REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



THESE POUR L'OBTENTION DE DIPLOME DE DOCTORAT
EN GENIE MECANIQUE

OPTION : Comportement mécanique des matériaux et des structures

Présentée

Par

NASSER-EDDINE BOUIDA

THEME :

MODELISATION NUMERIQUE DES PLAQUES EN FGM FISSUREES

JURY

REFASSI Kaddour	Pr	***Président***	UDL Sidi Bel-Abbès
BOUCHIKHI Aboubakar Seddik	MCA	***Directeur* de thèse**	UDL Sidi Bel-Abbès
MEGUENI Abdelkader	Pr	***Co-directeur de thèse***	UDL Sidi Bel-Abbès
MOKHTARI Mohamed	MCA	***Examinateur***	Ecole Nationale Polytechnique ORAN
REZGANI LAID	MCA	***Examinateur***	Université de SAIDA

Soutenu le : 16 / 09 /2019

REMERCIEMENT

REMERCIEMENT

Ce travail a été effectué au sein de laboratoire de Mécanique des Structures et des Solides (LMSS), Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbès.

Je remercie en premier lieu **Mr. A. S. BOUCHIKHI**, mon directeur de thèse, de m'avoir fait confiance en me proposant ce sujet de thèse. Sa constante disponibilité, la qualité de ses conseils dans de nombreux domaines et son soutien moral pendant les moments difficiles de la thèse ont été déterminants dans l'aboutissement de ce travail. Je n'aurais pu imaginer meilleur guide pour accompagner mes premiers pas dans le monde de recherche scientifique. Qu'il trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance. **J**e tiens également à remercier le professeur **A. MEGUENI** pour avoir suivi ce travail.

Un grand merci à ma famille et plus particulièrement à mes parents qui m'ont soutenu et encouragé tout au long de ces années.

Je souhaite finalement remercier tous ceux qui m'ont apporté leur soutien amical et logistique durant ces trois années, et en particulier mon équipe de relecteurs : famille de **MOHAMED LAMIN**, Mes amis pour leur patience et leurs précieux conseils. Que leur nom figure ici ou non, ils ne sont pas oubliés.

RESUME

RESUME

Cette thèse introduit une étude numérique utilisant la méthode des éléments finis, pour évaluer l'intégrale J aux fonds de fissure dans une plaque de matériaux à gradient de propriété céramique-métal de Borure-titane (TiB) -Titane (Ti); avec une entaille semi-circulaire à côté de la plaque, soumise à différentes conditions de charge mécanique (mode I et mode mixte). Le module de Young de la plaque de matériaux à gradient de propriété varie le long de la largeur de l'échantillon (sens du rayon de l'entaille r-FGM) en fonction de la loi de puissance et la loi d'exponentiel. De plus, le coefficient de Poisson est pris comme une constante dans la direction normale. La relation entre l'intégrale J et les paramètres de plaque de matériaux à gradient de propriété (ex., l'indice de la loi de puissance, l'épaisseur de la plaque) et les paramètres géométriques (ex., la longueur normalisée de la fissure, le rapport du rayon de l'entaille) sont mis en évidence; ces paramètres doivent être optimisés pour améliorer les performances. Les résultats obtenus montrent qu'il est nécessaire d'estimer la longueur de la fissure, l'épaisseur de la plaque, le rayon d'entaille, la variation des propriétés matérielles des constituants de la plaque de FGM et la direction de la fissure qui ont une influence significative sur l'intégrale J au niveau d'fond de la fissure. On remarque également que dans le mode mixte l'intégrale J est plus affectée que par le mode I.

L'étude des interactions multiples entre les fissures dans la mécanique de la rupture est importante pour prévoir la sécurité et la fiabilité des structures. Le deuxième objectif de ce travail est de proposer une analyse numérique pour calculer l'intégrale J du comportement principal de la fissure émanant d'une entaille semi-circulaire et d'une double entaille semi-circulaire et son interaction avec une autre fissure. Cette interaction peut se produire dans diverses positions de la plaque FGM (TiB / Ti) soumise à une charge mécanique de traction. La variation de l'intégrale J en fonction de la position, de la longueur et de l'angle de rotation des fissures est examinée. En outre, afin de réduire l'intégrale J, on examine l'effet de différents paramètres sur la plaque de FGM à double entaille et l'effet de la bande de FGM au sein de la plaque en céramique. Selon l'analyse numérique proposée, tous les paramètres ci-dessus ont joué un rôle important dans la détermination de l'intégrale J.

MOTS CLES

Matériaux à gradient de propriétés (FGM), méthode des éléments finis (FEM), fissure, entaille, Intégral J, Interaction fissures, Mécanique de la rupture, Mode I, Mode mixte.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENT I
RESUME II
INTRODUCTION GENERALE 6
I. CHAPITRE I. LES MATERIAUX COMPOSITES ET LES FGMS
I.1 INTRODUCTION 11
I.2 LES MATERIAUX COMPOSITES 12
I.2.1 DEFINITION 12
I.2.2 LA MATRICE 12
I.2.3 LE RENFORT 12
I.2.4 TYPE DE MATERIAUX COMPOSITES 13
I.2.4.1 LES COMPOSITES A GRANDE DIFFUSION 13
I.2.4.2 LES COMPOSITES HAUTES PERFORMANCES 14
I.2.5 CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX COMPOSITES 14
I.2.6 DOMAINES D'APPLICATION 15
I.2.7 PROCEDES D'ELABORATION 15
I.2.7.1 Moulage au contact 15
I.2.7.2 Moulage par projection simultanée 16
I.2.7.3 Injection thermodurcissable BMC (Bulk Molding Compound). 16
I.2.7.4 Compression thermodurcissable SMC (Sheet Molding Compound) 17
I.2.7.5 Pultrusion 17
I.2.7.6 Enroulement filamentaire (ou bobinage) 18
I.2.8 Le matériau composite stratifié 18
I.3 LES MATERIAUX À GRADIENTS ÉVOLUES 19
I.3.1 INTRODUCTION 19
I.3.2 CONCEPT DES MATERIAUX FONCTIONNELLEMENT GRADUES 20
I.3.3 APPLICATIONS DES MATERIAUX FGMS DANS L'INDUSTRIE 21
I.3.4 COMPARAISON DES MATERIAUX TYPES FGM ET LES MATERIAUX COMPOSITES TRADITIONNELS 22
I.4 REVUE DES METHODES D'ELABORATION DES MATERIAUX FGMS 23
I.4.1 COULAGE SEQUENTIEL EN BARBOTINE (SLIP CASTING) 24
I.4.2 COULAGE EN BANDE (TAPE CASTING) 24
I.4.3 COMPACTAGE DES COUCHES (POUDRE D'EMPILEMENT) 25
I.4.4 COULEE PAR CENTRIFUGATION 25
I.4.5 PROJECTION PLASMA 26
I.4.6 DEPOT PHYSIQUE EN PHASE VAPEUR (PVD) 26
I.4.7 DEPOT CHIMIQUE EN PHASE VAPEUR (CVD) 27

I.4.8 FRITTAGE LASER DIFFERENTIEL 29
I.4.9 DEPOT PAR ELECTROPHORESE 29
I.5 LOIS REGISSANTES LA VARIATION DES PROPRIETES MATERIELLES DES PLAQUES FGM 30
I.5.1 PROPRIETES MATERIELLES DE LA PLAQUE P-FGM 32
I.5.2 PROPRIETES MATERIELLES DE LA PLAQUE S-FGM 33
I.5.3 LES PROPRIETES MATERIELLES DE LA PLAQUE E-FGM 34
I.6 CONCLUSION 35
II. CHAPITRE II. LA MECANIQUE DE LA RUPTURE DES FGMS
II.1 INTRODUCTION 39
II.2 THEORIES DE LA RUPTURE FRAGILE 39
II.2.1 APPROCHE ÉNERGETIQUE DE GRIFFITH 39
II.2.2 APPROCHE CINEMATIQUE D'IRWIN 41
II.2.2.1. Modes de rupture 41
II.2.2.2 Critère de rupture fragile K_{IC} 43
II.2.3. FORCES DE COHESION. THEORIE DE BARENBLATT 44
II.2.4 LIMITES DE LA THEORIE LINEAIRE 45
II.2.4.1. Ouverture en fond de fissure ou C.O.D. (« Crack Opening Displacement ») 45
II.2.4.2 INTEGRALE J 47
II.2.5 RELATIONS ENTRE LES DIFFERENTS CRITERES DE RUPTURE ET DOMAINE D'UTILISATION 48
II.3 LA RUPTURE DES MATERIAUX À GRADIENT DE PROPRIETES 49
II.3.1 Questions majeures à FGMs [F. Erdogan] 49
II.3.1 METHODE NUMERIQUE 51
II.4 CONCLUSION 61
III. CHAPITRE III. MODELISATION NUMERIQUE D'UNE FISSURE EN 3D
III.1 INTRODUCTION 63
III.2 FORMULATION DE PROBLEME 65
III.2.1 MODEL GEOMETRIQUE DE LA PLAQUE (TI/TIB) 65
III.3 RESULTATS ET DISCUSSIONS 66
III.3.2 EFFET DE L'EPAISSEUR DE LA PLAQUE SUR LA VARIATION D'INTEGRALE J 72
III.3.3 EFFET DU RAYON D'ENTAILLE SUR LA VARIATION D'INTEGRALE J 74
III.3.4 EFFET DE MODULE DE YOUNG DES CONSTITUANTS DE LA PLAQUE FGM SUR LA VARIATION INTEGRALE J 76
III.3.5 EFFET DE CHARGEMENT SUR LA VARIATION D'INTEGRALE J 78
III.3.5 EFFET DE L'ORIENTATION DES FISSURES SUR LA VARIATION D'INTEGRALE J 81
III.4 CONCLUSION 82

IV. CHAPITRE IV. ANALYSE DE L'INTERACTION ENTRE DEUX FISSURES DANS LA PLAQUE DE FGM (TIB/TI) SOUS MODE I EN 2D

Iv.1 INTRODUCTION 87

Iv.2 FORMULATION D'ELEMENTS FINIS 89

Iv.3 RESULTATS ET DISCUSSIONS 91

Iv.3.1 EFFET DE L'INTERACTION FISSURE-FISSURE EN FONCTION DE LEUR POSITION SUR J-INTEGRALE……91

IV.3.2 EFFET DU RAYON D'ENTAILLE ET DU GRADIENT DE MATERIAU β SUR L'INTEGRALE J……...100

Iv.3.3 COMPORTEMENT DE FISSURES FIXES ET OBLIQUES EMANANT D'UNE PLAQUE DE FGM A DOUBLE ENTAILLE SOUS TRACTION……...102

Iv.3.3.1 COMPORTEMENT DE FISSURES FIXES ET OBLIQUES EMANANT D'UNE PLAQUE DE FGM A DOUBLE ENTAILLE SOUS TRACTION 103

IV.3.4 NOUVELLES TECHNIQUES POUR REDUIRE L'INTEGRALE J AVEC LES MATERIAUX FGM……105

Iv.3.4.1 EFFET DES COUCHES DE FGM JOINTES SUR UNE PLAQUE DE CERAMIQUE (TIB) POUR REDUIRE L'INTEGRALE J 105

Iv.3.4.2 EFFET DU RAYON DE LA COUCHE FGM ENTAILLEE POUR REDUIRE L'INTEGRALE J 107

Iv.4 CONCLUSION.....108

CONCLUSION GENERALE 111

REFERENCES GENERALE 116

ANNEXES.....121

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

Grâce aux récentes recherches, aussi bien publiques que privées, les matériaux composites ont trouvé une application plus large dans les secteurs industriels de l'aéronautique, de l'automobile, du sport et loisir, du génie civil et de la marine. Ces matériaux présentent des avantages de légèreté, de résistance mécanique, et de résistance à la corrosion. Ils permettent grâce à leur comportement anisotrope d'adapter les rigidités à l'application.

Depuis le début du vingtième siècle, l'usage des matériaux composites sous la forme de plaques et de poutres s'est considérablement développé. Que ce soit dans l'industrie automobile, la construction, et plus récemment en aéronautique. Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de forme et durée de vie prolongée. Mais l'inconvénient c'est l'existence de concentrations des contraintes au niveau des interfaces entre les couches en raison du changement brutal des propriétés mécaniques d'une couche à l'autre.

Récemment, une nouvelle classe de matériaux composites connus sous le nom de Matériaux Fonctionnellement Gradués (FGM) ou matériaux à gradient fonctionnel, présente une attention considérable due à un changement continu de la composition, les propriétés mécaniques et physiques varient d'une manière graduelle et continue. Cette variation pourra être dans une direction, deux directions, ou trois directions. En plus, la combinaison matérielle de plus de deux matériaux est envisageable.

Le matériau à gradient fonctionnel a été introduit pour la première fois au milieu des années 1980 par un groupe de chercheurs japonais. Depuis, un effort a été suivi pour développer des matériaux à haute résistance basée sur les matériaux à gradient fonctionnel. Ces matériaux ont été initialement conçus comme des matériaux de barrière thermique pour les structures aérospatiales et les réacteurs de fusion. Ils sont maintenant développés pour un usage général en tant que composants structuraux dans un environnement de haute température.

Les matériaux à gradient de propriétés (FGM) sont des composites de pointe, dont la microstructure est hétérogène. Généralement ces matériaux sont fabriqués à partir de composants isotropes tels que les métaux et la céramique. Les FGM trouvent leur application dans divers

domaines tels que les avions, les secteurs biomédicaux et les constructions civiles et industrielles. Les FGM sont obtenus en changeant sans interruption les constituants des matériaux multi-phases dans une fraction prédéterminée de volume du matériau constitutif. La fonction de loi de puissance, et la fonction exponentielle sont employées pour décrire les variations des propriétés matérielles des matériaux FGM, avec l'apparition des concentrations des contraintes dans les interfaces auxquelles le matériau est continu mais change graduellement.

Différentes méthodologies sont proposées dans la littérature pour examiner le comportement des fissures situées en FGM orthotrope. Un des moyens efficaces de conduire une L'analyse de la rupture des FGMs consiste à utiliser l'intégrale J en conjonction avec la méthode des éléments finis. L'intégrale J a été proposée par Rice et a été utilisée comme paramètre de mécanique de la rupture dans de nombreuses applications d'ingénierie, L'intégrale J est appelée contour indépendant de la trajectoire intégrale représentant le taux de libération d'énergie au fond de la fissure.

Les objectifs de l'étude sont la compréhension et la prédiction des comportements des plaques en FGMs fissurées soumis à chargement mécanique, Ce mémoire s'articule autour de deux parties.

La première partie concerne l'état de l'art sur les matériaux composites en générale et les matériaux fonctionnellement gradués (**Chapitre I**) et la mécanique de la rupture des FGMs au (**Chapitre II)**.

La seconde partie est consacrée aux modélisation numérique d'une fissure en 3D soumis à différent charge mécanique (**Chapitre III**), finalement analyse de l'interaction entre deux fissures dans la plaque de fgm (TiB/Ti) sous mode I en 2D au **Chapitre IV**.

L'objectif principal d'un concepteur est de prédire si une fissure dans un composant est susceptible de se développer dans les conditions de chargement données (**Chapitre III**). Cette section présente une étude numérique élastique utilisant la méthode des éléments finis en 3D; pour évaluer l'intégrale J au fond de la fissure dans une plaque de matériaux à gradient de propriété (Ti-TiB); avec une entaille semi-circulaire soumise à différentes charges mécaniques. Le module de Young de la plaque de matériaux à gradient de propriété varie dans le sens du rayon de l'entaille r-FGM avec une fonction de puissance et de loi exponentielle. De plus, le coefficient de poisson est pris comme une constante. La relation entre intégrale J et les paramètres mécaniques et

géométriques de la plaque de matériau à calibrage fonctionnel est mise en évidence. Les résultats indiquent que la réduction de l'intégrale J peut être contrôlée de manière significative par l'indice de loi de puissance. On peut choisir l'indice de la loi de puissance (n = 0,5) et en augmentant l'épaisseur de la plaque FGM. Il est recommandé d'optimiser l'orientation et la longueur de la fissure et de choisir une plaque à rayon d'entaille supérieure à 20% de la longueur de la fissure. Il convient également de noter que le contrôle de la variation des propriétés matérielles de la plaque FGM peut réduire considérablement l'intégrale J.

L'objectif de Chapitre IV est de décrire l'effet de l'interaction entre deux fissures dans une plaque FGM entaillée et à double entaille (TiB/Ti). Des variations des propriétés du matériau sont appliquées à la fois aux points d'intégration et aux nœuds en mettant en œuvre un sous-programme USDFLD dans le logiciel Abaqus. Le comportement est analysé par la détermination de l'intégrale J, des effets de la distance longitudinale et transversale entre les fonds des deux fissures et la rotation de la micro-fissure sont examinés. Nous étudions également l'effet de différents paramètres pour la plaque de FGM à double entaille. Enfin, l'effet de bande de FGM au sein d'une plaque de céramique.

Les éléments finis ont été développés par sous-programme USDFLD (Annexe) appropriées définies par l'utilisateur dans le logiciel ABAQUS.

CHAPITRE I

CHAPITRE I. LES MATERIAUX COMPOSITES ET LES FGMS

Sommaire

I.1 INTRODUCTION 11
I.2 LES MATERIAUX COMPOSITES 12
I.2.1 DEFINITION 12
I.2.2 LA MATRICE 12
I.2.3 LE RENFORT 12
I.2.4 TYPE DE MATERIAUX COMPOSITES 13
I.2.4.1 LES COMPOSITES A GRANDE DIFFUSION 13
I.2.4.2 LES COMPOSITES HAUTES PERFORMANCES 14
I.2.5 CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX COMPOSITES 14
I.2.6 DOMAINES D'APPLICATION 14
I.2.7 PROCEDES D'ELABORATION 15
I.2.7.1 Moulage au contact 15
I.2.7.2 Moulage par projection simultanée 16
I.2.7.3 Injection thermodurcissable BMC (Bulk Molding Compound). 16
I.2.7.4 Compression thermodurcissable SMC (Sheet Molding Compound) 17
I.2.7.5 Pultrusion 17
I.2.7.6 Enroulement filamentaire (ou bobinage) 18
I.2.8 Le matériau composite stratifié 18
I.3 LES MATERIAUX À GRADIENTS ÉVOLUES 19

I.3.1 INTRODUCTION 19
I.3.2 CONCEPT DES MATERIAUX FONCTIONNELLEMENT GRADUES 20
I.3.3 APPLICATIONS DES MATERIAUX FGMS DANS L'INDUSTRIE 22
I.3.4 COMPARAISON DES MATERIAUX TYPES FGM ET LES MATERIAUX COMPOSITES TRADITIONNELS 23
I.4 REVUE DES METHODES D'ELABORATION DES MATERIAUX FGMS 24
I.4.1 COULAGE SEQUENTIEL EN BARBOTINE (SLIP CASTING) 25
I.4.2 COULAGE EN BANDE (TAPE CASTING) 25
I.4.3 COMPACTAGE DES COUCHES (POUDRE D'EMPILEMENT) 26
I.4.4 COULEE PAR CENTRIFUGATION 26
I.4.5 PROJECTION PLASMA 27
I.4.6 DEPOT PHYSIQUE EN PHASE VAPEUR (PVD) 27
I.4.7 DEPOT CHIMIQUE EN PHASE VAPEUR (CVD) 28
I.4.8 FRITTAGE LASER DIFFERENTIEL 30
I.4.9 DEPOT PAR ELECTROPHORESE 30
I.5 LOIS REGISSANTES LA VARIATION DES PROPRIETES MATERIELLES DES PLAQUES FGM 31
I.5.1 PROPRIETES MATERIELLES DE LA PLAQUE P-FGM 33
I.5.2 PROPRIETES MATERIELLES DE LA PLAQUE S-FGM 34
I.5.3 LES PROPRIETES MATERIELLES DE LA PLAQUE E-FGM 35
I.6 CONCLUSION 36

I.1 INTRODUCTION

Grace aux récentes recherches, aussi bien publiques que privées, les matériaux composites ont trouvé une application plus large dans les secteurs industriels de l'aéronautique, de l'automobile, du sport et loisir, du génie civil et de la marine. Ces matériaux présentent des avantages de légèreté, de résistance mécanique, et de résistance à la corrosion. Ils permettent grâce à leur comportement anisotrope d'adapter les rigidités à l'application.

Récemment, une nouvelle classe de matériaux composites connus sous le nom de Matériaux Fonctionnellement Gradués (FGM) ou matériaux à gradient fonctionnel, présente une attention considérable due à un changement continu de la composition, les propriétés mécaniques et physiques varient d'une manière graduelle et continue. Cette variation pourra être dans une direction, deux directions, ou trois directions . En plus, la combinaison matérielle de plus de deux matériaux est envisageable. Le matériau à gradient fonctionnel a été introduit pour la première fois au milieu des années 1980 par un groupe de chercheurs japonais. Depuis, un effort a été suivi pour développer des matériaux à haute résistance basée sur les matériaux à gradient fonctionnel. Ces matériaux ont été initialement conçus comme des matériaux de barrière thermique pour les structures aérospatiales et les réacteurs de fusion. Ils sont maintenant développés pour un usage général en tant que composants structuraux dans un environnement de haute température.

Dans la majorité des applications de FGMs, une distribution en couches discrètes est utilisée, et elle est créée pratiquement, couche par couche, au lieu d'être vraiment continue. En fait, la plupart des méthodes produisant des FGMs ne fournissent pas une gradation continue régulière ; Même dans le cas de variation continue, ce n'est pas toujours possible d'exprimer la gradation comme fonction des coordonnées spatiales et d'obtenir une solution analytique. Dans de tels cas, la couche FGM peut être considérée comme faite d'un certain nombre de sous-couches et la solution peut être obtenue comme une structure avec des propriétés matérielles constantes dans chaque sous-couche.

I.2 LES MATERIAUX COMPOSITES

I.2.1 DEFINITION

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes. Leur association est complémentaire est permet d'aboutir à un matériau dont les performances recherchées seront supérieures à celles des composants pris séparément. Un matériau composite est constitué dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue, appelée renfort ou matériau renforçant, est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue, appelée matrice.

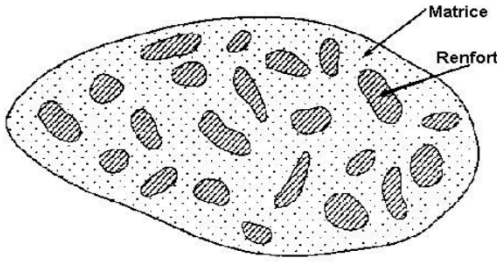


Fig. I.1 Schéma illustratif d'un matériau composite.

I.2.2 LA MATRICE

La matrice est, avec les renforts, l'un des deux principaux constituants des matériaux composites. C'est le terme désignant la résine polymérisée dont le rôle est de maintenir les renforts en place et de leur assurer la cohésion et la protection. Elle permet également la transmission des efforts mécaniques vers les renforts.

La matrice est généralement homogène et isotrope ; on distingue les matrices céramiques, les matrices métalliques, les matrices minérales et les matrices organiques.

I.2.3 LE RENFORT

Le renfort est généralement composé de matériau plus dur que la résine ; son rôle principal est d'assurer au matériau une grande résistance surtout à la traction, et qui se présente, généralement, sous forme de fibres :

-fibres longues unidirectionnelles (Carbonne, verre),

-fibres longues tissées,

-fibres courtes reparties aléatoirement sans directions privilégiées (mat).

En fonction de la forme des renforts, on distingue deux types de composites :

- les composites à fibres : constitués de fibres continues ou discontinues (fibres coupées ou courtes). Leur orientation permet de moduler les propriétés mécaniques du matériau et d'obtenir des matériaux isotropes ou anisotropes.

- les composites à particules : les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux.

Remarques

- entre le renfort et la matrice, existe une zone de liaison appelée interface.

- Des additifs, en particulier des produits chimiques, rentrent dans la composition du composite pour former des interphases etc... Cependant ils n'interviennent pratiquement jamais dans le calcul de structure composite.

- Un matériau composite est la plupart du temps hétérogène et anisotrope.

Tableau. I.1 Caractéristique moyenne des fibres et renforts

Renforts	Diamètre de filament (μm)	Masse volumique (Kg/m^3)	Module d'élasticité longitudinal (Mpa)	Module de cisaillement (Mpa)	Coefficient de poisson	Contrainte de rupture (traction) (Mpa)	Allongement a la rupture %	Coefficient de dilatation thermique $°C^{-1} \times 10^{-5}$
	d	ρ	E	G	ν	σ_r	A	α
Verre E	16	2 600	74 000	30 000	0.25	2 500	3.5	0.5
Verre R	10	2 500	86 000		0.2	3 200	4	0.3
Carbone HM	6.5	1 800	390 000	20 000	0.35	2 500	0.6	0.08
Carbone HR	7	1 750	230 000	50 000	0.3	3 200	1.3	0.02
Kevlar 49	12	1 450	130 000	12 000	0.4	2 900	2.3	-0.2
Bore	100	2 600	400 000			3 400	0.8	0.4
Silicate d'alumine	10	2 600	200 000			3 000	1.5	
Polyéthylène		960	100 000			3 000		

I.2.4 TYPE DE MATERIAUX COMPOSITES

Selon leur taux d'utilisation, les composites sont classés en deux grandes classes: les composites à grande diffusion et les composites hautes performances.

I.2.4.1 LES COMPOSITES A GRANDE DIFFUSION

Ils occupent une portion de 95% des composites utilisés. Ce sont en général des plastiques armés ou des plastiques renforcés, le taux de renfort est de 30%. Dans 90% des cas, l'anisotropie n'est pas maîtrisée car les renforts sont des fibres courtes. Les principaux constituants de bases

sont les résines polyesters avec des fibres de verre. Dans ce cas le renfort et la matrice sont à des coûts voisins.

I.2.4.2 LES COMPOSITES HAUTES PERFORMANCES

Ils sont principalement utilisés dans l'aéronautique et sont d'un coût élevé. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%, et ce sont les renforts qui influent sur le coût. Les propriétés mécaniques (résistance mécanique et rigidité) sont largement supérieures à celles des métaux, contrairement aux composites à grande diffusion. Des méthodes de calculs de structures et d'homogénéisations ont été développées pour les composites hautes performances.

I.2.5 CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX COMPOSITES

Les propriétés des matériaux composites dépendent de beaucoup de facteurs et sont différentes selon les divers types de matériaux composites. Ces propriétés résultent :

- des propriétés, de la nature et de la quantité des matériaux constitutifs.
- des constituants, de la géométrie et de la distribution du renfort
- de leurs interactions, de la nature de l'interface matrice-renfort, etc.

Les principales caractéristiques des pièces fabriquées en matériaux composites sont :

- le gain de masse,
- la bonne tenue en fatigue (durée de vie augmentée),
- l'absence de corrosion,
- l'absence de plasticité (leur limite élastique correspond à la limite de rupture)
- le vieillissement sous l'action de l'humidité et de la chaleur,
- l'insensibilités à certains produits chimiques courants (solvants, peinture, huiles, pétroles...),
- tenue aux impacts et aux chocs très moyenne,
- très forte anisotropie.

I.2.6 DOMAINES D'APPLICATION

Les excellentes performances mécaniques des matériaux composites fibres résine en terme de caractéristiques spécifiques en font des matériaux attrayants pour l'utilisation dans les structures. En outre, l'intérêt de ces matériaux réside dans leur anisotropie aisément contrôlable par le

concepteur qui peut ainsi ajuster la rigidité et la résistance en fonction des sollicitations extérieures. Ainsi l'immense avantage des matériaux composites est de pouvoir être optimisé pour chaque application : on peut placer le renfort exactement où il est nécessaire. Cette optimisation résulte en une grande performance de ces matériaux, qui sont souvent de loin les plus légers pour une résistance mécanique spécifiée. Cependant ils restent très chers à fabriquer! D'où leurs domaines d'application :

- électricité et électronique,
- bâtiment et travaux publics,
- transports routiers, ferroviaires, maritimes, aériens et spatiaux (notamment militaire),
- santé (instrumentation médicale),
- sports et loisirs (skis, raquette de tennis, planche à voile, surf, club de golf, aviron…).

Ainsi on note que les matériaux composites sont surtout utilisés pour des applications où une haute performance est recherchée et où le prix n'est pas le facteur primordial.

I.2.7 PROCEDES D'ELABORATION

L'élaboration d'un matériau composite consiste en trois opérations indispensables qui sont :

- Imprégnation du renfort par le système résineux.
- Mise en forme à la géométrie de la pièce.
- Durcissement du système :

  - ❖ Soit par polycondensation et réticulation pour les matrices thermodurcissables,
  - ❖ Soit par simple refroidissement pour les matières thermoplastiques.

Le moulage reste le procédé le plus utilisé dans l'élaboration de matériaux composites, mais Il existe d'autres procédés aussi importants :

I.2.7.1 Moulage au contact

Le principe consiste à imprégner manuellement les renforts disposés dans un moule. C'est peu onéreux et des pièces de formes quelconques peuvent être réalisées mais à cadence très faible. Cette technologie est plus réservée à la réalisation de pièces prototypes ou de simulation.

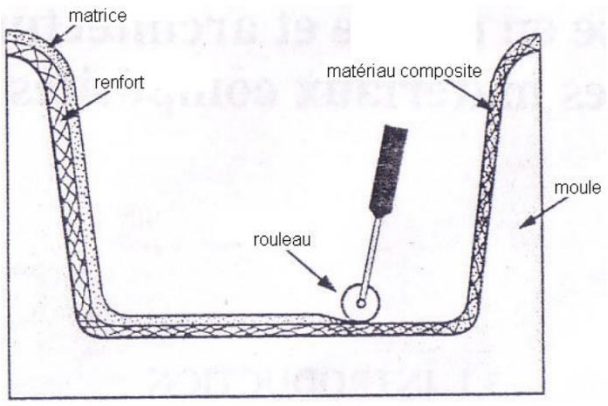


Fig. I.2 Principe du moulage au contact.

I.2.7.2 Moulage par projection simultanée

C'est une technologie similaire à la précédente mais les fibres coupées sont projetées au pistolet.

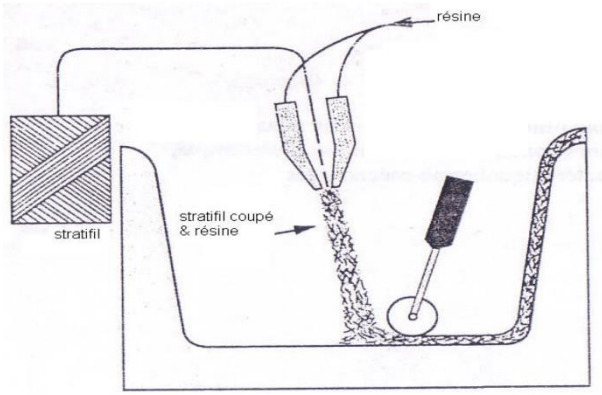


Fig. I.3 Principe du moulage par projection simultanée.

I.2.7.3 Injection thermodurcissable BMC (Bulk Molding Compound).

Procédé discontinu haute pression (100 bars). Alimentation et dosage du Compound, Injection-pression, maintien et polymérisation, puis éjection. Les avantages sont : réalisation de grande série, faible coût matière, peu de finition, temps de cycle. Les limites sont : le taux et la longueur des renforts et les propriétés mécaniques du composite obtenu.

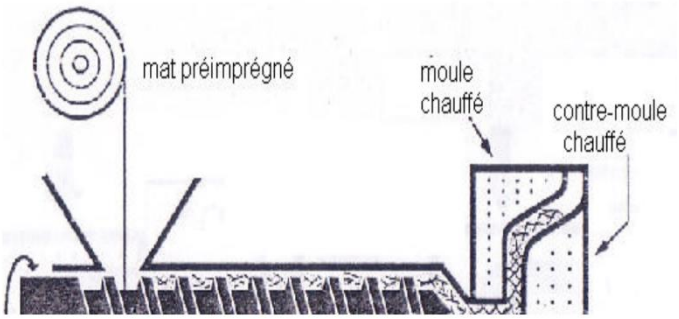


Fig. I.4 Principe du moulage par injection.

I.2.7.4 Compression thermodurcissable SMC (Sheet Molding Compound)

Le principe consiste à déposer des feuilles de pré-imprégnés dans un contre moule chauffé, de comprimer le matériau avec un moule chauffé, polymérisation puis éjection de la pièce. Avantages : coût matière, propriétés mécaniques et thermiques. Les limites sont l'aspect, le dimensionnement des presses et la finition.

I.2.7.5 Pultrusion

Utilisation pour les composites hautes performances industrielles. Le principe est : tirage, mise en forme et polymérisation de fibres continues imprégnées. Les avantages sont la production en continue, possibilité de réaliser des sections très complexes, et d'avoir un taux de renfort élevé. Les limites sont la lenteur du procédé, uniquement des profilés droits à section constante.

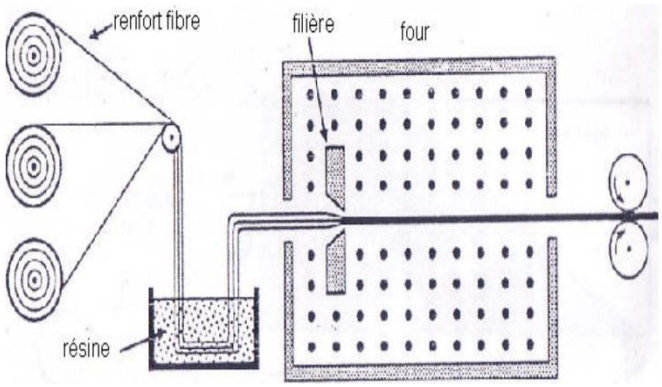


Fig. I.5 Principe du moulage par pultrusion.

I.2.7.6 Enroulement filamentaire (ou bobinage)

Technologie pour les HP. Le principe consiste en un enroulement sous tension sur un mandrin tournant autour de son axe de fibres continues préalablement imprégnées d'un liant. Les avantages sont la disposition optimale des renforts, les très bonnes propriétés mécaniques, possibilité de réaliser des pièces de grandes dimensions avec des surfaces internes lisses. Les limites sont des formes uniquement convexes et investissements importants.

