

Chapitre 2

Généralités sur les matériaux à gradients de propriétés

II.1 Définition:

Un matériau n'est pas la matière première brute, mais une matière élaborée en vue d'un usage. Cela nécessite une symbiose entre la préparation de nouveaux composés et la conception de nouveaux objets. Il est évident que la diversité des matériaux modernes est telle qu'on ne peut faire une présentation exhaustive en quelques lignes. Il est plus difficile de faire un choix entre les matériaux dits « traditionnels » comme le bois, le béton, l'acier et les matériaux « évolutifs » comme les céramiques, les métaux, les plastiques. La tendance actuelle n'est d'ailleurs pas de les opposer comme des ennemis mais de les marier pour engendrer des matériaux plus performants tel que le matériaux à gradient de propriétés « FGM ».[Ladmek2 010].

II.2 Aperçu sur l'historique sur les matériaux à gradient de propriétés:

L'amélioration des performances des pièces structurelles peut conduire à rechercher, au sein d'un même matériau, des propriétés différentes, souvent antagonistes, mais localement optimisées. Le développement des matériaux composites a permis d'associer des propriétés spécifiques à différents matériaux au sein d'une même pièce.

L'optimisation locale de ces propriétés, par association d'un matériau de haute dureté à la surface d'un matériau tenace par exemple, pose alors le problème de l'interface. Par exemple, une couche d'un matériau céramique peut coller à la surface d'une structure métallique pour former un revêtement barrière thermique dans les applications à haute température, la transition brusque dans les propriétés des matériaux à travers l'interface entre les matériaux discrets peuvent entraîner une grande contrainte inter laminaire ou une forte concentration de contraintes qui conduit à la déformation plastique ou de fissuration. Une façon pour surmonter ces effets nuisibles on doit employer « un matériau à gradient de propriété (FGM) ».

Ces dernières années, les matériaux à gradients de propriété ont été développés pour leurs excellentes propriétés mécaniques. Ces matériaux ont de grandes performances et sont capables de résister aux températures ultra hautes. Un groupe de scientifiques, à Sendai (Japon) a proposé pour la première fois le concept FGM en 1984, comme étant un nouveau matériau avec une barrière thermique ou des propriétés calorifuge (isolation thermique). Au début, les FGM ont été conçus en tant que matériaux thermiques de barrières dans les applications aéronautiques et les réacteurs.

C'est par la suite que les FGM ont été développés dans le domaine militaire, l'automobile, le biomédical, l'industrie de semi-conducteur et toutes utilisations dans un environnement à hautes températures.

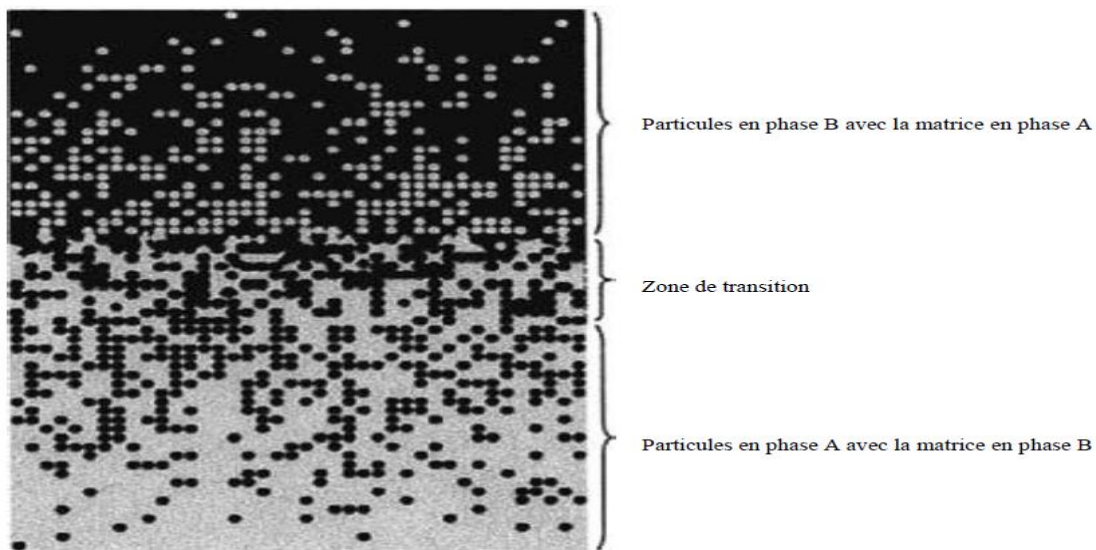


Figure II.1 : Un FGM avec les fractions de volume de phases constitutives graduées

