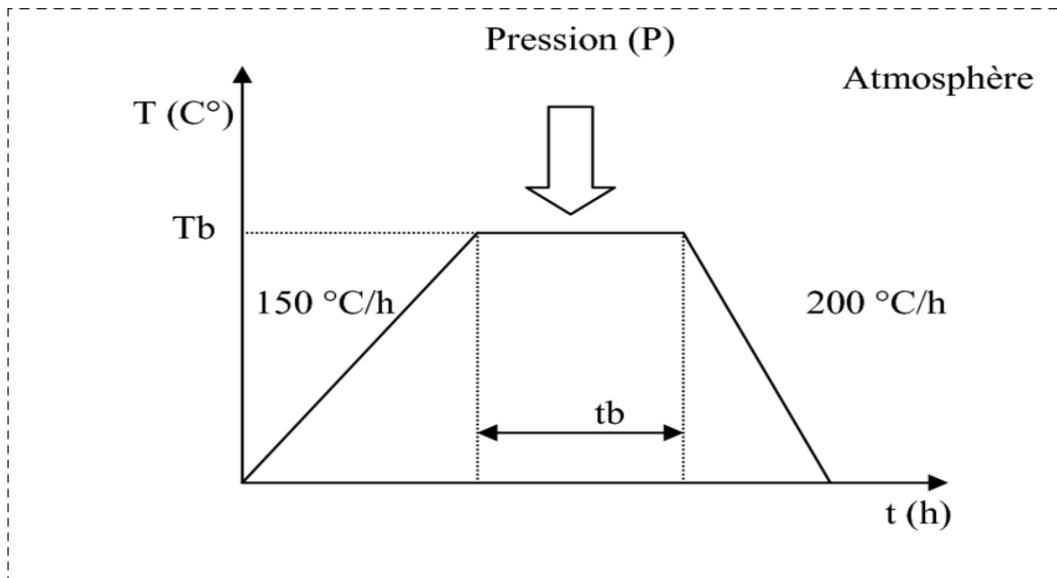


Figure I. 8 . Schéma d'un cycle de thermo compression[7]

La thermo compression est une technique très universelle puisqu'elle permet les assemblages les plus variés, du plomb sur du verre, à du platine sur de la zircone par exemple. Dans certaines applications c'est la seule méthode qui soit viable notamment lorsque les matériaux à assembler ont une température de fusion inférieure à celle des brasures des méthodes décrites en Annexe I [3]. Cette technique est non seulement intéressante pour la réalisation des assemblages métal/céramique mais elle contribue à l'étude fine des réactions à l'état solide.

La thermo compression est une technique qui permet de réaliser des liaisons

métal/céramique présentant des énergies de rupture interraciales jusqu'à 2100 J/m² et une tenue à chaud bien supérieure à celle des liaisons obtenues par métallisation ou autre. Les applications industrielles sont également nombreuses (fabrication de thermocouples, de composants électrotechniques, etc...) grâce au caractère plus général de cette méthode, qui possède en outre une bonne reproductibilité et une technologie de mise en œuvre relativement simple. Son principal inconvénient est la difficulté de réaliser des grandes séries.[4]

Dans les assemblages métal-céramique , trois niveaux de force doivent être recherchés Pour obtenir un contact étroit entre deux surfaces solides. De plus, nous devons tenir Description des produits de réaction possibles formés entre deux matériaux contact. En l'absence de réaction chimique et de formation d'une nouvelle phase, nous utilisons le terme «système non réactif». Au contraire, si une nouvelle phase se forme, on dira un système réactionnel Le processus de formation d'une interface entre le métal et la céramique par compression thermique à l'état solide doit passer par les étapes illustrées à la figure I.10.

Etape 1 :

- Mettre les deux matériaux en contact sans pression (a)
- Sous l'influence de la pression et de la température, une contrainte locale déforme la rugosité du contact initial, exposant le réseau interconnecté de pores, qui se remplissent à la fin des étapes (b, c)

Etape 2 :

- Former des liaisons chimiques en formant de nouvelles phases (e) ou uniquement des liaisons non réactives (d),

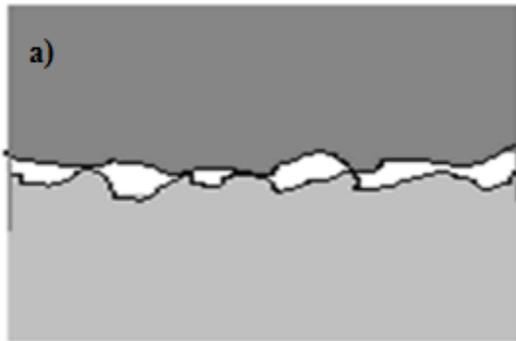
Etape 3 :

- La troisième étape correspond à l'évolution des propriétés des matériaux, et

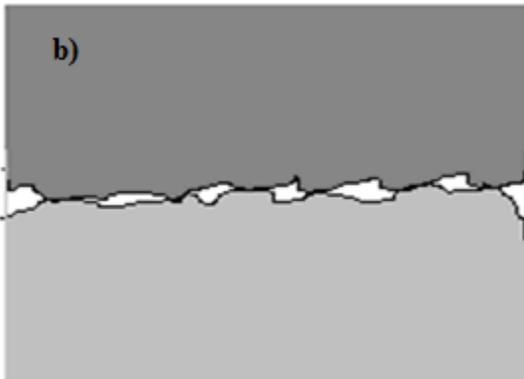
Formation de liaison et contrainte résiduelle, y compris Différence de coefficient de dilatation de deux matériaux.

Sachant que les céramiques sont généralement des solides rigides, les deux principales forces qui peuvent favoriser le collage sont :

- La pression utilisée pour maintenir les deux matériaux en contact pendant le processus de soudage,
- Force causée par la réduction de surface lors de la formation de l'interface Afin d'avoir une bonne liaison, nous partons des hypothèses suivantes L'assemblage peut être amélioré en optimisant chacune de ces trois étapes[5]



➤ Contact sans pression



- Déformation des aspérités sous l'effet de la pression
- Réseau de pores interconnectés



- Sous l'effet de la température et de la pression les pores se combent
- Formation d'une interface morphologiquement parfaite



liaison réactive



Liaison non réactive

Figure I.9. Formation de l'interface métal-céramique[8]

I.2.2.3. Le brasage ;

Le brasage des métaux est un procédé d'assemblage permanent qui établit une liaison métallique entre les pièces réunies¹. Contrairement au soudage, il n'y a pas fusion des bords assemblés. Le scellement par brasage à haute température est l'une des plus utilisées, lorsqu'il s'agit d'assurer à l'assemblage une résistance à la corrosion, aux températures élevées et aux contraintes mécaniques. Le brasage céramique-métal permet de lier une pièce en céramique technique et un composant métallique par l'intermédiaire d'une brasure (alliage ou métal pur) sous forme de feuillard ou de fil, à une température d'environ 800°C. Pour obtenir un brasage efficace, il est nécessaire de choisir les matériaux principalement en fonction de leur coefficient de dilatation [7]

Le brasage comporte trois étapes :

- Apport préalable d'une couche métallique sur la céramique (Métallisation des céramiques)

Deux types de métallisation pour effectuer une liaison céramique-métal sont principalement utilisés :

- a métallisation réfractaire haute température type Mo Mn & WMn. L'encre est déposée de différentes manières : au pinceau, par sérigraphie manuelle ou automatique. Ce type de métallisation est ensuite frittée sous atmosphère contrôlée
- La métallisation biocompatible active à base de Ti déposée soit au pinceau, soit par pulvérisation

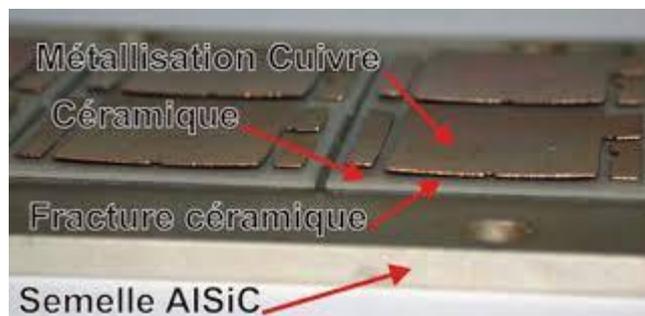


Figure I. 10. exemple de Métallisation des céramiques[9]

- Assemblage des composants céramiques et métalliques dans un outil de maintien (graphite ou alumine) avec le joint de brasure entre les surfaces à lier.

- Passage au four pour amener le métal d'apport à son point de fusion afin qu'il mouille les surfaces métalliques, puis refroidissement pour solidifier l'ensemble.[6]

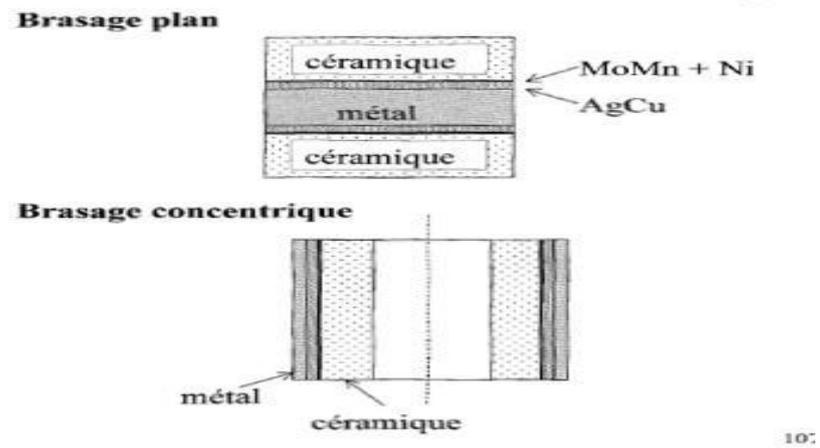


Figure I .11 . Exemples de brasage alumine métallisée moly-manganèse + métal[10]

- exemples d'assemblages métal /céramique :

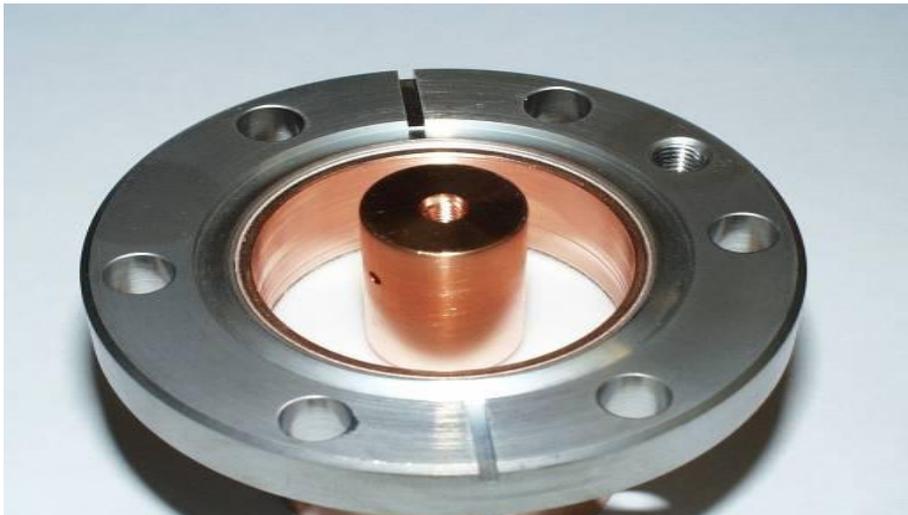


Figure I .12 . Brasure alumine / Cuivre (Passage HOM, Cavités 400 MHz).[11]



Figure I. 13 . Fenêtre Saphir, diamètre 114 mm sur Nb et anneaux d'alumine
(DéTECTEUR PET-HPT)[11]

I.2.2.4 assemblages par la méthode de l'eutectique gaz-métal ;

Cette méthode de liaison métal / céramique est utilisée pour les couples dans les situations suivantes Le métal a un eutectique sous forme de métal / oxyde, métal / sulfure ou métal / phosphore. Le principe est d'utiliser cette forme de formation eutectique comme Mouiller complètement le film liquide sur la surface des deux matériaux à coller[4].

Les brevets déposés à ce sujet indiquent qu'il est possible d'obtenir une telle phase liquide dans le cas de systèmes métal/céramique pour lesquels un eutectique métal gaz existe. Nous allons prendre l'exemple le plus étudié dans la littérature et le plus largement utilisé dans l'industrie, qui est celui du couple cuivre/alumine. Le système Cu-O présente un eutectique pour une composition en poids de 0.39 % d'oxygène avec un point de fusion de 1065 °C. Ce point de fusion est très proche de celui du cuivre pur qui est de 1083 °C (Figure 15). Néanmoins d'autres systèmes ont été évoqués dans ces deux brevets, comme l'eutectique Fe-O (1523 °C à 0.16 % en poids d'oxygène) ou encore les eutectiques (Mo, Al-Si), le gaz utilisé dans ce dernier cas pouvant être du silane.[7]

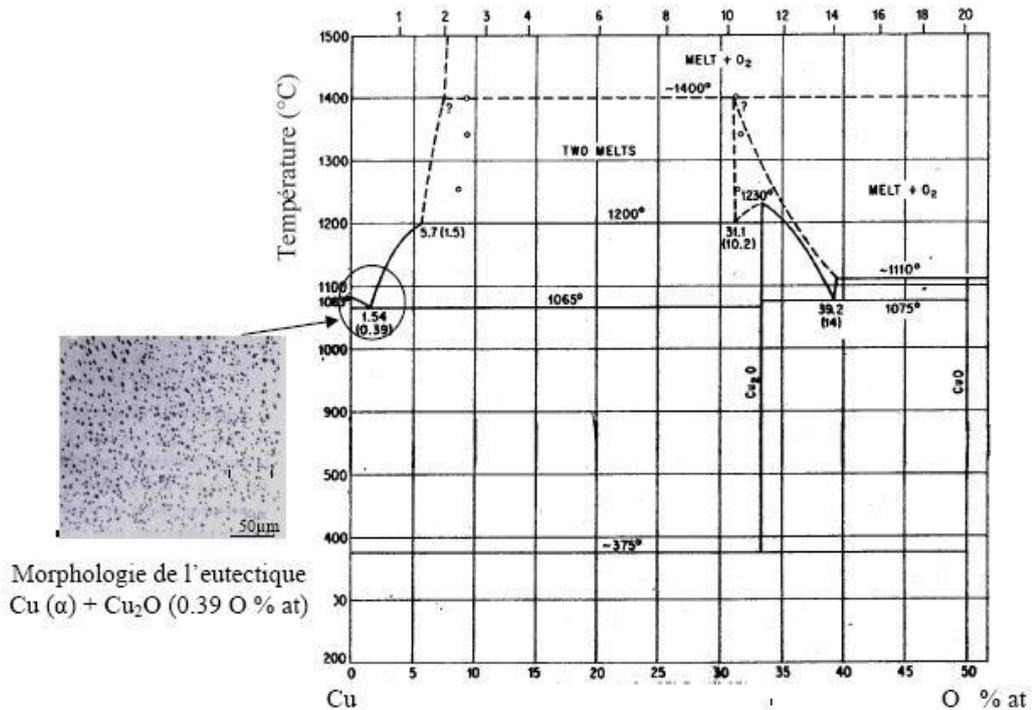


Figure I. 14: Diagramme d'équilibre Cu-O [7].

