

## II-1 Introduction

Les matériaux à gradient de propriétés (FGMs), ayant des composites microscopiques et constituer d'un mélange de métal et céramique, ils attirent beaucoup d'attentions dans les dernier années de leur performances, haute capacité a la résistance et exilent caractéristiques a la compression sous sollicitation, avec continuité la fraction volumique d'un constituant d'un matériau varier à travers la direction, les matériaux FGM peuvent résiste à un milieu de haut température. Ils sont généralement utilisés dans les domaines aérospatiaux, aéronautiques, véhicule, et dans les différents structures d'industries.

## II.2 Définition et concept d'un matériau à gradient de propriétés (FGM)

Un matériau à gradient de propriétés c'est un type de matériaux composites composé de deux ou plusieurs matériaux relatif a des fractions volumiques et microstructure qui sont conçus pour avoir une continuité spatiale des variables (figure II-1).

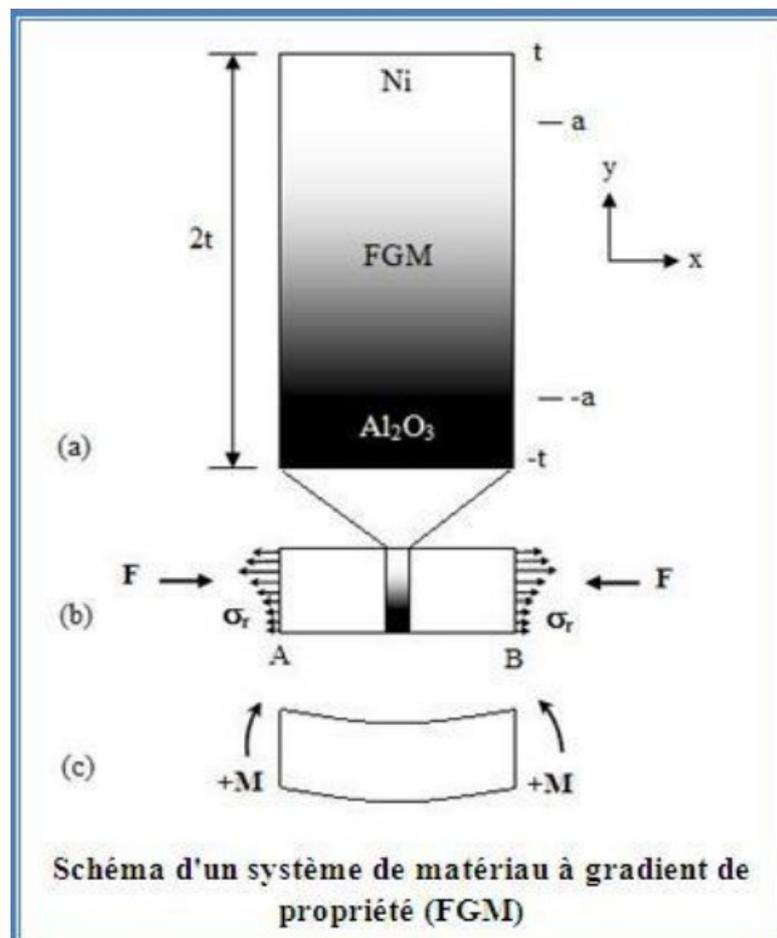
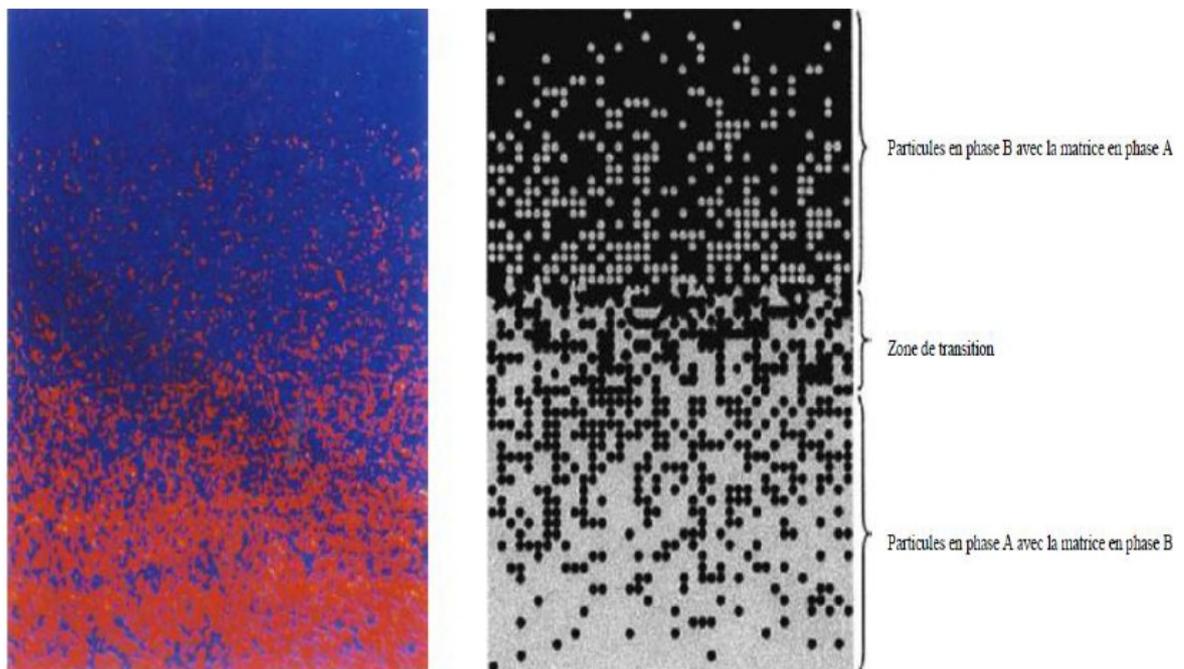


