

Chapitre II

Différentes théories des plaques

Chapitre II

Différentes théories des plaques

II.1. Introduction

Les problématiques rencontrées concernent essentiellement des questions de dimensionnement ou de contrôle des vibrations et des contraintes. Pour mieux connaître, la réponse du comportement dynamique et statique de la structure, il est impératif d'approcher de la manière la plus correcte possible les phénomènes mis en jeu par les plaques qui sont plus ou moins complexes. Ainsi, un tablier d'un pont, un bâtiment, une caisse de voiture, une aile d'avion, un bateau... Parmi tous ces domaines d'application, on peut distinguer plusieurs types de plaques : des plaques membranaires, des plaques minces, modérées et épaisses dont les propriétés matérielles sont différentes. Dans cette étude nous nous intéresserons par les plaques hétérogènes en matériaux composites avancés, nommés les matériaux à gradient de propriétés qui sont généralement constitués par deux constituants différents.

Afin de résoudre les problèmes des structures ayant comme éléments structuraux des poutres et des plaques FGM dans le domaine élastique, il est nécessaire de choisir la bonne théorie décrivant correctement le comportement statique et dynamique de la structure ainsi que la méthode de résolution à appliquer. C'est en 1888 que Love utilisa les hypothèses de Gustav Kirchhoff, elles-mêmes inspirées des hypothèses d'Euler-Bernoulli pour fonder une théorie des plaques minces "également appelée théorie classique ou théorie de Kirchhoff-Love". La théorie des plaques semi-épaisses "théorie des déformations du premier ordre" a été consolidée par Mindlin à partir des travaux de Timoshenko [46] et Reissner [47]. Ensuite, des théories d'ordre supérieur sont venues améliorer les hypothèses des théories classiques et du premier ordre lorsque l'épaisseur de la plaque devient importante. Il existe aussi la théorie basée sur l'élasticité tridimensionnelle "théorie 3-D" qui ne fait aucune hypothèse restrictive sur les déplacements de la plaque.

Nous présentons dans ce chapitre quelques modèles sur les théories des plaques développées dans la littérature pour améliorer l'évolution de la variation du champ des déplacements à travers l'épaisseur des plaques.

II.2. Définition d'une plaque

Une plaque est un solide élastique dont une dimension selon l'épaisseur, est petite en comparaison des deux autres, et qui généralement comporte un plan de symétrie au milieu de l'épaisseur que nous appellerons surface moyenne (Voir figure II.1). Par convention, cette surface sera le plan (x-y), l'axe (o-z) correspond à l'axe transversal selon l'épaisseur. Une plaque peut être constituée d'un matériau homogène, ou être obtenue par l'empilement de différentes couches de matériaux orthotropes.

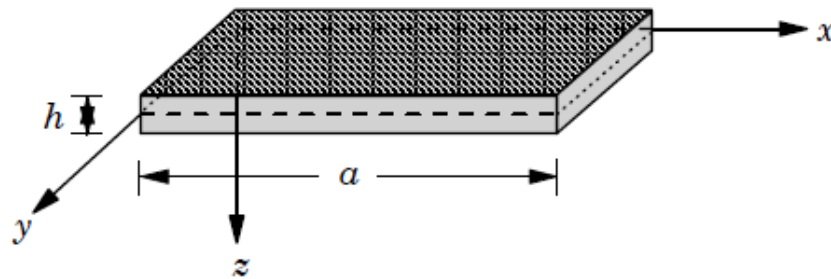


Figure II.1 : Géométrie d'une plaque de forme rectangulaire.

Afin de traiter des problèmes de plaques élastiques, des hypothèses doivent être imposées pour simplifier les équations générales de l'élasticité linéaire. Dans le cas d'un problème de plaques en flexion on applique des charges normales à la surface moyenne, dans la direction de z. Ces forces appliquées provoquent une flexion dans la plaque avec un déplacement du feuillet moyen dans la direction de z, ce déplacement vertical est habituellement appelé flèche et noté par w .

