

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie civil

Option : Structures

Présenté par : SAIDIA Taki-eddine

**Thème : Modélisation des interfaces de contact entre les couches
d'une structure stratifiée par utilisation de l'approche FGM**

Sous la direction de : Pr. HIMEUR Mohammed

Juin 2024

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier "ALLAH" le Tout Puissant de m'avoir donné la volonté, la force, la patience, le courage, la santé... pour réaliser ce travail.

Je tiens à exprimer un remerciement tout spécial à mes parents, pour m'avoir soutenu et encouragé tout au long de mes études.

*Avec une profonde gratitude et un intérêt tout particulier, je remercie mon encadreur le Professeur **HIMEUR Mohammed** pour son soutien, ses précieux conseils, sa grande bienveillance, et sa présence tout au long de l'élaboration de ce mémoire.*

Je tiens à remercier les membres du jury d'avoir accepté de lire, présider et examiner mon travail.

*Un grand merci à tous les enseignants qui ont contribué à assurer ma formation durant tout mon cycle universitaire et en particulier les enseignants et le personnel administratif du département de génie civil et hydraulique de la faculté des sciences et de la technologie de l'université **8 Mai 1945 de Guelma**.*

Et puis, un merci spécial à tous les amis avec qui nous avons gardé de bons souvenirs et nos proches, que Dieu les protège pour nous.

Dédicaces

C'est avec un grand respect, gratitude, joie et fierté que je tiens à dédier ce modeste travail :

- ✚ A ma très chère Mère '**Yamina**' : pour son amour, ses encouragements et ses sacrifices.*
- ✚ A mon très chère Père '**Ammar**' : pour son soutien, son affection et la confiance qu'il m'a accordée.*

Puisse ALLAH, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie.

- ✚ A mes grands frères '**Sami et Boutheyra**' : Pour son soutien moral et ses encouragements.*
- ✚ A Mon encadreur le Pr. '**Himeur Mohammed**' qui a fait tout son possible pour m'aider et me diriger dans la réalisation de mon mémoire.*
- ✚ A mes chers amis '**Malek et Abdou**' pour les beaux moments passés ensemble.*
- ✚ A la famille '**Saidia**', notamment à mon grand-père, je lui souhaite rétablissement et long vie.*

Résumé

Les structures stratifiées sont la forme la plus avancée des structures constituées de deux ou plusieurs couches ayant des propriétés physiques et mécaniques significativement différentes. Hétérogénéité, anisotropie, symétrie et hiérarchie sont les principales caractéristiques des matériaux composites qui suscitent un intérêt particulier pour diverses applications. Le rapport résistance / rigidité élevé, la résistance à l'usure et à la corrosion, une fiabilité élevée, sont les avantages des composites par rapport aux métaux purs ou alliés. En dépit de tous ces avantages, les matériaux composites sont soumis à une transition abrupte des propriétés à l'interface, ce qui peut entraîner une défaillance des composants dans des conditions de travail extrêmes et des singularités dans la distribution des champs des contraintes et de déformation le long de la section stratifiée. Cet inconvénient des composites conventionnels éliminés par une forme modifiée de composites appelés matériaux à gradient de propriétés (FGM).

L'objectif de ce travail est de rechercher à contourner ces inconvénients en modélisant les interfaces de contact entre les couches d'une structure stratifiée par utilisation de l'approche FGM (Functionally Graded Materials).

MOTS CLÉS : FGM, composites, interfaces, states, homogénéisation.

Abstract

Laminated structures are the most advanced form of structures consisting of two or more layers having significantly different physical and mechanical properties. Heterogeneity, anisotropy, symmetry and hierarchy are the main characteristics of composite materials that attract particular interest for various applications. High strength/stiffness ratio, resistance to wear and corrosion, high reliability, are the advantages of composites compared to pure or alloyed metals. Despite all these advantages, composite materials are subject to an abrupt transition of properties at the interface, which can lead to component failure under extreme working conditions and singularities in the distribution of stress and strain fields. along the stratified section. This disadvantage of conventional composites eliminated by a modified form of composites called property gradient materials (FGM)

The objective of this work is to seek to circumvent these drawbacks by modeling the contact interfaces between the layers of a stratified structure using the FGM (Functionally Graded Materials) approach.

KEYWORDS: FGM, composites, interfaces, states, homogenization.

ملخص

الهيكل المصفحة هي الشكل الأكثر تقدمًا للهياكل التي تتكون من طبقتين أو أكثر لها خصائص فيزيائية وميكانيكية مختلفة بشكل كبير. يعد عدم التجانس وتباين الخواص والتماثل والتسلسل الهرمي من الخصائص الرئيسية للمواد المركبة التي تجذب اهتمامًا خاصًا لمختلف التطبيقات. تعد نسبة القوة / الصلابة العالية، ومقاومة التآكل والصدأ، والموثوقية العالية، من مزايا المواد المركبة مقارنة بالمعادن النقية أو المخلوطة. على الرغم من كل هذه المزايا، تخضع المواد المركبة لانتقال مفاجئ للخصائص في الواجهة، مما قد يؤدي إلى فشل المكونات في ظل ظروف العمل القاسية والتفردات في توزيع حقول الإجهاد والانفعال على طول القسم الطبقي. تم التخلص من هذا العيب في المركبات التقليدية عن طريق شكل معدل من المركبات يسمى مواد التدرج الخاصة (FGM)

الهدف من هذا العمل هو السعي للتحايل على هذه العيوب من خلال نمذجة واجهات الاتصال بين طبقات الهيكل الطبقي باستخدام منهج FGM (المواد المصنفة وظيفيًا).

الكلمات المفتاحية: المواد المصنفة وظيفيًا ، المواد المركبة، الواجهات، الحالات، التجانس.

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Résumé

Sommaire

Introduction générale.....1

Chapitre I : Généralités sur les structures composites stratifiées

I.1.	Introduction.....	3
I.2.	Structure composites stratifiées	3
I.3.	Désignation des structures stratifiées.....	4
I.4.	Modélisation des structures stratifiées.....	5
I.5.	Problèmes d'optimisation pour les structures stratifiées	6
I.6.	Analyse structurelle	7
I.6.1.	Analyse de flambement	7
I.6.2.	Mode de défaillance.....	9
I.6.3.	Effet de la découpe	10
I.6.4.	Effet de l'orientation des fibres	11
I.7.	Conclusion.....	13

Chapitre II : Généralités sur les matériaux fonctionnellement gradués

II.1.	Introduction	14
II.2.	Définition.....	15
II.3.	Bref historique	15
II.4.	Concept des matériaux à gradient de propriété FGM.....	16
II.5.	Comparaison des matériaux types FGM et les matériaux composites traditionnels	19
II.6.	Propriétés effectives des matériaux à gradient de propriétés.....	20
II.7.	Avantages et inconvénients des matériaux à gradient des propriétés.....	22
II.7.1.	Avantages des FGM	22
II.7.2.	Inconvénients des FGM.....	22

II.8.	Champs d'utilisation.....	23
II.8.1.	Application des FGM dans le domaine du Génie civil.....	24
II.8.1.1.	Les joints dans la charpente métallique	25
II.8.1.2.	Les grands vitrages dans les zones chaudes	25
II.8.1.3.	Les chaussées rigides (Functionally Graded Concrete Materials for Rigid pavements)	25
II.8.1.4.	Les chaussées souples (Functionally Graded Concrete Materials for Flexible Pavements).....	25
II.8.1.5.	Les tunnels (functionally graded concrete segment in tunnel)	26
II.9.	Techniques de fabrication des matériaux à gradient de propriétés.....	26
II.9.1.	Techniques de dépôt en phase vapeur	26
II.9.2.	Métallurgie des poudres.....	27
II.9.3.	Méthode centrifuge.....	27
II.9.4.	Techniques de fabrication libre / fabrication additive (AM).....	27
II.10.	Conclusion	28

Chapitre III : Les lois régissant la variation des propriétés matérielles des plaques FGM

III.1.	Introduction.....	29
III.2.	Modélisation des propriétés matérielles effectives.....	29
III.3.	Lois de mélanges	30
III.3.1.	Propriétés matérielles de la plaque P-FGM	30
III.3.2.	Propriétés matérielles de la plaque S-FGM	31
III.3.3.	Les propriétés matérielles de la poutre E-FGM.....	32
III.4.	Homogénéisation des sections (Approche FGM).....	33
III.4.1.	Principe	33
III.5.	Conclusion	35

Chapitre IV : Description du logiciel CSB et son utilisation pour le cas des poutres stratifiées

IV.1.	Introduction à CSB	36
IV.1.1.	Présentation.....	36
IV.1.2.	Bibliographie résumée de Rached El Fatmi sur la théorie des poutres composites	37

IV.2.	L'utilitaire Matériels.....	37
IV.2.1.	Les différents types de matériaux.....	38
IV.2.1.1.	Matériau isotrope.....	38
IV.2.1.2.	Matériau orthotrope.....	38
IV.2.1.3.	Matériau isotrope transverse.....	39
IV.3.	Utilisation résumée de CSection.....	40
IV.3.1.	Fonctionnalités.....	41
IV.3.2.	Étapes de calcul.....	42
IV.3.3.	Adaptation des conventions et notations.....	42
IV.3.4.	CBeam.....	42
IV.4.	Le module Plane Structure.....	44
IV.4.1.	L'utilisation de Plane Structure.....	44
IV.5.	Le module Spatial Beam.....	45
IV.6.	Le module Spatial Structure.....	47
IV.6.1.	L'utilisation de Spatial Structure.....	48
IV.7.	CSB pour une nouvelle vision des poutres.....	49
IV.8.	CSB pour l'analyse des sections minces.....	49
IV.9.	CSB pour l'introduction de la Mécaniques des composites.....	50
IV.10.	Conclusion.....	50

Chapitre V : Validation de l'approche pour le cas d'une poutre stratifiée

V.1.	Introduction.....	51
V.2.	Présentation de la structure utilisée.....	51
V.3.	Modélisation utilisée.....	52
V.4.	Homogénéisation des sections (Approche FGM).....	53
V.4.1.	Principe.....	53
V.4.2.	Sections homogénéisées.....	55
V.4.3.	Déplacements de références selon les sections homogénéisées.....	57
V.5.	Application du modèle CSB.....	57
V.5.1.	Création de la section par Gmsh.....	58
V.5.2.	Définition des caractéristiques des matériaux.....	59
V.5.3.	Export de la section ver le module CSection et calcul des caractéristiques des sections développées.....	59
V.6.	Modélisation de la poutre.....	64

V.6.1.	Utilisation du CSB	64
V.6.2.	Modélisation par éléments finis.....	66
V.7.	Résultats et commentaires	67
V.7.1.	Déplacement de l'extrémité libre de la poutre.....	67
V.7.2.	Contraintes à l'encastrement.....	69
V.7.3.	Commentaire des résultats	69
V.8.	Conclusion	69
 Conclusion générale.....		71
Références et bibliographiques.....		72

Listes des figures

Chapitre I

Figure I.1: Applications des matériaux composites. Copyright 2023, avec l'autorisation d'Elsevier.....	3
Figure I.2 : Stratifié constitué de couches parfaitement liées.....	4
Figure I.3 : Désignations du stratifié.....	5
Figure I.4 : Structure en mille feuilles 3D et sa représentation équivalente à l'aide d'un modèle bidimensionnel.....	6
Figure I.5 : Modes de défaillance des composites à fibres (a) Micro flambage élastique, (b) pliage des fibres, (c) écrasement des fibres, (d) formation de bandes de cisaillement, (e) fissuration de la matrice et (f) délaminage des boucles reproduit sous licence Créative Commons (CC) (CC BY 4.0).....	10
Figure I.6 : Description de l'espacement des trous et du rapport d'ouverture dans une structure à paroi mince. Reproduit sous licence Créative Commons (CC) (CC BY 4.0).....	11
Figure I.7 : Exemple d'orientation de la fibre reproduit sous licence Créative Commons (CC) (CC BY 4.0).....	12

Chapitre II

Figure II .1 : Un FGM avec les fractions de volume de phases constitutives graduées.....	16
Figure II .2 : La distribution composante des matériaux.....	16
Figure II .3 : Concept des matériaux à gradient de propriétés.....	18
Figure II .4 : Protection thermique des Matériaux FGM et Non FGM.....	19
Figure II .5 : Caractéristiques des FGM en comparaison avec les matériaux composites conventionnels (Koizumi 1997).....	20
Figure II .6 : Fractions volumiques d'un matériau à gradient fonctionnel.....	21
Figure II .7 : Applications des FGM dans divers domaines.....	24
Figure II .8 : La variation de la fraction volumique des fibres dans la chaussée rigides.....	25
Figure II .9 : La variation de la fraction volumique des constituants entre la couche de la Grave Bitume et la couche de roulement.....	26