Dans le cas du couple Cu/Al₂O₃, la formation de la phase intermédiaire liquide peut se faire soit in situ dans le four sous une atmosphère réactive de quelques pour cent d'oxygène, ou par une peroxydation du cuivre thermique ou chimique. On introduit au préalable l'oxygène nécessaire à la formation d'un mélange eutectique ou proche de l'eutectique qui couvre la surface du cuivre au dessus de 1065 °C et qui vient mouiller de façon très intime la surface de la céramique (le cuivre liquide saturé en oxygène mouille parfaitement l'alumine) [8]. Au cours du refroidissement, il y a solidification du mélange eutectique sous forme de précipités d'oxyde de cuivre dans une matrice de cuivre. Il a également été mis en évidence la formation à l'interface Cu/Al₂O₃ d'oxydes mixtes tels qu'AlCuO₂ et éventuellement AlCu₂O₄. Pour un tel système, la contrainte à la rupture est de 150 MPa en traction et 50 MPa en cisaillement.

Ce procédé est applicable à de nombreux matériaux céramiques et alliages. De bons résultats sont obtenus avec l'alumine mais aussi avec l'AlN, la silice, le saphir, l'oxyde de béryllium, les spinelles, différents métaux notamment le cuivre lui-même. Par contre, la technique est inopérante sur le graphite, le nitrure de bore et les métaux très avides d'oxygène tels que le titane, le zirconium, etc. étudié, à partir de caractérisations mécaniques (essais de traction et de cisaillement, ténacité), des interfaces Cu/Al₂O₃ poly cristallines élaborées par thermo compression ou par l'eutectique Cu-Cu₂O. Les liaisons Cu/Al₂O₃ élaborées par les procédés de thermo compression ou par la fusion d'eutectique mettent en jeu à l'interface des composés

prévus par la thermodynamique. Ainsi, Béraud [9] a mené par Microscopie électronique en transmission (MET) une analyse microstructurale des composés formés à l'interface, tel que l'oxyde mixte CuAlO_2 . Des travaux similaires ont été effectués par *Mellul* sur des couples $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3$ élaborés par la fusion de l'eutectique. Il est donc indispensable de rappeler quelques propriétés thermodynamique du système Cu-Al-O .

I.3. Les domaines d'application typiques pour les assemblages céramique-métal :

- Haute tension
- Courants forts
- Détecteurs et appareils de mesures
- Technologies sous atmosphère vide ou ultravide
- Applications cryogéniques
- Technologies médicales
- Radiothérapie
- Technologies hautes fréquences
- Ingénierie énergétique
- Accélérateurs de particules

Référence bibliographie (chapitre 1)

[1] JEAN MARCCHAIX, [Elaboration de multi matériaux multifonctionnels par métallurgie des poudres – Mécanismes de frittage de bi matériaux] L'UNIVERSITE DE GRENOBLE 2010 .

[2] meziani HAKIMA ,ELABORATION D'UN COMPOSITE WC /c par infiltration UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERI DE Tizi-Ouzou 2012/2013.

[3]. Modélisation et simulation du frittage de matériaux dopés et de multi matériaux à l'échelle de la microstructure. Autre. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2013, Howatchinou Tossoukpe

[4] Attali lamine , LIAISON MÉTAL-CÉRAMIQUE PAR THERMOCOMPRESSIION. INFLUENCE DE L'ÉTAT INITIAL DES MATÉRIAUX ET DE LA PRESSIION PARTIELLE D'OXYGENE Soutenu le 4juillet 1994 devant la commission d'Exament

[5] Attali lamine ,CARACTÉRISATION ET MODÉLISATION THERMO-MÉCANIQUES DES ASSEMBLAGES MÉTAL-CÉRAMIQUE ÉLABORÉS PAR THERMOCOMPRESSIION, Article · 2009.

[6] Le Syndicat des Industriels des Céramiques Techniques.

[7] MESSAOUDI Khalid ,ANALYSE DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES DANS LES MULTI MATÉRIAUX TYPE SANDWICH/2010 MESSAOUDI Khalid.

[8] B P. DRILLET, "Contribution à l'étude des liaisons céramique/métal: Elaboration et études structurales d'interfaces alumine/nickel," Université de Rennes, Rennes, Thèse de doctorat 1996.

[9] C. BERAUD, INSA Lyon, N° 86 ISAL 0017, Thèse de doctorat 1986.

Chapitre II

Contraintes internes dans les multi-matériaux.

II.1 Introduction :

Les contraintes résiduelles sont donc des contraintes existant dans des pièces, en l'absence de sollicitations extérieures. Connaissant leurs méfaits, le premier souci a été de chercher à les atténuer. Cependant, lorsqu'on sait les prévoir, on cherche à les développer de manière favorable plutôt qu'à les éviter. Les origines des contraintes résiduelles sont très diverses. Elles peuvent être classées en trois catégories: origine mécanique, origine thermique et origine métallurgique. Souvent une combinaison de ces différentes causes est à l'origine de l'apparition des contraintes résiduelles [1].

Les contraintes résiduelles peuvent provenir [2] :

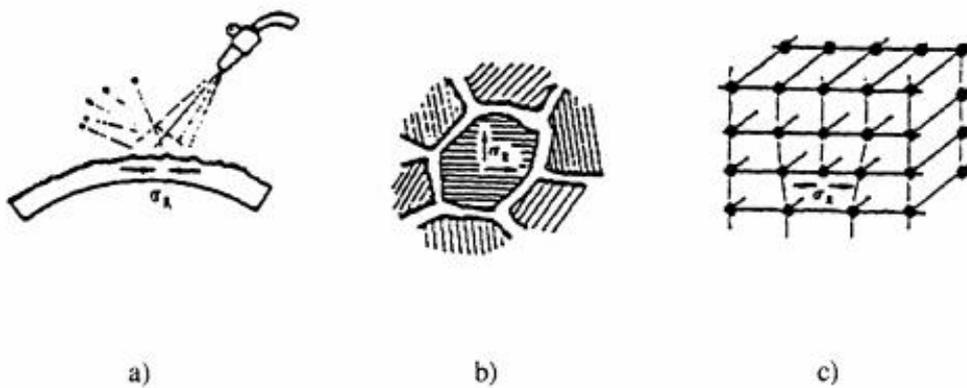
- d'hétérogénéités chimiques ou cristallographiques résultant de traitements thermiques superficiels (nituration, cémentation ...),
- de transformations structurales de la matière avec une chronologie résultant du gradient thermique, provenant par exemple de traitements thermiques,
- de traitements superficiels divers (émaillage, nickelage, chromage, grenailage, martelage),
- d'écoulements plastiques non homogènes au cours d'un chauffage ou d'un refroidissement non uniforme (trempe classique, moulage des matières plastiques ...),
- des différences de coefficients de dilatation et des incompatibilités mécaniques entre les différents composants d'un composite (composites à matrice métallique, organique ou céramique, revêtements céramiques).

Dans tous les cas, les contraintes résiduelles résultent d'hétérogénéités micro- et / ou macrostructurales.

II.2. Ordres de contraintes résiduelles :

La classification de la contrainte résiduelle est divisée en trois niveaux, et Nous la considérons comme matérielle, qui peut être définie comme suit [3]: La contrainte résiduelle de premier ordre ou macroscopiques sont homogènes sur un très grand domaine du matériau (plusieurs grains : quelques 1/10 de mm). Forces internes liées entre elles Ces contraintes sont en équilibre dans chaque partie, et les moments liés Sous l'action de ces forces, la force autour de n'importe quel axe est nulle. Changement de taille macroscopiquement, il est toujours dû à l'équilibre des forces et Moments liés à ces restrictions.

La contrainte résiduelle du second ordre sont homogènes sur de petits domaines du matériau (un grain ou une phase : quelques 1/10 de micromètre) Les forces et moments internes liés à ces contraintes sont Atteindre l'équilibre dans un nombre considérable de grains. Changement de taille Les changements macroscopiques peuvent être attribués à ce changement d'équilibre. La contrainte résiduelle du troisième ordre sont inhomogène dans la plupart des cas Petite surface de matériau (distance entre certains atomes 1/10 de nanomètres). Puissance interne et moments Les zones liées à ces contraintes sont en équilibre au sein d'une petite zone. Au niveau sous-micro, de nouvelles discontinuités apparaissent dans Grains de cristal, tels que sous-articulations, parois et cellules de dislocation, lacunes (Fig. II.1)



- a) Contraintes macroscopiques d'ordre 1 (échelle du polycristal), mesurables
- b) Contraintes microscopiques d'ordre II (échelle du grain)
- c) Contraintes microscopiques d'ordre III (échelle du réseau cristallin)

Figure II.1. Classification des contraintes résiduelles en pratique [1]

. Dans le cas de matériaux réels, l'état de contrainte résiduelle est produit par la superposition de contraintes d'ordre 1, 2 et 3, comme le montre la figure. II. 2 Dans le cas des matériaux monophasés [4].

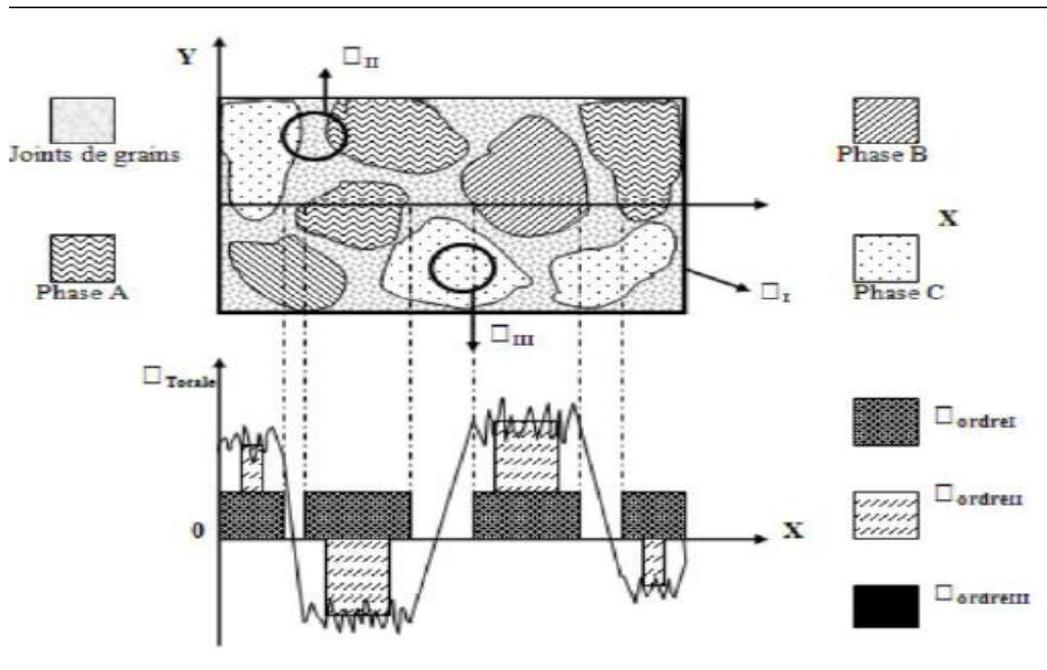


FIG. II.2. Définition schématique des différents ordres de contraintes [1]

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

$$\sigma_{résiduelle}^{Totale} = \sigma_{résid.}^I + \sigma_{résid.}^{II} + \sigma_{résid.}^{III} \dots\dots\dots(1)$$

La classification proposée pour les contraintes internes présente actuellement un aspect En théorie, parce que des contraintes différentes ne peuvent pas être utilisées pour séparer efficacement différents ordres de contraintes Il n'y a pas de méthode de calcul ou de mesure. Cependant, son intérêt est de montrer Toute hétérogénéité de déformation introduite dans des structures de toute taille nécessite La présence de contraintes résiduelles.

II.3. Les contraintes résiduelles dans les assemblages métal/céramique :

La liaison entre la céramique et le métal s'accompagne toujours de Création d'un champ de contraintes résiduelles multiaxiales. Origine différente Expliquer physiquement et mécaniquement la génération de contraintes résiduelles d'interface Bond, en céramique et en métal pendant la formation de la liaison céramo-métallique [5]:

- Contrainte thermique causée par le gradient thermique de l'environnement Expérience (la loi du refroidissement). Dans ce cas, le gradient thermique est Produit sur l'éprouvette en raison de la conductivité thermique différente Existe entre la céramique et les métaux,
- Contraintes générées par la nouvelle étape formée sur l'interface (connexion) Réactivité), entraînant une augmentation de volume et empêchant les luxations distance courte,

-La contrainte de transformation de phase générée par l'alliage métallique pendant le processus de transformation de phase refroidir,

-Contraintes liées à l'effet de générer des charges électrostatiques d'espace Produits céramiques,

-Contrainte mécanique pure causée par des différences caractéristiques Physique (α : coefficient de dilatation thermique, E: module d'élasticité).

II.4. Méthode de détections des contraintes internes

Les assemblages métal-céramique peuvent être inspectés par diverses méthodes analytiques Contrainte résiduelle non destructive (diffraction des rayons X, Neutrons, interférométrie optique) ou destructif (cavitation, élimination de couches, Indentation Vickers ou méthode de la flèche). Le calcul de la méthode d'analyse est Il est réalisable dans des cas simples. L'utilisation de codes de calcul par éléments finis a été prouvée Indispensable pour une modélisation complète de la distribution spatiale des contraintes Résidus dans des assemblages plus complexes. Possibilités et limites de la méthode La méthode utilisée est décrite sur la base des données bibliographiques de l'étude. Liaison métal / céramique.

II.4.1. Techniques diffractométriques

La technologie de diffraction est considérée comme la plus appropriée pour la recherche Composants en métal / céramique. Cette technique permet d'apprécier les symboles, les niveaux et les symboles. Distribution spatiale de la contrainte résiduelle dans le composant. Diffraction uniquement La technologie neutronique peut effectuer des tests entièrement non destructifs sur les pièces jointes épaisses. La profondeur de pénétration des neutrons est très grande [6,7]. Le volume analysé est Plus gros, un équipement lourd est nécessaire Temps de comptage très long. Par conséquent, la diffraction des rayons X est plus Bien que le taux de pénétration des photons soit faible, il peut toujours être utilisé. Son principe est d'utiliser Les paramètres cristallins sont utilisés comme jauges de contrainte.

