

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

UNIVERSITE DJILLALI LIABES  
SIDI BEL-ABBES

# Mémoire

Présentée par :

**Mr. LAHRACH Amine**

Pour l'obtention du diplôme de Magister  
*SPECIALITE* : MECANIQUE DES MATERIAUX

## *THEME*



### ANALYSE DES CONTRAINTES RESIDUELLES DANS LES STRUCTURES ASSEMBLEES DE TYPE CERAMIQUE/METAL

Soutenu en Juillet 2012 devant la commission d'examen :

#### – JURY –

**Président :**

Mr. K. Kadouri                      Maitre de conférence                      Université de Sidi Bel- Abbés

**Encadreur :**

Mr. B. SERIER                                      Professeur                                      Université de Sidi Bel- Abbés

**Membres :**

MM.  
Mr. M.BELHOUARI                      Professeur                      Université de Sidi Bel- Abbés  
Mr. B.BACHIR BOUIADJRA              Professeur                      Université de Sidi Bel- Abbés  
Mr. B. ISMAIL                      Maitre de conférence                      Université de Sidi Bel- Abbés

## *Remerciements*

Ce travail a été réalisé au laboratoire de S-D-M (Science des Matériaux), Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbès, sous la direction de **Mr. B. SERIER** et **Pr M. BELHOUARI**. Je les remercie chaleureusement de m'avoir accueillie au sein de leur groupe et de m'avoir accordé leur confiance. Etre en leur compagnie, durant la recherche dans le domaine des bimatériaux, a été un réel plaisir.

Merci à mon encadreur **Pr. B. SERIER** d'être toujours resté à mon écoute et de m'avoir toujours orienté et soutenu. Je lui suis aussi extrêmement reconnaissant pour sa patience et l'humour dont il a su faire preuve à mon égard afin que je me surpasse.

Merci aussi au **Pr M. BELHOUARI** pour sa disponibilité et ses conseils précieux. Toujours à l'écoute, son expérience, son assistance ainsi que son efficacité m'a été d'un grand secours.

Je remercie les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont manifesté pour ce travail, plus particulièrement **Pr. B.BACHIR BOUIADJRA** pour m'avoir fait l'honneur de présider ce jury et **Pr M. BELHOUARI**, **Mr B. ISMAIL** et **Mr K. MADANI** pour avoir accepté la charge d'examineurs.

## Sommaire

Introduction générale \_\_\_\_\_ 1

**Chapitre I :**  
**Comportement en rupture des bimatériaux**

I.1. Les céramiques:.....	2
I.1. Généralités:.....	2
I.1.2 Quelques propriétés recherchées des céramiques:.....	2
I.2.1 Conductibilité thermique:.....	4
I.2.2 La chaleur spécifique:.....	5
I.2.3 Pouvoir de diffusion thermique:.....	5
I.3 Propriété physiques:.....	5
I.3.1. Isolation électrique:.....	5
I.3.2 Conductivité ionique:.....	5
I.4 Propriétés mécaniques: .....	6
I.4.1 Module de Young:.....	6
I.4.2 Comportement à température élevée:.....	6
I.4.3 Tension thermique:.....	7
I.5 Résistance mécanique :.....	7
I.6 Dureté:.....	8
I.7 Frittage:.....	8
I.8 Métaux:.....	9
I.9 Propriétés physiques des métaux :.....	10
I.9.2 Conductivité électrique:.....	10
I.10 Propriétés thermiques: .....	11
I.11 Coefficient de dilatation thermique des matériaux:.....	13
I.12 Conductivité thermique des métaux:.....	16
I.13 Propriétés élastiques de ces matériaux:.....	16
I.13.1 Module de Young et coefficient de poisson:.....	17
I.14 Le comportement des métaux:.....	19
I.14.1 Le comportement élasto-plastique:.....	19

## *Chapitre II*

### *Les biomatériaux: élaboration, contraintes résiduelles*

II.1 Introduction:.....	20
II.2 Historique de la liaison céramique/métal:.....	20
II.3 Méthodes d'élaboration des bilatéraux:.....	20
II.3.1 Méthodes où intervient un alliage métallique à l'état liquide:.....	20
II.3.1.a Métallisation des céramiques:.....	20
II.3.1.B Bréactif:.....	21
1-Brasage par métaux actifs:.....	21
2-Brasage eutectique:.....	21
II.3.2 Dépôt de la céramique: .....	21
II.4 Technique de formation des liaisons métal-céramique:.....	22
II.4.1 L'assemblage par soudage diffusion.....	22
II.4.2 L'assemblage par thermocompression:.....	22
II.4.3 Mécanismes de liaison à l'état solide:.....	23
II.5 contraintes résiduelles thermiques:.....	26
II.5.1 les contraintes résiduelles dans les biomatériaux:.....	26
II.5.2 Contraintes résiduelles:.....	27
II.5.3 Origine des contraintes résiduelles:.....	28
II.5.4 Contraintes résiduelles se décomposent en trois origines:.....	28
1- Contraintes dans les particules à l'échelle microscopique:.....	28
2- Contraintes d'origine métallogique:.....	28
3- Contraintes thermiques:.....	28
II.5.5 Aspects macro et microscopique:.....	29
II.6 Théorie mécanique de l'adhésion:.....	30
II.6.1- Théorie de l'adsorption thermodynamique - Notion de mouillage :.....	31
II.6.2- Théorie des couches de faible cohésion :.....	33

**Chapitre III**

**Mise en œuvre de la simulation**

III.1 Introduction.....	34
III.2 Choix et présentation du logiciel M.E.F .....	34
III.3 Modélisation en 3D :.....	36
III.4 Paramètres géométrique:.....	36
III.5 Propriété des matériaux:.....	37
III.6 Assemblages:.....	38
III.7 Conditions aux limites et chargements: .....	38
III.8 Le maillage : .....	38
III.9 Choix de l'élément fini :.....	39
III.10 Démarche adopté pour la simulation:.....	40

**Chapitre IV**

**Résultats et analyse**

IV.1 - Introduction:.....	41
Partie A: Analyse des contraintes résiduelles:.....	42
IV.A.1 Couples XC15/ $Al_2O_3$ :.....	42
IV.A.2- Couples XC15/ SiC:.....	47
IV.A.3 - Couples XC15/ $ZrO_2$ :.....	49
IV.A.4 - Effet de la température pour XC15/ $Al_2O_3$ .....	53
IV.A.5 Effet de paramètres géométriques:.....	56
1. Effet de la longueur du bimatériau:.....	56
2. Effet de la largeur du bimatériau:.....	58
3. Effet de l'épaisseur du bimatériau:.....	59
Partie B: Model avec adhésif FM-73:.....	61
IV.B .1 propriété mécanique de FM- 73:.....	61
IV.B .1.a Assemblage XC15/ $Al_2O_3$ collé à l'aide d'un adhésif:.....	61
IV.B .1.b Effet de l'épaisseur de l'adhésif:.....	64
IV.B .2 A propos des contraintes résiduelles dans l'assemblages $Al_2O_3$ / joint métallique/ XC15.....	67
IV.B.3 Calcul des contraintes résiduelles d'origine thermique:.....	67
IV.B.4 Déformation thermique:.....	68
IV.B.5 Contraintes thermiques dans le joint :.....	68
IV.B.6 Effet du joint métallique:.....	68

IV.B.6.a Cas de couple $\text{Al}_2\text{O}_3$ /Ni/XC15 :.....	69
IV.B.7 La nature du joint métallique:.....	73
IV.B.8 Effet de la taille du joint:.....	76
IV.B.9 Chargement mécanique à 20 MPa:.....	78
IV.B.10 Chargement thermomécanique:.....	79
IV.B.11 Effet de la charge:.....	80
Conclusion général.....	

# Introduction

---

## Introduction

Les bimétalliques de type céramique métal présentent l'avantage de permettre de profiter de leurs propriétés mécaniques et physiques totalement opposées : mais leur assemblage donne naissance à des contraintes résiduelles dues à cette opposition. Leurs performances et leurs durées de vie dépendent de l'état et du niveau de ces contraintes.

Il a été montré que le facteur d'intensité de contraintes critique de la céramique chute considérablement lorsqu'elle est liée à des métaux. Cette chute est due à la présence de contraintes résiduelles dans les couples céramique-métal à l'interface et à son voisinage proche. De ce fait la mise en service de ces assemblages nécessite la connaissance et la maîtrise de ces contraintes.

Les contraintes résiduelles font l'objet de très nombreux travaux de recherche au niveau international depuis leur observation.

Différentes techniques expérimentales de mesure ont été développées pour l'analyse des contraintes résiduelles dans les structures assemblées et plus particulièrement pour des matériaux homogènes et les matériaux hétérogènes.

Actuellement l'évaluation des contraintes résiduelles est analysée analytiquement ou numériquement par la méthode des éléments finis en trois dimensions ou en deux dimensions.

Cette analyse s'applique pour les matériaux à comportement mécanique linéaire ou non. Ce travail porte sur la détermination par la méthode des éléments finis des contraintes résiduelles d'origine thermique et mécanique dans les bimatériaux de type céramique métal élaborés à l'état solide.

Cette étude comporte quatre chapitres. Les deux premiers chapitres portent sur des rappels théoriques et propriétés mécaniques et physiques des céramiques et des métaux ainsi que sur les techniques et les mécanismes de leurs liaisons. Le troisième chapitre est consacré à la mise en œuvre de la simulation.

Notre travail se propose d'atteindre ces deux objectifs. A cet effet, nous avons déterminé

Numériquement par la méthode des éléments finis les états, le niveau et la distribution des contraintes résiduelles présentes dans les éléments finis les états, le niveau et la distribution des contraintes résiduelles présentes dans les couples céramiques-métal. Cette analyse est faite en fonction des propriétés mécaniques et physiques de ces deux matériaux, du rapport de leur géométrie de la taille de l'assemblage et de la température de son élaboration, c'est là l'objet du quatrième chapitre

### I.1 Les céramiques:

#### I.1.1 Généralités:

Les éléments qui entre dans la composition des céramiques fortes, de type covalentes ou ioniques, et forment des composés hétéro polaires (réseaux d'anions et de cations). Les cations sont des éléments métalliques qui cèdent leurs électrons périphériques aux anions, dans la majorité des cas: les céramiques sont souvent des oxydes métalliques. Il existe également des composés dans les lesquels les cations sont du carbone de l'azote ou du bore, ce sont des céramiques de type: carbures, nitrures et borures.

Ces matériaux ont une rigidité (module de Young) élevée. Cependant, les dislocations dans les cristaux ioniques et covalents étant à la fois peu nombreuses et peu mobiles, les contraintes nécessaires à leurs déplacements sont du même ordre de grandeur que la résistance théorique a la rupture.

Sauf à des températures proches de leur température de fusion, les céramiques ont un comportement fragile et se rompent sans déformation plastiques. En présence des défauts de surface (rayures) ou des défauts internes (porosité), siège de concentration de contrainte, les céramiques ont une faible résistance à la rupture en traction; leur comportement est par contre meilleur en compression. On tire parti de la dureté des céramiques en les utilisant comme les abrasifs ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiC}$ ), les outils de coupe ( $\text{WC}$ ) et des surfaces frottement qui doivent résister à l'usure.

Notre étude s'intéresse particulièrement aux céramiques techniques dont les principaux sont l'alumine( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) qui fond à plus de  $2000^\circ\text{C}$  c'est un très bon isolant électrique utilisé dans les céramiques composites. Elle est concurrencée par le zircon( $\text{ZrO}_2$ ), qui fond ver plus de  $2900^\circ\text{C}$  et a une bonne résistance mécanique, elle est aussi chimiquement inerte vis-à-vis des métaux fondus agressifs.

#### I.1.2 Quelques propriétés recherchées des céramiques:

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



- **Tenue en température:**

Beaucoup de céramiques (alumine, zircone, magnésie) combinent des propriétés réfractaires avec une bonne stabilité chimique, notamment en environnement oxydant : éléments exposés à de hautes températures, couches de protection thermique, etc.

- **Résistance au fluage:**

En raison de leur structure, les céramiques tendent à moins souffrir du fluage que les métaux (dislocations beaucoup moins mobiles).

- **Résistance chimique:**

La résistance chimique est en général plus grande que celle des métaux : vaisselle, émaillage pour cuisine, bain, sanitaires et industrie chimique.

- **Dureté:**

La dureté des céramiques est en général élevée : vaisselle, couches anti-usure, inserts de coupe, émaillage.

### **I.2.1 Conductibilité thermique:**

C'est la caractéristique thermique la plus connue et la plus utilisée dans les céramiques. Elle dépend de la composition chimique, de l'état d'agrégation et de la température. Elle dépend aussi considérablement de la forme, de la taille, de l'orientation et de la répartition des pores. Des considérations purement théoriques il en résulte que, dans les substances vitreuses la conductibilité thermique croît avec la température, dans les corps cristallins; au contraire, elle est inversement proportionnelle à la température. Cette relation due à Debye, dérive toutefois de l'hypothèse que la transmission de la chaleur a lieu exclusivement par propagation d'onde thermos-élastiques à travers le solide.

Toutefois, dans un matériau céramique, indépendamment de ce type de transfert, il existe un transfert de chaleur par rayonnement, du d'une part, à la présence de défauts tels que les porosités du produit puisque le passage de chaleur de chaque cavité a lieu surtout par rayonnement, et d'autre aucun solide n'est parfaitement opaque aux radiations; un flux de chaleur peut donc se propager par ce mécanisme de la zone la plus chaude vers la plus froide.

La conductibilité d'un matériau ne peut être exprimée sous une forme simple en fonction de la température, les expressions proposées par les différentes études contiennent des termes qui sont soit en dépendance inverse, soit en dépendance directe de la température. La présence de la phase vitreuse, de la porosité, du coefficient d'absorption des radiations, etc. Donnent la priorité à l'un ou l'autre différents termes.

La plupart des céramiques à base d'oxydes ( $SiO_2$  en particulier), à l'état non poreux, présentent des conductibilités thermiques à température ambiante de l'ordre de  $2 \text{ à } 40 \text{ m}^{-1}\text{k}^{-1}$ .

### I.2.2 La chaleur spécifique:

Cette caractéristique dépend surtout de la composition d'agrégation du matériau céramique. L'énergie demandée pour élever la température d'un matériau de son état de moindre énergie se subdivise en:

1. Energie de variation: elle permet aux atomes de vibrer autour de leurs positions réticulaires avec une amplitude et une fréquence dépendant de la température et des trois directions spatiales;
2. Energie qui augmente le niveau énergétique des électrons;

Energie servant à modifier les positions atomiques (formation des défauts de Fränkel ou de Schottky, phénomène de désordre, orientation magnétique).

La température à laquelle la chaleur spécifique devient constante ou change peu avec la température dépend de l'énergie de liaison, des constantes élastique et du point de fusion. Des élévations ultérieures de température ne modifient pas notablement cette valeur.

Toutes les modifications structurales peuvent contribuer à augmenter la valeur de la chaleur spécifique à des températures plus élevées.

la capacité thermique intervient de façon remarquable même dans les fours soumis à des changements brusques et importants dans la capacité d'absorption de chaleur de la part de la charge (charge thermique) comme, par exemple, dans les fours de réchauffage pour grosses pièces forgées, pour les fours de traitement thermique, etc. A la suite à la forte absorption de chaleur consécutive à la période de chargement, le four subit un refroidissement plus ou moins grand selon la capacité thermique des parois. Une capacité thermique suffisante est alors utile pour éviter des dommages au réfractaire.

Très souvent, dans les calculs thermiques, plus que la capacité thermique ou la chaleur spécifique varie pour une certaine température, intervient la capacité thermique et la chaleur spécifique moyenne entre la température ambiante et celle des régimes.

### I.2.3 Pouvoir de diffusion thermique:

La diffusivité thermique des céramique est généralement faible ce qui est favorable a leur utilisation en t'an qu'isolant en régime dynamique mais au prix de la création de gradients thermiques élevés entre la face chauffée et le cœur des pièces.

### I.3 Propriété physiques:

#### I.3.1 Isolation électrique:

La plupart des matériaux céramiques et des verres sont de bons isolants électriques (il en existe aussi beaucoup de semi-conducteurs). Parmi les isolants, il existe une très grande gamme de constantes diélectriques.

#### I.3.2 Conductivité ionique:

Les oxyde à haute température se comportent comme des cristaux ioniques, dans un tel cristal parfait les ions seraient immobiles sous n'importe quelle différence de potentiel entre deux faces opposées. au dessus de la température ambiante, on remarque un désordre réticulaire, c'est à dire des défauts au sien de ce matériaux de Frenkel ou de Schottky.

Sous l'influence d'un champ électrique les ions proche d'une lacune: tout se passe comme si la lacune se déplaçait dans la direction opposée aux ions comporte en un porteur de charges égales et de signes contraires.

D'autre part, les ions interstitiels peuvent se déplacer dans le réseau d'une position interstitielle à une autre. La résistivité est donnée par:

$$\frac{1}{r} = (\mu_{lac} - \mu_{int})q^2n$$

$\mu_{lac}$ ,  $\mu_{int}$ : Mobilités des lacunes et des interstitiels,  $q$  leur charge,  $n$  leur nombre par unité de volume. Avec:

$$n = N. \exp \left[ -\frac{E_F}{RT} \right]$$

$E_F$ : Énergie de formation d'un couple de défauts.

$R$  : Constante des gaz parfaits.

$N$  : Nombre des ions par unité de volume.

### I.4 Propriétés mécaniques:

#### I.4.1 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, ce qui reflète la grande raideur des liaisons ioniques dans les oxydes et des liaisons covalentes.

Matériau	Module de Young $E(\text{GPa})$	Masse volumique $\rho$ $\text{kg.m}^{-3}$	Module spécifique $E/\rho(\text{GPa}/\text{kg.m}^{-3})$
Acier	210	7.8	27
Alliages d'aluminium	70	2.7	26
Alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	300	3.9	100
Silice( $\text{SiO}_3$ )	60	2.6	27

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

#### I.4.2 Comportement à température élevée:

La résistance des matériaux décroît rapidement avec l'augmentation de la température, celle à 1000°C (silicates d'alumine) et pour certains jusqu'à 1400 à 1500°C (SiC).

A température supérieure à 700°C les céramiques même poreuses, ont souvent une résistance supérieure à celle des aciers. Aux températures élevées les matériaux céramiques peuvent être sollicités du point de vue mécanique.

### I.4.3 Tension thermique:

La sensibilité des matériaux céramiques aux tensions thermiques est l'un des facteurs principaux limitant leur utilisation pour de nombreuses applications à haute température. L'effet des tensions thermiques sur les différents types de matériaux dépend du niveau des tensions, de leurs distributions dans les matériaux et de leur durée aussi bien que des caractéristiques des matériaux.

La tension thermique doit toujours rester inférieure à la résistance mécanique des matériaux afin d'éviter toute cassure.

La différence de tension entre deux points est fonction de la différence de la température.

Cette fonction n'est pas linéaire pour les matériaux céramiques traditionnels car  $\alpha$  varie avec la température.)

Les principales lois qui interviennent ici:

-Loi de dilatation thermique: 
$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha \Delta T$$

-Loi de Hooke 
$$\Delta \sigma = E \frac{\Delta L}{L}$$

-Loi de Fourier et de chaleur 
$$\frac{\delta T}{\delta t} = a \left[ \frac{\delta^2 T}{\delta^2 x} + \frac{\delta^2 T}{\delta^2 y} + \frac{\delta^2 T}{\delta^2 z} \right]$$

Donc on aura : 
$$\Delta \sigma = E \alpha \Delta T \leq R_{me}$$

$R_{me}$  : La résistance mécanique du matériau.

### I.5 Résistance mécanique :

La nature covalente des liaisons, confère aux céramiques une résistance théorique très haute, une dureté très importante, d'excellentes stabilités thermique et chimique (la résistance à l'oxydation et à la corrosion aux hautes températures et une faible ténacité).

En revanche, le manque de ductilité et la faible ténacité, ainsi que la mauvaise tenue aux

impacts sont les points les plus critiques vis-à-vis de l'utilisation des céramiques.

Cependant devant le potentiel efficace que représentent, en contrepartie, les propriétés de ces pour tenter de remédier au (caractère fragile) de leur rupture. En premier lieu, de nombreux travaux on été menés pour augmenter leurs résistances mécaniques, par élimination des défauts présents.

Du moment que ces défauts peuvent se développer à tous les stades de la vie d'un composant céramique, c'est-à-dire pendant l'élaboration, l'usinage, ou en service, la production de céramique avec des défauts libres n'était pas rentable vis-à-vis des progrès substantiels de cette technique.

### I.6 Dureté:

Un autre aspect du comportement des céramiques est lié à leur dureté; car elles sont les plus dures des solides.

$Al_2O_3$ , SiC et le diamant (C) sont utilisés comme abrasifs: ils peuvent couper, meuler ou polir.

Céramique	Dureté/module de Young (Hv)
Diamant	$1,5 \cdot 10^{-1}$
Alumine	$4 \cdot 10^{-2}$
Zircone	$6 \cdot 10^{-2}$
Carbure de silicium	$6 \cdot 10^{-2}$
Moyenne pour les céramiques	$8 \cdot 10^{-2}$

**Tableau I.2:** Duretés normalisées des céramiques

### I.7 Frittage:

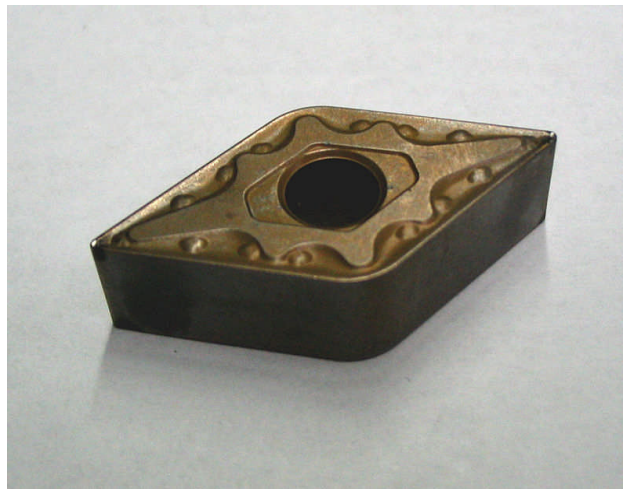
Le frittage est un procédé de fabrication de pièces consistant à chauffer une poudre sans la mener jusqu'à la fusion. Sous l'effet de la chaleur, les grains se soudent entre eux, ce qui forme la cohésion de la pièce. Le cas le plus connu est celui de la cuisson des poteries.

Au XXI<sup>e</sup> siècle, le frittage est utilisé pour obtenir la densification de matériaux céramiques :

- 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 et/ou l'utilisation de dopants, et/ou l'adjonction de liants...

- Il permet d'obtenir des matériaux durs mais fragiles, à porosité contrôlée, inertes chimiquement (faible réactivité chimique et bonne tenue aux corrosions) et thermiquement.
- 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.1:** Plaquette de coupe amovible pour outil d'usinage en céramique frittée.

### I.8 Métaux:

Diverses théories physiques ont permis une description quantitative de plus en plus précise de l'état métallique.

Paul Drude en 1902 puis Hendrik Antoon Lorentz en 1916 ont développé la théorie dite des électrons libres, qui a permis d'établir la loi de conductivité électrique du métal et de la relier à la conductivité thermique. Mais les propriétés des métaux n'ont pu être expliquées dans leur ensemble qu'à partir de l'apparition de la mécanique quantique, notamment grâce à la théorie d'Arnold Sommerfeld, qui a présenté l'état dynamique de l'électron par une fonction d'onde: l'électron ne peut pas être repéré par une trajectoire autour du noyau, mais par une probabilité de présence. La même année, la théorie de Félix Bloch, ou la théorie des bandes, a généralisé la précédente en s'appuyant sur le caractère périodique de la répartition des cations dans un

métal. Les atomes ont des énergies qui sont comprises dans des bandes d'énergie permise, séparées par des bandes d'énergie interdites.

Les propriétés des métaux sont très variables. La plupart ont une couleur proche du gris; le bismuth est rosâtre, le cuivre est rouge et l'or est jaune. Certains métaux apparaissent sous plusieurs couleurs, propriété appelée polychromie. Les températures de fusion des métaux varient d'environ - 40 °C pour le mercure à 3 410 °C pour le tungstène. L'Iridium, de densité égale à 22,4, est le plus dense des métaux ; le lithium, avec une densité de 0,53, est le moins dense. La majorité des métaux cristallisent dans les systèmes cubiques, mais certains adoptent les systèmes hexagonaux et tétragonaux. Aux températures ordinaires, le bismuth a la plus faible conductivité électrique de tous les éléments métalliques et l'argent à la plus élevée. La conductivité de la plupart des métaux est abaissée par l'incorporation d'impuretés et dans les alliages. La conductivité des métaux, liée au même mécanisme que la conductivité électrique, est également élevée. Tous les métaux se dilatent par chauffage et se contractent par refroidissement, mais certains alliages, comme ceux du platine et de l'Iridium, ont des coefficients de dilation extrêmement faibles.

### **I.9 Propriétés physiques des métaux :**

#### **I.9.1 Structure électronique:**

La structure électronique des métaux, responsable de leurs propriétés spécifiques, est très particulière. On doit faire appel à la mécanique pour l'expliquer. En 1928, Arnold Sommerfeld que, dans les métaux, les électrons se trouvent sous une forme quantifiée, les bas niveaux d'énergie électronique disponibles étant pratiquement tous occupés. La même année, Félix Bloch et, plus tard, Louis Brillouin reprirent cette idée de quantification et établirent la (théorie des bandes), qui s'applique non seulement aux métaux, mais aussi aux isolants et aux semi-conducteurs. Lorsque l'on étudie la distribution de l'énergie électrons d'un solide, on observe qu'elle se répartit sur plusieurs bandes d'énergie permise, séparées par des bandes (interdites). Les électrons de plus basse énergie correspondent aux orbitales de cœur des atomes individuels et ne participent pas à la liaison métallique. Seuls les électrons de valence des atomes (dernier couche électronique, de plus haute énergie) sont mis en commun et forment des liaisons délocalisées sur l'intégralité de l'échantillon métallique. Il y a autant d'orbitales (macroscopiques) que d'orbitales atomiques de départ, chacune contenant deux électrons. Selon le principe d'exclusion de Pauli, elles ne avoir strictement la même énergie, aussi se répartissent elles en bandent d'énergie proche de celle des orbitales atomiques de



départ. Ces orbitales se remplissent dans l'ordre du bas au plus haut niveau d'énergie jusqu'à épuisement du nombre d'électrons disponibles. C'est le taux de remplissage de la dernière bande, dite bande de conduction, qui détermine la nature isolante ou conductrice du solide: lorsque cette bande est totalement remplie ou totalement vide, les électrons ne peuvent pas changer d'état et le matériau est isolant. Dans le cas des métaux, la bande de conduction est partiellement remplie; les électrons peuvent changer de niveau d'énergie-- à l'intérieur d'une même bande -- par simple agitation thermique, et aller occuper un état d'énergie très proche, mais encore inoccupé. Les électrons sont (libres) d'accroître leur énergie sous l'effet d'un champ électrique extérieur ou bien de l'agitation thermique (conduction thermique).

La théorie des bandes permet d'expliquer de nombreuses autres propriétés des métaux, comme l'énergie de cohésion, le module d'élasticité, la compressibilité, les propriétés optiques et magnétiques, certaines propriétés thermodynamiques.

### **I.9.2 Conductivité électrique:**

Dans le cas des métaux, le niveau d'énergie le plus élevé que peut prendre un électron (niveau de Fermi) est situé à l'intérieur de la bande permise. Un champ électrique peut donc augmenter légèrement la vitesse d'ensemble des électrons avec une faible énergie : il y a conduction.

La conductivité électrique est la propriété la plus caractéristique des matériaux métalliques, car elle est plus élevée que celle des non-métaux. De plus, elle a une valeur finie à une température proche du zéro absolu, et devient même infinie dans un supraconducteur. Au contraire, un semi-conducteur devient isolant aux basses températures (conductivité nulle) et, au-dessus d'une température critique sa conductivité croît rapidement pour devenir infinie.

Ainsi, lorsque la température augmente, la conductivité électrique des métaux diminue, alors que celle des semi-conducteurs croît.

En fait la conductivité électrique élevée des métaux résulte du fait que le libre parcours moyen des électrons est grand, de l'ordre de  $10^6$  distances interatomiques. Cependant, la progression des électrons est entravée par certains défauts du réseau, sinon les métaux seraient supraconducteurs: le courant pourrait s'écouler sans aucun amortissement pendant un temps infini, ce qui n'est observé qu'à très basse température pour certains métaux et alliages.

Le métal possède une résistivité  $k$ , inverse à la conductivité électrique, telle que:

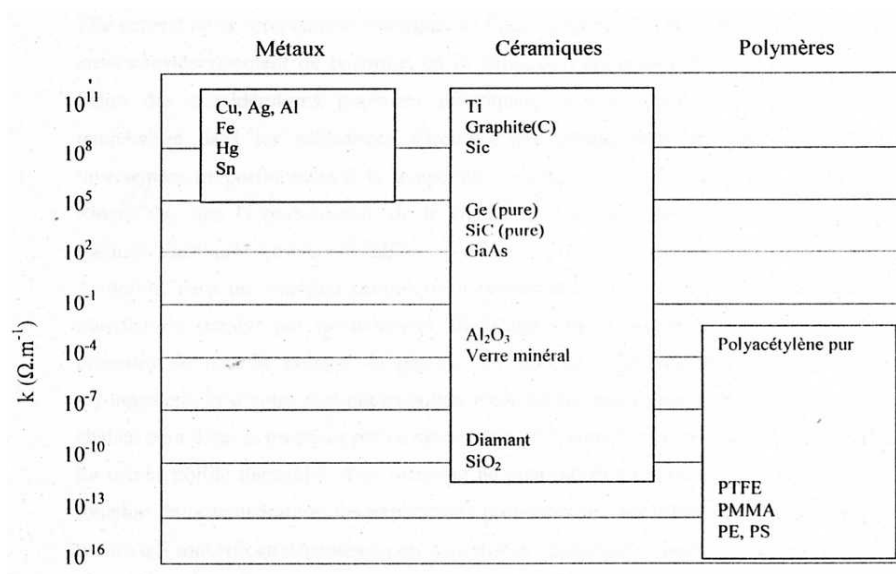
$$R = kl/s \quad (R: \text{résistance}; l: \text{longueur}; s: \text{section}).$$

La résistivité du métal est la somme de deux termes:

$$R = k_T + k_D \text{ (Loi de Matthiessen)}$$

$k_T$ : provient des vibrations d'origine thermique du réseau cristallin et croit donc avec la température. C'est une caractéristique de l'état métallique.

$k_D$ : provient de l'existence de défauts divers dans le réseau cristallin. Par suit,  $k_D$  et la résistivité globale  $k$  mesurée à une température donnée sont d'autant plus faible que le métal est plus pur et de structure cristalline plus proche du cristal idéal. [6]



**Figure I.2:** Valeurs de la conductivité électrique intrinsèque  $k$  pour différentes classes de matériaux à  $T_{amb}$ .

### I.10 Propriétés thermiques:

Pour les métaux: en première approximation, on peut donc supposer que les électrons libres d'un métal se comportent comme les atomes d'un gaz parfait. Il s'ensuit que la conductibilité thermique due aux électrons est déterminée par la relation:

$$\lambda_e = \frac{1}{3} \cdot (C_V)_e \cdot V_e \cdot l_e$$

$(C_V)_e$ : La capacité thermique électronique du matériau

$V_e$ : La vitesse moyenne des électrons libres au niveau de fermi.