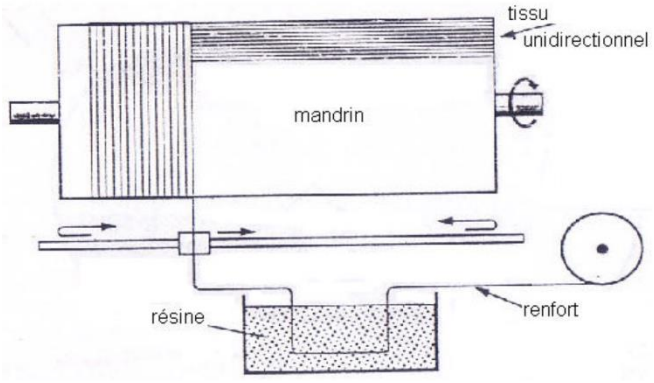


Fig. I.6 Principe du moulage de l'enroulement circonférentiel.

Remarque

- Il existe d'autres procédés : drapage en autoclave, centrifugation, stratification en continu, thermoformage sous vide, estampage.

I.2.8 Le matériau composite stratifié

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacune une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié.

Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques.

On pourra avoir des stratifiés de type :

- Equilibré : stratifié comportant autant de couches orientées suivant la direction +q que de couches orientées suivant la direction -q.

- Symétrique : stratifié comportant des couches disposées symétriquement

par rapport à un plan moyen.

- Orthogonal : stratifié comportant autant de couches à 0° que de couches à 90°.

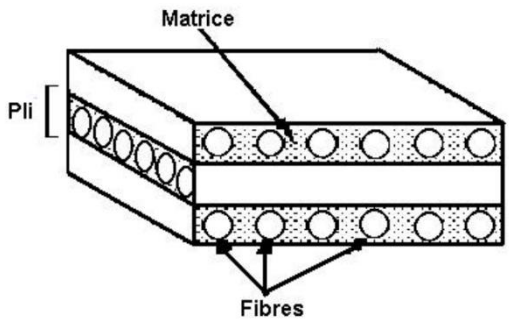


Fig. I.7 Schéma illustratif d'un matériau composite stratifié.

I.3 LES MATERIAUX À GRADIENTS ÉVOLUES

I.3.1 INTRODUCTION

Les matériaux à gradients évoluées (FGM) sont composés de deux ou plusieurs matériaux relatif à des fractions volumiques et microstructure qui sont conçus pour avoir une continuité spatiale des variables. Les (FGM) permettent l'adaptation des fractions de volume d'un matériau pour extraire l'avantage maximum de leur inhomogénéité.

Ces matériaux offrent un grand potentiel pour les composants dont le fonctionnement est soumis à de fortes charges mécaniques ou thermiques, tels que les boucliers thermiques des vaisseaux spatiaux, les revêtements du plasma pour les réacteurs de fusion, les composantes du moteur pour les avions de combat.

Toutefois, L'exécution d'un composant pour les (FGM) n'est pas seulement en fonction de la masse et des propriétés des constituants d'un seul matériau, mais c'est directement lié à la capacité du concepteur utilisons le matériel le plus optimal dans la mode. Par conséquent, Nous proposons une méthodologie pour les deux dimensions de simulation et l'optimisation de la distribution de matériel a gradient évalué qui subir à des processus thermomécaniques pour des matériaux en cours de vibration libre.

La distribution spatiale des éléments constitutifs des fractions de volume, qui doit être optimisée pour les différents chargements et les conditions aux limites, est obtenue par l'interpolation des morceaux bi cubique de fractions de volume définies à un nombre fini de points de grille.

Les propriétés efficaces du matériel à un point dans le domaine sont estimées à partir des fractions du volume local de la matière. La fraction de volume distribué est optimisée utilisant le code réel de l'algorithme génétique une fois.

Enfin, la méthodologie proposée est appliquée à plusieurs exemples de problèmes pour illustrer son efficacité dans la conception supérieure des composants des matériaux à gradient évaluée. La méthode est utilisée pour minimiser les contraintes résiduelles dues à une excitation électrique des matériaux piézoélectriques sur un matériau à gradient évalué ainsi que de minimiser la masse du matériel elle-même imposées en vertu de température non linéaire et d'une contrainte efficace. La méthodologie est également démontrée pour la maximisation et le réglage de la fréquence d'une structure à gradient évalué. L'optimisation multi objective de la distribution des fractions de volume est également effectuée pour un feu de chaleur intense du matériau à gradient évalué. L'exemple est de démontrer que la méthode proposée est robuste et bien adaptée pour la conception des matériaux à gradient évalué avec une thermomécanique supérieure.

I.3.2 CONCEPT DES MATERIAUX FONCTIONNELLEMENT GRADUES

Les matériaux à gradient fonctionnel sont une nouvelle classe de matériaux composites dont les propriétés thermomécaniques varient selon une loi de fonction continue (figure I.8) ou discrète à travers l'épaisseur. Grâce à la structure spéciale de ces matériaux, il est possible d'éviter les concentrations de contraintes au niveau des interfaces (provoquant le délaminage) et d'améliorer les propriétés mécaniques et thermiques des pièces par association de matériaux. Ces matériaux sont de plus en plus utilisés dans les industries aéronautiques, aérospatiale, biomécanique, automobile et dans bien d'autres applications technologiques.

La variation continue des propriétés (figures I.8) trouve son application lorsque, par exemple, la face supérieure est exposée à une haute température alors que la face inférieure est exposée à une basse température. Dans ce cas, la face supérieure est à 100% céramique et la face inférieure est à 100% métal, avec une transition graduelle entre les deux.

L'utilisation de la céramique n'est pas fortuite. Ce matériau est choisi grâce à ses caractéristiques exceptionnelles qui sont énumérées comme suit:

- faible réactivité chimique, bonne tenue à la corrosion ;
- haute température de fusion ou de décomposition ;

- haut module d'élasticité et haute dureté ;
- charge à la rupture élevée ;
- bas coefficient de frottement, bonne résistance à l'usure ;
- conservation des propriétés à haute température ;
- faible coefficient de dilatation thermique (donc bonne résistance aux chocs thermiques) ;
- faible conductivité thermique (donc bonne résistance à la température).

Cependant, les céramiques sont réputées être fragiles et très vulnérables aux défauts de petites tailles.

Les caractéristiques du métal sont données comme suit :

- Bonne résistance mécanique ;
- Conductivité thermique élevée,
- Très bonne ténacité.

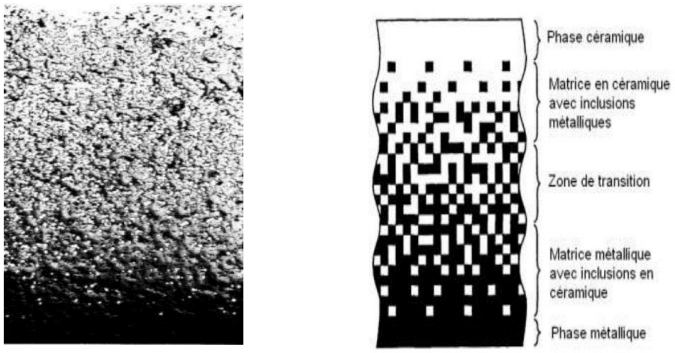


Fig. I.8 Schéma de la variation continue de la microstructure

En ajustant la microstructure de transition d'une façon appropriée, il est possible d'obtenir une distribution optimale de la température, de la déformation et des contraintes. Cette possibilité d'ajustement est demandée lors de la conception des structures thermiques aéronautiques et spatiales (moteurs, tuyères, revêtements thermiques, etc.). Ce concept a aussi été utilisé pour améliorer la résistance à la fatigue thermique et la durée de vie des revêtements pare-feu.

La plupart des « FGM » sont constitués de céramique et de métal dont les propriétés mécaniques sont comparées dans le tableau I.1.

Tableau I.2 comparaison entre les propriétés de la céramique et du métal.

La face à haute température	Céramique	- Bonne résistance thermique ; - Bonne résistance à l'oxydation ; - Faible conductivité thermique.
Continuité du matériau d'un point à l'autre « couches intermédiaires »	Céramique-métal	-Élimination des problèmes de l'interface ; -Relaxer les contraintes thermiques.
La face à basse température	Métal	- Bonne résistance mécanique ; - Conductivité thermique élevée, - Très bonne ténacité.

I.3.3 APPLICATIONS DES MATERIAUX FGMS DANS L'INDUSTRIE

La conception des FGMs est récente, et leurs applications sont encore rares. Les FGMs permettent par exemple d'associer dans une même structure des matériaux ayant des propriétés thermiques différentes sans provoquer de contraintes. Le japonais Sumitomo Electric a ainsi développé un matériau pour bouclier thermique dont l'une des faces est en composite carbone-carbone, résistant à très haute température, et l'autre en carbure de silicium, bon conducteur de la chaleur. Les FGMs pourraient être utilisés également pour la génération thermoélectronique de l'électricité et dans les piles solaires.

Au début, les matériaux à gradient de fonction ont été élaborés autant que matériaux résistants à des contraintes thermiques abusives pour les structures aéronautiques et les réacteurs à fusion [4] et [6]. Maintenant Ils sont développés pour une multitude d'objectifs structurels dans les environnements sous conditions de haute température. Les applications des matériaux FGM sont diverses et nombreuses, ils offrent de grandes performances dans les applications où les conditions de fonctionnement sont sévères.

Souvent les couches en céramiques peuvent utilisés comme barrières thermiques pour les moteurs, turbines à gaz, couches minces en optiques [Nguyen 2007], des sondes [Müller 2003], des déclencheurs [Qiu 2003], des armures métal/céramique [Liu 2003], des détecteurs photoélectriques [Paszkiewicz 2008] et des implants dentaires [Watari 2004]. Un certain nombre de revues traitant de divers aspects de FGM ont été publiées dans les dernières décennies. Elles prouvent que la majeure partie de première recherche étudie dans FGM s'était concentrée sur l'analyse du comportement mécanique et le traitement de la rupture sous l'effet des contraintes thermiques [Shen 2009]. Une étude complète de la flexion et l'analyse de vibration des plaques et des structures de coquille faites de FGM a été présentée par [Shen 2004]. Récemment, Birman et

Byrd [Birman 2007] ont présentés un examen des principaux développements dans FGM qui inclut des problèmes de transfert de chaleur, contraintes, stabilité et analyses dynamiques.

I.3.4 COMPARAISON DES MATERIAUX TYPES FGM ET LES MATERIAUX COMPOSITES TRADITIONNELS

Généralement, les F.G.M sont des matériaux constitués de plusieurs couches contenant des composants différents tels que les céramiques et les métaux. Ils sont donc des composites présentant des caractéristiques macroscopiquement inhomogènes. Le changement continu dans la composition et donc dans la microstructure du matériau distingue les F.G.M des matériaux composites conventionnels comme illustré sur la (figure I.6) (Koizumi 1996). Il en résulte un gradient qui déterminera les propriétés matérielles des FGM. Dans certains cas, on peut avoir un FGM constitué d'un même matériau mais de microstructure différente (Boch *et al*. 1986).

Le concept FGM peut être appliqué dans divers domaines pour des usages structuraux et fonctionnels. Au Japon, plusieurs programmes ont été conduits au cours des années 80 et 90 afin de développer l'architecture des FGM, et d'étudier également ces matériaux pour les applications de hautes températures (par exemple, éléments pour navettes spatial hypersonique) ainsi que pour des applications fonctionnelles (par exemple, convertisseurs thermoélectriques et thermo-ioniques). Ces programmes ont conduit au développement de la conception architecturale du FGM et de ces perspectives.

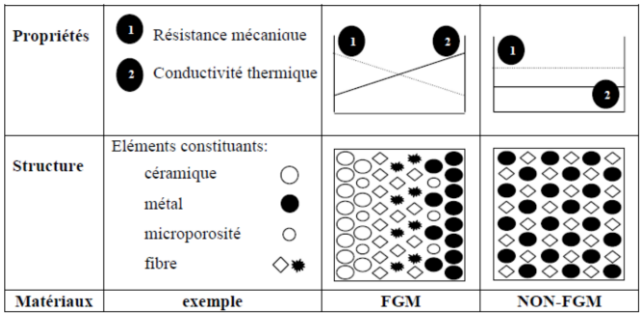
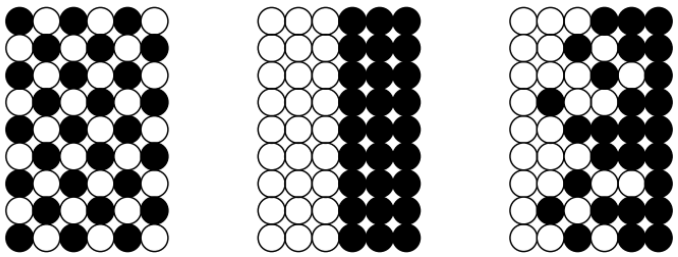


Fig. I.9 Caractéristiques des matériaux composites FGM en comparaison avec les matériaux composites conventionnels

[Yoshihisa 2004] à établie un modèle simple illustrant les différences entre les matériaux à gradient de propriétés (FGM) et les matériaux plus conventionnels est montré sur la (figure II.4) : (a) un matériau plans composé, (b) un matériau relié et (c) un matériau à gradient de propriété. Le matériau plan composé à une caractéristique plane, et le matériau relié à une frontière sur l'interface

de deux matériaux. FGM ont de excellentes caractéristiques qui diffèrent de ceux des matériaux plans composés et reliés. Par conséquent, les FGM attirent l'attention en termes de leur application dans les domaines industriels. Puisque les FGM ont une double propriété des deux matières premières qui sont mélangées ensemble, et la distribution composante est graduée sans interruption. Par exemple, l'un des FGM qui se composent du métal et en céramique a la caractéristique de la conductivité thermique et de la force métallique dans le côté en métal et la résistivité aux hautes températures dans le côté en céramique.



Matériau plan composé (a), Matériau relié (b), Matériau à gradient de propriété (c)
Fig. I.10 La distribution composante des matériaux [Yoshihisa 2004].

I.4 REVUE DES METHODES D'ELABORATION DES MATERIAUX FGMS

L'utilité des composites à gradient de propriétés avec une structure à gradient a été identifiée dans les articles théoriques par, [Shen 2009]. Cependant, leurs travaux n'ont qu'un effet limité, probablement en raison d'un manque de méthodes de production appropriées pour FGMs à ce moment-là. Cela a pris 15 ans supplémentaires jusqu'à ce que la recherche systématique sur des processus de fabrication pour les matériaux à gradient de propriétés ait été effectuée dans le cadre d'un programme de recherche national sur FGMs au Japon. Depuis lors, une partie de la recherche sur les FGM a été consacrée au traitement de ces matériaux et une grande variété de méthodes de production a été développée.

Le processus de fabrication d'un FGM peut habituellement être divisé en établissant la structure dans l'espace non homogène « gradation » et la transformation de cette structure en matériau en bloc « consolidation ». Des processus constitutifs sont basés sur un habillage par étapes de la structure graduée à partir des matériaux de précurseur ou des poudres. Les principaux procédés disponibles de nos jours pour la production des matériaux FGM : coulage séquentiel en barbotine (Slip Casting), coulage en bande (Tape Casting), projection thermique (plasma), dépôt chimique et physique en phase vapeur (CVD et PVD) et le frittage laser différentiel sont les plus importants.

IL ressort de notre étude bibliographique que de nombreuses méthodes d'élaboration sont employées pour la réalisation des matériaux FGMs. Ces techniques sont brièvement expliquées ci-après :

I.4.1 COULAGE SEQUENTIEL EN BARBOTINE (SLIP CASTING)

Morinaga a également réussi à fabriquer un Al2O3/W FGM en utilisant une méthode de coulée en barbotine. Il a obtenu un matériau de gradient avec une composition sans interruption changeante en contrôlant le taux d'arrangement de fines particules, qui dépend de la densité et de la taille du grain [Morinaga 1993], [Mel 2005]. Quand il utilise une densité mince en barbotine (5% ou 10%), la couche d'Al2O3 et la couche de W ont était séparées, confirmant des couches inclinées continues et claires. Dans le passé, le dépôt en phase vapeur, l'implantation ionique, et la diffusion ont été employées pour fabriquer des matériaux de gradient, mais cette technique a attiré l'attention et pourrait permettre pour fabriquer une série de FGM en utilisant des densités minces en barbotine et de fines particules comme matière première avec différentes densités spécifiques.

L'addition d'une pression pendant la coulée en barbotine augmente le taux de dépôt du matériau et à permet de fabriquer des pièces à plus grandes dimensions; ceci a été trouvé dans une étude réalisée par [Grazzini et al 1992]. Leur travail a couvert le traitement des composés monolithiques Al2O3 et Al2O3-Si avec des formulations de coulée en barbotine basées sur les boues d'émoulage dispersées et coagulées qui ont été analysées, et d'excellents résultats ont été obtenus en utilisant les boues d'émoulage coagulées, sans présence de fissuration après séchage. L'effet de la pression s'est avéré pour augmenter la densité avec une augmentation conséquente de la densité de feu. En outre, des microstructures homogènes ont été réalisées dans le système composé, malgré la grande différence de tailles des particules utilisées.

I.4.2 COULAGE EN BANDE (TAPE CASTING)

Le processus de coulage en bonde connu sous la dénomination anglaise (Tape casting) a été employé pour préparer les diverses bandes de poudres fines en suspension non aqueuse, dont lequel les matériaux composites laminaires et les matériaux à gradient de propriétés (FGM Al_2O_3-TiC) ont été produits en coupant, en empilant, en stratifiant le matériau, ensuite enlevant la reliure, et

ont pressant les produits obtenus à chaud, le coulage en bonde est une méthode utile pour modifier les propriétés mécaniques des composés en céramique [ZENG 2000].

L'élaboration des barbotines utilisées pour le coulage en bandes comprend plusieurs étapes : tout d'abord, le solvant avec une viscosité faible, le dispersant et la poudre céramique sont mélangés soit dans un broyeur planétaire dans des jarres en alumine pour SiC, soit dans un mélangeur à rouleaux avec des billes en SiC pour B4C (problème d'usure) ; ensuite, un liant acrylique et un plastifiant sont ajoutés et mélangés durant une nuit ; puis un autre agent est ajouté (seulement pour les barbotines servant à obtenir des bandes poreuses) et mélangé pendant 4 heures environ pour obtenir une répartition uniforme ; enfin, la barbotine est désaérée pendant 24 heures à faible vitesse de rotation. Après vérification de la viscosité des barbotines, ces dernières sont coulées sur un film Myler siliconé afin de faciliter le décollement de la bande sur un banc de coulage à l'aide d'un sabot constitué d'un double couteau permettant d'obtenir des bandes d'épaisseur contrôlée (100-200 μm). Des disques (20mm de diamètre) et des carrés (50mm de côté) sont découpés dans les bandes puis empilés. Ainsi on obtient des matériaux soit monolithiques (empilement de couches identiques) soit alternés (empilement symétrique de couches denses et poreuses) après thermocompression sous 60 MPa Reynaud al [Reynaud 2001].

I.4.3 COMPACTAGE DES COUCHES (POUDRE D'EMPILEMENT)

Dans cette méthode simple et bien établie un gradient est constitué par le dépôt des couches de poudre avec les compositions changeantes dans la matrice de compactage [Atarashiya 1993], [Leushake 1999]. Les inconvénients de ce processus sont évidents : changements discrets, nombre limité des couches (jusqu'à 10 dans l'échelle de laboratoire, mais pas plus de deux ou de trois dans la fabrication potentielle), épaisseur limitée des différentes couches (normalement pas moins de 1mm), taille limitée de la pièce (<100 cm2) en raison des limites des forces de compaction, fabrication discontinue avec la productivité faible. Néanmoins cette méthode permet des études de laboratoire efficaces des systèmes à gradient de propriétés.

I.4.4 COULEE PAR CENTRIFUGATION

Dans la coulée par centrifugation, des particules d'une phase réfractaire sont dispersées dans un métal fondu. Ces particules peuvent être formées in situ pendant le refroidissement du fondant [Zhang 1998] ou être dispersées dans une étape précédente. La différence de densité entre les

particules et le métal fondu mène à la formation d'un gradient de concentration de particules si le fondant est moulé dans une centrifugeuse. Particules avec une plus faible densité (Mg2Si, [Zhang 1998]) et une densité plus élevée (Al3Ti, [Watanabe 1997]) que le fondant a été utilisé pour préparer les tubes en aluminium à gradient de propriétés qui sont sélectivement la particule renforcée sur la surface intérieure ou externe du tube.

I.4.5 PROJECTION PLASMA

La projection plasma consiste à introduire des particules solides (de taille inférieur à 100 μm, environ) dans un jet de gaz, dont la température atteint couramment 11000 °C et la vitesse 1000-1500 m/s. Le dépôt est ainsi formé par l'empilement des lamelles solidifiées obtenues par l'impact des particules sur le substrat préalablement préparé [Watremetz 2006]. Ce procédé est utilisé en particulier pour déposer des matériaux à haute température de fusion tels que des alliages réfractaires ou des céramiques. Les caractéristiques des dépôts réalisés par projection plasma sont la résistance à l'usure et à la corrosion et l'isolation thermique et électrique.

Une recherche détaillée a été effectuée sur la microstructure et le contrôle de propriété des fines particules pulvérisés par plasma. La projection par plasma est un processus rapide et fournit la formation de film sur une large zone, mais a habituellement un inconvénient avec sa microstructure approximative [Omori et al 1998]. Ichikawa [Ichikawa 2000] a employé les poudres mécaniquement alliées des matériaux thermoélectriques, et a réussi à bien contrôler la teneur en dépôt dans le SiC pour former un matériau thermoélectrique transporteur concentration-gradué avec une microstructure homogène.

I.4.6 DEPOT PHYSIQUE EN PHASE VAPEUR (PVD)

La technique de dépôt physique en phase vapeur (Physical Vapor Deposition) est une technologie primordiale (prometteuse) pour la production de revêtements de barrière thermique. Parmi les caractéristiques avantageuses de PVD que les revêtements sont fabriqués ont des surfaces lisses, sans exigence, en fin il n'y a pas de fermeture de trous de refroidissement. Toutefois, le principal avantage est leur résistance exceptionnelle aux chocs thermiques, ainsi que la durée de vie est considérablement plus longue. L'équipement utilisé pour déposer les revêtements d'isolation thermiques par l'intermédiaire de PVD, se compose de plusieurs récipients

pour le chargement, le préchauffage, et le dépôt plus un dispositif de rotation et la manipulation des échantillons ...etc. [Miyamoto 1999].

Une autre approche pour obtenir une structure à gradients est d'utiliser un mélange d'aluminium, l'alumine, et de zircone, chimiquement contrôlés peuvent être fabriqués facilement par vaporisation à partir de sources multiples en utilisant un ou plusieurs pistolets électroniques. En ajustant les paramètres de faisceau d'électrons, différents taux de dépôt peuvent être obtenus pour chaque source [Miyamoto 1999]. Si les taux d'évaporation de deux composants, par exemple alumine et de zircone, sont changés sans interruption, un gradient défini de composition est obtenu, c'est le FGM.

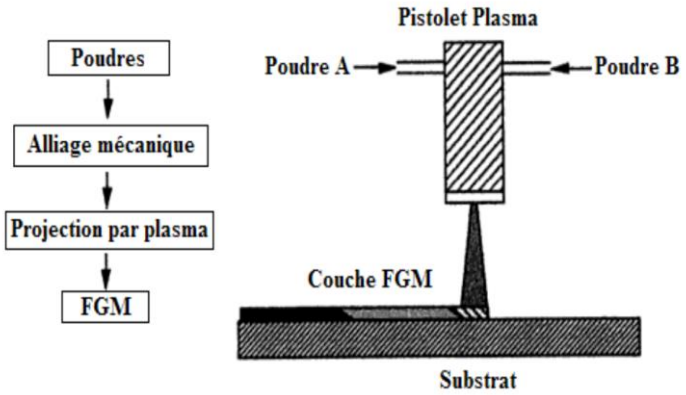


Fig. I.11 Projection par plasma pour former un matériau thermoélectrique gradué. (La composition est graduée dans la direction plane)

Pour les systèmes de barrières thermiques plus sollicités à l'environnement oxydant, notamment les aubes mobiles de turbines aéronautiques ou terrestres ne sont, toutefois, pas systématiquement élaborés par projection thermique ; dans le cas de la zircone yttriée ZrO2, un autre procédé différent est également employé. En l'occurrence, il s'agit de la technique de l'évaporation sous faisceau d'électrons (EB-PVD) qui conduit à des microstructures et des propriétés thermomécaniques assez différentes de celles obtenues par la technique de la projection thermique [Mévrel 2009].

I.4.7 DEPOT CHIMIQUE EN PHASE VAPEUR (CVD)

Dans la technique de dépôt chimique en phase vapeur (Chemical Vapor Deposition), représenté schématiquement sur la (figure II.6), un dépôt est formé sur un substrat en soumettant la source

des gaz (par exemple, des hydrures, bromures ou chlorures) qui occupent la chambre de réaction, à différents types d'énergie comme la chaleur, la lumière et le plasma [Miyamoto 1999].

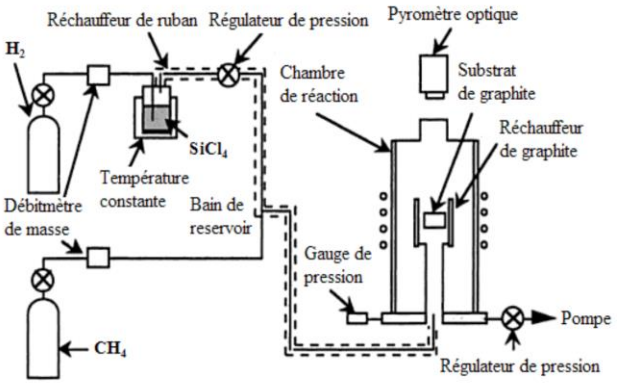


Fig. I.12 Schéma de l'installation pour la préparation d'un SiC/C FGM par le dépôt chimique en phase vapeur (CVD)

Les FGM peuvent être synthétisés à lent pour modérer des taux de dépôt en modifiant le rapport de mélange de la source des gaz, ou par le contrôle de la température de dépôt, la pression de gaz, ou le débit de gaz. En raison de son faible taux de dépôt, CVD est largement utilisé pour l'infiltration de piles ou pour la fabrication de couches minces.

Un exemple typique d'une application de FGM par CVD est la formation d'un revêtement gradué de carbure de silicium SiC sur le graphite dans lequel il y a une transition continue de SiC au C. des compositions contrôlés la source de mélanges des gaz (CH4-SiCl4- H2) sont employés aux températures de dépôt entre 1400 °C et 1500 °C et aux pressions entre 1.3 et 6.5 KPa.

Par définition 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.

Cette technique est constituée de deux étapes et convient à la fabrication d'un composite à gradient de fonction composé de deux matériaux dont les températures de fusion sont très différentes. La première étape est de fabriquer une matrice frittée du matériau à haute température de fusion avec un gradient de porosité. La seconde est de remplir ces porosités avec le deuxième matériau fondu par infiltration. Le résultat est excellent pour la diminution de la contrainte thermique. Ce procédé peut être généralement appliquée pour plusieurs combinaisons de

matériaux qui sont chimiquement inertes et qui ont des points de fusion bien différents les uns par rapport aux autres.

I.4.8 FRITTAGE LASER DIFFERENTIEL

Le rayonnement thermique du laser permet le contrôle de la température et la focalisation du point à chauffer. La différence de l'intensité de l'irradiation sur différents points du matériau, provoque un frittage différentiel le long de la pièce, ce qui résulte en des microstructures différentes, dépendant de la position du point irradié. YUKI et al. [YUKI 1991] ont utilisé cette technique pour élaborer un FGM de PSZ/Mo. La figure (II.7) montre schématiquement la disposition du procédé utilisé par ces auteurs.

I.4.9 DEPOT PAR ELECTROPHORESE

Un autre processus est ajouté aux différentes techniques de la fabrication des FGM, ce que n'appel le dépôt par électrophorèse (EPD) est un processus assez rapide à faible coût, capable de produire les matériaux à gradient de propriétés changeant sans interruption avec la géométrie complexe. EPD se compose de deux processus, c'est-à-dire le mouvement des particules chargées en suspension dans un champ électrique entre deux électrodes (électrophorèse) et le dépôt de particules sur l'un des électrodes. EPD permet la conception des matériaux à gradient de propriétés en forme de plaque binaire en déposant d'une suspension de poudre à laquelle une deuxième suspension est sans interruption ajoutée pendant le processus. Le dépôt est un contrat de poudre emballé étroit qui a besoin de l'agglomération pour réaliser les composants matériels entièrement denses.

Depuis lors, de nombreuses applications d'EPD ont été développées pour la fabrication de la céramique, y compris l'application des matériaux sans interruption à gradient de propriétés peut être obtenu tels que le céramique-céramique ZrO2/Al2O3, et le céramique métal, WC/Co puisque la composition des couches déposantes est déterminée par la suite

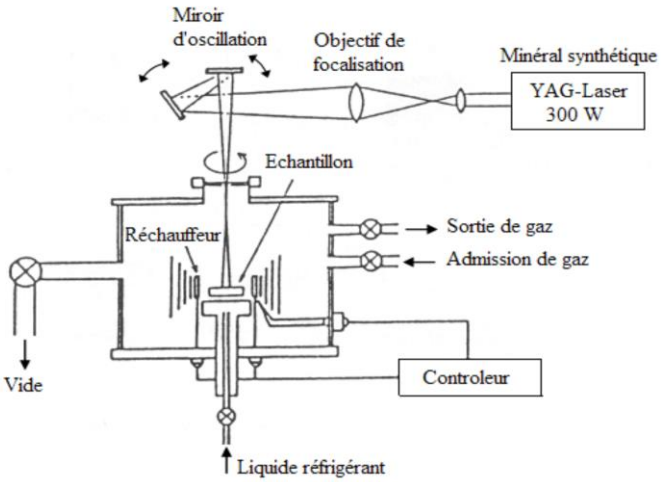


Fig. I.13 Disposition du procédé frittage laser différentiel.

Composition de la suspension au moment du dépôt. Une installation générale de ce principe est illustrée sur la (figure I.14)

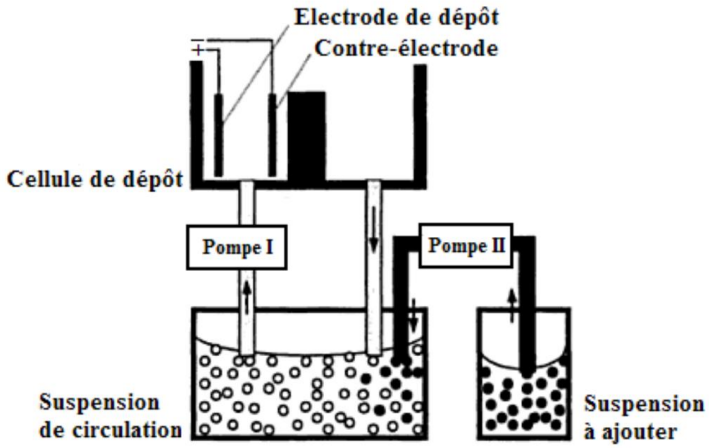


Fig. I.14 Vue schématique de l'installation d'EPD pour la production des matériaux

I.5 LOIS REGISSANTES LA VARIATION DES PROPRIETES MATERIELLES DES PLAQUES FGM

Les matériaux à gradient fonctionnel « FGM » consistent en l'association de deux ou plusieurs matériaux aux propriétés structurales et fonctionnelles différentes avec une transition idéalement continue de la composition, de la structure et de la distribution des porosités entre ces matériaux de manière à optimiser les performances de la structure qu'ils constituent.

Les caractéristiques les plus distinctes des matériaux FGM sont leurs microstructures non uniformes avec des macro-propriétés graduées dans l'espace.

Un des paramètres clé à déterminer lors de la fabrication de ces matériaux est la composition multi phase à travers l'épaisseur.

La dépendance des propriétés de la position se traduit par la prise en compte de la loi des mélanges correspondant au modèle de Voigt (Shen 2009)

$$P = \sum_{i=1}^{n} P_i V_i \qquad (I.1)$$

Avec *Pi* et *Vi* sont respectivement la propriété mécanique et la fraction volumique du constituant *i*, avec :

$$\sum_{i=1}^{n} V_i = 1 \qquad (I.2)$$

Dans la pratique, la plupart des structures FGM sont à deux constituants : de la céramique et du métal inoxydable en général. Dans ce cas, la loi de Voigt se réduit à :

$$P = P_1V_1 + P_2V_2 \qquad \text{Avec :} \quad V_1 + V_2 = 1$$

Un FGM peut être définie par la variation des fractions de volume. La plupart des chercheurs emploient la fonction de puissance, la fonction exponentielle, ou la fonction sigmoïde pour décrire les fractions de volume. Les liaisons entre les particules doivent être assez dures à l'intérieur pour résister à la rupture, et également assez dures à l'extérieur pour empêcher l'usure.

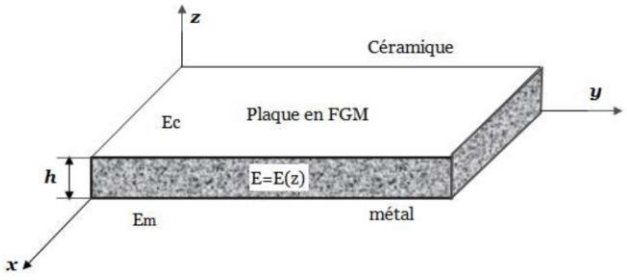


Fig. I.15 Géométrie d'une plaque FGM

Les coordonnées ***x*** et ***y*** définissent le plan de la plaque, tandis que l'axe ***z*** est perpendiculaire à la surface moyenne de la plaque et dans la direction de l'épaisseur. Les propriétés du matériau dont le module de Young et le coefficient de Poisson sur les faces supérieures et inférieures sont différentes. Ils varient de façon continue, suivant l'épaisseur (l'axe ***z)*** soit :

$$\mathrm{E} = \mathrm{E}(\mathrm{z}) \quad \mathrm{Et} \quad \vartheta = \vartheta(\mathrm{z}) \tag{I.3}$$

Jin et Batra (1996) indiquent que l'effet du coefficient de poisson sur les déformations est négligeable comparativement à celui du module de Young. Par conséquent, le coefficient de Poisson peut être supposé comme constant. Cependant, Le module de Young dans la direction de l'épaisseur de la plaque FGM varie en fonction de la loi de puissance (P-FGM), la fonction exponentielle (E-FGM) ou avec la fonction sigmoïde (S-FGM).