La contrainte résiduelle peut être ajustée par diffraction des rayons X du composant Parallèle ou perpendiculaire à l'interface ou de l'autre côté Matériel. La surface libre plane des pièces assemblées peut également être analysée par observation Déterminez la contrainte dans le plan parallèle à la zone d'interface.

II.4.1.1. Limite de l'analyse diffractométrique

La mesure de la diffraction des rayons X sur des surfaces courbes n'est pas critique D'un point de vue théorique, il doit être traité avec prudence. Dans le cas des pièces Cylindrique, la taille de la zone irradiée ne peut pas être trop grande pour limiter L'influence du rayon de courbure de la pièce [9].

Tanaka [8] a prouvé l'importance de fixer la taille de la zone d'irradiation Le travail de la méthode de diffraction est applicable aux liaisons métal / céramique. Les mesures Puisque la taille de la zone irradiée est faible.

II.4.2. Mesures par indentation Vickers

Moins répandue que la diffraction X mais facile à étudier Combinaison métal / céramique, la méthode d'indentation Vickers peut être utilisée Évaluer la contrainte résiduelle dans le matériau céramique près de l'interface (Figure II.3). Lascar [10] implique l'indentation continue de la céramique par les méthodes suivantes: Une distance de pas de 0,1 mm de l'interface à chaque point. Longueur de la fissure Les fissures mesurées sur la céramique assemblée correspondent parallèlement à interface.

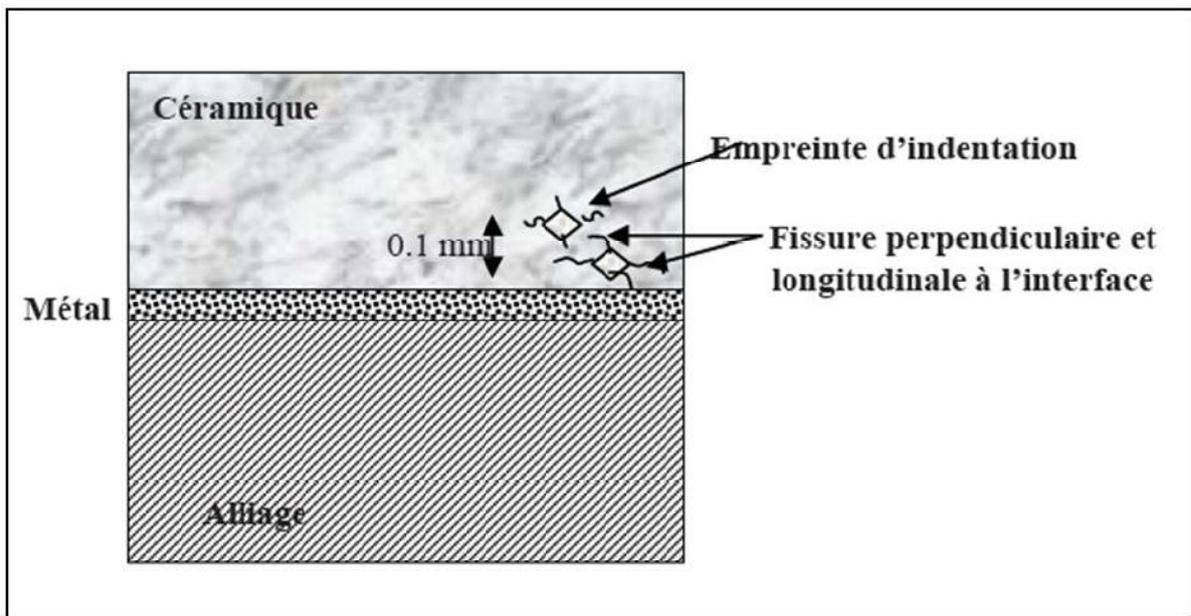


FIG II.3 : Schéma explicatif de la méthode de détermination des contraintes résiduelles par indentation Vickers.[3]

Le tableau II.1 donne les valeurs mesurées pour différents composants Métal / céramique. La longueur de fissure mesurée après collage est plus grande Vérifier efficacement si la contrainte estimée est systématiquement en tension. Ce Pour plusieurs raisons, la valeur de

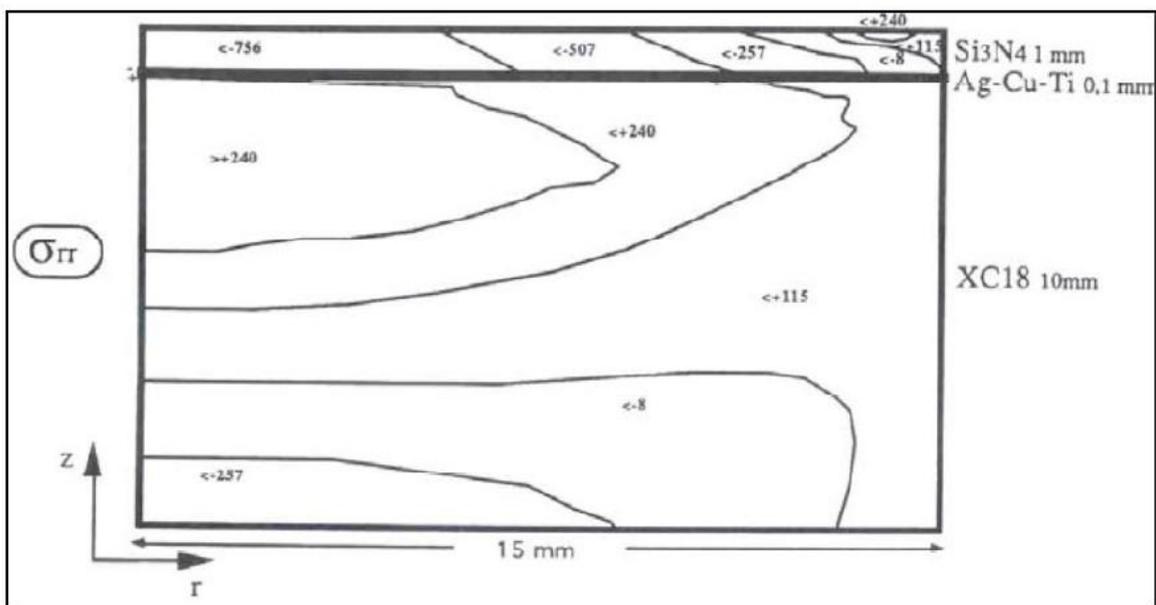
contrainte doit être estimée avec soin. il Il s'agit d'une moyenne superficielle, altérée par des erreurs liées à l'incompréhensibilité Longueur exacte de la fissure.

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

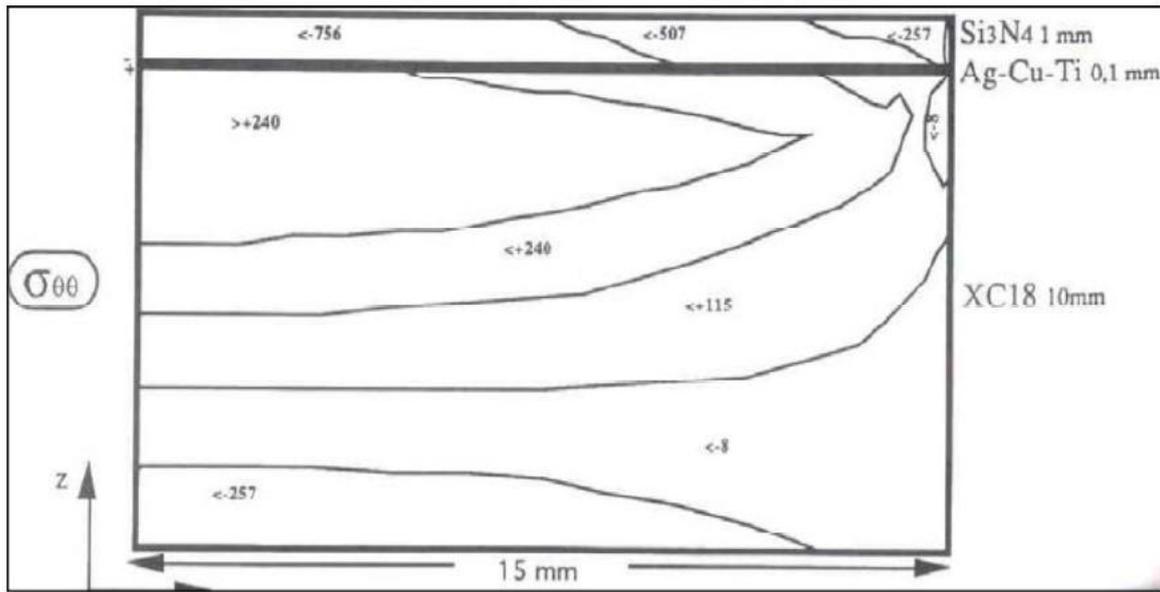
Tableau II.1 : Exemple de mesure de contraintes résiduelles à l'interface d'un assemblage métal/céramique par indentation Vickers [10].

II.4.3. Méthodes numériques :

La simulation numérique par éléments finis [11] est un outil puissant dont l'utilisation devrait être Permet de prédire la distribution spatiale de la contrainte résiduelle La méthode d'analyse est inefficace. Résultat du calcul de la contrainte résiduelle L'étude des liaisons brasées Si₃N₄ / Ag-Cu-Ti / XC18 en mode élastoplastique donne La distribution spatiale de la contrainte résiduelle sur l'ensemble de la pièce [12]. (Graphique II.4) Représente les composantes radiale σ_{rr} et circonférentielle $\sigma_{\theta\theta}$.



a)



b) **Figure II.4** : Cartographie des contraintes résiduelles d'origine thermique obtenues par éléments finis [4].

Ces représentations fournissent une vue d'ensemble des niveaux de contraintes résiduelles. La céramique est dans un état hautement comprimé au centre, dans un état entièrement comprimé. Il est bénéfique à la résistance de la céramique. En revanche, près du bord, la céramique expose une zone tendue. L'acier est sous tension comme couche inférieure de soudure, tandis que la couche de base est dans un état comprimé.

II.4.4. Comparaison des méthodes

Une des origines de la contrainte résiduelle dans les composants est la différence de coefficient de dilatation thermique entre métal / céramique. Antagoniste. Lourdin [13] lors de son étude des paires $\text{Al}_2\text{O}_3\text{Ni} / \text{Al}_2\text{O}_3$ par pressage à chaud montre qu'à température ambiante, le rapport de la contrainte résiduelle ne dépend que du taux de refroidissement, pas de la différence entre la température de collage et la température ambiante. En proposant un modèle, le taux de refroidissement et le métal, le même auteur a montré que le fluage peut détendre le stress. En plus de la relaxation plastique, il existe également une source de chaleur. Selon l'auteur, le métal sera freiné causé par le rétrécissement de la céramique, car généralement la céramique rétrécit plus rapidement que le métal. La céramique a l'effet inverse. En conséquence, si le taux de déformation du matériau correspond à la déformation de chacun d'eux.

Utilisez des diagrammes de déformation pour évaluer les taux de déformation respectifs
Caractériser le comportement au fluage du matériau. La déformation de l'alumine est insignifiante par rapport au nickel. Par conséquent, la déformation appliquée lors de la déformation Nickel considère pleinement le refroidissement.

En 1992, Ebihara et al. [14] Affiché sur les composants Si₃N₄ / AgCuTi / Cu / SUS 304
L'influence de la géométrie de l'échantillon. La contrainte résiduelle maximale est Les coins de l'interface n'ont rien à voir avec l'épaisseur du cuivre. de plus amples recherches Assemblage Sapphire / Nb par Ishida et al. [15] a montré que Les produits de réaction à l'interface sont propices au déplacement des dislocations, donc Réduisez le stress résiduel.

Trois ans plus tard, Gao et al. [16] Résultat confirmé d'Ebihara, à savoir La contrainte résiduelle aux coins de l'interface est la plus grande, ce qui équivaut à Une phase de défaillance est observée. En revanche, ils ont remarqué l'effet de l'épaisseur du métal sur l'alliage. En montrant que les paramètres clés sont toujours Sélectionnez le coefficient de dilatation thermique.

En 1998, Kovalev et al. La littérature [17] montre également à travers le calcul par éléments finis: L'épaisseur du métal a peu d'effet sur la contrainte résiduelle et la contrainte résiduelle. La différence de coefficient de dilatation thermique entre la céramique et le métal. Ceux-ci Ce dernier est plus affecté par les propriétés mécaniques du métal. résultat Les résultats obtenus en étudiant deux fois le couple montrent que plus le métal est ductile, plus la contrainte Très faible.

Colin [9] a montré qu'il existe une corrélation entre les contraintes résiduelles calculées Cohérence entre les deux déterminée par élément fini et diffraction des rayons X La méthode est liée à la contrainte axiale, qui est fonction de la distance à l'interface.

D'un point de vue quantitatif, Lascar [10] peut estimer L'interface est indentée en appliquant la méthode. Il a énuméré la valeur obtenue Différentes paires de brasage métal / céramique ou pressage à chaud. Mesure de diffraction des rayons X obtenue à l'interface de liaison au bord Fabrication de pièces brasées Si₃N₄ / acier [8] et valeurs mesurées obtenues par indentation Vickers Comparable par Lascar [10]. Qualitativement, la mesure de diffraction est Caractéristiques de $\sigma_{Rx} \approx 0$ le long de l'interface et $\sigma_{Ry} > 0$ perpendiculaire à l'interface ce Ceci est en bon accord avec la valeur mesurée de l'indentation Vickers étant donné $\sigma_{Ry} > 0$. Les deux méthodes ont prouvé l'existence de contraintes de surface à proximité de l'interface. Qualitativement, la comparaison est subtile car les matériaux et la géométrie de l'assemblage Ils sont différents, mais les deux méthodes sont très proches par ordre de grandeur.

Guipont [12] compare différentes méthodes de mesures expérimentales Modélisation sur composants Si₃N₄ / AgCuTi / acier Deux méthodes expérimentales ont été mises en œuvre: mesure par élimination de couche et jauge de contrainte Mieux que la mesure par diffraction des rayons X pendant le retrait de la couche. Une sorte de La modélisation élastoplastique par éléments finis et les calculs analytiques sont analysés. lignes parallèles (Figure II.5).

La différence entre les méthodes ne peut être ignorée. Méthode d'élément Limited peut fournir une valeur de compression plus élevée, et l'analyse et le calcul peuvent prédire Pas trop de pression. La mesure expérimentale donne une valeur intermédiaire.