Chapitre III

Figure III.1 : Géométrie d'une plaque en FGM.....	29
Figure III.2 : Modèle analytique pour une couche en FGM.....	30
Figure III.3 : Variation de la fraction volumique dans une plaque "P-FGM".....	31
Figure III.4 : Variation de la fraction volumique dans une plaque "S-FGM".....	32
Figure III.5 : Variation de la fraction volumique dans une plaque "E-FGM".....	33
Figure III.6 : Etape d'homogénéisation de la section de la poutre renforcée.....	34

Chapitre IV

Figure IV.1 : Fenê tre principale de CSB.....	36
Figure IV.2 : Interface de Matériels (liste vide).....	40
Figure IV.3 : Sections homogènes ou composites.....	40
Figure IV.4 : Système d'axes.....	43
Figure IV.5 : Page de saisie du module CBeam illustrant la possibilité de charger la surface d'une poutre par des forces ponctuelles, linéiques ou surfaciques.....	43
Figure IV.6 : L'interface de Plane Structure : Structure et chargements.....	44
Figure IV.7 : Interface de Plane Structure : Analyses.....	45
Figure IV.8 : Déformées 3D	46
Figure IV.9 : La fenê tre principale de Spatial Beam.....	47

Chapitre V

Figure V.1 : Poutre console de J.L.Batoz et G.Dhatt [BAT90].....	51
Figure V.2 : Poutre console renforcé par une plaque métallique.....	52
Figure V.3 : principe d'homogénéisation de la section.....	53
Figure V.4 : L'interface de la console d'entrée des données FORTRAN.....	56
Figure V.5 : Ficher « *.dat » de sortie de résultat des calculs des caractéristiques mécaniques.....	56

Figure V.6 : Géométrie et maillage de la section homogène et le script correspondant.....	58
Figure V.7 : Géométrie et maillage de la section composite et le script correspondant.....	59
Figure V.8 : La fenê tre principale de CSection pour la section homogénéisée (SH1).....	60
Figure V.9 : La fenê tre principale de CSection pour la section composite.....	60
Figure V.10 : Variation de la contrainte axiale σ_{zz}	61
Figure V.11 : Variation d'une contrainte de cisaillement τ	61
Figure V.12 : Effets de poisson	62
Figure V.13 : Distorsions et gauchissements.....	62
Figure V.14 : Variation de la contrainte axiale σ_{zz}	62
Figure V.15 : Variation d'une contrainte de cisaillement τ	63
Figure V.16 : Effets de poisson	63
Figure V.17 : Distorsions et gauchissements.....	63
Figure V.18 : La fenê tre principale de Spatial Beam pour SH1 (20%).....	64
Figure V.19 : Les diagrammes des efforts intérieurs.....	64
Figure V.20 : Les diagrammes des déplacements (translations et rotations).....	64
Figure V.21 : Variation d'une contrainte de cisaillement de la section SH1 à l'encastrement.....	66
Figure V.22 : Les déplacements des nœuds de la poutre et les réactions.....	66
Figure V.23 : Fichier de données et de résultats d'un Langage Fortran de la section SH1.....	67
Figure V.24 : Déplacement de l'extrémité libre de la poutre selon la section homogénéisée.....	68

Liste des tableaux

Chapitre III

Tableau III. 1: Les propriétés du métal et de la céramique	17
---	----

Chapitre V

Tableau V.1: Type de sections homogénéisées	55
Tableau V.2: Type de sections homogénéisées	55
Tableau V.3 : Solution de références des sections homogénéisées	57
Tableau V.4 : Déplacement de l'extrémité libre de la poutre selon la section homogénéisée	68
Tableau V.5 : Contraintes normales et tangentielles des sections à l'encastrement.....	69

Introduction générale

Les structures stratifiées sont largement utilisées dans divers domaines de l'ingénierie, notamment dans l'aérospatiale, l'automobile et la construction civile, en raison de leur capacité à combiner différentes couches de matériaux pour optimiser les performances mécaniques, thermiques et autres propriétés spécifiques. Ces structures sont constituées de plusieurs couches de matériaux distincts collés ensemble, formant un composite dont les propriétés globales peuvent être ajustées selon les besoins spécifiques d'une application.

L'une des principales préoccupations lors de la conception de structures stratifiées réside dans la gestion des interfaces de contact entre les différentes couches. Ces interfaces sont souvent les points faibles où des contraintes localisées, des délaminations ou des défaillances peuvent survenir sous l'effet de charges mécaniques, thermiques ou environnementales. La modélisation précise de ces interfaces est cruciale pour prédire et améliorer la durabilité et la fiabilité des structures stratifiées.

Pour améliorer l'interface entre les couches, l'utilisation des Matériaux à Gradient de Propriétés (Functionally Graded Materials, FGM) a été proposée comme une solution efficace. Les FGM sont des matériaux dont les propriétés varient graduellement d'un point à un autre, permettant ainsi une transition douce entre les couches de matériaux distincts. Cette variation continue des propriétés peut réduire les concentrations de contraintes aux interfaces, améliorer l'adhésion entre les couches et augmenter la résistance globale de la structure.

La modélisation des interfaces de contact en utilisant l'approche FGM implique la création de modèles numériques qui capturent la transition graduelle des propriétés matérielles à travers les interfaces. Cela nécessite des méthodes de calcul avancées et des techniques de simulation, telles que la méthode des éléments finis (MEF), pour analyser les comportements mécaniques et thermiques des structures stratifiées.

En conclusion, la modélisation des interfaces de contact dans les structures stratifiées à l'aide de l'approche FGM représente une avancée significative pour le développement de matériaux composites plus robustes et durables. Cette approche permet de surmonter les défis traditionnels associés aux interfaces de contact, ouvrant ainsi de nouvelles possibilités pour des applications innovantes dans divers secteurs industriels.

Structuration du document

Notre mémoire est scindé en cinq chapitres :

Le premier chapitre intitulé '**Généralités sur les structures composites stratifiées**' étudie les matériaux composites stratifiées, les domaines d'application, leurs propriétés, et les différents constituants de ces matériaux.

Le deuxième chapitre intitulé '**Généralités sur les matériaux fonctionnellement gradués**' présente des généralités et introduction aux matériaux FGM d'où leur historique, la différence entre FGM et les matériaux composites traditionnels, domaines de l'application de ces derniers et l'intérêt de leur utilisation, les différentes méthodes d'élaboration de ces matériaux.

Le troisième chapitre intitulé '**Les lois régissant la variation des propriétés matérielles des plaques FGM**' explique les différentes lois possibles qui servent à décrire la variation spatiale et progressive des propriétés matérielles du matériau FGM.

Le quatrième chapitre intitulé '**Description du logiciel CSB et son utilisation pour le cas des poutres stratifiées**' présente le logiciel CSB et aussi l'utilisation de logiciel pour le cas des poutres stratifiées.

Le cinquième chapitre intitulé '**Validation de l'approche pour le cas d'une poutre stratifiée**' A travers ce chapitre nous allons présenter et valider et interpréter les résultats obtenus à l'issue des simulations numériques menées sur le comportement mécanique de la poutre stratifiée d'après l'approche FGM.

Enfin, le document est clos par une conclusion générale.

Chapitre I :
Généralités sur les structures
composites stratifiées

I.1. Introduction

La plupart des technologies et systèmes d'ingénierie ont été développés autour de l'utilisation de matériaux complexes. Les stratifiés composites ont été largement utilisés dans des industries importantes et innovantes, telles que l'aviation, les transports, l'automobile et le génie civil. Des études récentes ont révélé que les matériaux composites sont largement utilisés dans les applications automobiles, sous-marines et structurelles. Des efforts considérables ont été consacrés à l'exploration des structures construites à partir de matériaux composites en raison de leur importance en ingénierie. Bien que les matériaux composites offrent de nombreux avantages par rapport aux autres matériaux, ils posent également des problèmes complexes et difficiles aux analystes et aux concepteurs.

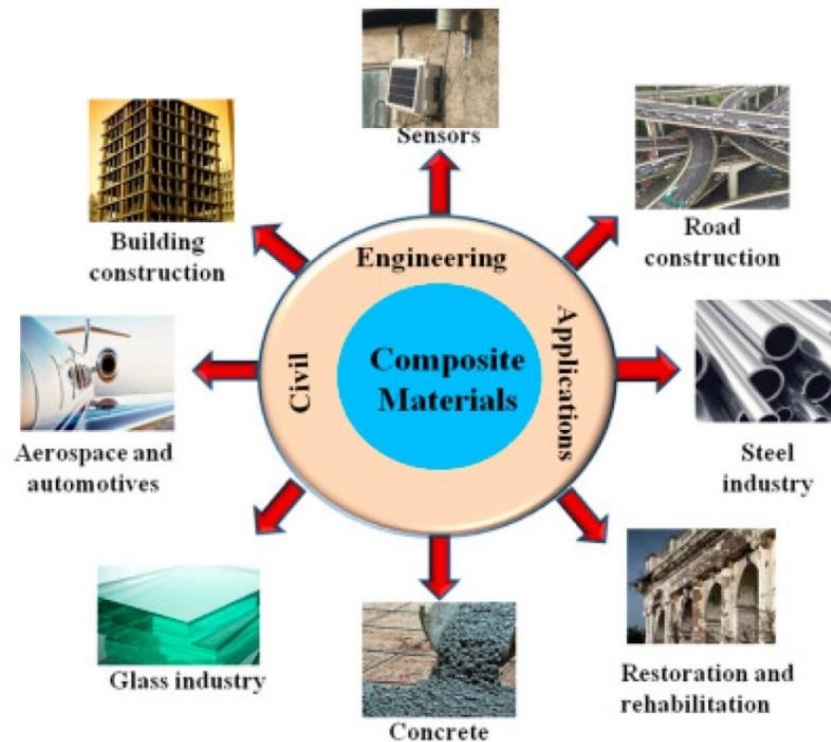


Figure I.1: Applications des matériaux composites.

I.2. Structure composites stratifiées

Les structures composites stratifiées sont constituées de couches successives de renfort en acier imprégné de résine. Les couches sont également appelées plis. Les structures stratifiées créées à partir de matériaux composites sont constituées de couches unidirectionnelles ou bidirectionnelles. Ces couches sont formées à partir du renforcement de longues fibres plastiques. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction mécanique lorsqu'il est

soumis à des contraintes. La résine assure la cohésion entre les renforts pour répartir les contraintes mécaniques. Les éléments structurels sont fabriqués par empilement de couches qui optimisent l'orientation du renfort en fonction de la charge à supporter. Les éléments de structure sont créés par empilement de couches qui optimisent l'orientation du renfort en fonction de la charge à supporter. Les matériaux composites sont modélisés à une échelle intermédiaire, l'échelle microscopique est associée aux composants de base du composite, l'échelle macroscopique est associée à la structure. À cette échelle, appelée méso-échelle, une structure stratifiée est formée par un empilement de monocouches uniformes en épaisseur et entre les couches. La couche et l'interface sont deux soi-disant entités qui constituent la base de modèles dédiés à l'étude des structures hiérarchiques. L'interface entre couches est une entité surfacique qui assure les déplacements et contraintes normaux d'une couche à l'autre. En termes d'élasticité, les couches sont parfaitement liées et l'interface n'a pas de rôle particulier. L'étude des composites jusqu'à l'étape finale démontrera l'utilité de l'utilisation de la modélisation d'interface pour simuler la ségrégation (séparation progressive des couches).

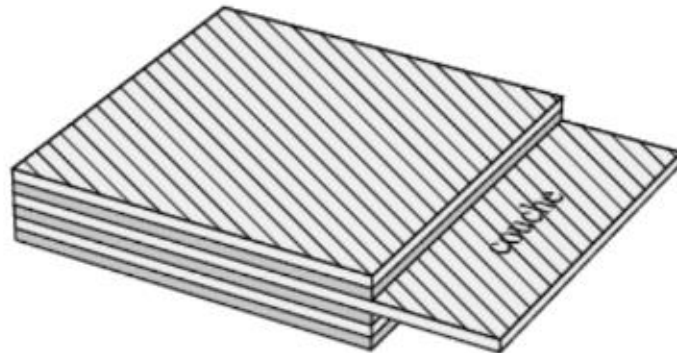


Figure I.2 : Stratifié constitué de couches parfaitement liées

I.3. Désignation des structures stratifiées

Les structures stratifiées sont basées sur des tissus unidirectionnels comportant un grand nombre de couches ou de plis. L'épaisseur d'une couche dépend de son poids. L'épaisseur de chaque couche est généralement très faible, environ 0,125 mm pour les matériaux époxy carbone de qualité aérospatiale et 0,3 mm pour les qualités marines. Ces structures stratifiées sont constituées de couches unidirectionnelles avec des fibres orientées différemment d'une couche à l'autre pour obtenir les propriétés mécaniques souhaitées pour la structure finale. La

désignation des structures stratifiées est subtile car elle précise les axes de référence. Un stratifié est codée de la manière suivante :

– chaque couche est désignée par un nombre qui indique le degré de l'angle que fait la direction avec l'axe de référence x. Sur les figures 3(a) et 3(b), les couches sont décalées. La structure stratifiée est décrite de bas en haut ;

– les couches sont nommées successivement entre crochets de bas en haut. Le symbole « / » comme l'exemple de la figure 3(a) : $[-45/45/-45/-45/45/-45]$;

– les couches successives du même matériau et de la même orientation sont indiquées par un index numérique, comme le montre la figure 3(b) : $[0/45_2/90/-45_2/0]$; dans le cas d'une stratification hybride (différents matériaux dans un même stratifié), il doit préciser l'indice des propriétés de la couche ; dans le cas d'une structure symétrique, la moitié est codée comme symbole s désignant la symétrie : $[-45/45/-45/-45/45/-45]$ devient $[-45/45/-45]_s$ et $[0/45/45/90/-45/-45/0]$ devient $[0/45_2/90/-45_2/0]$.

