

Chapitre I
Généralités sur les matériaux
composites avancés

Chapitre I

Généralités sur les matériaux composites avancés

I.1. Introduction

Depuis le début du vingtième siècle, l'utilisation des matériaux composites multicouches dans différentes applications d'ingénierie a largement augmenté. Malgré les avantages que présentent ces matériaux "grande rigidité, résistance mécanique élevée, légèreté, réduction des coûts...etc.", ils apportent aussi des problèmes spécifiques liés principalement à leur hétérogénéité. Il est bien connu dans la littérature que la différence des propriétés mécaniques entre des couches adjacentes peut entraîner des contraintes très élevées aux interfaces. Ces contraintes inter-faciales élevées peuvent engendrer des fissurations au niveau des interfaces qu'on appelle délaminage, des fissures, et d'autre mécanisme d'endommagement en raison du changement brutal des propriétés mécaniques et thermiques d'une couche à l'autre. Ce problème a attiré beaucoup d'attention en raison de son influence significative sur la résistance et la rigidité des structures composites multicouches [24].

À la fin des années 80, une équipe de chercheurs japonais a proposé de surmonter ces difficultés par une solution d'une transition continue des propriétés recherchées, en concevant de nouveaux matériaux qui possèdent un gradient de composition permettant de diminuer les fortes concentrations de contrainte par l'utilisation d'une nouvelle classe de matériaux composites avancés connus sous le nom de matériaux à gradient de propriétés "*Functionally Graded Materials : FGM*" dont les propriétés mécaniques varient lentement et continuellement dans l'épaisseur de la structure [25].

Au début, les matériaux composites avancés ont été conçus en tant que matériaux thermiques de barrière dans les applications aéronautiques et les réacteurs. C'est par la suite que ces matériaux ont été développés dans le domaine militaire, l'automobile, le biomédicale, l'industrie de semi-conducteur et toutes utilisations dans un environnement à hautes températures. Ces types de matériaux, ont suscité beaucoup d'attention récemment

en raison des avantages de diminuer la disparité dans les propriétés matérielles et de réduire les contraintes thermiques.

I.2. Concept des matériaux FGM

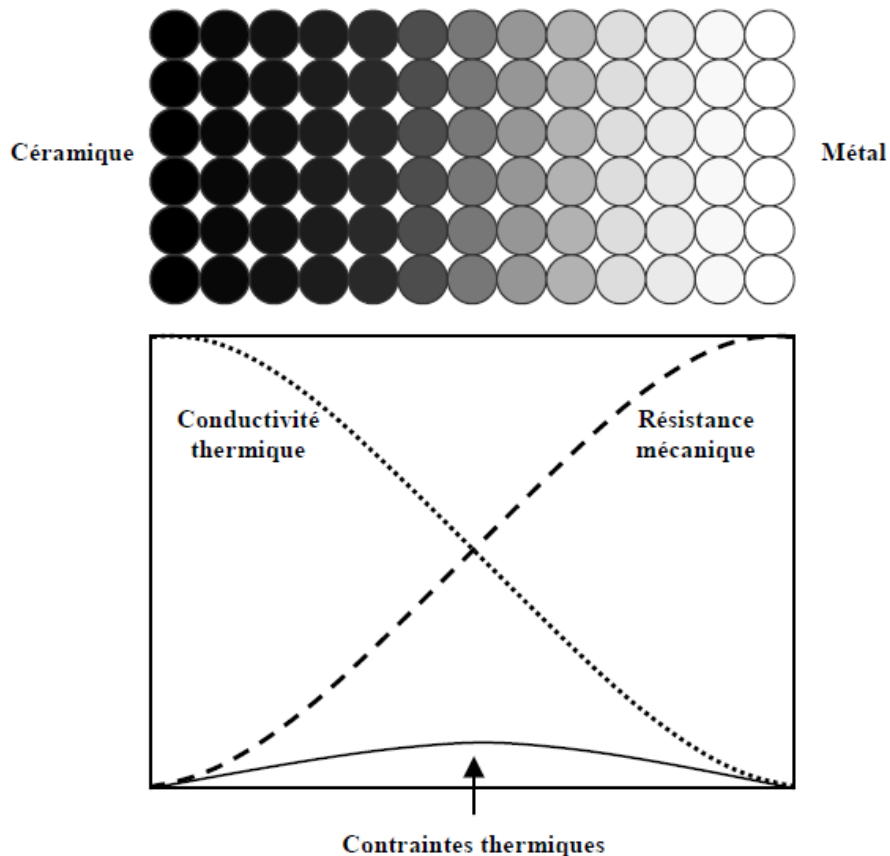
Le concept des matériaux à gradient de propriétés "FGM" fut proposé à la fin des années 1980 par un groupe de chercheurs au laboratoire national d'aérospatial "*National Aerospace Laboratory*" au Japon pour développer des pièces capables de résister aux sollicitations thermiques et mécaniques dans les systèmes de propulsion et le fuselage des navettes spatiales et comme un moyen de préparer les matériaux de barrière thermique pour l'isolation des chambres de nucléaires [26]. Une pièce peut être qualifiée de matériau FGM lorsqu'elle est composée d'au moins deux matériaux ou alliages primaires qui sont distribués continuellement ou dis-continuellement à l'intérieur de la structure. Lorsque la distribution est continue, on parle alors de matériaux à gradient continu [27]. Dans ce cas, la composition et la microstructure du matériau changent graduellement à l'intérieur de la pièce. Cette distribution des matériaux permet de modifier les propriétés à l'intérieur même de la pièce. Des gradients de propriétés peuvent ainsi être réalisés au niveau mécanique, physique, chimique, etc.