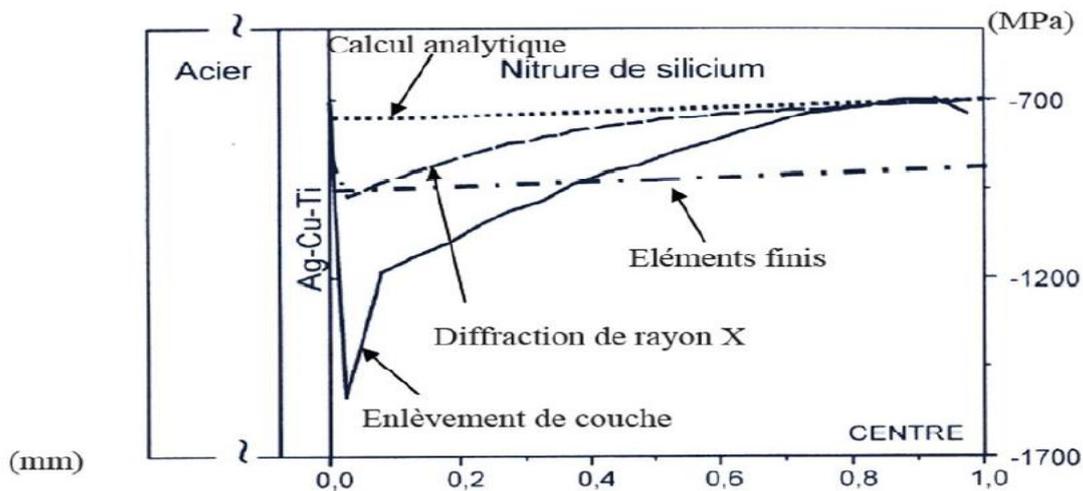


FIG II.5: Comparaison de quatre méthodes de détermination des contraintes résiduelles dans la céramique (assemblage Si₃N₄/acier par brasure AgCuTi) [4].

II.5 Solution pour diminuer les contraintes résiduelles dans les liaisons métal céramiques

De nombreuses méthodes ont été développées pour minimiser les contraintes résiduelles Parties de composants de cermet. Ils utilisent souvent la couche intermédiaire, y compris Le but est d'ajuster le coefficient de dilatation des deux matériaux. Les métaux tels que le cuivre et l'aluminium ont obtenu de bons résultats. De son Plasticité et point de fusion bas, l'aluminium peut être combiné avec Céramiques, telles que l'alumine et le nitrure de silicium [18,19]. Un autre niobium métallique a été étudié [20.21.22]. Il est utilisé comme couche L'intermédiaire de jonction alumine / acier est préparé par pressage à chaud. Ce La contrainte interne à l'interface Al₂O₃ / Nb a le moins d'effet. Sur l'interface Al₂O₃ / Nb, la déformation est nulle, et le niobium a subi un écrouissage considérable jusqu'à Noeud en acier au niobium.

La réduction des contraintes inter faciales peut être assurée par une autre technique, Consiste en la réalisation d'une couche intermédiaire de type cermet (composée d'un mélange des deux) Matériaux à assembler) [22]. Méthode multicouche métallique composée de métal (a) et de métal Le métal (b) déposé entre les matériaux (céramiques, métaux) à connecter peut être minimisé Contrainte interne, à condition que le coefficient de dilatation thermique satisfasse Les conditions suivantes [22] :

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

Naka et al. [23] Lors de l'essai de traction des composants contenant des nitrures Silicium, indiquant que la résistance du composant augmente avec Coefficient de dilatation thermique entre le nitrure de silicium et le substrat métallique En augmentant. Par conséquent, utilisez une couche intermédiaire en matériau Le coefficient de dilatation thermique est proche du coefficient de dilatation thermique de la céramique doit être limité La contrainte résiduelle dans la céramique augmente donc la résistance du composant. Après D'autre part, une faible dilatation thermique est généralement liée à la limite d'élasticité Surtout, bien que plusieurs auteurs aient montré que l'utilisation de matériaux ductiles peut Limiter la contrainte résiduelle [24.25]. Zhou et coll. [26] Dans leurs recherches sur la liaison Ni₃Si / acier, il a été prouvé Par rapport à l'utilisation de matériaux hautement plastifiés (comme le cuivre doux), Un matériau avec un coefficient de dilatation moyen. La figure II.6 montre La relation entre la résistance à la traction des composants Ni₃Si / acier et le coefficient de dilatation de l'alliage Matériau de couche intermédiaire. Cuivre tendre comme couche intermédiaire De meilleurs résultats que le coefficient de tungstène ou de molybdène, le coefficient de tungstène ou de molybdène est L'expansion est très proche de Ni₃Si

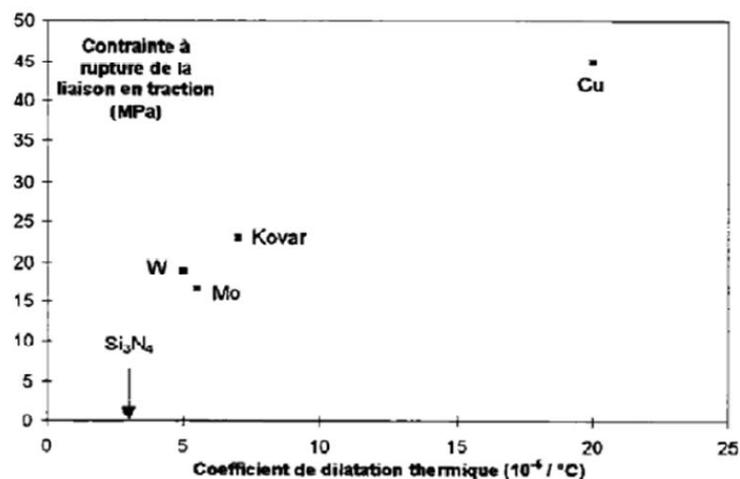


FIG II.6: Evolution de la tenue en traction d'un assemblage Ni₃Si/acier en fonction du coefficient de dilatation du matériau composant une couche intermédiaire de 1.5 mm de différents métaux [5].

II.6 Contraintes thermiques:

Au cours de refroidissement jusqu'à la température ambiante, les différences de propriétés thermique (coefficient de dilatation) et mécanique (différence de module de Young et coefficient de poisson) provoque une hétérogénéité de déformation entre le métal et la céramique et un gradient de contraintes résiduelles se développe de matériau 1 vers le matériau 2 passant par l'interface.

En l'absence de toute sollicitation mécanique, la contrainte d'un métal, ou sa déformation, possède de deux composantes principales. [27]

- Contrainte intrinsèque.
- Contrainte thermique
 - **Contrainte intrinsèque:** La contrainte intrinsèque est définie comme la contrainte du matériau pendant sa fabrication, à la température de d'élaboration.
 - **Contraintes thermo-élastiques:** la contrainte thermo-élastique dans les couches minces déposées sur un substrat à une température supérieure à la température ambiante est due à la différence des coefficients de dilatation thermique entre le métal et la céramique. [28].

Référence bibliographique (chapitre II)

[1] J.L. Chaboche et J.Lemaitre. Mécanique des matériaux solides, Dunod, Paris, (1985).

[2] Mahnaz SHAMSHIRSAZ . L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE CONTRAINTES RESIDUELLES DUES A L'ELABORATION DANS DES PLAQUES METALLIQUES MINCES MULTICOUCHES (1995).

[3] BENICHOU Khaled et TAIBI Ilyes ETUDE NUMÉRIQUE DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES DANS LES BI-MATÉRIAUX Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent 2015/2016

[4] G. Maeder, J.L. Lebrun, and J.M. Sprael. Matériaux, Mise en formes, Pièces formées, 1987.

[5] amine hatali CARACTÉRISATION ET MODÉLISATION THERMO-MÉCANIQUES DES ASSEMBLAGES MÉTAL-CÉRAMIQUE ÉLABORÉS PAR THERMOCOMPRESSION L'ÉCOLE CENTRALE DE LYON Année 2009

[6] W. REIMERS and R. DUPKE, "Colloque contraintes résiduelles," in Current and future activities in residual stress analysis by diffraction methods in HMI, Portugal, 1992, pp.1-23.

[7]. E. WELLE and W. REIMERS, "International conference on residual stresses," in Investigations of residual stress states in brazed meta/ceramic compound, USA, 1994, pp. 8-10.

[8] S. TANAKA and TAKAHASHI, "ISIJ International," in Effects of X-ray beam collimation on the measurement of residual stress distribution in a Si₃N₄/Steel joint, vol. 30,1990, pp. 1086-1091.

[9] C. COLIN, Ecole Normale Supérieure des Mines de Paris, Paris, Thèse de doctorat 1991.

[10] G. Lascar Thèse de l'université de Metz 1989.

[11] J. CHASKALOVIC, Méthode par éléments finis pour les sciences de l'ingénieur.: Ed. Lavoisier ISBN, 2004.

[12] V. GUIPONT, "Déterminations expérimentales de contraintes résiduelles au sein d'assemblages céramique/métal réalisés par brasage:Application au couple nitrure de silicium/acier doux," Ecole Centrale de Lyon, Lyon, Thèse de doctorat 1994.

[13]. P. LOURDIN, Ecole Centrale de Lyon, Lyon, Thèse de doctorat 1991

[14]. Y. EBIHARA and K. KADOTA, JSME Inter, vol. 35, no. 4, pp. 489-495, 1995

[15] Y. ISHIDA and J. WANG, Anal.Sci, vol. 7, pp. 1231-1234, 1991.

[16] M. GAO and F. BAO, J.Mater.Sci, pp. 399-404, 1995.

[17] S. KOVALEV, P. MIRANZO, and M. OSENDI, J.Amer. Ceram.Sci, pp. 2342-2348,

1998.

[18] M. NICHOLAS and R. CRISPIN, Proc.Brit.Ceram.Soc, vol. 32, pp. 33-40, 1982.

[19] K. SAGANUMA, T. OKAMOTO, M. KOIZUMI, and M. SHIMADA, J.Mater.Sci, pp.648-650, 1985.

[20] K. SUGANUMA, T. OKMATO, M. KOIZUMI, and M. SHIMADA, J.Amer. Ceram. Soc, 1983.

[21] K. SUGANUMA, T. OKMATO, M. KOIZUMI, and M. SHIMADA, J.Amer. Ceram. Soc, pp. 256-257, 1984.

[22] K. SUGANUMA, T. OKMATO, M. KOIZUMI, and M. SHIMADA, J.Amer. Ceram.Soc, pp. 648-650, 1985.

[23] M. NAKA, T. TANAKA, and I. OKAMOTO, Trans.Jpn weld res.Inst, vol. 14, no. 2, pp. 85-91, 1985.

[24] K. SUGANUMA, T. OKAMOTO, Y. MIYAMOTO, M. SHIMADA, and M. KOIZUMI, J.Mater.Sci, vol. 2, pp. 1156-1161, 1986.

[25] T. YAMADA, K. YOKOI, and A. KOHNO, J.Mater.Sci, vol. 25, pp. 2188-2192, 1990.

[26] Y. ZHOU, F. BAO, J. REN, and T. NORTH, J.Mater.Sci and Tech, vol. 7, p. 863, 1991.

[27] P. Lourdin. Les liaisons Ni/al203 à l'état solide, élaboration, état des contraintes thermiques, comportement mécanique, Thèse de l'école centrale de Lyon (1992)

[28] **J.P. Besse.** Revêtement métalliques ou céramiques sur polymère, application aux multimatériaux.(2002)

Références des figures (chapitre II) :

[1] Mahnaz SHAMSHIRSAZ CONTRAINTES RESIDUELLES DUES A L'ELABORATION DANS DES PLAQUES METALLIQUES MINCES MULTICOUCHES L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE 6 Juin 1995.

[2] Karina HIRSCHI Analyse des contraintes résiduelles et des paramètres microstructuraux par diffraction de neutrons dans un acier inoxydable austénitique UNIVERSITE DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE 1999.

[3] BENICHOU Khaled et TAIBI Ilyes ETUDE NUMÉRIQUE DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES DANS LES BI-MATÉRIAUX Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent 2005/2006.

[4] V. GUIPONT, "Déterminations expérimentales de contraintes résiduelles au sein d'assemblages céramique/métal réalisés par brasage: Application au couple nitrure de silicium/acier doux," Ecole Centrale de Lyon, Lyon, Thèse de doctorat 1994.

[5] Y. ZHOU, F. BAO, J. REN, and T. NORTH, J.Mater.Sci and Tech, vol. 7, p. 863, 1991

Chapitre 3

Analyse et résultat

III.1 Introduction

L'avenir est à l'outil numérique et à la réalité virtuelle; la simulation et l'analyse numérique se sont développées ces dernières années dans la recherche industrielle privée ou publique (constructeurs automobile, aéronautique, spatial...) améliorant ainsi la productivité des industriels et la vie de tous les consommateurs [1].

L'utilisation de codes de calculs par éléments finis s'avère indispensable pour des modélisations complètes de la répartition spatiale des contraintes résiduelles au sein d'assemblages plus complexes. Les possibilités et les limites des méthodes utilisées sont décrites à la lumière des données bibliographiques concernant l'étude des liaisons métal/céramique.

De nombreuses méthodes ont été développées afin de minimiser les contraintes résiduelles d'un assemblage métal-céramique. Elles font souvent appel à des couches intermédiaires dont le but est d'ajuster les coefficient de dilatation des deux matériaux. Des métaux tels que le cuivre et l'aluminium ont donné de bons résultats [104 thèse hattali].

III.2. Modélisation par éléments finis

III.2.1 Définition de logiciel de calcul par éléments finis ABAQUS :

ABAQUS est un code de calcul par la méthode des éléments finis créé en 1978. Il est avant tout un logiciel de modélisation de problèmes très variés en mécanique. Simuler la réponse physique des structures soumises à des chargements, des températures, des impacts ou autres conditions extérieures, Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants des problèmes linéaires et problèmes non linéaires [2].

III.2.2 Les éléments utilisés par ABAQUS [3] :

On distingue différentes grandes classes d'éléments :

- Les éléments unidimensionnels (1D) : barre; poutre, rectiligne ou courbe
- Les éléments bidimensionnels (2D) : élasticité plane (contrainte ou déformation plane), plaques en flexion, coques courbes de forme triangulaire ou rectangulaire.

- les éléments tridimensionnels (3D) : de forme tétraédrique, hexaédrique...etc.
- les éléments axisymétriques : (pour les pièces présentant une symétrie de révolution au niveau de la géométrie et du chargement).
- les autres éléments : ressorts, amortisseurs, rigides.