$l_e$ : Leur libre parcours moyen.

Par analogie avec le raisonnement utilisé, on détermine la conductibilité  $\lambda_p$  due aux phonons à l'aide de l'expression:

$$\lambda_p = 1/3. (Cv)_p v_p. l_p$$

$(Cv)_p$ : La capacité calorifique due à l'agitation atomique.

$v_p$ : La vitesse moyenne des phonons.

$l_p$ : Libre parcours moyen.

La conductibilité thermique totale  $\lambda$  d'un matériau est:

$$\lambda = \lambda_e + \lambda_p$$

### I.11 Coefficient de dilatation thermique des matériaux:

Un barreau isotrope soumis à une variation de température  $\Delta T$ , s'allonge d'une quantité:

$$\Delta L = \alpha. L_0. \Delta T$$

Son élongation unitaire ( $\varepsilon_0 = \Delta L/L$ ) a donc pour expression:  $\varepsilon_{th} = \alpha. \Delta T$

Ainsi, le coefficient de dilatation thermique linéaire  $\alpha$  peut se définir comme le rapport de l'élongation unitaire à l'accroissement de température. Graphiquement, il représente la pente de la courbe  $\Delta L/L_0 = f(\Delta T)$ . Il est en général donné pour un domaine de température limité.

Le coefficient de dilatation est un paramètre intrinsèque au matériau (dépendance vis-à-vis de la nature chimique donc des forces interatomiques). Du fait de l'anharmonicité des potentiels atomiques, une augmentation de température s'accompagne d'une dilatation volumique macroscopique du solide. [7] Un matériau à caractère covalent (liaisons fortes) présente généralement de faibles valeurs de  $\alpha$ . Des anisotropies de dilatation peuvent être observées dans les matériaux multi phases (orientation préférentielle de certaines phases).

Les variations de longueur et de volume associées aux changements de température sont importantes pour beaucoup d'applications. Ces valeurs dépendent de la température; pour des intervalles limités de celle-ci, il suffit de considérer une valeur moyenne.

Le volume spécifique de chaque cristal augmentent avec la température; cette augmentation est principalement déterminée par la plus grande amplitude des vibrations atomiques autour d'une

position donnée. La vibration de volume due à des vibrations réticulaires est en corrélation étroite avec l'augmentation de l'énergie contenue.

Par conséquent, les changements du coefficient de dilatation thermique avec la température ont lieu parallèlement aux variations de chaleur spécifique. Une importante conséquence pratique de la relation entre le coefficient de dilatation et température est que, pour beaucoup d'oxydes, il ne faut pas employer les chiffres de dilatation à température ambiante donnés le plus fréquemment dans les tableaux. [8]

Pour les cristaux cubiques, les coefficients de dilatation suivant des axes cristallographiques différents sont égaux et les variations dimensionnelles avec la température sont symétriques.

Par conséquent, le coefficient de dilatation thermique est le même quelle que soit la direction suivant la quelle il est mesuré. Pour les matériaux isotropes, le coefficient de dilatation volumétrique moyen dans un intervalle de température limité est en corrélation avec la dilatation linéaire moyenne  $\bar{\alpha}$  est petit, on peut écrire:

$$\alpha = 3 \bar{\alpha}$$

Les cristaux anisotropes, la dilatation thermique change suivant différents axes cristallographiques.

<b>crystal</b>	<b>Axe a</b>	<b>Axe c</b>
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	8.3	9
<i>Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub></i>	-2.6	11.5
<i>3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>2SiO<sub>2</sub></i>	4.5	5.7
<i>TiO<sub>2</sub></i>	6.8	8.3
<i>ZrSiO<sub>4</sub></i>	3.7	6.2
<i>CaCO<sub>3</sub></i>	-6	25
<i>SiO<sub>2</sub></i>	14	9
<i>NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub></i> (albite)	4	13
C(graphite)	1	27

**Tableau I.3:** Coefficient de dilatation thermique pour quelques cristaux anisotropes  
( $\alpha/^\circ\text{C} \cdot 10^{-6}$ ).

## Propriété des Matériaux

Les coefficients de dilatation thermique suivant les deux axes cristallographiques  $a$  et  $c$  sont respectivement  $a_a$  et  $a_c$ . A haute température, l'anisotropie tend à diminuer le rapport  $a_c/a_a$  diminue de façon analogue.

La valeur absolue du coefficient de dilatation est en corrélation étroite avec la structure cristalline et les forces de liaison. Les matériaux ayant des forces de liaison élevées, comme le tungstène, le diamant, le carbure de silicium, ont de bas coefficients de dilatation thermique.

Lorsqu'un matériau céramique constitué de plusieurs phases cristallines et vitreuses est chauffé aux températures de cuisson, il peut arriver que les coefficients de dilatation selon les différents axes cristallographiques ne soient pas les mêmes ou que les différents grains ont des retraits différents pendant le refroidissement et des contraintes résiduelles apparaissent.

En effet, les tensions provoquées par à des différences importantes entre les coefficients de dilatation de deux matériaux ou par les différentes directions cristallographiques dans un matériau polyphasé suffisent à provoquer ces contraintes dont l'importance est considérable pour comprendre bon nombre de propriétés des matériaux réfractaires. [8]

Voici des valeurs du coefficient de dilatation thermique pour quelque métal et céramiques.

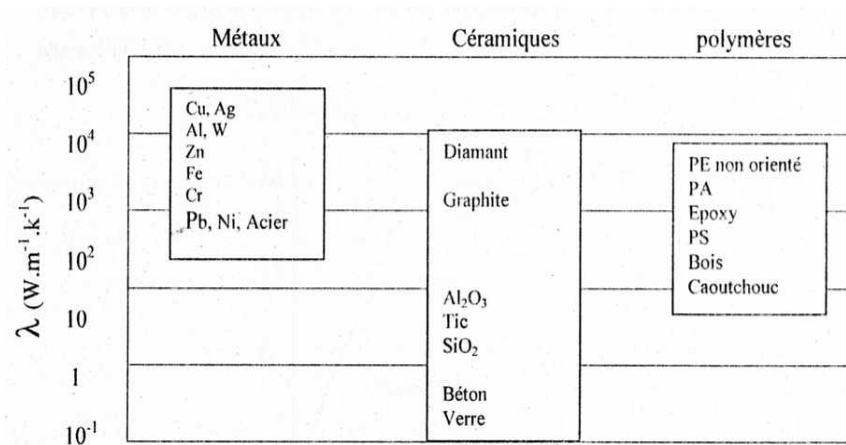
Métaux	Coefficient de dilatation thermique $\alpha(10^{-6}/^{\circ}K)$	Céramiques	Coefficient de dilatation thermique $\alpha(10^{-6}/^{\circ}K)$
Al	23.50	ThO <sub>2</sub>	10.8
Ag	19.20	MgO	9.00
Cu	16.50	BeO	9.00
Au	14.20	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.80
Ni	13.20	ZrO <sub>2</sub>	5.40
Fe	12.30	SiC	4.80
Pt	8.90	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	4.00

**Tableau I.4:** Coefficient de dilatation thermique pour quelques métaux et céramiques  $\alpha(10^{-6}/^{\circ}K)$ .

**I.12 Conductivité thermique des métaux:**

Elle provient de la possibilité pour les électrons de circuler librement le métal.

La conductivité thermique des métaux purs est proportionnelle à la calorifique des électrons, elle même directement proportionnelle à la température. Dans le cas des métaux impurs et des alliages, les vibrations d'origine thermiques des cations du réseau cristallin contribuent aussi de façon importante à la conductivité thermique. La figure I.3 illustre les valeurs de la conductivité thermique pour différents types de matériaux.



**Figure I.3:** Comparaison entre les valeurs de la conductivité thermique  $\lambda$  pour divers types de matériaux.

**I.13 Propriétés élastiques de ces matériaux:**

L'élasticité a été l'objet de nombreux travaux qui ont conduit à l'élaboration de l'élasticité permettant de prévoir les déformations d'un solide élastique lorsqu'on connaît les contraintes auxquelles il est soumis. Cette théorie pose comme hypothèse fondamentale que les déformations du solide sont linéaires ; autrement dit, que les déformations sont proportionnelles aux efforts qui les provoquent (loi de Hooke).

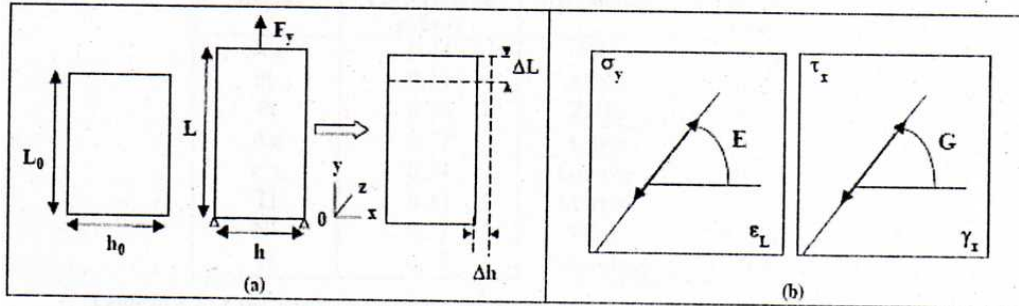
L'outil mathématique adapté est le calcul tensoriel, qui permet de relier de façon linéaire l'ensemble des coordonnées des déformations à l'ensemble des coordonnées des contraintes en utilisant ( le coefficient d'élasticité ) caractéristique du matériau:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{et} \quad \varepsilon = C \cdot \sigma$$

C: complaisance l'inverse du module de Young. [12]

**I.13.1 Module de Young et coefficient de poisson:**

Lorsqu'un solide est soumis à une sollicitation de traction pure  $F_y$  dans la direction  $(0,y)$ , on observe une élongation  $\Delta L$  selon cette direction (Figure I.4).



**Figure I.4:**(a) Schématisation d'un essai de traction pure (b) Courbes contraintes-déformations.

Le module d'Young est le facteur de proportionnalité entre la contrainte  $\sigma_y$  et la déformation  $\epsilon_y$ :

$$\epsilon_y = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (I.15) \quad E = \frac{\sigma_y}{\epsilon_0} = \frac{F_y}{S_0} \cdot \frac{L_0}{\Delta L}$$

On observe également une contraction transversale  $\epsilon_x$  selon  $(O,x)$  [de même selon  $(O,z)$ . Le coefficient de poisson  $\nu$  caractérise le rapport (en valeur absolue) entre cette contraction latérale et l'élongation longitudinale:

$$\epsilon_x = \epsilon_z = -\nu \cdot \epsilon_y$$

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, ce qui reflète la grande raideur des liaisons ioniques dans les oxydes et des liaisons covalentes. [15]

## Propriété des Matériaux

Matériau	Module de Young E (GPa)	Masse volumique $\rho$ ( $\text{Kg.m}^{-3}$ )	Module spécifique $E/\rho$ (GPa/ $\text{Kg.m}^{-3}$ )
Cuivre	100	7.15	14
Titane	105	4.5	23
Acier	210	7.8	27
Alliages D'aluminium	70	2.7	26
Alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	345	3.9	100
Silice	60	2.6	27

**Tableau I.5:** Modules spécifiques : comparaison entre les céramiques et les métaux.

Les coefficients de poisson des céramiques sont en général inférieurs à ceux des métaux, selon les matériaux, sa valeur varie de 0 (0,05 pour le béryllium) à 0,5 (caoutchouc), cette limite haute caractérisant des matériaux dont la déformation élastique s'effectue à volume constant.

Métaux	Coefficient de poisson	Céramiques	Coefficient de poisson
Au	0.44	SiC	0.24
Pb	0.39	$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.27
Pt	0.38	$\text{ZrO}_2$	0.28
Ag	0.37	<b>Autres</b>	
Cu	0.34	Granite	0.27
Ti	0.33	Marbre	0.3
Ni	0.27	Verre	0.2-0.3
W	0.27	Plexiglas	0.4

**Tableau I.6:** Coefficient de poisson comparaison entre les céramiques et les métaux.



### I.14 Le comportement des métaux:

#### I.14.1 Le comportement élasto-plastique:

Dans la réalité, l'approximation linéaire n'est valable que dans des limites précises au-delà desquelles commence le domaine de l'élasticité non linéaire. Celle-ci doit rendre compte des déformations de type (fluage) et des processus amenant à la rupture.

Si augment les forces  $F$  en (figure I.4) l'allongement augmente aussi. A partir d'une contrainte donnée, la déformation longitudinale augmente plus fortement par incrément de contrainte qu'indiqué par le module de Young. En plus, quand on relâche les forces, le cylindre ne retrouve plus sa longueur initiale mais garde un allongement permanent. Cet allongement permanent par rapport à la longueur initiale est appelé déformation plastique. Pour le constructeur, qui veut que la structure réalisée garde sa forme, il est important de savoir quelle est cette contrainte spécifique à partir de laquelle le matériau se déforme plastiquement. Cette contrainte est appelée (limite élastique) ou (contrainte d'écoulement).

La déformation plastique est facilitée par le mouvement de dislocations sous l'effet d'une contrainte en cisaillement  $\tau$ . Lors d'une mise sous charge, la contrainte de cisaillement est maximale sur les plans inclinés de  $45^\circ$  par rapport à la ligne de la force appliquée. Par contre, le mouvement d'une dislocation est le plus simple dans la direction des plans les plus espacés les uns des autres. Autrement dit, les dislocations bougent le plus facilement sur les plans les plus denses. Dans le réseau cristallin de symétrie cfc, il y a plusieurs plans denses qui sont orientés selon différentes directions de l'espace, ce qui rend les métaux qui cristallisent avec cette structure très ductiles. Par contre, le réseau hc, qui dispose de plans cristallins denses orientés dans une seule direction, engendre des métaux nettement moins ductiles.

Comme mentionné plus haut, la déformation plastique est engendrée par le mouvement des dislocations. En fait, s'il n'y avait pas de dislocation dans un cristal, sa résistance contre la déformation plastique serait d'un facteur 10 à 1000 plus élevé. Car il est techniquement quasi impossible le mouvement des dislocations, pour agrandir la gamme de déformations élastiques et donc les contraintes qui peuvent être supportées par un matériau.

### **II.1 Introduction:**

Depuis l'existence de l'homme, l'assemblage des matériaux a donné l'ensemble des pièces et des objets qui l'ont aidé pour mieux vivre. Ces méthodes d'assemblages ont subi un long trajet de développement jusqu'à nos jours. Les céramiques techniques sont la nouvelle génération des céramiques usuelles destinées à l'industrie.

Les zircones, les carbures de silicium, les nitrures de silicium et l'alumine trouvent un grand nombre d'applications dans les domaines de la mécanique et de la thermodynamique. Si les trois premiers sont encore d'utilisation limitée, il n'en est pas de même pour l'alumine qui reste la céramique la plus courante. Outre électriques intéressantes (grande résistivité, constant diélectrique important, faible facteur de perte diélectrique), en première place dans l'industrie électrique et électronique.

### **II.2 Historique de la liaison céramique/métal:**

Bien que l'émaillage soit appliqué depuis de trois millénaires, c'est seulement de puis l'apparition des céramiques (alumine principalement) et leur utilisation dans l'électronique avant la seconde guerre mondiale que les recherches sur la liaison entre un métal et une céramique se sont développées.

Mais de puis une trentaine d'années, les céramiques thermomécaniques ( $ZrO_2$ ,  $Si_3N_4$ ,  $SiC$  ...) sont étudiées en vue d'applications comme barrière thermique dans les turbines à gaz et les moteurs thermiques afin d'en améliorer le rendement grâce à une augmentation de la température de fonctionnement.

### **II.3 Méthodes d'élaboration des bilatéraux:**

#### **II.3.1 Méthodes où intervient un alliage métallique à l'état liquide:**

##### **II.3.1.a Métallisation des céramiques:**

Ces méthodes consistent à déposer sur la surface de la céramique une couche métallique permettant un bon accrochage de la brasure utilisée ultérieurement. Il est alors nécessaire de réaliser cet assemblage dans le cas où nous avons une mauvaise mouillabilité de la céramique par les métaux fondus.

Les principaux métaux employés pour la métallisation sont, soit des métaux réfractaires: Molybdène, Tungstène dont les coefficients de dilatation thermique sont proches de ceux de la céramique, soit des métaux (actifs): Titane et Zirconium.

Cette métallisation effectuée à haute température (1200-1700°C) est parfois suivie d'un dépôt électrolytique de cuivre ou de nickel ou d'une réduction du nickel Ni vers 952°C afin de former un dépôt de nickel apte à accrocher la brasure.[16]

### **II.3.1.B Brassage réactif:**

#### **1-Brasage par métaux actifs:**

Cette technique ne nécessite pas la réalisation d'un dépôt préalable sur la surface de la céramique: l'alliage d'apport qui servira de brasure contient des éléments ayant une réactivité chimique vis-à-vis de la céramique. Ces éléments sont introduits dans le métal d'apport lors de son élaboration. Un métal pur réactif peut donc être utilisé comme métal d'apport.

#### **2-Brasage eutectique:**

Cette technique dérivée de (moly metal process) permet de supprimer l'emploi du brassage du métal contre la céramique et donc de métallisation préalable. La liaison est obtenue directement par fusion d'un mélange d'oxydes formant à haute température des eutectiques complexes qui jouent le même rôle qu'une brasure classique (Ag-Cu par exemple). Ceci et du à l'excellente mouillabilité de ces alliages d'oxydes sur les métaux réfractaires tels que le Molybdène, le Tungstène, mais aussi sur les alliages à base de nickel. [17]

Elle permet les assemblages entre:

- des métaux et une céramique
- deux céramiques ou deux métaux réfractaires entre eux.

Ces systèmes ont été choisis pour plusieurs raison

- La plus importante est sans doute leur grande stabilité chimique à haute température en atmosphère réductrice; car lors de l'élaboration de la liaison il faut éviter l'oxydation de l'antagoniste métallique. Ceci exclut pour ces applications certains d'oxydes susceptibles d'être réduit pendant le traitement.
- Enfin, on peut trouver une composition adéquate permettant d'ajuster les coefficients de dilatation thermique du métal et de la céramique, minimisant ainsi les contraintes à l'interface lors de la tenue en service. [15]

Le choix dépend principalement de la température d'utilisation de l'ensemble des matériaux employés.

### **II.3.2 Dépôt de la céramique:**

Les dépôts de céramique réalisé par différentes technique (projection thermique, procédés de déposition chimique en phase vapeur et procédé de déposition physique en phase vapeur...) sont de plus en plus utilisés dans les applications industrielles, grâce à leurs duretés élevées et à leurs propriétés de frottement (permettant d'augmenter notablement la durée de vie des outillages revêtus, ce qui permet de réduire les couts de fabrication). [17]

Toutes technique de traitement de surface conduisent à la formation d'une fine couche de céramique sur substrat métallique ou inversement.

#### **II.4 Technique de formation des liaisons métal-céramique:**

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.

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

- métallisation brasage Mo-Mn,
- brasage à basse température,
- brasage à haute température,
- liaisons par soudage diffusion et en particulier thermo compression,
- méthode de l'eutectique gaz-métal.

##### **II.4.1 L'assemblage par soudage diffusion**

C'est une technique largement utilisée industriellement pour de nombreuses applications. Le principe de ce procédé consiste à mettre en contact les surfaces de deux pièces à assembler, correctement préparées (sur le plan de leur physico-chimie, de la micro géométrie et de l'ajustement des surfaces). Puis à chauffer l'ensemble, éventuellement sous vide ou sous une atmosphère protectrice, à une température déterminée en fonction des caractéristiques physico-chimiques des matériaux, ainsi que des contraintes techniques, pendant une durée suffisante, en fonction des autres paramètres opératoires et du résultat souhaité.

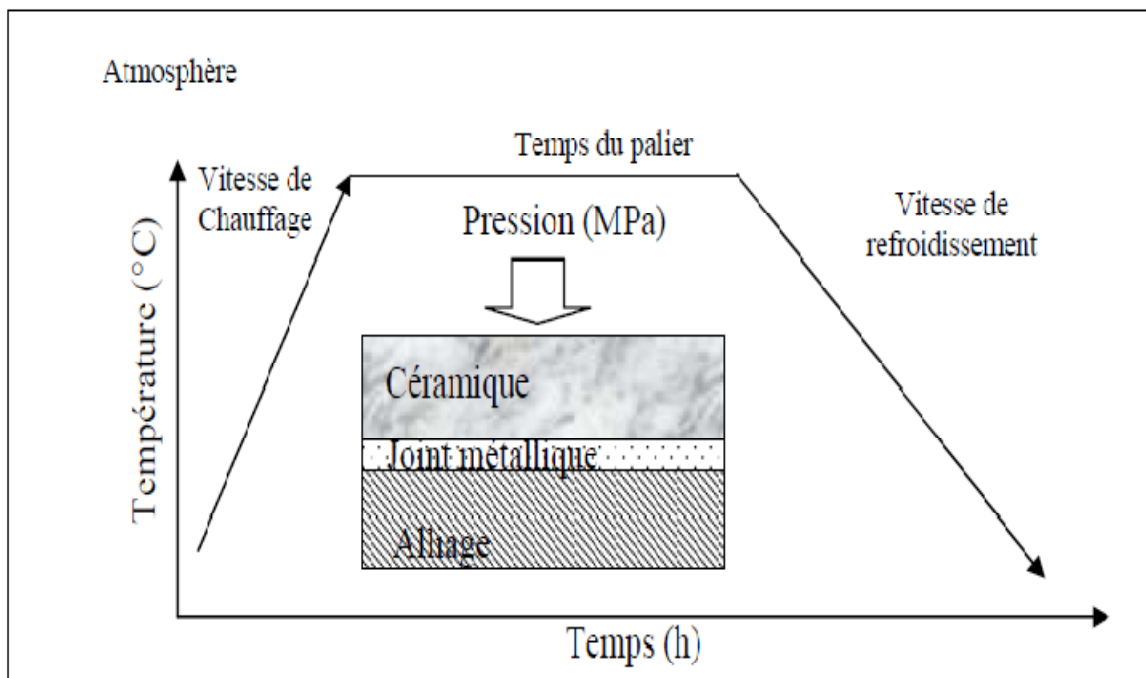
##### **II.4.2 L'assemblage par thermocompression:**

Bien que des nuances existent dans les termes anglo-saxons, c'est sous les noms de « *diffusion bonding* », « *pressure bonding* », « *pressure welding* », « *roll bonding* » et plus souvent « *solid state bonding* » que cette technique peut être rencontrée dans la littérature. Tout comme le soudage diffusion, 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 (Figure II.1).

Le contact des deux surfaces à lier est assuré par l'application d'une pression uniaxiale. 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. Il faut éviter d'utiliser des métaux ou des alliages susceptibles de former des composés définis ou intermétalliques avec les substrats à relier, pour ne pas risquer de fragiliser les jonctions aux interfaces de liaison.

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 II.1 :

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



**Figure II.1:** Représentation schématique d'un assemblage métal/céramique réalisé dans un four-presse de thermocompression.

### II.4.3 Mécanismes de liaison à l'état solide:

Lorsqu'on met en contact deux surfaces solides, elles subissent des forces d'attraction de différentes natures (Figure II.2) :

- Des forces à longue portée, d'origine électrostatique, qui sont reliées aux mécanismes de polarisation (micrométrique),
- Des forces à moyenne portée, qui correspondent à des interactions de type van der Waals (quelques nanomètres),
- Des forces de courte portée, qui correspondent aux liaisons chimiques de type intramoléculaire (ionique, covalente, métallique) de l'ordre de 0,1-0,2 nm.

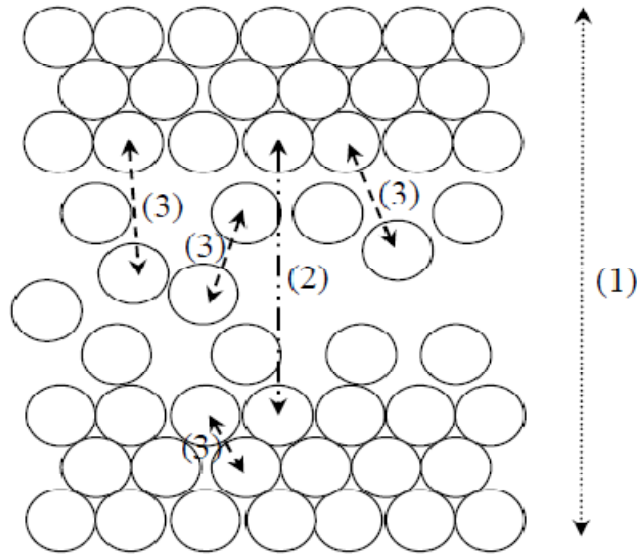


Figure II.2 : Différents types d'interaction ; Forces à longue (1), moyenne (2) et courte portée (3).

Dans les assemblages métal-céramique, les trois niveaux de force sont à rechercher pour obtenir un contact intime entre les deux surfaces solides. De plus, il faut tenir compte de la formation possible de produits de réactions entre les deux matériaux à associer. En l'absence de réaction chimique avec formation de phases nouvelles, nous utilisons le terme « système non réactif ». A l'inverse, si des nouvelles phases sont formées, nous parlerons de système réactif.

La formation d'une interface entre un métal et une céramique par thermocompression à l'état solide passe par les étapes schématisées sur la figure II.3.

#### Etape 1 :

- mise en contact des deux matériaux sans pression (a),
- sous l'effet de la pression et de la température, les contraintes locales déforment les aspérités initialement en contact faisant apparaître un réseau de pores interconnectés qui se combrent à la fin de l'étape (b,c).

Les mécanismes de liaisons de ces deux premières étapes sont à rapprocher de ceux du frittage :

- Déformation plastique entraînant le contact initial des aspérités,
- Diffusion superficielle,
- Diffusion en volume,
- Evaporation-condensation,
- Diffusion aux joints de grains,

- fluage.

**Etape 2 :**

- Création de liaisons chimiques avec formation d'une nouvelle phase (e) ou simplement d'une liaison non réactive (d).

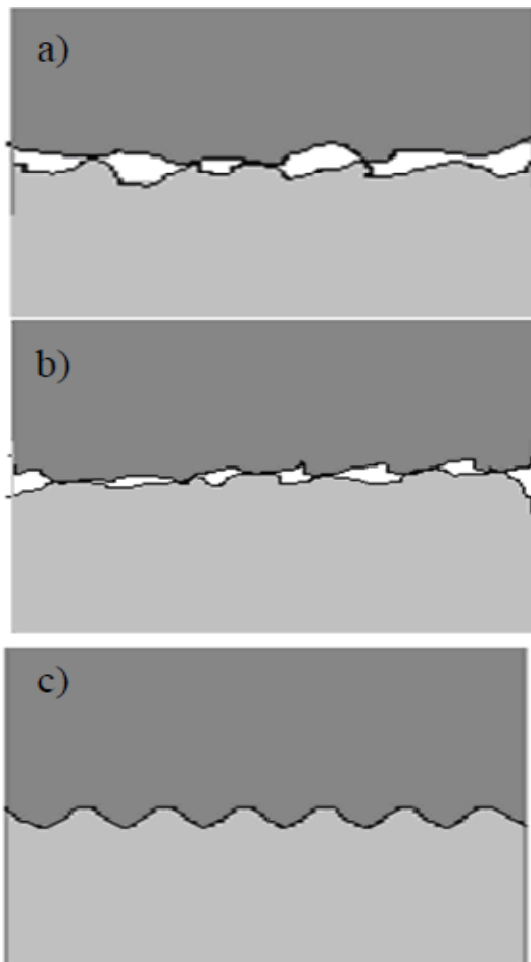
**Etape 3 :**

- Cette 3ème étape, correspond à l'évolution des propriétés des matériaux, liée à la formation de la liaison et aux contraintes résiduelles générées, entre autres, par la différence de coefficient de dilatation des deux matériaux.

Sachant que la céramique est le plus souvent un solide rigide indéformable, les deux forces principales qui peuvent promouvoir la liaison sont :

- La pression utilisée pour maintenir les deux matériaux en contact pendant le soudage,
- La force induite par la réduction de surface pendant la formation de l'interface.

Pour avoir une très bonne liaison, nous partons de l'hypothèse selon laquelle l'amélioration de l'assemblage peut s'opérer par l'optimisation de chacune de ces trois étapes.



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 combrent Formation d'une interface morphologiquement parfaite

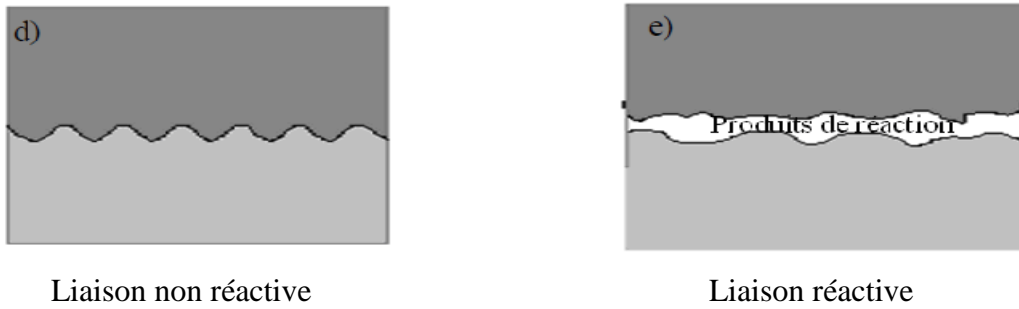


Figure II.3: Formation de l'interface métal-céramique.

### II.5 Contraintes résiduelles thermiques:

Quel que soit le mode d'élaboration du biomatériau à l'état solide ou liquide, des contraintes résiduelles apparaissent au cours du refroidissement et sont introduites dans la céramique et dans le métal du fait de la différence des coefficients de dilatation thermique de ces deux matériaux. Un gradient de contraintes résiduelles se développe dans les deux matériaux au voisinage de l'interface. Les contraintes parallèles à l'interface sont donc en compression pour la céramique, et de traction pour le métal (Fig. II-4).

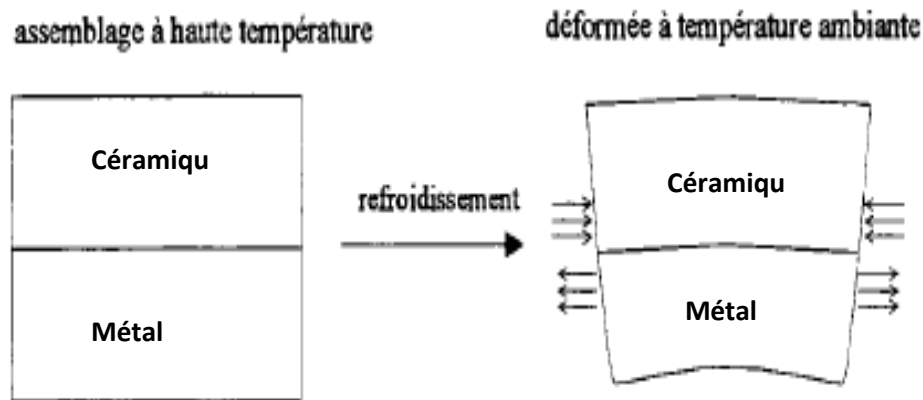


Figure II-4 : Naissance des contraintes résiduelles sur un assemblage céramique/métal.