La variation continue des propriétés mécaniques confère au matériau un comportement optimisé. Les FGM sont particulièrement utilisés dans les applications de haute technologie: aéronautique, aérospatiale, nucléaire, semi-conducteurs, et en Génie Civil et trouvent également des applications biomédicales. La plupart des "FGM" sont constitués des céramiques et des métaux dont les propriétés mécaniques sont comparés dans le tableau I.1.

Tableau I.1 : Comparaison entre les propriétés de la céramique et du métal.

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

Le changement continu dans la composition et donc dans la microstructure d'un matériau "FGM" est illustré dans la figure I.1ci-après. Il en résulte un gradient qui déterminera les propriétés des "FGM". Dans certains cas, on peut avoir un matériau composite avancé constitué d'un même matériau mais de microstructure différente [28].



+

Figure I.1 : Concept des matériaux à gradient de propriétés.

I.3. Différences entre FGM et matériaux composites traditionnels

Les matériaux à gradient de propriétés attirent l'attention en termes de leurs applications 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 (voir figure I.2). Par exemple, l'un des FGM qui se composent du métal et de céramique à la caractéristique de la conductivité thermique et de la force métallique dans le côté en métal et la résistivité aux hautes températures du côté céramique.

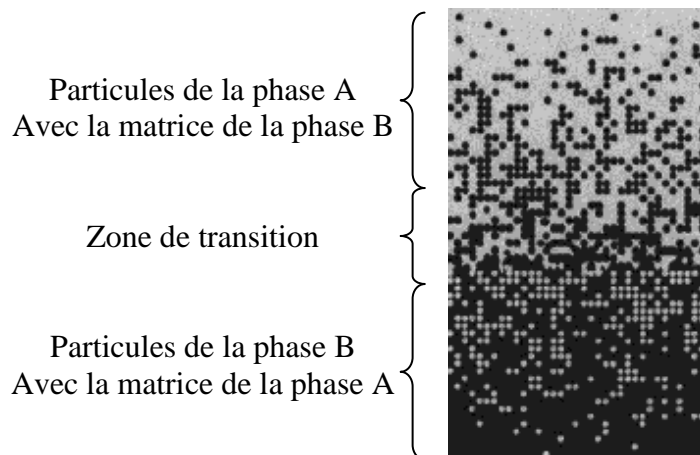


Figure I.2 : FGM "les fractions de volume graduées dans la direction verticale" [29].

Donc ces matériaux sont donc des matériaux composites avancés avec un caractère au microscope non homogène. Les changements continus de leur microstructure distinguent le FGM des matériaux composites conventionnels. Le changement continu de la composition a comme conséquence les gradients dans les propriétés de FGM. Les différences dans la microstructure et les propriétés entre FGM et matériaux composites conventionnels sont illustrées schématiquement sur la figure I.3.

| | | | |
|-------------------|---|------------|----------------|
| Propriétés | <p>1 Résistance mécanique</p> <p>2 Conductivité thermique</p> | | |
| Structure | Eléments constitutants: Céramique ○ Métal ● Microporosité ◊ Fibre ◊* | | |
| Matériaux | Exemple | FGM | NON-FGM |

Figure I.3 : Caractéristiques des matériaux FGM en comparaison avec les matériaux composites conventionnels [32].

I.4. Historique de développement des FGM

Le concept des matériaux fonctionnellement gradués a été aperçu dans la nature depuis des millions d'années. On peut les trouver dans les tissus des plantes, des animaux et même dans notre corps en citant à titre d'exemple les os (voir figure I.4), les coquilles, les noix de coco et les feuilles de certaines graminées comme les bambous.

Tous ces exemples, ouvrent la porte vers la biométrie qui tente d'appliquer les caractéristiques de la conception de la nature dans les sciences industrielles et médicales.