II.3. Modèles analytiques des plaques FGM

L'ensemble de ces modèles sont basées sur les lois de comportement élastique de la théorie d'élasticité linéaire et les hypothèses fondamentales nécessaires pour caractériser le modèle analytique choisi. Il faut savoir que l'aspect géométrique de la plaque est défini par une surface de référence plane et par une épaisseur petite par rapport aux autres dimensions. Cette définition favorise le choix d'une cinématique spécifique par rapport à la cinématique générale d'un solide, le facteur de classification de ces théories est l'importance de l'épaisseur par rapport aux autres dimensions, cette particularité conduit à l'effet de cisaillement transversal à travers l'épaisseur, ce dernier est présenté dans la cinématique adaptée. Dans l'analyse des plaques en flexion, on peut utiliser trois théories fondamentales :

- ✓ Théorie classique des plaques de Love-Kirchhoff (CPT),
- ✓ Théorie de déformation en cisaillement du premier ordre (FSDT),
- ✓ Théorie de déformation en cisaillement d'ordre élevé (HSDT)

II.3.1. Théorie classique des plaques de Love-Kirchhoff (CPT)

On parle d'une plaque mince, lorsque la flèche générée par les déformations de cisaillement reste négligeable devant la flèche générée par la courbure de la plaque. Dans le cas d'une plaque homogène isotrope, la part de cisaillement dans la flèche est directement reliée à l'élancement (L/h).

La théorie classique des plaques minces (CPT) se base sur les hypothèses de Love-Kirchhoff, selon lesquelles une droite normale au plan moyen de la plaque reste perpendiculaire après déformation, ce qui revient à négliger les effets de déformation en cisaillement transverse. Le champ de déplacement associé à cette théorie est présenté dans l'équation (II.1). La cinématique ci-après (figure II.2) illustre l'état déformé d'une structure monocouche avec le modèle de Love-Kirchhoff : la section de la plaque déformée reste orthogonale à la surface neutre, les contraintes et déformations de cisaillement transverse sont nulles. Cette formulation a tendance à sous-estimer les flèches et surestimer les charge critique de flambement et les fréquences propres des structures modélisées, cette erreur étant encore plus grande pour les stratifiés fortement anisotropes. Cependant, ce modèle permet de décrire correctement le comportement de plaques simples fortement élancées ou avec une épaisseur faible par rapport à la longueur d'onde de flexion, d'où son appellation de modèle de "plaques minces". Ce modèle de plaque peut être référé en Timoshenko et Woinowsky-Krieger [48] ainsi que Reddy [49].

En se basant sur les hypothèses citées ci-dessus, le champ de déplacement de la théorie classique est exprimé sous la forme suivante :

$$\begin{aligned}
 u(x, y, z) &= u_0(x, y) - z \frac{\partial w_0}{\partial x}, \\
 v(x, y, z) &= v_0(x, y) - z \frac{\partial w_0}{\partial y}, \\
 w(x, y, z) &= w_0(x, y),
 \end{aligned}
 \tag{II.1}$$

Avec u_0 et v_0 sont les composantes du champ de déplacement sur le plan moyen de la plaque ($z = 0$). Puisque ce modèle ne tient pas en compte l'effet de cisaillement transverse, il donne des résultats non précis pour les plaques épaisses.

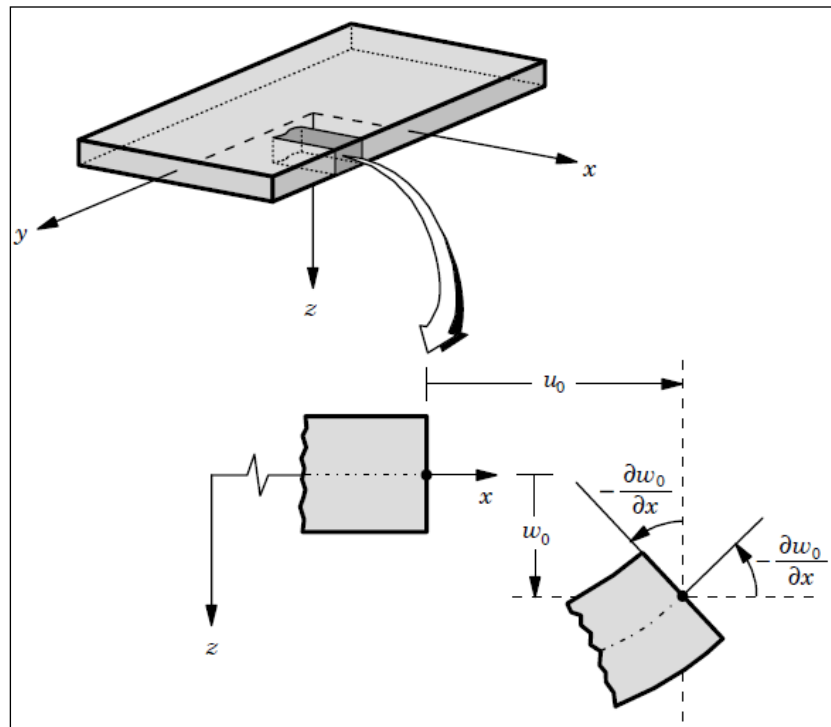


Figure II.2 : Cinématique de la plaque de Love Kirchhoff (CPT) [53].