I.5.1 PROPRIETES MATERIELLES DE LA PLAQUE P-FGM

La fraction volumique de la classe P-FGM obéit à une fonction en loi de puissance comme suit :

$$V(z) = \left(\frac{z + h/2}{h} \right)^k \tag{I.4}$$

Où ***k*** est un paramètre matériels et ***h*** est l'épaisseur de la plaque. Une fois la fraction volumique locale $V(z)$ a été définie, les propriétés matérielles d'une plaque P-FGM peuvent être déterminées par la loi des mélanges (Bao et Wang 1995):

$$E(z) = V(z)E_c + [1 - V(z)]E_m \tag{I.5}$$

Où E_m et E_c sont respectivement les modules de Young de la surface inférieure ($z = -h/2$) et de la surface supérieure ($z = h/2$) de la plaque FGM. La variation du moule de Young dans la direction d'épaisseur de la plaque P-FGM est représentée sur la figure I.16. Il apparait clairement que la fraction volumique change rapidement près de surface inférieure pour $k < 1$, et augmenté rapidement près de la surface supérieure pour $k > 1$.

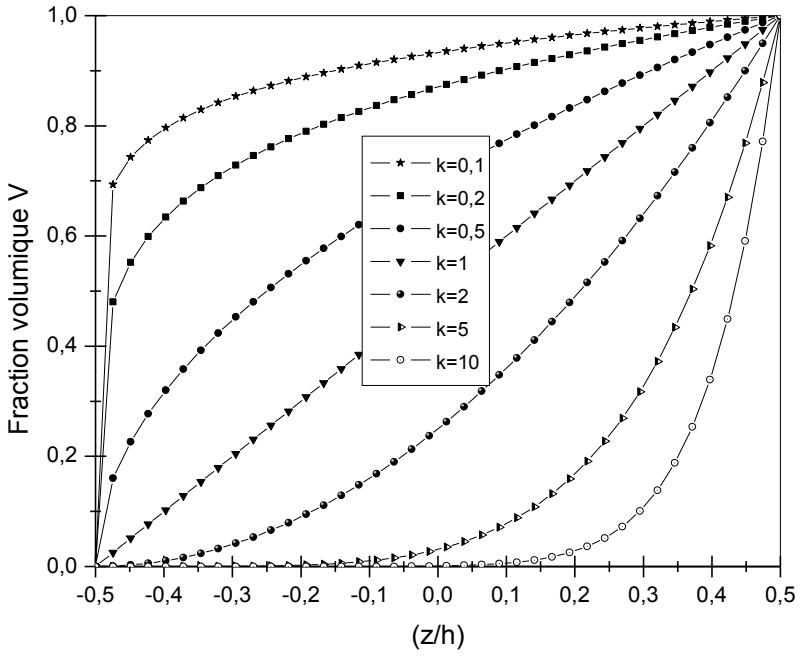


Fig. I.16 Variation de la fraction volumique dans une plaque P-FGM

I.5.2 PROPRIETES MATERIELLES DE LA PLAQUE S-FGM

Chung et chi (2003) ont défini la fraction de volume de la plaque FGM en utilisant deux fonctions de loi de puissance pour assurer une bonne distribution des contraintes parmi toutes les interfaces. Les deux fonctions de loi de puissance sont définies par :

$$V_1(z)=\frac{1}{2}\left(\frac{z+h/2}{h/2}\right)^k \qquad \text{Pour} \qquad -h/2 \le z \le 0 \tag{I.6}$$

$$V_2(z)=1-\frac{1}{2}\left(\frac{-z+h/2}{h/2}\right)^k \qquad \text{Pour} \qquad 0 \le z \le h/2 \tag{I.7}$$

En utilisant la loi des mélanges, le module de Young de la plaque S-FGM peut être calculé par :

$$E(z)=V_1(z)E_1+[1-V_1(z)]E_2 \qquad \text{Pour} \qquad -h/2 \le z \le 0 \tag{I.8}$$

$$E(z)=V_2(z)E_1+[1-V_2(z)]E_2 \qquad \text{Pour} \qquad 0 \le z \le h/2 \tag{I.9}$$

La figure I.10 montre que la variation de la fraction volumique définie par les équations représente les distributions sigmoïdes, et cette plaque FGM est appelée (Plaque S-FGM).

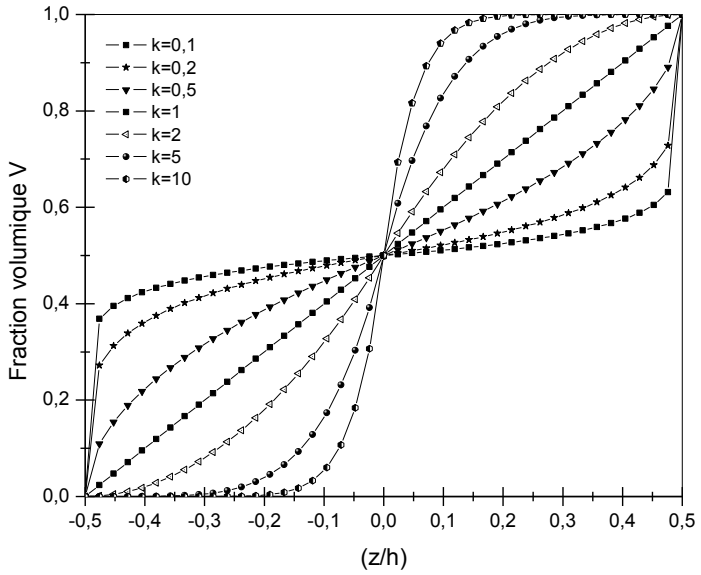


Fig. I.17 Variation de la fraction volumique dans une plaque S-FGM

I.5.3 LES PROPRIETES MATERIELLES DE LA PLAQUE E-FGM

Pour décrire les propriétés matérielles des matériaux FGM, la plupart des chercheurs utilisent la fonction exponentielle qui s'écrit sous la forme (Delale et Erdogan 1983).

$$E(z) = Ae^{B\left(z+h/2\right)} \tag{I.10}$$

$$\text{Avec } A = E_2 \text{ ET } B = \frac{1}{h} Ln\left(\frac{E_1}{E_2}\right)$$

La variation du module de Young à travers l'épaisseur de la plaque E-FGM est représentée sur la figure I.18.

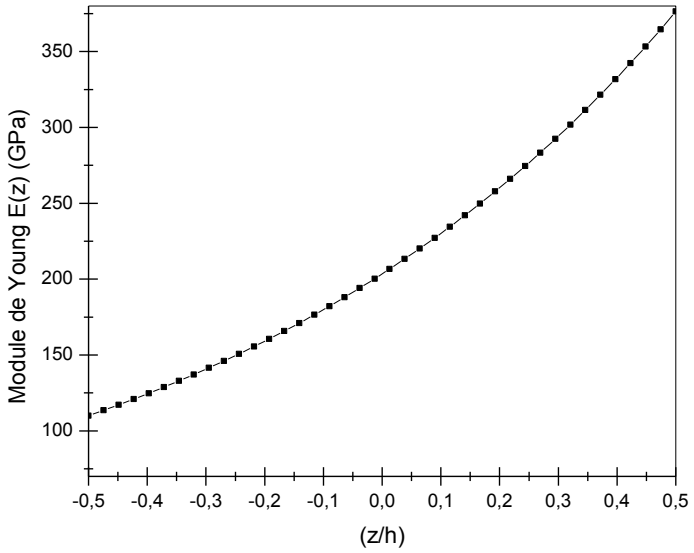


Fig. I.18 Variation de la fraction volumique dans une plaque E-FGM

I.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons défini les matériaux composites et les matériaux à gradient fonctionnel « FGM », l'histoire de leur développement, leurs propriétés et leurs domaines d'application. La variation spatiale et progressive des propriétés de ces matériaux permet de créer des structures innovantes qui peuvent être exploitées dans de nombreux domaines d'application dans les structures spéciales en génie civil.

CHAPITRE II

CHAPITRE II. LA MECANIQUE DE LA RUPTURE DES FGMS

Sommaire

II.1 INTRODUCTION 39
II.2 THEORIES DE LA RUPTURE FRAGILE 39
II.2.1 APPROCHE ÉNERGETIQUE DE GRIFFITH 39
II.2.2 APPROCHE CINEMATIQUE D'IRWIN....41
II.2.2.1. Modes de rupture....41
II.2.2.2 Critère de rupture fragile K_{IC}....43
II.2.3. FORCES DE COHESION. THEORIE DE BARENBLATT 44
II.2.4 LIMITES DE LA THEORIE LINEAIRE....45
II.2.4.1. Ouverture en fond de fissure ou C.O.D. (« Crack Opening Displacement ») 45
II.2.4.2 INTEGRALE J 47
II.2.5 RELATIONS ENTRE LES DIFFERENTS CRITERES DE RUPTURE ET DOMAINE D'UTILISATION 48
II.3 LA RUPTURE DES MATERIAUX À GRADIENT DE PROPRIETES 49
II.3.1 Questions majeures à FGMs [F. Erdogan]....49
II.3.1 METHODE NUMERIQUE 51
II.4 CONCLUSION 61

II.1 INTRODUCTION

Récemment, le concept des matériaux à gradient de propriétés comme outil de conception de nouveaux matériaux a suscité un vif intérêt. Ceci est habituellement accompli en faisant varier de manière appropriée la composition et / ou la microstructure du milieu. Jusqu'ici, la plupart des travaux sur le terrain ont concerné les composites métal / céramique, divers matériaux intermétalliques et électroniques ayant des applications actuelles et potentielles en tant que zones interfaciales et revêtements. D'un point de vue mécanique, les principaux avantages du classement des propriétés des matériaux semblent être une résistance améliorée, une ténacité et une résistance à l'usure et à la corrosion, ainsi qu'une réduction des contraintes résiduelles et thermiques. Certaines applications typiques incluent les revêtements de barrière thermique des composants à haute température dans les turbines à gaz, le durcissement superficiel pour la protection tribologique et les intercalaires gradués utilisés dans les composants microélectroniques et optoélectroniques multicouches [1-3].

Un aspect important qui doit être abordé dans diverses applications techniques des FGM est la question de la fiabilité et de la durabilité en général et des défaillances liées aux rupture en particulier. Cette partie concerne principalement la mécanique de la rupture appliquée aux structures impliquant des FGM. Après une brève description de quelques notions de base de la mécanique de la rupture, certains problèmes critiques liés aux FGM sont discutés et des exemples sont donnés.

II.2 THEORIES DE LA RUPTURE FRAGILE

II.2.1 APPROCHE ÉNERGETIQUE DE GRIFFITH

Pour un solide élastique possédant une fissure *S*, la propagation de celle-ci entraîne une modification de son aire. **GRIFFITH** exprime la conservation de l'énergie totale du système :

$$dW_{lot} = dW_{elast} + dW_{ext} + dW_S + dW_{cin} = O \qquad (II.1)$$

Avec:

- dW_{elast} : variation de l'énergie élastique
- dW_{ext} : variation de l'énergie potentielle des forces extérieures ou travail de ces forces (données) changé de signe

- dW_S : énergie dissipée dans la séparation $dW_S = 2\,\gamma\,dS$, γ étant **l'énergie superficielle** caractéristique du matériau, dS l'accroissement d'aire de la fissure, 2 étant dû aux deux faces de la fissure
- dW_{cin} : variation d'énergie cinétique

La fissure se propagera de façon instable si $dW_{cin} > 0$, c'est-à-dire :

$$\frac{\partial}{\partial S}(W_{elast} + W_{ext}) + 2\gamma < 0 \qquad (II.2)$$

Par définition, le **taux de restitution d'énergie** *G* est :

$$G = -\frac{\partial}{\partial S}(W_{elast} + W_{ext}) \qquad (II.3)$$

Le critère de propagation de **GRIFFITH** se traduit par :

$$G > 2\,\gamma \qquad (II.4)$$

L'initiation de la propagation à partir de la configuration *S* est possible lorsque :

$$G = 2\,\gamma \qquad (II.5)$$

Dès que *G* est supérieur à 2 γ, une partie de l'énergie disponible sert précisément à rompre les liaisons : c'est l'énergie de séparation. L'excès d'énergie (G - 2 γ) d*S* est transformé en énergie cinétique, qui pourrait à son tour, s'il n'y avait pas d'autre apport d'énergie extérieure, se dissiper dans la séparation de surface nouvelle. Ce processus peut mener à la propagation instable.

Si les sollicitations extérieures sont telles que l'égalité

$$G = 2\,\gamma$$

Soit vérifiée à tout moment, alors il n'y a pas d'accroissement d'énergie cinétique : la rupture est contrôlée et la croissance de la fissure est stable.

Diverses expressions de *G* sont présentées par BUI [4]. Considérons un problème plan en élasticité linéaire : un solide est soumis sur la partie S_t de sa frontière à une traction surfacique t_i dont on connaît certaines composantes et sur la partie S_u le déplacement u_i est imposé (par ses composantes complémentaires à t_i), (cf. Fig. 1).

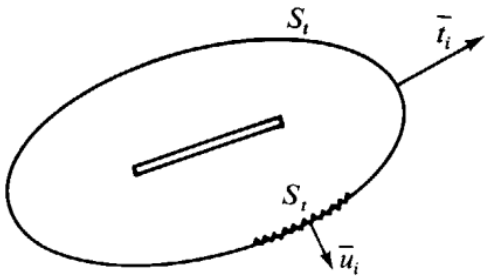


Fig. II.1 Conditions aux limites

En négligeant l'énergie cinétique, le taux de restitution d'énergie s'exprime alors par :

$$G = \frac{1}{2}\int_S \left(t_i \frac{du_i}{dl} - u_i \frac{dt_i}{dl}\right) dS \qquad (II.6)$$

C'est-à-dire:

$$G = \frac{1}{2}\int_{S_t} t_i \frac{-du_i}{dl} - \frac{1}{2}\int_{S_u} u_i \frac{-dt_i}{dl} dS \qquad (II.7)$$

Si la fissure de surface *S* s'accroît de dS, le produit G dS s'interprète comme le travail nécessaire pour fermer la fissure de surface dS.

G est aussi considéré comme le **taux d'énergie de fermeture**.

II.2.2 APPROCHE CINEMATIQUE D'IRWIN

II.2.2.1. Modes de rupture

IRWIN considère les fissures comme des surfaces de discontinuité des déplacements. Puisque chacune des trois composantes du vecteur déplacement peut être affectée, il a observé et défini trois modes indépendants possibles pour les mouvements respectifs des deux surfaces d'une fissure (Fig. II. 2) :

-mode I: les surfaces de la fissure tendent à s'écarter symétriquement par rapport au plan initial de la fissure ;

-mode II: les surfaces de la fissure glissent l'une par rapport à l'autre dans deux sens opposés perpendiculaires au front de fissure en restant dans le même plan ;

-mode III: les surfaces de la fissure glissent l'une par rapport à l'autre dans deux sens opposés perpendiculaires a ceux du mode II.

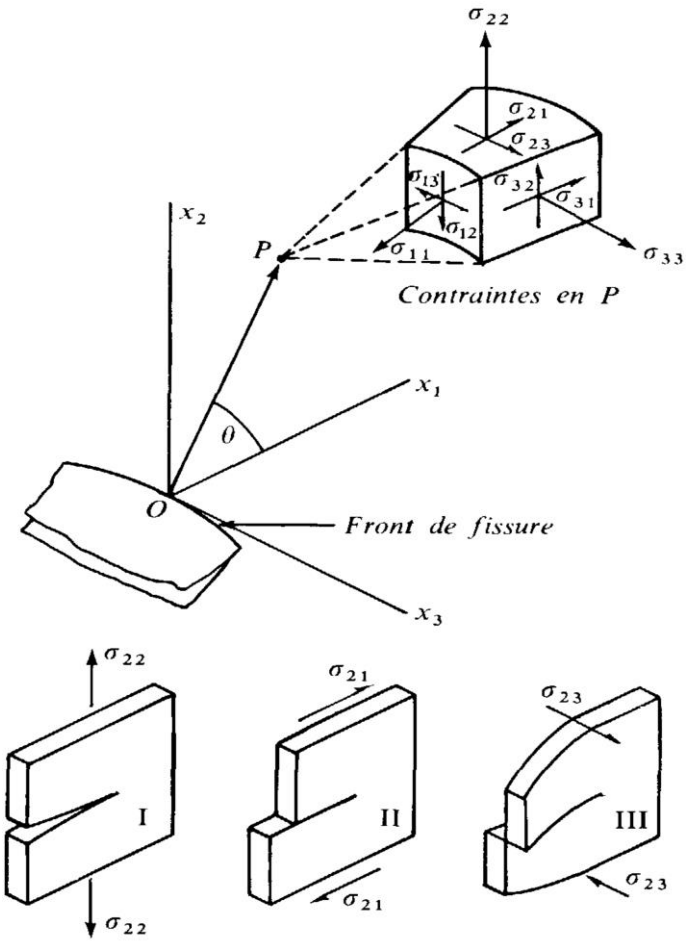


Fig. II.2 Modes de rupture

En élasticité linéaire, la distribution des contraintes au voisinage du fond de fissure s'exprime en coordonnées polaires suivant :

$$\sigma_{ij}(r,\theta) = \frac{K_{ij}(r)}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + O(L) \tag{II.8}$$

Pour chaque mode, le facteur d'intensité de contrainte est défini quand *r* tend vers zéro le long de l'axe x_1 (O = O) en fonction des composantes du tenseur des contraintes par :

$$K_I = \lim_{r\to 0}\left(\sqrt{2\pi r}\,\sigma_{22}\,(r,0)\right) \tag{II.9}$$

$$K_{II} = \lim_{r\to 0}\left(\sqrt{2\pi r}\,\sigma_{21}\,(r,0)\right) \tag{II.10}$$

$$K_{III} = \lim_{r\to 0}\left(\sqrt{2\pi r}\,\sigma_{23}\,(r,0)\right) \tag{II.11}$$

Ces constantes sont indépendantes de r et de θ et ne sont fonction que de la géométrie de la fissure et de la répartition des contraintes.

Comme les contraintes ne peuvent physiquement devenir infinies, une zone de plasticité se situe en fond de fissure. L'hypothèse de base de la mécanique de la rupture en élasticité linéaire est que son étendue est limitée en comparaison de la zone où le terme en $r^{-1/2}$ domine le champ de contraintes. Le comportement de la fissure est déterminé par le facteur d'intensité de contrainte.

II.2.2.2 Critère de rupture fragile K_{IC}

On suppose que l'extension de la fissure se fait dans son plan. Actuellement des recherches s'orientent vers les problèmes de bifurcation mais n'ont pas encore abouti à des résultats pratiques. D'après LABBENS, on peut négliger l'influence des modes II et III pour les aciers, car les aspérités qui existent au voisinage du front de fissure gênent les glissements.

Donc, en utilisant la notion de seuil critique, non pas pour la contrainte qui est infinie au front de fissure, mais pour le facteur K_I, on aboutit au critère de rupture fragile suivant :

$$K_I = K_{IC} \tag{II.12}$$

K_{IC} est une caractéristique physique du matériau appelée **ténacité**. Elle est déterminée expérimentalement et, dans certaines conditions, est indépendante des géométries de l'entaille et de l'éprouvette.

Ce critère est rigoureux en mode d'ouverture symétrique lorsque K_I est constant le long de la fissure et approché en chargement mixte. D'ailleurs, on ne connaît pas de K_{IIC} et K_{IIIC}. Si K est variable le long de la fissure on admet comme critère pessimiste (conservatif) :

$$K_{max} = K_{IC} \tag{II.13}$$

La validité de ce critère est limitée par la présence d'une zone plastique à la pointe de la fissure et par la nature tridimensionnelle du problème à étudier. Pour des pièces minces en acier à haute limite élastique, la zone plastique est confinée au voisinage du front de fissure.

II.2.3. FORCES DE COHESION. THEORIE DE BARENBLATT

Pour éviter d'envisager des contraintes et des déformations infinies au front de fissure, BARENBLATT suppose la présence de forces de cohésion agissant dans une zone limitée (Fig. II. 3).

Ces forces de cohésion vont entraîner des contraintes de compression singulières au front de fissure qui, en se superposant aux contraintes de traction dues au chargement appliqué, vont annuler la singularité du champ de contraintes au front de fissure. Il en résulte que les bords des fonds de la fissure, supposée elliptique initialement, se resserrent en forme de pointe. La force *F* est une fonction non linéaire de l'écartement $V(x_1)$ des faces de la fissure.

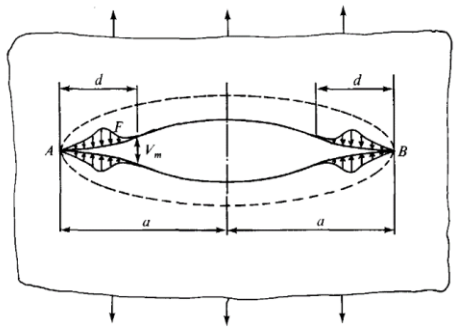


Fig. II.3 Forces de cohésion

La régularisation du champ de contraintes s'obtient par la présence d'un nouveau facteur d'intensité de contrainte *K'* résultant des forces de cohésion qui compense le facteur K_I, prévu par la théorie classique :

$$K'(A) - K_I(A) = 0 \qquad (II.14)$$

Pour déterminer K', BUI utilise la fonction de poids de BUECKNEK, notée K (x_1, A), qui représente le facteur d'intensité de contrainte en mode I à la pointe à correspondant ***A*** deux forces unités concentrées appliquées normalement au point d'abscisse x_1 aux deux faces de la fissure **:**

$$K'(A) = \int_0^d K(x_1, A) F\big(V(x_1)\big)\, dx_1 \qquad (II.15)$$

BARENBLATT suppose aussi que la forme de l'ouverture de la fissure dans la petite zone de largeur d est toujours la même, d'où la détermination de la force de cohésion F_c en fonction de x_1. La valeur critique K_{IC} est alors déterminée par :

$$K_{IC} = \int_0^d K(x_1, A) F_c(x_1)\, dx_1 \qquad (II.16)$$

II.2.4 LIMITES DE LA THEORIE LINEAIRE

II.2.4.1. Ouverture en fond de fissure ou C.O.D. (« Crack Opening Displacement »)

Du fait de la singularité du champ de contrainte en $r^{-1/2}$ au voisinage du front de fissure, IRWIN considère une correction de zone plastique près du front de fissure.

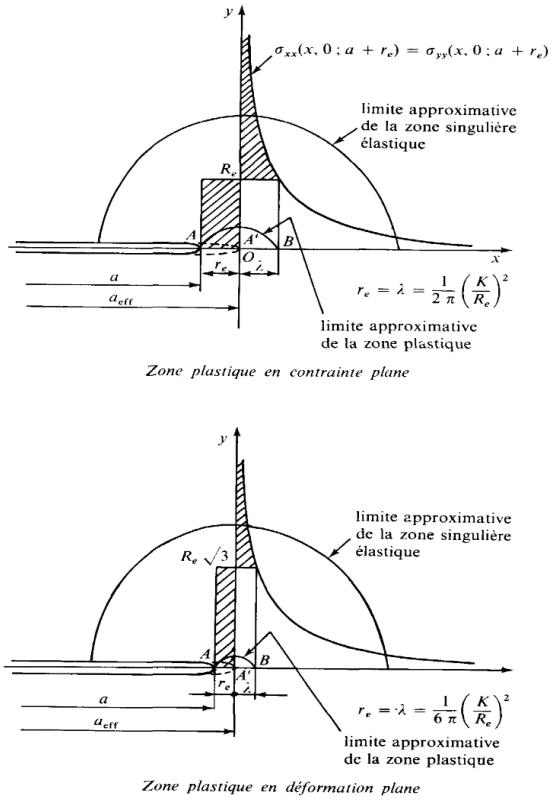


Fig. II.4 (D'après LABBENS)

Les calculs sont donc faits en théorie élastique pour une fissure de longueur effective :

$$a_{eff} = a + r_e \qquad (II.17)$$

r_e Étant lu correction de zone plastique.

Ainsi le front de fissure est émoussé et les contraintes restent limitées.

Pour une déformation plastique peu étendue, IRWIN admet que la zone plastique est plus petite que la zone singulière dans laquelle le terme singulier est dominant. Les longueurs r_e et $r_e + \lambda$ sont calculées en écrivant que, à la limite des zones plastiques et élastiques, R_e étant la limite élastique, sur l'axe Ox_1 pour $x = \lambda$ (Fig. II. 4) :

$$\sigma_{yy}^{(e1)}(\lambda, a + r_e) = \sigma_{yy}^{(p)} = R_e \tag{II.18}$$

Et que la traction R_e imposée sur le prolongement de longueur r_e de la fissure équilibre la contrainte fictive

$$\sigma_{yy}^{(e1)}(\lambda, a + r_e) - R_e \tag{II.19}$$

retranchée sur la longueur λ.
Cette solution approchée, statiquement admissible, ne vérifie pas les conditions cinématiques.

On admet que la valeur du facteur d'intensité de contrainte après correction est égale à sa valeur avant correction :

$$K(a) = K(a + r_e) \tag{II.20}$$

L'ouverture en fond de fissure est :

$$\delta = 2u_\gamma(r_e) \tag{II.21}$$

On obtient donc selon les états de déformation :
- En contrainte plan

$$r_e = \lambda = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{K}{R_e}\right)^2 \tag{II.22}$$

$$\delta = \frac{4}{\pi}\frac{1}{E}\frac{K^2}{R_e} \tag{II.23}$$

- En déformation plan

$$r_e = \lambda = \frac{1}{6\pi}\left(\frac{K}{R_e}\right)^2 \tag{II.24}$$

$$\delta = \frac{4}{\pi}\frac{1-\nu^2}{\sqrt{3}E}\frac{K^2}{R_e} \tag{II.25}$$

La valeur critique de l'ouverture en fond de fissure, δ_c, traduit le fait que le matériau n'est plus capable d'absorber des déformations locales avant l'initiation d'une rupture fragile brutale. 6, peut être considéré comme la résistance à la rupture d'un matériau élasto-plastique [11]. Le critère de rupture qui lui est attaché semble adapté à l'étude de la rupture fragile quand les déformations plastiques sont importantes. Cependant la valeur de δ dépend du modèle adopté.

En conséquence, le critère de rupture fragile déduit des mesures de C.O.D. ne parait pas utilisable pour le problème considéré.

II.2.4.2 INTEGRALE J

Pour un corps homogène élastique qui est soumis, en l'absence de forces de volume, à un champ de déformation bidimensionnel, RICE définit l'intégrale J par :

$$J = \int_{\Gamma}\left(W\,dy - t.\ \frac{\partial u}{\partial x}\,ds\right) \tag{II.26}$$

Où Γ est une courbe entourant le fond de fissure, l'intégrale étant évaluée dans le sens trigonométrique positif du bord inférieur vers le bord supérieur; W est la densité d'énergie de déformation,

$$W = \int_0^{\varepsilon} \sigma_{ij}\ d\varepsilon_{ij} \tag{II.27}$$

t est le vecteur traction défini suivant la normale extérieure au contour Γ, $t_i = \sigma_{ij}\, n_j$, u est le vecteur déplacement et ds est un élément d'arc de Γ.

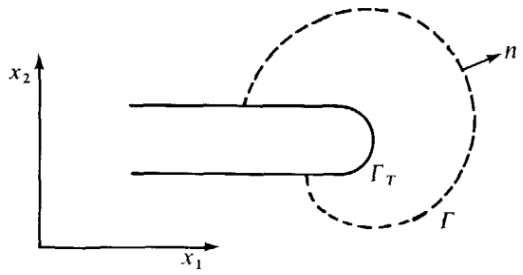


Fig. II.5 Contour d'évaluation de J

RICE a montré que l'intégrale J est indépendante du contour d'intégration (fig. II. 5.) pourvu qu'il délimite un domaine simplement connexe. Il suppose seulement le matériau homogène élastique. On peut donc considérer des matériaux élastiques non linéaires (pour la relation

contrainte-déformation) ce qui permet une analyse approchée des milieux élasto-plastiques. Ceci sort du domaine de notre étude.

Dans un problème plan l'intégrale J peut servir de critère de rupture car une translation de la fissure équivaut à une extension. On montre d'ailleurs que :

$$J = G \tag{II.28}$$

En déformation ou contrainte plane.

II.2.5 RELATIONS ENTRE LES DIFFERENTS CRITERES DE RUPTURE ET DOMAINE D'UTILISATION

- Nous avons vu au § II.2.2.2 comment la ténacité caractérisait la résistance d'un matériau à la propagation brutale d'une fissure en mode I.
- La formule d'IRWIN pour le mode I relie la ténacité K_{IC} au taux de restitution d'énergie G défini par GRIFFITH § II.2.1

$$G = \frac{k+1}{8\,\mu} K_I^2 \tag{II.29}$$

k traduit la nature du problème plan :

En déformation plane $\quad k = 3 - 4\,\nu$

En contrainte plane $\quad k = \frac{3-\nu}{1+\nu}$

μ étant le module de cisaillement et ν le coefficient de Poisson.

Le critère d'amorçage $G = 2\,\gamma$ est équivalent à $K = K_{IC}$. Les valeurs critiques sont liées par :

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{16\,\mu\,\gamma}{k+1}} \tag{II.30}$$

Cependant une valeur critique G, indépendante du mode de rupture, n'a pas encore été mise en évidence, car l'énergie de dissipation ne serait pas d'origine strictement superficielle.

Des intégrales de contour ont été définies par ESHELBY et RICE pour exprimer des variations d'énergie potentielle. Leur signification énergétique a conduit à les utiliser comme critère de

croissance ou de rupture, mais leur application est limitée au cas où la fissure se propage dans son plan initial. Aussi, seule l'intégrale J, relative à un problème plan, a abouti à un critère.

Une valeur critique J_{IC}, a pu être déterminée et liée à la croissance de la fissure en domaine plastique non confiné. Cependant, les expériences menées pour la détermination d'une relation entre K_{IC} et J_{IC} utilisé comme critère de rupture brutale en déformation plane n'ont pu aboutir. En effet, J_{IC} correspond au début de croissance stable de la fissure.

A partir de J_{IC} on peut calculer une valeur fictive de K_{IC} qu'on appelle K_J

$$K_J = \sqrt{\frac{E\, J_{IC}}{1-\nu^2}} \qquad (II.31)$$

Qui peut être une estimation par défaut de K_{IC} en l'absence de mesure valide.

L'utilisation de K_{IC} suppose l'absence d'une grande zone de plasticité. Cette restriction peut être évitée avec le concept d'ouverture en fond de fissure. Comme il est possible de relier δ à K_I par :

$$\delta = \frac{K_I^2}{E\sigma_0} \qquad (II.32)$$

σ_0 étant la limite d'élasticité en traction, une équivalence est possible entre la théorie de K_{IC} et une théorie de la rupture basée sur l'ouverture critique de la fissure δ_c. Cependant, il est maintenant certain que δ_c ne peut, comme J_{IC}, servir de critère de rupture brutale.

Pour certains problèmes de coques minces, δ est la grandeur la plus facilement accessible mais, d'après LABRENS, J_{IC} est souvent un critère de début de croissance stable plus sûr que δ_c.

II.3 LA RUPTURE DES MATERIAUX À GRADIENT DE PROPRIETES

II.3.1 Questions majeures à FGMs [F. Erdogan]

Les principes de la mécanique de la rupture s'appliquent aux matériaux inhomogènes et homogènes. Dans les FGMs les difficultés se posent dans la solution des problèmes élastiques ou élastiques-plastique de fissure pour évaluer G ou k_I, k_{II}, k_{III} et en caractérisant le matériel pour déterminer le K_{IC}, le G_{IC} ou le G_C où le G_{IC} et J_C, J_{IC} est la ténacité de matériau n'est plus une constante matérielle. Les définitions des facteurs d'intensité de la

contrainte et des expressions des taux de libération d'énergie de déformation donnés sont toujours valables à condition que les paramètres élastiques μ et k soient évalués à fond de la fissure. Voici quelques-unes des principales questions concernant la mécanique de la rupture de FGMs.

(a) singularités élastiques. Tant que les paramètres élastiques μ et k sont des fonctions continues des variables spatiales avec des dérivés continus, l'état de contrainte autour des fonds de fissures à la singularité de racine carrée standard. Par exemple, dans les problèmes d'élasticité isotrope du plan pour r~0, les termes principaux des contraintes sont donnés par

$$\sigma_{ij} \cong \frac{\varphi(r,\theta)}{\sqrt{2r}}\left[k_1 f_{1ij}(\theta) + k_2 f_{2ij}(\theta)\right], \quad (i,j) = (r,\theta) \tag{II.32}$$

Où (r, θ) sont les coordonnées polaires à la pointe de la fissure, k_1 et k_2 sont les modes I et II facteurs d'intensité de contrainte, $\phi\ (r, \theta)$ est une fonction lisse avec $\phi\ (r, \theta) = 1$ et les fonctions f_{1ij} et f_{2ij} sont identiques à celle trouvée pour les problèmes de fissure dans le matéiau isotrope homogène. Si la pointe de la fissure se termine à une discontinuité de courbure ou de pente, il n'y aurait aucun changement dans les termes dominants indiqués dans (II. 32). Cependant, pour les petites valeurs de r le prochain terme significatif serait différent, qui, pour la contrainte de clivage à la pointe de fissure est donnée par

$$\sigma_{\theta\theta}(r,0) \cong \frac{k_1}{\sqrt{2r}}\left(1 + \frac{1-4\nu}{8\pi(1-\nu)}\beta r \ln r\right) + c\sqrt{r} \tag{II.33}$$

Où c est une constante, $\mu(x) = \mu_0 \exp(\beta x)$ pour $x<0$, $\mu = \mu_0$ pour $x>0$ et de fissure est localisé à $0 < x < a$, $y=0$.