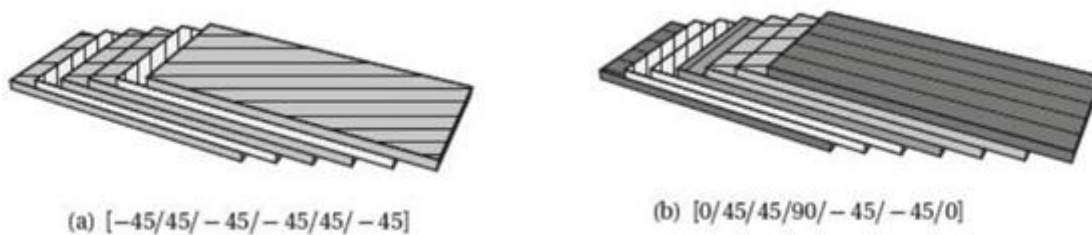


Figure I.3 : Désignation du stratifié

I.4. Modélisation des structures stratifiées

Les structures mille-feuille se caractérisent par l'élanement, c'est-à-dire le rapport entre l'épaisseur et la longueur maximale, ce qui rend leur modélisation analytique et quantitative difficile. En effet, l'épaisseur typique de la couche n'est atteinte que de 200 μ m lorsque la dimension horizontale de la structure en cours de réalisation est de l'ordre du mètre. Par conséquent, la modélisation tridimensionnelle de la structure à l'aide de Cauchy 3D avec prédiction de réponse à l'aide d'un volume fini standard est inconcevable à grande échelle. De manière plus pratique, les structures composites peuvent être considérées comme des coques et donc représentées en deux dimensions. Par conséquent, par construction, les modèles de

plaques ou les modèles conventionnels effectuent un processus d'intégration d'épaisseur, pour dégénérer le problème tridimensionnel en un problème bidimensionnel. Mais alors, cette diminution s'accompagne souvent d'informations sur la répartition du champ mécanique dans la plaque. Une description complète de tous les modèles existants pour caractériser les structures minces serait irréaliste. Par ailleurs, nous nous limiterons à présenter des approches axiomatiques et distinguerons deux grandes familles : d'une part, les modèles de réseaux construits sous contraintes « en contraintes », d'autre part, les modèles de réseaux en transition de position « en déplacements », dans lesquels nous tenterons de mettre en évidence les forces et les forces respectives faiblesses.

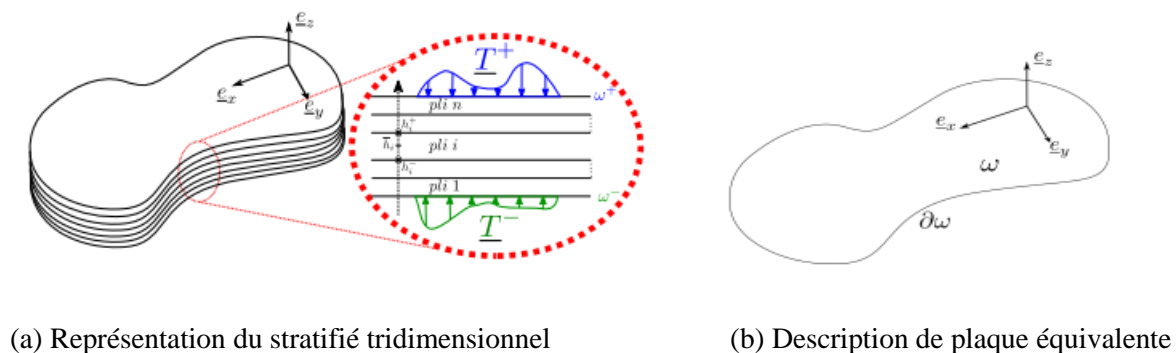


Figure I.4 : Structure en mille feuilles 3D et sa représentation équivalente à l'aide d'un modèle bidimensionnel

I.5. Problèmes d'optimisation pour les structures stratifiées

La conception d'une structure composite stratifiée implique généralement un certain nombre de variables de conception. En plus Les paramètres de base qui déterminent le stratifié, c'est-à-dire l'orientation des fibres, l'épaisseur de la couche et la séquence d'empilement du matériau, sont également liés à la structure composite topologique conçue. Le poids structurel, la rigidité, la résistance à la flexion, la fréquence propre, la tolérance aux dommages et le flambage sont les objectifs les plus couramment utilisés. Contraintes dans la conception de structures composites. Parfois, le comportement de transparence d'ondulation est également lié à la conception de panneaux composites. D'autres méthodes d'optimisation ont été développées pour les stratifiés Concevoir des structures composites selon des applications spécifiques. Différentes classifications des problèmes de conception de composites stratifiés sont également proposées dans la littérature basées sur des variables de

conception, des fonctions objectives ou des méthodes d'optimisation. a classé la conception de la structure composite en deux Scénarios : conception à rigidité constante et conception à rigidité variable. Haftka et al, a classé la conception des structures composites stratifiées en conception laminée et conception de panneaux rigides. Optimisez les problèmes de classification de l'usure en fonction de leurs objectifs, tels que la résistance dans le plan, la résistance à la flexion, la rigidité à la flexion et la fréquence propre. D'autre part, Awad et al, a classé l'optimisation des structures composites multicouches par rapport à l'optimisation utilisée.

I.6. Analyse structurelle

Un matériau composite stratifié composera de différentes couches matrice et de fibres. Ses propriétés peuvent varier considérablement en fonction de l'orientation de chaque couche ou pli, de la propriété du matériau du nombre de couches lui-même. Il existe différentes méthodes d'analyse pour les structures ; En particulier, la méthode des éléments finis s'est avéré une méthode d'analyse plus efficace des structures en tenant des différents modes d'analyse du format. De plus, une analyse spécifique des modes est disponible pour définir les contraintes et les déformations via l'analyse du Mode de défaillance, l'effet de la découpe.

De plus, une analyse spécifique des modes est disponible pour définir les contraintes et les déformations via l'analyse de flambement, le mode de défaillance, etc.

I.6.1. Analyse de flambement

Le flambement est un défaut principalement provoqué par la déflexion latérale d'un élément lorsqu'une force axiale est appliquée. Cela fait plier la colonne en raison de sa fragilité. La rapidité rend ce type d'échec dangereux. La longueur, la résistance et d'autres caractéristiques d'un poteau déterminent si elle se déformera. Les poteaux longs peuvent subir un flambement élastique par rapport à leur épaisseur.

Le pré-flambage, le flambement critique et le post-flambement sont les trois principaux états de travail qui caractérisent une structure composite à paroi mince typique dans un modèle idéal. Les états de pré flambement se produisent lorsque la force appliquée est inférieure au point de flambement critique de la structure. Dans cet état, il y a peu de déflexion et seulement une légère compression des structures. La charge axiale maximale que la structure peut supporter avant le flambement est connue sous le nom de charge critique. Le système atteint l'équilibre à la charge critique, qui sert également de point de bifurcation entre

les deux états de pré-flambement et de post-flambage. La linéarité d'une structure se termine à ce point, et la non-linéarité doit être prise en compte après que la charge appliquée dépasse le point de bifurcation. Enfin, une condition de post-flambement est une condition dans laquelle la déformation liée à la flexion augmente. Dans un état postcritique avec une surcharge sévère, l'intégrité structurelle est perdue, ce qui entraîne des dommages. La première étape du passage de la structure dans un état de fonctionnement postcritique est d'atteindre le point de bifurcation. L'activité postcritique est caractérisée par des effets spécifiques sur la compression axiale de la structure. Par conséquent, le facteur général qui définit la bonne exploitation de la structure en relation avec le processus de chargement est le flambage et la capacité de charge. La tendance à l'équilibre postcritique est constante et l'augmentation de la charge de compression est suivie d'une augmentation de la déflexion de la paroi, de sorte que la structure peut continuer à fonctionner même après le flambage.

En général, l'analyse de flambement linéaire et l'analyse de flambement non linéaire sont les deux types d'analyse fréquemment utilisés pour analyser le flambement sur les structures à parois minces. La charge critique de flambement d'une plaque est déterminée à l'aide de l'analyse de flambement en valeurs propres, également appelée analyse linéaire ou analyse de flambement d'Euler. Un facteur de charge ou multiplicateur de charge sera généré par ABAQUS lorsqu'un système est soumis à une charge arbitraire pour atteindre le point de bifurcation. ABAQUS appliquera la charge critique de flambement en multipliant la charge d'entrée, que la charge appliquée soit inférieure ou supérieure à la charge critique de flambement. L'analyse de flambement linéaire, également connue sous le nom d'analyse de flambement en valeurs propres, prévoit la capacité de flambement potentielle d'un système élastique linéaire idéal. La solution classique d'Euler, par exemple, peut être découverte à partir de l'analyse de flambement en valeurs propres d'une colonne compte tenu des défauts et des non-linéarités. Une analyse statique non linéaire des charges montantes est utilisée dans l'analyse de flambement non linéaire pour identifier le niveau de charge auquel le système devient instable. Par conséquent, l'analyse de flambement non linéaire peut être utilisée pour générer une méthode plus précise. En bref, l'analyse linéaire est beaucoup plus simple à mener tandis que l'analyse non linéaire offre une solution robuste par rapport à l'analyse linéaire. De plus, Abadi et al Améliorez la façon dont les stratifiés renforcés de fibres unidirectionnelles se plient en combinant un processus d'optimisation pour des configurations presque uniformes avec les possibilités offertes par les différentes orientations des plis.

I.6.2. Mode de défaillance

Lorsqu'une structure à paroi mince est comprimée, elle se rompt généralement en raison d'une perte de stabilité. Le flambement local, le flambement de distorsion et le flambement global sont les trois principaux modes ou classes utilisés pour catégoriser les processus de flambement. Une déformation extrême et une défaillance éventuelle résulteront de l'un ou l'autre de ces processus. Les instabilités des éléments comprimés à paroi mince comprennent le flambement par torsion en flexion locale, la distorsion et leur interaction. Le principal mode de défaillance de la colonne est le flambement local et le flambement par distorsion. Comme indiqué, le flambement local dans un élément à paroi mince n'entraîne pas de défaillance. Cependant, le flambement de distorsion, qui se manifeste par le déplacement de l'unité perpendiculaire à son plan, se produit au niveau des colonnes intermédiaires. Le flambement en flexion est généralement ce qui provoque l'effondrement de longues colonnes. Ce mode présente une déformation excessive le long d'un axe primaire plus faible. Pour augmenter considérablement l'efficacité globale de l'élément de compression, ce mode de défaillance peut être diminué ou éliminé.

D'autres noms pour le flambement de distorsion incluent la rupture du raidisseur et la rupture par torsion locale. Dans les éléments comportant des composants raidis par les arêtes, il s'agit d'un mode défini par la rotation de l'aile au niveau de l'aile ou de la jonction d'âme. Il est facile de comprendre comment fonctionne l'action de flambement locale : à mesure que le rapport largeur/épaisseur (L/E) augmente, la contrainte de flambement locale diminue. Par conséquent, l'ingénieur peut utiliser ces informations pour concevoir le flambement local. L'instabilité locale provoque la déformation des âmes et des brides comme des plaques, ce qui modifie la section transversale du poteau. La contrainte critique de flambement est souvent indépendante de la longueur du poteau lorsque la longueur du plus grand élément de plaque dans le poteau transversal est égale ou supérieure à trois fois celle de la largeur. Les modes de défaillance peuvent être activés à n'importe quelle couche et dans n'importe quelle direction dans les stratifiés composites lorsqu'ils subissent une charge de flambement par compression dans les structures à parois épaisses. Des exemples sont présentés à la figure I.5. La figure montre les types maximum possibles du mode de défaillance par compression.