II.3.2. Théorie de déformation en cisaillement du premier ordre (FSDT)

La théorie de déformation en cisaillement du premier ordre (FSDT) est une extension de la cinématique de la théorie classique des plaques (CPT) par une déformation de cisaillement transversale de la plaque dans leur hypothèse cinématique (figure II.3), dans ce cas la distribution des contraintes et les déformations sont constantes à travers l'épaisseur de la plaque, ce qui oblige l'introduction d'un facteur de correction du cisaillement pour corriger cette forme de contraintes. Généralement ce coefficient est difficile à déterminer à cause de sa dépendance à la fois, de la géométrie, du coefficient de Poisson à travers l'épaisseur, des charges appliquées et des conditions aux limites. Les études sur la théorie de déformation en cisaillement du premier ordre (FSDT) peuvent être trouvées dans les références de Reissner [47] et Mindlin [50] qui a mené au modèle de plaque de Reissner-Mindlin. Ce modèle a été utilisé par suite par Reddy pour l'analyse statique en flexion, la vibration libre et le flambement des plaques isotropes et multicouches [49, 51].

La théorie du premier ordre est basée sur le champ de déplacement suivant :

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= u_0(x, y) + z\phi_x(x, y), \\ v(x, y, z) &= v_0(x, y) + z\phi_y(x, y), \\ w(x, y, z) &= w_0(x, y), \end{aligned} \quad (\text{II.2})$$

Avec : (u_0, v_0, w_0) et (ϕ_x, ϕ_y) sont les déplacements en membrane et les rotations autour des axes x et y , respectivement.

Le champ de déplacement définis dans l'expression ci-dessus permet de reprendre la théorie classique des plaques décrite dans la dernière section par le remplacement :

$$\phi_x = -\frac{\partial w_0}{\partial x}, \quad \phi_y = -\frac{\partial w_0}{\partial y} \quad (\text{II.3})$$

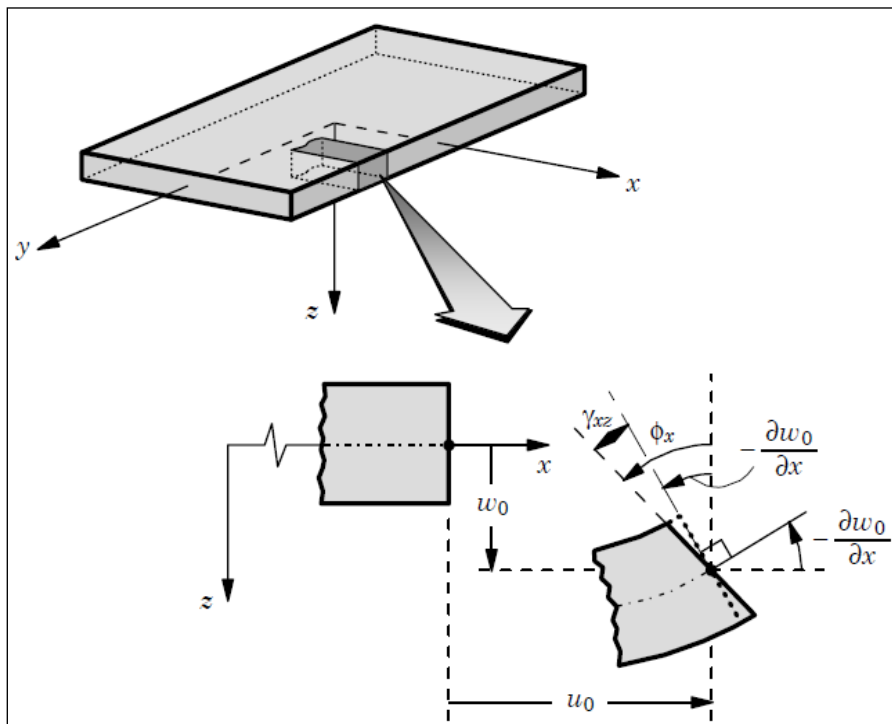


Figure II.3 : Cinématique de la plaque de Reissner- Mindlin (FSDT) [49].