(b) méthodes d'analyse/solutions de référence. Même s'il n'existe pas de solution de forme fermée connue pour les problèmes de fissure dans FGMs, pour les variations de propriété simples les formulations menant pour des équations intégrales singulières, des solutions simples et précises peuvent être obtenues.

(c) méthodes de calcul. La méthode des éléments finis est le principal outil de calcul. Toutefois, pour améliorer l'efficacité et la précision, le développement d'éléments de fissures et de transitions enrichis et d'éléments inhomogènes ordinaires sera nécessaire.

(d) matériel orthotropeie dans de nombreux cas, l'orthropie du matériau semble être la conséquence de la technique de traitement. Par exemple, les FGMs traitées à l'aide d'une technique

de pulvérisation au plasma ont tendance à avoir une structure lamellaire. Les plates aplaties et les limites relativement faibles d'éclaboussures entraînent un matériau orienté avec une rigidité plus élevée et des plans de clivage plus faibles parallèlement à la limite. D'autre part, les matières classées traitées par la technique de dépot de vapeur d'un faisceau d'électrons physique ont généralement une structure columbaire donnant une plus grande rigidité et des plans de fracture faible dans la direction de l'épaisseur. Ces matériaux orientés peuvent généralement être approchés par un milieu orthotrope inhomogène.

(e) comportement inélastique. En raison des échelles de longueur impliquées dans les revêtements et les interfaces des FGM, en plus de la plasticité conventionnelle, on peut avoir à utiliser une approche de micro plasticité qui tient compte de l'effet des gradients de déformation sur les coefficients de durcissement de la souche. Les problèmes de fissures élastiques non linéaires qui en résultent nécessitent une approche numérique avec des éléments spéciaux inhomogènes.

(f) effets rhéologiques. Invariablement FGMs sont utilisés dans les environnements à haute température. En conséquence, les effets temps-température ne peuvent pas être négligeables et le matériau peut être modélisé comme un milieu inhomogène Visco-viscoplastique ou un médium.

(g) effets dynamiques. En général, les vitesses élevées dans les fissures de propagation et les taux élevés de chargement (p. ex., l'impact) dans les fissures stationnaires nécessitent la prise en compte des effets d'inertie dans résoudre le problème de fracture. Cependant, même pour le milieu inhomogène élastique linéaire non fissuré, le phénomène d'onde de stress n'est pas entièrement compris. Les solutions existantes sont limitées principalement à des problèmes unidimensionnels dans les matériaux avec certaines classifications de propriété simples.

(h) caractérisation matérielle. C'est encore la question la plus importante dans l'étude de la mécanique de rupture des FGMs. La connaissance des paramètres de thermomécanique et de mécanique de rupture du matériel est essentielle pour toute étude réaliste de fiabilité prédictive des composants de FGM.

II.3.1 METHODE NUMERIQUE

Le champ de contrainte du front de fissure dans une FGM a une singularité régulière (voir delale et Erdogan, 1983; 1988; Gu et Asaro, 1997a, b) et le terme singulier pour les problèmes plan est donné par

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}\sigma_{ij}^{I}(\theta) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}}\sigma_{ij}^{II}(\theta) \quad \text{(II.34)}$$

Lorsque les fonctions angulaires σ_{ij}^{I} et σ_{ij}^{II} sont indépendantes des propriétés matérielles et de leurs variations et sont les mêmes que pour les matériaux homogènes. Le déplacement singulier du terme est donné

$$u_i = \frac{K_I}{2\mu_0}\sqrt{\frac{r}{2\pi}}u_i^{I}(\theta) + \frac{K_{II}}{2\mu_0}\sqrt{\frac{r}{2\pi}}u_i^{II}(\theta) \quad \text{(II.35)}$$

Voici, μ_0 le module de cisaillement à l'fond de la fissure. Les fonctions angulaires u_i^{I} et u_i^{II} sont également indépendants des gradients de la matières et sont les mêmes que ceux que celles des matériaux homogènes.

Gradients de matériels affectent uniquement les champs près de pointe à travers le mode I et mode II fact d'intensité de contrante, K_I et K_{II}. Le taux de libération d'énergie est défini comme

$$G = -\frac{\partial \Pi}{\partial a} \quad \text{(II.36)}$$

Qui est liée au champ près de la pointe de

$$G = \frac{K_I^2}{E_0} + \frac{K_{II}^2}{E_0} \quad \text{(II.37)}$$

E_0 à la pointe de la fissure. La ligne suivante intégrale peut représenter le taux de libération d'énergie :

$$J = \lim_{\Gamma \to 0} \int_{\Gamma} \left(W\delta_{1i} - \sigma_{ij}u_{j,1}\right)n_i dC \quad \text{(II.38)}$$

Où W est la densité d'énergie de déformation et n_i la normale vers l'extérieur de la voie Γ, qui commence à partir d'un point situé sur la face inférieure de la fente et se termine à un autre point sur la partie supérieure.

Pour le cas homogène, l'intégrale sous la limite y a divergence libre ; par conséquent, il est le chemin d'accès indépendant et la limite n'est pas nécessaire. Dans ce cas, le J (II. 38) est intégrale J de Ric (Rice, 1968).

Pour les matériaux non homogènes, indépendance du chemin d'accès se produit lorsque la fissure est perpendiculaire à la direction de variation de biens matériels, car dans ce cas, l'intégrale est toujours libre de divergence.

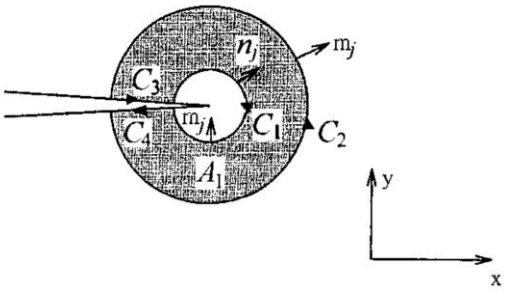


Fig. II. 6 domaine connexe Ai délimitée par le contour C (C = C1 + C2 + C3 + C4) près de fissure. Le domaine est l'endroit où le domaine Intégral est évalué.

Sens de variation, puisque dans ce cas, l'intégrale est toujours libre de divergence (Fig. II. 6).

Habituellement, il y a plusieurs façons de calculer les facteurs d'intensité de contrainte après que les champs de contraintes et les déplacements sont obtenus. Correspondant à la contrainte et le déplacement correspondant, les facteurs d'intensité de contrainte sont obtenus par extrapolation du stress ou déplacements devant la fissure astuce en utilisant (II.34) ou (II.35).

Par exemple, Il est obtenu en substituant la contrainte normale obtenue devant la fissure en (II.34).

La méthode correspondante a l'avantage que presque aucun calcul supplémentaire n'est nécessaire même dans le cas de mutilations génitales féminines, mais il exige un haut degré de raffinement et souffre souvent de l'instabilité que la fissure est bordée (voir Anderson, 1995).

Une autre façon, la méthode intégrale du domaine, qui est une approche énergétique basée sur l'intégrale-J et qui a été prouvé efficace pour les matériaux homogènes, fait l'objet de notre étude numérique ici.

Dans la méthode intégrale du domaine, le taux de libération de l'énergie J est calculé via une zone intégrale dans le cas bidimensionnel et facteurs d'intensité de contrainte sont ensuite obtenues à l'aide de (4).

L'approche intégrale zone fournit bien meilleure précision que d'évaluer directement l'intégrale de contour en (5) et est plus facile à mettre en œuvre numériquement.

Premières œuvres le long de la ligne de l'approche de l'énergie ont été prononcés par des parcs (1974, 1977), Hellen (1975) et de Lorenzi (1982). Shih et ses collègues (voir Li Shih et Needleman, 1985 Shih, Moran et Nakamura, 1986 ; Moran et Shih, 1987) a formulé la méthodologie intégrale du domaine d'une manière générale.

Pour les matériaux homogènes, il a été appliqué dans au-dessus des œuvres aux élastiques et plastiques réponses matérielles, des charges mécaniques et thermiques et à deux dimensions et des espaces de dimension trois. Nous allons discuter de l'application du domaine faisant partie intégrante de matériaux non homogènes.

En particulier, nous allons montrer que l'expression intégrale représentant l'effet de la non homogénéité peut-être négligée lors de l'évaluation de l'intégration à une clôture de région la fissure ;

par conséquent, le domaine standard intégral pour les matériaux homogènes donne une précision suffisante. Nous allons discuter le cas élastique ; la conclusion peut être étendue à l'affaire de durcissement de la Loi de puissance, c'est-à-dire, Singularité HRR (Hutchinson, 1968 ; Rice et Rosengren, 1968).

Considérons une région annulaire A1 autour de la fissure dans le cas bidimensionnel, comme illustré à la figure 1. Pour simplifier la discussion, nous considérons que la variation matérielle est le long de l'axe des abscisses ; et seul un des deux paramètres matériels, le module de Young, a une pente où le coefficient de Poisson est considéré comme un constante depuis sa variation est généralement faible par rapport à l'ancienne.

La conclusion obtenue ci-dessous peut être étendue au cas général de modification importante. Tant la frontière intérieure et extérieure de la région Ai est suffisamment près de la pointe de la fissure.

Le J (5) donné peut-être écrits en ce qui concerne la limite intégrale,

$$J = \oint_C \left(\sigma_{ij} u_{i,1} - W\delta_{1j}\right) q m_j ds \qquad \text{(II.39)}$$

Où C = C2 + C3 + C1 + C4 est la condition de A_l ; m_J est la normale extérieure de A_1 ; sur C1, mj = New -Jersey, ainsi que sur la C2, mj = nj ; et q est une fonction régulière dont la valeur de l'unité sur C1 et zéro sur C2.

Appliquant le théorème de la divergence à (Fig. II. 7) donne

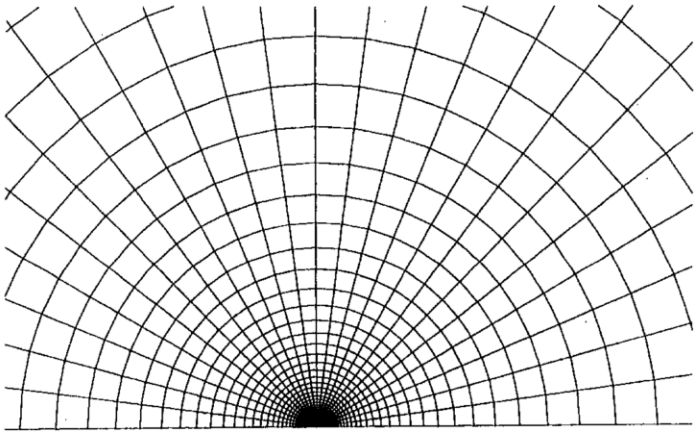


Fig. II. 7 Maille finis de la région fissure. Dans notre calcul, quatre nœuds éléments bilinéaires sont utilisés. Le plus petit élément à l'extrémité est 10^{-5} fois une longueur caractéristique

$$J = \int_{A_1}(\sigma_{ij}u_{i,1} - W\delta_{1j})q_{,j}dA - \int_{A1} W_{,1}qdA \qquad (II.40)$$

Ici, *W = W [E(x), e (x, y)]*. La dérivée de *W* sous la deuxième intégrale est par rapport à la coordonnée x dans x. En comparant avec le cas homogène, la deuxième intégrale est un terme supplémentaire qui représente l'effet de la non homogénéité.

Dans l'implémentation numérique, le contour intérieur C_1 est habituellement pris comme la fissure et la limite extérieure que C_2 est considéré comme étant le même que les limites des éléments.

La fonction q définie ci-dessus est une fonction arbitraire tant qu'il donne les valeurs correctes aux frontières, C_1 et C_2. Par Shih et ses collaborateurs dans les documents mentionnés précédemment, il a été démontré que le J calculé est insensible aux choix de q. La valeur de celui-ci au sein d'un élément peut être considérée comme

$$q = \sum_{i=1}^{n} N_i q_i \qquad (II.41)$$

où Ni sont les fonctions de la forme de l'élément, n est le nombre de nœuds par élément et qi sont les valeurs nodales de q, qui sont assignées selon une fonction régulière variant de zéro à la limite extérieure de l'unité à la pointe de la fissure. Est la dérivée de q en ce qui concerne la coordonnée xi

$$\frac{\partial q}{\partial x_i} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{2} \frac{\partial N_i}{\partial \eta_k} \frac{\partial \eta_k}{\partial x_i} q_i \tag{II.42}$$

Où sont les coordonnées dans l'espace iso-paramétriques. Évaluation de la quantité dans le cadre de l'intégrale dans les points d'intégration de Gauss, J est obtenu numériquement par

$$J = \sum_{A_1} \sum_{p=1}^{n} \left\{ \left[\left(\sigma_{ij} u_{i,1} - W \delta_{1j} \right) q_{,j} - W_{,1} q \right] \det \left(\frac{\partial x_k}{\partial \eta_k} \right) \right\} w_p \tag{II.43}$$

Ici, W_p est la fonction du poids de l'intégration, et det (.) est le déterminant de la matrice jacobienne.

La conception de maille pour nos problèmes non homogènes est une conception de maille standard pour des problèmes de fissure. La fissure est entourée par un arrangement des éléments iso-paramétriques cunéiforme. Le même type d'éléments rend les anneaux circulaires qui entourent les éléments en forme de coin à l'extrémité.

Dans cette région, la taille des éléments augmente le long de la direction radiale selon l'échelle exponentielle qui donne les proportions d'unité des éléments. Les plus petits éléments à l'fond de la fissure soient inférieurs ou égaux à 10-TMS, où a est une longueur caractéristique. Entre la zone circulaire et dans la région de loin de la pointe où les contraintes varient régulièrement, Il y a une zone de transition dans lequel la forme de l'élément passe progressivement du polygone incurvé à la forme de l'élément régulier. La géométrie d'un maillage typique de ce genre a été montrée dans les documents mentionnés précédemment (voir aussi Shih et Asaro, 1989). Il est à noter que près de la pointe le maillage doit être raffiné pour expliquer les gradients de contrainte élevée associées à la singularité ; dans le cas de mutilations génitales féminines, également pour tenir compte de la variation de biens matériels.

En utilisant ce type de maillage, nous montrons ici que si nous évaluons l'intégrale de domaine dans la région suffisamment fine autour de la fissure astuce, la valeur du second mandat faisant intervenir la dérivée de W est très petit, essentiellement négligeable.

Le domaine intégré dans la pratique peut être calculé dans la région proche de l'Astuce du fissure (le domaine circulaire consistant en les premières 10 ou 20 anneaux circulaires des éléments à la zone de pointe de fissure) comme l'a démontré dans la section suivante. Dans nos calculs,

comme mentionné ci-dessus, le plus petit élément est dans la taille de 10-TMS, où a est la longueur caractéristique.

Dans une telle situation, la deuxième intégrale dans peut être estimée comme suit. À l'aide de la version ci-dessus de la maille, les anneaux de 10 ou 20 premiers éléments sont disposés dans un rayon de a de la fissure. Les fonctions de poids pour les deux intégrales dans l'expression (II.43) sont q et a.q. Si la pyramide forme ibr la fonction q (Fig. II. 8. a) est utilisé, son dérivé avec aux coordonnées est l'ordre de 10^{-4} à 1 considérant que le domaine est dans un cercle de rayon respect

Ensuite, les fonctions poids des premiers et deuxième intégrales sont les ordres l0 ^(- 4) et 1, respectivement. Notez qu'a dans le dérivé de q a été déplacé vers l'intégrante de la première intégrale. La première intégrale est surpondérée par sa fonction de poids par rapport à celle du second.

En revanche, les deux fonctions ne sont pas susceptibles de se distinguent par une telle somme que celle des fonctions poids, c'est-à-dire, d'être du même ordre. Cela est dû à ce qui suit : (a) les deux mangeaient essentiellement des termes densité énergétique (énergie unité de densité\/longueur) calculées à l'aide de champs de contrainte et de déformation ; (b) les deux sont proportionnels au chargement, la place du facteur d'intensité de contrainte K; et (c) la première est proportionnelle à l'inverse du module et la seconde est proportionnelle à la dérivée du module divisé par le carré du module.

Puisqu'un tel petit domaine pour le domaine intégral est bien dans la zone de dominance K, les expressions asymptotiques (1) et (2) sont valables dans l'il. La zone de dominance K pour FGMs a été examinée en Gu et Asaro (1997 b), où il a été démontré qu'une distance de quelques pourcents de la caractéristique longueur, la différence entre les champs de contraintes des solutions asymptotiques et pleine sont accessibles à quelques pour cent. Son remplacement (1) et (2) dans les deux fonctions, (b) et (c) ne peut être confirmée. Cela nous permet d'écrire

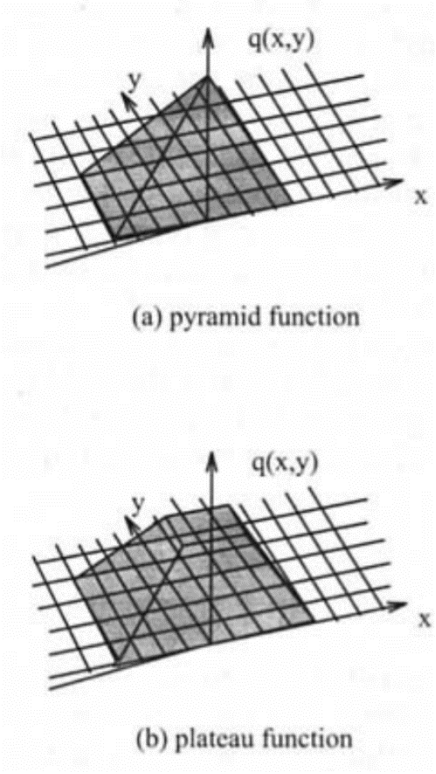


Fig. II. 8 Les deux formes de fonction q répandue parmi les

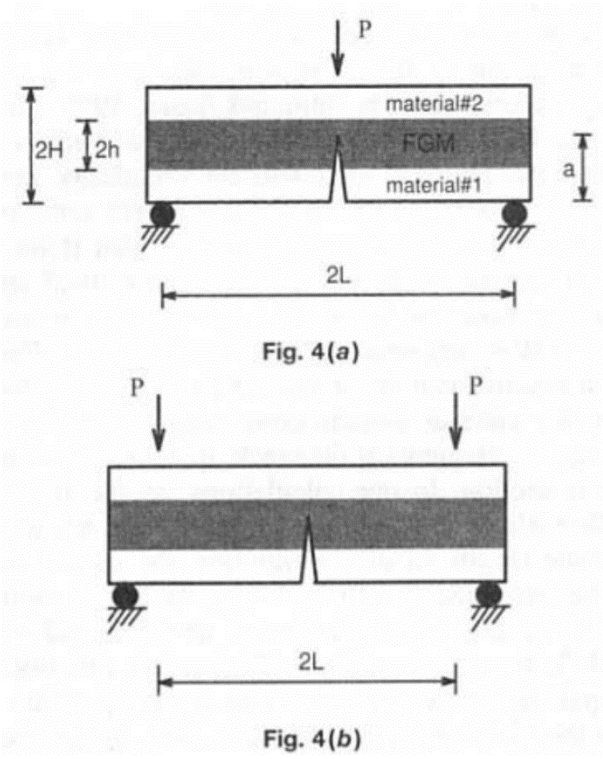


Fig. II. 9 deux spécimens flexion avec prise en sandwich Intercalaire de mutilations génitales féminines : (a) flexion trois points ; (b) quatre points flexion

$$[\text{premier intégrale}] = \frac{K_I^2}{E_0 a}\frac{f_1(\theta)}{r} \tag{II.44}$$

$$[\text{deuxiéme intégrale}] = \frac{K_I^2 E_0'}{E_0^2}\frac{f_2(\theta)}{r} \tag{II.45}$$

E_0' est la dérivée de l'élasticité à la pointe de la fissure ; f_1 et, f_2 sont obtenu à partir des fonctions angulaires en (1) et (2) et, par conséquent, ils n'ont pas beaucoup d'effet sur les amplitudes dès les deux fonctions.

Dans notre analyse, nous supposons qu'il y a mode se trouve j'ai chargement. Cependant, on peut obtenir la même conclusion pour la présentation de mode mixte à travers des étapes similaires.

En outre, $E'_0 a$ est plus ou moins proportionnelle à E_0 ainsi qu'il ressort de l'exemple suivant. Envisager l'intercalaire de mutilations génitales féminines dans la figure. II. 9 avec variation du module linéaire, nous avons $E_0 = (E_2 + E_1) / 2$ et $E'_0 a = \frac{E_0 a \zeta}{2} / h$ lorsque la fissure est au milieu de l'intercalaire de FGM,

Lorsque les indices indiquent les propriétés de matériau #1 et #2, et $\zeta = (E_2 - E_1) / (E_2 + E_1)$. La variation du multiplicateur ζ, comme E_2/E_1 varie, est petit.

Ainsi, l'échelle de deux facteurs dans l'expression ci-dessus (11) ne différeraient pas beaucoup tant qu'un et h ne diffèrent pas beaucoup, et c'est semblable à d'autres formes de modification importante.

Remarque que si h est la plus petite longueur par rapport aux autres longueurs dimensionnelles, on pourrait a choisi la longueur a caractéristique un être h donc ça a/h = 1.

Si E_0 et E'_0 Ella sont du même ordre, de l'analyse qui précède, nous estimons que la première intégrale est l0 ^(-4) fois la deuxième intégrale.

En général, la différence entre E_0 et E'_0 une est non significatif du tout, comparé à celui des fonctions deux poids et donc le second terme (7) peut être négligé. Il peut également être montré que la conclusion est vraie par une mesure semblable si le plateau Shape for le q fonctionne (Fig. II. 3 b] est utilisé.

Supposons qu'e est le rayon du domaine où l'intégrale du domaine est évaluée et en son sein que le champ peut être bien représenté par le champ du singulier (1) et (2), puis de l'analyse qui précède l'erreur de négliger le second terme peut être estimée comme

$$e \approx \frac{r_D E'_0/E_0}{1+r_D E'_0/E_0} \tag{II.46}$$

L'erreur est très faible si l'on choisit r_D est suffisamment faible.

La méthode simplifiée présente les avantages suivants : (a) il donne la même précision pour le stress facteurs d'intensité que le domaine intégral pour les matériaux homogènes, comme nous le

verrons dans les exemples numériques ; (b) l'entrée des dérivés des propriétés du matériau (dégradés) n'est pas nécessaire, tel que dans le seul matériau d'implantation numérique propriétés doivent être attribués aux éléments ou aux points d'intégration de Gauss et c'est facile à réaliser ; et (c) aucun des calculs supplémentaires ne sont nécessaires par rapport à l'affaire homogène.

Quand le gradient du coefficient de dilatation thermique de la FGM ne s'annule pas et thermiques (variation de température) de chargement est appliqué, le terme supplémentaire lié au gradient du coefficient de dilatation thermique est un intégrande sous la deuxième intégrale qui peut être écrite comme

$$[\text{thermal term under second integal}] = K_I T_0 \alpha_0' \frac{f_3(\theta)}{\sqrt{r}} \tag{II.47}$$

Ce terme peut également être négligé pour les raisons suivantes. Tout d'abord, c'est sous la deuxième intégrale (II.47). Tel qu'analysé avant, la première intégrale est surpondérée.

Deuxièmement, le facteur $\frac{1}{\sqrt{r}}$ en premier intégrale, est beaucoup plus grand que le $\frac{1}{\sqrt{r}}$ at facteur 7, dans le domaine avec rayon 10^{-4} a. Troisièmement, étant donné que la solution stress dépend uniquement du rapport de la modulé de ces deux matières pour des problèmes de traction (comme nous le verrons dans la prochaine section), les deux modules peuvent être choisis dans le calcul tel que (11) est dans une fourchette normale. Nous sommes passés d'une manière rigoureuse pour montrer que l'intégrale de domaine standard peut être utilisé directement pour les matériaux non homogènes.

Un simple trajet pour faire valoir ce qui est depuis les expressions asymptotiques sont les mêmes que ceux pour les matériaux homogènes avec les propriétés des matériaux étant ceux à la pointe de la fissure, Il existe une petite zone homogène qui peut être déclassée comme la zone de K-dominance, afin que le domaine standard intégrante est-il valide.

Mais de cette manière simple, il est impossible d'obtenir l'analyse de l'erreur ci-dessus. Lorsque le second terme est négligé, l'expression à calculer numériquement intégrale de domaine devient

$$J = \sum_{A_1} \sum_{p=1}^{n} \left\{ \left[\left(\sigma_{ij} u_{i,1} - W\delta_{1j} \right) q_{,j} \right] \det \left(\frac{\partial x_k}{\partial \eta_k} \right) \right\} w_p \tag{II.48}$$

S'il y a seulement le mode I facteur d'intensité de contrainte à la pointe en raison des propriétés du matériau symétrique, la géométrie et le chargement, il peut être évaluée directement à partir de (4). Si c'est un problème de mode mixte, le taux de libération d'énergie interaction défini dans Shih et Asaro (1989) peut être évaluées au lieu du taux de libération d'énergie.

En utilisant le taux de libération d'énergie interaction, modes I et II peut être séparé.

II.4 CONCLUSION

Dans les matériaux homogènes, le calcul de l'intégrale J est indépendant du contour considéré (Rice, 1968) ce qui permet de choisir un contour « loin » du front de fissure. Il n'est alors pas nécessaire de choisir une discrétisation spatiale très fine lors de la simulation numérique et ainsi les calculs de structures sont effectués en un temps raisonnable.

Dans les matériaux à gradient de propriétés ce n'est plus le cas. Pour effectuer les calculs de l'intégrale J dans ce type de matériau, Gu et al. (1999) choisissent une zone assez proche du front de fissure afin de considérer le matériau homogène dans cette zone et ainsi se ramener à un calcul classique de J. Or, cela nécessite une discrétisation spatiale très fine proche du front de fissure et des calculs très volumineux. Nous perdons ainsi l'avantage de l'approche par intégrale J.

Des méthodes récentes ont été développées pour retrouver l'indépendance au contour de l'intégrale J dans des matériaux à gradient de propriétés, notamment par Chen et al. (2000) qui modifient l'intégrale J en prenant en compte l'énergie élastique stockée

Dans la surface considérée. Cependant, cette intégrale J modifiée ne permet de considérer qu'un gradient de propriétés élastiques.

CHAPITRE III

CHAPITRE III. MODELISATION NUMERIQUE D'UNE FISSURE EN 3D

Sommaire

III.1 INTRODUCTION 64
III.2 FORMULATION DE PROBLEME 65
III.2.1 MODEL GEOMETRIQUE DE LA PLAQUE (TI/TIB) 65
III.3 RESULTATS ET DISCUSSIONS 67
III.3.2 EFFET DE L'EPAISSEUR DE LA PLAQUE SUR LA VARIATION DE L'INTEGRALE J 73
III.3.3 EFFET DU RAYON DE L'ENTAILLE SUR LA VARIATION DE L'INTEGRALE J 75
III.3.4 EFFET DE MODULE DE YOUNG DES CONSTITUANTS DE LA PLAQUE FGM SUR LA VARIATION DE L'INTEGRALE J 76
III.3.5 EFFET DE CHARGEMENT SUR LA VARIATION DE L'INTEGRALE J 79
III.3.5 EFFET DE L'ORIENTATION DES FISSURES SUR LA VARIATION DE L'INTEGRALE J 82
III.4 CONCLUSION 83

III.1 INTRODUCTION

Les matériaux à gradient de propriétés (FGM) appartiennent à une certaine classe de matériaux composites qui possèdent des variations spatiales lisses des fractions volumiques des constituants. Ces variations conduisent à une structure non homogène et nécessitent que les propriétés physiques soient représentées par des fonctions continues à des fins d'analyse et de calcul. Les FGM ont été utilisées dans un certain nombre de domaines technologiques et représentent un domaine important de la recherche en science des matériaux, avec potentiellement de nombreuses applications importantes. Tels que les revêtements de barrière thermique, les piles à combustible à oxyde solide, les outils de coupe haute performance et les matériaux biomédicaux.

Les recherches actuelles portent sur l'analyse par la méthode des éléments finis tridimensionnels de l'effet du matériau à gradient de propriété de la plaque de FGM, avec une fonction de la loi de puissance (P-FGM) et de la loi exponentielle (E-FGM) du module de Young le long de la largeur de la plaque le rayon de l'entaille (r-FGM) sur la variation de l'intégrale J au fond du fissure émanant de cette entaille soumise à deux conditions de charge de modes différents (mode I et mode mixte) et permettant de déterminer le gain obtenu par l'utilisation de chaque paramètre.

À cet égard, une étude paramétrique est effectuée en tenant compte de plusieurs paramètres mécaniques et géométriques tels que la fissure émanant de l'entaille, l'épaisseur de la plaque, le rayon de l'entaille, la direction de la fissure, l'effet du chargement et le module de Young de la plaque FGM. Les mandants étudient la sensibilité de l'intégrale J pour différents scénarios de configuration et leurs effets sur l'amplitude de l'intégrale J maximale dans le membre FGM. Ils seront utiles aux concepteurs et aux chercheurs car ils constituent un moyen efficace de la réduire.

L'objectif principal est de prédire si une fissure dans un composant est susceptible de se développer dans les conditions de chargement données. Ce chapitre présente une étude numérique utilisant la méthode des éléments finis 3D pour évaluer l'intégrale J en fond de fissure dans une plaque de matériaux à gradient de propriétés Ti-TiB avec entaille semi-circulaire soumise à différentes conditions de charge mécanique. Le module de Young de la plaque de matériaux à gradient de propriétés varie le long de la direction du rayon de l'entaille r-FGM avec

une fonction de la puissance et de la loi exponentielle. De plus, le coefficient de Poisson est pris comme une constante. La relation entre Intégrale J et les paramètres mécaniques et géométriques de la plaque de matériau est mise en évidence. Les résultats indiquent que la réduction de l'intégrale J peut être contrôlée de manière significative par l'indice de la loi de puissance. Il est également à noter que le contrôle de la variation des propriétés matérielles de la plaque FGM peut réduire considérablement l'intégrale J.

Les éléments finis classés sont implémentés dans le logiciel FE Abaqus pour vérifier le sous-programme USDFLD utilisé par ABAQUS (Annexe D).

III.2 FORMULATION DE PROBLEME

III.2.1 MODEL GEOMETRIQUE DE LA PLAQUE (TI/TIB)

Fig. III.1 illustre le modèle géométrique de la plaque en FGM (Ti-TiB) avec une entaille latérale semi-circulaire soumis en mode I et en mode mixte. Les caractéristiques géométriques de la plaque en FGM sont la largeur $W = 200mm$; la longueur $L = 2W = 400mm$; et l'épaisseur $h = 2mm$. Pour analyser le comportement à la rupture, une fissure de longueur (c) est supposée être initiée à l'entaille de rayon (R).

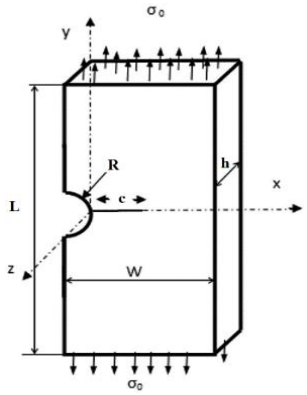


Fig. III.1 Notation géométrique de la plaque entaillée 3D-FGM

La plaque entaillée en FGM est considérée dans différents modes:

• Mode (I): $\sigma_0 = 100\,MPa$

• Mode (I+II): $\sigma_0 = \sigma_1 = 100\,MPa$ (Mode mixte)

• Mode (I+II+III): $\sigma_0 = \sigma_1 = \sigma_2 = 100\,MPa$ (Mode mixte)

Sous l'effet du chargement appliqué ($\sigma_0 = 100\,MPa$)

L'analyse a impliquée une méthode d'éléments finis tridimensionnelle en utilisant un code d'éléments finis commercialement disponible, ABAQUS Version 6.9.126.

Nous avons utilisé 47538 éléments quadrilatéraux hexaédriques et 203416 nœuds de type C3D20R avec un maillage raffiné et structuré près de l'entaille, comme illustré dans la Fig. III.2. En présence de fissure, le nombre d'éléments quadrilatéraux atteint 32213 de type C3D15 et 911 triangulaire. Éléments de type CPS3. La singularité en fond de fissure peut être intégrée à la solution en remplaçant les éléments en fond de fissure par des éléments spéciaux en quart de point 28.

La maille a été raffinée près de la zone du fond de fissure avec une dimension d'élément de 0,066 mm en utilisant au moins quinze de ces éléments fins à l'avant et à l'arrière du fond de fissure.

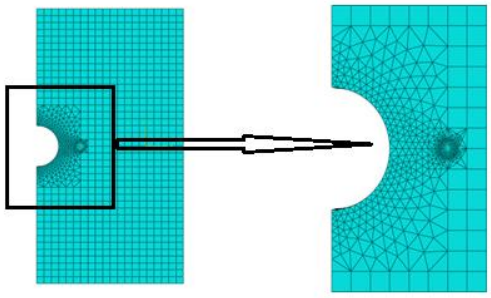


Fig. III.2 Maillage typique d'une plaque entaillée 3D-FGM

Les propriétés des matériaux utilisés pour la modélisation et l'analyse des structures FG sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1 Propriétés mécaniques utilisées pour les phases métalliques et céramiques du matériau FGM

Constituants	Module de Young (GPa)	Coefficient de Poisson (μ)
Ti	110	0.34
TiB	375	0.14
Al	72	0.346
Cu	124	0.33
Ni	215	0.312
SiC	420	0.17
ZrO_2	200	0.32
Al_2O_3	345	0.27

III.3 RESULTATS ET DISCUSSIONS

Sur la base de l'analyse FE telle que discutée dans la section 2 en utilisant Abaqus. Les résultats obtenus à partir de différentes analyses ont été présentés dans les sous-sections suivantes.