Figure (II-1) : schéma d'un système de matériau à gradient de propriété (FGM)

Un FGM est produit en changeant sans interruption les fractions de volume dans la direction d'épaisseur pour obtenir un profil bien déterminé. Ces matériaux FGM sont généralement fait à partir d'un mélange de métaux et de céramique par un processus de métallurgie de poudre, le coté métal riche est typiquement placé dans les régions ou les propriétés mécaniques, comme la dureté, le besoin d'être élevés. En revanche, le céramique riche, ce qui a la conductivité faible et peut résister aux températures plus élevées, est place dans les régions de grands gradient de la température

Le concept de "Matériaux à Gradient de propriétés" a été développé dans le laboratoire national d'aérospatial en 1984 par un groupe de scientifiques au Japon (M. Niino et ses collègues à Sendai). L'idée est de réaliser des matériaux utilisés comme barrière thermique dans les structures spatiales et les réacteurs à fusion. Un exemple d'un tel matériau est montré sur la (figure II-2) où des particules sphériques ou presque sphériques sont incrustées dans une matrice isotrope.



**Figure. II.2 Un FGM avec les fractions de volume de phases constitutives graduées dans la direction verticale.**

En variant graduellement la fraction de volume des matériaux constitutifs, leurs propriétés matérielles montrent un changement minime et continu d'un point à un autre, de ce fait en remédient aux problèmes d'interface et en atténuant des concentrations de contraintes thermique. C'est dû au fait que les constituants en céramique de FGM peuvent résister aux hautes températures que le produit final possède de meilleures caractéristiques de résistance thermique, tandis que le les constituants métalliques fournissent une résistance mécanique

plus forte et réduisent la possibilité de rupture catastrophique. Donc un FGM (fonctionnelle grade matériel) typique est un composé non homogène constitué de différentes phases matérielles (habituellement en céramique-métal). Cette solution permet une transition continue des propriétés recherchées, par un gradient de composition, en vue d'atténuer les singularités prédites ci-dessous.

Les FGM peuvent être utilisés pour différentes applications, telles que couches en céramique comme barrières thermiques pour les moteurs, turbines à gaz, couches minces en optiques, et... D'autres Applications potentielles de ce matériau sont diverses et nombreuses. Elles ont été, récemment, rapporté dans la littérature ouverte ; par exemple, des sondes, des déclencheurs, des armures métal/céramique, des détecteurs photoélectriques et des implants dentaires. Un certain nombre de revues traitant les différents aspects de ce matériau ont été édités pendant les deux dernières décennies. Il a été montré dans ces revues que la majorité des recherches récentes en FGM sont concentrés sur l'analyse mécanique de la rupture ainsi que sur les contraintes thermiques [12].