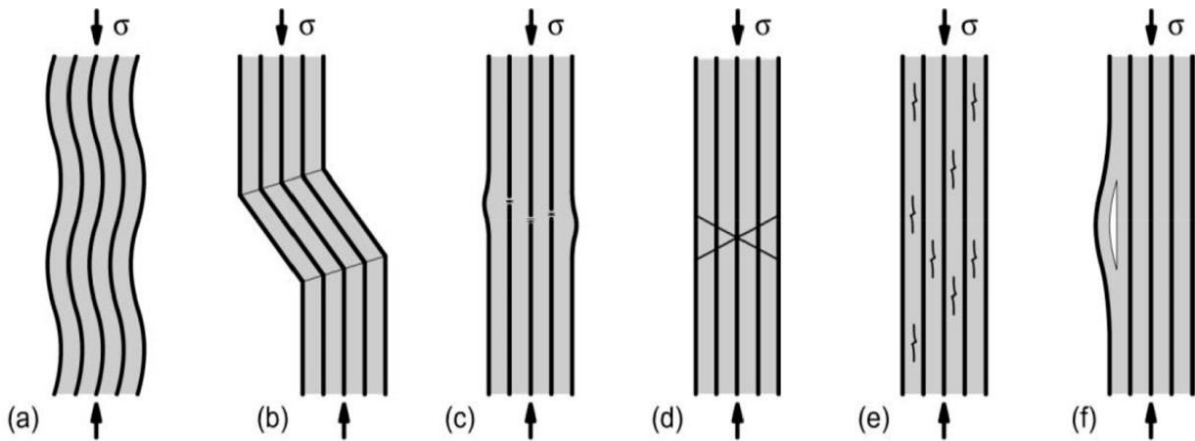


Figure I.5 : Modes de défaillance des composites à fibres (a) Micro flambage élastique, (b) pliage des fibres, (c) écrasement des fibres, (d) formation de bandes de cisaillement, (e) fissuration de la matrice et (f) délaminage des boucles

I.6.3. Effet de la découpe

Pour gagner du poids et permettre les services d'évaluation et de construction, les pièces à paroi mince sont souvent tranchées. En raison du transfert des contraintes causées par cette perforation, la résistance finale et la rigidité élastique de l'élément structural peuvent être modifiées. En règle générale, lorsqu'une section de la structure est perdue, la charge critique d'un élément à paroi mince avec des découpes devrait diminuer. Cependant, en raison de sa taille, ce type de structure est vulnérable au flambage, qui est aggravé par l'existence de lacunes. Le comportement de flambement des éléments structuraux ayant des perforations est directement influencé par le type, la taille, la position et la quantité des perforations. L'étude portait sur des poutres de canaux perforés à parois minces soumises à des charges de compression. Pour examiner leur effet sur la résistance au flambement de la poutre, trois paramètres, la géométrie des ouvertures, les rapports d'ouverture et la proportion d'espacement, ont été choisis. À l'aide de la technique de Taguchi et de l'ANOVA, les auteurs ont cherché à trouver la combinaison idéale des facteurs susmentionnés dans une construction perforée à paroi mince pour l'aluminium 6061-T6. Selon leurs résultats, une forme hexagonale avec un rapport d'ouverture de 1,7 et un rapport d'espacement de 1,3 offre la meilleure résistance au flambement. Rozyło et Wrzesinska ont déterminé l'impact sur le flambement en examinant les éléments à paroi mince avec une longueur et un diamètre de trou modifiables par les barres transversales en I. Ils ont affirmé que la longueur n'avait pas d'influence perceptible sur le flambage. Cependant, la dimension des trous modifie la capacité de l'élément à supporter des charges plus importantes. Il a été déterminé que la taille de la charge critique qu'un élément peut appliquer augmente avec le diamètre. Contrairement aux

recherches antérieures, Ce rapport ne spécifie pas de largeur maximale de trou ni de nombre de trous. En plus de son étude de la relation entre le rapport d'élanement et la stabilité, Guo a examiné l'impact des perforations sur les éléments à paroi mince. Il a été déterminé que pour un seul trou dans la structure, le coefficient de stabilité global de flambement diminuait à mesure que la taille du trou augmentait. En revanche, pour les éléments à paroi mince avec de nombreux trous circulaires, la stabilité augmente à mesure que l'espacement des trous augmente. Selon ses recherches, l'ajout de trous supplémentaires n'a pas d'impact perceptible sur la stabilité lorsque des trous plus petits sont présents. Cela a été mis en évidence par l'inclusion des dimensions du sujet, comme le montre la figure I.6.

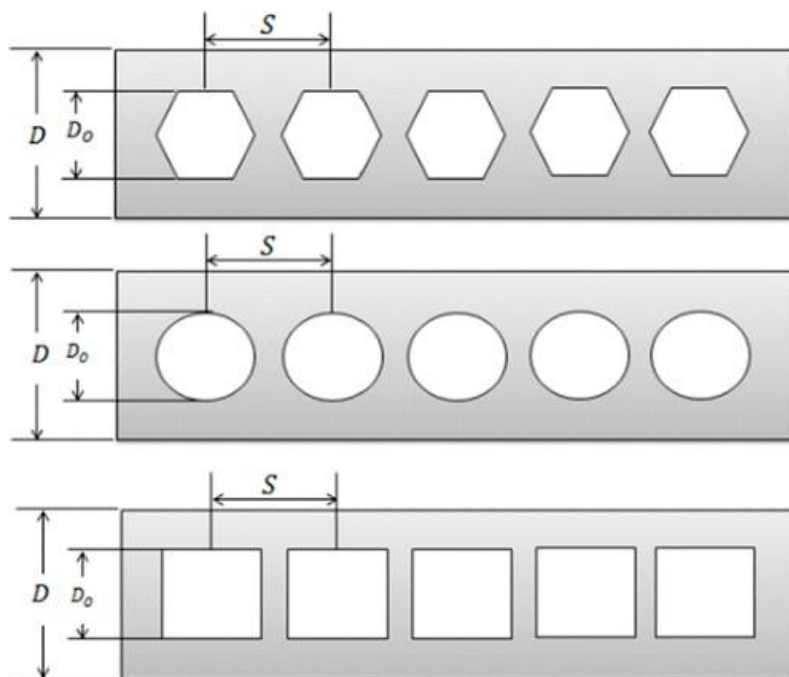


Figure I.6 : Description de l'espacement des trous et du rapport d'ouverture dans une structure à paroi mince

I.6.4. Effet de l'orientation des fibres

Il est bon de connaître l'effet de l'orientation des fibres sur le flambement critique. L'étude a révélé que différentes orientations de fibres donnent différentes charges de flambement critique. Les calculs théoriques et l'analyse par éléments finis ont utilisé les propriétés mécaniques des plaques composites verre-polyester feuilleté. À partir des couches composites, des stratifiés à huit plis avec huit séquences d'empilage sont créés. Des orientations de fibres de 0, 15, 30 et 45 degrés étaient présentes dans chacune des couches à six couches. Il a été constaté que dans cette étude, la charge de flambement est la plus faible

lorsque l'angle de la fibre est de 45° et augmente à mesure que l'angle d'orientation augmente. La figure I.7 montre l'exemple de la direction des fibres en considérant huit couches de stratifiés composites.

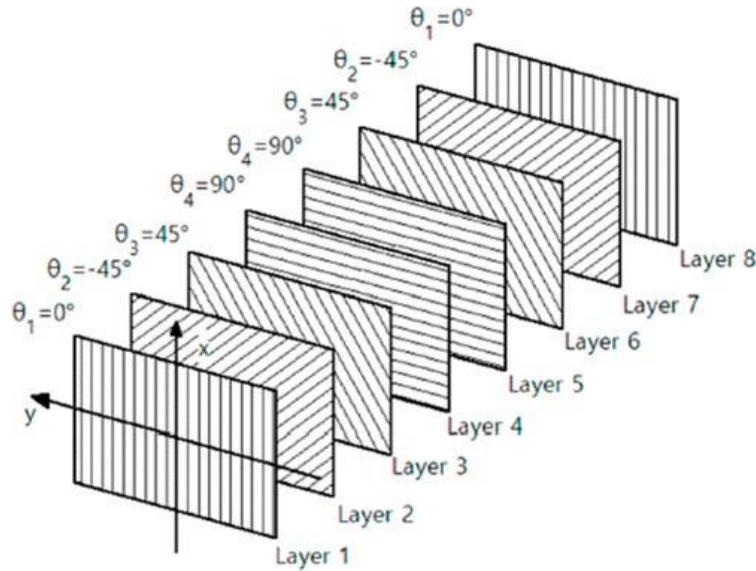


Figure I.7 : Exemple d'orientation de la fibre

Selon une étude publiée la contrainte critique de flambement avait tendance à augmenter lorsque l'orientation de la fibre changeait. De plus, cette version de recherche ne démontre aucune différence en ce qui concerne l'influence de l'épaisseur, le même schéma étant montré dans les résultats lorsqu'ils répètent le processus pour des modèles plus épais. Après tout, il est important de reconnaître que chaque étude de recherche utilise des matériaux de manière unique. Une étude a utilisé un matériau composite de verre feuilleté et de polyester dans ses expériences, mais une autre a utilisé du FRP. De ces deux publications, nous pouvons donc conclure que divers matériaux composites influencent également la contrainte critique de flambement sur les pièces à parois minces.

En raison de la popularité des structures, de nombreux types de recherche ont été effectués pour examiner les lacunes présentes et ainsi améliorer l'utilisation des colonnes, des poutres, des coques et des structures stratifiées dans divers secteurs. Généralement, la charge critique de flambement d'un élément à paroi mince est ensuite estimée à l'aide d'une analyse linéaire et, après le flambement, le chercheur examine le comportement du poteau par étapes non linéaires pour déterminer la charge ultime. De plus, une fois l'expérience ou la simulation terminée pour un élément spécifique à paroi mince, plusieurs types de défaillance peuvent être observés. En utilisant l'équation d'Euler, nous pouvons anticiper le mode de flambage.

L'option de soutien utilisée pour soutenir la colonne est un autre aspect qui ajoute de l'attention à ce sujet. Comme nous comprenons le classique d'Euler, différents supports entraînent des réponses différentes. En effet, différents coefficients de flambement seront utilisés en fonction du type et des dimensions des supports. Selon les revues de la littérature antérieure, la performance des parois minces perforées a tendance à diminuer à mesure que la taille des trous augmente. Pour déterminer l'acceptabilité du diamètre de découpe pour une structure spécifique à paroi mince, une optimisation est donc nécessaire. De plus, étant donné qu'une distance plus petite entre les trous réduit la contrainte critique pour le flambement, il est également nécessaire d'optimiser cette valeur. Enfin, divers facteurs, notamment l'orientation des fibres, le type et l'épaisseur du composite, influencent les performances de flambement des structures composites à paroi mince.

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les matériaux composites stratifiées, les domaines d'application, ainsi que leurs propriétés, et les différents constituants de ces matériaux.

Les matériaux composites offrent de nombreux avantages : légèreté, chimie, entretien réduit et liberté de forme. Cependant l'interface de ces couches pose un problème majeur est la discontinuité des propriétés et de contraintes à niveau. Une technique a été élaborée par un groupe de Japonais pour surmonter ces effets nuisibles; elle consiste à utiliser un matériau fonctionnellement graduée "FGM".

Le chapitre suivant se concentrera sur la façon de présenter les matériau fonctionnellement graduée "FGM" dans leur concept et leurs caractéristiques, puis nous déterminerons le facteur qui régit ce matériau.

Chapitre II :
**Généralités sur les matériaux
fonctionnellement gradués**

II.1. Introduction

Les matériaux composites sont la forme la plus avancée de matériaux constitués de deux composants ou plus dont les propriétés physiques et chimiques diffèrent considérablement de celles des matériaux individuels. Les matériaux composites permettent des combinaisons individuelles de noyaux durs et résistants à l'usure et de noyaux souples pour répondre aux exigences fonctionnelles de l'application. L'hétérogénéité, l'anisotropie, la symétrie et la hiérarchie sont les principales caractéristiques des matériaux composites qui suscitent un intérêt particulier dans une grande variété de matériaux. Rapport résistance/dureté élevé, résistance élevée à l'usure, résistance à l'abrasion et fiabilité, etc. sont les avantages des composites par rapport aux métaux ou aux alliages. Malgré tous ces avantages, les matériaux composites subissent des transitions soudaines de propriétés à l'interface, ce qui peut conduire à une défaillance des composants dans des conditions de travail difficiles.

Cet inconvénient des composites conventionnels est éliminé par un type de composite appelé matériau à gradient de propriétés. Ces matériaux remplacent l'interface nette par l'interface de gradient, ce qui permet une transition en douceur des propriétés d'un matériau à un autre. Ces matériaux avancés, dotés de gradients de composition et de propriétés spécifiques dans la direction privilégiée, sont des matériaux homogènes composés de compositions similaires. Les propriétés mécaniques telles que le module d'élasticité de Young, le coefficient de Poisson, le module d'élasticité au cisaillement, la densité du matériau et le coefficient de dilatation thermique varient de manière régulière et continue dans les directions préférées des FGM. Les os, les dents, le cuir et le bambou sont quelques exemples de matériau fonctionnellement gradué.

Le concept de matériaux à gradient de propriétés a été développé pour la première fois par des chercheurs Japonais en 1984. Ils ont conçu une barrière thermique à gradient de température externe de 2000 K et de température interne de 1000 K sur une épaisseur de 10. A partir de là, l'utilisation de matériaux dégradés Les FGM présentent de nombreux avantages qui les rendent adaptés à ces applications. Cela inclut une ténacité élevée, des contraintes réduites dans le plan et en épaisseur, un système de barrière thermique amélioré, etc.