Il est important de comparer l'intégrale J entre la plaque FGM (Ti / TiB) et les matériaux homogènes Ti et la plaque TiB suivant la profondeur de la plaque, cette comparaison à été illustrée dans la Fig. III.3 (a. b. c). Les propriétés mécaniques de la FGM qui sont présentées avec une loi de puissance (P-FGM) caractérisée par un indice de paramètre de matériau (n) et une fonction de loi exponentielle (E-FGM) du module de Young ont été prises en compte pour trois modes de chargement (mode I; mode I+II; Mode I+II+III).

La variation des propriétés des FGM dans la direction du rayon de l'entaille (r-FGM) offre le meilleur choix qui reste favorable par rapport à d'autres directions, comme cela avait été mentionné dans notre analyse précédente.

Sur la Fig. III.3 (a, b) Il est à noter que l'intégrale J maximale se présente au niveau de l'épaisseur du bord de la plaque et augmente progressivement au milieu de leur épaisseur de manière asymptotique. Les courbes ont une forme parabolique. Mais, d'autre part, on observe que les courbes qui sont tracées à la Fig. III.3c ont montrent que l'intégrales J maximum ont un comportement opposé et ils sont antisymétriques par rapport à l'épaisseur du centre de la plaque. Elles sont maximales dans les extrémités de l'épaisseur de la plaque et disparaissent prés de leur centre.

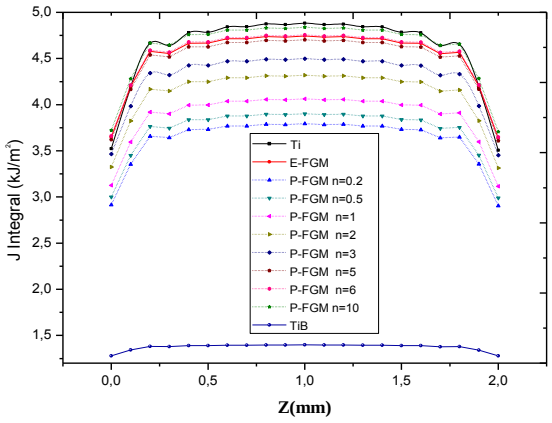
Les graphiques de la Fig. III.3 (a, b, c) montrent que l'intégrale J est plus importante pour les plaques métalliques (Ti) que pour les plaques en céramique (TiB). Pour la plaque P-FGM caractérisée avec l'indice de paramètre de matériau (n), l'analyse du résultat obtenu montre que l'augmentation de cet indice entraîne une augmentation de l'intégrale J, alors que pour $n < 6$, nous observons que la valeur de l'intégrale J à la plaque P-FGM est inférieure à celle trouvée dans la plaque E-FGM, la valeur de l'Intégrale J pour la distribution E-FGM est égale à la valeur de l'intégrale J pour la distribution P-FGM pour $n = 6$.

Il est bien connu que la formation de fissures est préjudiciable aux propriétés mécaniques des matériaux et à la charge appliquée. Par conséquent, une très faible intensité de l'intégrale J

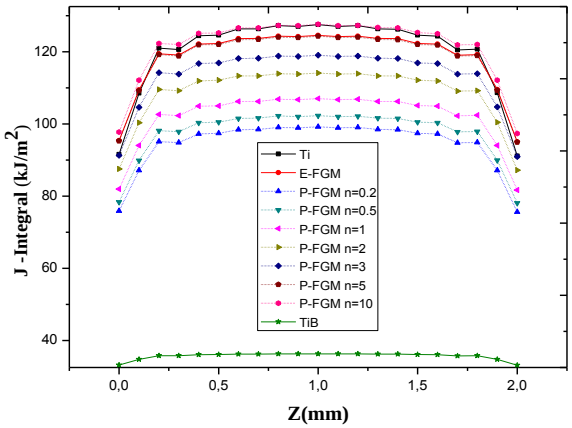
est nécessaire pour opter à l'améliorer des propriétés mécaniques de la plaque FGM. Pour prendre en compte l'effet du type de charge mécanique sur la distribution et le niveau de l'intégrale J, il est essentiel de l'analyser simultanément sous différentes conditions de la charge appliqué, ce qui est un cas plus réaliste.

Les variations de l'intégrale J en fonction de trois modes de chargement (mode I), mode mixte (mode I+II) et (mode I+II+III) sont présentées respectivement dans la Fig. III.3 a, b et c,.

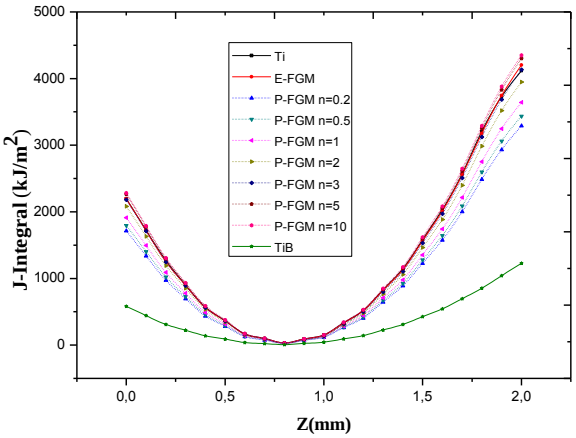
On remarque que l'intensité des intégrales $J_{(I)}$, $J_{(I+II)}$ et $J_{(I+II+III)}$, dans la plaque en FGM augmentent avec l'augmentation du type de modes de chargement du mode I au mode I+II au mode I+II+III. On remarque également que dans le mode mixte l'intégrale J est plus touchée que celle dans le mode I.



(a)



(b)



(c)

Fig. III.3 Variation d'intégrale J le long de l'épaisseur de la plaque FGM pour une longueur de fissure normalisée

$$(c/w = 0.1\ ,\ t/w = 0.1, R/w = 0.15)$$

(a) Mode I, (b) Mode I + II, (c) Mode I + II + III

Pour une meilleure analyse, on a essayé d'estimer numériquement le gain sur l'intégrale J résultant de l'utilisation de matériaux de gradient différents avec une fonction de loi de puissance (P-FGM) pour différentes valeurs d'indice (n) et de loi exponentielle (E-FGM) fonction du module de Young sur la largeur de la plaque et de la plaque TiB par rapport à la plaque Ti soumise à différentes conditions de charge mécanique (mode unidirectionnel et mode mixte). En prenant les mêmes dimensions, on définit le gain comme la différence entre l'intégrale J obtenue avec une plaque de Ti et l'intégrale J obtenue pour une autre plaque dépendant de la répartition des matériaux au fond de la fissure. Les résultats globaux sont résumés dans le Tableau 2.

Tableau 2 Variation du gain en fonction de l'intégrale J pour différentes distributions de matériaux et conditions de charge mécanique.

Mode	**Distributions de Matériaux**							
	E-FGM (%)	P-FGM (%)						
		n=0,5	n=1	n=2	n=3	n=5	n=6	n=10
Mode I	2,83	20,1	16,8	11,6	7,86	3,69	2,58	0.90
Mode I+II	2,35	19,7	16,1	10,5	6,67	2,51	2,27	0.08
Mode I+II+III	2,06	16,5	11,4	4,06	0,46	2,47	2,05	0.71

On peut remarquer que l'indice de la loi de puissance (n = 0,5) pour la plaque P-FGM indique la valeur maximale du gain pour toute une gamme de plaques par rapport à une plaque de Ti homogène, dans le cas du mode I. Dans le Tableau 2, On peut également noter que le gain diminue avec l'augmentation de l'indice (n) et une nouvelle augmentation de (n) ne montre pas une réduction significative du gain.

Nous trouvons également que le gain (%) des distributions E-FGM est presque égal à celui de la distribution P-FGM pour l'indice de loi de puissance n = 6.

Les valeurs maximales du gain en mode (I) sont beaucoup plus importantes que celles du mode (I+II) le taux de montée atteint 11%, et 21% du mode (I+II+III).

La rigidité de la plaque P-FGM (avec n = 0,5) est supérieure à celle de la plaque E-FGM. En comparant les résultats, on constate que le travail actuel est en bon accord avec le travail de Claydon [20].

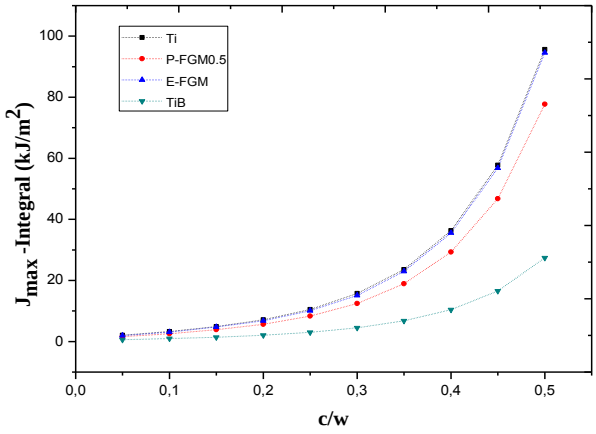
En conséquence, pour poursuivre l'analyse du comportement mécanique des plaques P-FGM, nous avons limité notre étude à l'indice de loi de puissance n = 0,5.

Dans la suite de notre étude, nous nous intéresserons uniquement aux plaques de FGM fissurées soumises à une charge en mode mixte (I+II+III), qui présentent des valeurs intégrales de J_{max} plus intenses que celles du mode (I+II).

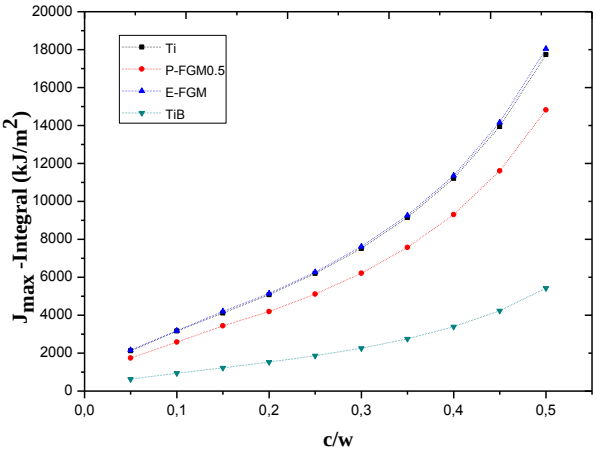
III.3.1 EFFET DE LA FISSURE ISSUE DU ENTAILLE SUR LA VARIATION D'INTEGRALE J

La fissure se trouve à l'entaille et se propage sur le ligament de la plaque; dans ce paragraphe, l'effet de la longueur de la fissure sur l'intégrale J est analysé. Fig. III.3 et 4 décrivent la variation de l'intégrale J maximale au fond de la fissure en fonction des divers rapports (c/w), sous les deux modes de charge. Il est à noter que l'intégrale J maximale augmente de façon exponentielle avec l'augmentation de la longueur de fissure et atteint son maximum pour la plus grande longueur de fissure. La différence d'intégrale J devient plus grande et plus importante avec l'augmentation de la longueur de la fissure. Ce comportement est normal car la propagation de la fissure entraîne une augmentation de la contrainte autour du front de la fissure, ce qui est à l'origine des valeurs plus élevées de l'intégrale J.

Pour les courtes longueurs de fissure, l'intégrale J maximale est la même. Par contre, lorsque la longueur de la fissure augmente, l'intégrale J pour la fissure provenant d'une entaille semi-circulaire est beaucoup plus importante en mode mixte (mode I+II+III) comparé au mode unidirectionnel (mode I) et qu'il est plus important dans une plaque de Ti qu'une autre plaque P-FGM, E-FGM et TiB, ce qui est principalement dû à l'augmentation de la fraction de céramique (TiB) par rapport au métal (Ti).



(a)



(b)

Fig. III.4 Variation de l'intégrale J maximale en fonction de la longueur normalisée de la fissure émanant d'entaille

$(t/w = 0.1\ R/w = 0.15)$

(a) Mode I, (b) Mode I + II + III

Pour mieux analyser les avantages de la plaque FGM, on a essayé d'estimer numériquement le gain sur l'intégrale J résultant de l'utilisation de (P-FGM) n = 0,5 par rapport à la plaque homogène (Ti).

On définit le gain comme le rapport de la différence entre le maximum d'intégrale J obtenu avec une plaque de Ti et le maximum d'intégrale J obtenu pour une plaque de répartition de matériau (P-FGM) n = 0,5 tout en prenant les mêmes dimensions.

Le gain intégral J est défini par:

$$\text{Gain Ratio}= \frac{\text{max J-integral (Ti)-max J-integral PFGM)}_{n=5}}{\text{max J-integral (Ti)}}$$

Fig. III.5 illustre la variation du rapport de gain maximal entre l'intégrale J et la longueur normalisée de la fissure émanant de l'entaille pour le mode I et du mode mixte (I+II+III); On observe que le gain de l'Intégrale J diminue lorsque la longueur de la fissure augmente au niveau de la plaque (P-FGM) par rapport à la plaque métalliquement (Ti) et à la plaque (E-FGM).

Le rapport de gain maximal pour la plaque en (P-FGM) n = 0,5 par rapport à la plaque de Ti est de 23% obtenu pour une longueur de fissure normalisée pour le chargement en mode (I) et de 18,53% pour une longueur de fissure normalisée pour le mode mixte (I+II+III).

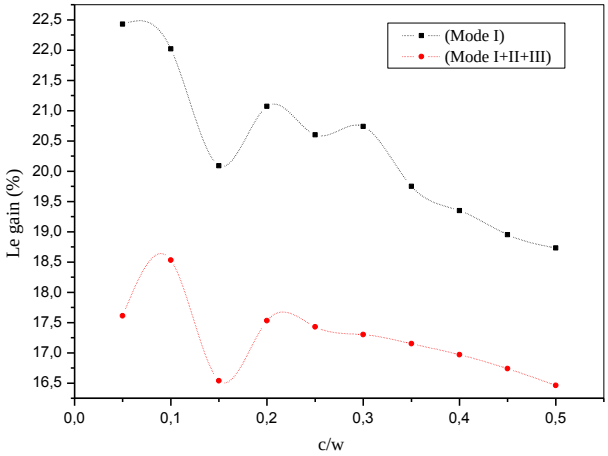


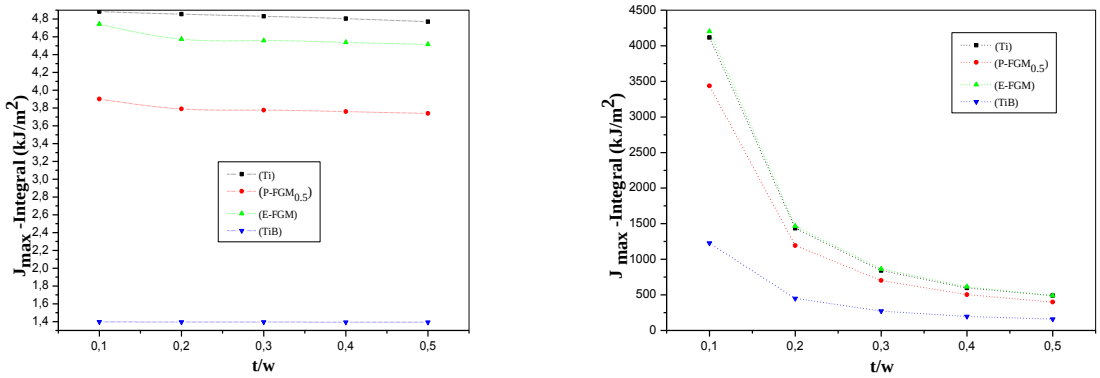
Fig. III.5 Le gail d'intégrale J vs longueur normalisée de la fissure émanant de l'entaille pour plaque Ti-TiB avec (P-FGM) n = 0,5 par rapport à la plaque Ti en mode I et mixte.

III.3.2 EFFET DE L'EPAISSEUR DE LA PLAQUE SUR LA VARIATION DE L'INTEGRALE J

Pour mettre en évidence l'effet majeur de l'épaisseur de la plaque, qui est l'un des paramètres les plus importants de la conception, une section de plaque d'extrémité uniforme est considérée avec différentes épaisseurs. L'influence de l'épaisseur des plaques sur l'étendue de l'intégrale J est analysée dans cette section. La Fig. III.6 montre l'effet de l'épaisseur normalisée de la plaque en FGM sur la variation de l'intégrale J en présence d'une entaille semi-circulaire pour deux modes de chargement.

La figure montre clairement que pour le mode de chargement I, l'intégrale J est quasi stable lorsque l'épaisseur normalisée augmente. D'autre part, il est à noter que l'intégrale J en plus proche de l'entaille dépend beaucoup plus de l'épaisseur du chargement en mode mixte (I+II+III). Une augmentation de l'épaisseur de la plaque entraîne une réduction de l'intégrale J au niveau plus proche de l'entaille dans la plaque FGM. Cette augmentation est beaucoup plus marquée lorsque l'épaisseur de la plaque FGM tend à être nulle. Au-delà de l'épaisseur normalisée, l'intégrale J de la plaque FGM converge vers une valeur asymptotique. Ce comportement nous permet de dire qu'une plaque FGM assure une bonne stabilité de la fissure par une forte absorption du champ de contrainte induit en fond de fissure. Rappelons que les choix de ces épaisseurs ne sont que théoriques afin de mieux illustrer leurs effets sur les critères de propagation d'une fissure.

Les résultats montrent qu'une augmentation de l'épaisseur de la plaque en FGM réduit proportionnellement l'intégrale J au fond de la fissure. En effet, une augmentation d'environ 10% de l'épaisseur de la plaque en FGM réduit l'intégrale J de 35%. Par conséquent, une plaque plus épaisse permet une bonne absorption du champ de contrainte émis par la fissure.



(a) (b)

Fig. III.6 Variation de l'intégrale J maximale en fonction des différentes épaisseurs normalisées $(c/w = 0.1\ ,\ R/w = 0.15)$

(a) Mode I, (b) Mode I + II + III

Le rapport de réduction de l'intégrale J dépend non seulement de l'épaisseur de la plaque de FGM utilisée et du mode de chargement, mais également de son type.

La Fig. III.7 montre la variation du rapport de gain maximal entre l'intégrale J et l'épaisseur normalisée de la plaque en P-FGM n = 0,5 pour le mode I et le mode mixte (I+II+III) par rapport à la plaque homogène (Ti). Nous observons que le gain maximal sur l'intégrale J est de 21,85% pour une épaisseur normalisée t/w=0,3 pour le mode I et de 18,18% pour une épaisseur normalisée t/w=0,5 pour le mode I+II+III.

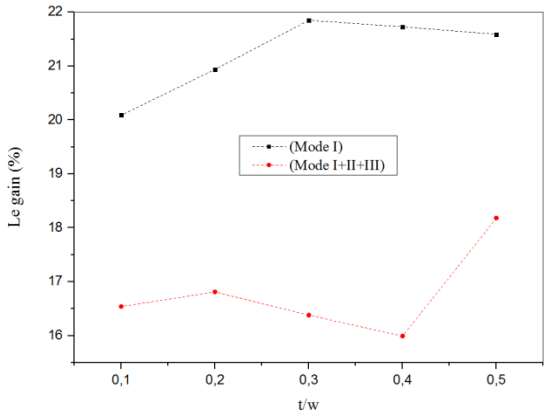


Fig. III.7 Gain intégrale J par rapport à l'épaisseur normalisée de P-FGM $_{n=0,5}$ plaque en mode I et mixte.

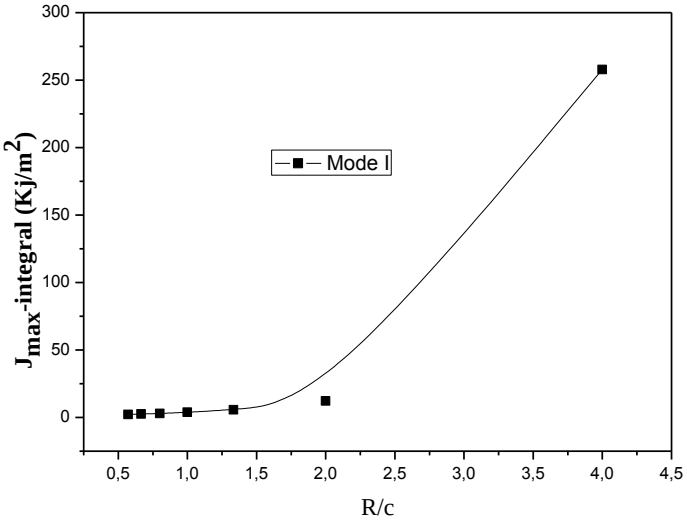
III.3.3 EFFET DU RAYON D'ENTAILLE SUR LA VARIATION D'INTEGRALE J

L'intégrale J caractérise les champs de contrainte et de déplacement au fond de la fissure et a une influence importante sur la vitesse de propagation de la fissure. Afin de comparer le comportement des fissures issues de demi-cercles pour différents rayons d'entaille, nous étudions la variation de l'intégrale J en mode I et mode mixte pour différents rayons d'entailles. Cependant, la longueur de la fissure est supposée être constante car c=10 mm situé dans la face métallique Ti de la plaque FGM.

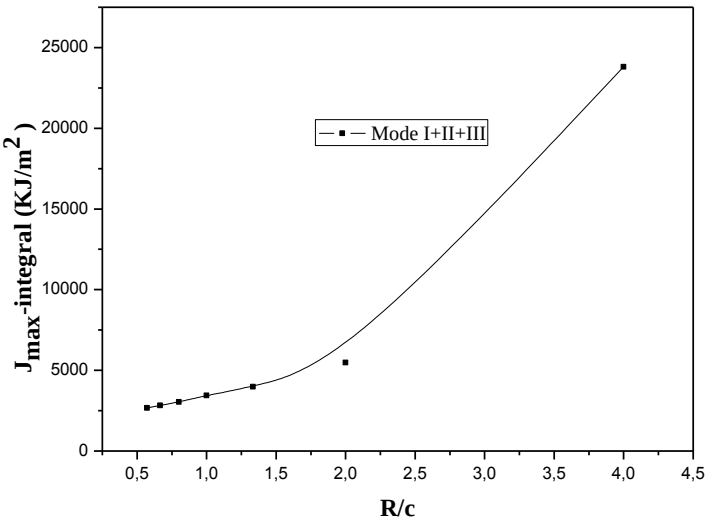
La Fig. III.8 présente le maximum de l'intégrale J au niveau plus proche de l'entaille semi-circulaire latérale en fonction du rayon de l'entaille sous différents modes de chargement pour les plaques Ti-TiB avec P-FGM n = 0,5, fonction de répartition du matériau.

On peut noter que les dimensions de rayon de l'entaille, conduit systématiquement à une augmentation de l'intégrale J. Pour le mode I, la sensibilité est inférieure pour les valeurs inférieures à 2 (R/c<2). Par contre, lorsque le rapport géométrique R/c>2, l'intégrale de J au fond de la fissure est plus importante.

Nous pouvons également voir que la différence d'intégrale J entre le mode I et mode mixte devient de plus en plus importante avec l'augmentation du rayon de l'entaille.



(a)



(b)

Fig. III.8 Variation de l'intégrale J maximale en fonction de la longueur normalisée issue d'entaille pour le rayon d'entaille en fonction de la plaque Ti-TiB avec (P-FGM) n = 0,5 ($c = 10mm$, $t/_w = 0.1$)

(a) Mode I, (b) Mode I + II + III

Les résultats montrent qu'une augmentation du rayon de l'entaille réduit proportionnellement l'intégrale J au fond de la fissure pour la plaque en (P-FGM) n = 0,5 par rapport à une plaque de Ti homogène. En effet, une augmentation d'environ 55% du rayon de l'entaille réduit l'intégrale J du même ordre.

III.3.4 EFFET DE MODULE DE YOUNG DES CONSTITUANTS DE LA PLAQUE FGM SUR LA VARIATION INTEGRALE J

Étudier l'influence du rapport de rigidité des matériaux des composants de la plaque de FGM sur la variation de l'intégrale J avec l'existence d'une fissure émanant d'entaille semi-circulaire. Ainsi, le même modèle géométrique formé par un couple métal / céramique a été considérés. Les propriétés élastiques du métal et de la céramique sont présentées comme suit dans le Tableau 1.

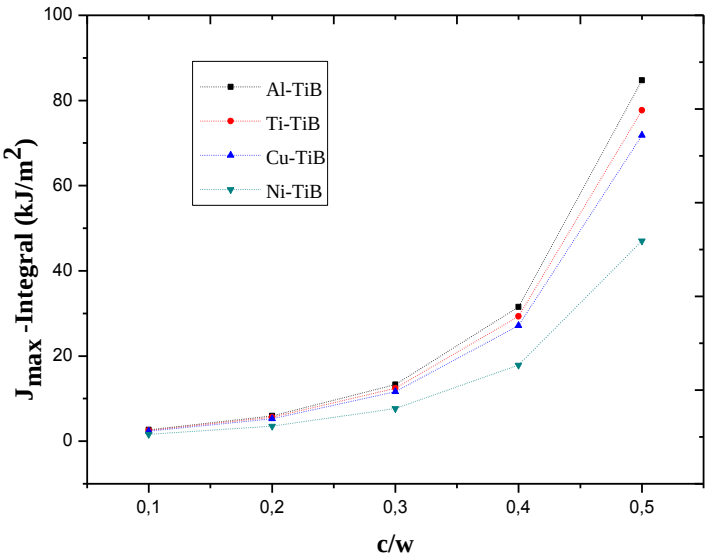
On suppose que le module d'élasticité de la plaque à calibrage fonctionnel varie continuellement sur toute la largeur de la plaque, en fonction de la fraction volumique des matériaux constitutifs, sur la base de la loi de puissance avec un indice n = 0,5.

Dans les premiers cas, la fissure émanant de l'entaille est présente dans (Ti) et elle est orientée perpendiculairement par apport à la direction de la céramique. Cette fissure est susceptible de croître sous l'action de la charge appliquée jusqu'à la céramique du couple métal / TiB de la plaque FGM.

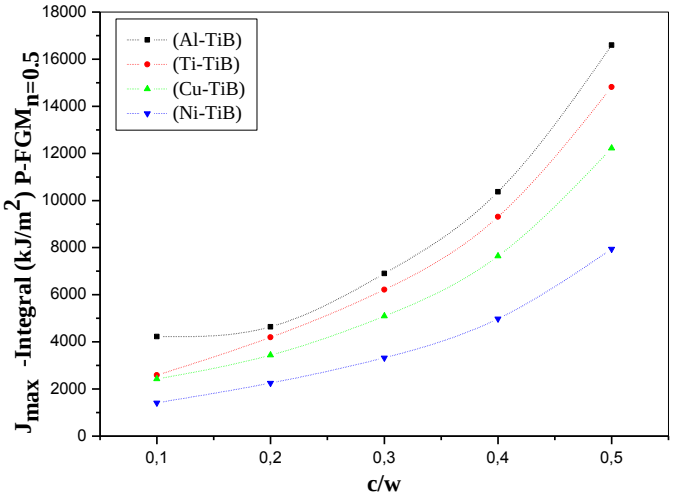
Les résultats qui sont présentés à la Fig. III.9 présente la variation de l'intégrale J en fonction de la longueur de la fissure émanant de l'entaille semi-circulaire pour différentes valeurs du rapport (E_1/E_2).

On peut constater que les valeurs de l'intégrale J sont fortement affectées lorsque le rapport (E_1/E_2) est modifié. L'intégrale J prend une courbe descendante lorsque les caractéristiques mécaniques du matériau P-FGM sont de n=0,5. (E_1/E_2) devenir plus fort. La différence de l'intégrale J devient importante avec l'augmentation du défaut de la taille géométrique qui caractérisant l'initiation et la propagation de la fissure. En d'autres termes, l'intégrale de J diminue avec l'augmentation du module de Young de métal sur le côté de la plaque de FGM.

La réduction maximale de l'intégrale J atteinte d'environ 44,46% en mode I et d'environ 52% en mode mixte pour un couple (Al-TiB) ayant des caractéristiques mécaniques et une résistance en métal de (Al) inférieures par rapport au couple (Ni-TiB) qui ayant une résistance supérieure (Ni).



(a)



(b)

Fig. III.9 Variation de l'intégrale J maximale en fonction de la longueur normalisée issue d'entailles pour différents modules de Young de céramique ($c/w = 0.1$, $t/w = 0.1$, $R/w = 0.15$)

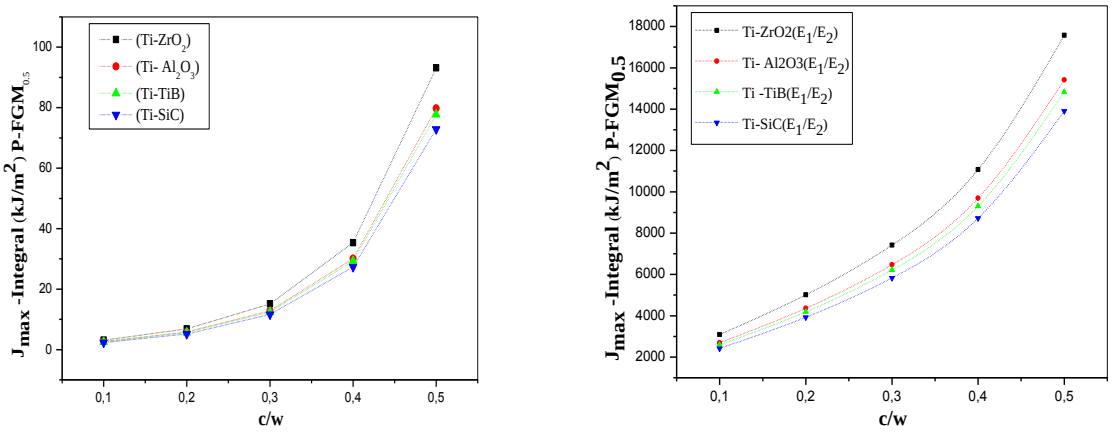
(a) Mode I, (b) Mode I + II + III

Les résultats de la Fig. III.10 confirment le phénomène observé à la Fig. 12. En effet, lorsque la fissure se dirige vers un matériau de résistance supérieure, l'intégrale J diminue au voisinage de l'entaille du couple (Ti / céramique). D'autre part, la présence de la fissure dans un matériau rigide implique une augmentation de l'intégrale J et l'énergie de propagation de la fissure prend de l'importance en passant du matériau d'une résistance supérieure à celle du matériau ayant une résistance inférieure, cette augmentation dépend de l'élasticité. Propriétés du matériau présentées.

D'une part, l'énergie de propagation de la fissure prend de l'importance en passant du matériau à résistance élevée au matériau à résistance inférieure. De plus, cette augmentation est plus remarquable avec la diminution du module de Young de céramique.

En effet, le champ résulte par l'effet du rapport de rigidité des matériaux constituons la plaque en FGM sur l'intégrale J varie d'un couple à l'autre en fonction de la différence des caractéristiques mécaniques.

Le gain de l'intégrale J atteint environ 21,77% en mode I et d'environ 21% en mode mixte pour le couple (Ti-ZrO_2) par rapport au couple (Ti-SiC).



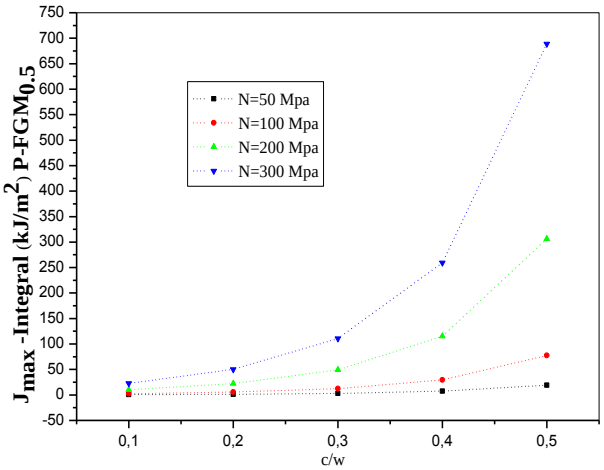
(a) (b)

Fig. III.10 Variation de l'intégrale J maximale en fonction de la longueur normalisée issue des entailles pour différents modules de Young de métal ($c/w = 0.1$, $t/w = 0.1$, $R/w = 0.15$)

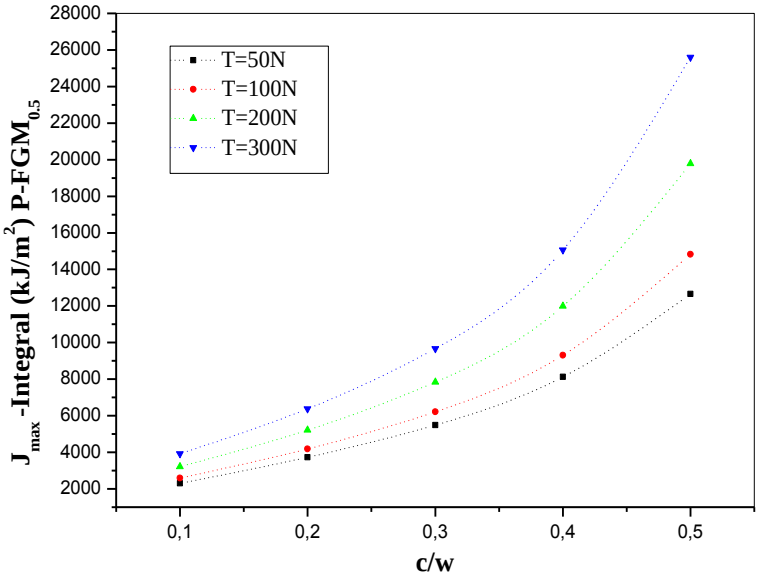
(a) Mode I, (b) Mode I + II + III

III.3.5 EFFET DE CHARGEMENT SUR LA VARIATION D'INTEGRALE J

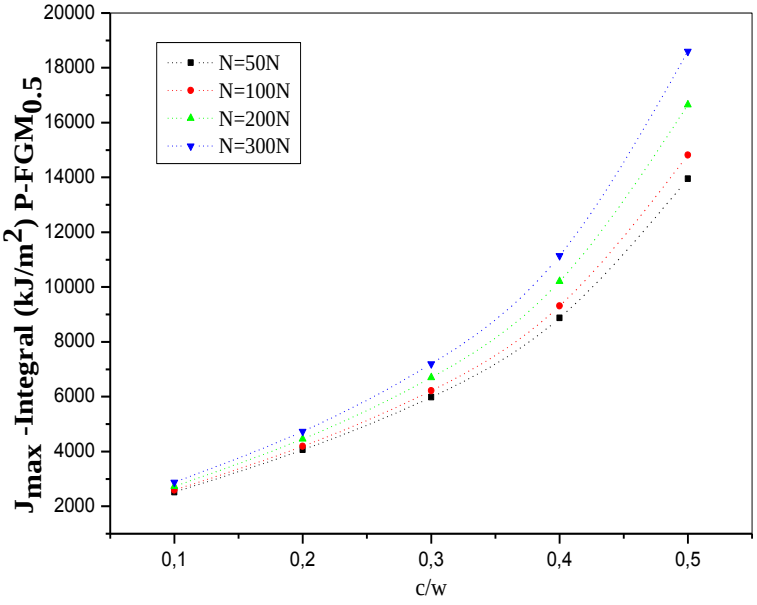
Pour analyser l'effet des types de chargement mécanique appliqués sur l'intégrale J pour différents modes d'une plaque P-FGM entaillée n=0,5 pour différentes tailles de fissure, les cas suivants sont présentés dans la Fig. III.11, nous avons remarqué que quel que soit le mode, le J est affecté proportionnellement aux charges. L'augmentation de la charge conduit à l'augmentation de l'intégrale J.