### **II-3 Histoire de développement architectural du concept FGM :**

Généralement, les FGM sont des matériaux constitués de plusieurs couches contenant des composantes différents tels que les céramiques et les métaux. Ils sont donc des composites présentant des caractéristiques macroscopiquement homogènes. Le changement continu dans la composition et donc dans la microstructure du matériau distingue les FGM des matériaux composites conventionnels .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 [12].

Le concept FGM peut être appliqué dans divers domaines pour usage structuraux et fonctionnels. Au Japon, plusieurs programmes de cinq ans 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 thermoélectroniques). Ces programmes ont conduit au développement de la conception architecturale du FGM et de ces perspectives.

### **II-4 Propriétés physiques et mécaniques des FGM**

Pour ce travail le matériau FGM choisi est (Aluminium-Céramique).

#### **II-4.1 Propriétés physiques de l'aluminium**

**Définition :** L'Aluminium est un métal blanc qui après polissage peut devenir réfléchissant.

**Propriétés Physiques :** L'Aluminium à une température de fusion relativement basse d'environ 660°. Il en résulte une facilité de fusion qui présente un avantage certain pour les opérations de fonderie. L'Aluminium est très ductile, on peut aisément le mettre en forme. Lamasse volumique de l'Aluminium est de 2700 kg/m<sup>3</sup>. L'utilisation de l'Aluminium s'impose donc dans les domaines aéronautiques et du transport

**Propriétés mécaniques :** Les propriétés mécaniques des métaux présentent un grand intérêt dans la vie quotidienne, elles peuvent être classées en deux groupes :

- Celles qui se rapportent à la résistance mécanique du métal :

- \* Résistance à la traction.
- \* Résistance à la pénétration (dureté).

- Celles qui concernent les modifications de forme que le métal peut subir sans se briser :

- \* La malléabilité (mises en feuilles).
- \* La ductilité (mise en fils).

Propriétés des alliages d'aluminium : L'Aluminium à pour propriétés une :

- \* Température de travail élevée.
- \* Très bonne résistance à la corrosion.
- \* Légèreté.
- \* Très bonnes solidités, dureté et rigidité.
- \* Bon rapport force/poids.
- \* Bonnes propriétés de protection contre les interférences électromagnétiques.
- \* Bonne conductivité thermique.
- \* Conductivité électrique élevée.
- \* Bonnes caractéristiques de finition.
- \*Entièrement recyclable.

**Résistance à la corrosion :** Grâce à la couche d'oxyde qui se forme en surface, les alliages d'Aluminium résistent à la corrosion. On peut rendre cette couche protectrice d'oxyde plus épaisse par galvanisation. L'Aluminium et ses alliages peuvent être utilisés sans protection supplémentaire comme revêtement extérieur de bâtiments. Par contre dans les milieux corrosifs, les alliages d'Aluminium peuvent subir les effets de la corrosion. Des piqûres, de la corrosion sous contrainte, de la fatigue corrosion, voire de la corrosion généralisée peuvent se

développer. Pour des conditions données, la sévérité de l'attaque dépend de l'alliage utilisé et de son état.

## **II-4.2 Propriétés physiques de la céramique**

### **Définition :**

La céramique résulte des terres et des roches broyées (matériaux géologiques) ou bien d'une argile qui sera modelée puis cuite sous haute température (transformation irréversible) ce qui fait perdre au matériau sa plasticité donc il ne peut plus se réhydrater.

### **Propriétés physiques :**

La céramique a une facilité de fusion qui présente un avantage certain pour les opérations de fonderie. La masse volumique de la céramique est de  $3800 \text{ kg/m}^3$ . L'utilisation de la céramique s'impose dans les domaines de l'habitat et du design, l'industrie céramique et métallurgique, aéronautique et spatial, médicale et dans les revêtements.

### **Propriétés mécaniques :**

Les propriétés mécaniques du céramique dépendent des :

- \* Matières première employées.
- \* Méthodes de fabrication qui fixent les microstructures finales et déterminent la répartition des différentes phases en présence.