Avec ce choix de la forme des champs de déplacement, les déformations transversales sont constantes en (z) . Les contraintes de cisaillement sont donc uniformes dans chaque couche discontinue entre les couches. Cette mauvaise description oblige à introduire des coefficients correcteurs pour mieux prendre en compte dans l'écriture de l'énergie, les effets de cisaillement transversal [52]. Les résultats obtenus dépendent essentiellement du choix

empirique dans des situations complexes des coefficients correcteurs et l'étude du composite épais reste aléatoire par ce type d'approche cinématique. Pour éviter l'introduction d'un facteur de correction, des théories de déformation en cisaillement d'ordre élevée ont été développées.

D'ailleurs pour éviter l'introduction d'un facteur de correction, des théories de déformation en cisaillement d'ordre élevée ont été développées.

II.3.3. Théorie de déformation en cisaillement d'ordre élevé (HSDT)

À la différence de la théorie CPT et la théorie FSDT avec les acceptations de la distribution linéaire du déplacement par l'épaisseur, la théorie d'ordre élevé est basée sur une distribution non linéaire des champs dans l'épaisseur (voir figure II.4). Par conséquent, on tient compte des effets de la déformation transversale de cisaillement et / ou de la déformation normale transversale. Ces modèles n'exigent pas des facteurs de correction. Les références sur de tels modèles peuvent être trouvées dans plusieurs références scientifiques [53, 54, 55, 56, 57].

Nous avons introduit ici quelques modèles de plaques utilisés pour analyser le comportement des matériaux composites avancés (FGM).

Le champ de déplacement est généralement comme suit :

$$\begin{aligned}
 u(x, y, z) &= u_0(x, y) - z \frac{\partial w_0(x, y)}{\partial x} + f(z) \varphi_x(x, y), \\
 v(x, y, z) &= v_0(x, y) - z \frac{\partial w_0(x, y)}{\partial y} + f(z) \varphi_y(x, y), \\
 w(x, y, z) &= w_0(x, y)
 \end{aligned} \tag{II.4}$$

Où u , v et w représentent les déplacements dans les directions x , y et z . Les composantes de déplacements u_0 , v_0 et w_0 sont ceux d'un point du plan moyen ($x, y, z = 0$). φ_x et φ_y sont les rotations due à la flexion des plans yz et xz . Cependant $f(z)$ est la fonction de gauchissement qui représente la forme de distribution des contraintes et des déformations de cisaillement transverse dans l'épaisseur de la plaque. Ainsi le choix de cette fonction $f(z)$ est basé sur les résultats de l'élasticité tridimensionnelle ou toute autre information sur la distribution des contraintes de cisaillement transverse.

En effet, les déplacements de la théorie classique de plaque CPT est obtenue par en prenant $f(z) = 0$, alors que la théorie de premier ordre FSDT peut être obtenue par $f(z) = z$.

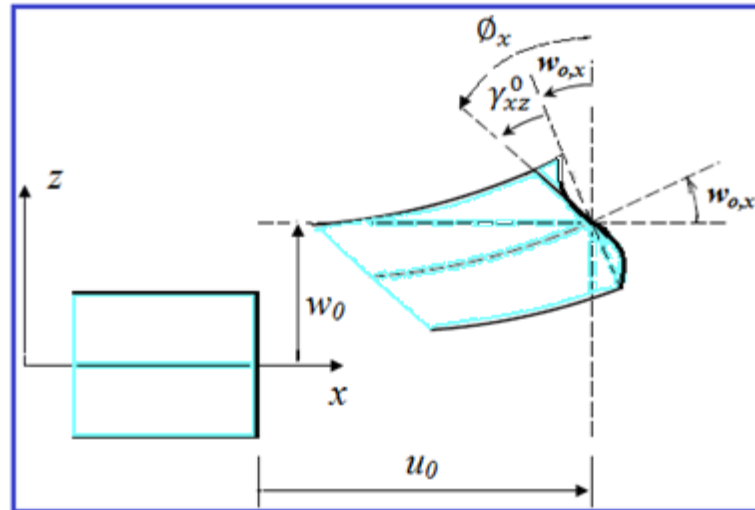


Figure II.4 : Cinématique de la plaque d'ordre élevé (HSDT) [53].