Ces contraintes fragilisent la céramique au voisinage de l'interface et créent des microfissures dans la céramique, provoquent ainsi la rupture de celle-ci à une contrainte beaucoup plus faible que celle de la céramique non liée au métal. [19]

#### II.5.1 les contraintes résiduelles dans les biomatériaux:

Le chauffage des pièces à haute température puis le refroidissement donne naissance à des contraintes dites contraintes résiduelles. Ces dernières sont très remarquables dans les biomatériaux. L'analyse de ces contraintes au niveau des jonctions de deux matériaux conjointement liés reste un problème technologique très important. Les liaisons étant réalisées à température élevée, l'assemblage est soumis au cours de refroidissement à des contraintes, notamment à l'interface, due à la différence importante entre les propriétés thermiques et



mécaniques des deux matériaux antagonistes (coefficients de dilatation thermique, module de Young et coefficient de Poisson).

Des contraintes sont aussi engendrées dans le volume des deux matériaux, celle-ci dépendent de la différence des coefficients de dilatation thermique mais aussi des facteurs géométriques ainsi que des caractéristiques mécaniques (module d'élasticité, coefficient de Poisson, limite d'élasticité, charge mécanique, etc.).

Un autre mécanisme générateur de contraintes au niveau de l'interface des deux matériaux assemblés se produit lorsque des variations de composition de la couche formée ou du métal apparaissent au cours de la diffusion.

De même si un élément étranger migre de l'un des deux matériaux vers l'autre, son insertion dans le réseau peut conduire à une augmentation des paramètres de la maille et même à des changements de phase s'accompagnant dans les deux variations de volume et de coefficient d'expansion [16]. L'oxydation interne et plus généralement la précipitation peuvent être des facteurs de contraintes importants.

### **II.5.2 Contraintes résiduelles :**

Les contraintes résiduelles sont l'une des caractéristiques parmi les plus influentes sur les propriétés de résistance dans les jonctions céramo-métalliques élaborées à température élevée. En effet, leur rôle sur la qualité de la jonction est important, en particulier sur l'adhérence et sur la résistance à la corrosion sous contrainte et enfin sur la durée de vie sous cyclage thermique [13].

Selon la définition de Mura, dans les conditions normales de températures, les contraintes résiduelles sont des contraintes internes auto-équilibrantes qui existent dans un matériau qui n'est soumis à aucune force extérieure. Les contraintes résiduelles apparaissent dans le matériau dès le processus de fabrication, ou bien alors à chaque fois que celui-ci subit des traitements thermiques. En effet, lors des traitements thermiques, la surface et le cœur du matériau considéré ne se trouvent pas dans le même état de contrainte. [14]

### **II.5.3 Origine des contraintes résiduelles:**

Les contraintes résiduelles sont les contraintes qui subsistent dans le matériau en l'absence de force extérieure. Ce sont les phénomènes thermiques, mécaniques et physico-chimiques mis en jeu durant le trajet des particules et pendant la formation de la jonction céramique/métal conduisant majoritairement à l'établissement d'un état de contraintes résiduelles microscopiques et macroscopiques. L'assemblage d'un bimatériau provoque l'appropriation d'une contrainte mécanique au sien des deux matériaux. Par ailleurs, plusieurs facteurs

contribuent et influencent le développement de ces contraintes dans le métal et la céramique.[18]

- Différence entre les coefficients de dilatation thermique.
- Conditions d'assemblage.
- Nature du métal.
- Porosité éventuelle de la céramique.
- Procédés utilisés pour former les pièces, notamment la gravure et le polissage mécano/chimique.

### II.5.4 Contraintes résiduelles se décomposent en trois origines:

#### 1- Contraintes dans les particules à l'échelle microscopique:

Elles proviennent de la contraction de chacune des gouttelettes projetées au cours du refroidissement rapide jusqu'à la température ambiante. En effet, lorsque la particule fondu parvient au contact d'un matériau solide (matériau de base ou particules précédemment projetées et refroidies), elle n'a pas plus tous ses degrés de liberté pour se solidifier. Lors de son refroidissement, sa contraction est contravée et des tensions apparaissent.

#### 2- Contraintes d'origine métalogique:

Lors de la projection de certains matériaux, les particules peuvent subir des déformations métallurgiques dont on sait qu'elles s'accompagnent généralement de variation de volume, qui peuvent conduire à un état de contraintes de compression dans le revêtement.

#### 3- 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. [18]

- 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 thermoélastiques:** la contrainte thermoélastique 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.[17]

### II.5.5 Aspects macro et microscopique:

A cause du caractère polycristallin et hétérogène des matériaux métalliques, les sources de contraintes peuvent provenir de déformations aux échelles macro- micro- ou submicroscopiques. En effet, un matériau cristallin est constitué de phases, qui elles mêmes sont formées de grains. Chaque grain est un monocristal qui peut être considéré dans un modèle simple, comme divisé en petits domaines séparés par un réseau de dislocations. Chaque domaine est constitué par un empilement régulier d'atomes, qui peut être défini par un ensemble de mailles cristallines identiques.

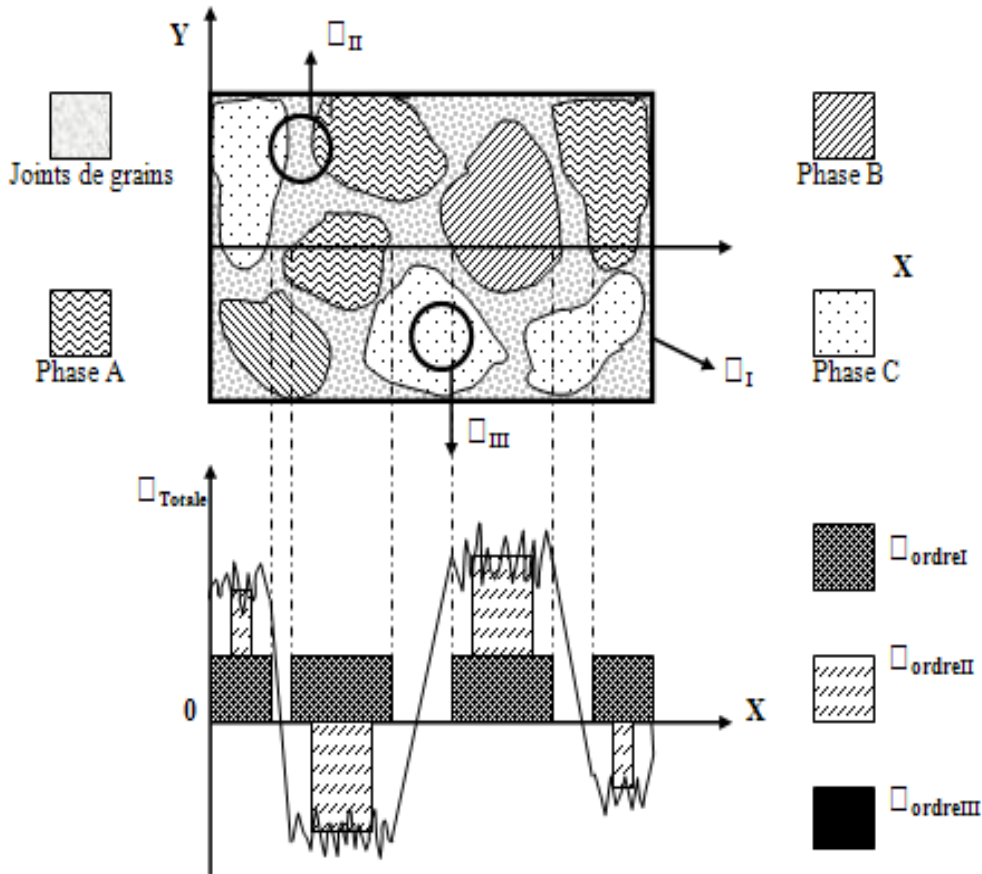
Quelle que soit l'échelle à laquelle on considère le matériau, on peut mettre en évidence des contraintes ayant pour origine des déformations assurant la continuité du matériau, par exemple autour des défauts ponctuels, des dislocations, des joints de grains, des joints d'interphase, au niveau des grains, des phases et enfin de la pièce elle-même.

Trois ordres de contraintes résiduelles liés à l'échelle d'observation:

1. les contraintes résiduelles du 1<sup>er</sup> ordre ( $\sigma^I$ ) ou macroscopiques sont homogènes sur un très grand domaine du matériau (plusieurs grains : quelques 1/10 de mm). Les forces internes liées à ces contraintes sont en équilibre dans chaque section, et les moments liés à ces forces sont nuls autour de tout axe. Des variations dimensionnelles macroscopiques résultent toujours d'une modification de l'équilibre des forces et des moments liés à ces contraintes  $\sigma^I$ .
2. les contraintes résiduelles du 2<sup>ème</sup> ordre ( $\sigma^{II}$ ) sont homogènes sur de petits domaines du matériau (un grain ou une phase : quelques 1/10 de  $\mu\text{m}$ ). Les forces internes et les moments liés à ces contraintes sont en équilibre dans un assez grand nombre de grains. Des variations dimensionnelles macroscopiques peuvent résulter d'une modification de cet équilibre.

Les contraintes résiduelles du 3<sup>ème</sup> ordre ( $\sigma^{III}$ ) ou submicroscopiques sont inhomogènes sur les plus petits domaines du matériau (quelques distances interatomiques : quelques 1/10 de nm). Les forces internes et les moments liés à ces contraintes sont en équilibre dans de très petits domaines. Ces contraintes peuvent atteindre des valeurs très élevées mais les dimensions macroscopiques ne peuvent être affectées par une évolution de cette famille de contraintes résiduelles.

Dans le cas de matériaux réels, l'état de contraintes résiduelles résulte de la superposition des contraintes d'ordre I, II et III comme ceci est schématisé sur la figure II.5 dans le cas d'un matériau polyphasé.



**Figure II. 5 :** Définition schématique des différents ordres de contraintes pour un matériau polyphasé

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

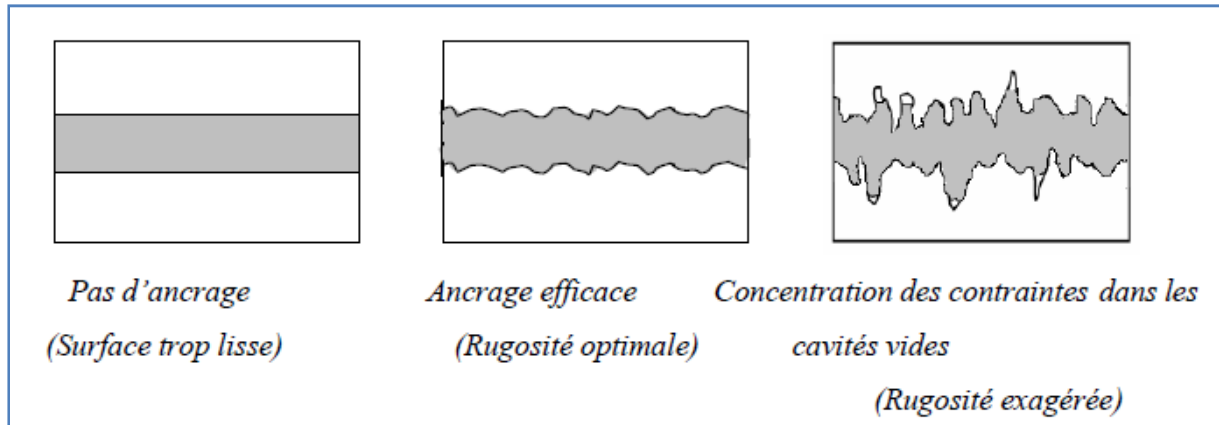
$$\sigma_{résiduelle}^{totale} = \sigma_{résiduelle}^I + \sigma_{résiduelle}^{II} + \sigma_{résiduelle}^{III}$$

Cette classification proposée pour les contraintes internes a un aspect pour l'instant théorique, car la séparation effective des différents ordres de contraintes n'est atteinte par aucune méthode de calcul ou de mesure. Cependant, elle a pour intérêt de montrer que toute hétérogénéité de déformation introduite à toute échelle de la structure entraîne l'existence de contraintes résiduelles.

**II.6 Théorie mécanique de l'adhésion:**

Cette théorie proposée initialement en 1925 par Mac Bain et Hopkins dont les travaux concernaient notamment le collage du bois, a été reprise dans les années 1970 pour expliquer

l'adhésion des substrats d'aluminium. L'adhésion est assurée par un ancrage mécanique du polymère qui pénètre dans les microcavités et irrégularités de surface du substrat avant la solidification. Un bon ancrage mécanique nécessite un choix judicieux de la rugosité de surface et dépend à la fois de la viscosité de l'adhésif et de la mouillabilité du substrat. Une bonne affinité adhésif/substrat limite la formation de défauts liés à de l'air piégé. [20]



**Figure II-6 :** Influence de la rugosité des substrats sur l'ancrage mécanique.

### II.6.1- Théorie de l'adsorption thermodynamique - Notion de mouillage :

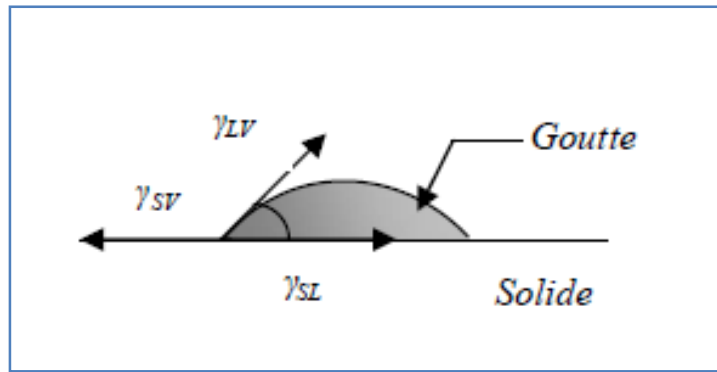
Cette théorie est présentée en 1963 par Sharpe et Schonhorn [21], ce modèle met l'accent sur le mouillage du substrat par la colle. En effet, les colles étant mises en œuvre à l'état liquide dans la plupart des cas, il est nécessaire de considérer leur étalement sur la surface de contact. Le phénomène de mouillage traduit l'aptitude de l'adhésif à créer des liaisons de **Van der Waals** ou des liaisons de type acide-base (liaisons "hydrogène") avec le substrat. Selon le modèle, l'adhésion s'expliquerait donc par l'existence de ces forces de liaisons physiques [22]. En fait, lorsque l'on dépose une goutte de liquide sur un solide, celle-ci va s'étaler jusqu'à atteindre un état d'équilibre, caractérisé par l'angle de contact liquide/solide dénoté par  $\theta$  ;(figure II.3) et décrit par l'équation de Young :

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos\theta$$

$\gamma_{SV}$ : tension superficielle du solide

Où  $\gamma_{LV}$  : tension superficielle du liquide

$\gamma_{SL}$  : tension interfaciale solide/liquide



**Figure II.7:** Etalement d'une goutte sur un substrat solide.

En outre, Dupré définit une énergie d'adhésion  $W_a$ , également appelée énergie de Dupré compte tenu de la création d'une énergie libre interfaciale et de la perte d'énergie de cohésion lors de l'étalement de la goutte.

$$W_a = W_{SL} = \gamma_{SV} + \gamma_{LV} - \gamma_{SL}$$

En la combinant avec l'équation de Young, on obtient l'équation de Young-Dupré :

$$W_{SL} = \gamma_{LV} (1 + \cos \theta)$$

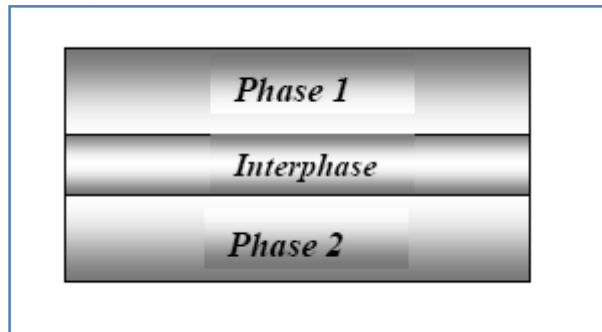
Plus le mouillage est bon (angle de contact tend vers zéro), plus l'énergie d'adhésion est grande. Le tableau II.1 illustre quelques valeurs d'énergies de surface pour des matériaux usuels.

<i>Matériau</i>	<i>Energie de surface (mj/m<sup>2</sup>)</i>
<i>Aluminium</i>	<i>840</i>
<i>Cuivre</i>	<i>1000</i>
<i>Verre</i>	<i>73</i>
<i>Plastiques</i>	<i>18-50</i>
<i>Epoxy</i>	<i>44</i>
<i>PVC</i>	<i>39</i>
<i>Caoutchouc</i>	<i>57</i>
<i>Polyéthylène</i>	<i>31</i>

**Tableau II.1** : Exemples d'énergies de surface pour quelques matériaux courants (Données du CETIM- centre technique des industries mécaniques).

**II.6.2- Théorie des couches de faible cohésion :**

Cette théorie étudie la rupture des interfaces plutôt que le phénomène d'adhésion. Dans le cas d'une forte cohésion de l'assemblage, la rupture n'a généralement pas lieu à l'interface, mais dans une couche voisine. En 1961 Bikermann [23] a introduit la notion d'interphase. L'interphase est une couche d'épaisseur finie entre les deux matériaux, caractérisée par de faibles cohésions dues à la présence d'imperfections provenant de la mise en œuvre (bulles d'air, impuretés...) et à la discontinuité entre les phases ; elle constitue une zone de transition. Cette théorie est surtout applicable à une échelle très fine car elle décrit l'interface en termes d'interactions moléculaires [20].



**Figure II.8** : interphase

## III.1- Introduction

Depuis quelques années, l'utilisation des logiciels de calcul par éléments finis s'est démocratisée dans la majorité des disciplines scientifiques.

L'accroissement permanent des moyens informatiques est à l'origine de cet essor. En sciences des matériaux, la simulation numérique c'est implantée dans de nombreux domaines comme celui des biomatériaux étudiés ici. Elle a le gros avantage d'être un outil de prédiction rapide, accessible et qui permet de limiter les risques industriels. La simulation numérique peut notamment contribuer à aiguiller les démarches empiriques habituellement effectuées pour mettre au point un matériau nouveau ou améliorer ces performances mécanique et thermique de pièces dans leurs conditions de service, souvent extrêmes.

Cette partie sera consacrée à la simulation numérique du comportement de biomatériau après leur élaboration. L'objectif est de déterminer les contraintes résiduelles dans le volume du matériau. La modélisation d'architectures en trois dimensions a été privilégié.

## III.2- Choix et présentation du logiciel M.E.F

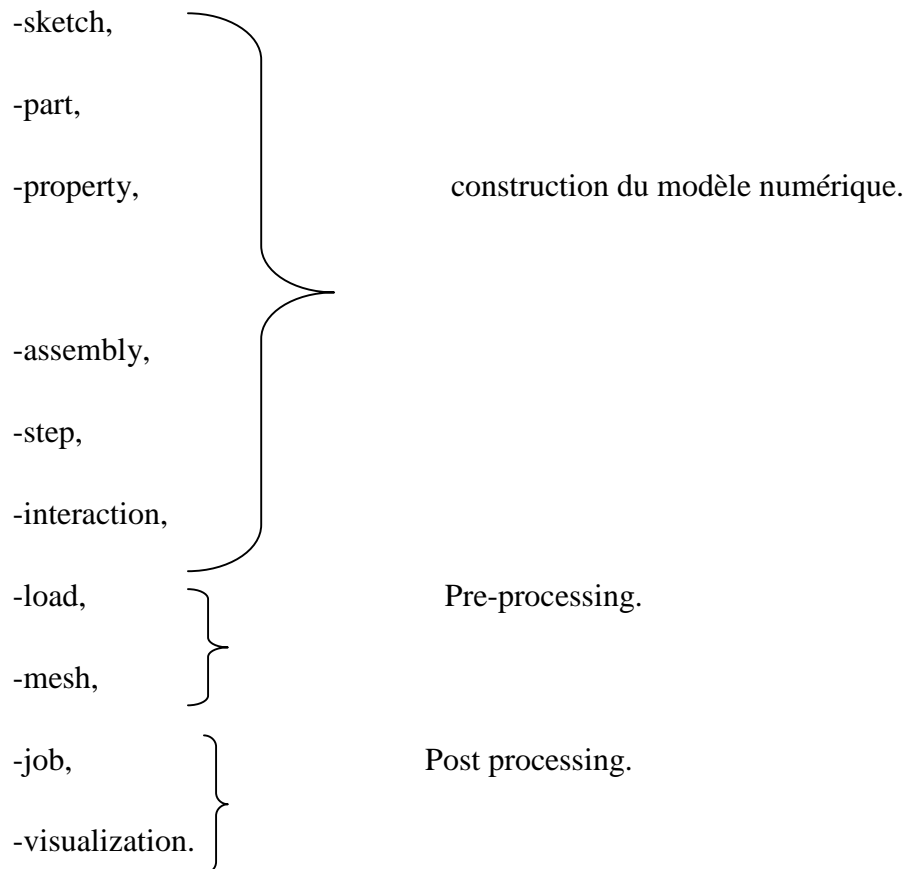
La méthode de résolution numérique par éléments finis est l'une des mieux adaptées aux problèmes thermomécaniques. La présente étude a été réalisée à l'aide du code de calcul par éléments finis ABAQUS version 6.9, sous environnement Windows 7. Le critère de choix a été essentiellement motivé par les grandes capacités qu'offre ce logiciel.

ABAQUS est avant tout un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés en mécanique. Il est connu et répandu, en particulier pour ces traitements performants de problèmes non-linéaires. A partir d'un fichier de données (caractérisé par un suffixe.inp qui décrit l'ensemble du problème mécanique), le logiciel analyse les données, effectue les simulations demandées et fournit les résultats dans un fichier.odb. Deux tâches donc restent à accomplir : générer le fichier (.inp), la structure du fichier de données peut se révéler rapidement complexe : elle doit contenir toutes les définitions géométriques, les descriptions des maillages, des matériaux, de chargement, suivant une syntaxe précise. ABAQUS propose le module ABAQUS.CAE, qui permet de gérer l'ensemble des opérations liées à la modélisation :



- la génération du fichier de données,
- le lancement du calcul,
- l'exploitation des résultats

Le module CAE se lance en entrant simplement la commande "ABAQUS.CAE". Il se présente sous la forme d'une interface graphique et propose les dix sous modules suivants :



Les huit premiers sous modules servent à définir le problème mécanique à simuler.

Le module job est celui qui gère le passage du calcul de simulation. Enfin le dernier module regroupe tout ce qui concerne l'exploitation des résultats sous forme de diverses visualisations.

Il faut noter néanmoins que la durée du traitement est relativement longue. A titre indicatif pour l'étude d'une structure composite  $Al_2O_3$ /acier, il a fallu 45mn. Ce temps augmente en

fonction du maillage utilisé. Les graphes ont été réalisés par un logiciel spécialisé du nom d'Origine.

### **III.3- Modélisation en 3D :**

Pour modéliser le comportement des matériaux réels, la simulation numérique directe d'architecture en 3 dimensions constitue indéniablement la meilleure approche. En effet une coupe 2D contenant 2 sections rectangulaires est aussi représentative d'un matériau formé par deux cylindres coaxiaux.

Par ailleurs, **Kurita** a montré que l'état de contrainte dans un assemblage soumis à un chargement thermomécanique est tridimensionnel. En comparant des mesures expérimentales par rayons X des contraintes résiduelles, et des résultats de simulation 2D et 3D, il conclut à la mauvaise adéquation simulation 2D/résultats expérimentaux.

La simulation numérique d'architectures tridimensionnelles tend à se développer en sciences des matériaux. Cependant l'extension au cas de matériaux multi constituants reste peu répandue à cause de la lourdeur générale de l'approche :

- la construction géométrique en trois dimensions peut être excessivement longue et fastidieuse en fonction de la complexité et la taille du modèle étudié ;
- la manipulation du modèle maillé est difficile dès lors que sa taille est importante, ce qui rend délicate la mise en place des conditions aux limites ;
- les temps de calcul sont d'autant plus longs que la complexité et la taille du modèle sont importantes.

### **III.4- Paramètres géométrique:**

Le modèle géométrique choisie est un parallélépipède de longueur  $L=20\text{mm}$ , largeur  $l=10\text{mm}$  et d'épaisseur  $e_1=10\text{mm}$  pour le métal et  $e_2=5\text{mm}$  pour la céramique. Pour des raisons de symétrie nous avons considéré que la moitié de la pièce. Nous avons fait varier les matériaux constituant notre modèle de façon à avoir bénéficié du choix des propriétés mécaniques et physiques, ainsi que leur température d'élaboration. Le modèle est représenté dans la figure III.1.

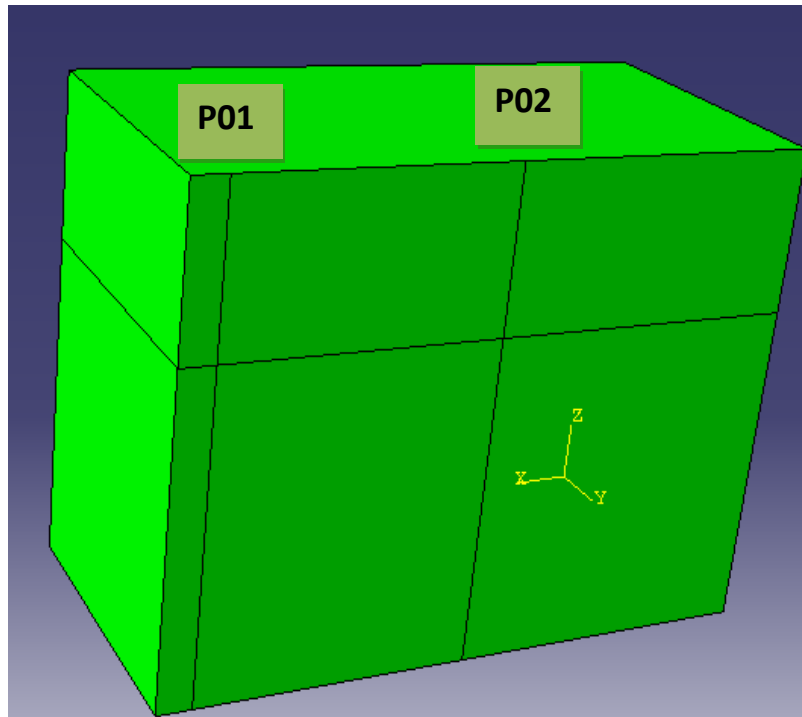


Figure III.1: représentation schématique du modèle.

### III.5- Propriété des matériaux:

Les propriétés mécaniques et physiques des différents matériaux sont dans le tableau III.1

	Module de Young E(GPa)	Coefficient de poisson	de	Coefficient de dilatation thermique $\alpha(10^{-6}/k)$
Acier XC15	210	0.29		12
Alumine $Al_2O_3$	350	0.25		8.5
ZrO <sub>2</sub>	200	0.28		5.4
SiC	420	0.24		4.8
Pt	170	0.39		9
Ni	210	0.31		13.20

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

### III.6- Assemblages:

La compatibilité entre les géométries de la pastille et le porte outil offre la possibilité d'assemblage. Les liaisons entre les deux constituants sont définies comme étant continues et parfaites.

### III.7- Conditions aux limites et chargements:

Les conditions aux limites de fixation, subordonnées aux conditions de symétrie de la géométrie, ces conditions sont représentées sur le tableau ci-dessus.

Conditions de frontières	Surface d'application		
$U1= UR2= UR3= 0$	<table border="1"><tr><td>Métal</td><td>Céramique</td></tr></table>	Métal	Céramique
Métal	Céramique		
$U3= UR2= UR3= 0$	<table border="1"><tr><td>Métal</td><td>Céramique</td></tr></table>	Métal	Céramique
Métal	Céramique		

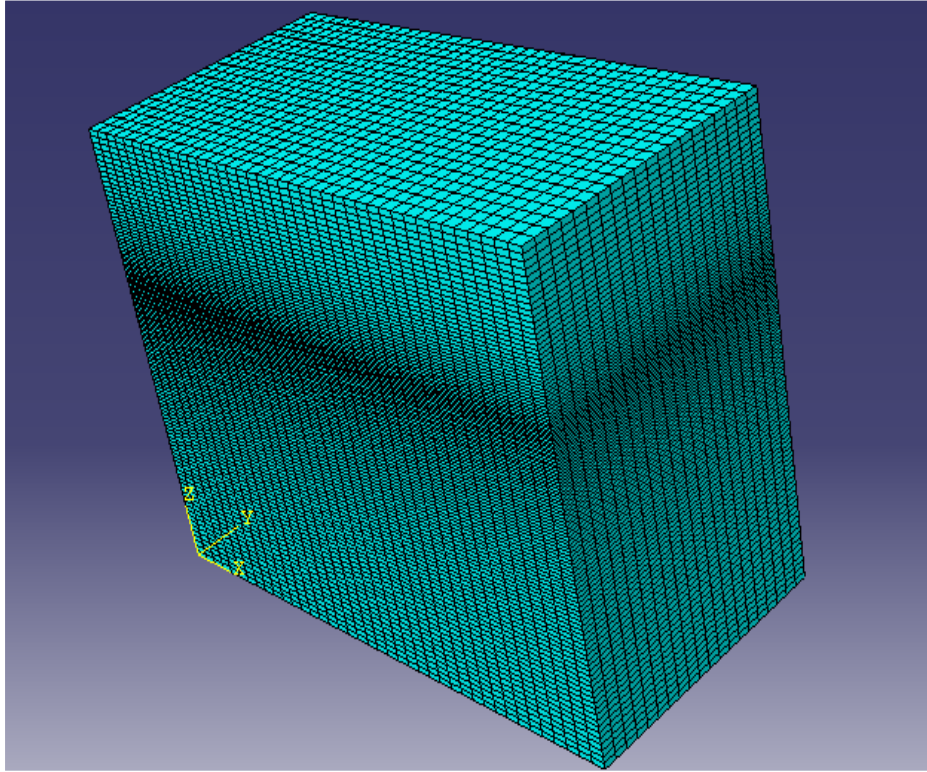
Le système est soumis d'un chargement thermique uniforme, simulant un refroidissement d'une température initiale, jusqu'à la température ambiante.

La température initiale est considérée comme la température d'essais mécaniques (température d'élaboration). Elle est attribuée à l'étape initiale (initial step) et change selon le couple à étudier. La température ambiante est équivalente à 20°C.

### III.8- Le maillage :

Le choix des éléments du maillage peut s'avérer déterminant puisqu'un maillage mal adapté peut conduire à des résultats erronés.

Notre objectif était donc de savoir comment mailler le domaine pour avoir des résultats satisfaisants. Sachant qu'un maillage trop fin donne une bonne précision du résultat mais avec un temps de calcul long, alors qu'un maillage grossier fait perdre en précision mais réduit le temps de calcul. La figure III.2 montre le maillage du couple céramique / métal



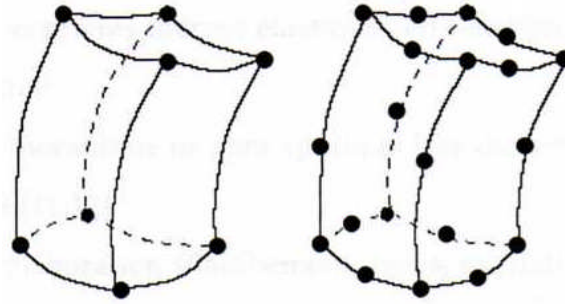
**Figure III.2:** schéma du maillage du couple alumine/acier

### III.9- Choix de l'élément fini :

Le choix de l'élément fini est primordial puisqu'il va conditionner tout le calcul numérique réalisé par la machine. ABAQUS propose, dans le cadre d'une étude thermomécanique, plusieurs éléments pour mailler un modèle en trois dimensions. Parmi ces éléments. Deux éléments hexaédriques, offrant la meilleure adaptation à notre géométrie, sont retenus :

-C3D8R ?élément à 8 nœuds.