III.2.3 Réalisation d'un modèle par simulation numérique

La réalisation complète d'un jeu de données s'effectue après un passage successif dans les modules [4] :

- Part
- Property
- Assembly
- Step
- Interaction
- Load
- Mesh
- Job (pour lancer le calcul)

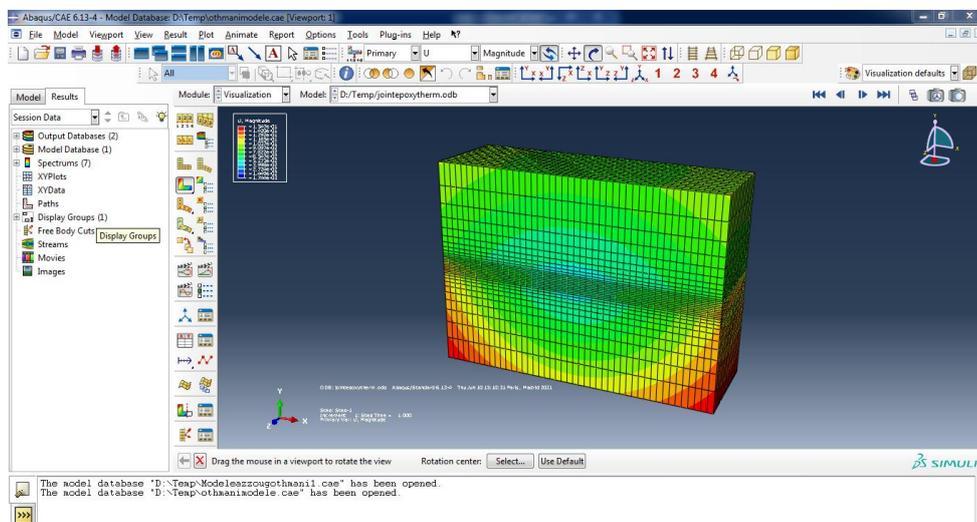


Figure.III.1: logiciel de calcul par éléments finis ABAQU[1]

III.3 Présentation du modèle

Le modèle numérique développé pour cette étude est une structure tridimensionnelle constituée composée de trois matériaux (Al_2O_3 , Nickel et HAYNESTM 214®) conjointement assemblés (fig. 2). Cet assemblage (multi-matériau) est soumis à des efforts de traction uni axiale d'amplitude (σ) uniformément répartie (fig2). De largeur ($l=5$ mm), de hauteur ($h=11$ mm) et d'épaisseur ($e=1$ mm). la différence de coefficient de dilatation thermique entre la céramique (Al_2O_3) et le métal (Ni et HAYNESTM 214®) conduit à de forte concentration de contraintes résiduelles a l'interface. Une simulation par éléments finis en utilisant le code ABAQUS, nous a permis de localiser le champ des contraintes résiduelles dans ce type d'assemblage. Une comparaison entre un modèle avec joint et un autre sans joint a été réalisée. Le modèle numérique développé pour cette recherche est une structure tridimensionnelle assemblée à partir de trois matériaux (L'alumine et le nickel et L'HAYNESTM 214®) (Figure 2). La hauteur est divisée en trois parties : 5 mm d'alumine plus 1 mm de nickel plus 5 mm de HAYNESTM 214®

L'alumine (Al_2O_3)

Est un composé très dur. A température ambiante, elle est inattaquée par les composés chimiques courants. Elle fond à plus de 2000 °C. L'alumine très pure peut être utilisée jusqu'à 1700°C. La combinaison d'un coefficient thermique élevé, d'une faible dilatation thermique et d'une résistance élevée à la compression permet une bonne tenue aux chocs thermiques. On l'utilise donc comme matériau réfractaire, par exemple pour le revêtement de fours, tubes et gaines de thermocouples soumis à des chocs thermiques. L'alumine offre également une bonne isolation électrique à température élevée et une bonne résistance à l'usure, ce qui permet de l'utiliser comme matériau d'outillage [5].

Le Nickel(NI)

Est un métal blanc brillant de numéro et de masse atomique respectivement 28 et 58.7, il est classé parmi les métaux de transition (ferromagnétique) qui fait partie du groupe des métaux non-ferreux. Le Nickel sous forme d'ions, se présente essentiellement sous degré d'oxydation +2. Il peut se présenter au degré +3 et très exceptionnellement au degré +4. Au degré d'oxydation +2, le Nickel donne d'une manière générale des composés de couleur verte.

Le nickel est utilisé sous forme de plaquette de 0,25 mm d'épaisseur obtenue après laminage et découpage d'une tôle de 1 mm d'épaisseur [6].

L'HAYNES TM 214®

Est un alliage industriel à base de Ni de structure austénitique. Les principales caractéristiques de cet alliage sont la bonne résistance à l'oxydation et à la corrosion. A une température avoisinant 950 °C, l'alliage forme en surface des oxydes mixtes type Cr₂O₃ et Al₂O₃ qui lui confèrent une protection à l'oxydation suffisante, comparable à celle obtenue par les alliages à haute teneur en nickel. Il s'agit aussi d'un alliage qui a un très bon comportement à la soudabilité (TIG, MIG...) [7].

	HAYNES	Nickel (Ni)	Alumine (Al₂O₃)
E (GPa)	218	205	375
α (10⁻⁶. K⁻¹)	13.12	13.1	6.9
ν	0.3	0.29	0.28

α : coefficient d'expansion thermique ν : coefficient de poisson E : module d'élasticité

Tableau III.1: Les propriétés mécaniques et physiques des matériaux [1]

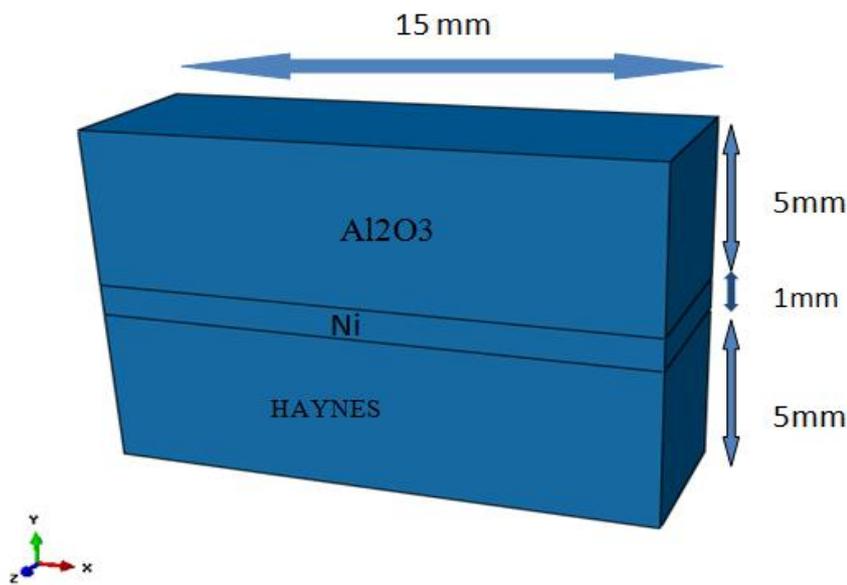


Figure.III.2 : Modèle tridimensionnelle étudié.

III.4 Le maillage

Le maillage d'une géométrie constitue la partie la plus longue et la plus déterminante d'un modèle numérique. On estime que cette étape représente environ 60% du temps consacré au projet. Le maillage est la discrétisation spatiale d'un milieu continu. Le maillage est alors constitué d'un repère, de points le constituant et leurs coordonnées, et des cellules, formant des polyèdres que forment les points une fois reliés.

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.

Pour la fiabilité des résultats, le maillage adopté a été suffisamment raffiné à l'interface comme l'illustre la figure **III.3**

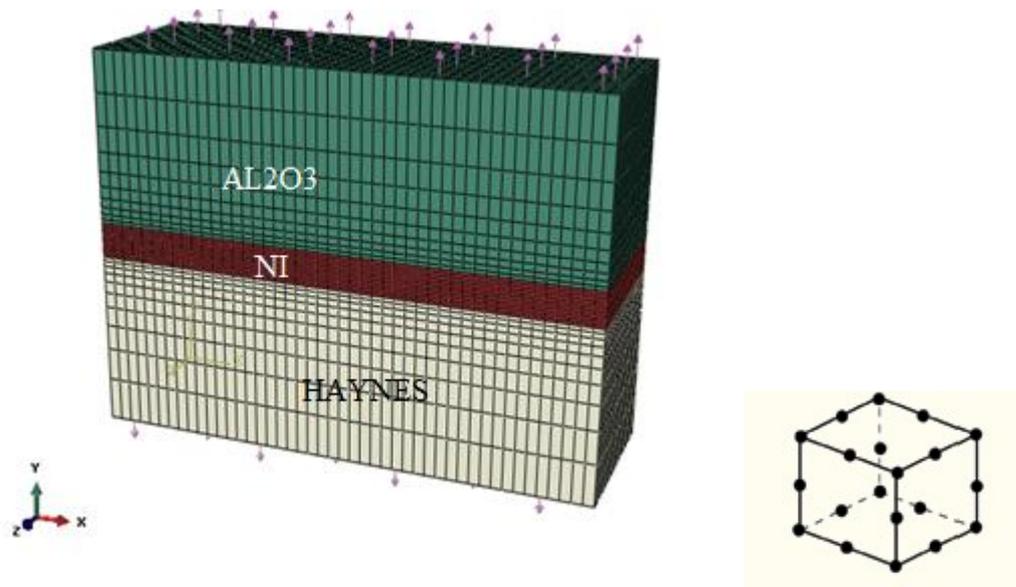


Figure.III.3.: Maillage 3D de l'assemblage AL2O3/Ni/HAYNES

III.5 Résultats et discussions

III.5.1. Effet du chargement Mécanique

Dans ce qui suit, nous analysons numériquement par la méthode des éléments finis l'effet du chargement appliquée dans une structure constituée de trois matériaux différents assemblées sur le niveau et la distribution des contraintes induites dans ces constituant au voisinage proche de leur interface.

Sur la figure III.4 est montré le niveau et la distribution des contraintes principales radiales (S11), Circonférentielles (S22) et longitudinales (S33) dans un matériau composé (céramique, alliage, métal) soumis à un chargement mécanique. La distribution de ces contraintes résiduelles dans l'assemblage n'est pas homogène. Leurs niveaux et leurs distributions dépendent de la nature des constituants du multi-matériau. Ces contraintes sont fortement déterminées au voisinage près de l'interface ou joint de nickel.

La figure III4.a présente les contraintes normales induites selon la direction X de la structure sont fortement concentrées dans l'interface entre le HAYNES™ et le nickel est plus fort que les contraintes qui présente au niveau du largeur de AL2O3. Les contraintes développées dans la deuxième direction de la jonction σ_{yy} les plus importantes sont situées dans la céramique (AL2O3) près du bord de son interface avec le métal (nickel), Un

éloignement de cette partie de la structure conduit à une relaxation progressive des ces contraintes. Dans la troisième direction Z les contraintes normales sont plus fort dans l'interface par rapport la figure III.4.b.

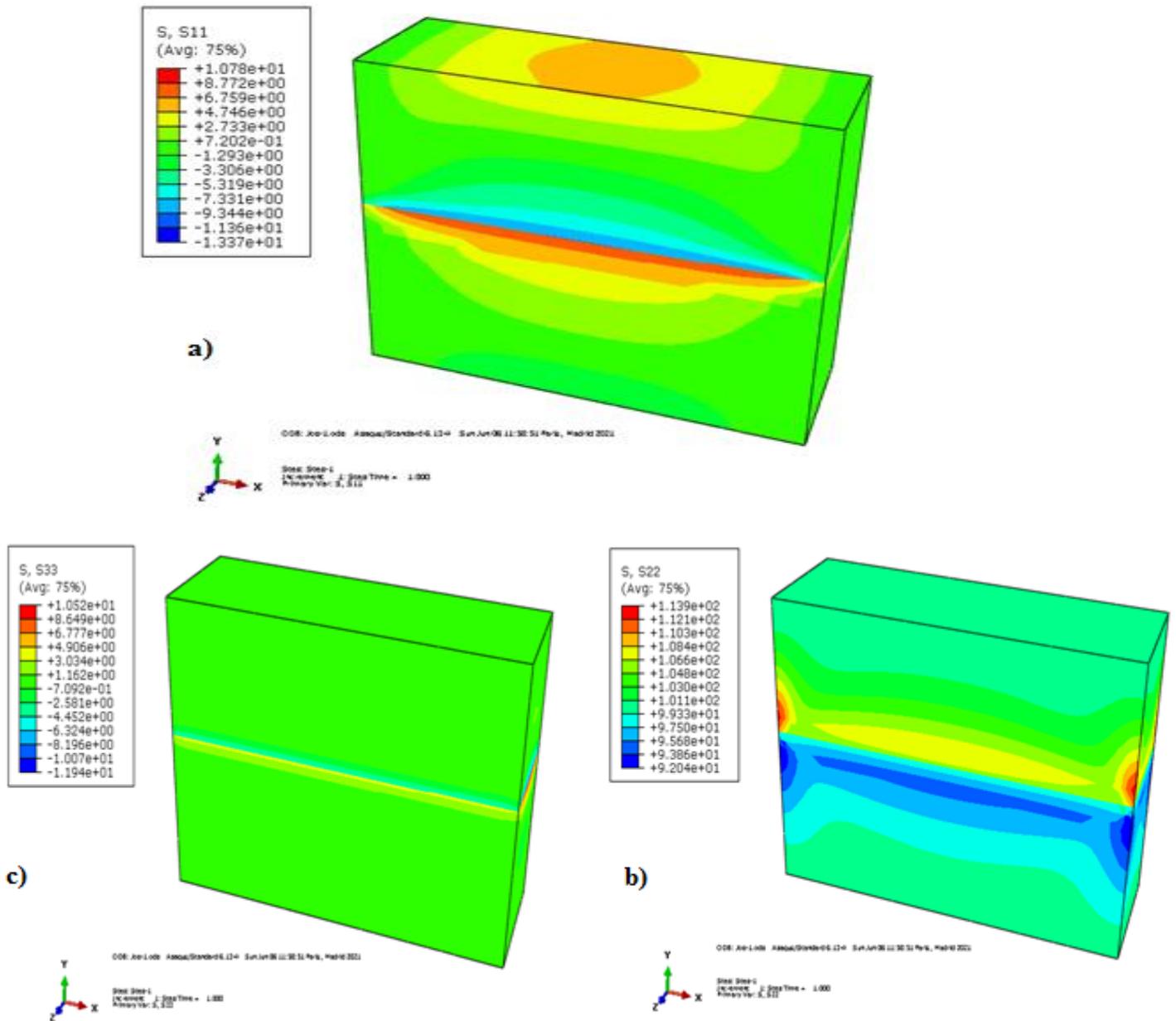
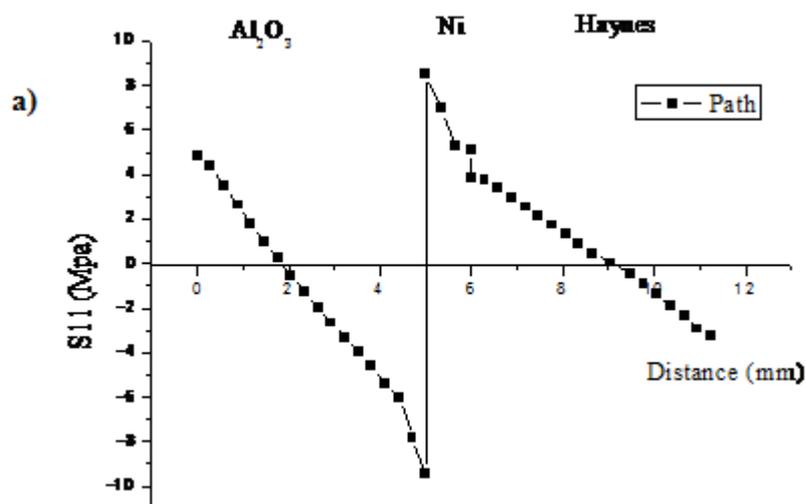
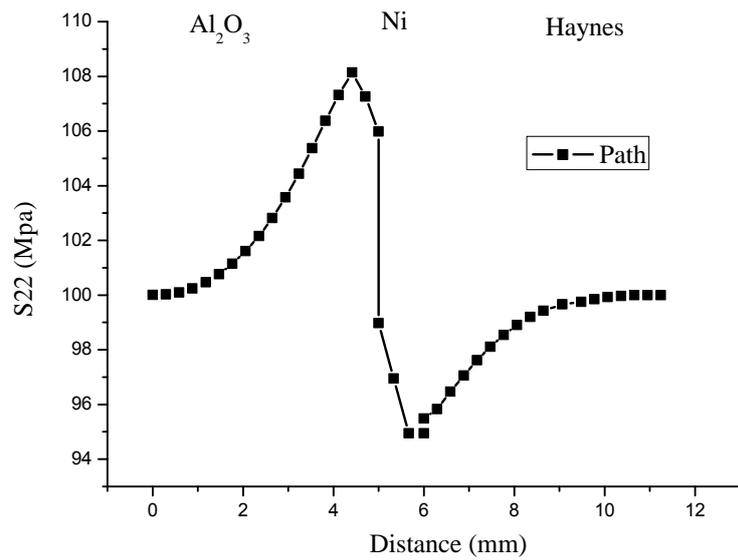