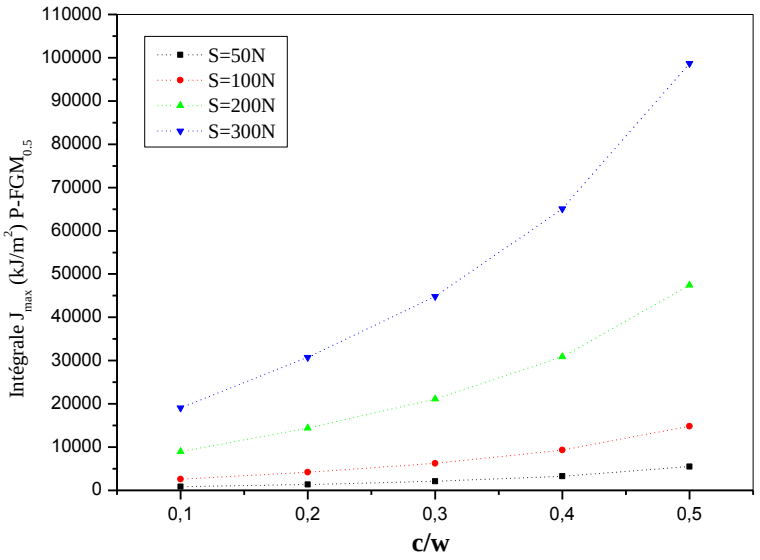
(a)



b.1.Traction



b .2. Cissaillement anti-plan (screwing)



b.3. Cissaillement (Shear)

(b)

Fig. III.11 Variation de l'intégrale J maximale en fonction de la longueur normalisée émanant des entaille pour différents chargements appliqués ($c/w = 0.1$, $t/w = 0.1$, $R/w = 0.15$)

(a) Mode I, (b) Mode I + II + III

Pour une meilleure compréhension de l'effet du chargement, une analyse de la propagation de la fissure pour différentes charges appliquées est également représentée dans la Fig.III.11. L'influence de la charge augmente avec l'augmentation de la longueur de la fissure. S'explique que l'augmentation de la taille de la fissure entraîne une augmentation dans le champ de contrainte au fond de la fissure, ce qui conduit à une saturation du transfert des contraintes. Cette saturation implique une augmentation dans l'intégrale J en fonction de la taille de la fissure.

Le Tableau 3 illustre la variation du gain en fonction de l'intégrale J pour différentes conditions de charge mécanique du la plaque en P-FGM entaillé avec n = 0,5 par rapport à une plaque homogène (Ti) soumise au même type de charge. Nous remarquons que la réduction maximale de cette intégrale J est respectivement de 97% en mode I et de 96% en composante de cisaillement pour le mode mixte. Le taux de réduction de l'intégrale J est relativement faible en traction pour le mode mixte par rapport au mode I.

Tableau 3 Variation du gain en fonction de l'intégrale J pour différentes conditions de charge mécanique.

Chargement	Traction (%)	Cisaillement anti-plan(%)	Cissaillement (%)
Mode I	97	-	-
Mode Mixte (I+II+III)	25	51	96

III.3.5 EFFET DE L'ORIENTATION DES FISSURES SUR LA VARIATION D'INTEGRALE J

La Fig. III.12 montre la variation de l'intégrale J en fonction de la variation de l'angle d'inclinaison de la fissure avec une constante de la longueur imposée normalisée. Les résultats obtenus pour sept positions de la fissure principale issue de l'entaille semi-circulaire par rapport au ligament de la plaque entre θ=0° et 90°.

Les courbes prennent des valeurs maximales lorsque l'angle θ diminue. On remarque que la fonction d'intégrale J passe par un maximum correspondant à l'angle θ=0° de la fissure (c'est-à-dire que la fissure est orientée perpendiculairement par rapport à la charge appliquée) jusqu'à la valeur minimale obtenue pour θ=90°. Les valeurs maximales de l'intégrale J en mode I+II+III sont beaucoup plus importantes que celles du mode I, le taux de montée atteint 283% pour θ=0° et 110% pour θ=90° respectivement

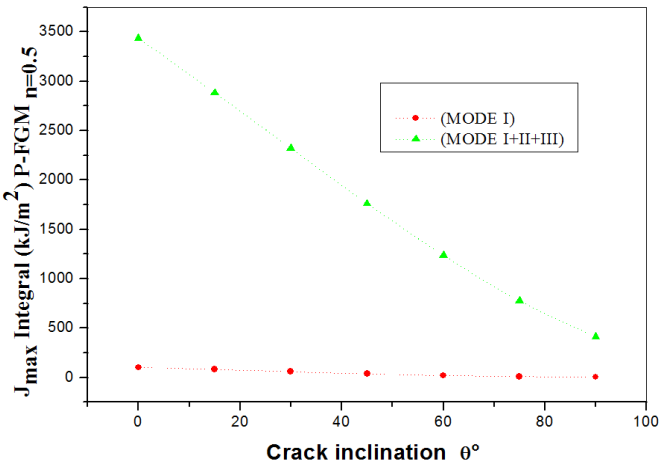


Fig. III.12 Variation de l'intégrale J maximale en fonction des différentes orientations d'angle pour une fissure de longueur normalisée ($c/w = 0.1$, $t/w = 0.1$, $R/w = 0.15$)

La variation relative du gain sur l'intégrale J (entre l'inclinaison de la fissure varie de θ=0° à θ=90°) diminue de l'ordre de 95% à 85% lorsque la plaque FGM est chargée en mode I et mode mixte, respectivement par rapport aux mêmes dimensions de la plaque et à la même inclinaison de fissure pour plaque homogène (Ti).

III.4 CONCLUSION

Les structures réelles sont de formes géométriques complexes contenant de nombreuses zones de concentrations de contraintes. Ces sites sont caractérisés par des sections faibles dues à la présence d'entailles qui sont les principales causes d'initiation des fissures. La connaissance de la distribution du champ de contraintes au voisinage d'une entaille est d'une extrême importance pour l'analyse de la variation de l'intégrale J.

L'étude a été réalisée afin de déterminer les performances de la plaque FGM (Ti-TiB) pour réduire l'intégrale J calculée pour au fond de fissure émanant d'entaille semi-circulaire en mode I et mode mixte. Lorsque la fissure se propage à partir de l'entaille, elle reçoit la force motrice du champ de contraintes qui l'entoure.

Dans ce chapitre, la méthode des éléments finis 3D est appliquée pour analyser le comportement d'une fissure émanant d'une entaille semi-circulaire qui se développant à partir du métal (Ti) et orientée perpendiculairement en direction de la céramique (TiB).

L'intégrale J a été trouvée pour plusieurs combinaisons de lois de plaques FGM en ce qui concerne la combinaison variable de la longueur de la fissure, de l'épaisseur de la plaque, du rayon d'entaille, du module de Young des constituants de la plaque FGM et de l'orientation de la fissure.

Les résultats de nos recherches sont assez convaincants et permettent de tirer les conclusions suivantes:

- Les propriétés de la plaque à entaille FGM ont des effets significatifs sur la variation de l'intégrale J à la pointe de l'entaille.
- L'augmentation de l'indice de loi de puissance (n) provoque une augmentation de l'intégrale J pour la plaque P-FGM.

Pour l'indice de loi de puissance n = 6, la distribution d'Intégrale J de la plaque P-FGM est similaire à celle de l'intégrale J de la plaque E-FGM.

Pour l'indice de loi de puissance n <6, l'intégrale J de la plaque P-FGM est inférieure à celle trouvée dans la plaque E-FGM.

En résumant les résultats, on peut conclure que, dans le mode mixte, l'intégrale J est plus affectée que celle du mode I.

L'augmentation de la taille de la fissure a entraîné une augmentation appréciable de l'intégrale J dans la plaque à entaille FGM.

La sensibilité de la propagation de la fissure caractérisée par son intégrale J est plus importante dans la plaque qui présente une résistance mécanique plus élevée.

Lorsque l'épaisseur de la plaque diminue, l'absorption de l'énergie de propagation de la fissure émanant de l'entaille devient importante en mode mixte. Alors qu'il n'a pas d'effet significatif sur la variation de l'intégrale J en mode I.

L'effet de le rayon d'entaille sur l'intégrale J au fond de la fissure de la plaque FGM a un impact très significatif. L'augmentation de l'intégrale J devient de plus en plus importante avec l'augmentation du rayon de l'entaille semi-circulaire de la plaque de FGM.

Lorsque la fissure se propage vers un matériau moins rigide, elle entraîne une augmentation de son intégrale J: cas des couples (céramique / métal).

La présence de la fissure dans un matériau ductile (métal / céramique) diminue l'intégrale J.

Lorsque la fissure se propage dans un matériau ductile, son intégrale J au fond de la fissure diminue; alors que le phénomène inverse se produit si la fissure se propage vers un matériau de moindre résistance; son intégrale J au fond de la fissure augmente, il a la tendance de s'accélérer.

Lorsque la fissure se propage vers un matériau de résistance supérieure, son intégrite J au fond de la fissure diminue.

L'intégrale J est affectée par l'effet de la charge en fonction de la taille de la fissure; lorsque la charge appliquée augmente, l'intégrale J est inversement proportionnelle, l'influence de la charge augmente avec l'augmentation de la longueur de la fissure.

On peut constater qu'une réduction de l'angle d'orientation par rapport à la charge appliquée entraîne une augmentation de l'intégrale J.

On a constater aussi que les meilleurs résultats sont obtenus par l'orientation de l'angle de fissure à 0 ° en fonction de la direction de la charge.

L'orientation de la fissure à 90 ° indique une valeur élevée de l'intégrale J, ce qui est nuisible pour notre structure.

Le gain d'intégrale J dépend des propriétés mécaniques et géométriques de la plaque FGM. Ces propriétés doivent être optimisées pour améliorer les performances et la durabilité de la plaque de FGM fissurée.

De la présente analyse, on peut conclure que l'intégrale J au niveau du fond de fissure pour une plaque à entaille peut être réduite efficacement en utilisant un matériau gradué de manière fonctionnelle présentant des propriétés de matériau variant dans le sens de la largeur (sens du rayon de l'entaille r-FGM).

La réduction peut être contrôlée de manière significative par l'indice de la loi de puissance. On peut choisir l'indice de la loi de puissance (n=0,5) pour avoir la moindre intégrale J. En outre, il est également observé que l'intégrale J peut être réduite en augmentant l'épaisseur de la plaque FGM.

Il est recommandé de choisir une plaque avec un rayon d'entaille avec un bail de 20% pour la longueur de la fissure ($R/c<2$).

Les orientations et la longueur de la fissure doivent être optimisées.

Il est également à noter que le contrôle de la variation des propriétés matérielles de la plaque FGM peut réduire considérablement l'intégrale J.

Ce chapitre présente une étude pilote visant à trouver une réponse susceptible de fournir un moyen efficace d'analyser l'intégrale J au fond de la fissure et de la réduire par une optimisation de divers paramètres géométriques et des propriétés mécaniques de la plaque FGM.

CHAPITRE IV

CHAPITRE IV. ANALYSE DE L'INTERACTION ENTRE DEUX FISSURES DANS LA PLAQUE DE FGM (TIB/TI) SOUS MODE I EN 2D

Sommaire

IV.1 INTRODUCTION 88
IV.2 FORMULATION DES ELEMENTS FINIS 90
IV.3 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS 92
IV.3.1 EFFET DE L'INTERACTION FISSURE-FISSURE EN FONCTION DE LEUR POSITION SUR INTEGRALE J 92
IV.3.2 EFFET DU RAYON DE L'ENTAILLE ET DU GRADIENT DE MATERIAU β SUR L'INTEGRALE J 100
IV.3.3 COMPORTEMENT DE FISSURES FIXES ET OBLIQUES EMANANT D'UNE PLAQUE DE FGM A DOUBLE ENTAILLE SOUS TRACTION 102
IV.3.3.1 COMPORTEMENT DE FISSURES FIXES ET OBLIQUES ÉMANANT D'UNE PLAQUE DE FGM À DOUBLE ENTAILLE SOUS TRACTION 103
IV.3.4 NOUVELLES TECHNIQUES POUR REDUIRE L'INTEGRALE J AVEC LES MATERIAUX FGM 105
IV.3.4.1 EFFET DES COUCHES DE FGM JOINTES SUR UNE PLAQUE DE CERAMIQUE (TIB) POUR REDUIRE DE L'INTEGRALE J 105
IV.3.4.2 EFFET DU RAYON DE LA COUCHE FGM ENTAILLEE POUR REDUIRE L'INTEGRALE J 107
IV.4 CONCLUSION 108

IV.1 INTRODUCTION

Les formations de fissures dépendent fortement de la qualité des matériaux, de la charge, de l'agression environnementale et des conditions de conception des composants mécaniques. En général, la fissure s'est développée perpendiculairement à l'axe de chargement, mais dans certaines circonstances, la fissure se propage également de manière oblique, en particulier à la suite d'une fissure froide induite par l'hydrogène après le soudage du métal. Dans ce cas, la plupart des fissures ne sont pas apparues dans une seule, mais sous la forme de fissures multiples.

On peut trouver d'énormes travaux dans l'analyse des fissures normales dans la littérature ouverte. Par exemple, Matsumto et al.ont évalué le facteur d'intensité de contrainte d'une fissure normale le long de deux matériaux différents en utilisant une méthode de taux de libération d'énergie d'interaction et d'élément limite. Afin d'indiquer la fiabilité de leur méthode, certains modèles numériques sont utilisés et comparés. La présente méthode est capable de produire des résultats plus précis avec un maillage grossier que la méthode basée sur l'extrapolation de déplacement qui est basée sur la méthode des éléments finis.

Hammond et Fawaz ont passé en revue les facteurs d'intensité de contrainte de spécimens de tension de tailles différentes présentant des tensions uniques. La méthode des éléments finis est utilisée pour calculer les facteurs d'intensité de contrainte pour des larges gammes de géométries de fissures et d'échantillons. Une comparaison est également effectuée entre la corrélation existante et la corrélation généralement satisfaisante entre leurs résultats et les différences importantes d'environ 12,7%. est observé pour les fissures courtes dans le rapport de forme de la petite plaque.Ismail et al.ont étudié les facteurs d'intensité de contrainte des fissures à double bord dans une grande plaque à gorge sous traction de mode I. Ils ont utilisé la méthode des éléments finis pour déterminer le facteur d'intensité de contrainte via la méthode des intégrales de domaines. On constate numériquement que les SIF sont fortement affectées par la profondeur relative de la fissure et les géométries des rainures. On constate également que le grand sillon est capable de réduire les SIF par rapport aux entailles circulaires en raison de facteurs de concentration de contrainte plus faibles.

Plusieurs travaux discutés sur les multiples fissures normales. Par exemple, Yan et Miao ont étudié l'interaction de fissures multiples dans une plaque rectangulaire à l'aide de la méthode des

éléments finis. Ils ont indiqué que la méthode des éléments finis était simple mais précise pour déterminer les facteurs d'intensité de contrainte de multiples problèmes de fissure. Tandis que Yang et Soh ont développé une méthode d'éléments finis utilisant un potentiel complexe et une technique de cartographie conforme pour étudier les multiples problèmes de fissure. La méthode développée est utile pour modéliser les interactions entre fissures et défauts. Shu et al. ont étudié les problèmes de trois fissures sur les deux bords de la feuille de largeur finie en mode de chargement I.

Ils ont modélisé les fissures multiples à l'aide de la méthode des éléments finis et en raison de l'effet symétrique, seule la moitié du modèle est développée. Ils ont constaté que, lorsqu'il existait plusieurs fissures, la flexibilité de la plaque augmentait et que les facteurs d'intensité de contrainte aux fonds des fissures diminuaient.

Ismail a étudié les facteurs d'intensité de contrainte de trois fissures de bord parallèles sous des moments de flexion. Les fissures sont modélisées à l'aide de la méthode des éléments finis. Différentes longueurs et espacements relatifs des fissures sont utilisés. On a constaté qu'en raison de la présence de fissures multiples au bord des fissures, la répartition des contraintes est relâchée et, par conséquent, les facteurs d'intensité de contrainte pour toutes les fissures diminuent et, lorsque la distance entre les fissures augmente, l'interaction semble être diminuée et peut se produire. Être négligé surtout pour la fissure (hirondelle). Le comportement de la fissure décalée lors du chargement en mode mixte.

En termes de fissures inclinées, plusieurs travaux sont trouvés. Kuang et Chen ont utilisé une méthode d'extrapolation par déplacement pour étudier les problèmes de fissures en mode mixte lors du chargement en mode I. Deux paramètres importants sont utilisés, tels que la longueur de la fissure et la taille de l'élément au fond de la fissure. Cependant, la fissure n’est inclinée que sous un angle limité, alors il est difficile de comprendre le rôle des angles sur les facteurs d’intensité de contrainte.

La présente étude consiste à examiner la simulation utilisée pour calculer l’intégrale J du comportement de la fissure principale émanant d’une entaille semi-circulaire et d’une entaille double semi-circulaire et son interaction avec une autre fissure pouvant se produire dans diverses positions de la plaque de FGM (TiB / Ti) sous mode I.

L'intégrale J sont déterminées pour différentes charges appliquées. La plaque fissurée est jointe en collant une couche d'entaille en FGM à la plaque de TiB sur son double côté. La détermination du gain sur l'intégrale J à l'aide de la couche FGM est mise en surbrillance.

Le calcul de l'intégrale J des FGM implique la direction du rayon de l'entaille afin de réduire l'intégrale J. Les éléments finis sont implémentés dans le logiciel FE Abaqus 6.9 pour vérifier le sous-programme utilisé par l'USDFLD donné en Annexe D.1.

Iv.2 FORMULATION D'ELEMENTS FINIS

Cette section détaille la formulation d'éléments finis en pointe de fissure enrichis pour les analyses de rupture en mode I de fissures bidimensionnelles dans les FGM. Semblable à de nombreuses autres études dans la littérature, la forme des fonctions de gradient de propriété du matériau est choisie pour être exponentielle, le module d'élasticité varie en fonction de:

$$E(x) = E_1 e^{\beta r} \quad \text{(IV.1)}$$

$$\beta = \frac{1}{h} Ln\left(\frac{E_1}{E_2}\right) \quad \text{(IV.2)}$$

Où β est une constante matérielle et r est la coordonnée par laquelle la propriété matérielle change le long de rayonne d'entaille (r-FGM). E est le module de Young, E_1 est le module de Young à $r = r_0$, E_1 et E_2, respectivement, module de Young pour la céramique et le métal. Le Tableau 1 indique l'échelle de longueur en fonction des variations des propriétés. Pour validation du modèle FE.

Table 1 Propriétés matérielles du Ti et du TiB

Matériaux	Module de Young (GPa)	Coefficient de Poisson
Ti	110	0.34
TiB	375	0.14

Comme le montre la Fig. IV.1, une plaque rectangulaire de FGM fissurée(Ti-TiB) avec une entaille semi-circulaire sur le côté sous chargement uniforme (σ_0=100 MPa) est simulée numériquement dans le code FEM ABAQUS version 6.9.126.

Les caractéristiques géométriques de la plaque FGM sont ; la largeur W=200 mm; la longueur H = 2W = 400mm. Pour analyser le comportement à la rupture, une fissure de longueur (c) est supposée être initiée à l'entaille de rayon (R).

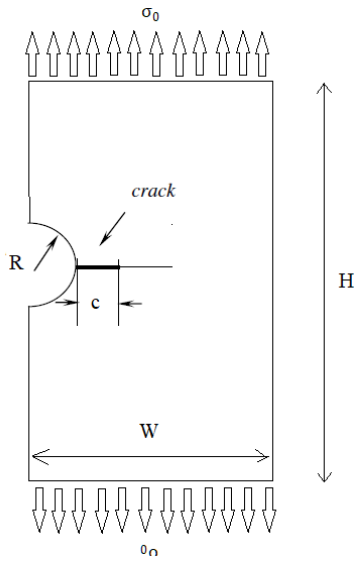
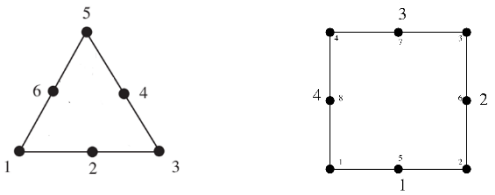


Fig. IV.1 Une plaque FGM rectangulaire fissurée sous chargement uniforme $(H, a, a_0, {}^{W}/_{H} = 0.5, {}^{r}/_{W} = 0.15, \sigma_0 = 80\ \text{MPa})$

Nous avons utilisé 9316 éléments Quadratique CPS6M: triangle de contrainte d'un plan quadratique modifié à 6 nœuds figure IV.2 (a). Nous avons utilisé 65546 nœuds dans le modèle en vrac, élément CPS8R: Un quadrilatère à contrainte plane biquadratique à 8 nœuds Fig. IV.2 (b), maillage de balayage quadrant dominant près des fonds de fissures, comme illustré à la Fig. IV.3.



(a) (b)

Fig. IV.2 Quadrature gaussienne: CPS6M(a), CPS8R (b).

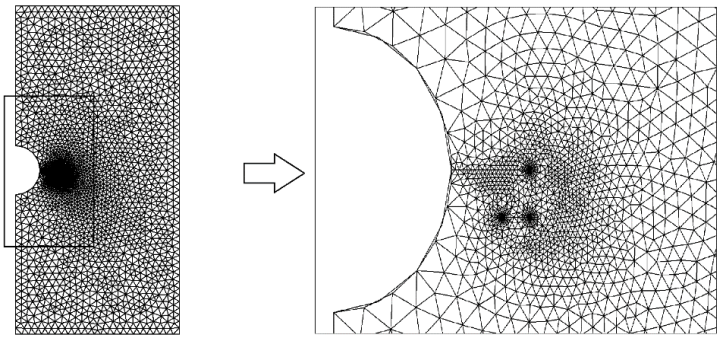


Fig. IV.3 Modèle de plaque maillée.

Iv.3 RESULTATS ET DISCUSSIONS

Dans cette étude, le calcul numérique est basé sur la FE par le code de calcule ABAQUS; la direction de variation du module de Young de la FGM est conforme à la r-FGM.

Iv.3.1 EFFET DE L'INTERACTION FISSURE-FISSURE EN FONCTION DE LEUR POSITION SUR INTEGRALE J

Dans cette section, nous avons étudié l'influence de l'interaction entre deux fissures AB et CD en fonction de leur position sur l'intégrale J.

Cinq configurations géométriques différentes entre deux fissures AB et CD sont étudiées, leurs effets d'interaction sont analysés et comparés. La Fig. 5 montre les détails et la désignation des formes géométriques considérées.

- **(a)** Deux fissures (AB) et (CD) sont parallèles (il est perpendiculaire à la charge appliquée), et l'interdistance transversale L entre ces deux fissures est supposée variable.
- **(b)** Deux fissures (AB) et (CD) sont parallèles (il est perpendiculaire à la charge appliquée), et l'interdistance longitudinale d entre ces deux fissures est supposée variable.
- **(c)** Deux fissures (AB) et (CD) colinéaires (orientées par la même ligne horizontale et perpendiculaire à la charge appliquée) et l'interdistance longitudinale (d) entre ces deux fissures est supposée variable.
- **(d)** On suppose que la fissure horizontale (CD) au niveau de l'entaille avec une orientation fixe et une fissure d'orientation inclinée (AB) est variable.
- **(e)** L'orientation des fissures entre les entailles (AB) et (CD) varie; Dans ce cas, les deux tailles de fissure sont supposées invariables.

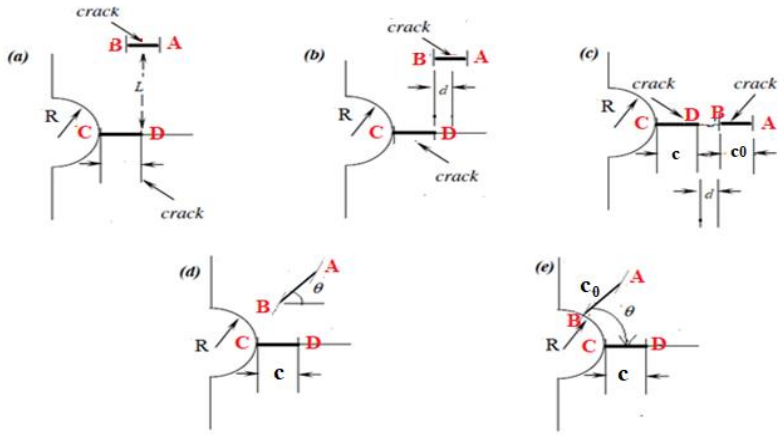


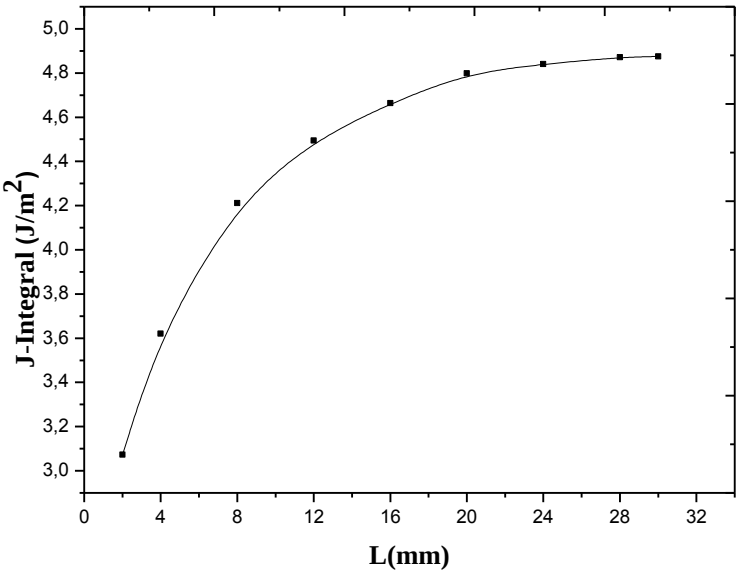
Fig. IV.4 Interaction entre deux fissures pour différentes positions.

3. 1.1 Cas (1):

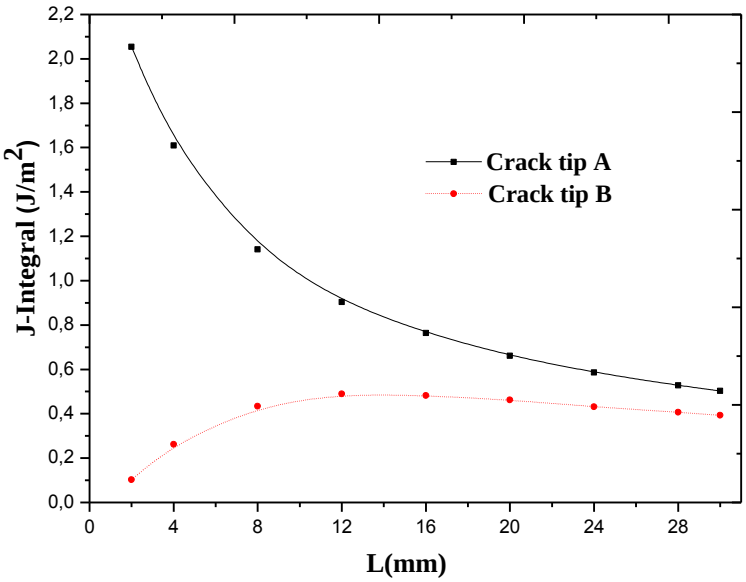
L'objectif de cette investigation est d'analyser l'effet de la distance L séparant deux fissures AB et CD. Les deux fissures sont considérées de taille constante et ont la même longueur; la fissure CD à l'entaille est parallèle à la fissure AB et située près de celle-ci, comme indiqué sur la fig. IV.4.a.

Fig. IV.5. Présent les variations de l'intégrale J au fond de la fissure D de la fissure CD par rapport à la distance L. On peut observer que l'intégrale J au fond de la fissure devient plus grande avec la distance transversale. Il a une valeur maximale à L = 24 mm, il se stabilise et l'effet d'interaction de ces fissures disparaît complètement.

Le comportement est prouvé par les résultats de la Fig. IV.5.b qui présentent la variation de l'intégrale J aux fonds A et B de la fissure AB. L'intégrale J devient plus petite à la pointe A lorsqu'elle s'éloigne de la fissure CD et il se stabilise sur une distance L> 24 mm, après quoi l'intégrale J devient indépendante sur une distance L inférieure à 24 mm, la valeur de l'intégrale J a une valeur exponentielle. Évolution avec la distance décroissante L. On observe que la valeur d'intégrale J à la pointe A est supérieure à celle de la pointe B. L'effet de l'interaction disparaît lorsque la distance entre les fissures approche de 24 mm, à laquelle les valeurs d'intégrale J aux pointes A et B au similaire.



(a)



(b)

Fig. IV.5 Variation de l'intégrale J au fond de fissure en fonction de la distance L. (a) fond de fissure D (b) fond de fissure A et B

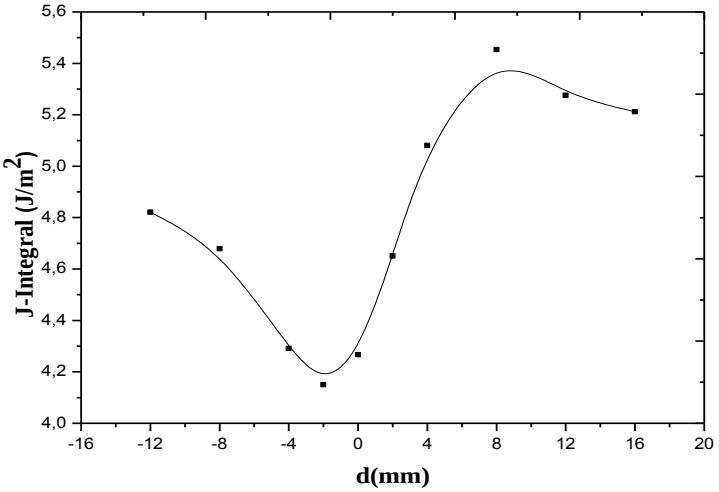
3. 1.2 Cas (2):

Dans la partie suivante, la fissure AB est déplacée transversalement près de l'entaille de la fissure CD (voir Fig. IV.4.b. Ce déplacement a un effet sur l'intégrale J présenté dans la Fig. IV.6.a).

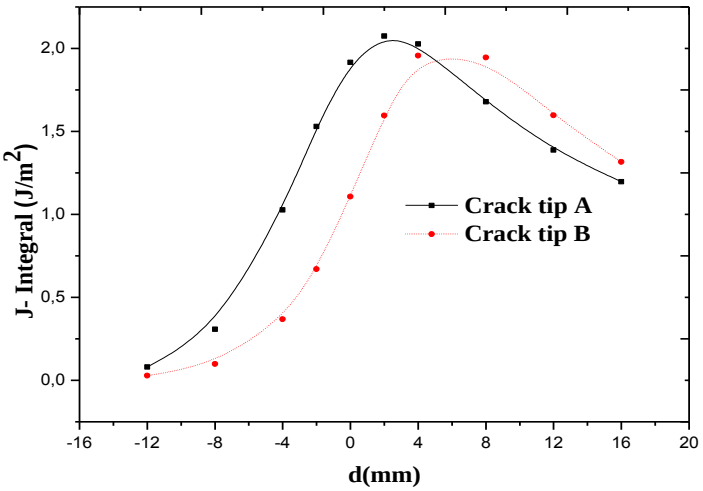
On observe que la valeur à la pointe D est maximale lorsque la distance transversale d = 8 mm et minimale lorsque d = 0 mm; lorsque d> 0 mm ou d <8 mm, l'effet de l'interaction disparaît complètement et l'intégrale de J aux fonds de la fissure CD est stabilisée et devient indépendante.

L'effet de la distance transversale est également étudié pour les fonds de fissures AB. Ceci est illustré à la Fig. IV.6.b. A partir de cette figure, les valeurs maximales de l'intégrale J aux fonds A et B sont atteintes lorsque d tend à 2 mm.

Le minimum est obtenu pour d = -12 mm et d = 16 mm pour lequel l'effet d'interaction disparaît. La forme de la Fig. IV.6. Montre que l'intégrale J est critique à d = 2mm où l'effet est significatif.



(a)



(b)

Fig. IV.6 Variation de l'intégrale J au fond de la fissure en fonction de la distance d. (a) fond de fissure D (b) fond de fissure A et B.

3. 1.3 Cas (3):

D'après les études précédentes traitant l'effet dû au déplacement longitudinal représenté dans la Fig. IV.4.c, les résultats obtenus sont représentés à la Fig. IV.7.

La figure montre les variations de l'intégrale J par rapport à la distance (d) entre les fonds de fissure. On remarque que l'effet d'interaction dépend de la distance d.

Lorsque le fond de fissure B se rapproche du fond de fissure D. L'intégrale J au fond de

fissure D augmente de façon exponentielle.