-C3D20R, élément à 20 nœuds.



**Figure III-3** : les éléments finis hexaédriques pour problèmes thermomécaniques 3D. Chacun des huit sommets de l'élément C3D8R correspond à un nœud sur lequel un chargement thermique peut être appliqué. L'élément C3D20R est une version améliorée dans la mesure où il possède un nœud supplémentaire au milieu de chacun de ces arêtes. Ce dernier élément est donc plus précis que le premier, mais nécessite un temps de calcul beaucoup plus long. L'objectif étant la mise en évidence de l'évolution des contraintes résiduelles thermique d'élaboration, nous avons donc privilégié le temps de calcul sur la précision. C'est pourquoi nous avons choisi l'élément C3D8R pour mailler le modèle, afin d'obtenir un maximum d'essais tout en ayant des temps de simulation convenables.

### III.10- Démarche adopté pour la simulation:

La simulation aux éléments finis du procédé de fabrication est complexe. En effet, tous les phénomènes intervenant lors de la fabrication (comportement des matériaux vis-à-vis du chargement thermique) sont relativement difficiles à simuler. Donc pour réaliser le calcul certaines hypothèses ont été adoptées :

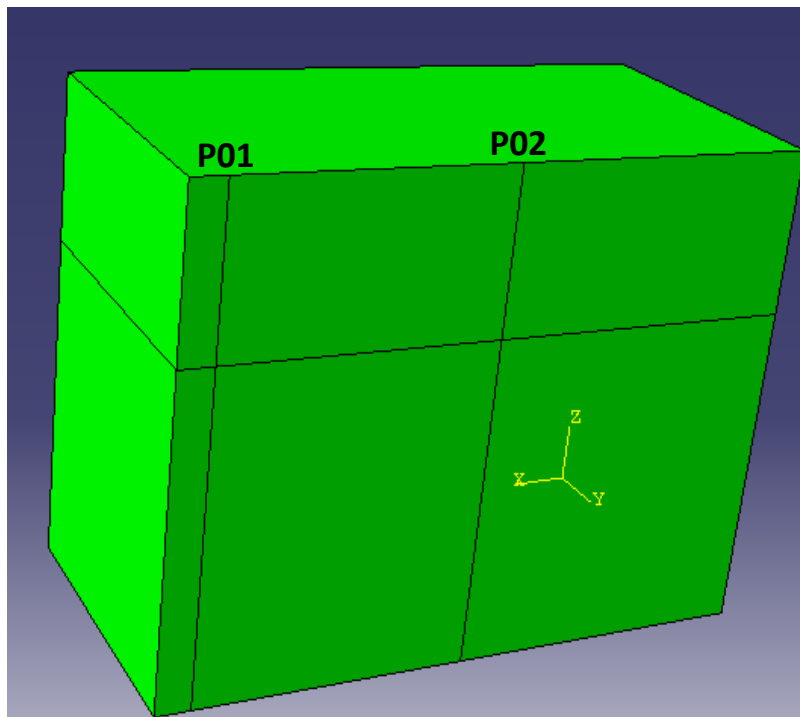
- 1) les températures d'élaboration pour les CMM sont prises égales au  $\frac{1}{3}$  de la température de fusion du métal, en supposant qu'au-delà de cette température les contraintes d'effets thermiques sont relaxées par une déformation viscoplastique.
- 2) les variations des propriétés thermo élastiques en fonction de la température sont prises en considération.
- 3) Aucun chargement mécanique ne sera appliqué lors du refroidissement, ce qui est parfaitement justifié.
- 4) les défauts dus à l'élaboration (flambement, trous, oxydation) ne seront pas pris en considération.

### IV.1 - Introduction:

Dans ce chapitre nous analyserons numériquement par la méthode des éléments finis, les contraintes résiduelles développées dans les bimatériaux.

Les paramètres physiques sont la cause essentielle de la naissance de ces contraintes. Rappelons que la différence des propriétés mécaniques et physiques entre la céramique et l'acier est la source principale des contraintes résiduelles. L'état et l'intensité de ces contraintes donc de la nature des matériaux assemblés. La région proche de l'interface est le siège de concentrations des contraintes résiduelles qui peuvent, en fonction de leurs amplitudes, être à l'origine de la rupture de l'assemblage. C'est pourquoi leur analyse est d'une grande importance pour la mise en service et la durabilité des bimatériaux.

Sur la Figure IV.1, nous avons illustré le volume élémentaire représentatif utilisé dans l'analyse des contraintes résiduelles. Ces dernières ont été évaluées le long des lignes notées P01, P02.



**Figure IV.1:** Position d'analyse les contraintes résiduelles

### **Partie A: Analyse des contraintes résiduelles:**

Dans un premier temps nous avons étudié la nature des contraintes résiduelles dans les bimatériaux (céramique/métal) : trois types de matériaux ont été analysés: XC15/ $Al_2O_3$ , XC15/SiC et XC15/ $ZrO_2$

#### **VI.A.1 Couples XC15/ $Al_2O_3$ :**

Actuellement, les technologies de pointes requièrent des combinaisons inhabituelles des propriétés mécaniques, physiques et thermiques qui ne peuvent être obtenues avec les matériaux classiques conventionnels. Pour élargir le domaine de ces propriétés, une nouvelle classe de bimatériaux à été développée avec des propriétés, tout particulièrement mécaniques et physique diamétralement opposées. Pour profiter de ces propriété ou est amené à les assembler. Pour bénéficier des propriétés mécaniques de ductilité élevées de l'acier et de propriété de résistances élevées de la céramique on est dans l'objection de lier conjointement.

Ce dernier à fait l'objet de bon nombre de travaux de recherche. Ces études approfondies ont eu pour objectif de réduire le poids, d'améliorer les performances des propriétés mécaniques et physiques et développer la mise en service dans des domaines aussi variés que l'aéronautiques, l'aérospatiales, outils de coupes et autres.

La température d'élaboration optimale choisie, pour le cas de XC15/ $Al_2O_3$  est de 650°C, son refroidissement jusqu'à la température ambiante conduit à la création des contraintes résiduelles normales dont l'intensité et la répartition sont représentés sur la (fig VI.2). Ce dernier illustre également le niveau de la contrainte équivalente de Von Mises induite thermiquement dans les deux constituantes du bimatériau au voisinage proche de leur interface. Cette figure IV.3.a montre que les contraintes résiduelles normales les plus importantes sont localisées au voisinage proche de l'interface. La contrainte équivalente de Von Mises représente globalement le niveau des contraintes internes dans ce bimatériau. Elle est intensivement concentrée dans l'acier et l'alumine près de leur interface. Loin de cette dernière, le bimatériau se comporte comme un matériau homogène. En effet, loin de ce défaut plan les contraintes sont totalement relaxées.

Pour une meilleur illustration du comportement mécanique du bimatériau type XC15/ $Al_2O_3$ , nous avons représenté sur la Figure IV.3.b.c.d la variation des contraintes résiduelles normales  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  et  $\sigma_{zz}$  engendrées lors de l'élaboration de la jonction en fonction de la



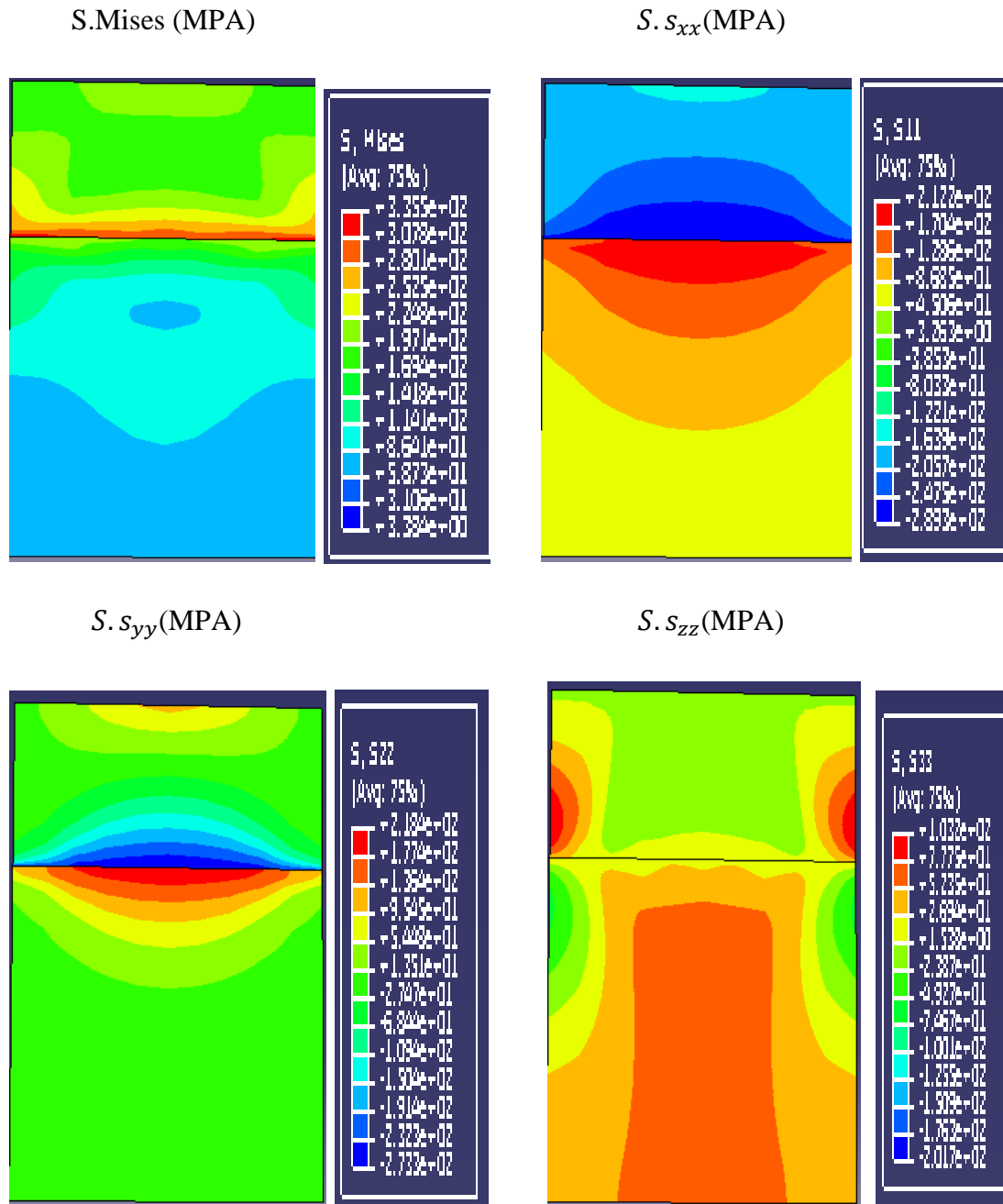
distance par rapport à l'interface. Les contraintes ont été analysées dans les deux positions citées précédemment les contraintes internes  $\sigma_{xx}$  fortement localisées près de l'interface du bimatérial mettent la céramique en compression et le métal en tension (Fig IV.3.b). Ce comportement a tendance à disparaître loin de cette interface. Dans ce cas le bimatérial présente un comportement d'un matériau homogène.

La variation des contraintes internes normales  $\sigma_{yy}$  en fonction de la distance par rapport à l'interface diffère de celle de  $\sigma_{xx}$ . En effet, ces contraintes intensivement situées dans les composantes près de leur interface sollicitent l'acier en tension et la l'alumine en compression (Fig IV.3.c). Une partie de la céramique est en tension contrairement au contrainte normale  $\sigma_{xx}$ , l'effet de ces contraintes s'annule au voisinage de l'interface la zone sollicité est moins marquée que celle des contraintes  $\sigma_{xx}$ .

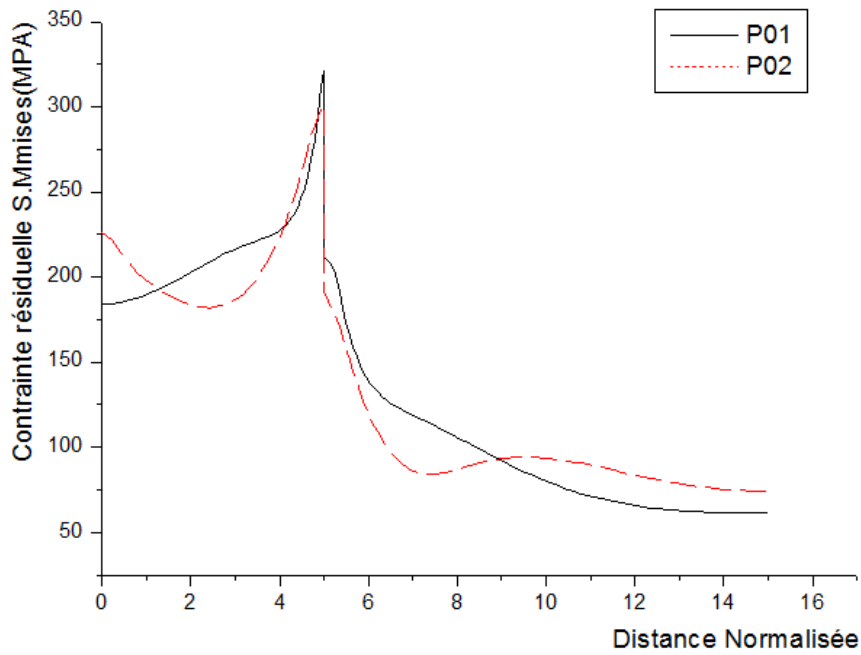
Les contraintes résiduelles normales  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  analysée au voisinage proche de l'interface ne sont pas répartie de façon homogène dans l'acier. C'est dans la position P02 de l'acier ou ces contraintes sont les plus fortes et dans l'alumine elles sont relatives à la position P01. Les résultats illustrées (Fig IV.3 b et c) montrent clairement que la contrainte interne induite près de l'interface n'ont plus aucun effet loin de la zone de jonction.

La variation des contraintes résiduelles  $\sigma_{zz}$  engendrées thermiquement dans le métal et la céramique près de leur interface est représentée sur la (Fig IV.3.d). Cette dernière montre que ces contraintes mettent le bimatérial en flexion. En effet, ces contraintes sont de tension dans l'acier et de compression dans la céramique et s'annulent à leur interface. Cette dernière constitue la ligne neutre de l'assemblage fléchi.

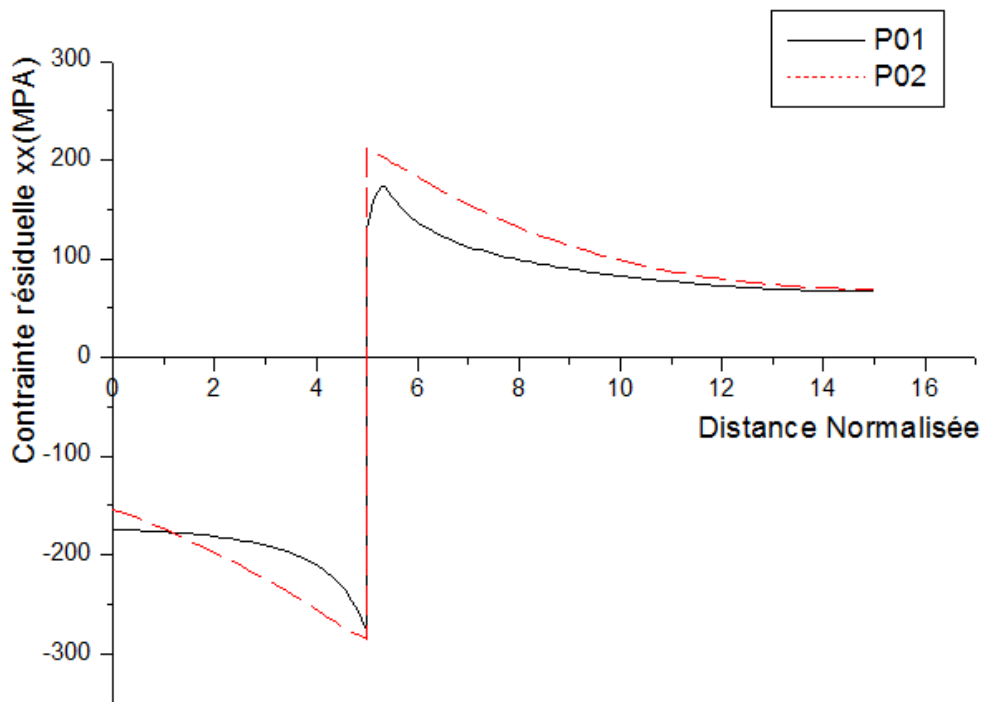
Les contraintes résiduelles normales  $\sigma_{xx}$  et  $\sigma_{yy}$  induites thermiquement lors du processus l'élaboration des bimatérial, type céramique/ métal, sont fortement localisée au voisinage très proche de l'interface. Ajouter aux contraintes de mise en service, elles peuvent conduire à une rupture cohésive de ces assemblages.



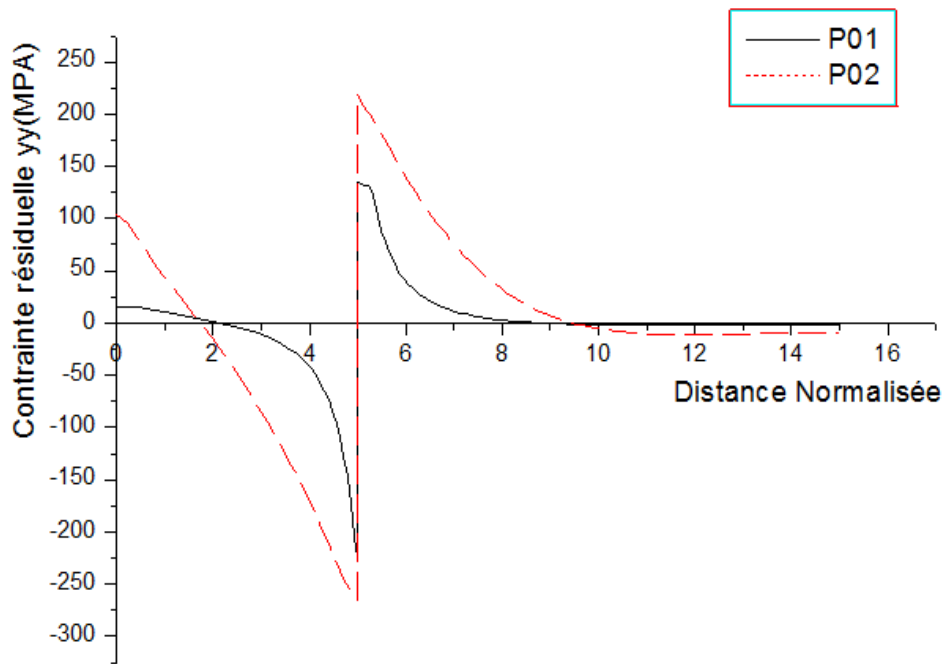
**Figure IV.2:** Carte de contrainte thermique résiduelle pour acier/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



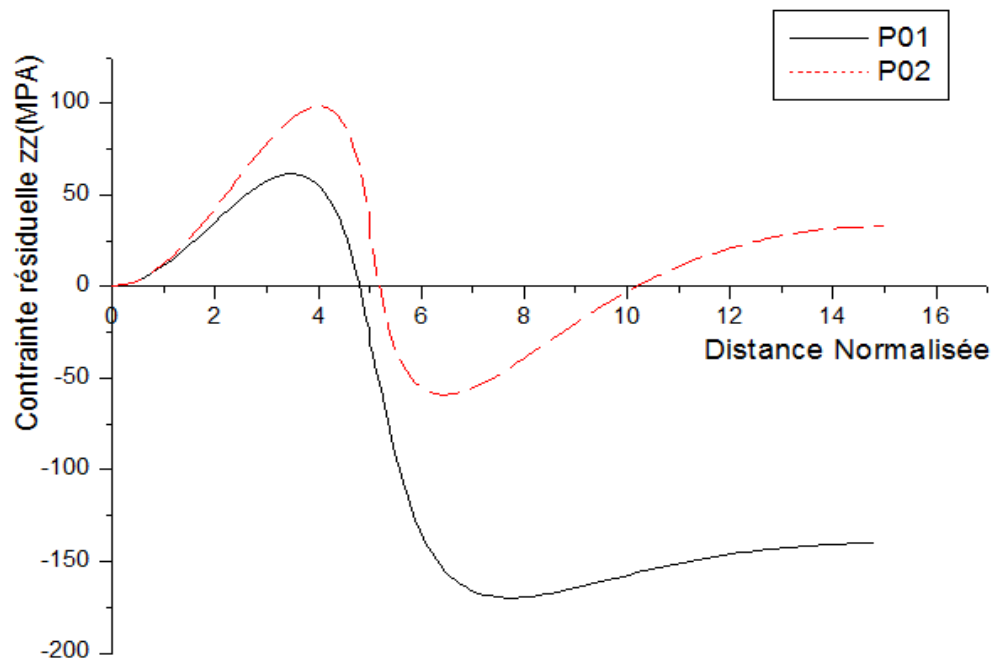
**Figure IV.3.a :** Variation des contraintes résiduelles S.Mises induite dans le bimatériau lors de son élaboration à  $T_E = 650^\circ C$  en fonction de la distance par rapport à l'interface.



**Figure IV.3.b :** Variation des contraintes résiduelles  $\sigma_{xx}$  induites dans le bimatériau lors de son élaboration à  $T_E = 650^\circ C$  en fonction de la distance par rapport à l'interface.



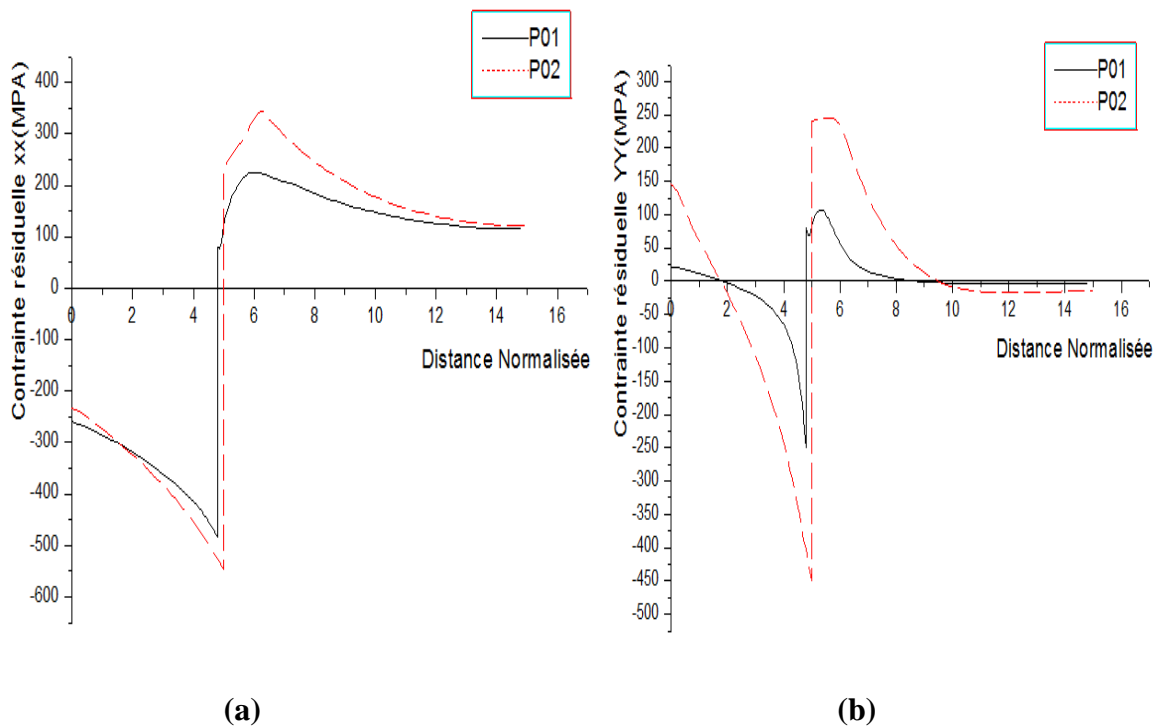
**Figure IV.3.c :** Variation des contraintes résiduelles  $\sigma_{yy}$  induites dans le bimatériau lors de son élaboration à  $T_E = 650^\circ C$  en fonction de la distance par rapport à l'interface.

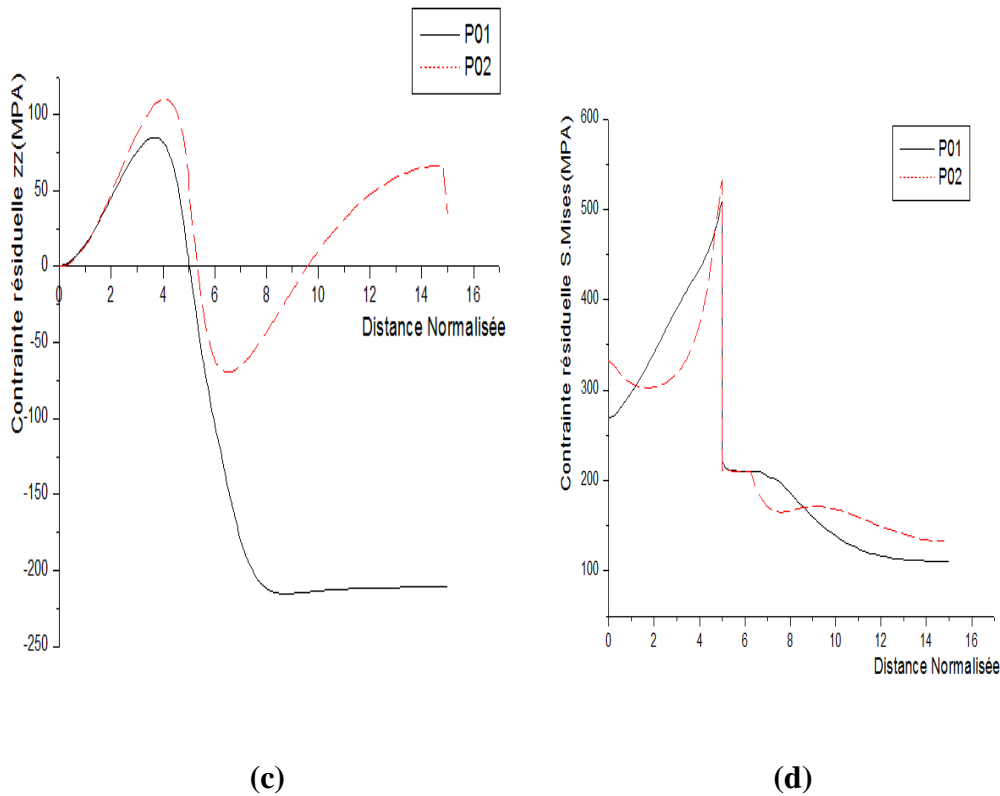


**Figure IV.3.d :** Variation des contraintes résiduelles  $\sigma_{zz}$  induites dans le bimatériau lors de son élaboration à  $T_E = 650^\circ C$  en fonction de la distance par rapport à l'interface.

## VI.A.2- Couples XC15/ SiC:

Le carbure de silicium présente généralement un module de Young très élevé et un faible coefficient de dilatation thermique comparativement à d'autres céramiques. Son assemblage avec des métaux permet de bénéficier de l'avantage de cette propriété mécanique d'une part et d'autre part, cette céramique est un parfait isolant thermique et électrique ce qui explique son utilisation comme barrière thermique dans l'industrie thermomécanique et aéronautique. De par son module de Young élevé, le carbure de silicium est utilisé pour les pièces travaillant à l'usure ou comme outil de coupe dans l'industrie mécanique. Dans ce cas, le carbure de silicium, fabriqué sous forme de plaquettes, est lié conjointement à un métal. Cette liaison permet de bénéficier de l'avantage des propriétés mécaniques, physiques et thermique radicalement opposées des deux matériaux. Néanmoins, la différence de ces propriétés conduit à la création de contraintes pouvant conduire à l'endommagement de l'assemblage par rupture brutale. Ce phénomène nécessite l'étude et l'analyse de l'état de ces contraintes, de leur intensité et leur distribution. Ces contraintes ont un rôle déterminant sur la tenue mécanique des assemblages céramique / métal et sur leur durée de vie.





**Figure IV.4.a.b.c.d** : Variation des contraintes résiduelles pour Sic/acier S.Mises,  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$  en fonction de la distance par rapport à l'interface pour les deux position P01, P02 à  $T_E = 650^\circ\text{C}$

Dans ce qui suit nous analysons le niveau et la répartition des contraintes résiduelles normales et de Von Mises induites dans un bimatérial acier / SiC élaboré à une température de  $T_E = 650^\circ\text{C}$ . Les contraintes ont été analysés dans deux position latérale notée P01 et central notée P02 du bimatérial. Les résultats ainsi obtenues sont représentés sur les Figures IV.4.a.b.c.d. Ces figures montrent que les contraintes résiduelles normales  $\sigma_{xx}$  et  $\sigma_{yy}$  sont plus marquées près de la zone de jonction des deux matériaux. Leur niveau baisse fortement loin de cette zone. les contraintes de tension dans le métal et de compression dans la céramique de forte intensité peuvent conduire à l'amorçage et à la propagation de fissure en mode II. Lors de sa mise en service cet assemblage présente un risque de décohésion interraciale.

Les contraintes internes induites dans la liaison XC15/ SiC sont d'amplitude plus important que celles engendrées dans les assemblages XC15/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  et ce quelle que soit la position ou elles sont analysées et la distance par rapport à l'interface.