Figure III.4 : Distribution des contraintes sous l'effet d'un chargement mécanique

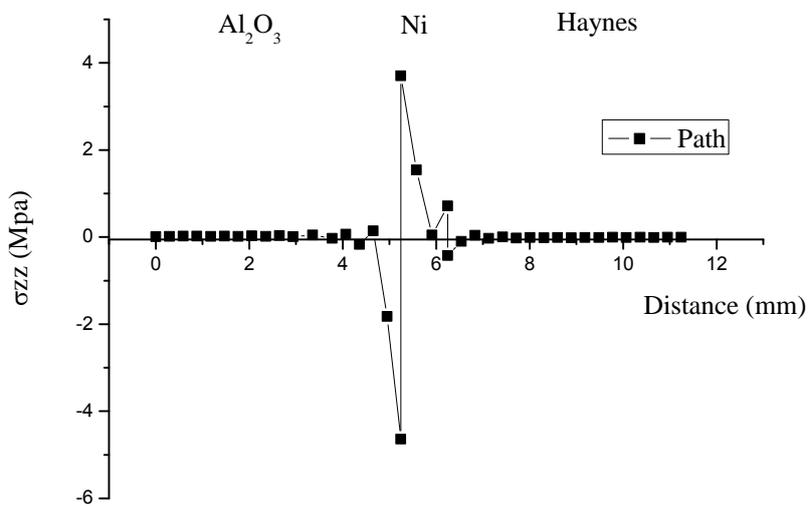
La figure 5a présente la variation des contraintes radiales en fonction de la distance. Cette figure montre clairement que ces contraintes augmentent fortement au niveau du joint en nickel, car plus on se rapproche à l'interface les contraintes diminuent dans les deux matériaux (Al_2O_3 et HAYNES), ce qui explique l'augmentation de la présence de contraintes au niveau du joint en nickel. Pour la figure 5b, la variation de la contrainte circonférentielle en fonction de la distance a été présentée, on remarque que le niveau de ces contraintes sont plus importantes que les contraintes radiales et les contraintes longitudinales. On remarque que plus on se rapproche du joint du nickel, plus les contraintes augmentent au niveau du matériau céramique Al_2O_3 .

Quand au nickel, on constate une diminution significative des contraintes avec une élévation relative au niveau de HAYNES, ce qui explique que les 3 matériaux en tension. La figure 5c présente la variation de la contrainte longitudinales en fonction de la distance, on remarque que ces contraintes sont absentes au niveau des matériaux HAYNES et Al_2O_3 Aux bords, par contre, on note l'existence de ces contraintes au niveau de joints nickel. Les contraintes résiduelles normales σ_{yy} restent fortes et peuvent constituer un risque d'endommagement des multi matériaux. Nos résultats montrent que la présence d'interface dans les matériaux est le siège de concentration de contrainte.





b)



c)

Figure III.5: Variation des contraintes normales en fonction de la distance

III.5.2. Effet du chargement thermique :

La température est un paramètre physique fondamental pour la réalisation des assemblages métallo-céramique. Il est donc important d'analyser l'influence de ce

paramètre sur le niveau des contraintes internes induites thermiquement. Dans notre cas, la température choisie pour la simulation de ce composé est de 1150°C .

Les contraintes ont été calculées selon une position définie (path1) schématisé en figure III.6, les contraintes internes induites dans le multi-matériau selon la direction X, les plus significatives sont situées dans l'interface entre le nickel et HAYNES. Le niveau de ces contraintes élève au fur et à mesure ou l'on s'éloigne de l'interface entre nickel et HAYNES et le contrairement entre nickel et AL₂O₃ (figure-6- b). dans le troisième direction z les contraintes plus élève dans la interface nickel.

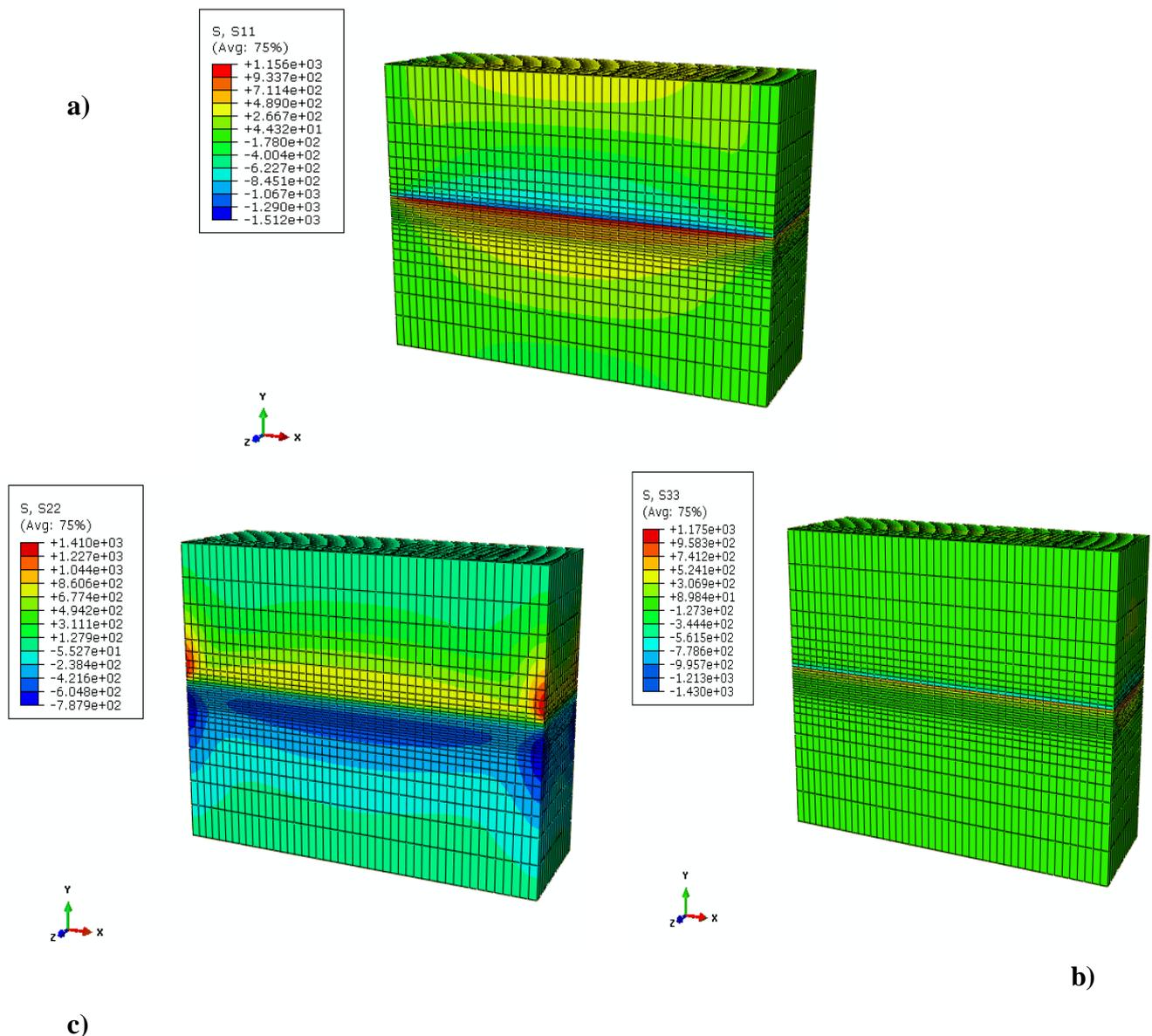


Figure III.6: Distribution des contraintes (a) : principales radiales,(b) contrainte Circonférentielles,(c) contrainte longitudinales sous l'effet d'un chargement thermique

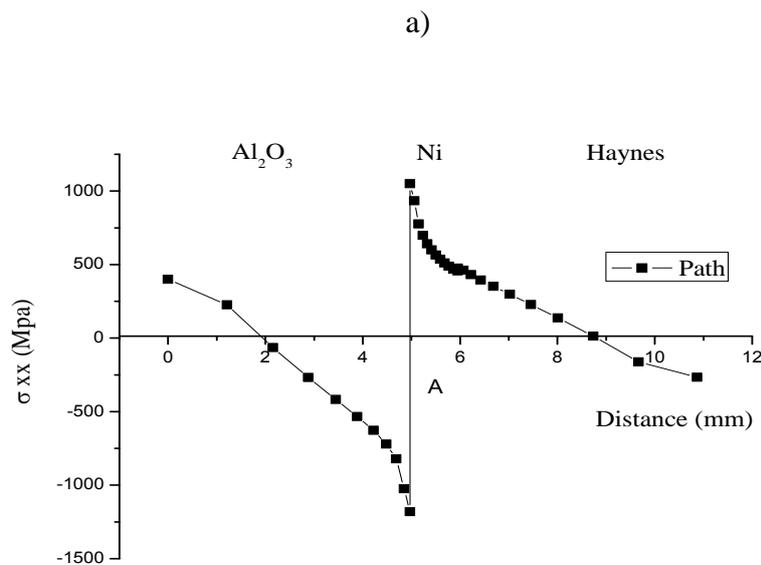
La figure 7 montre que l'élaboration du matériau composite consiste à la création des contraintes internes d'origine thermique dont on cite : les contraintes principales radiales (σ_{xx}), Circumférentielles (σ_{yy}) et contrainte longitudinales (σ_{zz}), vu que ces contraintes sont les plus significatives

Sur la figure III.7.a est représentée la variation des contraintes internes normales σ_{xx} en fonction de la distance, on remarque que les contraintes radiales sont élevées et plus intenses au niveau du joint de nickel par rapport à Al_2O_3 et HAYNES.

On remarque aussi, que ces contraintes sont d'autant plus importantes que le coefficient de dilatation thermique du métal (Ni) est élevé.

La figure III.7.b représente la variation des contraintes internes Circumférentielles (σ_{yy}) en fonction de la distance, Cette figure montre clairement que ces contraintes augmentent fortement au niveau du joint en nickel, car plus on se rapproche à l'interface les contraintes augmentent dans les deux matériaux (Al_2O_3 et HAYNES),

Dans la figure III.7.c, est représentée la variation des contraintes internes (σ_{zz}) en fonction de la distance. On remarque que les contraintes sont absentes au niveau de (Al_2O_3 et HAYNES) et très intéressante à l'interface (joint de nickel).