En raison de l'importance des FGM, de nombreuses méthodes ont été déployées pour améliorer le processus de production des propriétés FGM. Il existe plusieurs méthodes de fabrication pour produire des FGM, selon le type de FGM requis. Celles-ci incluent la métallurgie des poudres, le dépôt en phase vapeur, la centrifugation et les techniques à l'état

solide. Parmi toutes ces méthodes, les techniques de forme libre d'énergie de type laser, plasma ou faisceau d'électrons sont devenues très populaires ces dernières années.

II.2. Définition

Les matériaux ne sont pas des matières premières mais des matériaux développés pour être utilisés. Cela nécessite une symbiose entre la préparation et la conception de nouveaux objets. Il est clair que la variété des documents modernes est telle qu'il est impossible de créer une présentation complète ligne par ligne. Il devient plus difficile de faire un choix entre des matériaux dits « traditionnels » comme le bois, l'acier et des matériaux « évolutifs » comme la céramique, les métaux, les plastiques. La tendance actuelle n'est pas de les opposer à des ennemis mais de les combiner pour créer des matériaux plus efficaces tels que les matériaux fonctionnellement gradués « FGM ».

II.3. Bref historique

L'amélioration des performances des pièces structurales peut conduire à des propriétés différentes d'un même matériau, souvent optimisées localement. Le développement des matériaux composites a permis de lier des matériaux spécifiques avec différents matériaux dans une même pièce.

L'optimisation locale de ces propriétés, par collage d'un matériau très rigide sur une surface de matériau rigide, pose alors le problème de l'interface. Par exemple, une couche de matériau céramique peut lier la surface d'une structure métallique pour former un revêtement thermique dans des applications à haute température, la transition des propriétés du matériau à travers l'interface entre des matériaux discrets peut provoquer des contraintes inter couches élevées, des concentrations de contraintes élevées conduisant à la plasticité. Ou des fissures. Une façon de surmonter ces effets néfastes consiste à utiliser des « matériaux à gradient de propriété ».

Ces dernières années, des matériaux à gradient de propriétés ont été développés en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques. Ces matériaux performants sont capables de résister à des températures élevées. Une équipe de scientifiques de Sendai, au Japon, a proposé pour la première fois le concept de FGM en 1984, en tant que nouveau matériau doté d'une barrière thermique ou d'une isolation « isolante ». Initialement, le FGM a été conçu comme matériau de barrière thermique dans les applications aérospatiales et de réacteurs. Plus

tard, les FGM ont été utilisées dans les domaines militaire, automobile, biomédical, industriel et dans toutes les utilisations dans des environnements à haute température.

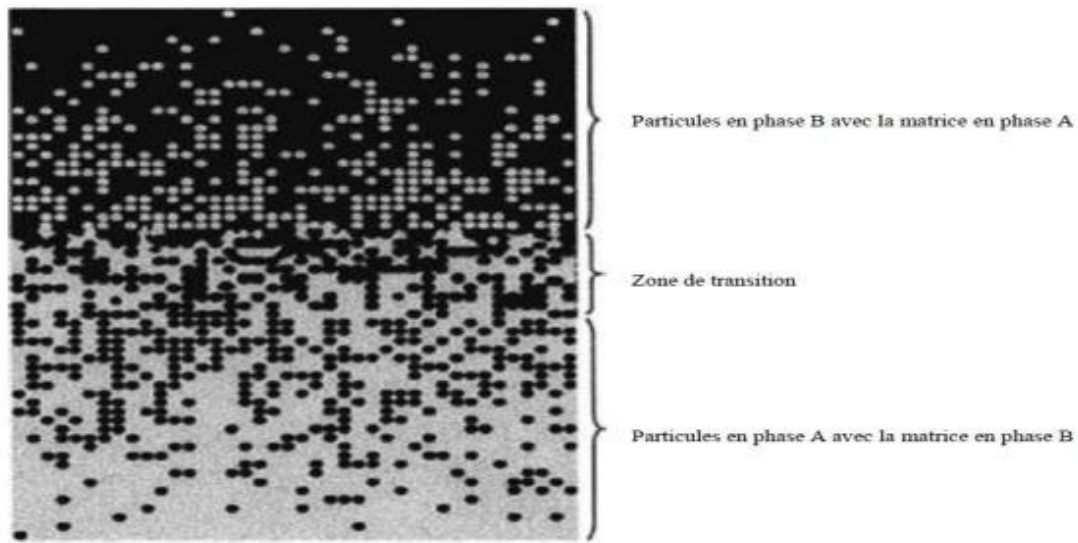


Figure II.1 : Un FGM avec les fractions de volume de phases constitutives graduées

II.4. Concept des matériaux à gradient de propriété FGM

Les matériaux à gradient de propriétés peuvent être produits en modifiant le pourcentage de deux matériaux ou plus, en modifiant la microstructure d'un composant, de tels types, les nouveaux matériaux auront les propriétés souhaitées. Il s'agit donc d'un mélange, d'une substance hétérogène aux propriétés hétérogènes au niveau macroscopique et homogènes au niveau microscopique.

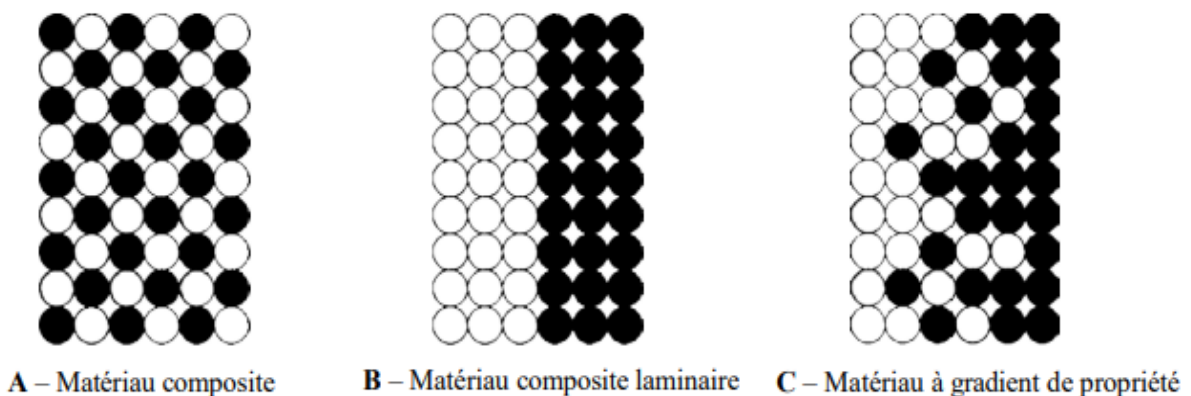


Figure II .2 : La distribution composante des matériaux

Conçu à l'origine comme bouclier thermique pour les navettes spatiales et les réacteurs à fusion, les chercheurs se sont intéressés à la combinaison de deux matériaux, le métal et la céramique, l'un pour une résistance à l'usure et à l'oxydation excellente à basse température et sa résistance à la chaleur côté haute température. L'association de ces deux matériaux permet d'améliorer les propriétés mécaniques et thermiques des pièces, contre les agressions extérieures, en effet les performances des céramiques à haute température sont plus attractives que celles des métaux, donc les qualités sont en même temps différentes. Le tableau II.1. Regroupe les propriétés de chaque composant :

Tableau II.1 : Les propriétés du métal et de la céramique

	Position	Propriétés
Céramique	Côté haute Température	<ul style="list-style-type: none"> - Faible réactivité chimique, bonne tenue aux corrosions. - Haute température de fusion ou de décomposition. - Haute dureté. - Hauts modules d'élasticité. - Charge à la rupture élevée. - Coefficient de frottement bas et bonne résistance à l'usure et l'oxydation. - Fragiles, très vulnérables aux défauts de petite taille et de caractéristique dispersées.
Céramique/Métal	Epaisseur intermédiaire	<ul style="list-style-type: none"> - Réduit les contraintes résiduelles. - Pas de problème d'interface.
Métal	Côté basse Température	<ul style="list-style-type: none"> - bonne résistance mécanique. - Conductivité thermique élevée. - Très bonne ténacité. - Bonne résistance à l'usure l'oxydation.

Le changement continu de la composition et donc de la microstructure du matériau FGM est représenté sur la figure II.3, en résulte un gradient qui déterminera les propriétés des FGM. Dans certains cas on peut avoir un FGM fabriqué à partir du même matériau mais avec une microstructure différente.

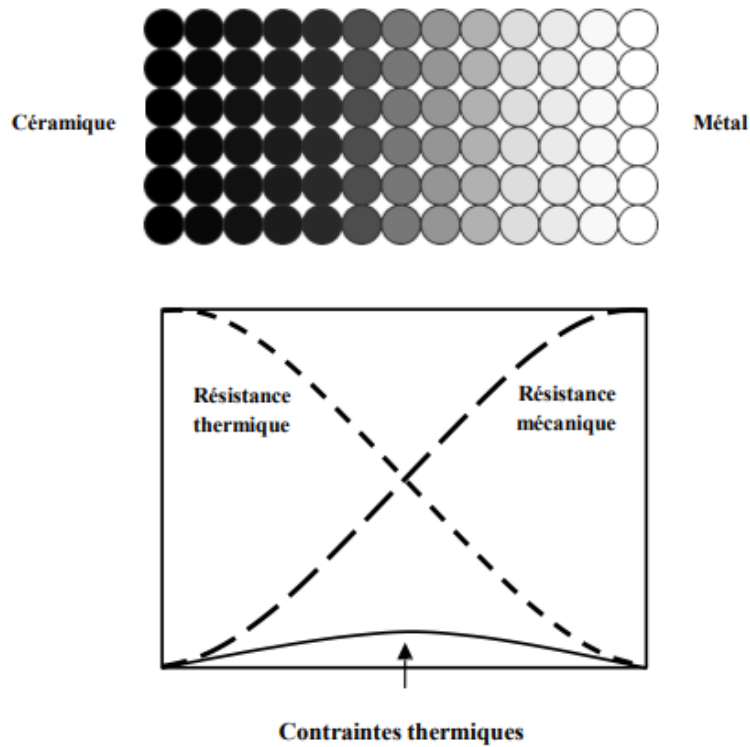


Figure II.3 : Concept des matériaux à gradient de propriétés

La figure II.4. Montre la concentration de contraintes dans les plaques chauffantes conventionnelles au niveau des surfaces. Il montre également comment un FGM peut alléger. Ces concentrations modifient progressivement les propriétés tout en offrant la protection thermique des radiateurs conventionnels.

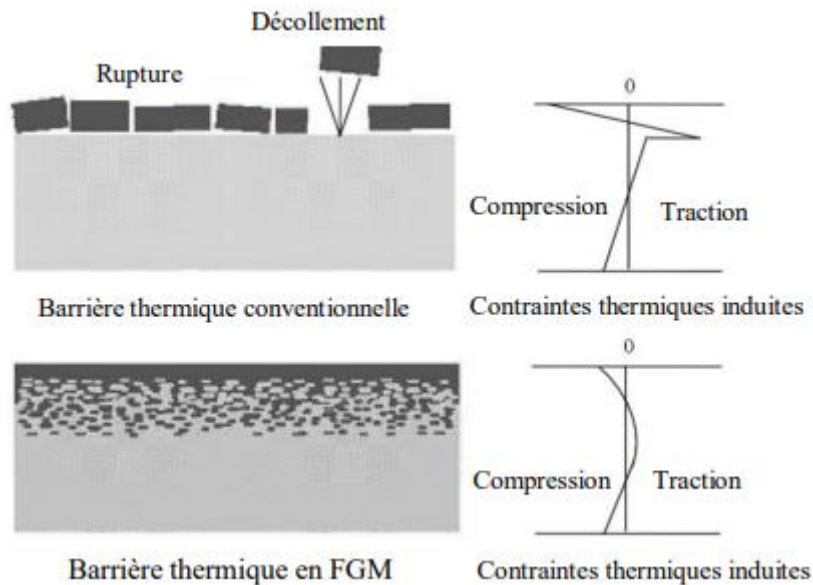


Figure II.4 : Protection thermique des Matériaux FGM et Non FGM

II.5. Comparaison des matériaux types FGM et les matériaux composites traditionnels

Les matériaux composites sont le mélange de deux ou plusieurs substances il a été développé par des chercheurs au fil du temps.

Le développement des matériaux composites a permis d'associer des propriétés spécifiques à différents matériaux au sein d'une même pièce et il a plusieurs types est :

- Macroscopique comme les matériaux composites à base des fibres (verre, carbone...) + matrice
- Microscopique comme les FGM (matériau fonctionnellement graduée)
- Nanos topique comme les nanotubes de carbone

Et maintenant, nous parlons du deuxième type de FGM qui est un matériau composite composé de nombreuses couches contenant différents composants qui sont des composés aux propriétés macroscopiques. Parce que le FGM a des propriétés doubles de deux matières premières qui sont ensemble et la distribution graduelle des composants n'est pas interrompue.