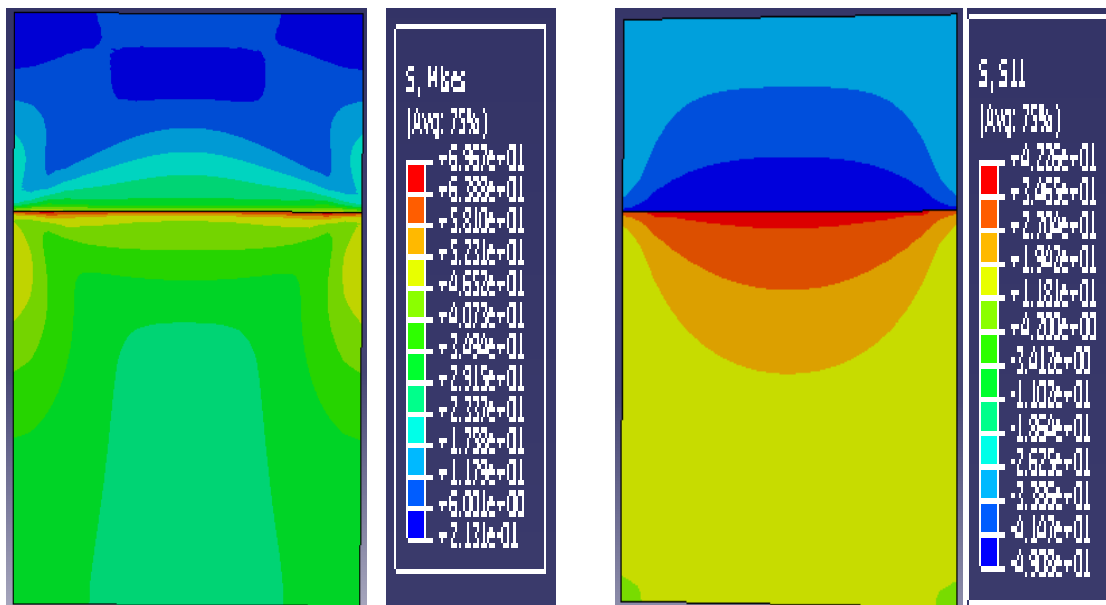
### VI.A.3 - Couples XC15/ $ZrO_2$ :

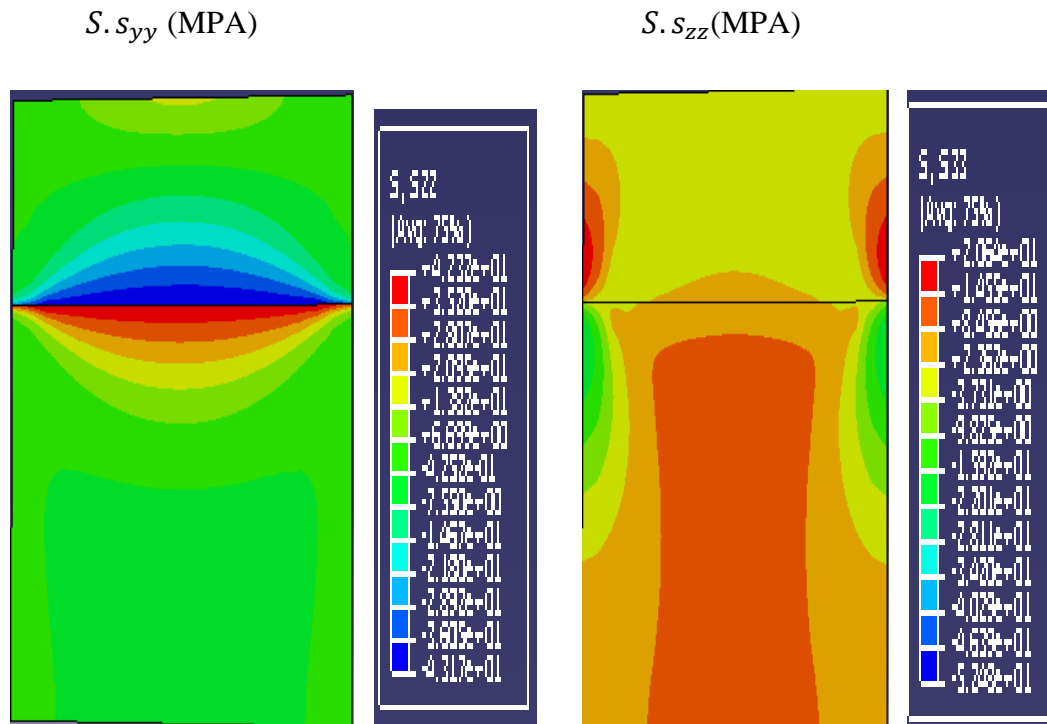
Ces bimatériaux sont élaborés à des températures relativement élevées. Leur refroidissement (de la température d'élaboration à la température ambiante), conduit à la création des contraintes résiduelles, dont la répartition et l'amplitude sont étroitement liées à l'écart entre les propriétés physiques et mécaniques de l'acier et de la zircone XC15 et  $ZrO_2$ . Ces contraintes d'origine thermique sont connectées au voisinage proche de l'interface.

Notre travail porte sur ce contexte et consiste à analyser numériquement tridimensionnellement par la méthode des éléments finis le niveau et la répartition des contraintes internes engendrées lors de l'élaboration de la liaison à une température élevée. Sur la (Fig IV.5) est illustrée la distribution des contraintes normales  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  et  $\sigma_{zz}$  et de Von Mises au voisinage proche de l'interface des deux constituants (acier et la zircone). Cette figure montre que ces contraintes sont fortement concentrées près du défaut plan de la jonction entre ces deux matériaux. En s'éloignant progressivement de ce plan, ces contraintes baissent d'intensité. Autrement dit, l'interface est siège de ces contraintes, en fonction de la résistance mécanique de l'interface (interface adhésive), peuvent conduire à l'endommagement du bimatériau.

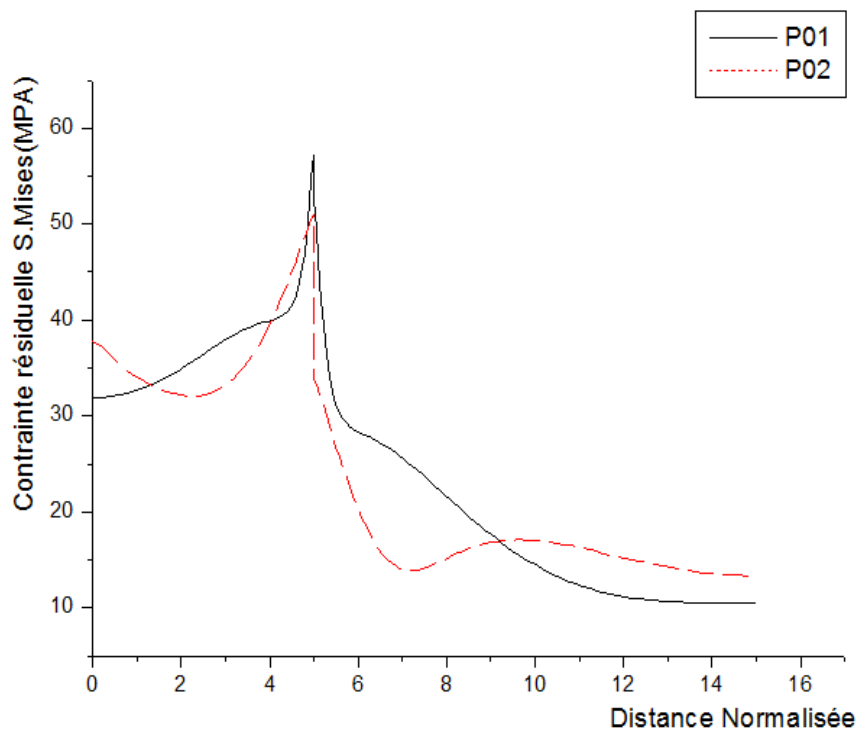
S.Mises (MPa)

S.  $\sigma_{xx}$  (MPa)



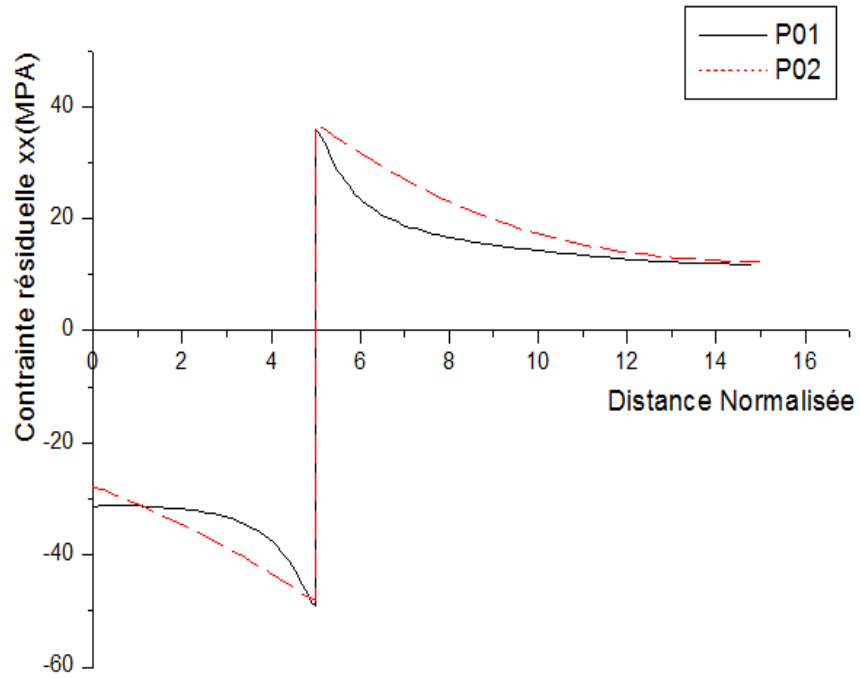


**Figure IV.5:** Distribution des contraintes internes d'origine thermique dans le couple acier/zircone

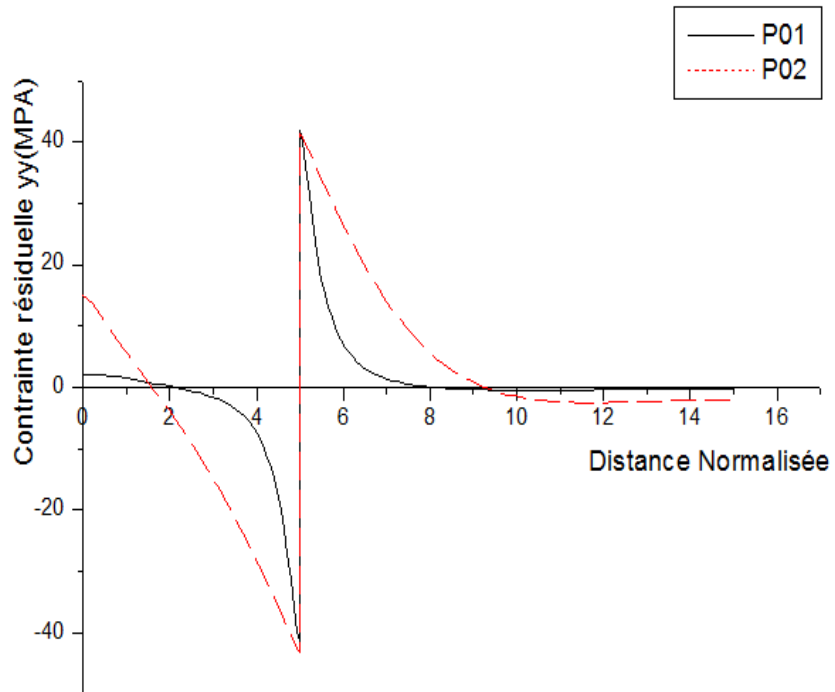


**Figure IV.5.a :** Variation des contraintes résiduelles S.Mises dans le couple acier/ zircone élaboré à  $T_E = 650^\circ\text{C}$  en fonction de la distance par rapport à l'interface

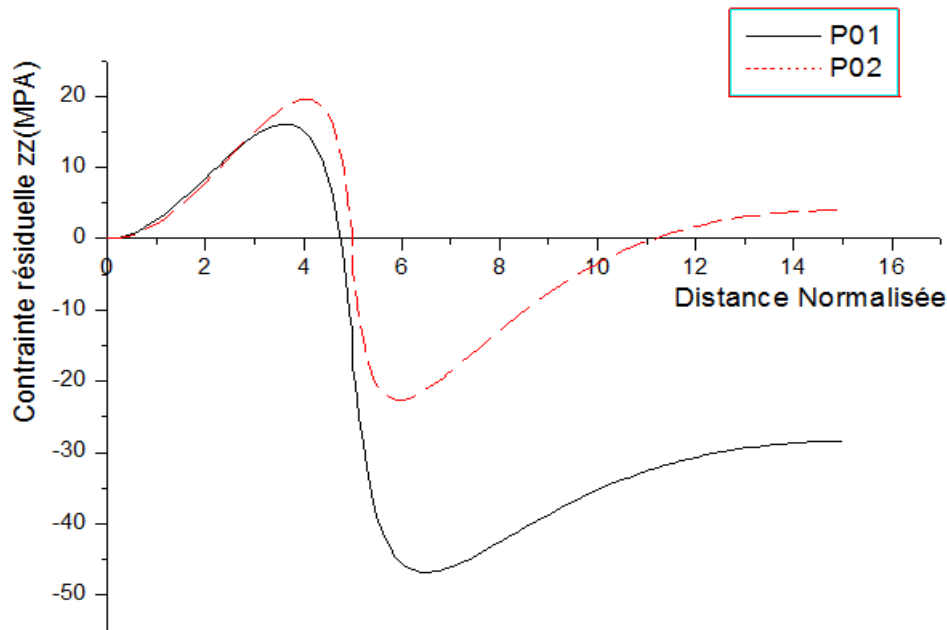




**Figure IV.5.b :** Variation des contraintes résiduelles  $\sigma_{xx}$  dans le couple acier/ zircone élaboré à  $T_E = 650^\circ C$  en fonction de la distance par rapport à l'interface



**Figure IV.5.c:** Variation des contraintes résiduelles  $\sigma_{yy}$  dans le couple acier/ zircone élaboré à  $T_E = 650^\circ C$  en fonction de la distance par rapport à l'interface



**Figure IV.5.d:** Variation des contraintes résiduelles  $\sigma_{zz}$  dans le couple acier/ zircone élaboré à  $T_E = 650^\circ C$  en fonction de la distance par rapport à l'interface

La variation de l'intensité des contraintes résiduelles normales  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  et  $\sigma_{zz}$  en fonction de la distance par rapport à l'interface est illustrée par les Figures IV.5.a.b.c.d, pour les deux positions latérales P01 et centrales P02. Les contraintes internes normales  $\sigma_{xx}$ , les plus significatives sont engendrées dans l'acier et la zircone près de leur interface, puis ces contraintes baissent d'intensité au fur et à mesure ou l'on s'éloigne de ce défaut. Loin de ce défaut les contraintes résiduelles normales  $\sigma_{xx}$ , ont tendance à s'annuler (Fig IV.5.b) un comportement différent est observé sur la distribution des contraintes interne normal  $\sigma_{yy}$ . En effet, ces contraintes d'amplitude comparable à celle de  $\sigma_{xx}$ , sont très fortement localisées au voisinage très proche de l'interface. Leur effet disparaît non loin du plan de la jonction, comme le montre la (Fig IV.5.b). D'autre part, les contraintes résiduelles  $\sigma_{xx}$  mettent la céramique en compression et le métal en tension. Sous l'effet des contraintes  $\sigma_{yy}$  une partie de la céramique est en tension. Quelque soit l'état des contraintes résiduelles normale ( $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ), les deux constituant acier et zircone de l'assemblage sont fortement mécaniquement sollicités près de l'interface. Loin de cette dernière, le bimatériau se comporte comme un matériau homogène.

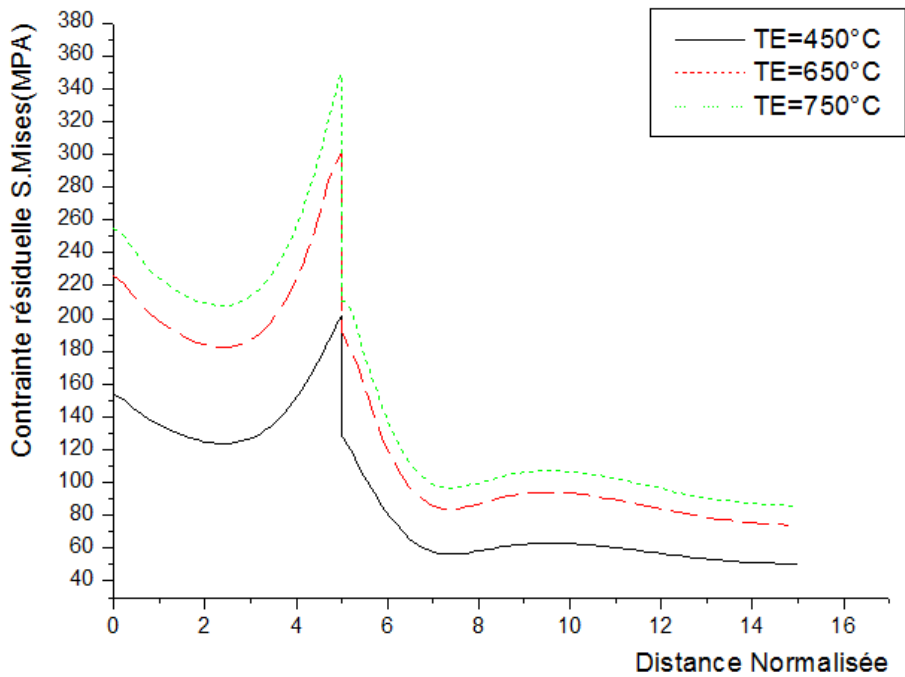
Sur la (Fig IV.5.d) est représentée le niveau des contraintes résiduelles normale  $\sigma_{zz}$  près de la jonction acier/ zircone. Comparativement aux contrainte normale  $\sigma_{xx}$  et  $\sigma_{yy}$  présentant une discontinuité des contraintes à l'interface, les contraintes  $\sigma_{zz}$  négatives dans la céramique et positives dans le métal. De part leur nature, ces contraintes sollicitent le bimatériau en flexion. Le plan de jonction de l'acier et de l'alumine est totalement relaxé de ces contraintes. A cette localité du bimatériau les contraintes sont nulles.

Ces contraintes internes normales induites pendant le processus d'élaboration des jonctions acier/ zircone sont d'un niveau plus faible que celle engendrées dans les couples acier/alumine et ce quelque soit la position ou elles sont analysées.

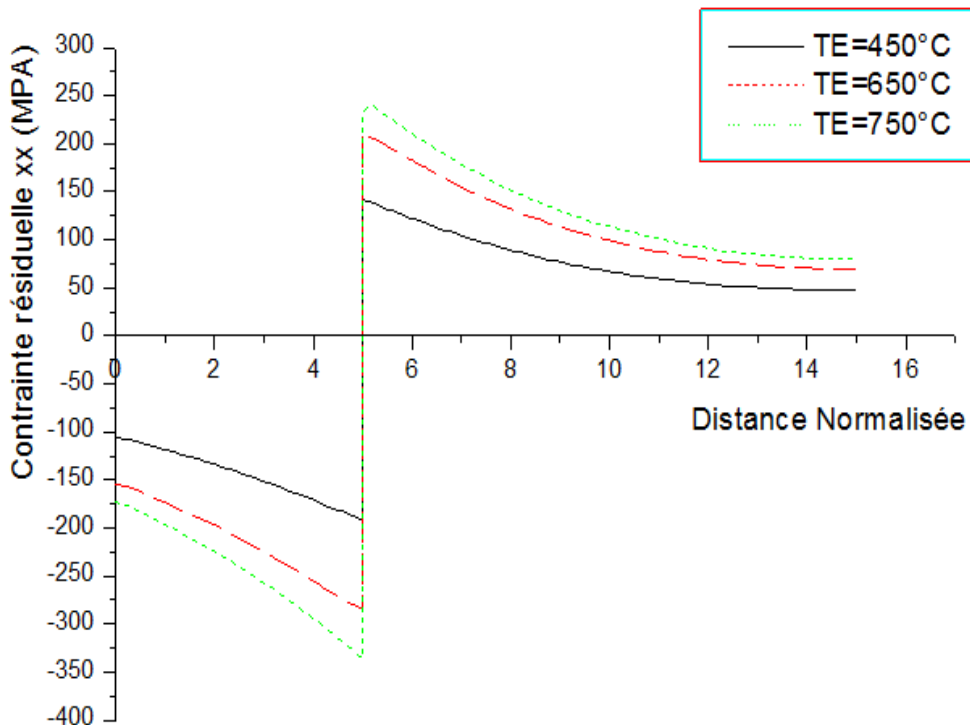
### IV.A.4 - Effet de la température pour XC15/ $Al_2O_3$

Le paramètre température détermine non seulement la qualité de l'adhésion mais également le niveau des contraintes internes d'origine thermique dans les bimaériaux, les multilatéraux et les matériaux composites. Ce paramètre conditionne l'écoulement plastique, voir visqueux de ces matériaux élaborés à des températures élevées. La température d'élaboration des bimaériaux dépend des propriétés physiques des constituants de ce matériau. C'est pourquoi nous avons jugé important d'analyser son effet sur le niveau des contraintes résiduelles.

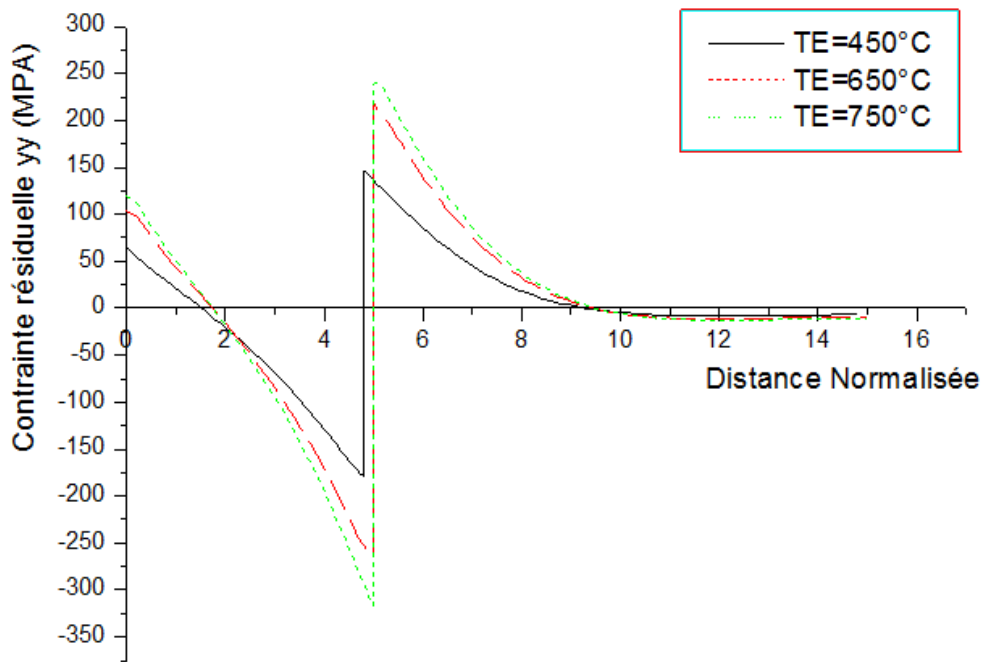
Nous avons analysé l'effet de la température d'élaboration sur le niveau et la répartition des contraintes résiduelles à l'interface métal / céramique. Les résultats obtenus à partir de cette étude sont représentés sur les figures IV.6.a.b.c.d. Nous remarquons que quelle soit la nature des contraintes résiduelles (S.Mises équivalente,  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$ ), leurs niveaux croissent avec l'accroissement de la température d'élaboration; ceci montre clairement que l'élaboration des bimaériaux à des températures élevées conduit à une meilleure adhésion, mais engendre des contraintes résiduelles de fortes intensités. De ce fait, il est fortement conseillé d'élaborer des bimatériau à des températures modérées. Par conséquent, elle doit être optimisé afin d'avoir, à l'interface, à la fois un bon accrochage mécanique métal / céramique et de faibles contraintes résiduelles à leurs interfaces.



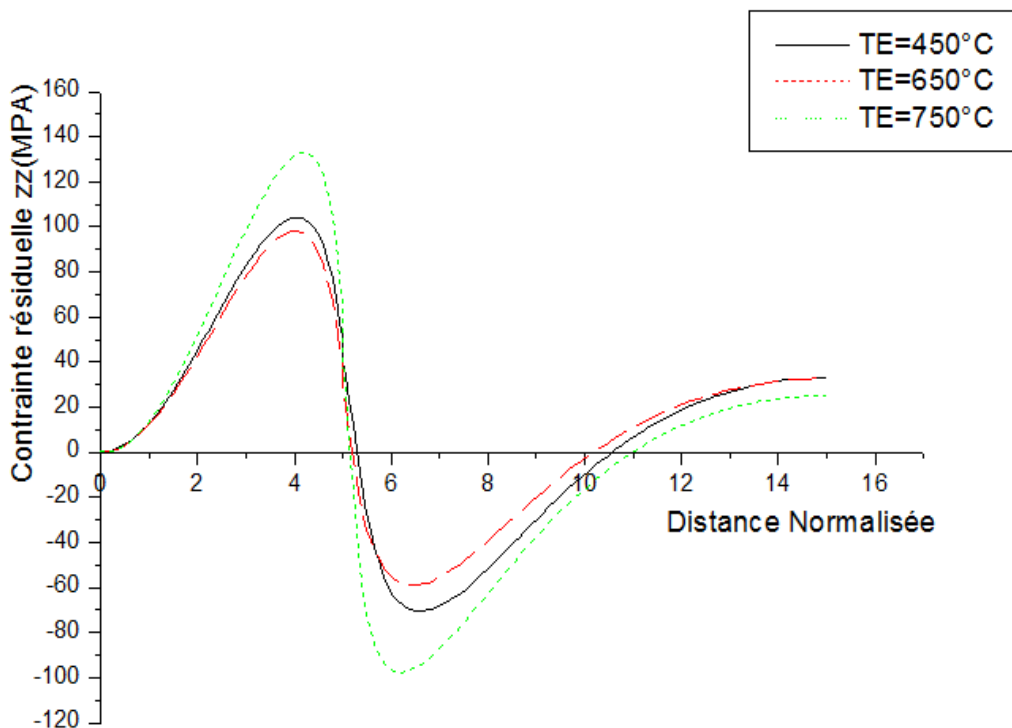
**Figure IV.5.a:** Variation de la contrainte équivalente de Von Mises induite dans le couple  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{XC15}$  en fonction de la température d'élaboration



**Figure IV.5.b:** Variation de la contrainte équivalente de  $\sigma_{xx}$  induite dans le couple  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{XC15}$  en fonction de la température d'élaboration



**Figure IV.5.c:** Variation de la contrainte équivalente de  $\sigma_{yy}$  induite dans le couple  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{XC15}$  en fonction de la température d'élaboration



**Figure IV.5.d:** Variation de la contrainte équivalente de  $\sigma_{zz}$  induite dans le couple  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{XC15}$  en fonction de la température d'élaboration

## IV.A.5 Effet de paramètres géométriques:

Dans cette partie de travail, nous analysons le niveau et la distribution des contraintes résiduelles normales et de Von mises induites dans les bimatériaux type céramique/métal en fonction de ses paramètres géométriques. Pour ce faire, nous avons analysé séparément l'influence de chaque paramètre géométrique de l'assemblage  $Al_2O_3/XC15$ .

### 1- Effet de la longueur du bimatériau:

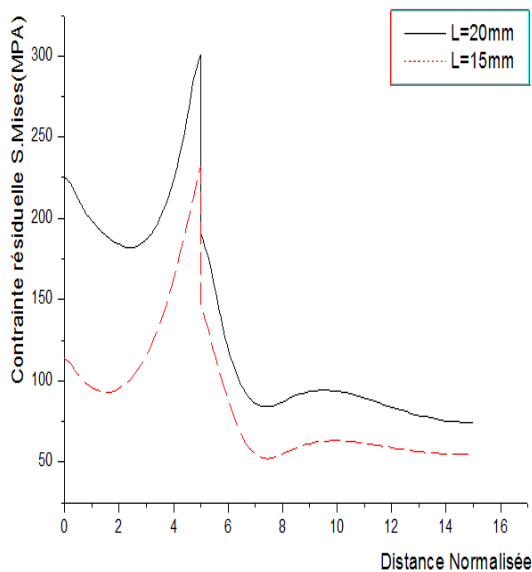
#### Model 2:

- Métal:

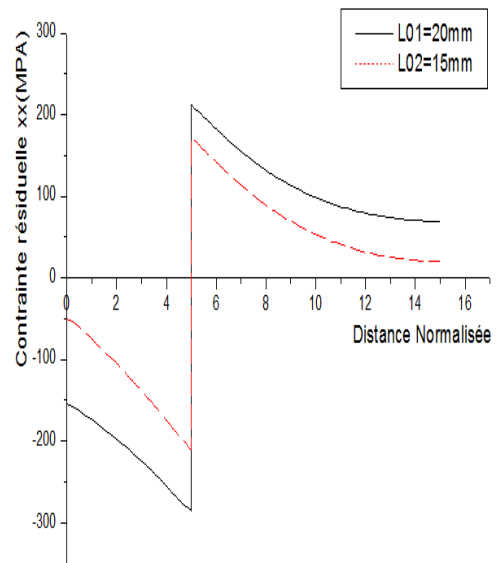
$L = 15 \text{ mm}; l = 10 \text{ mm}$  et  $e = 10 \text{ mm}$

- Céramique  $Al_2O_3$ :

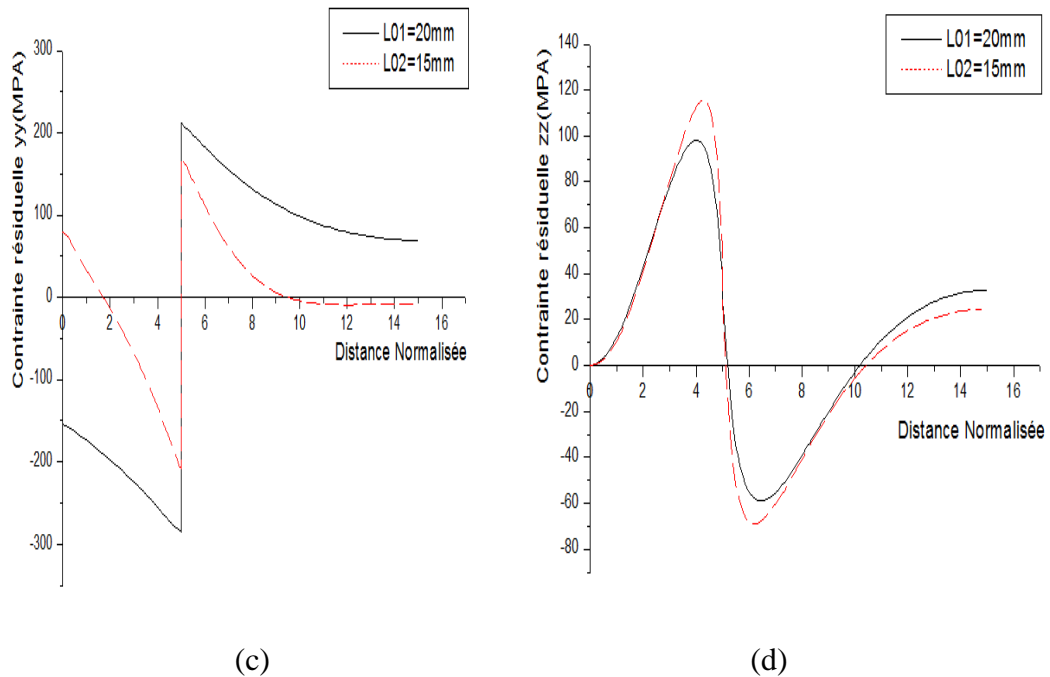
$L = 15 \text{ mm}; l = 10 \text{ mm}$  et  $e = 5 \text{ mm}$



(a)



(b)



**Figure IV.6.a.b.c.d:** Variation des contraintes résiduelles Von Mises,  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  et  $\sigma_{zz}$  en fonction de la taille du bimatérial  $T_E = 650^\circ\text{C}$

Dans ce cas, une analyse numérique tridimensionnelle par la méthode des éléments finis de la répartition des contraintes interne induites thermiquement en fonction de la longueur du bimatérial a été menée. Les résultats obtenus à partir de cette analyse sont représentés sur la (Fig IV.6.a). Ces figures montrent la variation de la contrainte équivalente de Von Mises, et des contraintes normales  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  et  $\sigma_{zz}$  en fonction de la taille du bimatérial élaboré à une température élevée respectivement. Les contraintes résiduelles normales  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  et  $\sigma_{zz}$  croissent avec l'augmentation de la taille du bimatérial. C'est dans la céramique où l'écart de contrainte, induit par une variation de la longueur de l'assemblage est plus important. Cet écart devient plus significatif loin de l'interface. Un comportement inverse est observé dans le cas des contraintes internes normales  $\sigma_{zz}$  comme le montre la (fig IV.6.c). Cette dernière illustre qu'une réduction de la longueur du bimatérial engendre dans la céramique et le métal des contraintes résiduelles normales plus fortes.