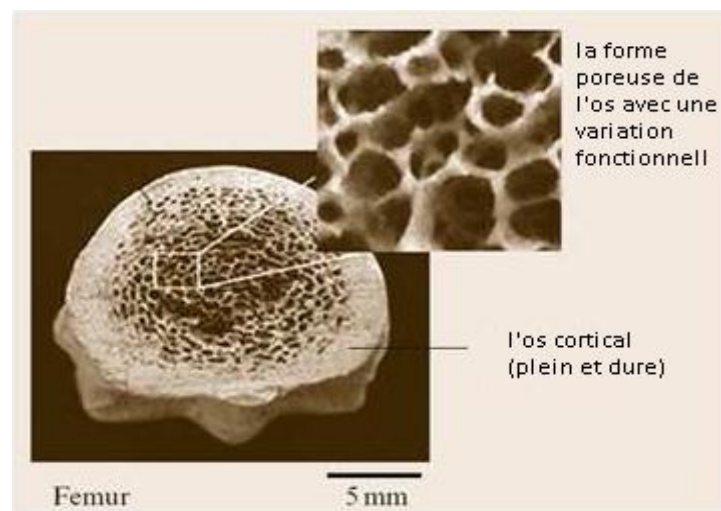


Figure I.4 : Vue microscopique d'une section transversale de l'os.

Le concept de FGM est né au milieu des années quatre-vingt dans le laboratoire national d'aérospatial au Japon, qui fût suivi par d'autres pays : l'Allemagne, la Suisse, Les Etats-Unis, la Chine et la Russie. En 1984 M. Niino et ses collègues à Sendai. Ont eu l'idée de réaliser des matériaux utilisés comme barrière thermique dans les structures spatiales et les réacteurs à fusion [31]. Les changements continus dans la composition, dans la microstructure, et même dans la porosité de ces matériaux a comme conséquences des gradients des propriétés matérielles telles que les propriétés mécaniques et la conductivité thermique [32]. Cette nouvelle classe de matériaux composites peuvent être utilisés pour différentes applications, telles que les enduits des barrières thermiques pour les moteurs en céramique, turbines à gaz, couches minces optiques [33].

En 1987, le gouvernement Japonais a lancé un vaste projet intitulé "la recherche sur la technologie de base pour développement de Matériaux à Gradient de propriétés et l'étude de la relaxation des contraintes thermiques". L'intérêt du projet est de développer des matériaux présentant des structures utilisées comme barrière thermique dans les programmes aérospatiaux. 17 laboratoires nationaux de recherche, des universités et des entreprises ont été engagées dans ce projet [34].

Trois caractéristiques sont à considérer pour la conception de tels matériaux :

- Résistance thermique et résistance à l'oxydation à haute température de la couche superficielle du matériau ;
- Ténacité du matériau côté basse température ;
- Relaxation effective de la contrainte thermique le long du matériau.

Pour répondre à un tel cahier des charges, l'idée originale des FGM a été proposée pour élaborer un nouveau composite profitant à la fois des propriétés des céramiques "côté haute températures" et des métaux "côté basse température".

À la fin de la première étape (1987-1989), les chercheurs avaient réussi à fabriquer des petites pièces expérimentales "1-10 mm d'épaisseur et 30 mm de diamètre" pouvant résister à des températures maximales de 2000K "température de surface" et à un gradient de température de 1000K. Quatre techniques ont été utilisées pour fabriquer les matériaux présentant un gradient de composition et de structure. Les techniques utilisées dans la fabrication de tels matériaux sont les suivantes : le système SiC/C par C.V.D., le système PSZ/Mo par la technique de la compaction sèche des poudres, le système TiB₂/Cu par synthèse par auto-propagation à haute température, et enfin le système (Ni-Cr-Al-Y)/ (ZrO₂-Y₂O₃) par projection plasma à double torches [32].

Dans la seconde étape (1990-1991), le but était de réaliser des pièces de tailles plus grandes et de forme plus complexes par rapport à celles réalisées dans la première étape. Pendant les années 90, non seulement les champs d'applications des FGM s'est développé pour les matériaux de structure fonctionnant à haute température, mais s'est aussi élargi à d'autres applications: biomécaniques, technologie de capteur et l'optique [35].

En 1992, c'est la période de l'amélioration de l'efficacité des FGM dans la conservation d'énergie photoélectrique, thermoélectrique, thermonucléaire [36].

I.5. Les méthodes de fabrication des FGM

Les procédés de fabrication d'un matériau à gradient de propriétés "FGM" peuvent habituellement être divisés en construisant la structure dans un espace hétérogène "mélange graduel" et transformation de cette structure en matériau en bloc "solidification". Les processus de mélange graduel peuvent être classés dans les constituants, l'homogénéisation et la ségrégation. Les procédés élémentaires sont basés sur la fabrication par étape de structure en matériaux graduels précurseurs ou poudres. Les avancés en technologie d'automatisation pendant les dernières décennies ont rendu des processus élémentaire de progression technologiquement et économiquement durable. Dans la procédure d'homogénéisation qui traite une interface pointue entre deux matériaux est convertie dans un gradient par transport matériel. Les procédés d'homogénéisation et de ségrégation produit un gradient continu, mais ont des limitations au sujet des types de gradients qui peuvent être produits.