On constate également une distance critique à d = 16mm, après cette longuer l'intégrale J n'est pas stable. L'effet d'interaction disparaît complètement. L'effet de ces fissures est déterminant lorsqu'elles sont plus proches les unes des autres.

Etant donné que la pointe de la fissure B se situe dans la direction de propagation de la fissure CD, la valeur d'intégrale J est supérieure à la pointe A qu'à la pointe B. Pour une distance d> 12 mm, les valeurs d'intégrale J aux fonds de la fissure A et B sont similaires.

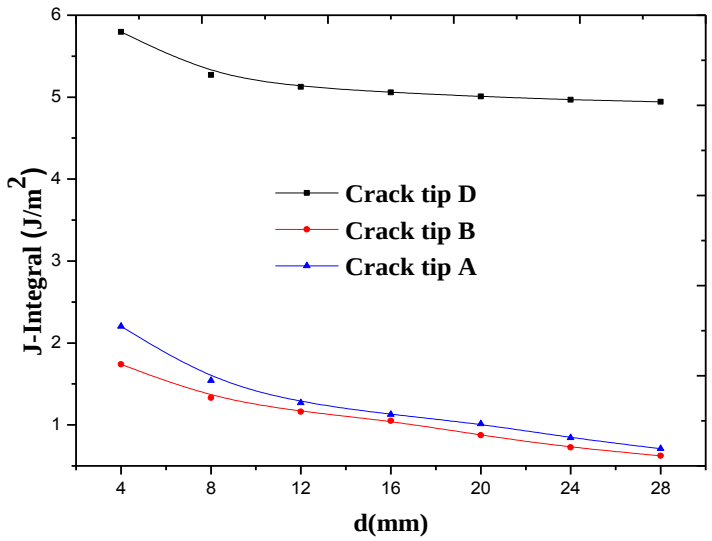


Fig. IV.7 Variation de l'intégrale J au fond de la fissure en fonction de la distance d.

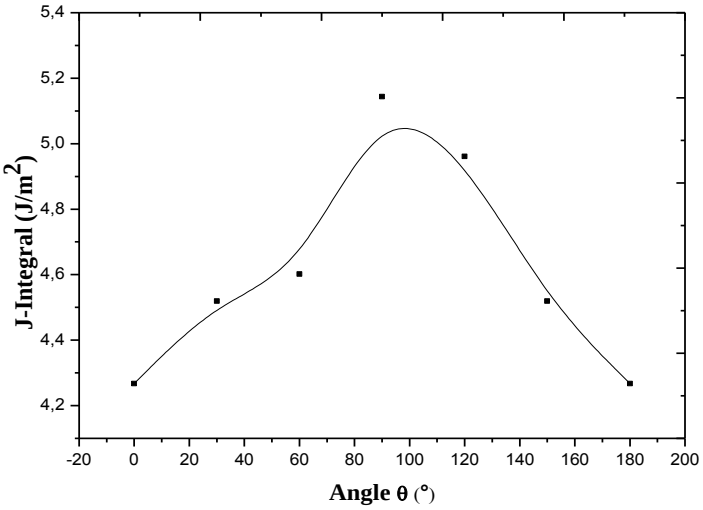
3. 1.4 Cas (4):

Dans la sous-section suivante, l'orientation de la fissure AB varie près de l'entaille de fissure CD, comme indiqué dans Fig. IV.4.d

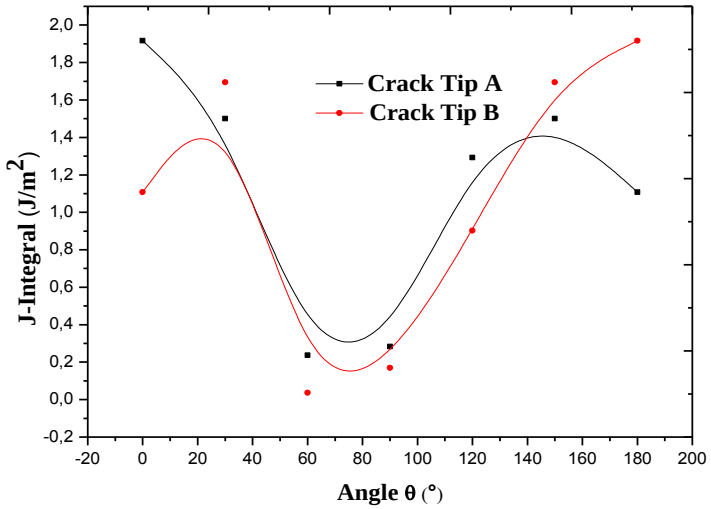
L'effet de l'orientation de la fissure AB sur l'intégrale J au fond de la fissure D est représenté dans la Fig. IV.8.a. On peut observer que l'intégrale J est maximale lorsque la fissure AB est parallèle au chargement vers un champ à faibles contraintes et contraintes.

En ce qui concerne l'effet de l'orientation de la fissure AB sur les variations de l'intégrale J aux fonds A et B, les résultats montrent que le maximum est observé pour une orientation parallèle, c'est-à-dire (angle θ = 0 ° et angle θ = 180°) par rapport à le CD fissure l'entaille. Fig. IV.8.b

Pour ces positions, la fissure AB est un mode d'ouverture et ses pointes sont plus proches du fond de la fissure du CD. Le minimum d'intégrale J est atteint pour l'orientation de l'angle (θ =90°) par rapport à la fissure AB. Dans cette position, la charge est parallèle à la fissure AB et ses pointes A et B sont pratiquement entaillées sous des champs de contraintes et de contraintes.



(a)



(b)

Fig. IV.8 Variation de l'intégrale J au fond de fissure en fonction de l'angle θ. (a) fond de fissure D (b) fond de fissure A et B.

3. 1.5 Cas (5):

Afin d'analyser leurs effets sur l'intégrale J au fond des fissures de l'entaille dans la plaque FGM, en considére la même structure, l'orientation entre les fissures au niveau de l'entaille est variée. La longueur des fissures d'entaille a la même longueur (Fig. IV.4.e). La Fig. IV.9 représente la variation de l'intégrale J en mode I en fonction de la variation de l'angle d'inclinaison entre la fissure AB et CD au niveau de l'entaille.

Il est à noter que l'intégrale J est le même pour θ = 0 entre deux fissures (lorsque les deux fissures sont parallèles au chargement). Lorsque θ augmente, l'intégrale J au fond de la fissure A augmente de façon asymptotique et diminue au fond de la fissure D. Au fond de la fissure A, la résistance à la propagation de la fissure augmente avec l'augmentation de θ et inversement cette résistance augmente à la pointe de la fissure D (lorsque les deux fissures). est perpendiculaire entre eux).

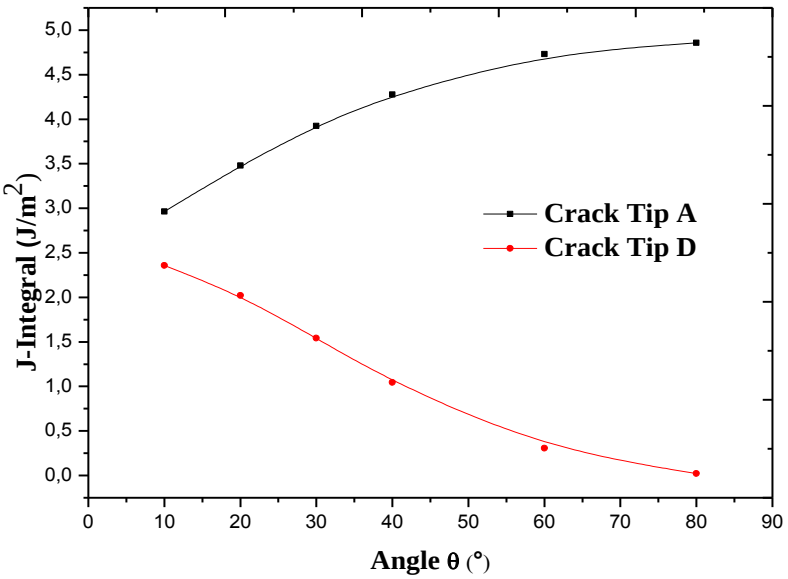


Fig. IV.9 Variation de l'intégrale J aux fonds de fissure A et D en fonction de l'angle θ.

3. 1.6 interaction entre deux fissures de même orientation et de taille différente (c/c0) sur l'intégrale J

Pour les interactions entre les deux fissures, l'intégrale J de chaque fissure est évaluée en faisant varier le rapport de longueur de la fissure pour la même inclinaison angulaire.

Premièrement, le rapport de la longueur de la deuxième fissure à la longueur de la première fissure (c/c_0) varie de 0,2 à 1,5 (Fig. IV.4.e).

Fig. IV.10 et .11 décrivent l'évolution de l'intégrale J dans différents rapports de la taille des longueurs de fissure (c/c_0) émanant d'une entaille par l'angle θ. C'est le fait que l'intégrale J présente un comportement asymptotique lorsque la longueur de la fissure augmente quelle que soit la position de la fissure dans la plaque de FGM.

On peut noter que l'intégrale J au fond de la fissure A augmenté avec la longueur de la fissure. Un comportement opposé est observé pour l'intégrale J au niveau du fond de fissure D. Lorsque les longueurs des deux fissures sont presque similaires (par exemple, $c/c_0 = 1,5$), la magnitude de l'intégrale J est similaire. Le résultat montre également que l'interaction disparaît avec un angle plus élevé ($\theta = 80°$). À ce stade, la valeur de J est maximale pour la fissure A et inversement pour un angle ($\theta = 20°$). Le rapport de la taille affecte la valeur de J proportionnellement à la fissure A, et inversement à la fissure D. D'autre part, la différence d'intégrale J devient de plus en plus importante avec la diminution de la longueur de la fissure et l'augmentation de l'inclinaison de la fissure.

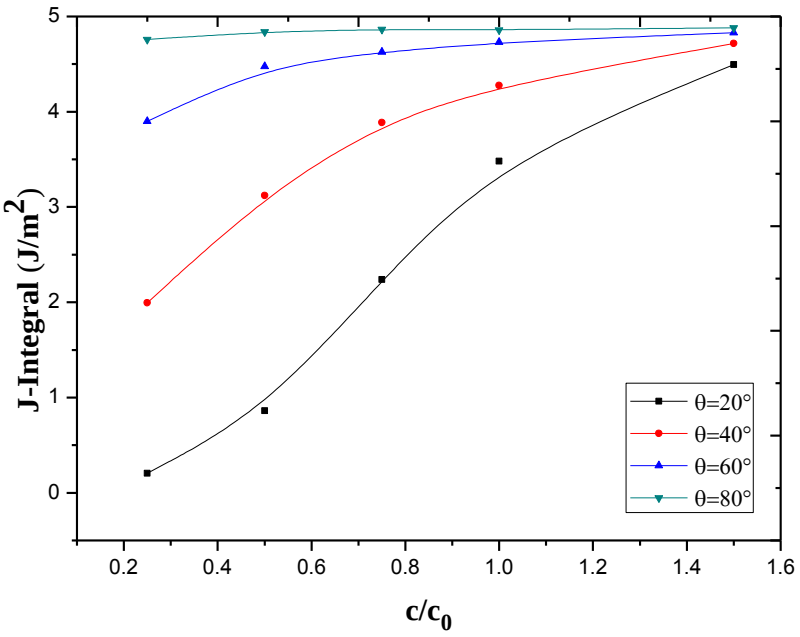


Fig. IV.10 Variation de l'intégrale J au fond de fissure A par rapport au rapport de longueur de fissure c / c_0 pour différentes orientations changeantes θ.

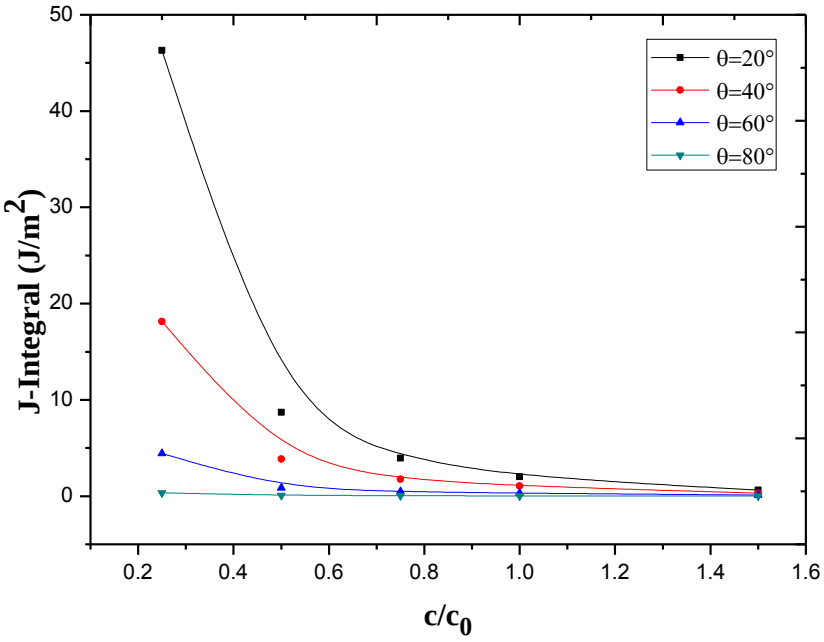


Fig. IV.11 Variation de l'intégrale J au fond de fissure D en fonction du rapport de longueur de fissure c / c_0 pour différentes orientations changeantes θ.

Ainsi, se qui est raisonablement obtenue, des valeurs tres faible de l'intégrale J lorsque les fissures sont parallèles à la direction de la charge appliquée. On peut dire que l'importance de la réduction de l'intégrale J dépend fortement de la taille de la fissure. Plus la longueur de la fissure est grande, plus la réduction est importante. Cela s'explique par le fait que les petites fissures sont demandées dans le champ de contraintes généré par l'entaille semi-circulaire. La réduction de l'intégrale J influence directement la cinétique de la fissure.

IV.3.2 EFFET DU RAYON D'ENTAILLE ET DU GRADIENT DE MATERIAUβSUR L'INTEGRALE J

La contrainte maximale est localisée au niveau de l'entaille, ce qui permet de caractériser l'entaille par une intégrale J qui ne dépend que de la géométrie de l'entaille. Fig. IV.12 présente le rapport en rayon normalisé (R / w) des entailles semi-circulaires latérales. On peut également observer que l'intégrale J devient plus grande en augmentant le rayon de contrôle. Lorsque le rayon normalisé des entailles est compris entre 0,1 et 0,3, l'intégrale J est comprise entre 5 et 24 J/m^2 pour les entailles circulaires des entailles semi-circulaires.

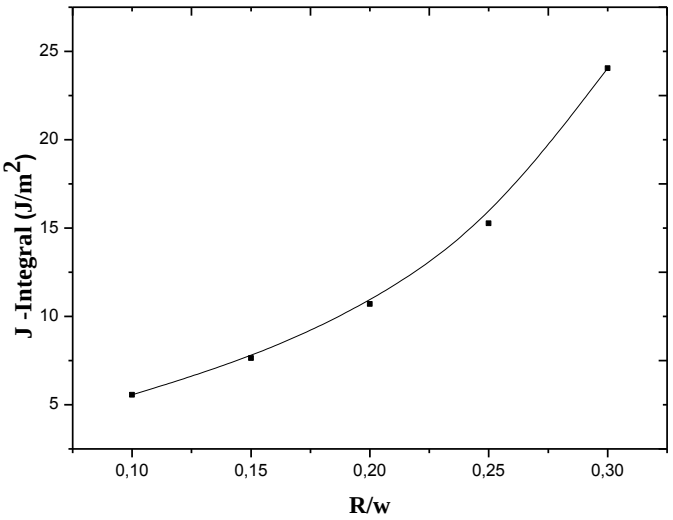


Fig. IV.12 Variation du rapport R/w entre l'intégrale J et le rapport normalisé avec (c/w= 0,1, c_0/w = 0,1).

Le module de Young peut varier de manière exponentielle sur la largeur de la plaque de FGM. Dans ce cas, par exemple, le module de Young varie de 70 à 140 GPa. Le coefficient de Poisson est supposé constant et égal à 0,3. La variation de l'intégrale J en fonction de la valeur de β est représentée à la Fig. IV.13

Il convient de noter à nouveau que β = 0 peut représenter le matériau homogène.

Pour un gradient de matériau élevé (l'exposant β), l'intégrale J est négligeable, on peut en conclure que le gradient de matériau (l'exposant β) a un effet plus important sur l'intégrale J (Fig.13).

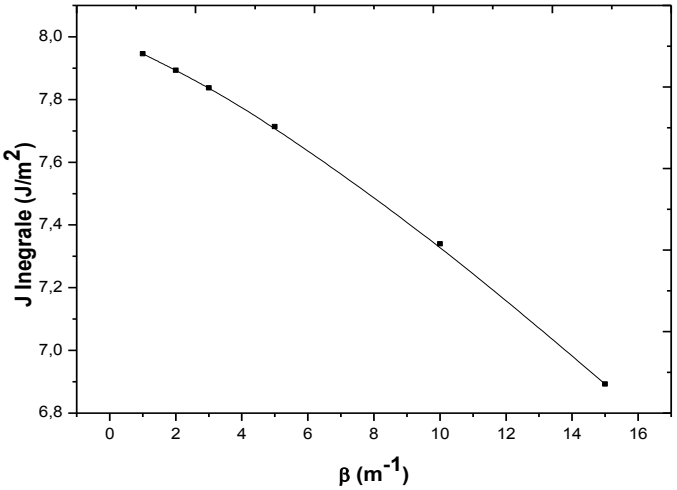


Fig. IV.13 Variation de l'intégrale J en fonction du gradient de matériau β (c/w= 0,1, c_0/w= 0,1).

Iv.3.3 COMPORTEMENT DE FISSURES FIXES ET OBLIQUES EMANANT D'UNE PLAQUE DE FGM A DOUBLE ENTAILLE SOUS TRACTION

Les effets de l'interaction de l'orientation entre deux fissures inter entailles de longueurs égales provenant de chaque entaillée semi-circulaire dans une plaque à double entaille sont étudiées dans cette partie; Sur la Fig. IV.14, on considère le modèle géométrique de la plaque FGM, afin de provoquer l'ouverture des fissures, on laisse la plaque d'être soumise à des chargements unidirectionnels constants σ_0 au champ éloigné. L'influence de l'orientation de la deuxième fissure AB est mise en évidence tout en maintenant constante l'angle de la première fissure CD (la fissure CD est fixe, alors que l'orientation de la fissure AB est modifiée).

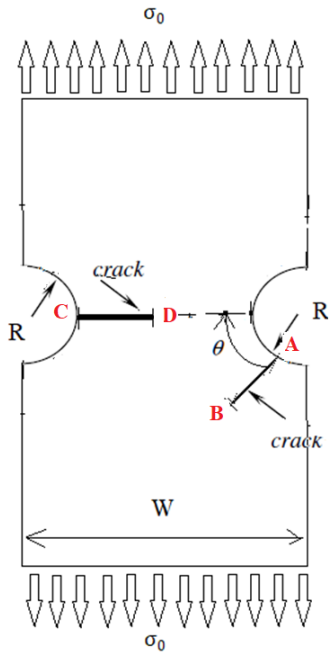


Fig. IV.14 Modèle géométrique de plaque FGM avec fissure fixe et oblique aux entailles.

Fig. IV.15 illustre la variation de l'intégrale J au niveau des fonds de fissure B et D en mode I en fonction de la variation de l'angle d'inclinaison de la fissure AB avec entaille semi-circulaire. On montre respectivement l'effet de la rotation de la fissure principale AB située au niveau de l'entaille avec l'angle pour différentes valeurs comprises entre 60 ° et -60 °. En raison de la symétrie, l'intégrale J possède la même courbe pour les angles d'inclinaison positif et négatif; cela montre qu'elle est indépendante du sens de l'orientation de la fissure existante AB. Dans le cas des angles négatifs, l'intégrale J prend des valeurs positives et la courbe est

asymétrique par rapport à l'axe des ordonnées.

Les résultats montrent également que la fissure, la rotation de la fissure AB a un effet relativement important sur l'intégrale J lorsque l'angle de la fissure est relativement petit. Dans ce cas, l'angle d'inclinaison de la fissure est plus petit, la traction sur la fissure est plus grande et les contraintes à proximité de la fissure sont plus grandes. La fissure AB a donc plus d'effet sur la fissure CD dans le boîtier.

Fig. IV.15 montre que l'effet des fissures droites sur le fond de fissure D est illustré dans ce cas. L'intégrale J des deux fonds de fissure est identique à ($\theta = 0$) en raison de la symétrie. À cet angle, la valeur de J est maximale. L'angle du fond de fissure B est inversement influencé par le fond de fissure D. L'intégrale J du fond de fissure D devien minimale lorsque θ augmente.

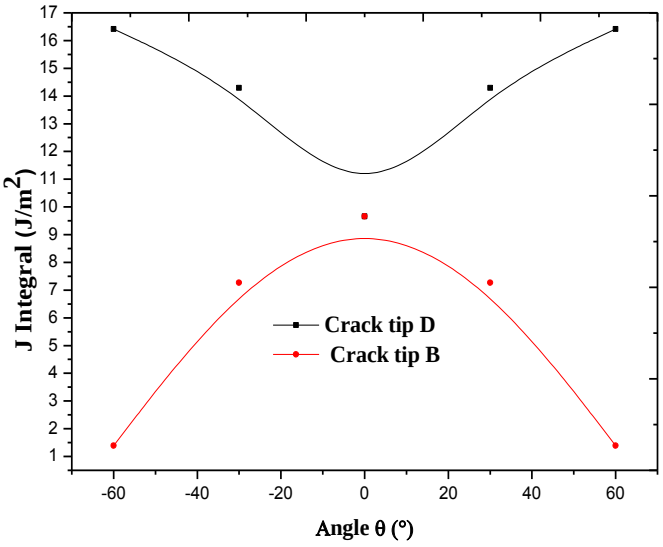


Fig. IV.15 Variation de l'intégrale J en fond de fissure en fonction de l'inclinaison de l'angle θ fissure oblique en fond de fissure B et D.

Iv.3.3.1 COMPORTEMENT DE FISSURES FIXES ET OBLIQUES EMANANT D'UNE PLAQUE DE FGM A DOUBLE ENTAILLE SOUS TRACTION

Dans cette partie, on étudie l'interaction des deux fissures provenant de l'entailles d'une plaque. Comme l'indique la Fig. IV.16, nous présentons le modèle géométrique de la plaque à double entaille en présence de deux fissures situées à chaque entaille . La plaque est soumise aux mêmes conditions aux limites.

Fig. IV.16 (a) montre la géométrie de la plaque de FGM, la Fig. IV.16 (a) montre la configuration complète du maillage, la Fig. IV.16 (b) montre le détail du maillage des deux fissures et la Fig. IV.16 (c) montre un zoom de la fissure gauche. région de pointe montrant le maillage.

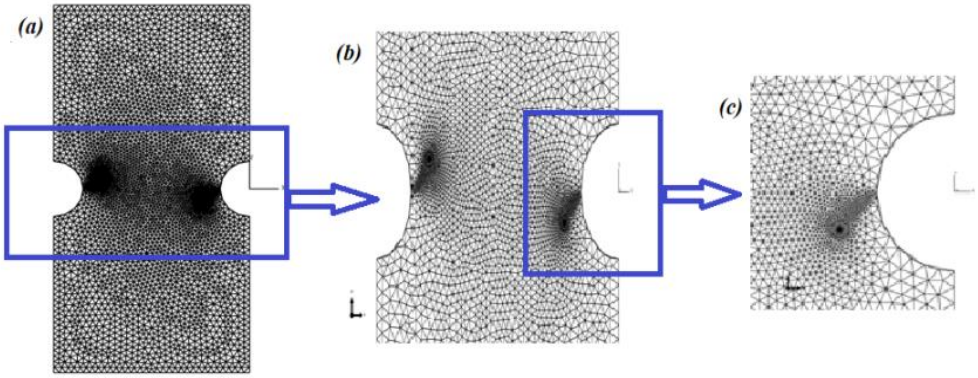


Fig. IV.16 Plaque FGM avec deux fissures provenant des entailles:(a) Géométrie et maillage complet d'éléments finis; (b) des détails de maillage de deux fonds de fissure; (c) zoom du fond de fissure droit

Pour les interactions entre les deux fissures, l'intégrale J de chaque fissure est évaluée en faisant varier l'inclinaison de l'angle de la fissure qui est la même des deux fissures pour le même rapport de longueur.

La Fig. IV.17 montre la variation de l'intégrale J en fonction de la variation de l'angle d'inclinaison de la fissure. Les résultats sont respectivement obtenus pour sept positions des deux fissures qui sont issues de l'entaille semi-circulaire avec lesquelles la même angle de rotation est compris entre (θ = -60 ° et 60 °). L'angle est positif suite à l'application du principe de symétrie locale. Il est clair que les courbes de l'intégrale J sont symétriques par rapport au ligament de la plaque. Les courbes prennent l'importance lorsque l'angle θ diminue. On remarque que la fonction intégrale J (θ) passe par un maximum correspondant à l'angle θ = 0 des deux fissures existantes (c'est-à-dire que les fissures préexistantes sont orientées perpendiculairement par rapport à la charge appliquée).

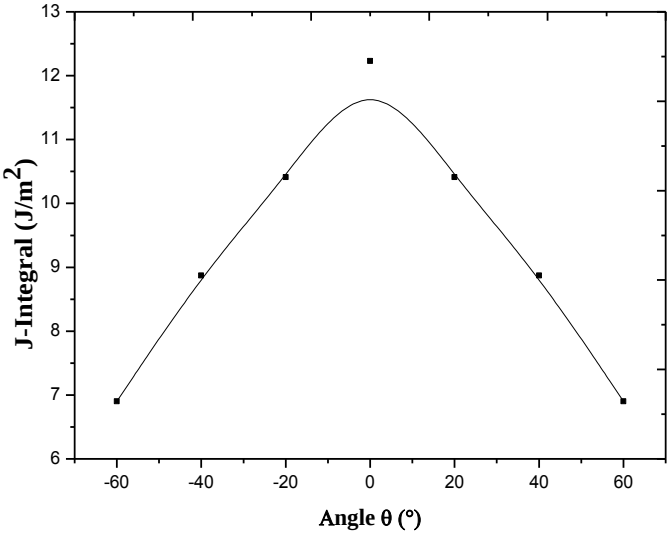


Fig. IV.17 Variation d'Intégrale J en fonction de l'angle d'inclinaison θ de deux fissures.

IV.3.4 NOUVELLES TECHNIQUES POUR REDUIRE L'INTEGRALE J AVEC LES MATERIAUX FGM

Iv.3.4.1 EFFET DES COUCHES DE FGM JOINTES SUR UNE PLAQUE DE CERAMIQUE (TIB) POUR REDUIRE L'INTEGRALE J

Les structures réelles sont de formes géométriques complexes contenant de nombreuses zones de concentrations de contraintes. Ces sites se caractérisent par des sections faibles dues à la présence d'entailles qui sont les principales causes d'initiation des fissures. La connaissance de la distribution du champ de contraintes au voisinage d'une entaille est d'une extrême importance pour l'analyse de la variation d'intégrale J.

Cette section a été réalisée pour déterminer les performances des matériaux FGM (Ti-TiB) en vue de réduire l'intégrale J calculée pour le fond de fissure émanant d'entaille semi-circulaire en mode I, lorsque la fissure se propage à partir de l'entille. Les interactions des deux fissures dans une plaque de FGM à double entaille sont étudiées avec traction (σ_0). Fig. IV.18montre la géométrie d'une plaque à entailles avec deux fissures. Pour deux fissures de AB et CD, les longueurs des deux fissures sont c et c_0.

Afin d'analyser l'effet d'une couche de FGM collée sur une plaque de céramique (TiB) pour réduire l'intégrale J sur la réparation des fissures provenant de l'entaille soumise à une contrainte de traction unidirectionnelle (Fig. IV.18.c), nous considérons le modèle géométrique d'une plaque de céramique TiB contenant deux couches de FGM (R_1-FGM, (Ti-TiB)) autour d'une

entaille circulaire de rayon R, la couche a une largeur w_0 ($w_0 = R_1$-R), comme indiqué sur la Fig.IV.18.b).

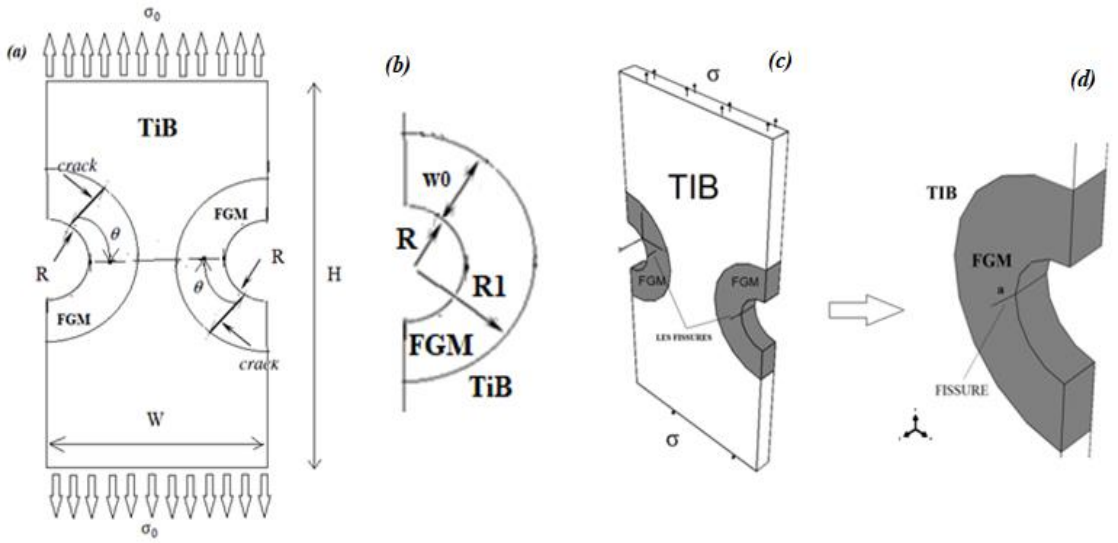


Fig. IV.18 Modèle géométrique d'une plaque en céramique (TiB) assemblée avec deux couches de FGM à des entailles.

Pour une meilleure illustration de l'effet bénéfique des matériaux FGM sur la réduction de l'intégrale J, Fig. IV.19 illustre la variation de l'intégrale J asymptotique en fonction de la couche FGM w_0 définie par $w_0 = R_1$-R pour un double entaille articulée à la plaque TiB pour diverses charges appliquées.

D'une part, l'intégrale J est affectée par la couche de FGM jointe. L'augmentation de la largeur entraîne l'augmentation de l'intégrale J. L'intégrale J est stabilisée lorsque la largeur des joints de la couche de FGM dépasse $w_0 / w = 0,4$. Cet effet est dû au fait que l'augmentation de la taille de la largeur articulée de la couche de FGM entraîne une augmentation du champ de contrainte au fond de la fissure, ce qui conduit à une saturation des contraintes transférées. Cette saturation implique une stabilisation de l'augmentation de l'intégrale J en fonction de la taille de la fissure, une optimisation de la largeur de la couche FGM étant recommandée. D'autre part, l'intégrale J augmente proportionnellement avec l'augmentation des charges appliquées,

L'utilisation d'une couche de FGM de taille $w_0 / w = 0,2$ entraîne une diminution significative de l'intégrale J avec un gain de (69%). Le maximum de J est presque au niveau de $w_0 / w = 0.4$ avec un gain de (52%).

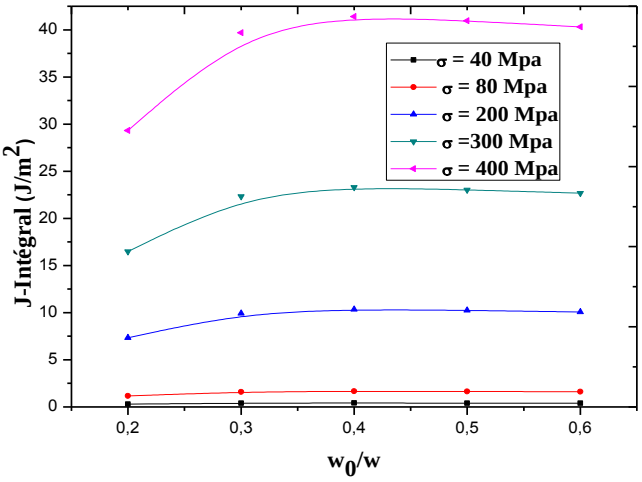


Fig. IV.19 Variation de l'intégrale J en fonction du rapport (w0 / w). (c/w= c_0/w = 0,1, θ = 45 °)

Iv.3.4.2 EFFET DU RAYON DE LA COUCHE FGM ENTAILLEE POUR REDUIRE L'INTEGRALE J

L'influence de la géométrie du plaque est très importante. Afin de déterminer l'effet du rayon de l'entaille sur la performance de la réparation de la plaque de TiB liée par couche de FGM jointe en mode I, l'orientation de la fissure entaillée est θ = 45 ° pour la couche de FGM. largeur de w_0/w = 0,125 maintenue constante.

Fig. IV.20 présente la variation de l'intégrale J en fonction des rayons d'entailles pour diverses charges soumises. Il est à noté que l'intégrale J a augmenté de telle sorte que le facteur important (R / w) dans les couches de FGM w_0 / w = 0,125, la différence de l'intégrale J devient plus importante avec l'augmentation du rayon de charge.