### **Propriétés des céramiques :**

Les propriétés de la céramique sont :

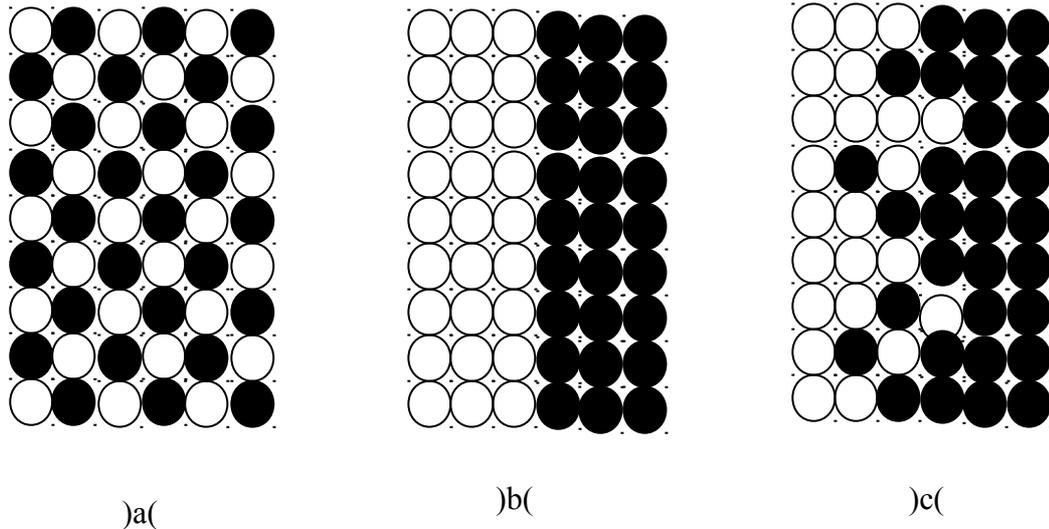
- \* Un module de YOUNG élevé (Liaisons, covalente, ioniques).
- \* Une dureté élevée (Abrasif, outils de coupe, surfaces de frottement qui doivent résister à l'usure, résistance mécanique élevée, bonne tenue à chaud, rigidité élevée).
- \* Une très bonne résistance à la compression non à la traction (Résistance à la compression = 200 MPa).

## **II-5 Propriétés matérielles effectives d'un matériau 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.

## **II-6 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.



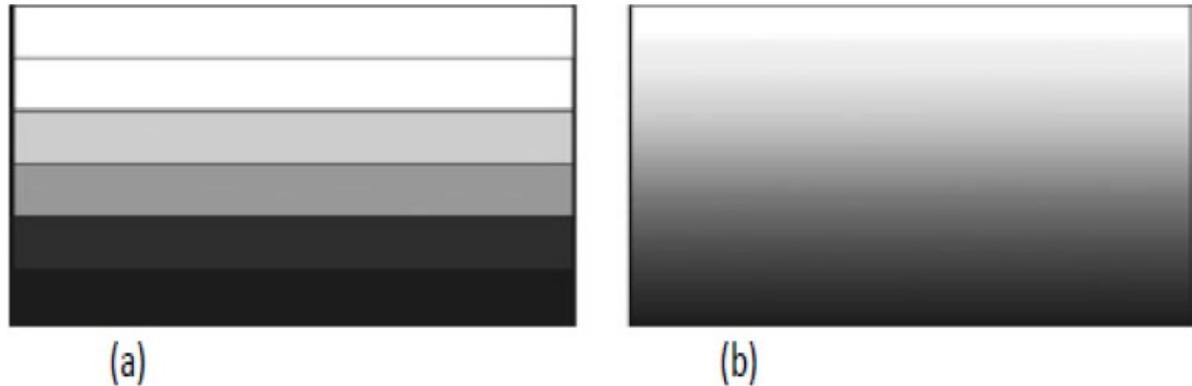
**Figure. II-3 : La distribution composante des matériaux.**

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

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 de puissance.