II.3 Définition du concept d'un matériau à gradient de propriétés (FGM) :

Les matériaux à gradient de propriétés (FGM) sont des matériaux constitués de deux ou plusieurs ingrédients de matières dont les fractions de volume relatif et la microstructure sont conçues pour avoir un processus continu de variation spatiale. Des progrès marquants dans la fabrication et des techniques de traitement au cours de la dernière décennie ont permis de produire des FGM en utilisant des procédés qui permettent une grande latitude dans l'adaptation de la microstructure et la composition des matériaux. Dans l'avenir, les FGM avec des propriétés et des formes complexes, y compris les deux et gradients en trois dimensions, seront produits en utilisant la fabrication assistée par ordinateur. Ce potentiel signifie que le concepteur n'est plus limité à une palette du matériel existant homogène. Bien que beaucoup de recherches ont été consacrées à l'analyse des FGM, les ingénieurs et autres professionnels engagés dans le processus

de conception avec les FGM manquent de cadre unifié pour la prise de décisions concernant la façon de tirer le meilleur partie du choix possibles en fonction de ce "menu" d'ingrédients produits et de matières disparates .

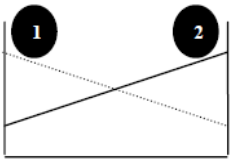
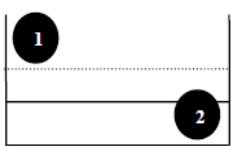
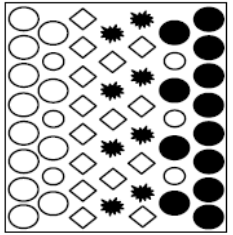
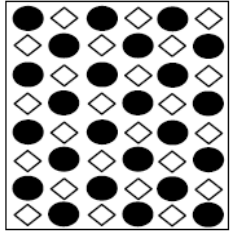
Propriétés	<p>1 Résistance mécanique</p> <p>2 Conductivité thermique</p>		
Structure	<p>Eléments constitutants:</p> <p>céramique ○</p> <p>métal ●</p> <p>microporosité ○</p> <p>fibres ◇*</p>		
Matériaux	exemple	FGM	NON-FGM

Figure II.2 : Caractéristiques des matériaux composites FGM en comparaison avec les matériaux composites conventionnels [Koizumi 1996]

II.4 Différence entre FGM et les matériaux composites traditionnels:

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.3) : (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 a une frontière sur l'interface de deux matériaux. Les 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.

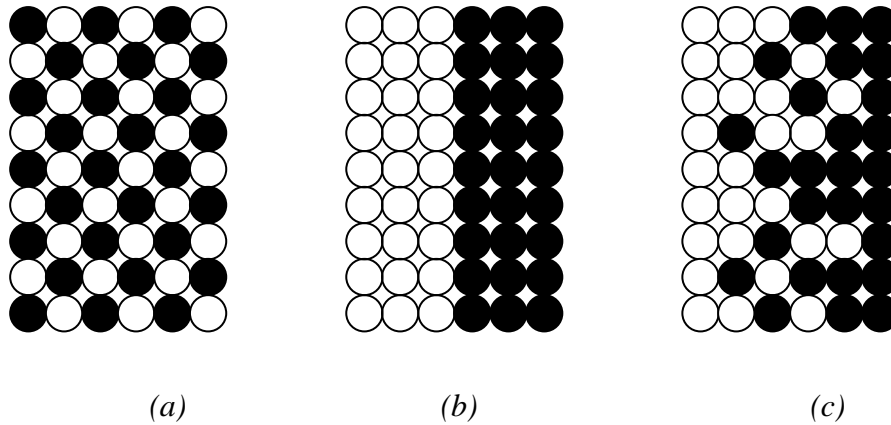


Figure II.3 La distribution composante des matériaux.