Sur la (fig IV.6.a) est représenté la variation de la contrainte interne équivalente de Von Mises dans l'assemblage acier (XC15)/ céramique ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) en fonction de sa taille. Nous remarquons que cette contrainte est d'autant plus importante, à l'interface, que la longueur de cette jonction croît.

## Résultats et analyses

Les résultats obtenues montrent que le niveau et la distribution des contraintes résiduelles équivalentes induites au voisinage très proche de l'interface des liaisons de type métal/céramique dépendent fortement de la taille de cette liaison.

### 2- Effet de la largeur du bimatérial:

Dans cette partie du travail, nous analysons l'effet de la longueur du bimatérial  $XC15/Al_2O_3$  sur l'intensité des contraintes résiduelles engendrées dans l'acier et l'alumine.

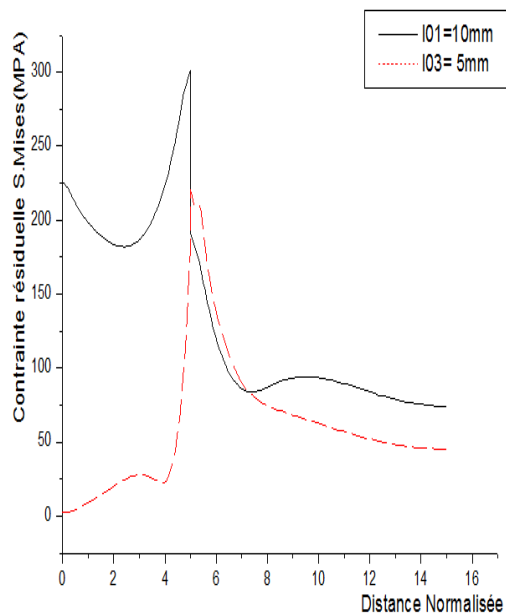
#### Model 3 :

- Métal:

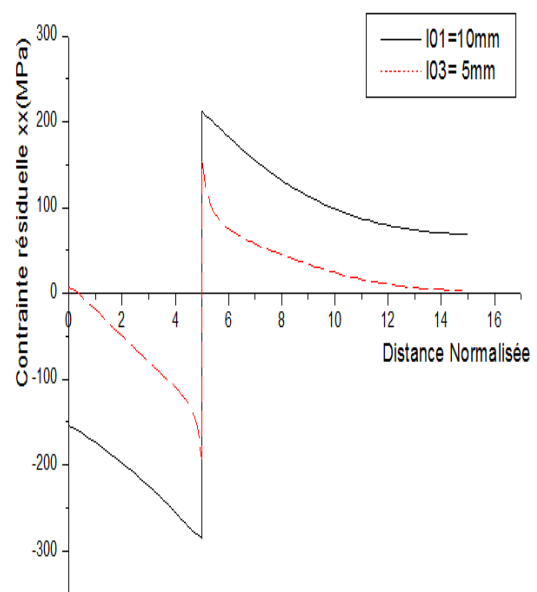
$L = 20$  mm;  $l = 5$  mm et  $e = 10$  mm

- Céramique  $Al_2O_3$ :

$L = 20$  mm;  $l = 5$  mm et  $e = 5$  mm

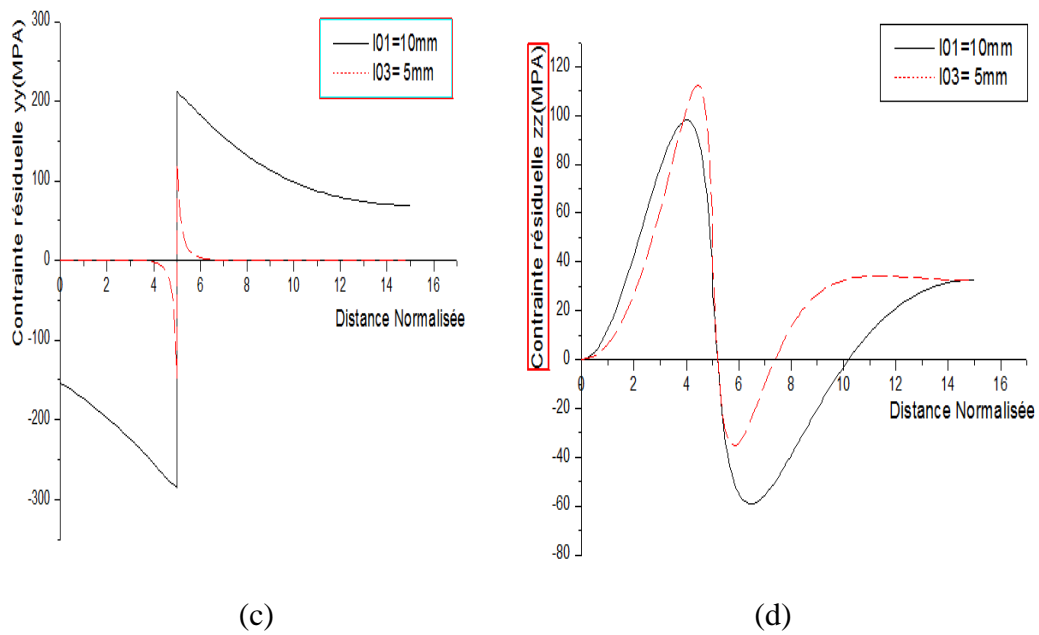


(a)



(b)





**Figure IV.7.a,b,c,d:** Variation des contraintes résiduelles Von Mises,  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  et  $\sigma_{zz}$  en fonction de la taille du bimatériel  $T_E = 650^\circ\text{C}$

Sur la (Fig IV.7.b,c,d) est illustrée la variation des contraintes résiduelles normales  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  et  $\sigma_{zz}$ , résultant de l'élaboration de l'assemblage métal/céramique à haute température, en fonction de la largeur. On notera cependant, qu'une diminution de ce paramètre géométrique. Ce comportement que les déplacements engendrés par les températures sont étroitement liés à la taille de la jonction les liaisons de dimension plus importante induisent de contraintes résiduelles d'origine thermique plus marquées.

L'effet de largeur acier/ alumine sur la contrainte équivalente de Von Mises est illustrée (fig IV.7.a). L'analyse de cette figure montre que ce paramètre géométrique détermine le niveau et la distribution de cette contrainte près du plan de jonction de ces matériaux.

D'une liaison de taille importante résulte des contraintes plus importantes. Ces contraintes fortement localisées peuvent présenter un risque de rupture des assemblages types céramique/métallique.

### 3- Effet de l'épaisseur du bimatériel:

L'effet de l'épaisseur de la céramique sur l'amplitude et la répartition des contraintes résiduelles normales  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$ , et de Von Mises engendrées dans les jonctions acier/alumine est représenté sur les Figures IV.8.a,b,c,d.

### Model 4:

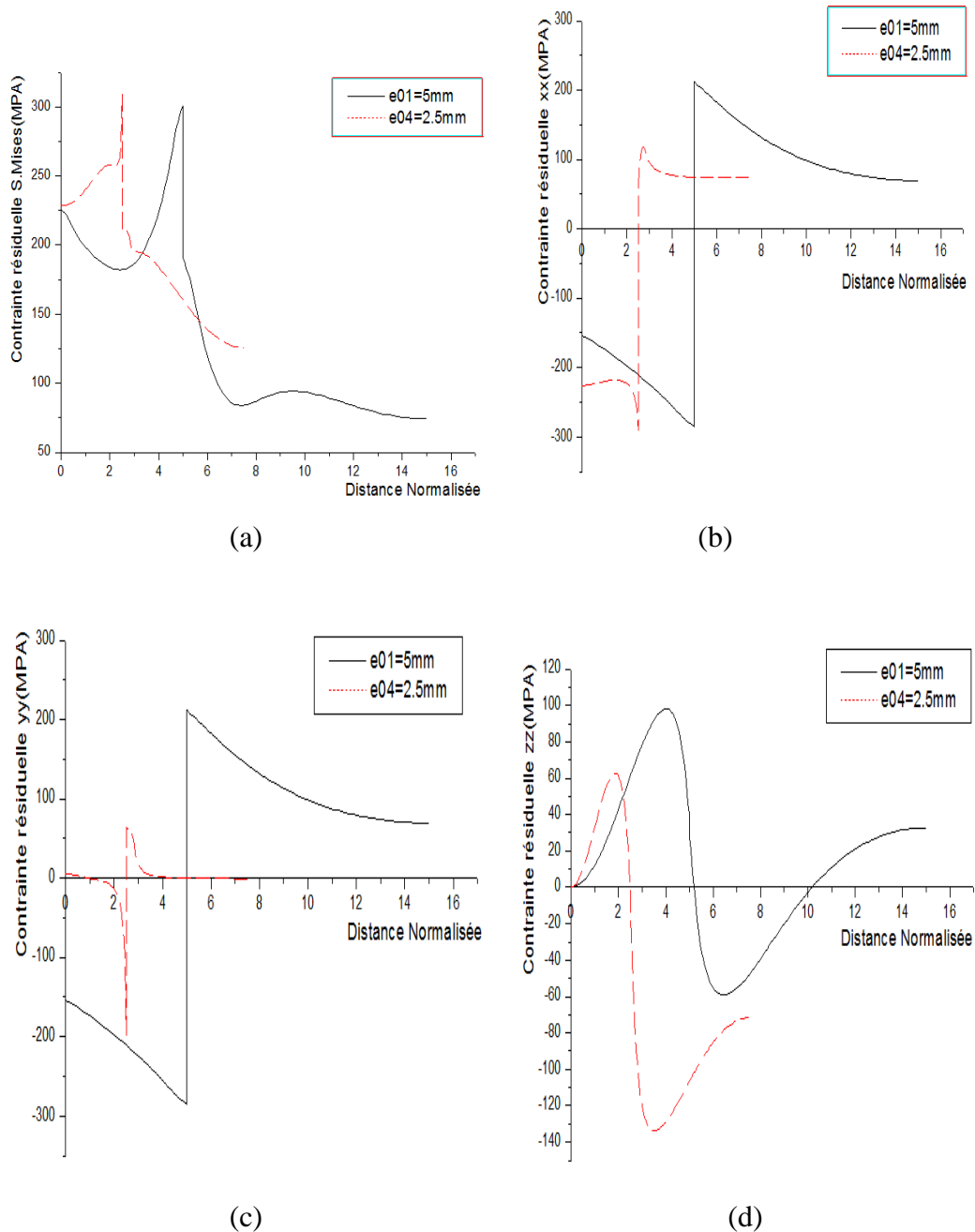
## Résultats et analyses

- **Métal:**

$L = 20$  mm;  $l = 10$  mm et  $e = 5$  mm

- **Céramique  $Al_2O_3$ :**

$L = 20$  mm;  $l = 10$  mm et  $e = 2.5$  mm



**Figure IV.8.a,b,c,d:** Variation des contraintes résiduelles Von Mises,  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  et  $\sigma_{zz}$  en fonction de la taille du bimatériaux  $T_E = 650^\circ C$

### Partie B: Model avec adhésif FM-73:

#### IV.B .1 - propriété mécanique de FM- 73

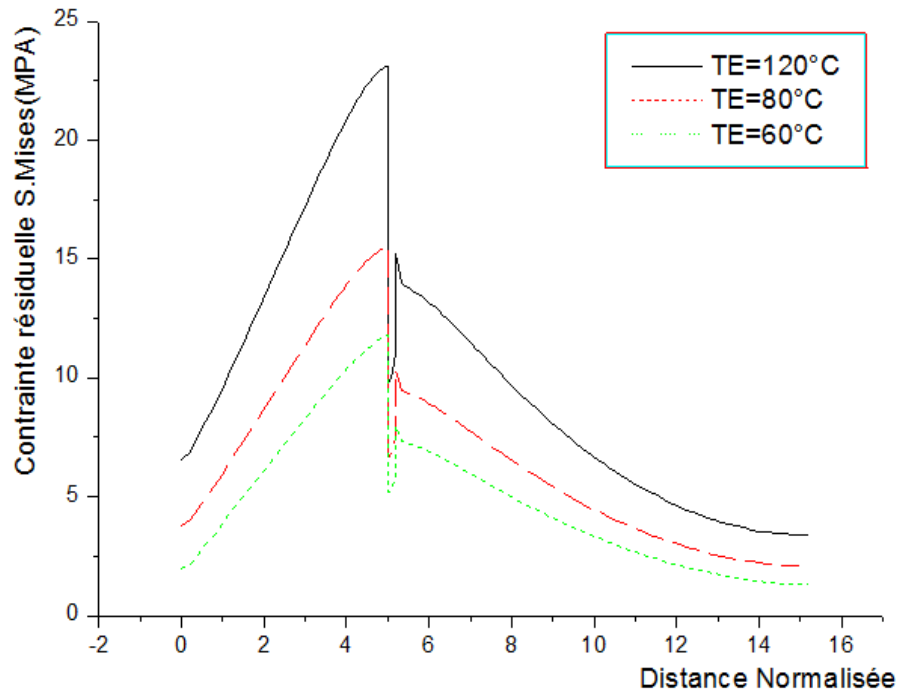
Module de Young E (MPa)	Coefficient de poisson	Coefficient de dilatation thermique $\alpha \cdot 10^{-6} (1/k)$
2550	0.32	5

**Tableau 01:** Propriétés mécanique et physique de l'adhésif

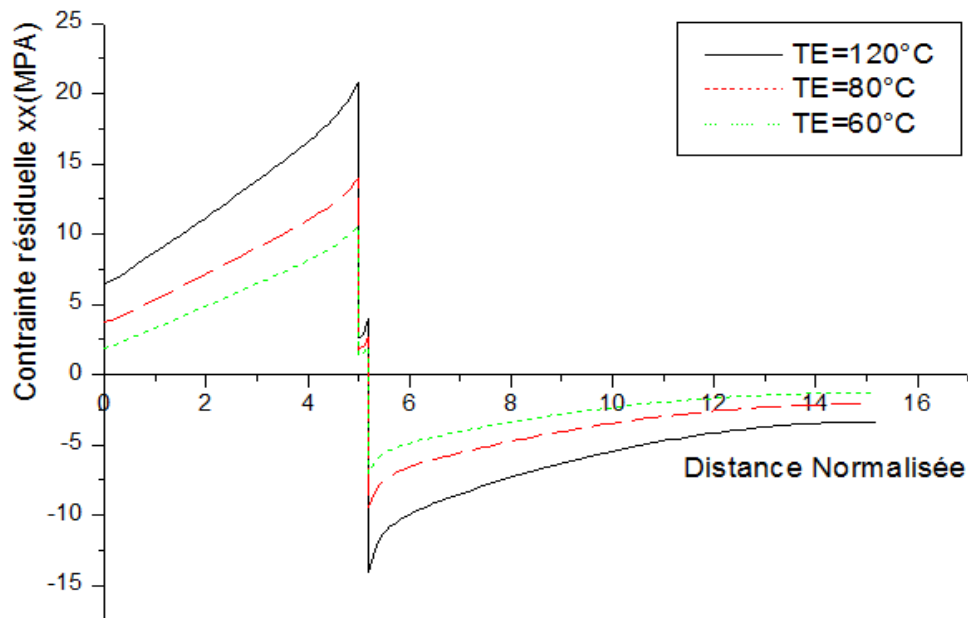
#### IV.B .1.a Assemblage XC15/ $Al_2O_3$ collé à l'aide d'un adhésif:

Dans cette partie, les assemblages acier/alumine ne sont plus élaborés par thermocompression mais par collage, la céramique et l'acier sont conjointement collés par cette adhésif sous forme de colle de type FM-73. Pour ce faire, la surface d'adhésion du substrat en acier est préalablement chauffé à de différentes températures afin d'assurer un bon étalement de la colle sur la surface de l'acier et de minimiser l'énergie superficielle du substrat. Ce phénomène assure une bonne mouillabilité de l'acier par l'adhésif. Les propriétés mécaniques et physiques de cet adhésif sont regroupées sur le (tableau 01).

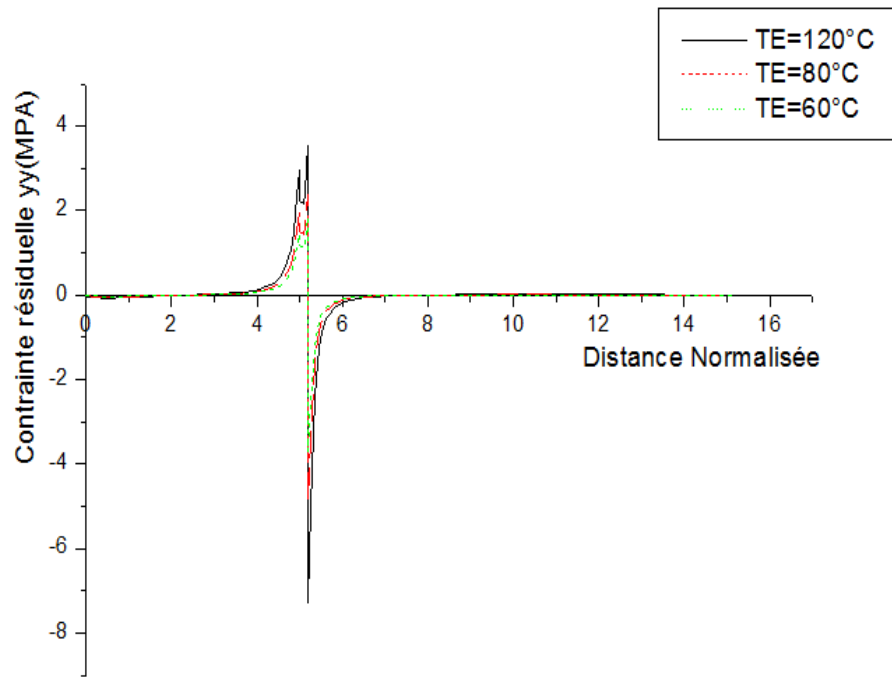
Les résultats obtenus à partir de cette analyse sont représentés sur les Figures IV.9.b.c et d. Ces dernières montrent qu'une augmentation de la température de pré-chauffage de l'acier engendre dans les deux matériaux constituant l'assemblage près de l'interface des contraintes résiduelles normales de forte intensité. Ce ci montre clairement que le pré-chauffage du substrat métallique favorise l'étalement de la colle et par conséquent un bon accrochage mécanique entre les deux protagonistes, il engendre des contraintes résiduelles aux deux interfaces métal adhésif et adhésif céramique. La température de pré-chauffage doit être optimisée afin d'avoir une bonne adhésion mécanique entre deux matériaux à lier et de faibles contraintes résiduelles.



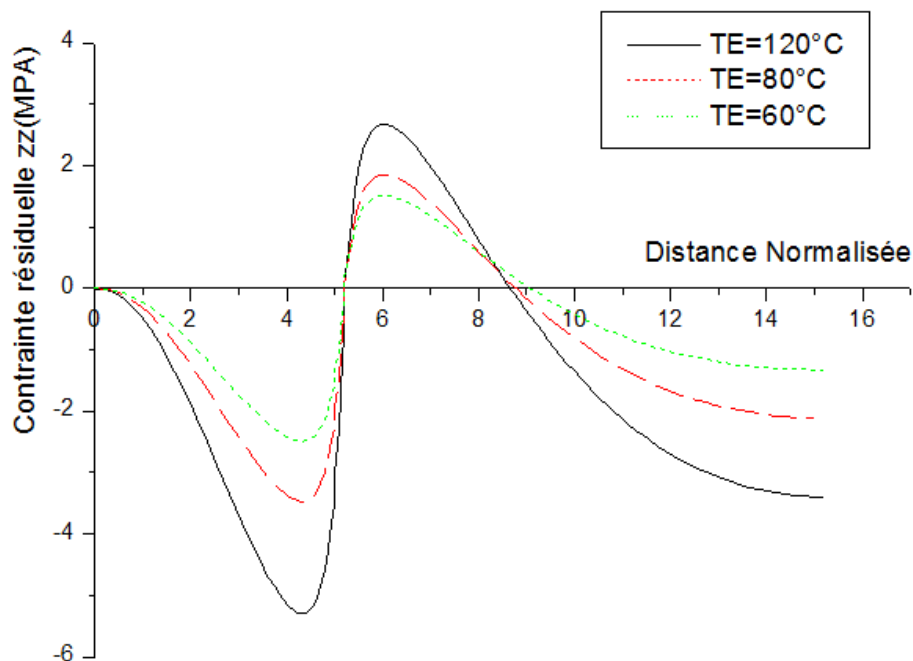
**Figure IV.9.a :** Variation de la contrainte équivalente de Von. Mises pour en fonction de la distance par rapport à l'interface pour la P02 à  $T_E = 60^\circ\text{C}, 80^\circ\text{C}, 120^\circ\text{C}$



**Figure IV.9.b :** Variation des contraintes résiduelles  $\sigma_{xx}$  pour  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FM-73}/\text{acier}$  en fonction de la distance par rapport à l'interface pour la P02 à  $T_E = 60^\circ\text{C}, 80^\circ\text{C}, 120^\circ\text{C}$



**Figure IV.9.c:** Variation des contraintes résiduelles  $\sigma_{yy}$  pour  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FM-73}/\text{acier}$  en fonction de la distance par rapport à l'interface pour la P02 à  $T_E = 60^\circ\text{C}, 80^\circ\text{C}, 120^\circ\text{C}$



**Figure IV.9.d:** Variation des contraintes résiduelles  $\sigma_{zz}$  pour  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FM-73}/\text{acier}$  en fonction de la distance par rapport à l'interface pour la P02 à  $T_E = 60^\circ\text{C}, 80^\circ\text{C}, 120^\circ\text{C}$

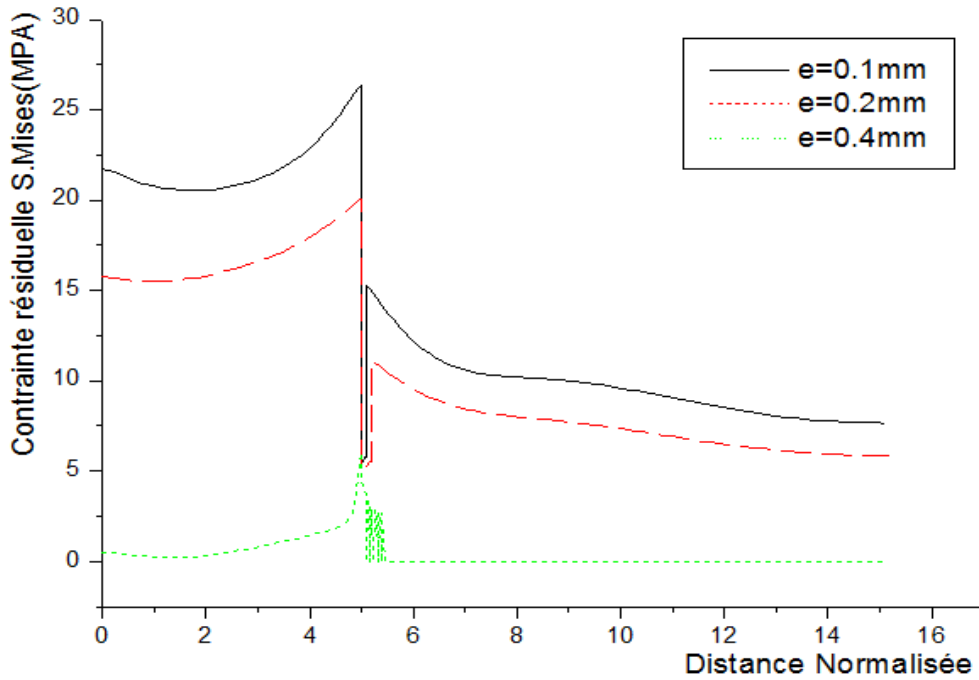
### IV.B .1.b Effet de l'épaisseur de l'adhésif:

La qualité d'adhérence entre la céramique et le métal dépend des paramètres géométriques de l'adhésif et tout particulièrement de son épaisseur. L'énergie d'adhésion interfaciale est d'autant plus importante que l'épaisseur de l'adhésif est faible. Le collage à des températures relativement élevées favorise cette énergie. Nous avons jugé l'influence de ce paramètre sur le niveau des contraintes internes induites lors du chauffage du substrat métallique. Les résultats ainsi obtenus sont illustrés sur les Figures IV.10.a,b,c et d. Nous remarquons qu'une réduction de l'épaisseur de l'adhésif conduit à une augmentation des contraintes résiduelles normales  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  et  $\sigma_{zz}$  comme le montrent les figures IV,a,b,etc. Les matériaux conjointement liés à l'aide d'un adhésif épais résultent de faibles intensités de contraintes. Ces assemblages typés céramique-métal, élaborés par collage à des températures relativement élevées, induisent moins de contraintes internes au voisinage de leur interface. Si le matériau assurant l'adhésion est de plus en plus épais.

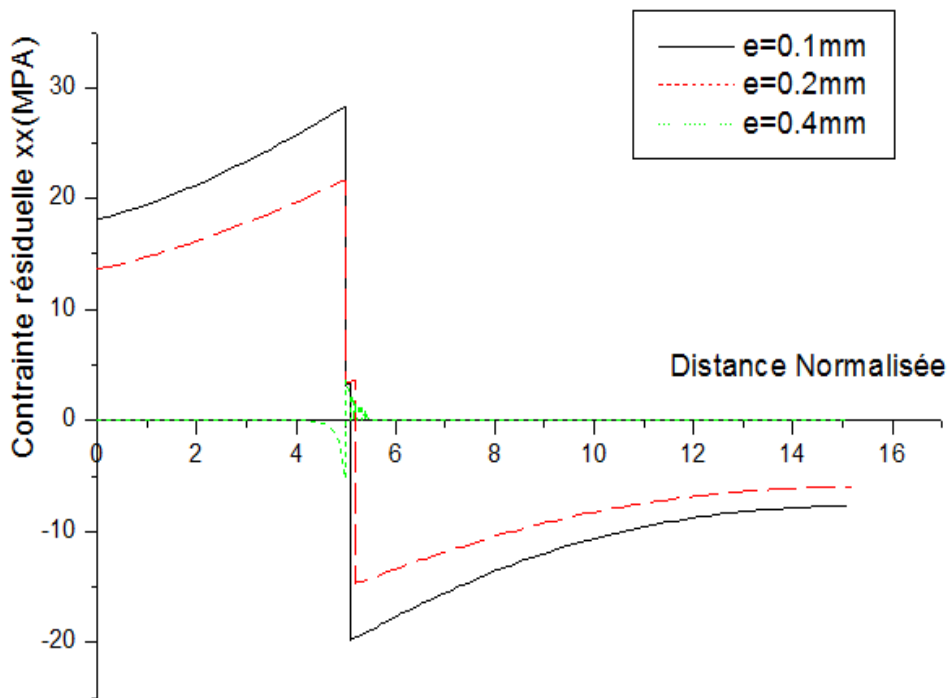
Sur la figure IV.10 est représentée la variation de la contrainte interne équivalente de Von Mises engendrée dans l'acier et l'alumine en fonction de l'épaisseur de la colle assurant leur liaison. L'analyse de cette figure montre que les liaisons réalisées à l'aide d'adhésifs minces induisent des contraintes résiduelles, dans ces deux constituants près de la zone de jonction, plus intenses que le niveau de la contrainte croix avec l'accroissement de ce paramètre géométrique.

Les résultats obtenus dans notre étude montrent que les matériaux type céramique-métal assemblés à l'aide de colles épaisses engendrent moins de contraintes résiduelles.

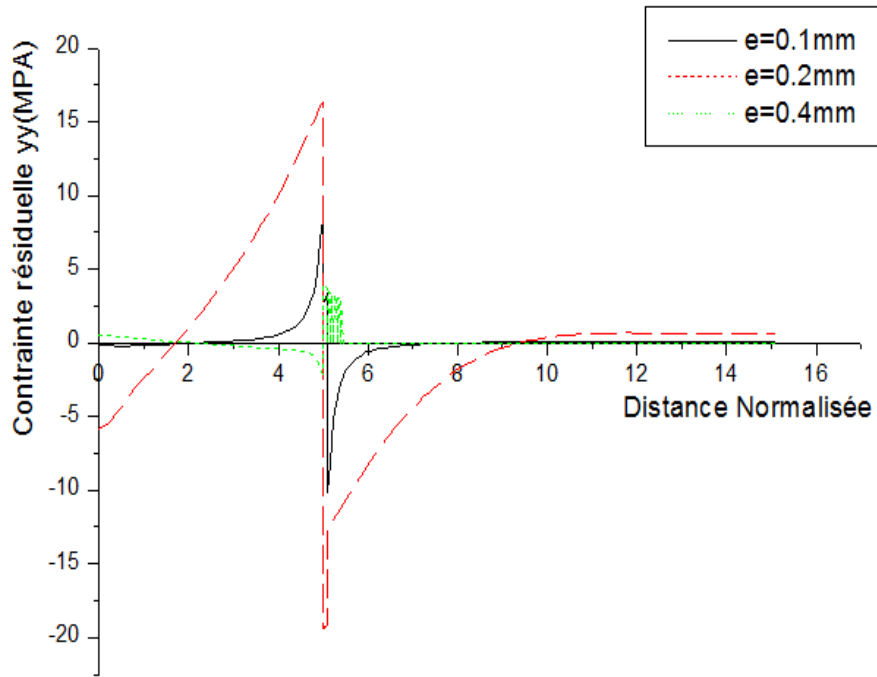
Rappelons que d'une telle épaisseur résulte une faible adhérence mécanique et donc une faible énergie d'adhésion. Autrement dit, les efforts de mise en service peuvent conduire au décollement soit par rupture interfaciale ou par rupture de joint adhésif.