### **II.7 Méthodes d'élaboration des FGM**

L'obtention des qualités désirées nécessite de plus l'intervention de techniques sophistiquées et subtiles comme l'utilisation de lasers, de plasmas, l'implantation ionique, de dépôts en phase vapeurs, etc

Les procédés de fabrication d'un matériau à gradient évalués peuvent habituellement être divisés en construisant la structure dans un espace hétérogène (mélange graduel) et la transformation de cette structure en matériau en bloc (solidification)

Les processus de mélange graduel peuvent être classés suivant ses 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 durant les dernières décennies ont rendu des processus élémentaires de progression technologiquement et économiquement durables. 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 produisent 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 adapter aux FGM : Des conditions de procédure choisie pour ne pas altérer ou détruire le gradient en mode non contrôlé

.Prêter attention a tout rétrécissement inégal du FGM pendant la consolidation

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 proportionnelle à la densité du matériau et au carré du diamètre de particule. En contrôlant et en adaptant les répartitions granulométriques de chaque poudre, il est possible d'obtenir différents gradient de concentration dans le dépôt formé à l'issue de sédimentation

Il existe de nombreuses méthodes d'élaboration des matériaux a gradient de propriétés, les techniques les plus employées sont brièvement expliquées ci-dessous :

### **II.7.1 Coulage en Bande (Tape Casting ou Doctor-Blade)**

Le coulage en bande consiste à couler une barbotine de poudres fines en suspension aqueuse ou non-aqueuse (la plupart des travaux commerciaux utilisent le procédé non-aqueux) sur un support plan en couches minces et régulières. Selon les cas, c'est soit la lame (doctor-Blade) qui est animée d'un mouvement de translation, soit le support qui se déplace sous la lame (figure. II.6). Les produits obtenus sont des feuillets avec des épaisseurs contrôlées (25-1000 $\mu$ m).

.Après un raffermissement de la pâte, les feuillets sont démoulés et ensuite découpés

Le solvant doit avoir un point d'ébullition très bas et une viscosité faible. Il doit être soluble avec le liant le plastifiant et les autres ajouts, mais ne doit être ni soluble ni réactif avec la poudre céramique. Le liant donne une grande résistance mécanique au produit cru en permettant son maniement. Généralement un plastifiant est ajouté au liant pour baisser sa viscosité .Les liants (Plastifiants et dé flocculant) doivent être totalement dégagés pendant le délainage.

L'un des plus anciens travaux sur l'étude de cette technique a été publié par Howatt et al. En 1947, et depuis d'autres travaux ont été réalisés. Ce procédé est devenu une technique économique pour la production des substrats céramiques de type Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et surtout pour les condensateurs à base de BaTiO<sub>3</sub>. On peut d'ailleurs remarquer qu'il s'agit déjà de F.G.M puisqu'il faut empiler des couches conductrices (métaux rares) avec des couches diélectriques (BaTiO<sub>3</sub> principalement)

Le procédé de coulage en bande est largement utilisé pour réaliser des matériaux composites

: laminaires suivant deux méthodes

- Réalisation directe de bandes multicouches grâce à un système de lames multiples c'est le cas .des tri-couches élaborées par Mistler [12]
- Empilement des couches élaborées séparément dont la cohésion est ensuite assuré par une .étape de thermo-compression [12]

### **II.7.2 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 : effectué en deux étapes essentielles

« ➤ Formation du tesson ou « prise

« ➤ Consolidation du tesson « raffermissement

La filtration, c'est-à-dire la formation du tesson lors du collage, peut être considérée comme un processeur 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 succions du plâtre (coulage classique)
- 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.

### **II.7.3 Compaction sèche des poudres**

Cette technique consiste à verser successivement dans un moule en acier les poudres, et à chaque fois qu'une poudre est versée une faible compressions exercée. Ensuite la compaction de l'ensemble des couches sera effectuer .ce procédé est suivi généralement par une pression isostatique et un délainage. La densification sera enfin l'étape finale [12].

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.

### **II.7.4 Dépôt par électrophorèse**

Le dépôt par électrophorèse est un procédé dans lequel une suspension colloïdale stable est placée dans une cellule contenant deux électrodes, le dépôt se fait par le mouvement des

particules chargées au sein de la solution vers la cathode selon le signe de la charge des particules due à un champ électrique. L'élaboration des FGM peut se faire donc par le dépôt séquentiel des matériaux [12].