Habituellement le séchage et la solidification suivent les étapes du mélange graduel. Le besoin de ces processus de consolidation doit être adapté à FGMs: les conditions de ces procédures doivent être choisies pour que le gradient ne soit détruit ou altéré en mode non contrôlée. L'attention doit être également prêtée au rétrécissement inégal de FGMs pendant la consolidation [36].

Ces dernières années, les travaux menés au laboratoire ont permis de développer une méthode originale pour élaborer des composites à gradient continu de composition. Cette méthode est basée sur une technique de Co-sédimentation de poudres en milieu aqueux. Chaque particule élémentaire de poudre sédimente avec une vitesse proportionnelle à la densité du matériau et au carré du diamètre de la particule "relation de Stokes". En contrôlant et en adaptant les répartitions granulométriques de chaque poudre, il est possible d'obtenir différents gradients de concentration dans le dépôt formé à l'issue de la sédimentation.

Il existe de nombreuses méthodes d'élaboration des matériaux à gradient de propriétés, les techniques les plus employées sont brièvement expliquées ci-après.

I.5.1. Coulage en bande "Tape Casting"

Le coulage en bande est une technique de mise en forme par voie liquide qui consiste à étaler une barbotine de poudres fines en suspension sur une surface plane en couches minces et régulières. L'étalement de la bande est obtenu par le mouvement relatif d'un réservoir ou sabot. La suspension est ainsi laminée par son passage entre la lame du réservoir et le support (figure I.5), ce qui confère à la bande déposée une épaisseur uniforme sur toute sa longueur. La hauteur du couteau du réservoir par rapport au support détermine l'épaisseur de la bande [39]. Les produits obtenus sont des feuillets avec des épaisseurs contrôlées. Après un raffermissement de la pâte, les feuillets sont démoulés et ensuite découpés.

Le procédé de coulage en bande est largement utilisé pour réaliser des matériaux composites laminaires suivant deux méthodes, soit par réalisation directe de bandes multicouches grâce à un système de lames multiples, c'est le cas des tri-couches élaborés par Mistler [38], soit par empilage de couches élaborées séparément, dont la cohésion est ensuite assurée par une étape de thermo-compression [28].

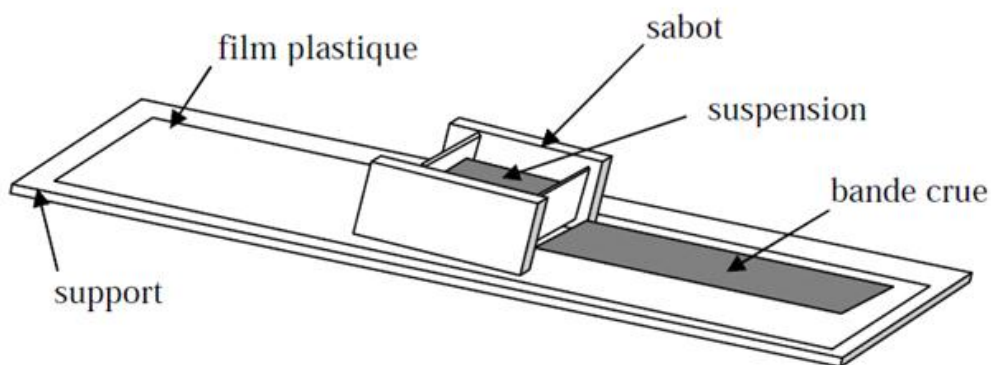


Figure I.5 : Principe de la méthode coulage en bande [39].

I.5.2. Coulage séquentiel en barbotine "Slip Casting"

Le coulage en barbotine "slip casting" consiste à couler une suspension dans un moule poreux qui va drainer le liquide grâce aux forces capillaires, laissant un tesson "couche de poudre compacte" sur la surface du moule. Après séchage, on obtient le corps en cru. Donc le coulage se décompose en deux étapes essentielles :

- ✓ Formation du tesson ou "prise",
- ✓ Consolidation du tesson ou "raffermissement".

La filtration, c'est à dire la formation du tesson lors du coulage, peut être considéré comme un processus d'élimination d'une partie de l'eau de la barbotine; Cette eau migre à travers la couche de tesson déjà formée, sous l'effet :

- ✓ Du pouvoir de succion du plâtre "coulage classique [39] ",
- ✓ Ou d'une pression appliquée sur la barbotine "coulage sous pression".

Dans le cas de la fabrication de multicouches, après la formation du premier tesson, le dépôt de la deuxième couche s'effectue de manière telle que la barbotine ne pénètre pas dans le tesson formé. Ce procédé est successivement reproduit pour les autres couches.