II.4. Revue sur les différents modèles de la théorie d'ordre élevé (HSDT)

Pour franchir les limites des théories du premier ordre, plusieurs auteurs ont proposé quelques contributions importantes pour le développement de modèles d'ordre élevé qui se sont distingués dans la littérature par l'expression de la fonction de cisaillement $f(z)$. Les modèles sont basés sur une distribution non linéaire des champs de déplacement à travers l'épaisseur, et qui permettent de représenter le gauchissement de la section transversale dans la configuration déformée (Figure II.4) [52, 58, 59, 60]. Nous citons en particulier :

L'approche d'Ambartsumyan [61] avec :

$$f(z) = \frac{z}{2} \left(\frac{h^2}{4} - \frac{z^2}{3} \right) \quad (\text{II.5})$$

L'approche de Reissner [51], Panc et Kaczkowski, avec :

$$f(z) = \frac{5}{4} z \left(1 - \frac{4z^2}{3h^2} \right) \quad (\text{II.6})$$

L'approche de Levinson, Murthy [62] et Reddy [56] Avec ;

$$f(z) = z \left(1 - \frac{4z^2}{3h^2} \right) \quad (\text{II.7})$$

Dans le modèle de Reddy, le champ de déplacement membranaire est cubique et le déplacement normal w , est constant [56]. Ce modèle donne une bonne approximation pour les contraintes de cisaillement transverse par rapport à la solution élastique tridimensionnelle dans le cas homogène. La distribution des contraintes de cisaillement transverse est parabolique à travers l'épaisseur (elle doit être parabolique par couche pour un multicouche). Les conditions aux limites sur les surfaces libres sont satisfaites. Les résultats du modèle de Reddy sont également très proches des deux modèles d'ordre élevé proposés par Kant et Swaminathan [57].

Touratier propose le modèle (sinus) qui est différent des autres modèles d'ordre élevés puisqu'il n'utilise pas de fonction polynomiale. Une fonction trigonométrique sinusoïdale est donc introduite pour modéliser la répartition des contraintes de cisaillement à travers l'épaisseur [60]. La fonction de cisaillement transverse s'écrit comme suite :

$$\begin{aligned} f(z) &= \frac{h}{\pi} \sin \left(\frac{\pi z}{h} \right) = \frac{h}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)!} \left(\frac{\pi z}{h} \right)^{2n+1} \\ &= z \left(1 - \frac{\pi^2}{3!} \frac{z^2}{h^2} + \frac{\pi^4}{5!} \frac{z^4}{h^4} - \frac{\pi^6}{7!} \frac{z^6}{h^6} + \dots \right) \end{aligned} \quad (\text{II.8})$$

Les contraintes de cisaillement transverses déterminées par le modèle (sinus) prennent une forme trigonométrique à travers l'épaisseur de la plaque. La précision de ce modèle par rapport à la solution exacte est meilleure que la théorie de [Reddy 1984]. En se basant sur les travaux de Touratier, un élément fini triangulaire à six nœuds, est construit pour les structures multicouches non linéaires géométriques par Polit *et al.* [63] et Dau *et al.* [64].

Malgré le fait que les modèles d'ordre élevé assurent une continuité de déplacement et de déformation à l'interface, les contraintes de cisaillement interlaminaire et les contraintes d'interface, restent discontinues. Ceci présente un inconvénient lors de l'analyse locale de l'interface des structures multicouches dont les propriétés des couches sont très différentes.

Nous regroupons dans le tableau suivant les différentes fonctions de cisaillement ainsi qu'une comparaison entre les différents modèles.

Tableau II.1 : Différentes fonctions de cisaillement utilisées dans les théories des plaques en matériaux composites avancés.

Théories	intitulé	Fonction de cisaillement $f(z)$	Coefficient de correction k	Domaine de validité
CPT Kirchhoff [69]	Théorie classique des plaques	0	---	Plaques minces
FSDT Mindlin [54]	Théorie de déformation en cisaillement du 1er ordre	z	Requis	Plaques minces et moyennement épaisses
Ambartsumyan [65]	Théorie d'ordre supérieur	$\frac{z}{2} \left(\frac{h^2}{4} - \frac{z^2}{3} \right)$	Non Requis	Plaques minces et moyennement épaisses
Reissner [51]	Théorie d'ordre supérieur	$\frac{5}{4} z \left(1 - \frac{4z^2}{3h^2} \right)$	Non Requis	Plaques minces et épaisses
PSDT Levinson [66], Reddy [60]	Théorie de déformation parabolique	$z \left(1 - \frac{4z^2}{3h^2} \right)$	Non Requis	Plaques minces et épaisses
TSDT Touratier [64]	Théorie de déformation trigonométrique	$\frac{h}{\pi} \sin \left(\frac{\pi z}{h} \right)$	Non Requis	Plaques minces et épaisses
Soldatos [70]	Théorie de déformation hyperbolique	$h \sinh \left(\frac{z}{h} \right) - z \cosh \left(\frac{1}{2} \right)$	Non Requis	Plaques minces et épaisses
Shimpi [71]	Théorie raffinée	$h \left[\frac{1}{4} \left(\frac{z}{h} \right) - \frac{5}{3} \left(\frac{z}{h} \right)^3 \right]$	Non Requis	Plaques minces et épaisses
ESDT Karama et al. [72]	Théorie de déformation exponentielle	$z e^{-2(z/h)^2}$	Non Requis	Plaques minces et épaisses
Aydogdu [73]	Théorie de déformation exponentielle	$z \alpha^{-\frac{2(z/h)^2}{\ln(\alpha)}}, \alpha > 0$	Non Requis	Plaques minces et épaisses
El Meiche et al. [74]	Théorie raffinée	$\frac{(h/\pi) \sin(hz/\pi)}{\cosh(\pi/2 - 1)}$	Non Requis	Plaques minces et épaisses
Zenkour [75]	Théorie de déformation hyperbolique	$h \sinh \left(\frac{z}{h} \right) - \frac{4z^3}{3h^2} \cosh \left(\frac{1}{2} \right)$	Non Requis	Plaques minces et épaisses