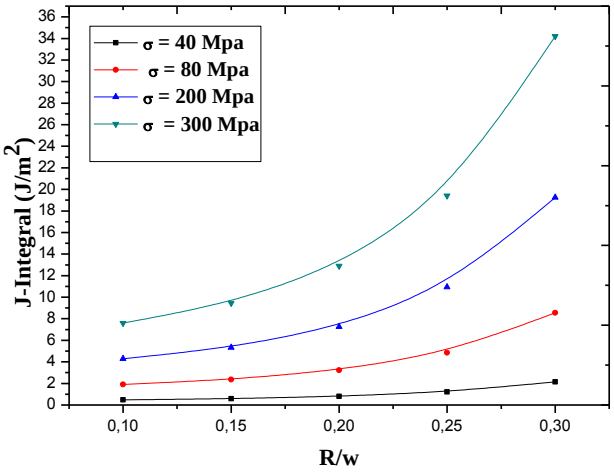


Fig. IV.20 Variation de l'intégrale J en fonction de R/w (w_0/w = 0,125, c/w =c_0/w= 0,1, θ = 45 °)

IV.4 CONCLUSION

L'objectif principal d'un concepteur est de prédire si une fissure dans un composant est susceptible de se développer dans les conditions de chargement données. Il peut obtenir l'intégrale J critique au fond de la fissure pour la déterminer. L'objectif de ce travail est de décrire l'effet de l'interaction entre deux fissures dans une plaque de FGM entaillée et à double entaille (TiB / Ti). La plaque est simulée numériquement à l'aide de la méthode des éléments finis (FEM).

Les résultats obtenus permettent de déduire les conclusions suivantes:

- Le déplacement transversal (L) et longitudinal (d) et l'angle d'orientation (θ) caractérisent l'effet d'interaction entre deux fissures jouent un rôle important sur le niveau et la distribution d'intégrale J.
- Pour le déplacement transversal (L) et longitudinal (d); L'intégrale J augmente considérablement et atteint sa valeur maximale. Pour un déplacement lointain, l'effet d'interaction disparaît complètement; il en résulte une stabilisation de l'intégrale J à une valeur constante.
- L'effet de l'interaction entre deux fissures dépend non seulement de leur inter-distance, mais également de l'angle d'orientation entre ces deux fissures. L'intégrale J atteint son maximum lorsque la fissure est directement parallèle à la charge. Cette orientation mène à l'ouverture de la fissure. Une orientation perpendiculaire provoque la fermeture de la fissure, conduisant à une intégrale J négligeable.
- Une fissure normale à charger conduit à intégrale J le plus élevé au fond de la fissure. Cette énergie diminue progressivement à mesure que l'angle d'orientation diminue.
- L'intégrale J au fond de la fissure dépend à la fois de la longueur de la fissure et de sa position,
- L'augmentation de la longueur de la fissure entraîne une augmentation de l'intégrale J. La propagation de la fissure entraîne une augmentation de l'énergie de rupture.
- Dans le cas des deux fissures émanant d'une entaille dans une plaque de FGM sous traction, l'interaction et leur effet sur l'intégrale J sont importants lorsque la valeur de θ est maximale.
- L'effet de l'orientation avec différentes tailles de fissure est remarquable; le maximum

d'intégrale J est obtenu lorsque l'angle augmente en conséquence, lorsque la fissure est parallèle au chargement et d'une taille supérieure, et que la valeur minimale est obtenue pour la fissure perpendiculaire au chargement.

- Dans le cas des deux fissures provenant d'une plaque FGM à double entaille sous traction, l'intégrale J des deux fonds de fissure est identique à ($\theta = 0$) en raison de la symétrie. À cet angle, la valeur d'intégrale est maximale. L'angle de la fissure B est inversement influencé par la fissure A. L'intégrale J de la fissure A est minimale lorsque θ augmente.
- L'effet du rapport de chargement et de rayon d'entaille (σ_0, R / w) sur l'intégrale J a été mis en évidence; l'interaction s'augmente pour une valeur élevée du rayon de chargement et de l'entaille.
- Le bon choix des couches de FGM au niveau des entailles dans la plaque de céramique (TiB) et du rayon de l'entaille doit être optimisé; car c'est le meilleur moyen de réduire considérablement l'intégrale J et d'améliorer la résistance à la rupture.
- La diminution de l'intégrale J devient de plus en plus importante avec l'importance du rayon de la couche de FGM semi-circulaire autour de l'entaille. L'utilisation d'une couche de taille $w_0/w=0,2$ entraîne une diminution significative de l'intégrale J avec un gain de (69%). Le maximum de J est presque au niveau de $w_0/w=0.4$ avec un gain de (52%).

Ces résultats sont utiles pour analyser les comportements de rupture ou de fatigue des matériaux.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE

Dans cette thèse, premièrement nous avons défini les matériaux composites et les matériaux à gradient fonctionnel « FGM », l'histoire de leur développement, leurs propriétés et leurs domaines d'application. La variation spatiale et progressive des propriétés de ces matériaux permet de créer des structures innovantes qui peuvent être exploitées dans de nombreux domaines d'application dans les structures spéciales en génie civil.

Les structures réelles sont des formes géométriques complexes contenant de nombreuses zones de concentration de contraintes. Ces sites sont caractérisés par des sections faibles dues à la présence d'entailles qui sont les principales causes d'initiation des fissures. La connaissance de la distribution du champ de contraintes au voisinage d'une entaille est d'une extrême importance pour l'analyse de la variation de l'intégrale J.

L'étude a été réalisée afin de déterminer les performances de la plaque FGM (Ti-TiB) pour réduire l'intégrale J calculée pour le fond de fissure émanant d'entaille semi-circulaire en mode I et mode mixte. Lorsque la fissure se propage à partir de l'entaille, elle reçoit la force motrice du champ de contraintes qui l'entoure.

La méthode des éléments finis 3D est appliquée pour analyser le comportement d'une fissure émanant d'entaille semi-circulaire se développant à partir du métal (Ti) et orientée perpendiculairement en direction de la céramique (TiB).

L'intégrale J a été trouvée pour plusieurs combinaisons de lois de plaques FGM en ce qui concerne la combinaison variable de la longueur de la fissure, de l'épaisseur de la plaque, du rayon d'entaille, du module de Young des constituants de la plaque FGM et de l'orientation de la fissure.

Les résultats de nos recherches sont assez convaincants et permettent de tirer les conclusions suivantes:

- Les propriétés de la plaque à entaille FGM ont des effets significatifs sur la variation de l'intégrale J à la pointe de l'entaille.
- L'augmentation de l'indice de loi de puissance (n) provoque une augmentation de l'intégrale J pour la plaque P-FGM.

- Pour l'indice de loi de puissance n = 6, la distribution d'Intégrale J de la plaque P-FGM est similaire à celle de l'intégrale J de la plaque E-FGM.
- Pour l'indice de loi de puissance n <6, l'intégrale J de la plaque P-FGM est inférieure à celle trouvée dans la plaque E-FGM.
- En résumant les résultats, on peut conclure que, dans le mode mixte, l'intégrale J est plus affectée que celle du mode I.
- L'augmentation de la taille de la fissure a entraîné une augmentation appréciable de l'intégrale J dans la plaque à entaille FGM.
- La sensibilité de la propagation de la fissure caractérisée par son intégrale J est plus importante dans la plaque qui présente une résistance mécanique plus élevée.
- Lorsque l'épaisseur de la plaque diminue, l'absorption de l'énergie de propagation de la fissure émanant de l'entaille devient importante en mode mixte. Alors qu'il n'a pas d'effet significatif sur la variation de l'intégrale J en mode I.
- L'effet de l'entaille du rayon sur l'intégrale J au fond de la fissure de la plaque FGM a un impact très significatif. L'augmentation de l'intégrale J devient de plus en plus importante avec l'importance du rayon de l'entaille semi-circulaire de la plaque de FGM.
- Lorsque la fissure se propage vers un matériau moins rigide, elle entraîne une augmentation de son intégrale J: cas des couples (céramique / métal).
- La présence de la fissure dans un matériau ductile (métal / céramique) diminue l'intégrale J.

Lorsque la fissure se propage dans un matériau ductile, son intégrale J au fond de la fissure diminue; alors que le phénomène inverse se produit si la fissure se propage vers un matériau de moindre résistance; son intégrale J au fond de la fissure augmente, il a tendance à s'accélérer.

Lorsque la fissure se propage vers un matériau de résistance supérieure, son intégrité J au fond de la fissure diminue.

L'intégrale J est affectée par l'effet de la charge en fonction de la taille de la fissure; lorsque la charge appliquée augmente, l'augmentation de l'intégrale J et inversement, l'influence de la charge augmente avec l'augmentation de la longueur de la fissure.

On peut constater qu'une réduction de l'angle d'orientation par rapport à la charge appliquée entraîne une augmentation de l'intégrale J.

- Il a été constaté que les meilleurs résultats sont obtenus par l'orientation de l'angle de fissure à 0 ° en fonction de la direction de la charge.
- L'orientation de la fissure à 90 ° indique une valeur élevée de l'intégrale J, ce qui n'est pas recommandé et il est inefficace de l'augmenter.

Le gain d'intégrale J dépend des propriétés mécaniques et géométriques de la plaque FGM. Ces propriétés doivent être optimisées pour améliorer les performances et la durabilité de la plaque de FGM fissurée.

De la présente analyse, on peut conclure que l'intégrale J au niveau du fond de fissure pour une plaque à entaille peut être réduite efficacement en utilisant un matériau gradué de manière fonctionnelle présentant des propriétés de matériau variant dans le sens de la largeur (sens du rayon de l'entaille r-FGM).

La réduction peut être contrôlée de manière significative par l'indice de la loi de puissance. On peut choisir l'indice de loi de puissance (n=0,5) pour avoir la moindre intégrale J. En outre, il est également observé que l'intégrale J peut être réduite en augmentant l'épaisseur de la plaque FGM.

Il est recommandé de choisir une plaque avec un rayon d'entaille avec un bail de 20% pour la longueur de la fissure (R/c<2).

Les orientations et la longueur de la fissure doivent être optimisées.

Il est également à noter que le contrôle de la variation des propriétés matérielles de la plaque FGM peut réduire considérablement l'intégrale J.

L'objectif principal d'un concepteur est de prédire si une fissure dans un composant est susceptible de se développer dans les conditions de chargement données. Il peut soit obtenir l'intégrale J critique au fond de la fissure pour la déterminer. L'objectif de ce travail est de décrire l'effet de l'interaction entre deux fissures dans une plaque de FGM entaillée et à double entaille (TiB / Ti). La plaque est simulée numériquement à l'aide de la méthode des éléments finis (FEM).

Les résultats obtenus permettent de déduire les conclusions suivantes:

- Le déplacement transversal (L) et longitudinal (d) et l'angle d'orientation (θ) caractérisant l'effet d'interaction entre deux fissures jouent un rôle important sur le niveau et la distribution d'intégrale J.

- Pour le déplacement transversal (L) et longitudinal (d); L'intégrale J augmente considérablement et atteint sa valeur maximale. Pour un déplacement lointain, l'effet d'interaction disparaît complètement; il en résulte une stabilisation de l'intégrale J à une valeur constante.

- L'effet de l'interaction entre deux fissures dépend non seulement de leur inter-distance, mais également de l'angle d'orientation entre ces deux fissures. L'intégrale J atteint son maximum lorsque la fissure est directement parallèle à la charge. Cette orientation mène à l'ouverture de la fissure. Une orientation perpendiculaire provoque la fermeture de la fissure, conduisant à une intégrale J négligeable.

- Une fissure normale à charger conduit à intégrale J le plus élevé au fond de la fissure. Cette énergie diminue progressivement à mesure que l'angle d'orientation diminue.

- L'intégrale J au fond de la fissure dépend à la fois de la longueur de la fissure et de sa position,

- L'augmentation de la longueur de la fissure entraîne une augmentation de l'intégrale J. La propagation de la fissure entraîne une augmentation de l'énergie de rupture.

- Dans le cas de deux fissures émanant d'une entaille dans une plaque de FGM sous traction, l'interaction et leur effet sur l'intégrale J sont importants lorsque la valeur de θ est maximale.

- L'effet de l'orientation avec différentes tailles de fissure est remarquable; le maximum d'intégrale J est obtenu lorsque l'angle augmente en conséquence, lorsque la fissure est parallèle au chargement et d'une taille supérieure, et que la valeur minimale est obtenue pour la fissure perpendiculaire au chargement.

- Dans le cas de deux fissures provenant d'une plaque FGM à double entaille sous traction, l'intégrale J des deux fonds de fissure est identique à ($\theta = 0$) en raison de la symétrie. À cet

angle, la valeur d'intégrale est maximale. L'angle de la fissure B est inversement influencé par la fissure A. L'intégrale J de la fissure A est minimale lorsque θ augmente.

- L'effet du rapport de chargement et de rayon d'entaille (σ_0, R / w) sur l'intégrale J a été mis en évidence; l'interaction augmente pour une valeur élevée du rayon de chargement et de l'entaille.

- Le bon choix des couches de FGM au niveau des entailles dans la plaque de céramique (TiB) et du rayon de l'entaille doit être optimisé; car c'est le meilleur moyen de réduire considérablement l'intégrale J et d'améliorer la résistance à la rupture.

- La diminution de l'intégrale J devient de plus en plus importante avec l'importance du rayon de la couche de FGM semi-circulaire autour de l'entaille. L'utilisation d'une couche de FGM de taille $w_0/w=0,2$ entraîne une diminution significative de l'intégrale J avec un gain de (69%). Le maximum de J est presque au niveau de $w_0/w=0.4$ avec un gain de (52%).

Ces résultats sont utiles pour analyser les comportements de rupture ou de fatigue des matériaux.

RÉFÉRENCES GÉNÉRALE

RÉFÉRENCES GÉNÉRALE

Heikinheimo Liisa, Siren Mika, Gasikt Michael M. (1996).AI2O3 to Ni-superalloy diffusion bonded FG-joints for high

temperature applications. , I. Shiota and M.Y, Miyamoto (Editors), Functionally Graded Materials, 1997 Elsevier Science B.V.pp313-318.

Yamanouchi, M., Hirai, T., Shiota, I., (1990a) Overall view of the P/M fabrication of functionally gradient materials. Proceedings of first international symposium on functionally gradient materials, Sendai, Japan, pp.59–64.

Koizumi, M. (1993). The Concept of FGM in Functionally Graded Materials, American Ceramic Society Transaction, 34: 3–10.B. Smith, "Unpublished work style," unpublished.

Hirai, T., and Chen, L., (1999). Recent and prospective development of functionally graded materials in Japan, Materials Science Forum, 308–311, 509–514.

Chan S.H. (2001), Performance and emissions characteristics of a partially insulated gasoline engine, International Journal of Thermal Science, 40, 255-261.

Uemura, S., (2003). The activities of FGM on new applications. Materials Science Forum, 423–425, 1–10.

D. Gay, V. S. Hoa, and S. W. Tsai. Composite materials design and applications. CRC Press LLC, 2003.

K. Ichikawa (Ed), functionally graded materials in the 21ST CENTURY, A Workshop on Trends and Forecasts, 2000, 264 p., Hardcover.

A. Benatta. Contribution du phénomène de gauchissement dans les poutres courtes en FGM par les théories d'ordre élevé, thése 2010.

S. Gouasmi. Modélisation numérique du comportement en rupture des structures en matériaux composites gradués. Thése 2015.

M. Yamanouchi, M. Koizumi, T. Hirai and I. Shiota (eds.), 1990, FGM-90, Proc. FGM-90, FGM Forum, Tokyo, Japan (1990).

J.B.Holt, M. Koizumi, T. Hirai, and Z.A. Munir (eds.), Proc. FGM'92, Ceramic Transactions, Vol. 34, American Ceramic Society (1992).

B. Ilschner, and N. Cherradi (eds.), Proc. FGM'94, Presses Polytechniques et Universitaires Romands, Lausanne, Switzerland (1995).

Bui. H. D., (Mécanique de la rupture fragile), Masson (1978).

Rrzzo F. J., (An intcgral equation approach to boundary value problems of classical elastostatics) Qucrterly of Applied mathemrrtics (1967), pp. 25-83.

LABBENS R., PELISSIER-TANON A., HELIOTJ., (Méthodes pratiques de calcul des facteurs d'intensité de contrainte). Revue de Physique Appliquke, Tome 9 (juil. 1974), pp. 587-598.

BFRGEZ D., (the determination of stress intensity factors on elastic shells: a possible method). Advances in Fracture research. Procedings ICF5, Cannes (1981), vol. 1 , pp. 161-

168

BUECHNER H. F., (The propagation of cracks and the energy of elastic deformations). Transaction of the ASME* (1958). vol. 15, pp. 1325-1730

BUECKNER H. F., « A novel principle for the computation of stress intensity factors », Zeitschrif fûrr- Angewandte Mathematik und Mechanik (15)70),p. 529

LABBENS R. C., (Introduction à la mécanique de la rupture », Pluralis (1980).

WINTERMARK H., (Offshore structures fabrication and control of the fatigue and brittle fracture risk n. Det Norske Veritas, Oslo (1976).

KANASAWA T., MACHIDAS., KAWANOH., (Fracture initiation from a surface flaw under combined tension and bending). Second International Conference on Mechanical Behaviour of Materials, Aug. 16-20 (1976). Boston, Mass.

Bui H. D. (Mécanique de la rupture fragile), Masson (1978)

RICE J. R., « A path indepcndant integral and the approximate analysis of strain concentration by notched and cracks ». J. of Applicd Mechnnics (1968), pp. 379-386.

ESHELRY J. il, « The continuous theory of lattice defects ». Solid State Physics (1956) vol. 3, Academic Press.

ESHELBY J. D., (Energy relations and the energy momentum tensor in continuous mechanics. Inclastic behaviour of solids) (1969), McGraw-Hill, pp. 77-115.

LABBENS R. C., (Introduction à la mécanique de la rupture », Pluralis (1980)

M. Saito and H. Takahashi, Proc. FGM'90 (1990), p. 297.

F. Delale and F. Erdogan, Int. J. Engng, ScL, 26 (1988) 559.

F. Erdogan, Tr. J. Engineering and Environmental Sci., 18 (1994) 185

F. Erdogan, A.C. Kaya and P.F.Joseph, ASME J. Appl. Mech., 58 (1991) 410.

P.A. Martin, J. Engineering Mathematics, 26 (1992) 467.

Y.D. Lee and F. Erdogan, Int. J. of Fracture, 69 (1995) 145.

W.A. Kaysser and B. Ilschner, M.R.S. Bulletin, 20 (1995) 22.

P. Chauchot, J. Labeyrie. Rupture fragile des pièces minces des équations intégrale, 1982.

F. Erdogan, 1995, Fracture mechanics of functionally graded materials. Composite Eng., 5, 753–770

P. Gu, M. Dao and R. J. Asaro, 1999, A simplified method for calculating the crack-tip fields of functionally graded materials using the domain integral. ASME J. Appl. Mech., 66, 101–108

Kawasaki, A., Watanabe, R., 2002. Thermal fracture behavior of metal/ceramic functionally graded materials. Eng. Fract. Mech. 69, 1713–1728.

Liu, Y., Compson, C., Liu, M., 2004. Nanostructured and functionally graded cathodes for

intermediate solid oxide fuel cells. J. Power Sources 138, 194–198.)

Nomura, T., Moriguchi, H., Tsuda, K., Isobe, K., Ikegaya, A., Moriyama, K., 1999. Material design method for the functionally graded cemented carbide tool. Int. J. Refract. Metals Hard Mater. 17, 397–404)

Watari, F., Yokoyama, A., Omori, M., Hirai, T., Kondo, H., Uo, M., Kawasaki, T., 2004.Biocompatibility of materials and development to functionally graded implant for bio-medical application. Compos. Sci. Technol. 64, 893–908).

Rice JR. Path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. J Appl Mech 1968;35:379–86.

McMeeking RM. Finite deformation analysis of crack-tip opening in elastic–plastic materials and implications for fracture. J Mech Phys Solids 1977;25:357–81.

Carka D, Landis CM. On the path-dependence of the J-integral near a stationary crack in an elastic–plastic material. J Appl Mech 2011;78:1–6. 011006.

Aoki S, Kishimoto K, Takeuchi N. An elastic–plastic finite element analysis of blunting interface crack with microvoid damage. Int J Fract 1992;55:363–74.

Liebowitz H, Sandhu JS, Lee JD, Menandro FCM. Computational fracture mechanics: research and application. Engng Fract Mech 1995;50:653–70.

Broberg KB. Critical review of some method in nonlinear fracture mechanics. Engng Fract Mech 1995;50:157–64.

Firmature R, Rahman S. Elastic–plastic analysis of off-center cracks in cylindrical structures. Engng Fract Mech 2000;66:15–39.

Allen PA, Wells DN. Interpolation methodology for elastic–plastic J-integral solutions for surface cracked plates in tension. Engng Fract Mech 2014;119:173–201.

Cho DH, Seo HB, Kim YJ, Chang YS, Jhung MJ, Choi YH. Advances in J-integral estimation of circumferentially surface cracked pipes. Fatigue Fract Engng Mater Struct 2011;34:667–81.

Pop O, Dubois F, Absi J. J-integral evaluation in cracked wood specimen using the mark tracking method. Wood Sci Technol 2013;47:257–67.

Kikuchi M, Miyamoto H, Machida K, Kitagawa Y, Chiba K. On the 3 dimensional J integral: 2nd report, the J integral of the CT specimen in elastic–plastic state. Jpn Soc Mech Engng Ser A 1984;50(456):1524–30.

Kikuchi M, Miyamoto H, Tanaka M. J integral evaluation of CT specimen in elastic–plastic state. Bull JSME (Jpn Soc Mech Engng) 1984;27(233):2365–71.

Parks DM. The virtual crack extension method for nonlinear material behavior. Comput Methods Appl Mech Engng 1977;12:353–64.

Hellen TK. On the method of virtual crack extensions. Int J Numer Methods Engng 1975;9:187–207.

Banks-Sills L, Kopelman R. On the computation of stress intensity factors for three-dimensional geometries with singular, twenty-seven-noded,distorted elements. Comput Struct

1991;41(5):981–6.

Claydon PW. Maximum energy release rate distribution from a generalized 3D virtual crack extension method. Engng Fract Mech 1992;42:961–9.

Li FZ, Shih CF, Needleman A. A comparison of methods for calculating energy release rates. Engng Fract Mech 1985;21:405–21.

Shih CF, Moran B, Nakamura T. Energy release rate along a three-dimensional crack front in a thermally stressed body. Int J Fract 1986;30:79–102.

Nikishkov GP, Atluri SN. An equivalent domain integral method for computing crack-tip integral parameters in non-elastic, thermo-mechanical fracture. Engng Fract Mech 1987;26:851–67.

Nikishkov GP, Atluri SN. Three-dimensional elastic–plastic J-integral calculations for semielliptical surface cracks in a tensile plate. Engng Fract Mech 1988;29:81–7.

Shivakumar KM, Raju IS. An equivalent domain integral method for three-dimensional mixed-mode fracture problems. Engng Fract Mech1992;42:935–59.

Nishioka T, Stan F, Fujimoto T. Dynamic J integral and dynamic stress intensity factor distributions along naturally and dynamically propagating three dimensional fracture fronts. JSME Int J Ser A 2002;45(2):523–37.

Nishioka T, Stan F. A hybrid experimental-numerical study on the mechanics of three-dimensional dynamic fracture. CMES Comput Model Engng Sci2003;4:119–39.

Sukmar N, Chopp DL, Moran B. Extended finite element method and fast marching method for three-dimensional fatigue crack propagation. Engng Fract Mech 2003;70:29–48.

Legrain G, Moës N, Verron E. Stress analysis around crack tips in finite strain problems using the eXtended finite element method. Int J Numer Methods Engng 2005;63:290–314

Delale, F., Erdogan, F., 1983. The crack problem for a nonhomogeneous plane. ASME Journal of Applied Mechanics 50, 609–614.

Bouida, N., Bouchikhi, A.S., Megueni, A. et al. A Finite Element Analysis for Evaluation of J-Integral in Plates Made of Functionally Graded Materials with a Semicircular Notch. J Fail. Anal. and Preven. (2018) 18: 1573. https://doi.org/10.1007/s11668-018-0558-6

Bao, G., Wang, L., 1995. Multiple cracking in functionally graded ceramic/metal coatings. International Journal of Solids and Structure 32, 2853–2871.

ABAQUS Finite Element Program, ABAQUS/Standard 6.9.1. Hibbit, Karlsson and Sorensen,Inc. Pawtuket, USA, 2008.

ANNEXES

ANNEXE A: NOMENCLATURE

P_i Propriété mécanique

V_i Fraction volumique

E Module de Young

ν Coefficient de Poisson

E(z) Module de Young en fonction de coordonnée spatiale

r, θ Coordonnées cylindriques

K_t Facteur de concentration de contrainte

K_f Facteur de concentration de contrainte

σ_0 Contrainte appliquée

σ_N Contrainte nominale

σ_{max} Contrainte maximale

σ_{11} , σ_{22}, σ_{12} Champs de contraintes en coordonnées cartésiennes

σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$, σ r θ Champs de contraintes en coordonnées cylindriques

a Rayon d'entaille

ρ Coordonnées cylindriques r normalisée par rapport au rayon a

U , V Composantes du déplacement

u , v Composantes du déplacement normalisée par rapport au rayon a

εq , εθ Déformations

K_0 Facteur de concentration de contrainte

Σ_0 Facteur de concentration de contraintes normalisée

G Energie de Griffith

G_C Energie de Griffith critique

σ_R Contrainte à la rupture

a_c Longueur du défaut critique

K_I Facteur d'intensité des contraintes en mode I

K_{II} Facteur d'intensité des contraintes en mode II

K_{III} Facteur d'intensité des contraintes en mode III

J L'intégrale de contour

Γ Contour d'intégration entourant l'fond de la fissure

Ti Composante du vecteur contraint du vecteur déplacement

u_i Composante du vecteur déplacement

W La densité d'énergie de déformation W

σij Composantes du tenseur de contraintes au point courant sur le contour Γ

εij Composantes du tenseur de déformations au point courant sur le contour Γ

n Paramètre du matériau

H Longueur de la plaque

W Largeur de la plaque

t Epaisseur de la plaque

ANNEXE B: LISTE DES FIGURES

Fig. I.1 Schéma illustratif d'un matériau composite. 11
Fig. I.2 Principe du moulage au contact. 15
Fig. I.3 Principe du moulage par projection simultanée. 15
Fig. I.4 Principe du moulage par injection. 16
Fig. I.5 Principe du moulage par pultrusion. 17
Fig. I.6 Principe du moulage de l'enroulement circonférentiel. 17

Fig. I.7 Schéma illustratif d'un matériau composite stratifié. 18
Fig. I.8 Schéma de la variation continue de la microstructure 20
Fig. I.9 Caractéristiques des matériaux composites FGM en comparaison avec les matériaux composites conventionnels 23
Fig. I.12 Schéma de l'installation pour la préparation d'un SiC/C FGM par le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) [Miyamoto 1999]. 28
Fig. I.13 Disposition du procédé frittage laser différentiel [YUKI 1991]. 30
Fig. I.14 Vue schématique de l'installation d'EPD pour la production des matériaux [Aldo 2002] 30
Fig. I.15 Géométrie d'une plaque FGM 32
Fig. I.16 Variation de la fraction volumique dans une plaque P-FGM 33
Fig. I.17 Variation de la fraction volumique dans une plaque S-FGM 34
Fig. I.18 Variation de la fraction volumique dans une plaque E-FGM 35
Fig. II.1 Conditions aux limites 40
Fig. II.2 Modes de rupture 42
Fig. II.3 Forces de cohésion 44
Fig. II.4 (D'après LABBENS) 45
Fig. II.5 Contour d'évaluation de J 47
Fig. II. 6 domaine connexe Ai délimitée par le contour 53
Fig. II. 7 maille finis de la région fissure 55
Fig. II. 8 Les deux formes de fonction q répandue parmi les 58
Fig. III.1 Notation géométrique de la plaque entaillée 3D-FGM 65
Fig. III.2 Maillage typique d'une plaque entaillée 3D-FGM 66
Fig. III.3 Variation d'intégrale J le long de l'épaisseur de la plaque FGM pour une longueur de fissure normalisée 69
Fig. III.4 Variation de l'intégrale J maximale en fonction de la longueur normalisée de la fissure émanant d'entaille 71
Fig. III.5 Le gail d'intégral J vs longueur normalisée de la fissure émanant de l'entaille pour plaque Ti-TiB avec (P-FGM) n = 0,5 par rapport à la plaque Ti en mode I et mixte 73
Fig. III.6 Variation de l'intégrale J maximale en fonction des différentes épaisseurs normalisées 74
Fig. III.7 Gain intégral J par rapport à l'épaisseur normalisée de P-FGM $_{n=0,5}$ plaque en mode I et mixte. 75
Fig. III.8 Variation de l'intégrale J maximale en fonction de la longueur normalisée issue d'entaille pour le rayon d'entaille en fonction de la plaque Ti-TiB avec (P-FGM) n = 0,5 76

Fig. III.9 Variation de l'intégrale J maximale en fonction de la longueur normalisée issue d'entailles pour différents modules de Young de céramique..... 78

Fig. III.10 Variation de l'intégrale J maximale en fonction de la longueur normalisée issue des entailles pour différents modules de Young de métal..... 79

Fig. III.11 Variation de l'intégrale J maximale en fonction de la longueur normalisée émanant des entaille pour différents chargements appliqués..... 81

Fig. III.12 Variation de l'intégrale J maximale en fonction des différentes orientations d'angle pour une fissure de longueur normalisée 82

Fig. IV.1 Une plaque FGM rectangulaire fissurée sous chargement uniforme 89

Fig. IV.2 Quadrature gaussienne: CPS6M (a), CPS8R (b). 90

Fig. IV.3 Modèle de plaque maillée..... 90

Fig. IV.4 Modèle géométrique de fissures avec h (a/a_0~3)..... 91

Fig. IV.5 Intégrale J en fissure (a) et les fonds de la fissure A et B de la micro-fissure (b) en fonction de h/a..... 92

Fig. IV.6 Modèle géométrique des fissures en fonction d (a/a_0~3) 92

Fig. IV.7 Intégrale J en fissure (a) et les fonds A et B de la micro-fissure (b) en fonction d/a. 93

Fig. IV.8 Modèle géométrique des fissures en tant que « d » dans la même ligne (a/a_0~3)..... 93

Fig. IV.9 Intégrale J au niveau de fissure et de micro-fissure en fonction d/a. 94

Fig. IV.10 Modèle géométrique de fissures en fonction θ (a/a_0~3)..... 94

Fig. IV.11 Intégrale J à la fissure (a) et fonds de la micro-fissure (b) en fonction angle θ... 95 Fig. IV.12 Modèle géométrique de plaque à deux fissures..... 96 Fig. IV.13 schéma des fissures en fonction de θ ($a=a_0$) 96

Fig. IV.14 Intégrale J aux fissures en fonction θ. 96

Fig. IV.15 Intégrale J aux fissures en fonction a/a_0 à θ différent..... 97

Fig. IV.16 Modèle géométrique de la plaque. 98

Fig. IV.17 Intégrale J aux fissures en fonction de θ de la fissure B ($a=a_0$, $r=r_0$). 98

Fig. IV.18 Plaque FGM avec deux fissures émanant des entailles..... 99

Fig. IV.19 Intégrale J en fonction de normalisée (σ0, r/w) avec (a, a_0/w=0,1) 100

Fig. IV.20 Variation de Intégrale J en fonction β 100

Fig. IV.21 modèle géométrique d'une plaque en céramique (TiB) avec deux bands de FGM,.. 102

Fig. IV.22 Intégrale J en fonction (h/w). 102

ANNEXE C: LISTE DES TABLEAUX

Tableau. I.1 Caractéristique moyenne des fibres et renforts..... 12

Tableau. I.2 comparaison entre les propriétés de la céramique et du métal. 21

Tableau. III.1 Propriétés mécaniques utilisées pour les phases métalliques et céramiques du matériau FGM..... 66

Tableau. III.2 Variation du gain en fonction de l'intégrale J pour différentes distributions de matériaux et conditions de charge mécanique. 69

Tableau. III.3 Variation du gain en fonction de l'intégrale J pour différentes conditions de charge mécanique. 81

ANNEXE D: LES SOUS-PROGRAMME

1- E-FGM selon r

```
**USER SUBROUTINE

      SUBROUTINE USDFLD(FIELD,STATEV,PNEWDT,DIRECT,T,CELENT,
     1 TIME,DTIME,CMNAME,ORNAME,NFIELD,NSTATV,NOEL,NPT,LAYER,
     2 KSPT,KSTEP,KINC,NDI,NSHR,COORD,JMAC,JMATYP,MATLAYO,LACCFLA)
C
      INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
C
      CHARACTER*80 CMNAME,ORNAME
      CHARACTER*3  FLGRAY(15)
      DIMENSION FIELD(NFIELD),STATEV(NSTATV),DIRECT(3,3),
     1 T(3,3),TIME(2)
      DIMENSION ARRAY(15),JARRAY(15),JMAC(*),JMATYP(*),COORD(*)
C     DIMENSION INTV(1),REALV(1)

      X=COORD(1)
      Y=COORD(2)
      Z=COORD(3)
      L=20*(2**0.5)
      R=((((X)**2)+((Y)**2))**0.5)
      FIELD(1)=exp((1.22/L)*(R-3))

      RETURN
      END
```

2- P-FGM)$_{n=0.5}$ selon r

```
      SUBROUTINE USDFLD(FIELD,STATEV,PNEWDT,DIRECT,T,CELENT,
     1 TIME,DTIME,CMNAME,ORNAME,NFIELD,NSTATV,NOEL,NPT,LAYER,
     2 KSPT,KSTEP,KINC,NDI,NSHR,COORD,JMAC,JMATYP,MATLAYO,LACCFLA)
C
      INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
C
      CHARACTER*80 CMNAME,ORNAME
      CHARACTER*3  FLGRAY(15)
      DIMENSION FIELD(NFIELD),STATEV(NSTATV),DIRECT(3,3),
     1 T(3,3),TIME(2)
      DIMENSION ARRAY(15),JARRAY(15),JMAC(*),JMATYP(*),COORD(*)
```

```
C    DIMENSION INTV(1),REALV(1)

     X=COORD(1)
     Y=COORD(2)
     Z=COORD(3)
     L=20*(2**0.5)
     F=L/2
     R=((((X)**2)+((Y)**2))**0.5)
     FIELD(1)=(((((R-3)+F)/L)**0.5)*3.41)+1-((((R-3)+F)/L)**0.5)

     RETURN
     END
```