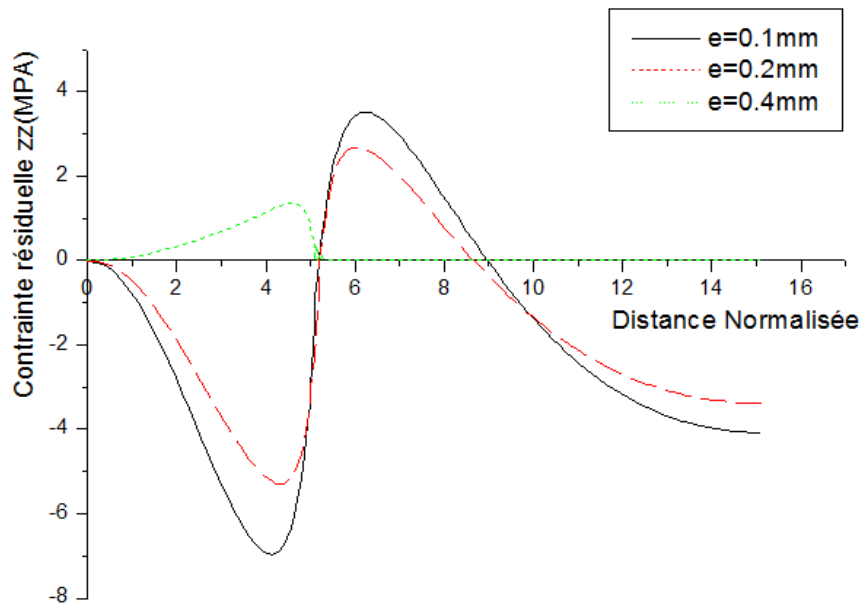
**Figure IV.10.a :** variation des contraintes résiduelles équivalente S.Mises en fonction de l'épaisseur à  $T_E = 120^\circ\text{C}$



**Figure IV.10.b:** variation des contraintes résiduelles  $\sigma_{xx}$  en fonction de l'épaisseur à  $T_E = 120^\circ$

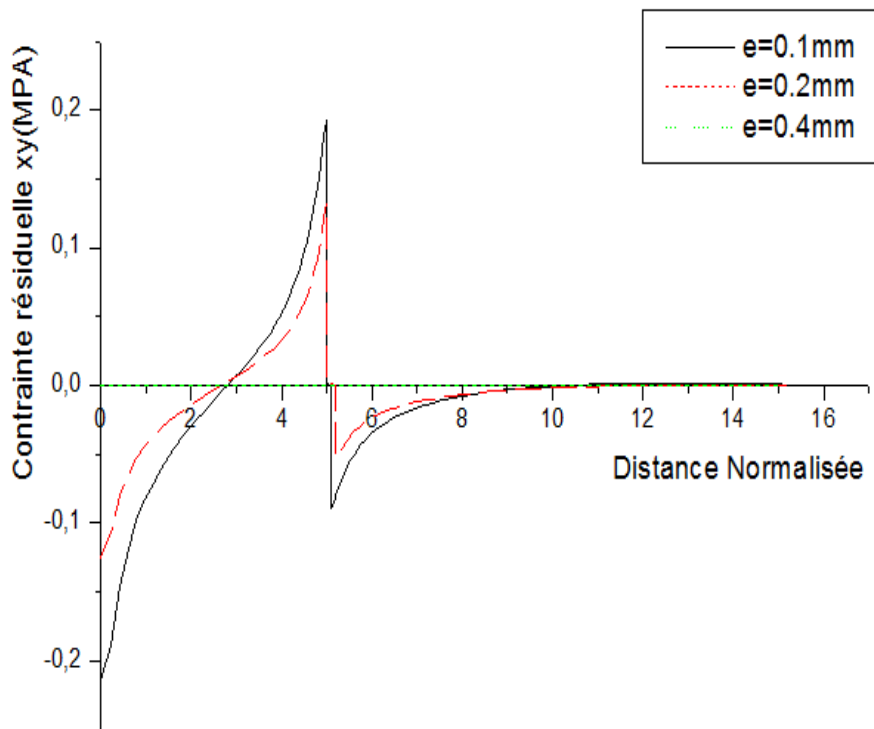


**Figure IV.10.c :** variation des contraintes résiduelles  $\sigma_{yy}$  en fonction de l'épaisseur à  $T_E = 120^\circ\text{C}$



**Figure IV.10.d :** variation des contraintes résiduelles  $\sigma_{zz}$  en fonction de l'épaisseur à  $T_E = 120^\circ\text{C}$





**Figure IV.10.e** : variation des contraintes résiduelles  $\sigma_{xy}$  en fonction de l'épaisseur à  $T_E = 120^\circ\text{C}$

### IV.B .2 A propos des contraintes résiduelles dans l'assemblages $\text{Al}_2\text{O}_3$ / joint métallique/ XC15

Dans ce genre d'assemblage, il est très difficile de séparer l'effet de la réaction chimique de celui des contraintes résiduelles. Ce paragraphe est consacré à la compréhension des mécanismes d'accommodation des contraintes résiduelles d'origine thermique qui sont susceptibles de conduire à l'endommagement du matériau qui sont : la plasticité et la fissuration.

### IV.B.3 - Calcul des contraintes résiduelles d'origine thermique:

Les joints de nickel utilisés dans l'assemblage SiC /Ni/ XC15 et formés, ayant un coefficient de dilatation  $\alpha_1$  supérieure à celui de SiC.

Leurs dimensions à une température T au cours du refroidissement sera inférieure à celle de SiC. Le joint va donc se trouver en tension pour satisfaire la continuité des déplacements à l'interface. Le SiC se trouve quant à lui en compression. Nous allons calculer dans les deux paragraphes suivants, la déformation induite par le différentiel de coefficient de dilatation thermique entre SiC et le joint métallique (déformation thermique) et par suite les contraintes thermiques qui en résultent.

### IV.B.4 - Déformation thermique:

Dans le cas d'un matériau isotrope où la dilatation thermique est la même dans toutes les directions, les allongements entre la température  $T_a$  d'assemblage et l'état non contraint à la température  $T$  sont :

$$\text{Pour le joint : } \mu_1 = l_0 \alpha_1 (T - T_a)$$

$$\text{pour le SiC : } \mu_2 = l_0 \alpha_2 (T - T_a)$$

La différence d'allongement entre SiC et le joint sera alors :

$$\mu = \mu_1 - \mu_2 = l_0 (\alpha_1 - \alpha_2) (T_a - T)$$

Si le joint est contraint à rester à la même longueur que SiC, alors, la déformation thermique imposée au joint sera :

$$\mu = \frac{\mu_1 - \mu_2}{l_0} = (\alpha_1 - \alpha_2) (T_a - T) = \Delta \alpha (T_a - T)$$

### IV.B.5. Contraintes thermiques dans le joint :

On peut supposer que la déformation thermique est accommodée uniquement dans le joint.

On peut supposer aussi que :

1-La relation entre contraintes et déformations est donnée par la loi de l'élasticité linéaire

(Loi de Hooke)

2-La déformation thermique induit une contrainte plane selon le plan (Oxy).

La contrainte thermique dans le joint métallique qui peuvent se former entre le SiC et le joint métallique est donc :

$$\sigma_T = \frac{E \varepsilon_T}{(1 - \nu)}$$
$$\sigma_T(T) = \frac{E \Delta \alpha}{1 - \nu} (T_a - T) = \frac{E \Delta \alpha T_a}{1 - \nu} \left(1 - \frac{T}{T_a}\right)$$

Où  $E$  est le module de Young du joint métallique ou du siliciure,  $\nu$  est le coefficient de Poisson et  $T_a$  la température d'assemblage.

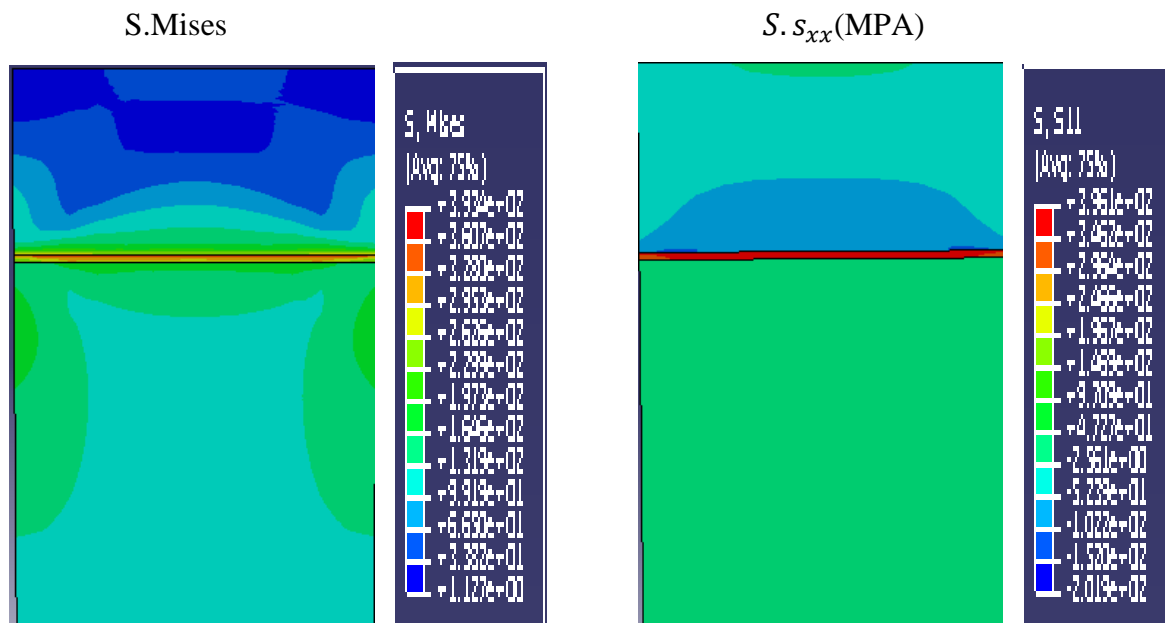
### IV.B.6 Effet du joint métallique:

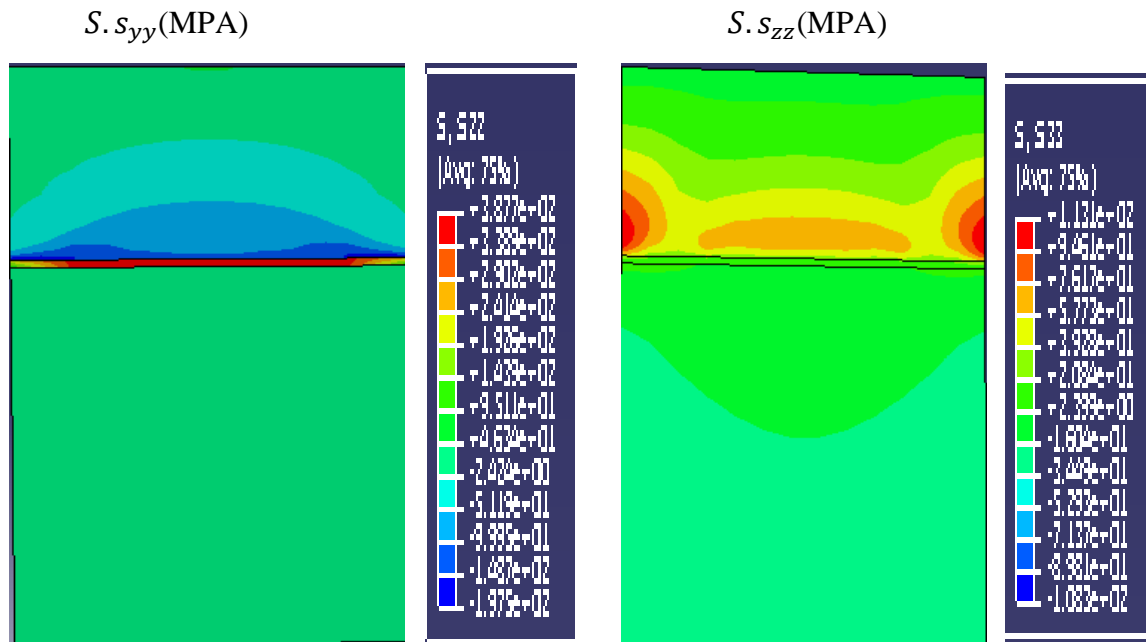
Les jonctions céramo-métalliques sont obtenue par interposition de joints métalliques entre la céramique et le métal. Dans ce cas, les deux matériaux sont conjointement liés entre eux par l'intermédiaire d'un joint métallique. La technique consiste à interposer un joint entre les deux matériaux à assembler. La jonction est donc assurée sous l'effet simultané de la température et de la pression. Les liaisons obtenues sont donc composées de trois matériaux différents. Leur

## Résultats et analyses

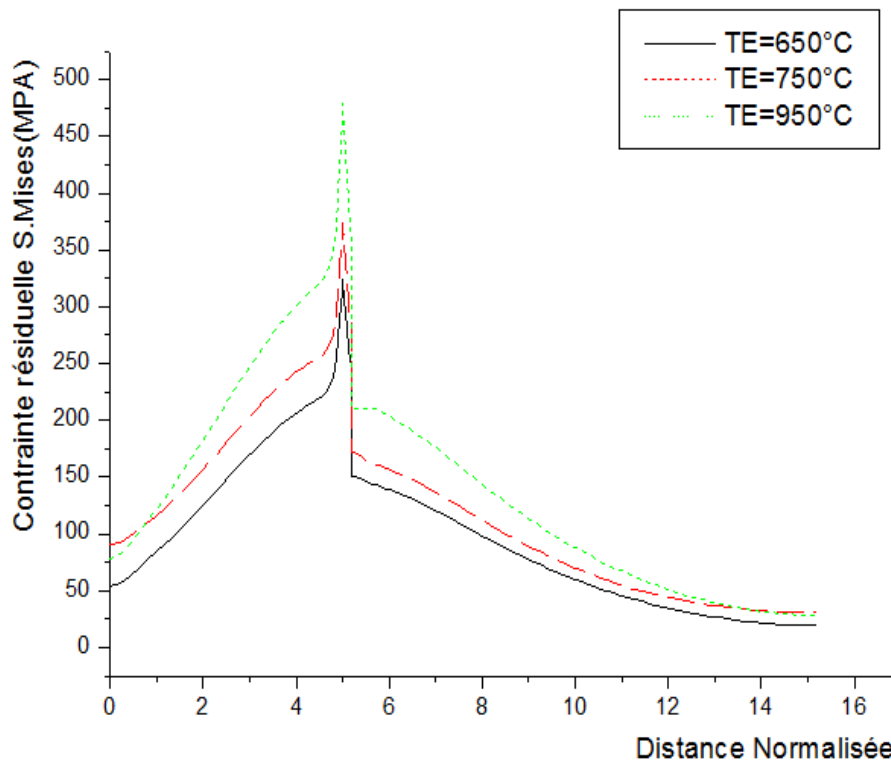
élaboration à une température élevée engendre dans ces matériaux, des contraintes internes. L'objectif de cette étude est d'analyser numériquement par la méthode des éléments finis l'intensité des contraintes d'origine thermique dans les constituants de l'assemblage résultant du processus d'élaboration. L'amplitude et la répartition des contraintes internes normales  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  et  $\sigma_{zz}$  et de Von Mises sont représentées sur la (Fig IV.10). Nous remarquons, que comparativement aux contraintes développées dans une liaison réalisée sans joint de Nickel les contraintes résiduelles sont plus intenses dans la céramique. Elles sont fortement situées près de l'interface Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Rappelons que dans ce cas, l'assemblage présente deux interfaces métal-joint métallique et joint métallique- céramique. Elles sont d'un niveau plus faible à l'interface métal-métal (Ni/XC15).

### IV.B.6.a Cas du couple Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ni/XC15 :

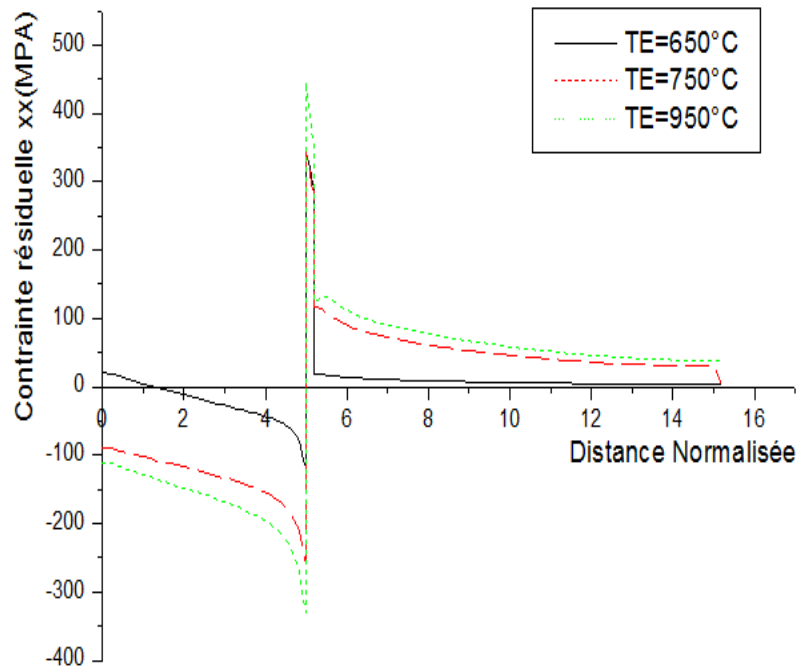




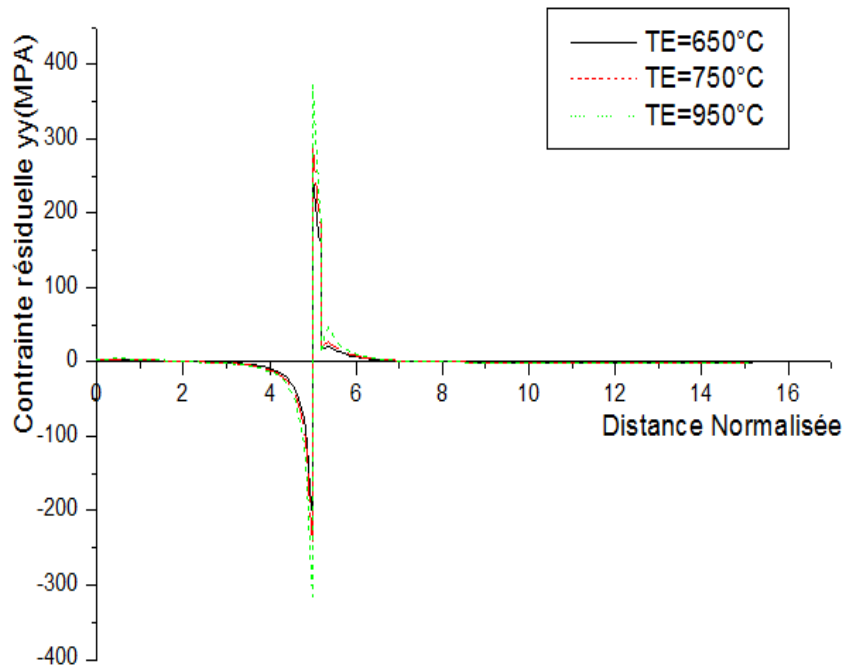
**Figure IV.10:** Variation des contraintes résiduelles S.Mises,  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$  pour le couple  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}/\text{XC15}$ .



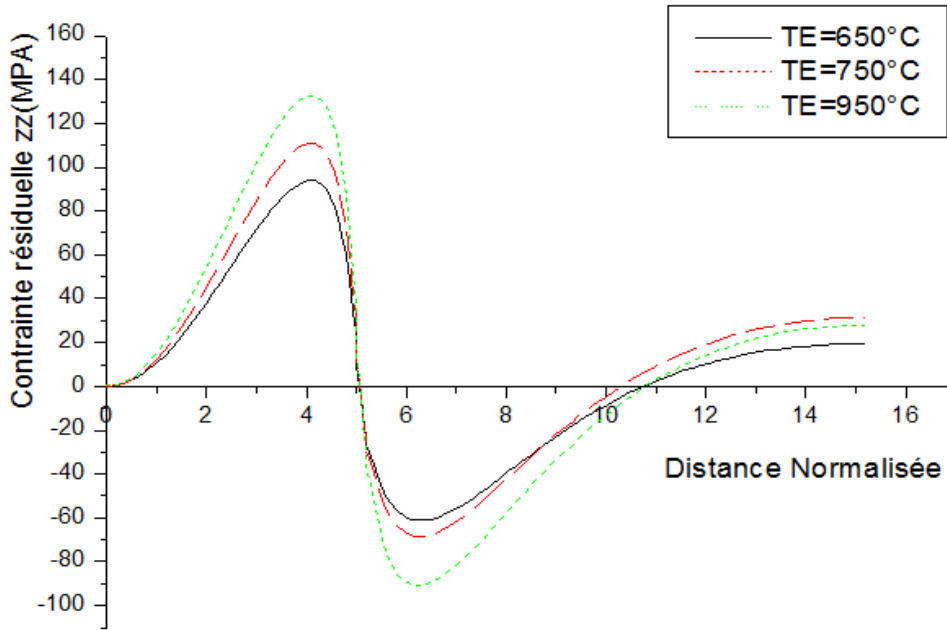
**Figure IV.11.a:** Variation des contraintes résiduelles S. Mises pour  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}/\text{XC15}$  en fonction de la distance par rapport à l'interface pour la position P02 à  $T_E = 650^\circ\text{C}, 750^\circ\text{C}, 950^\circ\text{C}$



**Figure IV.11.b:** Variation des contraintes résiduelles  $\sigma_{xx}$  pour  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}/\text{XC15}$  en fonction de la distance par rapport à l'interface pour la position P02 à  $T_E = 6500^\circ\text{C}, 750^\circ\text{C}, 950^\circ\text{C}$



**Figure IV.11.c:** Variation des contraintes résiduelles  $\sigma_{yy}$  pour  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}/\text{XC15}$  en fonction de la distance par rapport à l'interface pour la position P02 à  $T_E = 6500^\circ\text{C}, 750^\circ\text{C}, 950^\circ\text{C}$

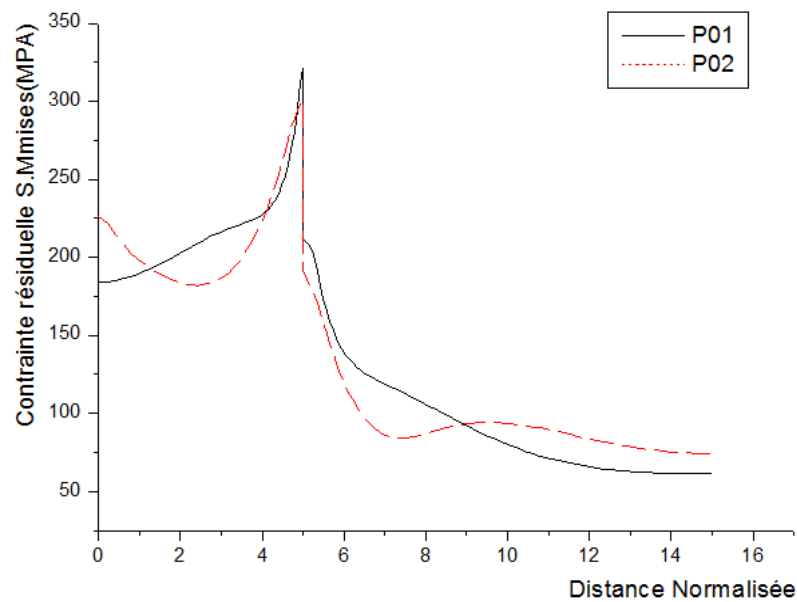


**Figure IV.11.d:** Variation des contraintes résiduelles  $\sigma_{zz}$  pour  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}/\text{XC15}$  en fonction de la distance par rapport à l'interface pour la position P02 à  $T_E = 650^\circ\text{C}$ ,  $750^\circ\text{C}$ ,  $950^\circ$

Nous avons représenté sur les figures IV.11,b.c.d le niveau des contraintes résiduelles dans les jonction  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{acier}$  liés conjointement par un joint en Nickel à des températures élevées. Nous remarquons comparativement aux mêmes assemblages élaborés sans joint métallique, les jonctions obtenues à l'aide de joint présentent un niveau de contrainte interne plus faible dans le métal et plus fort dans la céramique et ce quelque soit l'état de ces contraintes.

L'effet de la présence d'un joint métallique interposé entre l'alumine et l'acier sur l'intensité de la contrainte interne de Von Mises induite dans ces deux matériaux est représenté sur la (Fig IV.11.d). La contrainte équivalente résultant d'un tel assemblage est plus important que celle d'une liaison réalisée sans joint.

Nous notons ce pendant, que les contraintes résiduelles résultant d'un assemblage alumine/acier obtenue par interposition d'un joint en acier XC15 présent le même niveau et la même distribution que celles engendrées par des mêmes couples élaborés sont joint métallique. Ce ci est du pratiquement aux mêmes propriétés mécaniques de ce joint et de l'acier liés à la céramique figure. Acier/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ .



**Figure IV.3.a :** Variation des contraintes résiduelles S.Mises induite dans le bimatériau lors de son élaboration à  $T_E = 650^\circ\text{C}$  en fonction de la distance par rapport à l'interface.

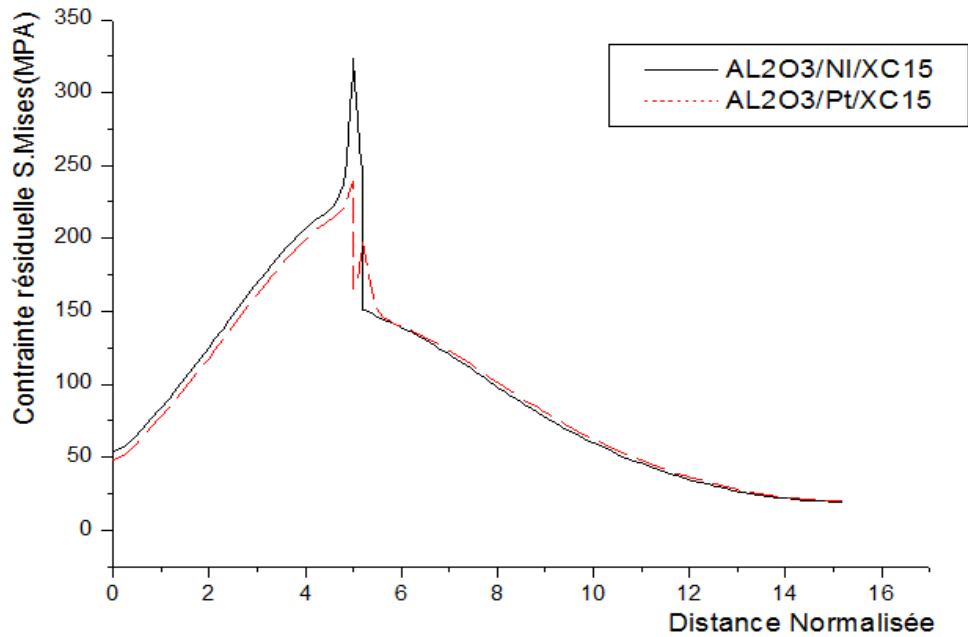
### IV.B.7 La nature du joint métallique:

Les assemblages métal céramiques ont été élaborés par l'interposition de joint métallique entre ces deux matériaux. Le rôle de ce joint est d'assurer la jonction, sous l'effet simultané de la température et de la pression, entre le corps en acier et la pastille de coupe en céramique. Nous avons opté, en fonction de leur propriété physique, pour trios métalliques; acier XC15; Nickel et platine.

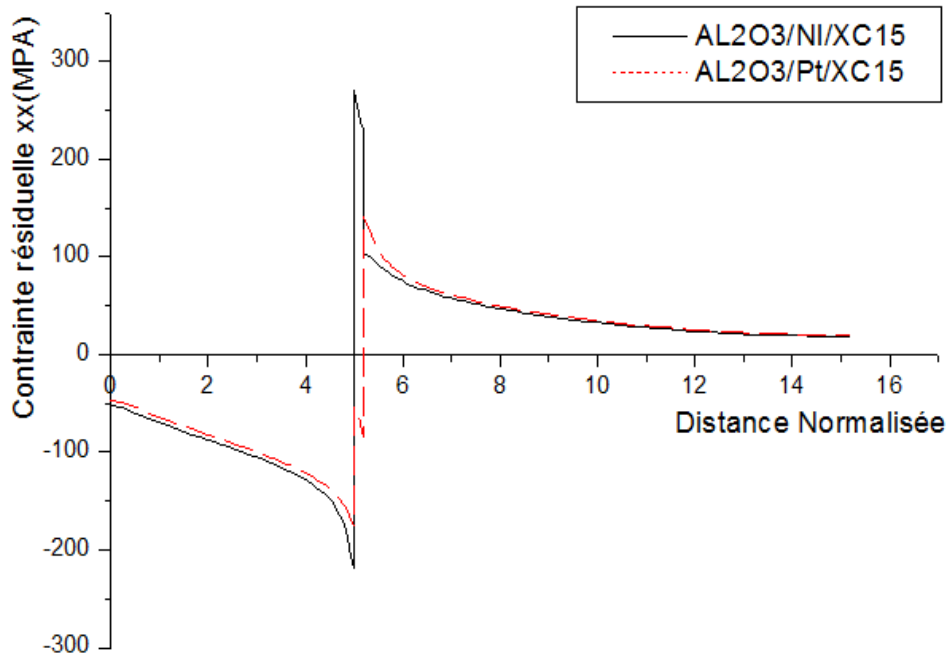
Nous avons analysé numériquement par la méthode des éléments finis les contraintes internes développées dans ce matériau au voisinage de leur interface. Les résultats ainsi obtenues sont représentés sur les (Fig IV.12.a.b.c et d). Les (Fig IV.12.a.b.c et d) illustre la variation des contraintes résiduelles normales  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  et  $\sigma_{zz}$  en fonction de la nature du joint métallique. Nous remarquons que les assemblages réalisés à l'aide de joint en platine engendrent des contraintes plus faibles et ce quelque soit l'état des contraintes. L'élaboration des liaisons alumine /acier à l'aide de tels joint conduisent à une forte relaxation des contraintes dans les matériaux conjointement liés et tout particulièrement dans l'alumine (Fig IV.12.a). Cette figure illustre la variation de la contrainte interne équivalente de Von mises induite dans l'alumine et l'acier XC15 assemblé par un joint métallique. Elle montre que ces deux matériaux liés par un joint en platine engendrent des contraintes résiduelles plus faibles à

## Résultats et analyses

l'interface. Dans ce cas l'alumine est très faiblement mécaniquement sollicitée par les contraintes développées thermiquement.