I.5.3. Dépôt par Electrophorèse

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 [40]. 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 ZrO_2/Al_2O_3 et le céramique-métal, WC/Co puisque la composition des couches déposantes est déterminée par la suite composition de la suspension au moment du dépôt. Une installation générale de ce principe est illustrée sur la (figure I.6).

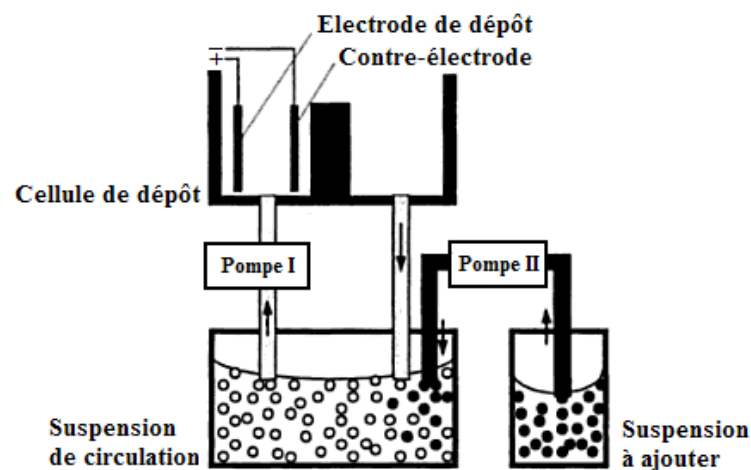


Figure I.6 : Principe de l'installation d'EPD pour la production des FGM [43].

I.5.4. Compaction sèche des Poudres

Dans cette technique les poudres sont successivement versées dans un moule en acier. Chaque fois qu'une poudre est versée, une faible compression est exercée. Ensuite, la compaction de l'ensemble des couches sera effectuée. Ce procédé est suivi, généralement, par une pression isostatique et un déliantage. La densification sera enfin l'étape finale.

Ce procédé peut être envisagé pour la fabrication de pièces de formes complexes. En effet il s'applique aussi avec la technique du pressage isostatique, et de façon industrielle [41].

I.5.5. Projection plasma

La projection plasma consiste à introduire des particules solides "de taille inférieure à $100\mu\text{m}$, environ" dans un jet de gaz, dont la température atteint couramment 1100°C et la vitesse $1000\text{-}1500\text{m/s}$ (figure I.7). Le dépôt est ainsi formé par l'empilement des lamelles solidifiées obtenues par l'impact des particules sur le substrat préalablement préparé [45]. 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 la projection plasma sont la résistance à l'usure et à la corrosion et ainsi à l'isolation thermique et électrique.

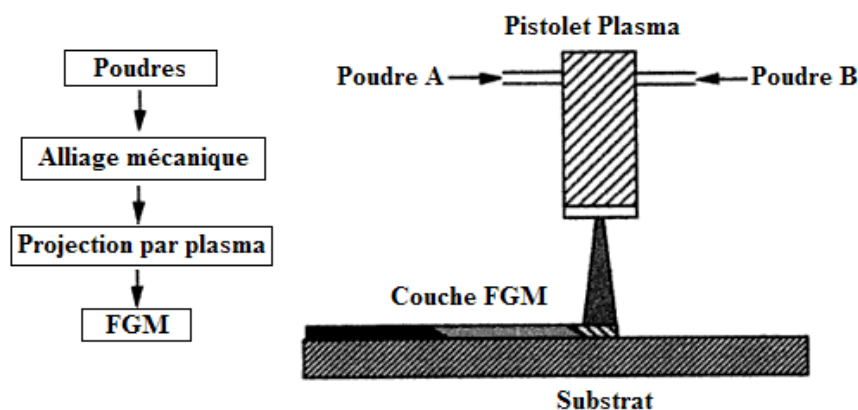


Figure I.7 : Méthode de projection plasma pour former un matériau thermoélectrique gradué. "La composition est graduée dans la direction plane "[42].

La projection plasma est devenue une méthode très utile pour fabriquer des FGM. Le rendement élevé du dépôt des particules sur des substrats à géométrie compliquée, les performances des surfaces en fonctionnement et la compatibilité des céramiques avec les métaux sont les avantages essentiels de cette technique.

I.5.6. Frittage et Infiltration

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 [43].

Cette méthode 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.5.7. Dépôt physique en phase vapeur "PVD"

La technique de dépôt physique en phase vapeur "*physical vapor deposition*" est une technologie prometteuse pour la production de revêtements de barrière thermique. Parmi les caractéristiques avantageuses de PVD que les revêtements fabriqués ont des surfaces lisses, sans exigence, enfin 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.

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. 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.

I.5.8. Dépôt chimique en phase vapeur "CVD"

Dans la technique de dépôt chimique en phase vapeur "*chemical vapor deposition*", représenté schématiquement à la (figure I.8), 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. 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 [44].