Par exemple, l'un des FGM comprend des céramiques qui combinent des propriétés de conductivité thermique et mécanique. Les FGM sont donc très attractives en termes d'applications dans les domaines industriels.

Propriétés	<p>1 Résistance mécanique</p> <p>2 Conductivité thermique</p>		
	<p>Structure</p> <p>Eléments constitutifs:</p> <p>céramique ○</p> <p>métal ●</p> <p>microporosité ◊</p> <p>fibre ✦</p>		
Matériaux	exemple	FGM	NON-FGM

Figure II.5 : Caractéristiques des FGM en comparaison avec les matériaux composites conventionnels (Koizumi 1997)

II.6. Propriétés effectives des matériaux à gradient de propriétés

Les FGM sont fabriqués par deux phases de matériaux avec différentes propriétés classées par leur microstructure variable dans l'espace, conçu pour optimiser l'exécution des composants de la Structure en répartissant les propriétés correspondantes. Les descriptions détaillées de la microstructure sont pratiquement graduées et généralement disponibles, à l'exception peut-être des informations sur la distribution de la fraction volumique tandis que la fraction volumique réelle de la phase augmente progressivement dans une direction croissante, l'effet de la FGM étant modifié dans cette direction.

Deux types courants de hiérarchies de masse, couvrant la plupart des modèles analytiques existants :

1. supposons une variation partielle de la fraction volumique de la céramique ou du métal et le FGM est réglée pour placer la même fraction volumique dans la zone, c'est-à-dire une couche presque uniforme de céramique-métal (Figure II.6.a).

2. Une variation continue de la fraction volumique du métal est supposée (Figure II.6.b) être la fraction volumique du métal pouvant être exprimé en fonction de la coordonnée d'épaisseur (e).

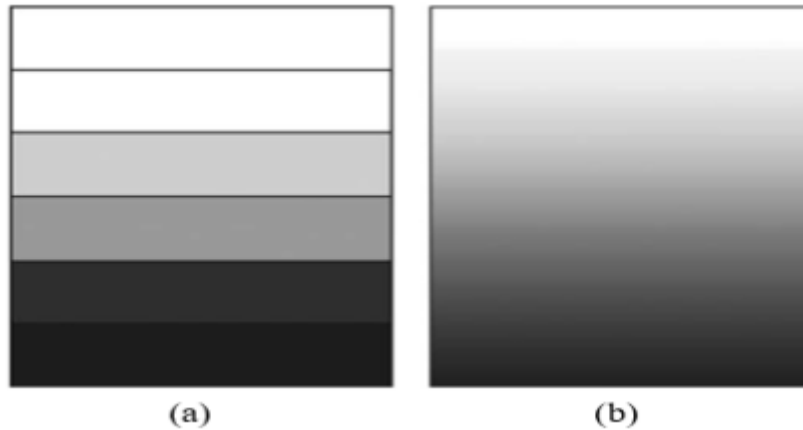


Figure II.6 : Fractions volumiques d'un matériau à gradient fonctionnel

Une variation continue des propriétés est appliquée lorsque, par exemple, la surface supérieure est exposée à des températures élevées tandis que la surface inférieure est exposée à des températures élevées. Dans ce cas, la face supérieure est à 100% céramique et la face inférieure est à 100% métal, avec une transition graduelle entre les deux. L'utilisation de la céramique n'est pas fortuite.

Ce matériau a été choisi pour ses propriétés particulières :

- Faible réactivité chimique, bonne résistance à la corrosion ;
- Température de fusion ou de décomposition élevée ;
- Haut module d'élasticité et haute dureté ;
- Charge à la rupture élevée ;
- Faible coefficient de frottement, bonne résistance à l'usure ;
- Conservation des propriétés à haute température ;
- Faible coefficient de dilatation thermique ;
- Faible conductivité thermique (donc bonne résistance à la température).

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

Les caractéristiques du métal sont :

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

II.7. Avantages et inconvénients des matériaux à gradient des propriétés

II.7.1. Avantages des FGM

En plus d'atteindre son objectif principal, qui est de fournir différentes propriétés nécessaires en différents points de la surface du futur produit, qui peuvent être obtenues avec un simple revêtement et bien d'autres choses, les différents avantages du FGM sont mis en évidence. Ils énumèrent certains avantages qui sont principalement dus à la non-existence d'une interface FGM forte, tels que :

- ✓ Réduit les contraintes thermiques causées par les différences de coefficient de dilatation thermique des matériaux utilisés.
- ✓ L'absence d'interface explicite se traduira par un meilleur ensemble de contraintes
- ✓ Meilleure liaison entre différents matériaux, par exemple un type de céramique avec un autre.
- ✓ Agrandir la zone fonctionnelle avant d'atteindre la limite de déformation plastique.
- ✓ Éliminer la ségrégation.
- ✓ Augmenter la résistance à la rupture.
- ✓ Élimine les singularités de contraintes en divers endroits, sur les faces libres, les coins, les racines de fissures, etc.

II.7.2. Inconvénients des FGM

Le principal obstacle à une application plus large des FGM est leur processus de fabrication complexe en raison de l'inadéquation de différentes propriétés, par exemple la température de fusion, qui diffère en fonction d'autres facteurs, de la taille des particules, de la morphologie, etc. Un exemple type est un mélange d'un métal avec la température de fusion (T1) et une céramique avec une température de fusion (T2). Dans la plupart des cas, un tel

couple est habituellement ($T_1 \ll T_2$). Ensuite, si la température de production est autour de T_1 , la céramique reste non fondue et la structure finale des particules céramiques n'est pas fondue dans une matrice métallique. Dans de nombreux cas, de telles structures présentent une porosité et une faible adhésion entre les différents composants, ce qui limite leur application générale. En effet, si la température de production est autour de T_1 , la céramique reste non fondue et la structure finale des particules céramiques n'est pas fondue dans une matrice. D'un autre côté, travailler autour de (T_2) conduira inévitablement à une oxydation et une volatilisation rapides de nombreux métaux. Formation d'étapes indésirables, etc. Les matériaux doivent être produits dans une atmosphère protectrice à basse pression, et les deux technologies sont coûteuses.

II.8. Champs d'utilisation

En raison des développements technologiques, il est essentiel que les capacités avancées en matière de matériaux deviennent une priorité en ingénierie pour des systèmes plus efficaces.

Les FGM sont des matériaux relativement nouveaux et font l'objet de recherches pour être utilisés dans des applications à haute température. FGM est utilisé dans de nombreuses applications de pratique d'ingénierie qui nécessitent des performances matérielles qui varient en fonction de l'emplacement dans la pièce.

Les applications les plus largement utilisées sont :

- Champ d'aérospatiale
- Dans la médecine
- Dans l'industrie
- Articles de sports

Il existe autres domaines d'application les FGMs :

- Champ optique (fibre optique, lentille etc.)
- Champ d'électronique (capteur, semi-conducteur à bande graduée, substrat, etc.)
- Champ chimique (Échangeur de chaleur, récipient de réacteur, tuyau (pipe) de chaleur etc.)

- Champ de biomatériaux (peau artificielle, Système de délivrance de médicaments, prothèses, etc.)
- Marchandises (Matériaux de construction, bon sport, Carrosserie etc.)
- Conversion de l'énergie (Générateur thermoélectrique, convertisseur thermo-ionique, piles à combustible, cellules solaires etc.)
- Optoélectronique
- Piézo-électricité

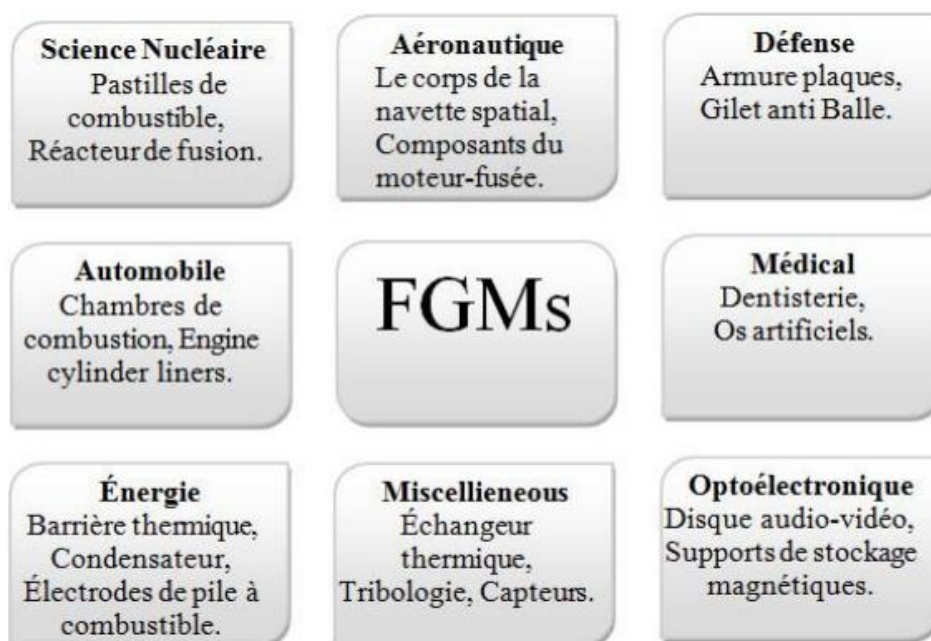


Figure II.7 : Applications des FGM dans divers domaines

II.8.1. Application des FGM dans le domaine du Génie civil

Le FGM peut être utilisé dans des chaussées en béton rigide avec un degré de gradation obtenu par variation de la fraction volumique des fibres, la technique est destinée à être appliquée aux autoroutes et aux routes où l'utilisation est très résistante de chaussées en asphalte souple telles que les chaussées industrielles et pour les pistes d'aéroport, elles ont une capacité portante et une durabilité élevées, afin d'optimiser l'épaisseur de la chaussée pour la rigidité de la surface de roulement et le matériau dur sur la couche de base.

FGM peut être utilisé dans les chaussées flexibles en éliminant les couches de liaison entre la couche de bitume et la couche d'asphalte pour éviter le glissement entre les deux

couches et économiser l'épaisseur des couches tout en obtenant un état optimisé qui augmente la capacité portante de la route et augmente ainsi sa durabilité.

II.8.1.1. Les joints dans la charpente métallique

Lors de l'assemblage de pièces dans une charpente métallique, il est nécessaire de souder entre deux pièces de dimensions différentes, une lourde et une souple. Dans ce cas on utilise des joints ordinaires en acier. L'inconvénient de ce type de joint est sa durabilité à la rupture. L'utilisation des joints FGM est optimale.

II.8.1.2. Les grands vitrages dans les zones chaudes

L'utilisation de fenêtres dans FGM vise à améliorer les températures dans les zones chaudes, en évitant le vitrage et en réduisant le coût et le poids des structures.

II.8.1.3. Les chaussées rigides (Functionally Graded Concrete Materials for Rigid pavements)

Le FGM peut être utilisé dans les chaussées en béton rigide avec une gradation obtenue en modifiant le rapport volumique des fibres, cette technique est destinée à être utilisée sur les autoroutes et les routes à très fort tarmac des aéroports, car elles sont très résistantes et durables, le but est d'optimiser l'épaisseur de la chaussée pour avoir un matériau rigide sur la surface de roulage et un matériau moins rigide sur la couche de base.

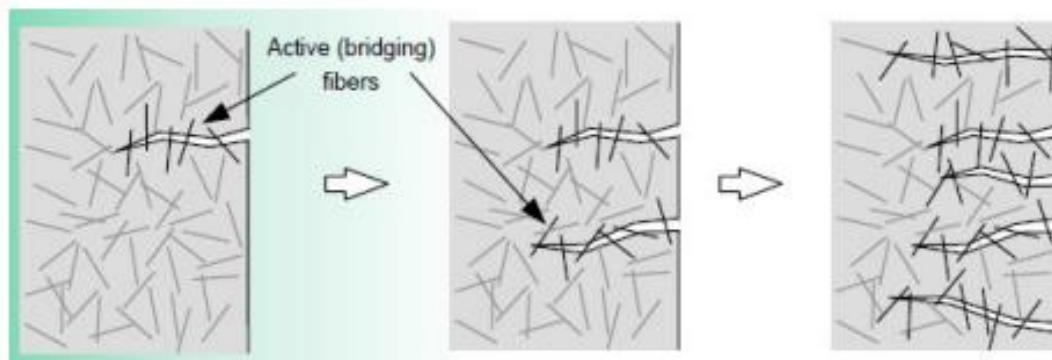


Figure II.8 : La variation de la fraction volumique des fibres dans la chaussée rigides

II.8.1.4. Les chaussées souples (Functionally Graded Concrete Materials for Flexible Pavements)

Le FGM peut être utilisé dans les chaussées flexibles pour éliminer les couches de liaison entre la couche de gravier et la couche d'usure transparente.

Béton bitumineux pour éviter le glissement latéral et économiser de l'épaisseur tout en atteignant un état qui augmente la capacité portante de la route et donc sa durabilité.