## II-8 Les différentes lois qui régissent la variation des propriétés matérielles suivant L'épaisseur d'une plaque FGM

### II-8.1 Propriétés matérielles de la plaque P-FGM

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

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

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

$$S(z) = \psi(z) S_1 + [1 - \psi(z)] S_2 \quad (\text{II-2})$$

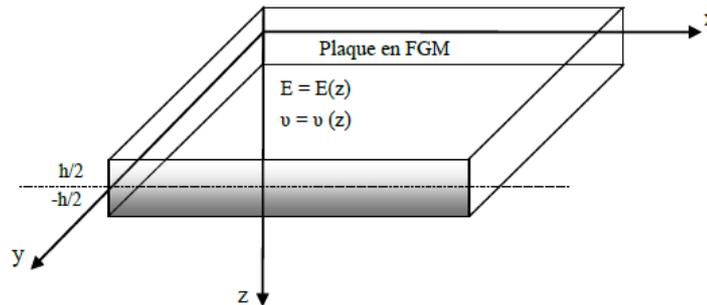


Figure. II-5 : Les Dimensions De La Plaque FGM

Où  $S_1$  et  $S_2$  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 plaque FGM. La variation de ces propriétés dans la direction de l'épaisseur de la plaque 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  $p < 1$ .

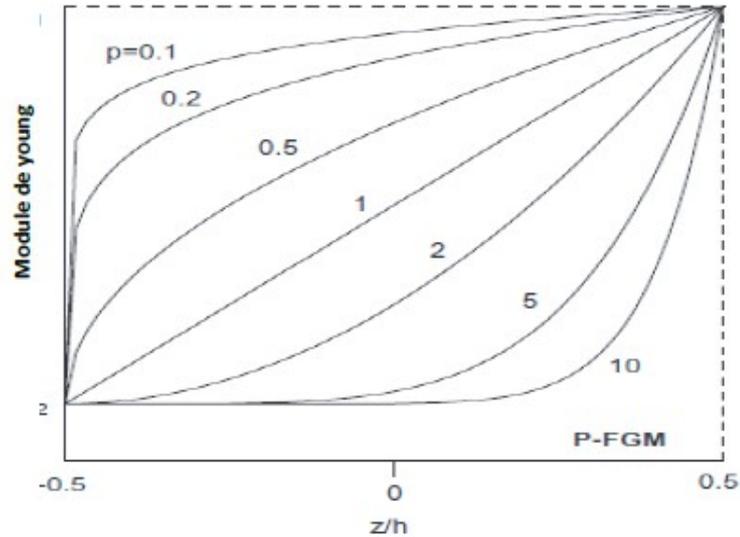


Figure II-6 : la variation du module de Young dans une plaque P-FGM

### II-8.2 Propriétés matérielles de la plaque S-FGM

Si l'on ajoute une plaque P-FGM d'une simple fonction de loi de puissance à une plaque composite multicouche, les concentrations des contraintes apparaissent sur l'interface des deux matériaux. Par conséquent, Chung et Chi [13] 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 :

$$\psi_1(z) = 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{2 \left( \frac{1}{2} h - z \right)}{h} \right)^p \quad \text{Pour } 0 \leq z \leq h/2 \quad (\text{II.3.a})$$

$$\psi_2(z) = \frac{1}{2} \left( \frac{2 \left( z + \frac{1}{2} h \right)}{h} \right)^p \quad \text{Pour } -h/2 \leq z \leq 0 \quad (\text{II.3.b})$$

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

$$S(z) = \psi_1(z) S_1 + [1 - \psi_1(z)] \cdot S_2 \quad \text{pour } 0 \leq z \leq h/2 \quad (\text{II-4})$$

$$S(z) = \psi_2(z) S_1 + [1 - \psi_2(z)] \cdot S_2 \quad \text{pour } -h \leq z \leq 0 \quad (\text{II-5})$$

La (figure II.7) montre que la variation du module de young selon les équations (II-4) et (II-5) avec des distributions sigmoïde, donc la plaque FGM est ainsi appelée (plaque S-FGM)