Matériau plan composé (a), Matériau relié (b), Matériau à gradient de propriété (c)

II.5 Propriétés matérielles effectives des FGM :

Les matériaux à gradient de propriétés sont généralement fabriqués par deux phases matérielles avec des propriétés différentes. Une description détaillée des microstructures graduée réelles n'est pas disponible, excepté peut-être pour l'information sur la distribution de fraction volumique. Puisque la fraction de volume de chaque phase varie graduellement dans la direction de la graduation, les propriétés effectives des FGM changent le long de cette direction. Par conséquent, nous avons deux approches possibles pour modéliser un FGM. Pour le premier choix, une variation par tranche de fraction volumique de la céramique ou du métal est assumée, et le FGM est pris pour être posé avec la même fraction de volume dans chaque région, c.-à-d., couches quasi homogènes de céramique-métal (figure II.4). Pour la deuxième approche, une variation continue de la fraction volumique de la céramique ou du métal est assumée, et la fraction de volume en métal peut être représentée suivant une fonction dépendante de la coordonnée Z (épaisseur) :

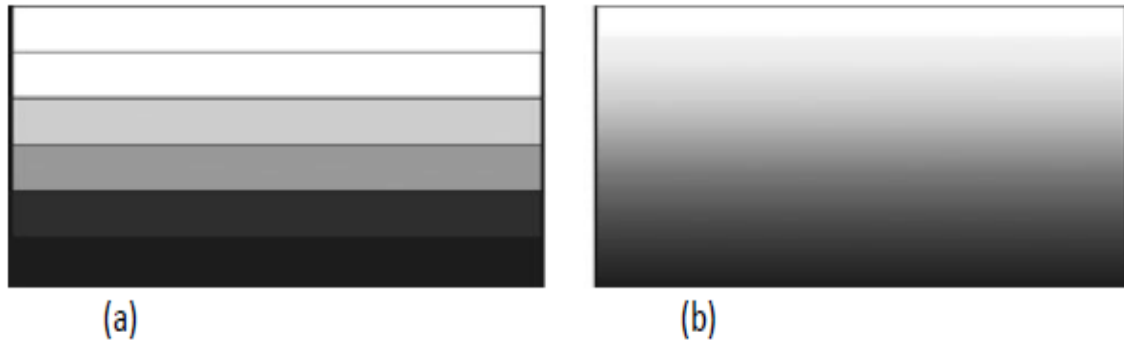


Figure. II.4 : Modèles analytiques pour une couche en FGM.

La plupart des chercheurs emploient la fonction de loi de puissance, la fonction exponentielle, ou la fonction sigmoïde pour décrire les fractions de volume. Par conséquent, on considère dans notre travail des poutres en FGM avec une variation de la fraction de volume qui suit une fonction de loi exponentielle.

II-6 Les différentes lois qui régissent la variation des propriétés matérielles suivant l'épaisseur d'une poutre FGM

II-6 -1 Propriétés matérielles de la poutre P-FGM :

La fraction volumique dans les P-FGM est assurée par une loi de puissance sous la forme :

$$g(z) = \left(\frac{z + \frac{h}{2}}{h} \right)^p \quad (\text{II-1})$$

Où p est un paramètre du matériau et h est l'épaisseur de la poutre. Une fois que la fraction de volume local $g(z)$ est définie, les propriétés matérielles d'une poutre P-FGM peuvent être déterminées par la loi des mélanges :

$$E(z) = g(z).E_1 + [1 - g(z)]E_2 \quad (\text{II-2})$$

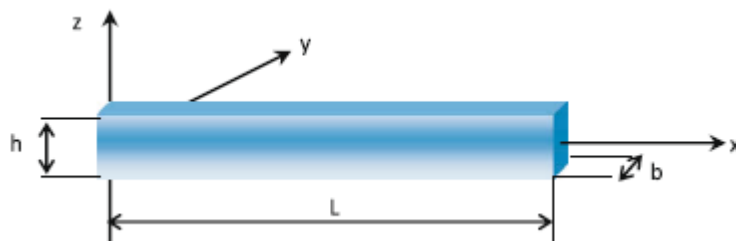


Figure. II.5 Les dimensions de la poutre FGM

Où E_1 et E_2 sont respectivement les propriétés matérielles (modules de Young ou densité) de la surface inférieure ($z = -h/2$) et de la surface supérieure ($z=h/2$) de la poutre FGM. La variation de

ces propriétés dans la direction de l'épaisseur de la poutre P-FGM est représentée sur la figure (II.6), il apparaît clairement que le module de Young par exemple change rapidement près de la surface inférieure pour $p > 1$, et augmente rapidement près de la surface supérieure pour $p < 1$. Pour une résolution numérique, par éléments finis par exemples, Les propriétés matérielles effectives E de la couche de FGM, comme le module de Young E , et la densité et le coefficient de poisson ν peut alors être exprimé comme suit :

$$E = \sum_{j=1} E_j g_j \quad (\text{II-3})$$

Là où le E_j et le g_j sont les propriétés matérielles et la fraction volumique de la couche j (Figure. II.6), et la somme des fractions de volume de tous les matériaux constitutifs fait l'unité :