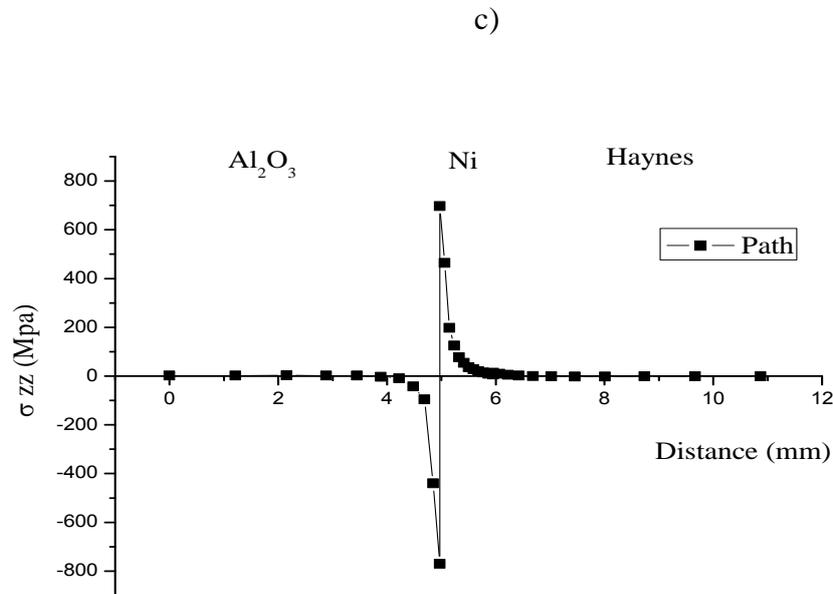
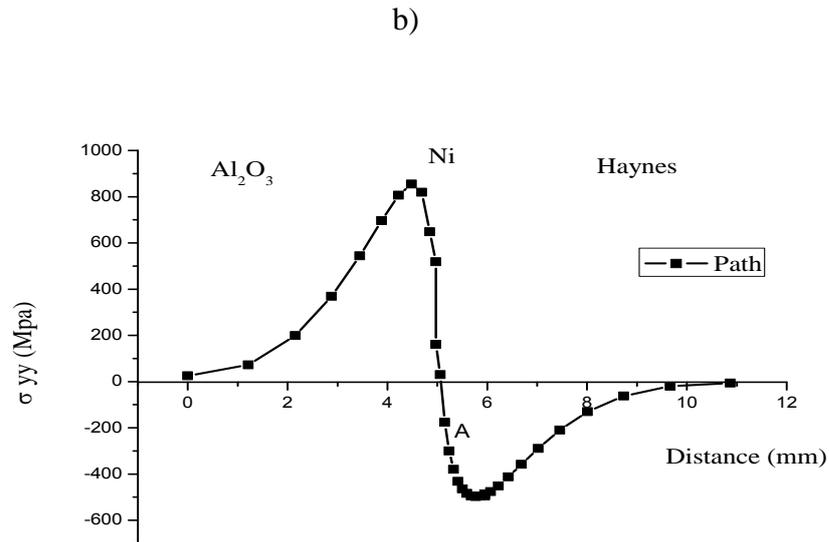


Figure III.7 variation des contraintes principales pour un chargement thermique

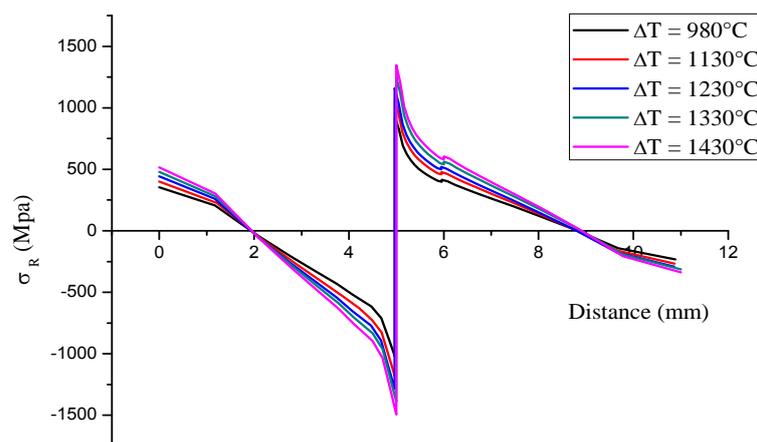
Dans les 2 cas on a utilisé le chargement de température au cours d'élaboration de cet assemblage multi-matériau.

Sur la figure III.8.a, est représentée la variation des contraintes radiales normales σ_{xx} en fonction de la distance. Cette figure montre une augmentation de cette température qui entraîne un accroissement de l'amplitude des contraintes résiduelles. Ce paramètre

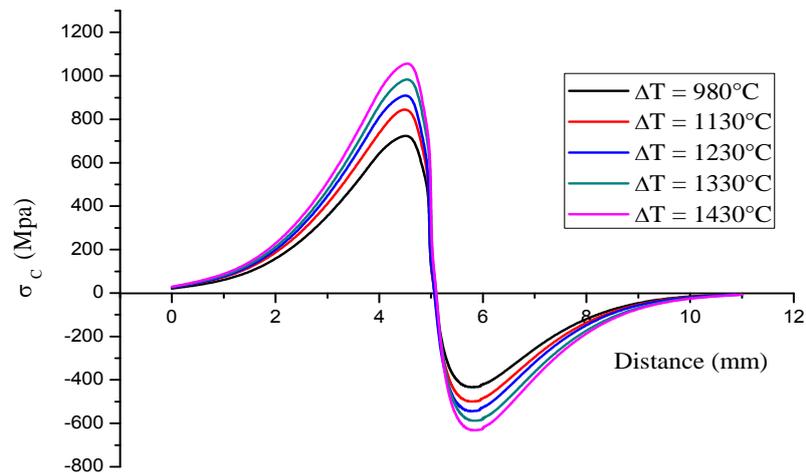
physique induit des contraintes plus intenses au voisinage de l'interface du joint de nickel et décroissant au niveaux des matériaux AL₂O₃ et HAYNES.

la figure III.8.b représentée la variation des contraintes (σ_{yy}), Cette figure montre qu'un accroissement de Ces contraintes mettant la céramique en tension et le HAYNES en compression.

Précédemment, il a été montré que la température est un paramètre physique déterminant. Il conditionne la résistance mécanique de l'interface du matériau composé type céramique-métal. L'étude de son influence sur le niveau des contraintes internes est d'une grande importance pour la survie de ces types de matériaux. Les résultats obtenus et représentés sur les figures III 8a, b montrent que le niveau de ces contraintes est d'autant plus élevé que la température augmente. Ces contraintes de très fortes intensités peuvent être fatales pour l'assemblage. La température d'élaboration doit être optimisée. En effet, elle doit permettre à la fois la réalisation des matériaux composés à interface cohésive avec moins de contraintes résiduelles.



a)

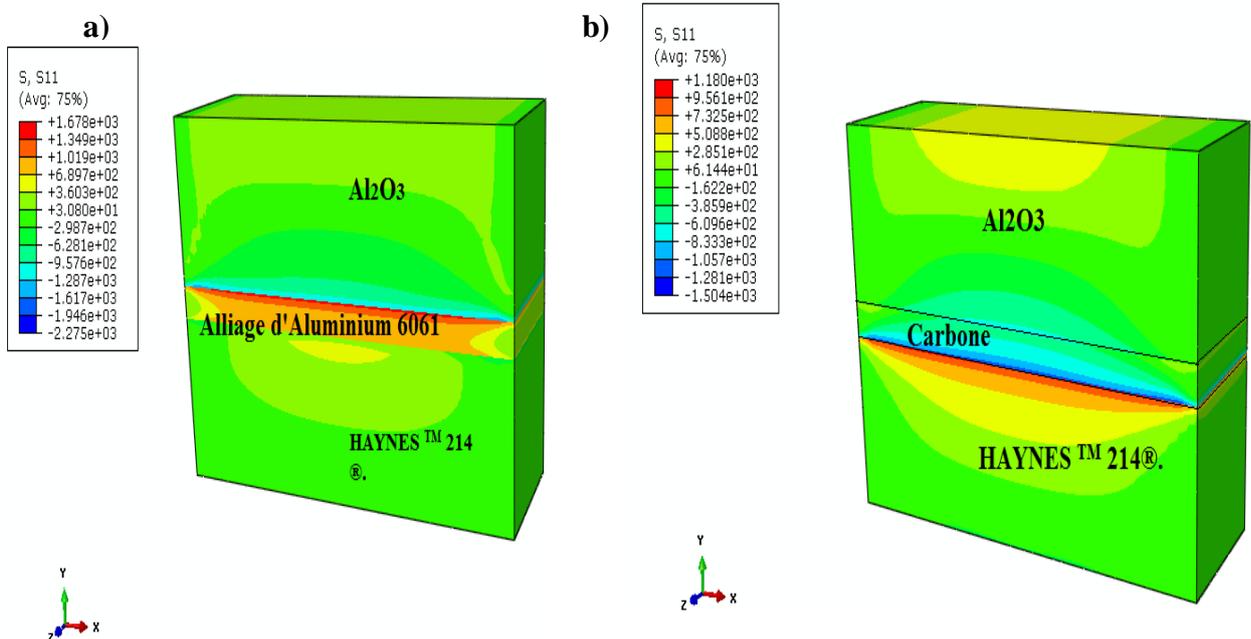


b)

Figure III.8 : Variation de la contrainte (σ_{yy} , σ_{xx}) en fonction de la température d'élaboration de la jonction

III.5.3. Effet de la nature du joint (chargement thermique) :

Pour cette partie du travail, nous avons analysé l'influence des propriétés des différents joints choisis sur le niveau et la distribution des contraintes induites dans le multi matériau par un chargement thermique. Pour ce faire trois matériaux conjointement liés ont été analysé, les résultats ainsi obtenus sont représentées sur la figure III.9



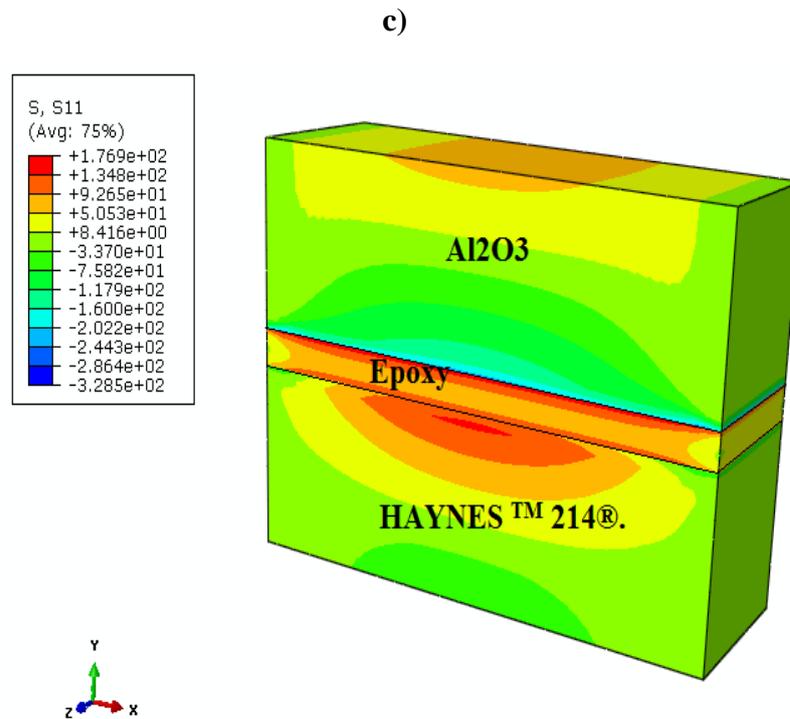


Figure III.9 : Répartition et niveau des contraintes sous l'effet de changement la nature de joint

L'analyse de la figure III.9.a. b. c montre la variation de les contraintes (σ_{xx}) induite dans le multi-matériau soumis à un chargement thermique en fonction de la nature de différents types de matériaux du joint assemblée à la céramique et l'alliage HAYNES 214.

Dans le cas de la liaison Al₂O₃/**Carbone**/HAYNESTM214®. On note que les contraintes (σ_{xx}), (σ_{yy}), (σ_{zz}), (la figure III.10) présentent une bonne réduction de ces contraintes sur la jonction des deux matériaux céramo-métallique. Pour le cas de la liaison Al₂O₃/**Ep**/Al₂O₃, le joint en époxy a joué le rôle d'un adhésif, ce qui a introduit un niveau très bas de ces contraintes. L'explication peut-être liée à la propriété mécanique et physique du matériau du joint. L'observation du comportement à la rupture de la liaison Al₂O₃/**Alliage d'Al 6061**/HAYNES™ 214® montre que la contrainte a augmenté -une valeur très élevée-. On confirme donc encore l'excellente tenue des assemblages Al₂O₃/**Ep**/HAYNESTM214® et Al₂O₃/**C**/ HAYNESTM214®

la nature de joint joue un rôle déterminant sur de assemblage un bon matériaux , autrement dit sur sa résistance mécanique. Cette nature est définie, ici, en termes de rigidité (module de Young) et de dilatation différentielle (coefficient de dilatation thermique).

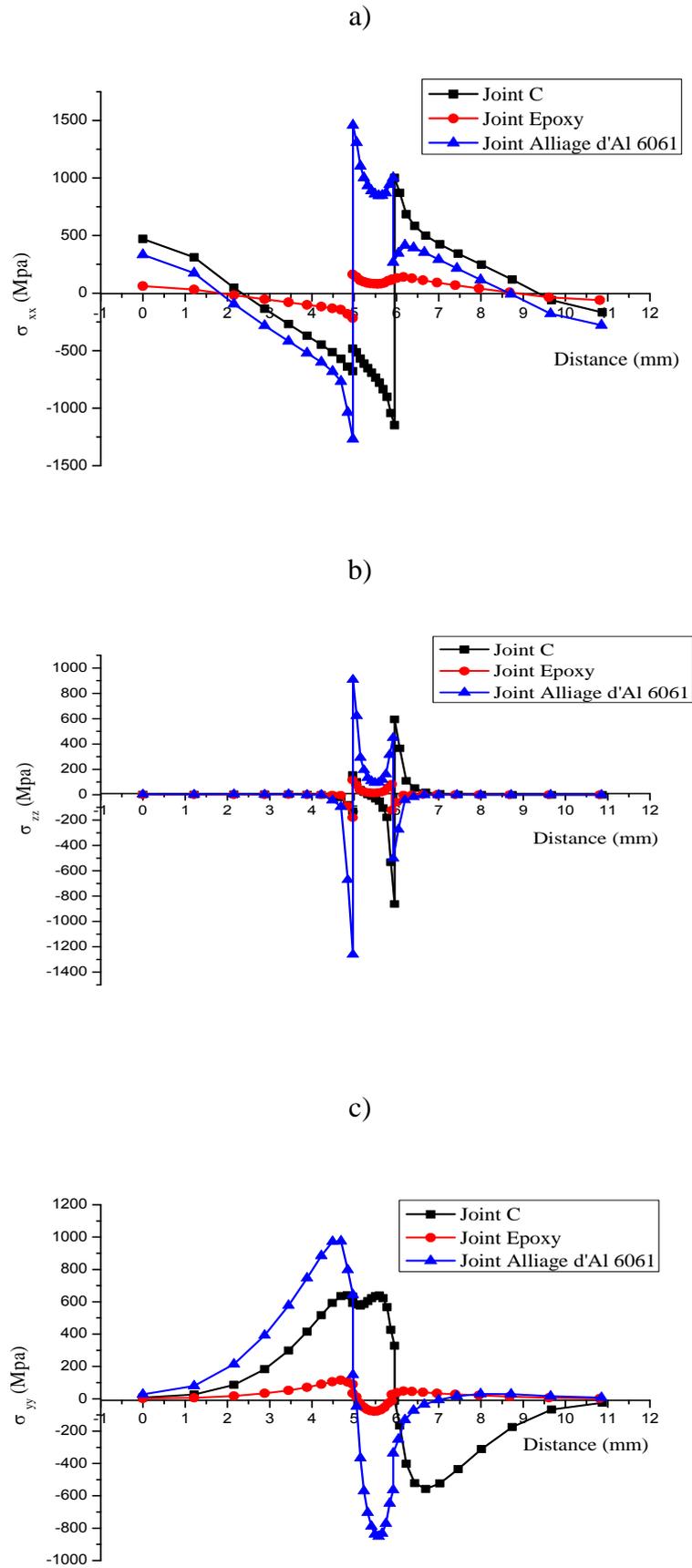


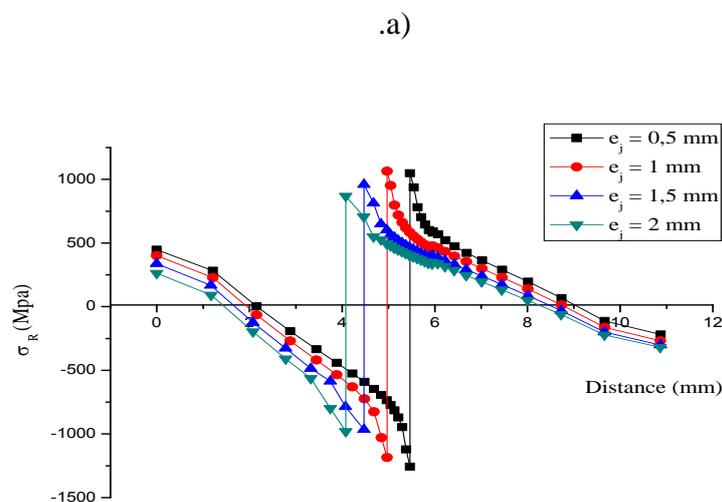
Figure III.10 : la variation des contraintes en fonction de changement de la nature de joint

III.5.4. Effet de l'épaisseur du joint

Afin d'avoir une idée globale sur le tenseur des contraintes résiduelles réelles, nous avons réalisé une simulation numérique en 3D. **Figure III.2** illustre le champ des contraintes résiduelles près de l'interface. Le calcul 3D a montré que ces contraintes sont concentrées au niveau de l'interface du multi – matériau. Cette concentration de contraintes est due à la forte énergie de déformation plastique emmagasinée dans le volume des matériaux.