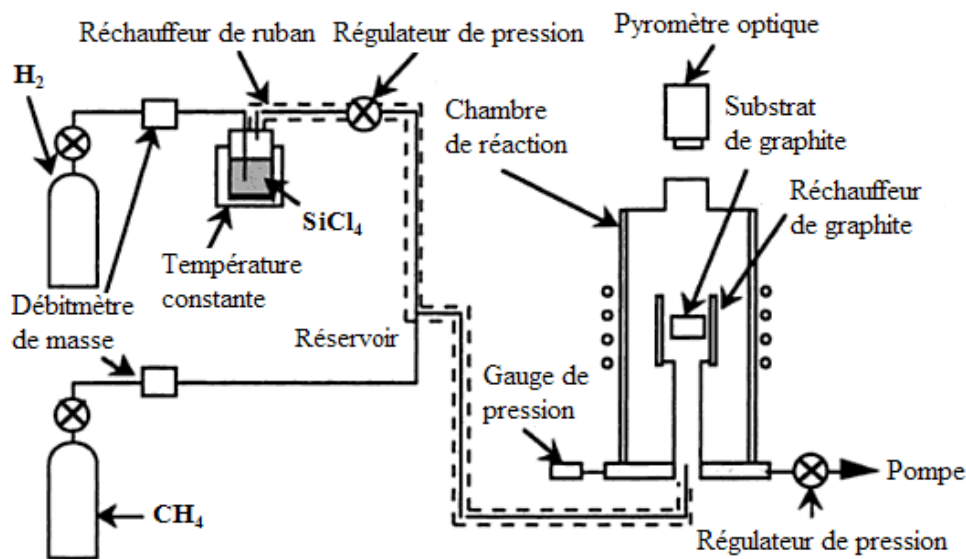


Figure I.8 : Technique de préparation d'un SiC/C FGM par le dépôt chimique en phase vapeur "CVD" [43].

I.6. Lois régissant la variation des propriétés matérielles des plaques FGM

Les matériaux à gradient de propriétés "FGM" peut être produit en changeant sans interruption les constituants des matériaux multiphasés dans un profil prédéterminé. Les dispositifs les plus distincts d'un FGM sont les microstructures avec des macros -propriétés graduées sans interruption. Un FGM peut être définie par la variation des fractions de volume.

La plupart des chercheurs utilisent la fonction de loi 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.

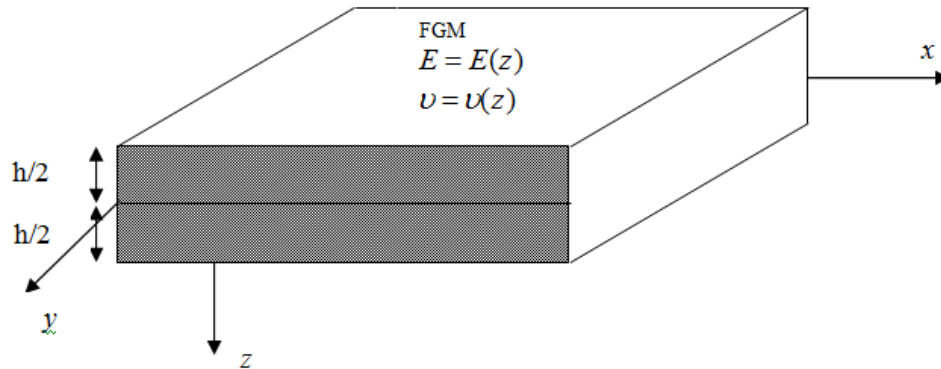


Figure I.9 : Géométrie d'une plaque en FGM.

Les coordonnées x et y définissent le plan de la plaque (figure I.9), tandis que la direction de l'axe z 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 surfaces supérieures et inférieures sont différentes mais sont déterminés selon les demandes d'exécution.

Toutefois le module d'élasticité "Young" et le coefficient de Poisson varient de façon continue, dans le sens de l'épaisseur "l'axe z " soit : $E = E(z)$, $\nu = \nu(z)$. Le module de Young dans le sens de l'épaisseur de la plaque en matériaux à gradient de propriétés varie en fonction de la loi de puissance "P-FGM" ou avec la fonction sigmoïde "S-FGM" ou bien la fonction exponentielle "E-FGM".

I.6.1. Propriétés matérielles de la plaque P-FGM

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

$$V(z) = \left(\frac{z + h/2}{h} \right)^p \quad (\text{I.1})$$

Où p est un paramètre matériels et h est l'épaisseur de la plaque. Une fois la fraction volumique locale $V(z)$ à été définie, les propriétés matérielles d'une plaque P-FGM peuvent être déterminées par la loi des mélanges [45] :

$$E(z) = V(z)E_1 + [1 - V(z)]E_2 \quad (I.2)$$

Où E_1 et E_2 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 module de Young dans la direction d'épaisseur de la plaque P-FGM est représentée sur la (figure I.10), il apparait clairement que la fraction volumique change rapidement près de surface inférieure pour $p < 1$, et augmenté rapidement près de la surface supérieure pour $p > 1$.