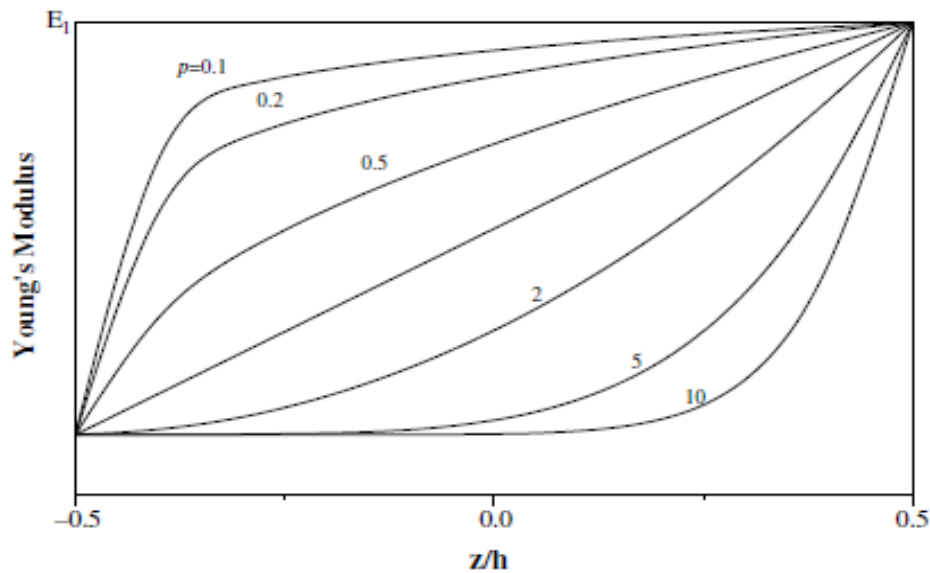


Figure II.6 : La variation du module de Young dans une plaque P-FGM

II.6.2 Propriétés matérielles de la poutre S-FGM :

Si l'on rajoute une poutre P-FGM d'une simple fonction de loi de puissance à une poutre composite multicouche, les concentrations des contraintes apparaissent sur l'interface des deux matériaux Par conséquent, Chung et chi ont défini la fraction de volume de la poutre 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:

$$g_1(z) = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\frac{h}{2} - z}{\frac{h}{2}} \right)^p \quad \text{pour} \quad 0 \leq z \leq \frac{h}{2} \quad (\text{II-4})$$

$$g_2(z) = \frac{1}{2} \left(\frac{\frac{h}{2} - z}{\frac{h}{2}} \right)^p \quad \text{Pour} \quad -\frac{h}{2} \leq z \leq 0$$

En utilisant la loi des mélanges, la propriété E de la plaque S-FGM peut être calculé par:

$$E(z) = g_1(z).E_1 + [1 - g_1(z)]E_2 \quad \text{Pour} \quad 0 \leq z \leq \frac{h}{2} \quad (\text{II-6})$$

$$E(z) = g_2(z).E_1 + [1 - g_2(z)]E_2 \quad \text{Pour} \quad -\frac{h}{2} \leq z \leq 0$$

La figure II.7 montre que la variation du module de Young selon les équations avec des distributions sigmoïdes, donc la poutre FGM est ainsi appelée (poutre S-FGM).