D'après les différents modèles proposés de la théorie de déformation en cisaillement d'ordre élevé, on voit que l'approche d'Ambartsumyan [61] et l'approche de Reissner [47] (voir figures II.5 et II.6 ci-dessous), sont un peu loin des autres fonctions de forme présentées par Touratier [60], Reddy [56], Karama et al [68] et Aydogdu [69]. Elles sont servies comme bases pour développer les autres fonctions de cisaillement qui sont en principe plus proches de l'analyse 3D.

Il faut remarquer que les modèles issus d'une approche monocouche équivalente pressentent des contraintes de cisaillement transverse discontinues aux interfaces si les couches ont des propriétés différentes, même si la continuité du champ de déformation est assurée. Ceci présente un inconvénient sérieux lors de l'analyse locale à l'interface des structures multicouches (effets de bord sur les contraintes, contraintes inter-faciales, délaminage, ...etc.), mais pour le cas des matériaux à gradient de propriétés (FGM) cette approche paraît très appropriée, du fait que la variation des propriétés se fait continuellement selon l'épaisseur.

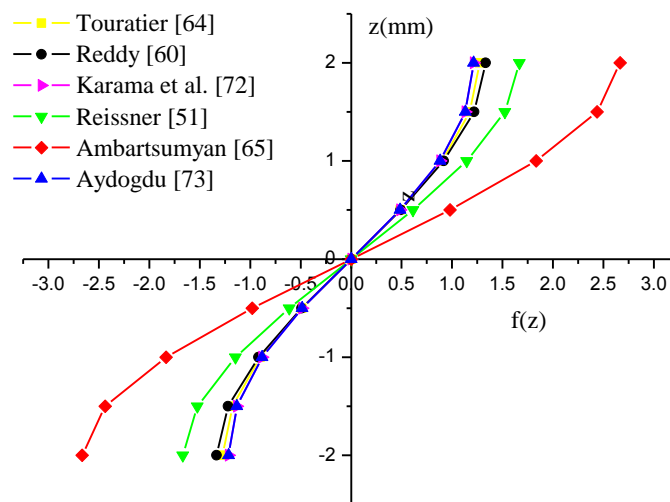


Figure II.5 : Variation de la fonction de forme $f(z)$ des différents modèles en fonction de l'épaisseur z .

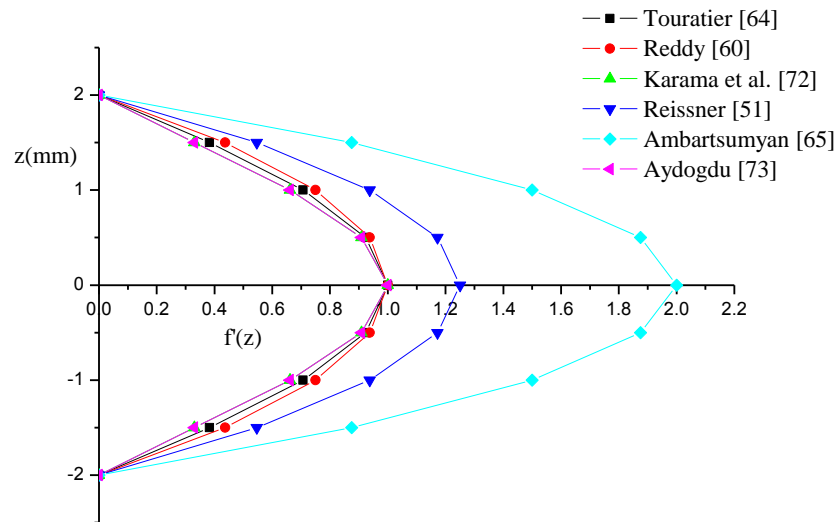


Figure II.6 : Variation de la fonction de forme $f(z)$ des différents modèles en fonction de l'épaisseur z .