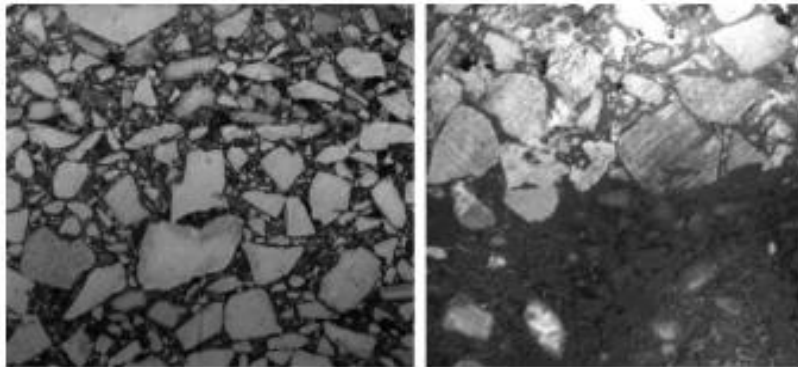


Figure II.9 : La variation de la fraction volumique des constituants entre la couche de la Grave Bitume et la couche de roulement

II.8.1.5. Les tunnels (functionally graded concrete segment in tunnel)

Les parois intérieures des tunnels doivent être réalisées sur réfractaire et rigide dans la surface exposée et d'un matériau dans la surface en contact avec le sol et roches.

II.9. Techniques de fabrication des matériaux à gradient de propriétés

Plusieurs techniques sont disponibles pour la production de matériaux fonctionnels. Certaines d'entre elles sont décrites en détail ci-dessous.

II.9.1. Techniques de dépôt en phase vapeur

Les techniques de dépôt en phase vapeur décrivent diverses méthodes de dépôt sous vide qui peuvent être utilisées pour produire des films minces sur les matériaux de base. Toutes ces techniques ne peuvent être utilisées que pour produire des FGM minces. Les différents types de techniques de dépôt en phase vapeur comprennent le dépôt physique en phase vapeur (PVD) et le dépôt chimique en phase vapeur (CVD). Celles-ci sont énergivores et produisent des jauges toxiques comme sous-produits. Parmi les autres techniques basées sur le dépôt de couches minces à gradients fonctionnels, il faut citer le dépôt par faisceau d'électrons (EBD), le dépôt par faisceau d'ions (IBD) et la synthèse (SHS) à haute température. Toutes les méthodes mentionnées ci-dessus ne sont pas économiques pour produire des FGM épais.

II.9.2. Métallurgie des poudres

Une technique basée sur la métallurgie des poudres peut être utilisée pour produire des FGM épais à discontinus. Ce processus est réalisé en utilisant des étapes comprenant la pesée et le mélange de la poudre selon une distribution prédéterminée en fonction des exigences fonctionnelles, l'empilage et le pilonnage de la poudre pré mélangée, et enfin le frittage.

II.9.3. Méthode centrifuge

La méthode de centrifugation permet la production de FGM épais avec une structure continue. Il utilise la gravité par rotation pour créer un matériau de calibre fonctionnel. La différence de densité des matériaux et la rotation des moisissures produisent des FGM. Cette méthode présente deux inconvénients : elle ne peut pas produire de FGM cylindriques et il existe des différences dans le type de gradient pouvant être produit.

II.9.4. Techniques de fabrication libre / fabrication additive (AM)

La fabrication (SFF) solide de forme libre / La fabrication additive (AM), également connue sous le nom d'impression 3D, est un processus qui utilise des matériaux pour créer des objets à partir d'un modèle 3D, généralement de cette couche à une autre couche, par opposition à la technologie de fabrication soustractive. Ce processus de fabrication sans outil permet de produire des pièces denses entièrement métalliques en peu de temps avec une grande précision. Les procédés de fabrication additive métallique peuvent être classés en deux types principaux : les technologies basées sur la synthèse de poudres (PBF) et les technologies basées sur les dépôts dirigés par (DED). Ces deux technologies peuvent également être classées selon le type de source d'énergie utilisée. Dans les technologies basées sur le PBF, l'énergie thermique sélectionne les régions du lit de poudre. Le frittage / fusion sélectif au laser (SLS / SLM) et la fusion par faisceau d'électrons sont des processus représentatifs de la technologie basée sur le PBF. Dans les technologies basées sur le (DED), l'énergie thermique est utilisée pour fusionner des matériaux sous forme de fil ou de fil en les faisant fondre au fur et à mesure de leur dépôt. La focalisation laser (LENS), le dépôt de métal (DMD), la formation de faisceaux (EBFFF) et la technologie Arc (AM) sont quelques-unes des technologies populaires basées sur (DED).

La plupart des méthodes SFF / AM mentionnées ci-dessus sont capables de produire des matériaux à gradient fonctionnel (FGM) à partir de revêtements épais et de pièces épaisses complexes.

Les avantages qu'offrent les techniques de fabrication additive, tels qu'une disponibilité accrue des matériaux, une vitesse de production, une liberté de conception, une capacité de production de pièces complexes et une intensité énergétique moindre, suscitent un intérêt particulier dans le cadre de la FGM pour diverses applications.

Les technologies AM basées sur la fusion en poudre PBF telles que la fusion sélective au laser SLM et la fusion par faisceau d'électrons EBM sont des méthodes très populaires pour la production de pièces complexes en raison de leur grande précision et de leur finition de surface comparé aux technologies à déposition d'énergie dirigée. Cependant, les technologies basées sur le PBF sont inférieures aux technologies basées sur le DED pour fabriquer des matériaux à gradient fonctionnel. Cela est dû au fait qu'il est impossible de créer un gradient en créant une modification de la composition chimique de la pâte. Cependant, ces méthodes peuvent produire des FGM épais grâce à la porosité ou en introduisant différents types de structures en treillis dans les pièces fabriquées.

Les techniques de AM basées sur le dépôt d'énergie dirigée sont les méthodes les plus pratiques pour produire des FGM car elles peuvent produire des FGM en sections épaisses à épaisses avec des gradients discontinus continus. Ces méthodes peuvent produire des FGM avec des propriétés d'adhésion mécanique supérieures à celles de la technologie des poudres. Le dépôt de métal par laser (LMD) et le dépôt de forme libre par faisceau d'électrons (EBFFF)/additif par faisceau d'électrons (EBAM) sont des méthodes courantes sur les systèmes de fabrication additive laser. Les (DED) peuvent être utilisés pour créer différents types de FGM.

II.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités et introduction aux matériaux FGM d'où leur historique, ainsi la différence entre FGM et les matériaux composites traditionnels, ensuite on s'est intéresser aux domaines de l'application de ces dernier et l'intérêt de leur utilisation dans de nombreux domaines d'application dans les structures spéciales et en génie civil, mais aussi les différentes méthodes d'élaboration de ces matériaux.

Chapitre III :
Les lois régissant la variation
des propriétés matérielles
des plaques FGM

III.1. Introduction

Les matériaux présentant des gradients de propriété « FGM » peuvent faire varier sans interruption les compositions de matériaux multi phases selon une configuration prédéterminée. Les caractéristiques les plus distinctes des FGM sont celles qui présentent des propriétés macroscopiques continuellement graduées. Un FGM peut être identifiée par des changements de volume. La plupart des chercheurs utilisent des fonctions de loi de puissance, exponentielles ou sigmoïdes pour les fractions volumiques.

La liaison entre les particules doit être suffisamment dure à l'intérieur pour résister à la rupture et suffisamment dure à l'extérieur pour éviter l'usure.

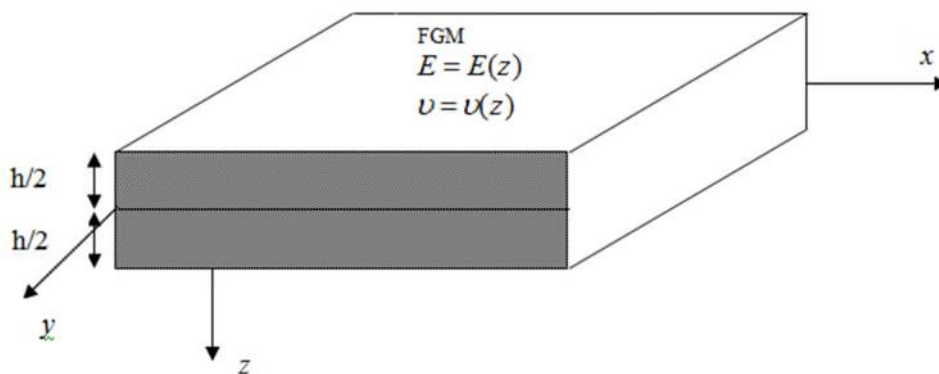


Figure III.1 : Géométrie d'une plaque en FGM

Les coordonnées x et y définissent le plan de la plaque (Figure III.1), tandis que la direction de l'axe z se situe au niveau de la surface moyenne de la plaque et dans le sens de l'épaisseur

III.2. Modélisation des propriétés matérielles effectives

Les FGM sont très hétérogènes, il est utile de les idéaliser car leurs propriétés mécaniques continuent de varier avec les coordonnées spatiales. Des schémas d'homogénéisation sont nécessaires pour simplifier leurs microstructures complexes afin de les analyser efficacement. Un FGM typique représente un assemblage de particules avec une distribution de fraction volumique prescrite de la paroi des phases structurales. Les propriétés des matériaux sont généralement supposées suivre un continuum d'épaisseur. Deux types courants de fractions volumiques qui composent la plupart des modèles analytiques existants :

- Une variation partielle de la fraction volumique des FGM est supposée avoir la même fraction volumique dans chaque région.
- La variation continue de la fraction volumique du matériau est supposée et la fraction volumique peut être exprimée en fonction de coordonnées par rapport à l'épaisseur.

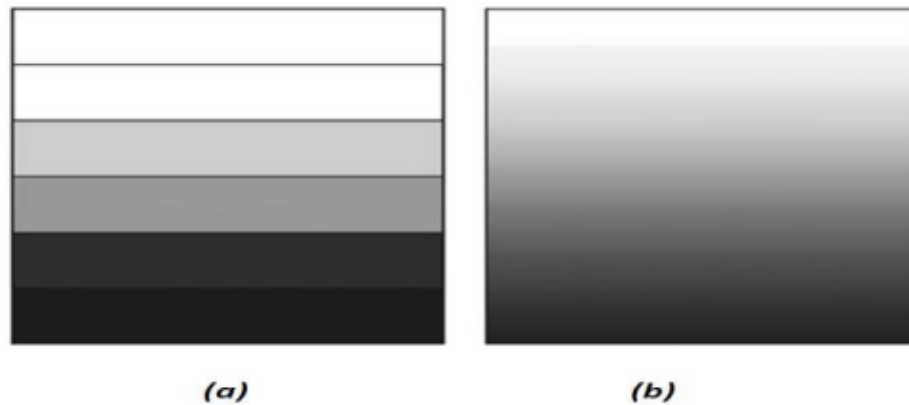


Figure III.2 : Modèle analytique pour une couche en FGM

Les propriétés des matériaux, notamment le module d'Young et le coefficient de Poisson sur les surfaces supérieure et inférieure, varient mais sont déterminées par les besoins de performances.

Cependant, le module élastique "Young" et le coefficient de variation sont continus, dans la direction de l'épaisseur "l'axe z " soit : $E = E(z)$, $\nu = \nu(z)$. Le module d'Young dans le sens de l'épaisseur de plaques constituées de matériaux à gradients de propriétés variant selon la loi de puissance "P-FGM" ou avec la fonction sigmoïde "S-FGM" ou la fonction exponentielle "E-FGM".

III.3. Lois de mélanges

III.3.1. Propriétés matérielles de la plaque P-FGM

La fraction volumique de la couche P-FGM suit une fonction de loi de puissance.

$$V(z) = \left(\frac{z+h/2}{h} \right)^p \quad (\text{III.3.1})$$

Où p est le paramètre matériau et h est l'épaisseur de la plaque. Lorsque la fraction volumique locale V correspond déjà aux matérielles de la plaque P-FGM, peut être déterminée par loi des mélanges :

$$E(z) = V(z) E1 + [1-V(z)] E2 \quad (III.3.2)$$

Où $E1$ et $E2$ sont respectivement les modules d'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 III.3), il est clair que la fraction volumique change rapidement à partir de la surface inférieure pour $p < 1$, et augmente près de la surface supérieure pour $p > 1$.