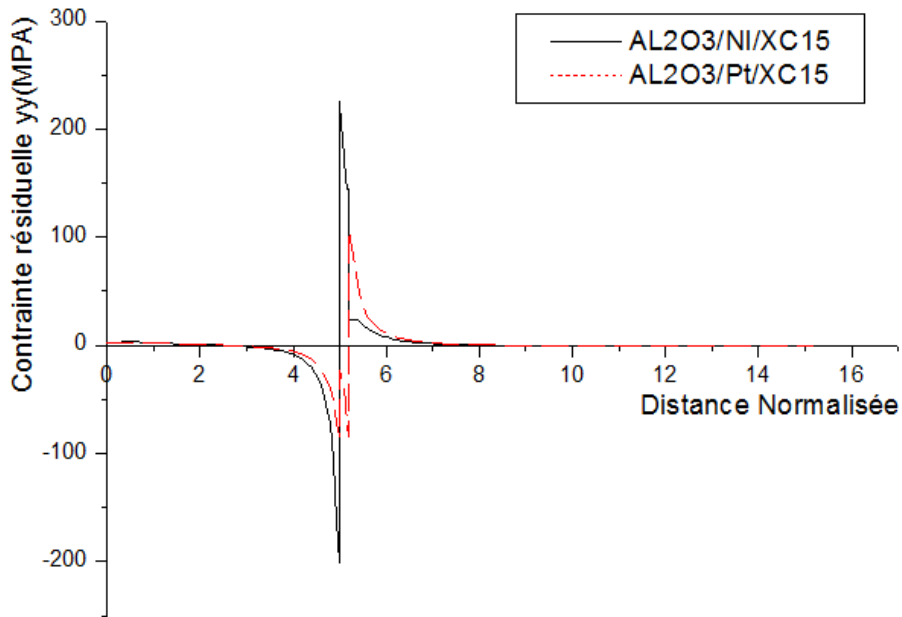


**Figure IV.12.a:** Variation des contraintes résiduelles S.Mises induite dans le bimatériau lors de son élaboration à  $T_E = 650^\circ\text{C}$  en fonction de la distance par rapport à l'interface

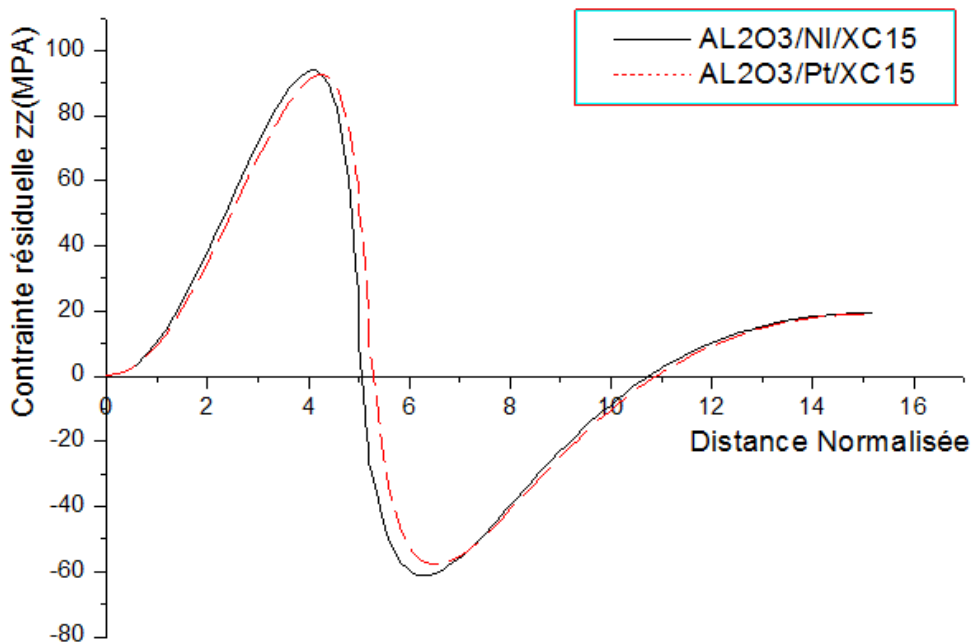


**Figure IV.12.b:** Variation des contraintes résiduelles  $\sigma_{xx}$  induite dans le bimatériau lors de son élaboration à  $T_E = 650^\circ\text{C}$  en fonction de la distance par rapport à l'interface





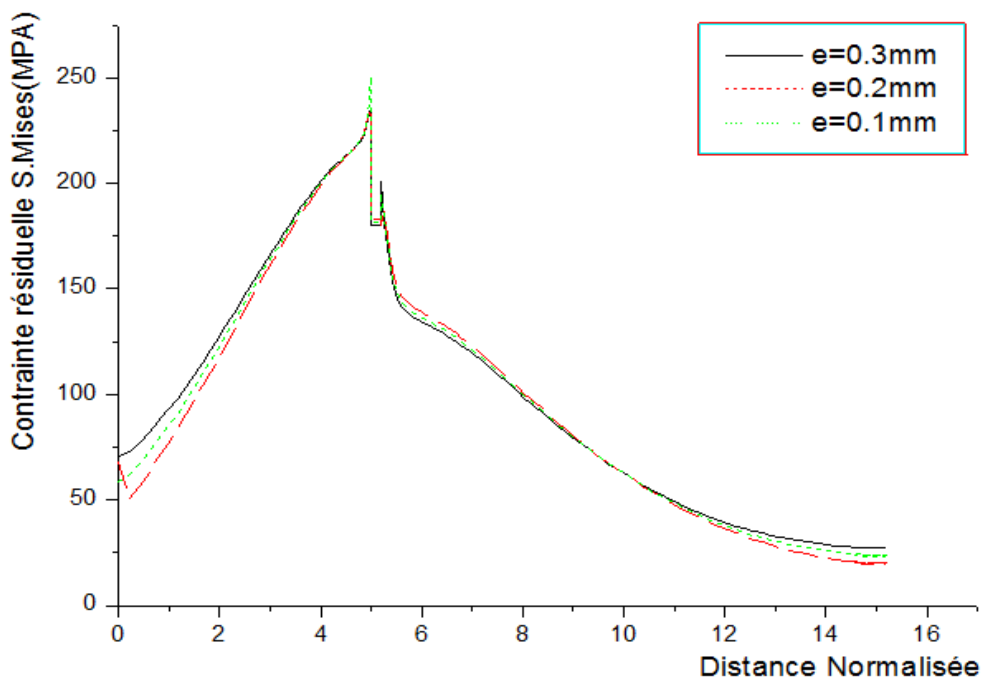
**Figure IV.12.c:** Variation des contraintes résiduelles  $\sigma_{yy}$  induite dans le bimatériau lors de son élaboration à  $T_E = 650^\circ\text{C}$  en fonction de la distance par rapport à l'interface.



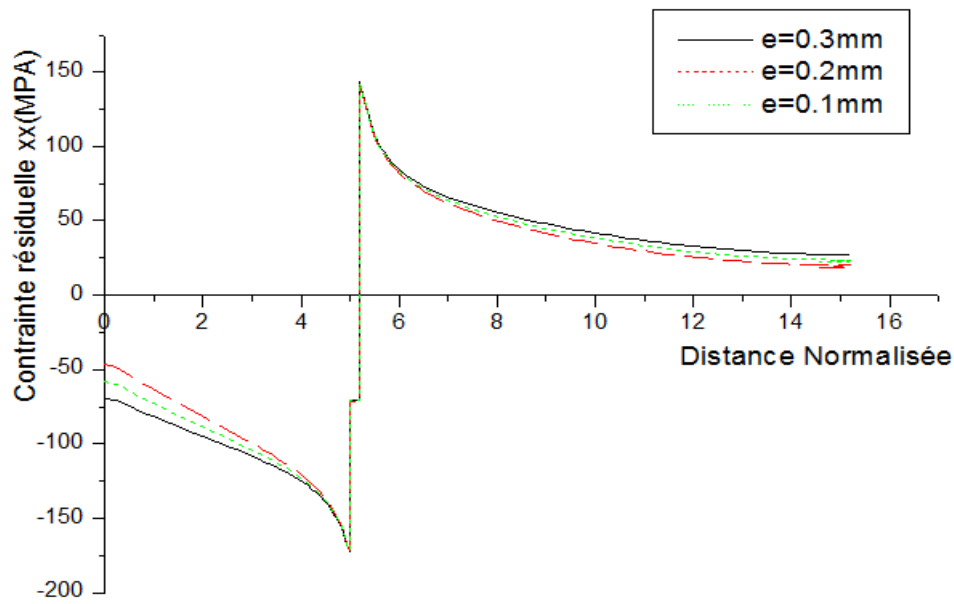
**Figure IV.12.d:** Variation des contraintes résiduelles  $\sigma_{zz}$  induite dans le bimatériau lors de son élaboration à  $T_E = 650^\circ\text{C}$  en fonction de la distance par rapport à l'interface

### IV.B.8 Effet de la taille du joint :

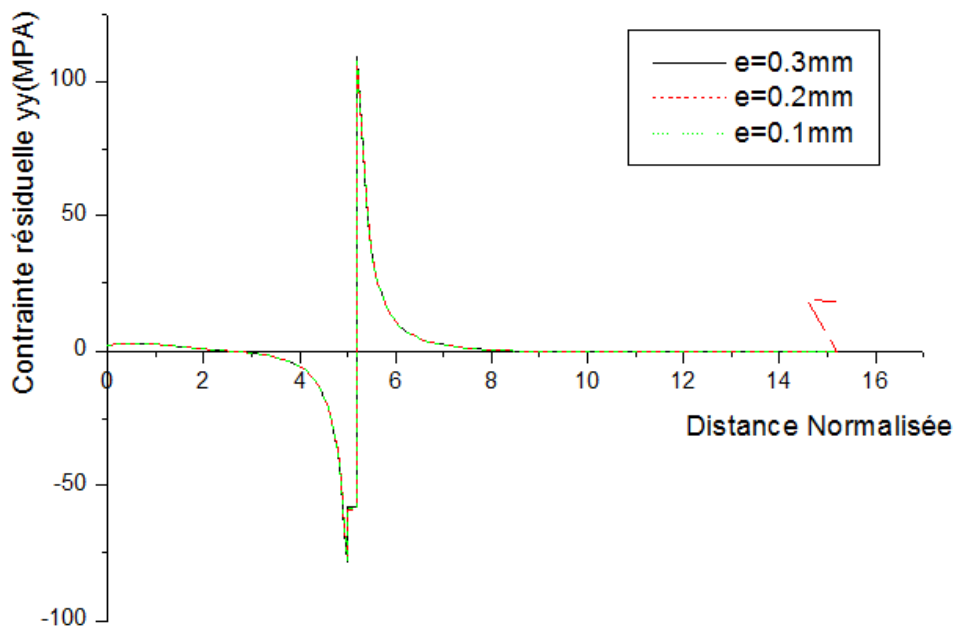
Nous avons étudié l'effet de l'épaisseur du joint métallique d'interposition sur le niveau des contraintes résiduelles induites thermiquement dans l'alumine et l'acier XC15 liés conjointement par un joint en platine. Les résultats obtenus sont représentés sur les (fig IV.13.a.b et c). Ces dernières montrent qu'une réduction de l'épaisseur de ce joint conduit à une augmentation peu sensible des contraintes résiduelles normales  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  et  $\sigma_{zz}$  dans ces deux composantes de l'assemblage près de l'interface ce comportement également montré sur la figure IV.5. Cette figure illustre la variation de la contrainte résiduelle équivalente de Von Mises en fonction de l'épaisseur du joint métallique. Nous observons une légère augmentation de cette contrainte avec la réduction de l'épaisseur de ce joint. Autrement dit, les jonctions élaborées à l'aide de joints minces induisent des contraintes résiduelles plus importantes.



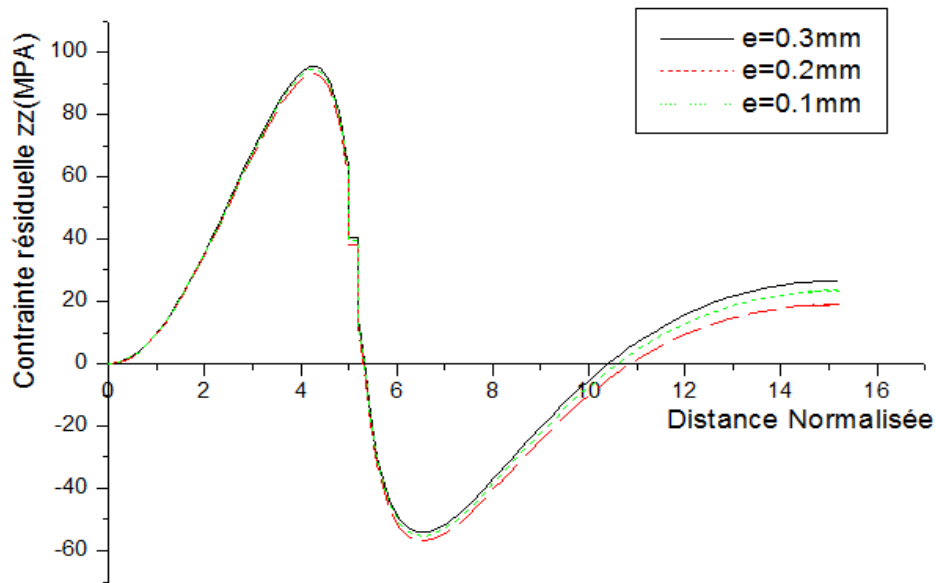
**Figure IV.13.a :** : Variation des contraintes résiduelles de S.Mises induite dans le bimatériel lors de son élaboration à  $T_E = 650^\circ C$  en fonction de l'épaisseur du joint métallique.



**Figure IV.13.b :** Variation des contraintes résiduelles de  $\sigma_{xx}$  induite dans le bimatériau lors de son élaboration à  $T_E = 650^\circ\text{C}$  en fonction de l'épaisseur du joint métallique.

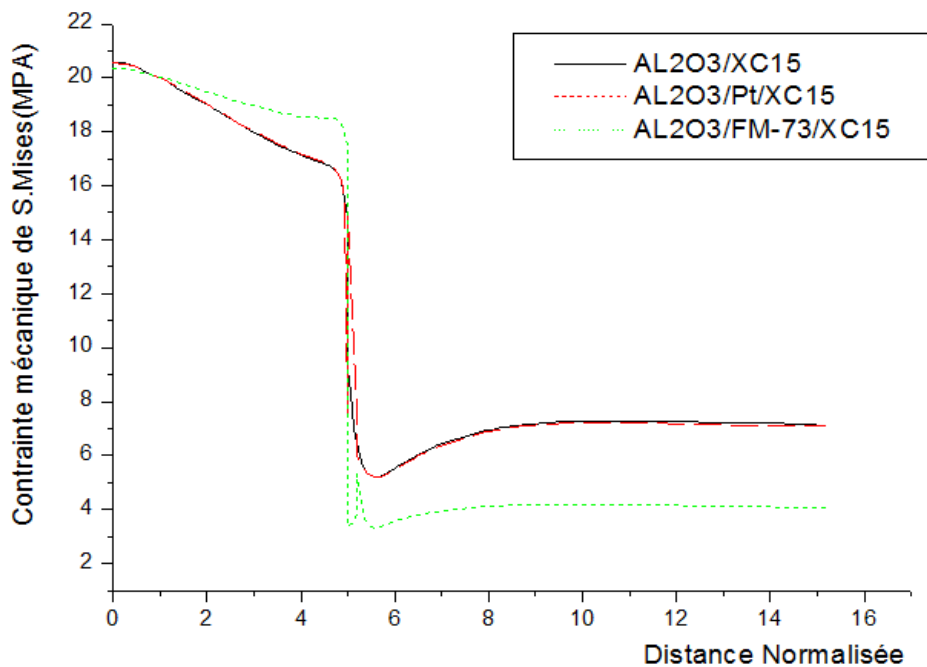


**Figure IV.13.c :** Variation des contraintes résiduelles de  $\sigma_{yy}$  induite dans le bimatériau lors de son élaboration à  $T_E = 650^\circ\text{C}$  en fonction de l'épaisseur du joint métallique.



**Figure IV.13.d :** Variation des contraintes résiduelles de  $\sigma_{zz}$  induite dans le bimatériau lors de son élaboration à  $T_E = 650^\circ\text{C}$  en fonction de l'épaisseur du joint métallique.

### IV.B.9 Chargement mécanique à 20 MPa:



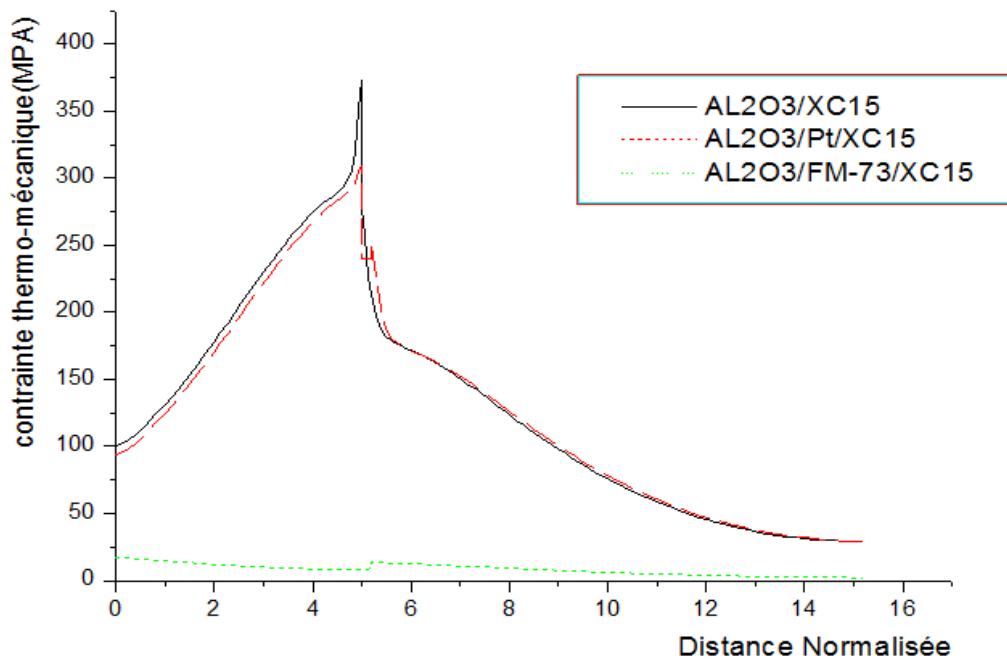
**Figure IV.14 :** Variation des contraintes de mise en service de ces couples sur l'alumine/acierXC15 assemblés sans joint, avec joint métallique à l'aide d'une colle.

### **IV.B.10 Chargement thermomécanique:**

Nous avons analysé l'effet de contrainte de mise en service de ces couples sur l'alumine/acierXC15 assemblés sans joint, avec joint métallique à l'aide d'une colle. L'objectif de cette étude est d'analyser le comportement de ces assemblages lors de leur mise en service. Sur la (fig IV.15), et représenté la variation de la contrainte équivalente de Von Mises induites thermomécaniquement dans les assemblages alumine/acier XC15. Le niveau de ces contraintes est celui des contraintes résiduelles additionnées aux contraintes de mise en service. Les résultats illustrés sur cette figure montrent que le changement thermomécanique engendre des contraintes plus importantes.

L'analyse précédente a montré que l'élaboration des bimatériaux à des températures relativement élevée engendre des contraintes résiduelles dans les deux constituants de ce matériau au voisinage proche de leur interface. Nous avons montré que la distribution de ces contraintes dépend non seulement des propriétés physiques des deux composantes à assemblées, mais également de leurs caractéristiques géométriques et de la température de leur élaboration et de la nature du joint de liaison. Ajouter aux contraintes de mis en service, ces contraintes internes peuvent constituer un risque de rupture en fonction de la résistance de l'interface, cohésive ou adhésive.

Dans ce qui sent nous analysons numériquement par la méthode des éléments finis, l'effet des sollicitations de mise en service sur le comportement mécanique des assemblages élaborés à des températures élevées. Les résultats obtenus sont illustrés sur la (fig IV.15). Cette dernière montre la variation des contraintes induites thermomécaniquement en fonction de la distance par rapport à l'interface. Nous remarquons, que comparativement aux contraintes engendrées thermiquement, le chargement combiné mécanique plus thermique conduit à un niveau des contraintes plus important. Rappelons, que dans ce cas, l'intensité des efforts mécaniques appliqués à l'assemblage est relativement faible. Une amplification de cet effort peut être fatal pour la stabilité du bimatériau.

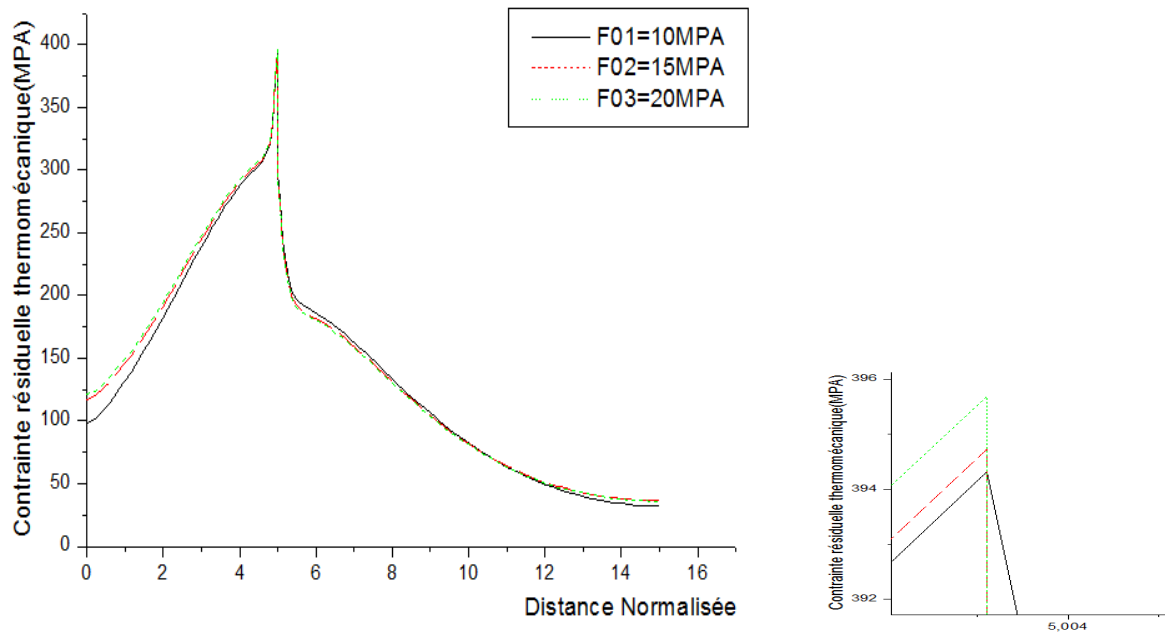


**Figure IV.15 :** Variation des contraintes de mise en service de ces couples sur l'alumine/acierXC15 assemblés sans joint, avec joint métallique à l'aide d'une colle.

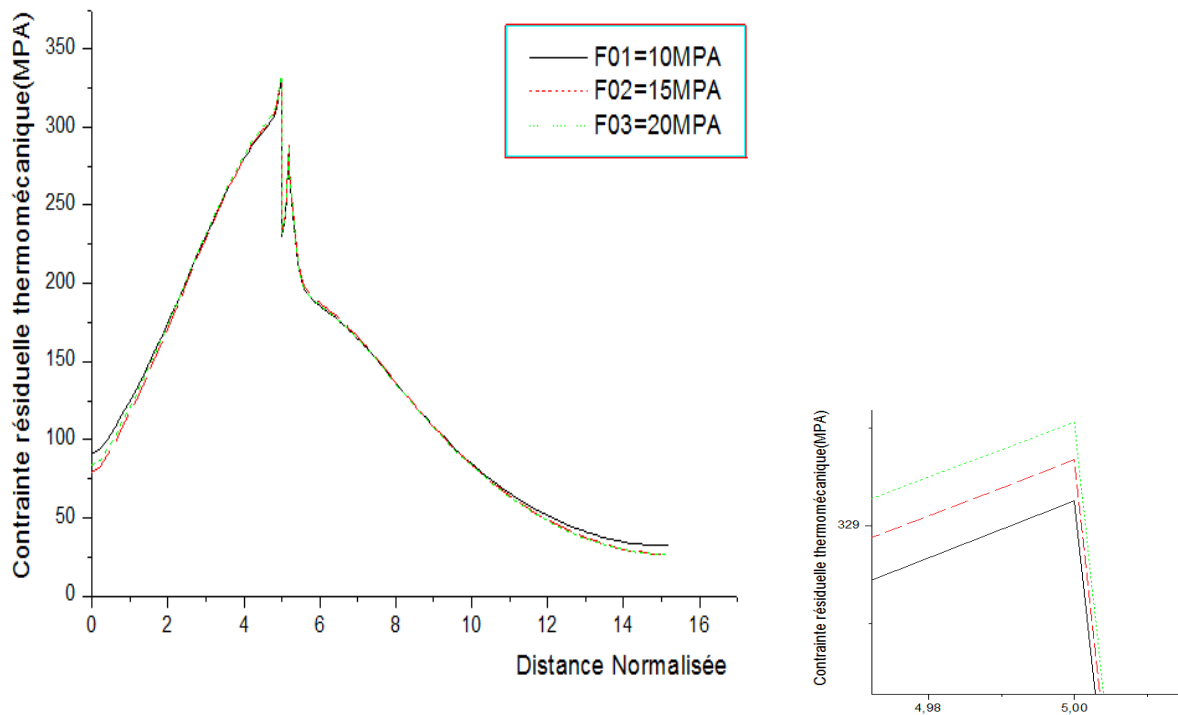
### IV.B.11 Effet de la charge:

Sur les (fig IV.16.17.18), nous avons illustré la variation de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction de l'intensité de la contrainte de mise en service (contrainte appliquée) des différents assemblages. Nous remarquons que, quelle que soit la nature des jonctions réalisées à de températures élevées, un accroissement des efforts appliqués conduit à des contraintes sont fortement localisées au voisinage très proche de l'interface.

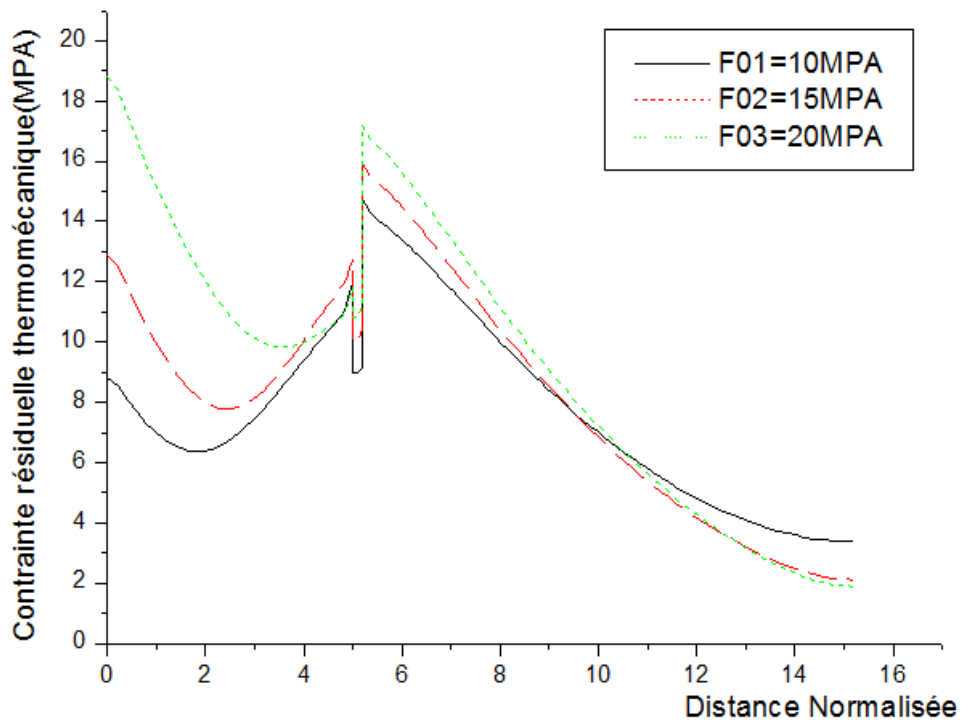
Les résultats obtenus dans cette étude montrent, qu'additionnent aux contraintes résiduelles développées thermiquement, les contraintes de mise en service peuvent conduire à l'endommagement des assemblages élaborés à des températures élevées.



**Figure IV.16 :** Variation de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction de l'intensité de la contrainte de mise en service pour le couple  $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{XC15}$



**Figure IV.17 :** Variation de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction de l'intensité de la contrainte de mise en service pour le couple  $\text{XC15/ Pt / Al}_2\text{O}_3$



**Figure IV.18 :** Variation de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction de l'intensité de la contrainte de mise en service pour le couple XC15/ FM-73 /Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



## Conclusion générale

---

### Conclusion générale

Les résultats obtenus dans ce travail montrent:

- Les matériaux types céramiques métal conjointement liés à des températures élevées engendrent des contraintes résiduelles normales et tangentielles. Les contraintes de cisaillement de faible intensité non pas été analysés dans ce travail;
- Le niveau de ces contraintes dépend non seulement des propriétés physiques des matériaux à assembler, mais également de leur caractéristique géométrique, de la température de leur élaboration.
- Les contraintes résiduelles normales développées thermiquement mettent la céramique en compression et le métal en tension;
- L'interface entre la céramique et le métal est le siège de concentration de contrainte interne. Loin de cette interface le bimatériau ce comportent comme un matériau homogène;
- Les contraintes résiduelles normales et de Von Mises dépendent de la taille de l'assemblage;
- L'interposition d'un joint métallique entre la céramique et le métal détermine le niveau des contraintes résiduelles dans ces deux matériaux;
- Le volume du joint métallique et sa nature conditionnent l'amplitude des contraintes internes dans la céramique et le métal près de leur interface;
- Les assemblages céramo-métallique collés à des températures élevées induisent les contraintes résiduelles de très faible intensités;
- L'épaisseur de l'adhésif détermine le niveau et la répartition des contraintes internes induites thermiquement dans la céramique et le métal près de l'interface;
- Ajoutées aux contraintes de mise en service, les contraintes résiduelles d'origine thermique peuvent constituer un risque de rupture des assemblages céramo-métallique. Ce risque est d'autant plus élevé que les jonctions sont élaborées à des températures élevées;
- Une intensification des contraintes de mise en service engendrent dans les bimatériaux des contraintes plus significative;
- Une augmentation de la température de près chauffage de substrat métallique induit des contraintes internes plus fortes à l'interface colle-métal et céramique-colle. Le niveau de ces contraintes croît avec l'accroissement de la température de près chauffage et de l'amplitude des contraintes de mise en services.

**Références bibliographique**

[1] **P. Boch.**

Propriétés et applications des céramiques, Hermes, Paris, (2001).

[2] **W.D. King, H.K. Bown and D.R Uhlmann.**

Introduction to ceramics, John Wiley et Sons , (1976).

[3] **J.L. Chermant.**

Les céramiques thermomécaniques, presse du CNRS, (1989).

[4] **G. Aliprandi.**

Matériaux réfractaires et céramiques techniques . (1979)

[5] **C. Kittel.**

Physique de l'état solide, 7ème édition, Dunod. Paris, (1998)

[6] **C. Arnouy**

Gaines en matériaux précieux, institut of industrial sciences, (2001)

[7] **B. Boutabout.**

Etude des contraintes résiduelles dans les bimatériaux par la méthode des éléments finis : cas des couples céramique-métal. Thèse doctorat d'état, Université de Djillali Liabes, Sidi Bel Abbes, Algérie, (2005).

[8] **R.J. Brook.**

Concise Encyclopydia of Advanced Ceramic méterial, Pergamon Press, (1994).

[9] **M. Colombié et Coll.**

Matériaux industriels et matériaux métalliques Dunod, Paris, (2000).

[10] **Heindel R. Cales B**

Radiaactivity of zirconia ceramics used for femoral heads 4th World Biomaterials  
Congres Berlin, (1992)

- [11] **H.Hachette**  
Encyclopédie des métaux, articles, (2004).
- [12] **R.P. Tye.**  
Ed, Thermal conductivity, Academic Press, (1969)
- [13] **J.L. Chaboche et J.Lemaitre.**  
Mécanique des matériaux solides, Dunod, Paris, (1985).
- [14] **W.Kurz, J.P. Mercier, G.**  
Introduction à la science des matériaux, traités de matériaux, tome 1 Zambelli, 2ème édition, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, (1991).
- [15] **M.Koizumi, T. Okamoto, M.Shimada**  
American ceramic Society, vol 63, (1984).
- [16] **M. Courbière.**  
Etude des liaisons céramiques métal, application au couple cuivre-alumine.  
Thèse de l'école centrale de Lyon, (1986)
- [17] **J.P. Besse.**  
Revêtement métalliques ou céramiques sur polymère, application aux multimatériaux.  
(2002)
- [18] **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)
- [19] **R. Plaut- Aubry et M. François.**  
6ème Conférence INTERNATIONALE SUR LES contraintes Résiduelles (ICRS6).  
Oxford – Angleterre, 10-12 Juillet 2000.
- [20] **Philippe Cognard,**  
Techniques d'ingénieurs: Collage des matériaux, caractéristiques et mise en œuvre des colles. BM 7616.
- [21] **Silvio Romero DE BARROS**  
Modèle d'interface pour la simulation du comportement des assemblages collés. Thèse : université de Versailles Saint-Quentin-En- Yvelines 2005. P11.

[22] **Sylvain Popineau**

Durabilité en milieu humide d'assemblages structuraux colles type ALUMINIUM/COMPOSITE. Thèse : Ecoles des mines de paris 2005. P10-11.

[23] **Marie-anne Bruneaux,**

Durabilité des assemblages collés : Modélisation mécanique et physico-chimique. Thèse : Ecoles nationales des ponts et chaussées 2004. P21.