II.5. Nouvelle théorie raffinée de déformation des plaques

Shimpi [67] a développé un modèle raffiné pour l'analyse des plaques isotropes (RPT : Refined Plate Theory). Les caractéristiques les plus intéressantes de cette méthode et qu'elle ne contient que quatre équations d'équilibre avec seulement quatre inconnus à trouver au lieu des cinq dans le cas des théories classiques. En plus, cette théorie n'exige pas de facteur de correction de cisaillement et donne une distribution parabolique de déformation en cisaillement à travers l'épaisseur de la plaque. Aussi, elle présente beaucoup de similitudes avec la théorie classique des plaques quant aux équations du mouvement, les conditions aux limites et les expressions des moments. Plusieurs chercheurs ont adaptés cette théorie pour étudier le comportement statique et dynamique des plaques stratifiés, sandwichs et en matériaux à gradient de propriétés.

Récemment Thai et Kim [72, 73] ont adapté le modèle raffiné, avec succès, au flambement des plaques orthotropes et à la vibration libre des plaques composites stratifiées et sandwichs.

II.6. Approche par couche

Ces approches sont destinées justement à mieux décrire les effets d'interface pour les matériaux composites conventionnels. Il est observé que cette approche est applicable pour les structures en matériaux FGM. Ainsi différents modèles issus de l'approche par couche ont été proposés par Carrera [74], Afaq et al. [75], Reddy [56] et Di Sciuva [76]. Le multicouche

est subdivisé en sous structures correspondant en fait à chaque couche ou chaque ensemble de couches. On applique à chaque sous structure une théorie du premier ordre ou un modèle d'ordre supérieur, imposant un champ de déplacement vérifiant la continuité aux interfaces entre les différentes couches.

Les modèles de ce type sont relativement coûteux (l'ordre des équations de comportement dépend du nombre de couche), mais ils permettent l'obtention de résultats plus précis, notamment en ce qui concerne le calcul des contraintes hors plan. D'une manière générale, les modèles issus de l'approche par couche peuvent être classés en deux groupes : les modèles couches discrètes où chaque couche est considérée comme une plaque en imposant les conditions de continuité en déplacements ou en contraintes aux interfaces et les modèles zig-zag où la cinématique satisfait a priori les conditions de contact est indépendante du nombre de couches.

II.6.1. Les modèles couches discrètes

Les modèles couches discrètes adoptent une approximation plus fine des champs suivant l'épaisseur du multicouche que les modèles de plaque d'ordre supérieur ou Zig-zag puisqu'ils proposent une cinématique par couche plutôt qu'une cinématique globale. En fait avec les modèles couches discrètes le multicouche est représenté par un ensemble de plaques (structures 2D) couplées par des efforts d'interface. Les conditions de continuité aux interfaces sont assurées. Le nombre de paramètres inconnus dépend du nombre de couche de la plaque composite. Dans les travaux de Srinivas [77] et Reddy [49] on postule une cinématique du premier ordre ou d'ordre supérieur par couche les équations fondamentales par couche sont obtenues en utilisant le principe des travaux virtuels les conditions aux limites sont également données couche par couche.

D'une manière alternative les travaux de Ren [78] et Yin [79] utilisent une approximation des champs de contraintes par couche ou une mixte contrainte cinématique ainsi Ren [78] utilise un champ de contrainte dont la composante de cisaillement transversal est quadratique par couche et les déplacements sont considérés cubiques par couche et continus aux interfaces. Dans la référence [80], le champ de contrainte est construit sous la forme d'un produit de fonctions à variables séparées par couche à partir de l'équilibre des forces et moments les contraintes planes sont supposées constantes suivant l'épaisseur dans Yin [79],

les fonctions de contraintes sont utilisées par couche pour déterminer les contraintes inter laminaires elles sont approximées de façons polynomiale dans l'épaisseur.

II.6.2. Les modèles zig-zag

Afin de réduire le nombre de paramètres inconnus, Di Sciuva [74] est le premier à proposer le modèle zig-zag du premier ordre. Dans ce modèle, les déplacements membranaires sont les résultats de la superposition du champ de déplacement global d'une théorie du premier ordre et d'une fonction zig-zag. La cinématique des modèles zig-zag satisfait a priori les conditions de contact et elle est indépendante du nombre de couches.