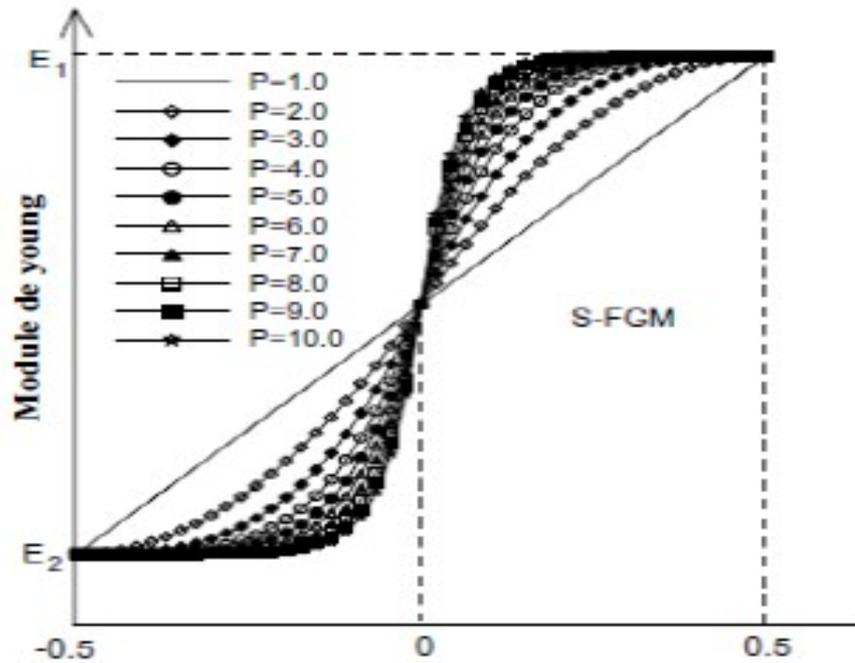


Figure (II.7) : La variation du module de Young dans une plaque

### II-8.3 Propriétés matérielles de la plaque E-FGM

Beaucoup de chercheurs utilisent la fonction exponentielle pour décrire les propriétés matérielle des matériaux FGM, la fonction exponentielle est donnée par [14]

$$S(z) = A.e^{B(z+h/2)} \quad (\text{II-6})$$

Avec

$$A = S_2 \text{ et } B = \frac{1}{h} \cdot \ln \left[ \frac{S_1}{S_2} \right] \quad (\text{II-7})$$

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

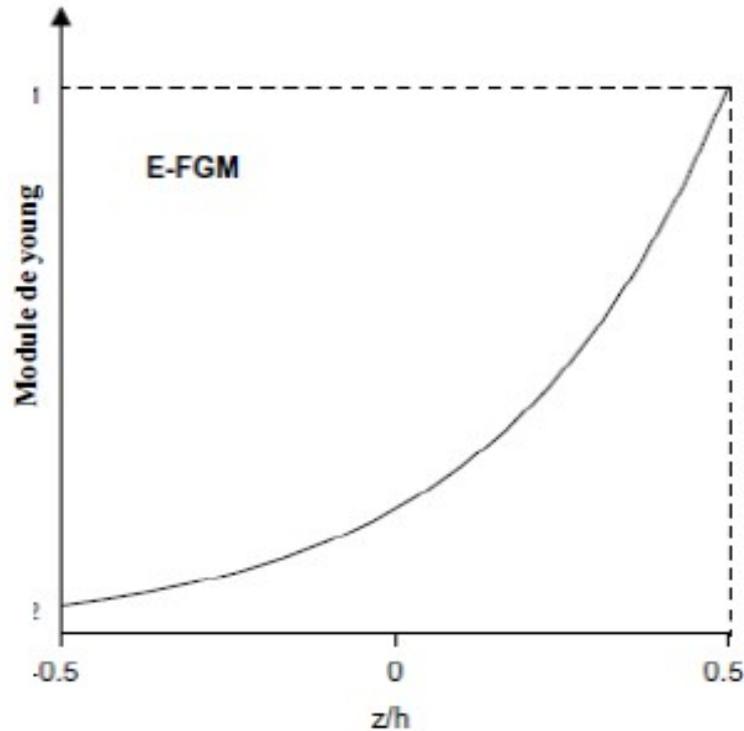


Figure (II-8) : la variation du module de Young de la plaque E-FGM

### II-8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous sommes attachés à présenter et à définir la notion d'un matériau FGM. Dans un premier temps, nous avons présenté l'histoire de la fabrication des FGM dans les premiers pas de la naissance du FGM.

Après nous avons cités les propriétés matérielles effectives d'un matériau FGM, et à la fin nous avons terminés par les différentes lois possibles qui servent à décrire la variation des propriétés matérielles du matériaux FGM (module de Young, Masse volumique, et Coefficient de poisson ) suivant l'épaisseur d'une plaque, ces lois peuvent être de puissances, exponentielles ou même sinusoïdale.