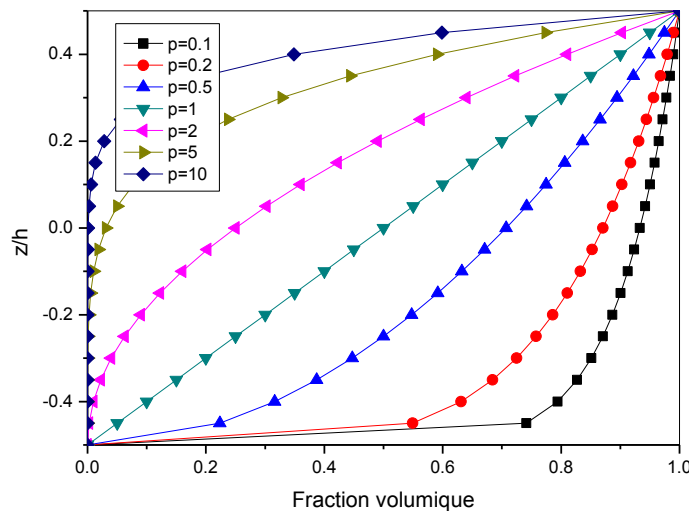


Figure I.10: Variation de la fraction volumique dans une plaque "P-FGM".

I.6.2. Propriétés matérielles de la plaque S-FGM

Dans le cas d'ajouter une plaque P-FGM d'une simple fonction de loi de puissance à une plaque composite multicouche, les concentrations des contraintes apparaissent sur l'interfaces où le matériau est continu mais change rapidement [45]. Par conséquent, Chung et Chi [45] 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 définis par :

$$V_1(z) = \frac{1}{2} \left(\frac{h/2 + z}{h/2} \right)^p \quad \text{Pour } -h/2 \leq z \leq 0 \quad (\text{I.3a})$$

$$V_2(z) = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{h/2 - z}{h/2} \right)^p \quad \text{Pour } 0 \leq z \leq h/2 \quad (\text{I.3b})$$

En utilisant la loi des mélanges, le module de Young de la plaque S-FGM peut être calculé en utilisant les relations suivantes :

$$E(z) = V_1(z) E_1 + [1 - V_1(z)] E_2 \quad \text{Pour } -h/2 \leq z \leq 0 \quad (\text{I.4a})$$

$$E(z) = V_2(z) E_1 + [1 - V_2(z)] E_2 \quad \text{Pour } 0 \leq z \leq h/2 \quad (\text{I.4b})$$

La (figure I.11) montre que la variation de la fraction volumique dans les équations (I.4.a) et (I.4.b) représente les distributions sigmoïdes, et cette plaque FGM est appelée dans ce cas "Plaque S-FGM".

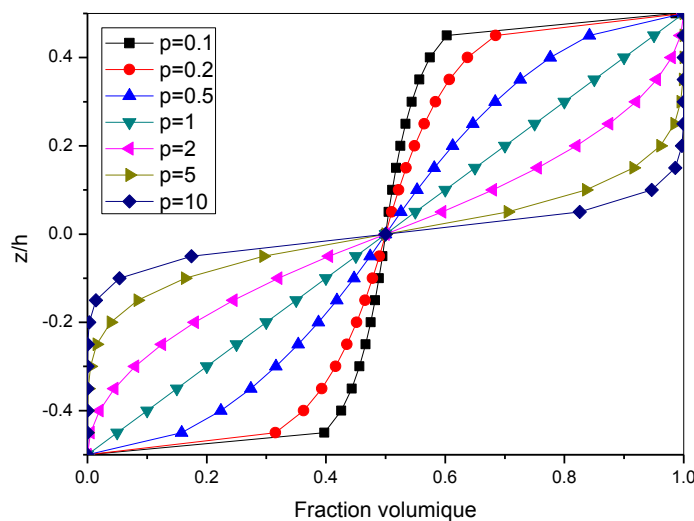


Figure I.11: Variation de la fraction volumique dans une plaque "S-FGM".

I.5.3. Les propriétés matérielles de la poutre E-FGM

Pour décrire les propriétés matérielles des matériaux FGM, la plupart des chercheurs utilisent la fonction exponentielle "E-FGM". En effet, cette fonction est impliquée dans ce présent travail, car les propriétés du matériau varient à travers l'épaisseur avec une distribution exponentielle. La fraction de volume des constituants s'écrit sous la forme (figure I.12) :

$$V(z) = e^{p \left(\frac{z+1}{h} \right)} \quad (\text{I.5a})$$

Et le module de Young de la plaque E-FGM peut être calculé en utilisant l'expression suivante :