Toutefois, la fonction zig-zag donne une contribution des déplacements membranaires qui est continue en z mais sa dérivée première est discontinue à l'interface (voir figure II.7). Les déformations transversales sont donc discontinues et la continuité des contraintes de cisaillement transverse aux interfaces est assurée.

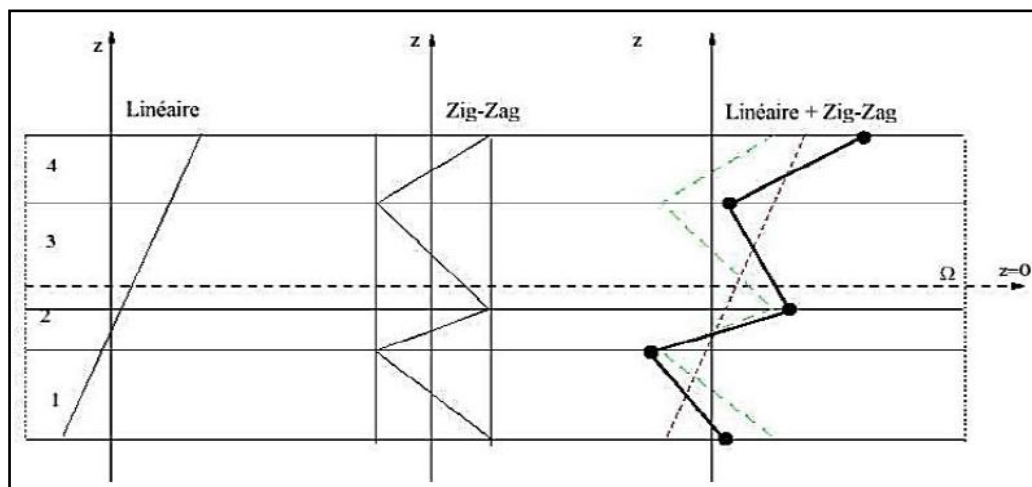


Figure II.7 : Champ de déplacement des modèles zig-zag du premier ordre [81].

II.7. Approche quasi-3D

Pour éviter de recourir à une analyse tridimensionnelle et de l'introduction de l'effet de déformation normale transverse cette particularité devient importante pour définir un état de contraintes correct et évaluer exactement les fréquences propres en analyse vibratoire de façon générale toutes les contributions et les recherches récentes sur cette approche basées sur la jonction d'une fonction non linéaire de la coordonnée de l'épaisseur z de telle sorte que le

déplacement transversal sera exprimé et dépend d'une variation non linéaire à travers l'épaisseur de la plaque.

En générale les théories d'ordre élevé de déformation en cisaillement transversal et la déformation normale suivant l'épaisseur considèrent l'effet de l'étirement de l'épaisseur (stretching effect) peuvent être numériquement appliquées en utilisant la formulation unifiée initialement proposée par Carrera [82] et récemment évoluée par Demasi [83].

De nombreux travaux basant sur la théorie d'ordre élevé avec effet d'étirement ont été proposés dans les littératures pour analyser le comportement statiques et dynamiques des structures en matériaux composites multicouches et en FGM (plaques, poutres, coques, ...etc.), Talha [84], Carrera [85], Reddy [86], Mantari et Guedes Soares [87], Draiche et al. [88], Benbakhti et al. [89] et Benahmed et al. [90]. Ces théories sont assez complexes en termes de formulations, néanmoins elles sont très intéressantes du point de vue précision.

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur les différents modèles analytiques de calcul des plaques épaisses en FGM, ainsi que les travaux effectués par plusieurs chercheurs dans ce domaine, à savoir la théorie classique des plaques (CPT), la théorie de déformation en cisaillement du premier ordre (FSDT), la théorie de déformation en cisaillement d'ordre élevé (HSDT), la théorie des plaques raffinée (RPT) et la théorie quasi-3D de déformation en cisaillement d'ordre élevé avec effet d'étirement de l'épaisseur.

A travers notre lecture de la littérature en matière de théories d'ordre élevé, il apparaît que celles-ci sont certes intéressantes du point de vue précision, néanmoins devient assez complexes en termes de formulations. Le chapitre qui se suivra portera sur la présentation d'étude du comportement statique des plaques en matériaux composites avancés dans les propriétés matérielles varient selon une fonction exponentielles à travers l'épaisseur de la plaque (E-FGM).