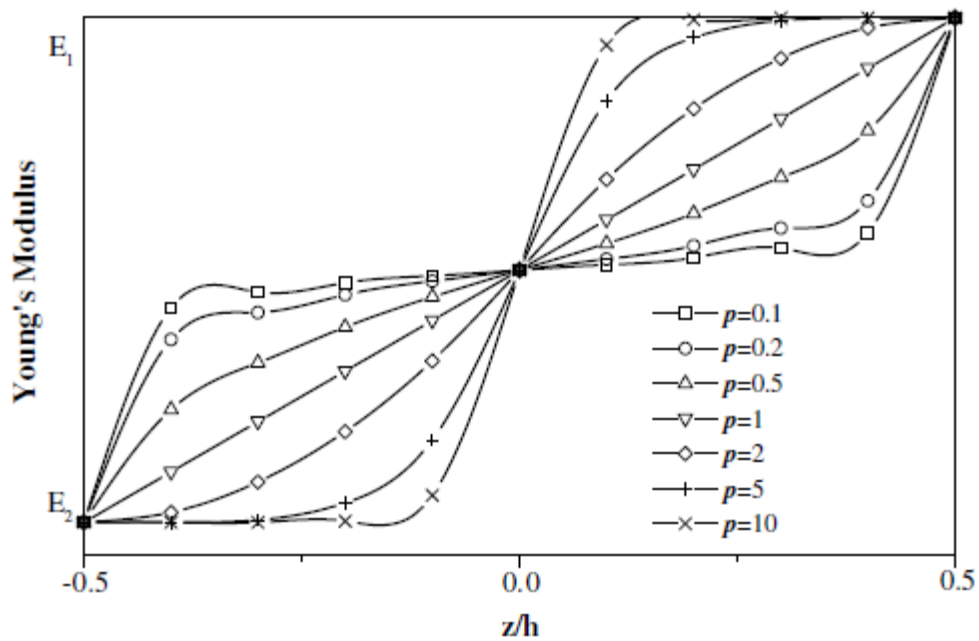


Figure .II.7 La variation du module de Young dans une poutre S-FGM

II.6.3 Propriétés matérielles de la poutre E-FGM

Beaucoup de chercheurs utilisent la fonction exponentielle pour décrire les propriétés matérielles des matériaux FGM, la fonction exponentielle est donnée par [Delale 1983] :

$$E(z) = Ae^{\beta(z+\frac{h}{2})} \quad \text{Avec } A=E_2 \quad \text{et} \quad \beta = \frac{1}{h} \ln \frac{E_1}{E_2} \quad (\text{II-7})$$

La variation du module de Young à travers l'épaisseur de la plaque E-FGM est représentée dans la figure (II.8).

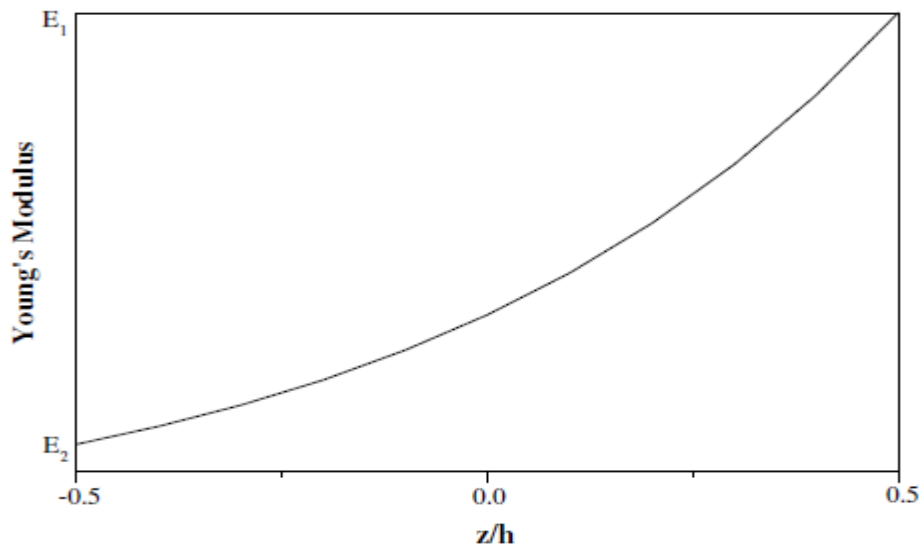


Figure. II.8 La variation du module de Young de la poutre E-FGM

II.7 Procédés de fabrication FGM :

L'utilité des composites à gradient de propriétés avec une structure à gradient a été identifiée dans les articles théoriques par Bever et Duwez, Shen et Bever [Kieback B] Cependant, leurs travaux n'ont qu'un effet limité, probablement en raison d'un manque de méthodes de production appropriées pour FGM 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 a été effectuée dans le cadre d'un programme de recherche national sur les FGM au Japon. Depuis lors, une partie de la recherche sur FGM a été consacrée au traitement de ces matériaux et une grande variété de méthodes de production a été développée [A. Mortensen 1995, T. Hirai 1996].

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.