$$E(z) = E_1 V(z) \quad (\text{I.5b})$$

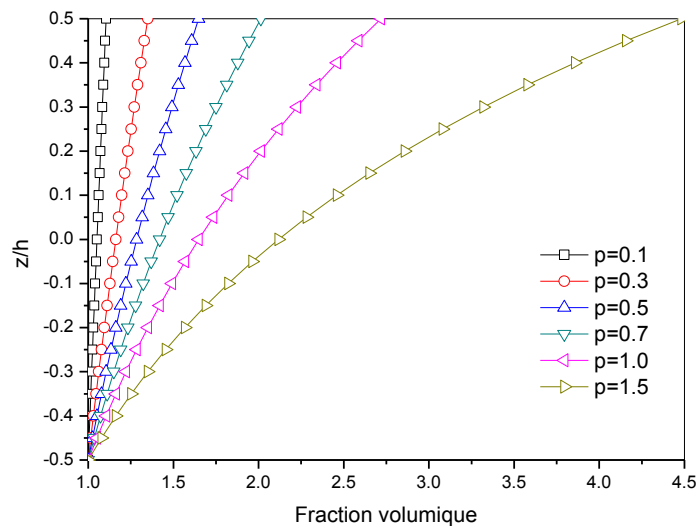


Figure I.12: Variation de la fraction volumique dans une plaque "E-FGM".

I.6. Domaines d'application des FGM

Le concept des matériaux à gradient de propriétés est applicable dans un large intervalle et dans différents domaines.

I.6.1. Aéronautique

Les FGM permettent de produire un poids-léger des matériaux solides, durables et applicables dans différents domaines de structure. Ces derniers sont considérés d'une part, comme une technologie indispensable pour la roquette et à la construction de station spatiale, et d'autre part utilisables comme des barrières thermiques des avions spatiaux et des parties de moteur de fusée.

I.6.2. Matières industrielles

De nombreuses applications de FGM ont été récemment apparues pour les matériaux industriels. Comme les produits récents sont intensifiés en raison d'une résistance mécanique et thermique accrue, la demande d'un nouveau matériau pour l'outil industriel est en pleine

croissance. Dans ce domaine, il est nécessaire d'avoir les deux résistances donc la demande de la FGM est une solution.

I.6.3. Biomatériaux

Notre corps est soutenu par 206 os, et certains d'entre eux couvrent un cerveau et des organes. Si nous avons une douleur à un os ou une articulation, nous aurons des troubles dans notre vie. Pour résoudre ce problème, un nouveau matériau nommé FGM est apparu et peut remplacer les os et les articulations. Non seulement la dureté et une excellente résistance à la corrosion et la compatibilité, mais aussi au niveau biologique.

I.6.4. Energie solaire

Les cellules photovoltaïques des piles solaires ont une bande de fréquence propre de réponse à la lumière dépendant des matériaux. Ces piles solaires utilisent des FGM et présentent une réponse optimale sur une très large bande de fréquence. De plus la combinaison de la génération thermoélectrique avec la génération photovoltaïque sur une pile solaire permet la pleine utilisation de l'énergie lumineuse et thermique du rayonnement solaire et donc conduit à un meilleur rendement de conversion global.

Ces conversions thermoélectroniques utilisant les FGM laissent entrevoir la mise au point de générateurs à recharge de gaz ou kérosène compacts qui peuvent être utilisés dans des zones reculées en montagne ou dans les déserts froids ou chauds pour des instruments de mesure et de communication comme par exemple des stations météorologiques.

I.6.5. Génie civil

Les FGM peuvent être utilisés dans les chaussées rigides en béton avec une gradation obtenue par la variation de la fraction volumique des fibres, cette technique est visée d'être utilisée dans les autoroutes et les routes à très fort trafic où l'utilisation d'une chaussée souple en béton bitumineux est déconseillée, tels que les dallages industrielles, les pistes des aéroports, car elles offrent une résistance et une durabilité élevées, le but est d'optimiser l'épaisseur de la chaussée afin d'avoir un matériau rigide sur la surface de roulement et un matériau moins rigide sur la couche de fondation.

Les FGM peuvent être utilisés dans les chaussées souples pour supprimer les couches d'accrochage entre la couche de la Grave Bitume et la couche de roulement en Béton Bitumineux et éviter le glissement entre les deux couches et économiser les épaisseurs des

couches tout en obtenant un comportement optimisé et augmentant la capacité portante de la chaussée et par la suite sa durabilité.

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini au premier lieu les matériaux composites avancés nommés "FGM", l'historique de leur développement, leurs propriétés, leurs principales méthodes de fabrication, et par la suite nous avons cité les différentes lois possibles qui servent à décrire la variation spatiale et progressive des propriétés matérielles du matériau FGM "module de Young, masse volumique et coefficient de poisson" suivant l'épaisseur d'une plaque, ces lois peuvent être de puissance, sigmoïde et exponentielle. Ces matériaux permettent la construction des structures innovantes qui peuvent être exploitées dans de nombreux domaines d'application dans les structures spéciales et en génie civil.