Sur la figure III.11 est représentée la variation de la contrainte interne dans une jonction alumine-HAYNES- en fonction de l'épaisseur du nickel. L'analyse de cette Figure montre que les contraintes les plus fortes sont localisées au voisinage proche de l'interface. Elles diminuent d'intensité au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'interface. Loin de cette dernière, l'effet de ce défaut disparaît et le multi-matériau se comporte comme un matériau homogène. Des simulations numériques pour une configuration type d'assemblage $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}/\text{HAYNES}^{\text{TM}} 214\text{®}$ ont été réalisées.

La figure III.11. Montre que pour une telle configuration, les contraintes normales sont comme précédemment sensibles à l'épaisseur du joint. L'optimum est obtenu pour les épaisseurs les plus grandes $e_{\text{joint}} = 0.5\text{mm}$ et 1 mm , 1.5mm et 2mm . On remarque que l'ordre de grandeur de ces contraintes est plus faible que celui engendré par une géométrie d'un joint plus mince et petit.



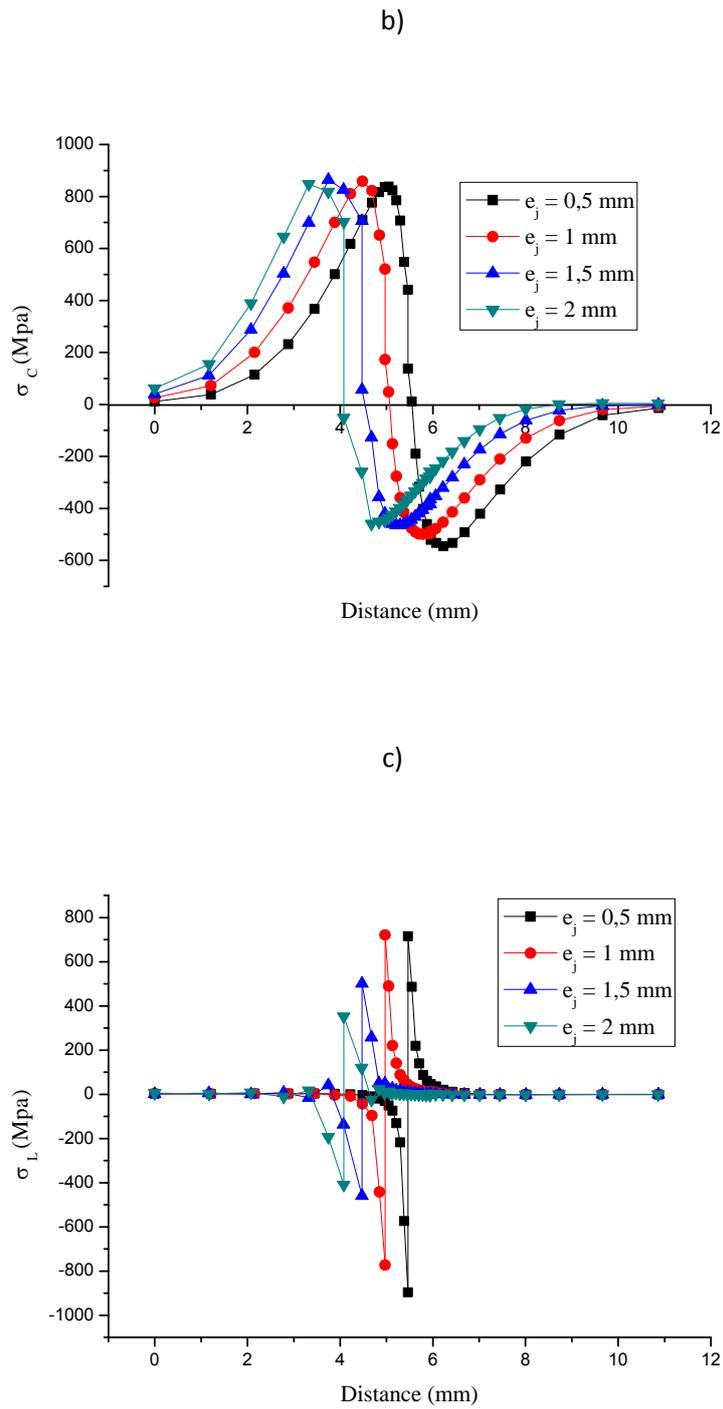


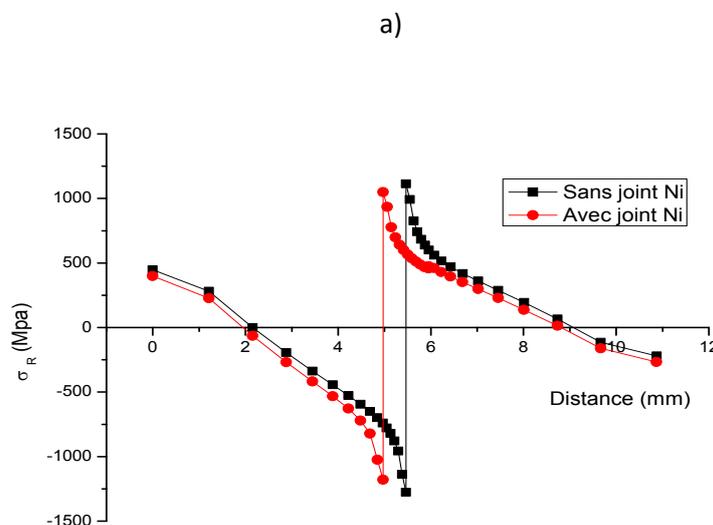
Figure III.11. Variation des contraintes en fonction de la taille de l'épaisseur

III.5.5. Effet du joint :

Dans cette partie du travail nous analysons numériquement par la méthode des éléments finis l'intensité et la répartition des contraintes induites thermiquement dans notre modèle (Figure III. 2) avec et sans joint de nickel. Les résultats obtenus à partir de cette étude ont été représentés sur la figure III.12. La figure 12a présente la variation des contraintes radiales en fonction de la distance. Cette figure montre clairement que ces contraintes augmentent fortement au niveau de l'interface et accroissent dans le cas de l'absence du joint de nickel, ce qui explique que ce dernier joue le rôle d'un matériau intermédiaire qui absorbe les contraintes au niveau de l'interface des deux matériaux (Al_2O_3 et HAYNES).

Les contraintes normales dans la direction y mettent le céramique Al_2O_3 en tension et le métal en compression dans les deux cas de l'assemblage. Les contraintes sont plus intensivement localisées dans l'interface (sans joint Nickel) qu'avec le joint de nickel.

la figure 12c présente la variation des contraintes σ_{zz} en fonction de la distance, le niveau et la répartition de ces contraintes sont incomparable à ceux des contraintes σ_{xx} , σ_{yy} , les contraintes sont inexistant au niveaux de matériaux (Al_2O_3 , HAYNES), Loin de leur interface, ces deux constituants de l'assemblage sont entièrement relaxés de ces contraintes. Le niveau de ces contraintes augmente fortement au niveau de l'interface et augmente dans le cas d'absence de joint de nickel par rapport à la présence du joint de nickel. L'importance de joint de nickel est l'Absorption des contrainte au niveau des constituants d'assemblage (Al_2O_3 , HAYNES) et par conséquent de diminuer les contraintes résiduelles.



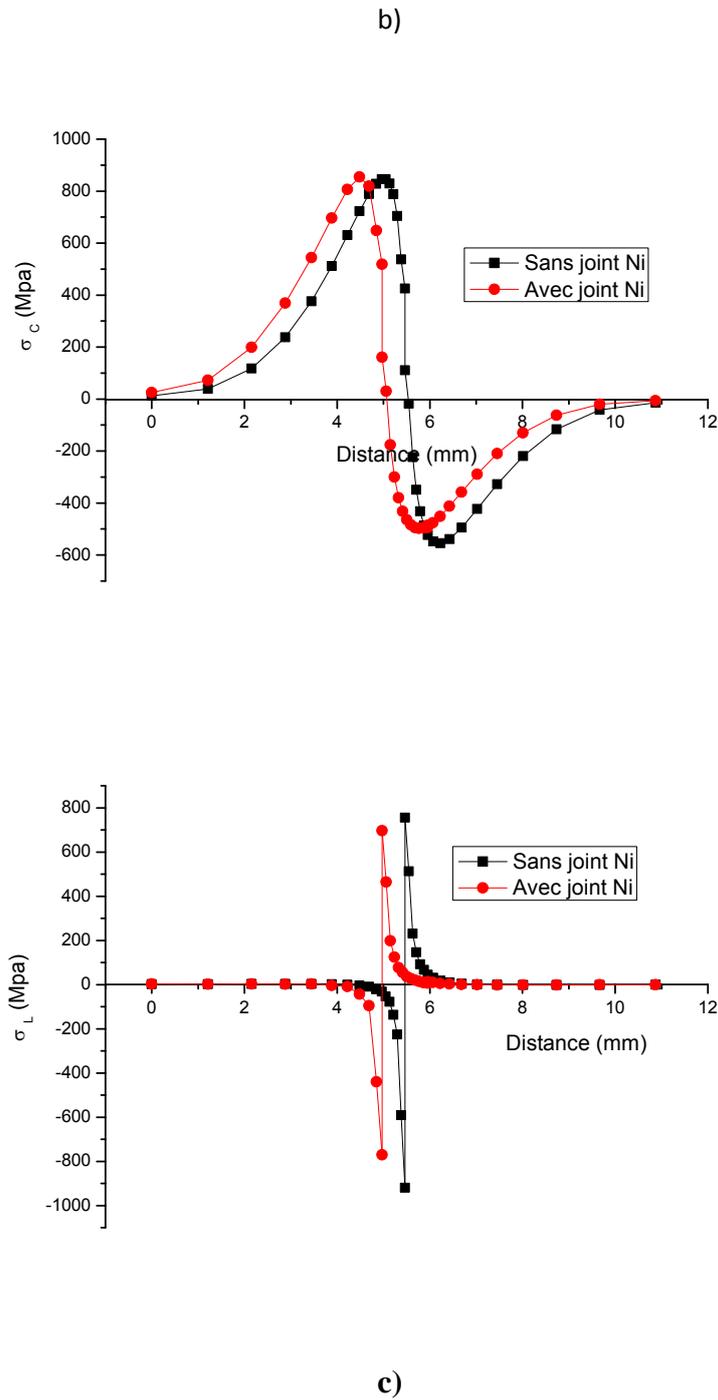


Figure III.12 : Distribution de contraintes pour les deux modèles de matériaux composés (avec et sans joints).

III.6. Conclusion Générale

Les résultats obtenus montrent que :

- Les contraintes normales les plus significatives sont fortement localisées au cœur de l'interface. Ces contraintes d'autant plus intenses que la température d'élaboration de l'assemblage métal-céramique est élevée.
- la présence de Les contraintes résiduelles fortes peuvent constituer un risque d'endommagement des multi matériaux
- la différence entre les coefficient de dilatation thermiques des deux matériaux (métal et céramique) conjointement liés induit, dans ces deux constituants, des contraintes internes normales. Cette différence conditionne le niveau et la distribution de ces contraintes. Le signe de cet écart détermine l'état des contraintes normales
- dans l'effet de chargement thermique les contraintes résiduelles, fortement localisées près de l'interface, croissent avec l'accroissement de température de réalisation de jonction. L'effet de ce paramètre physique s'annule loin de la zone de contact céramo-métallique. Loin de l'interface, le multi-matériau se comporte comme un matériau homogène soumis à un chargement thermique.
- l'importance de joint est l'Absorption des contrainte au niveau des constituants d'assemblage et par conséquent de diminuer les contraintes résiduelles.
- Nous résultants montrent que l'épaisseur du joint détermine le niveau des contraintes internes dans les assemblages céramo-métallique Où plus l'épaisseur du joint est grande, on constate une diminution du niveau des contraintes a l'interface
- la nature du joint joue un rôle déterminant sur des assemblages d'un bon matériau, autrement dit sur sa résistance mécanique. Cette nature est définie, ici, en termes de rigidité (module de Young) et de dilatation différentielle (coefficient de dilatation thermique).
- la nature de joint epoxy sont le meilleure pour un assemblage (céramique, métal) car il joué le rôle d'un adhésif, ce qui a introduit un niveau très bas de ces contraintes.

Référence bibliographie (chapitre III)

- [1] Présentation général d'Abaques. Formation des masters; école central de paris. 2008.
- [2]. PATRICKH ROZICHI. « Formation ABAQUS » Université de Nantes, France, 2007.
- [3]. M. SARTOR, « Eléments finis » Notes de cours, Chapitre 01
- [4]. MEFTEH KAMEL, « Cours : Introduction général au logiciel Abaqus » université de Biskra, 2013.
- [5] F. Jean-Marie Haussonne «Céramiques pour composants électroniques »Technique de l'ingénieur; Traité Electronique ; E1820.
- [6]. Kaci BARA Dépôt de nanoparticules de Nickel sur un substrat d'Argent et de Silicium le 10/07/2017 UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU FACULTE DES SCIENCES DEPARTEMENT DE PHYSIQUE.
- [7]. Lamine Hattali CARACTÉRISATION ET MODÉLISATION THERMO-MÉCANIQUES DES ASSEMBLAGES MÉTAL-CÉRAMIQUE ÉLABORÉS PAR THERMOCOMPRESSION Année 2009 L'ÉCOLE CENTRALE DE LYON.