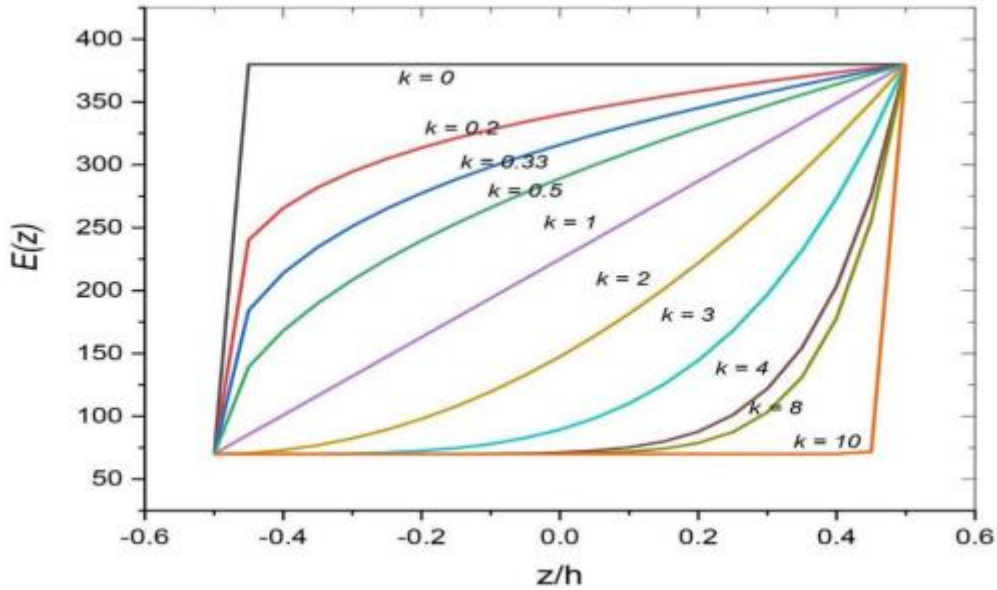


Figure III.3 : Variation de la fraction volumique dans une plaque "P-FGM"

III.3.2. Propriétés matérielles de la plaque S-FGM

Dans le cas de l'ajout d'une plaque P-FGM à loi de puissance simple à une plaque composite stratifiée, des concentrations de contraintes apparaissent au niveau des surfaces de contact où le matériau continue mais change rapidement. Par conséquent, Chung et Chi ont déterminé la fraction volumique de la plaque FGM en utilisant deux fonctions de loi de puissance pour assurer une bonne répartition entre toutes les interfaces.

Les deux fonctions de loi de puissance sont définis par :

$$V1(z) = \frac{1}{2} \left(\frac{\frac{h}{2} + z}{\frac{h}{2}} \right)^k \quad \text{Pour } -h/2 \leq z \leq 0 \quad (III.3.3a)$$

$$V2(z) = \frac{1}{2} \left(\frac{\frac{h}{2} - z}{\frac{h}{2}} \right)^k \quad \text{Pour } 0 \leq z \leq h/2 \quad (III.3.3b)$$

En utilisant la loi du mélange, le module de Young de la plaque S-FGM peut être calculé à l'aide des relations suivantes :

$$E(z) = V_1(z) E_1 + [1 - V_1(z)] E_2 \text{ Pour } -h/2 \leq z \leq 0 \quad (\text{III.3.4a})$$

$$E(z) = V_2(z) E_1 + [1 - V_2(z)] E_2 \text{ Pour } 0 \leq z \leq h/2 \quad (\text{III.3.4b})$$

La (figure III.4) montrent la variation de la fraction volumique dans les équations (III.3.4.a) et (III.3.4.b) est représentent la distribution sigmoïde, et cette FGM dans ce cas est appelée "Plaque S-FGM".

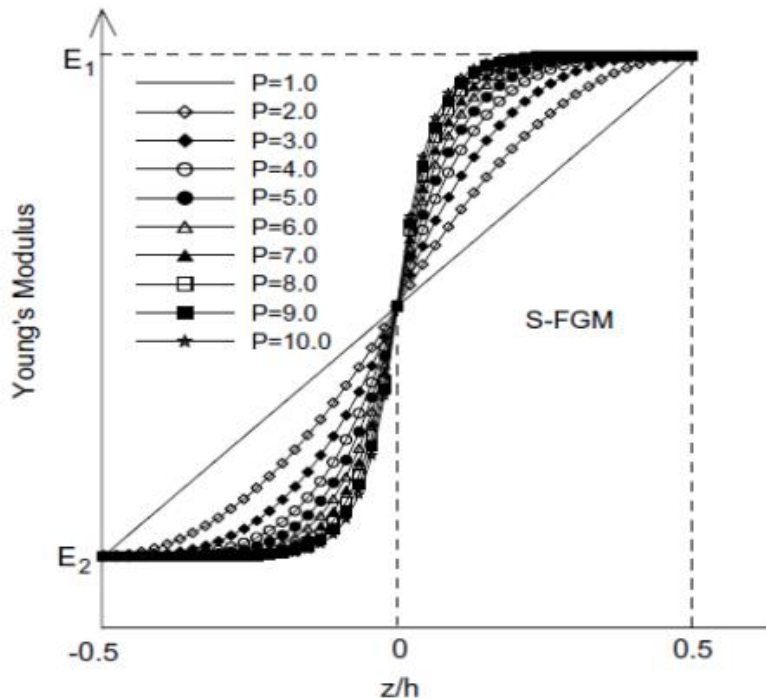


Figure III.4 : Variation de la fraction volumique dans une plaque "S-FGM"

III.3.3. Les propriétés matérielles de la poutre E-FGM

Pour décrire les propriétés matérielles des matériaux FGM, les chercheurs utilisent une fonction exponentielle « E-FGM ». En effet, cette fonction est impliquée dans le présent car les propriétés du matériau changent dans l'épaisseur selon une distribution exponentielle.

Elle s'écrit de la forme suivante :

$$E(z) = E_2 e^{\beta(z+h/2)} \quad (\text{III.3.5})$$

Avec :

$$\beta = \frac{1}{h} \ln \frac{E_1}{E_2}$$

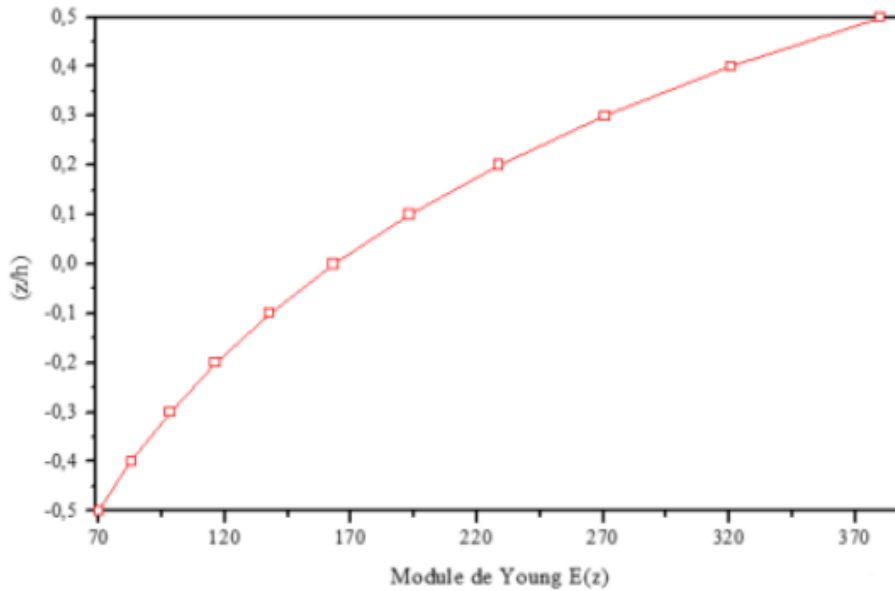


Figure III. 5 : Variation de la fraction volumique dans une plaque "E-FGM"

III.4. Homogénéisation des sections (Approche FGM)

III.4.1. Principe

Le principe d'homogénéisation de la section composite est établi, comme l'illustre le schéma qui suit. Celui-ci repose sur trois principales étapes :

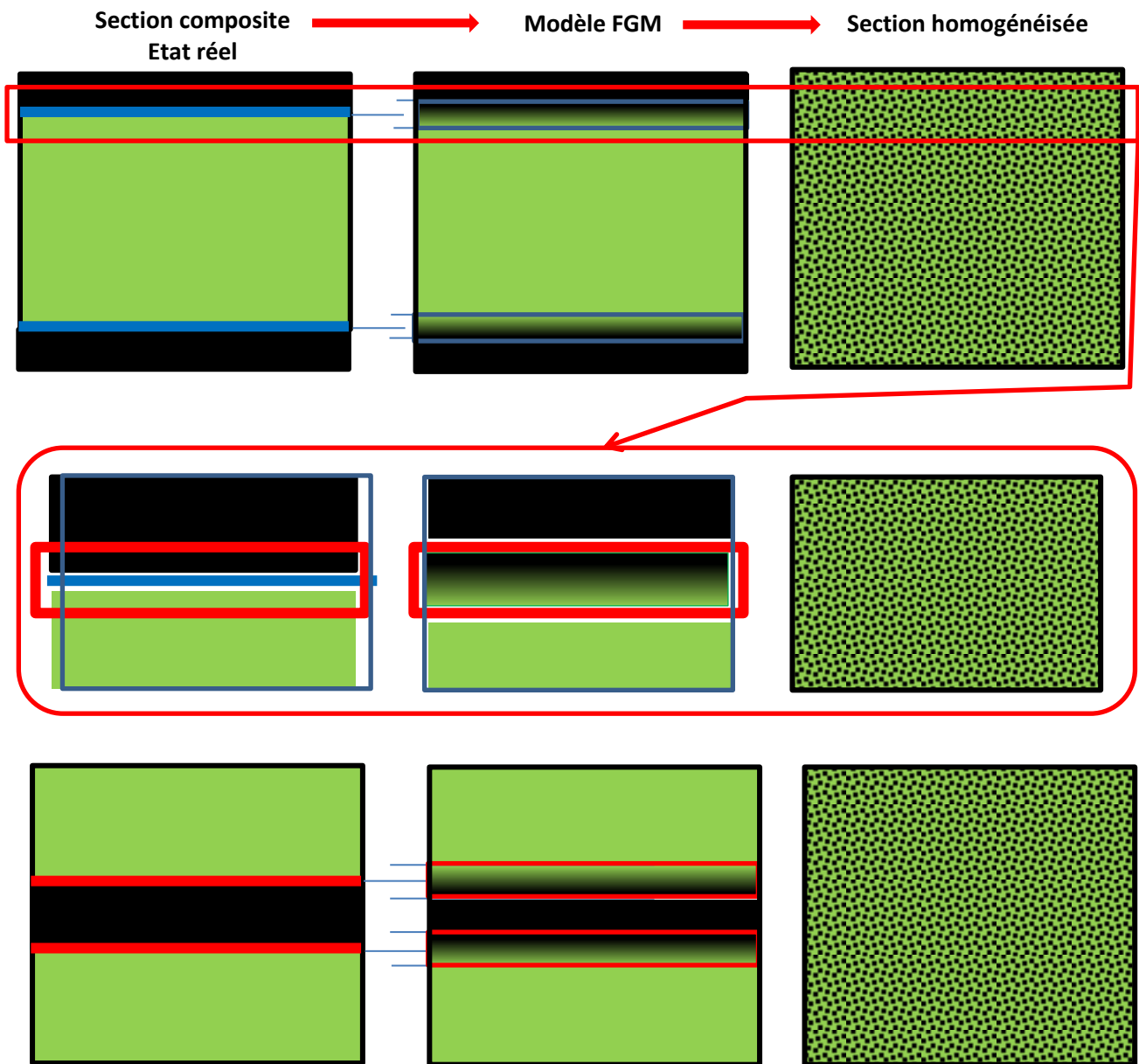


Figure III.6 : Etape d'homogénéisation de la section de la poutre renforcée

Etape 01 : Section composite Etat réel

A ce niveau, la section de la poutre est dans son état réel initial, décrite par les caractéristiques mécaniques et géométriques des constituants de la section composite sont E_i ; ν_i ; h_i ; E_j ; ν_j ; h_j .

Etape 02 : Modèle FGM

On considère une section de poutre FGM de hauteur ayant les caractéristiques suivantes :

- Hauteur : $h_{FGM} = 2. \alpha. \min(h_i; h_j)$.
- Axe de la poutre FGM confondu avec la ligne de l'interface entre les deux matériaux.
- Raideur de l'interface représentée par un facteur $k = 2. \alpha$ où :

$\alpha = 0$ S'il n'y a pas de liaison entre les deux composites ($k = 0$).

$\alpha = 0.5$ S'il y a une liaison parfaite entre les deux composites ($k = 1$).

- Les grandeurs mécaniques sont E_i et ν_i sur une face et E_j et ν_j sur l'autre face.
- Variation propriétés mécaniques selon une fonction exponentielle sur la hauteur de la section FGM et constantes sur les autres parties des sections restantes des différents composites.

La fonction exponentielle utilisée pour ce modèle est celle la plus utilisée et celle la plus adaptée pour les problèmes de génie civil. Celle-ci s'écrit :

$$E(z) = E_j e^{B(z + h_{FGM}/2)} \quad \text{Avec} \quad B = \ln\left(\frac{E_i}{E_j}\right)$$

Etape 03 : Section homogénéisée

Intégration de ces fonctions sur leurs domaines respectifs et calcul des caractéristiques homogénéisées des grandeurs mécaniques.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, 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.

Chapitre IV :
Description du logiciel CSB
et son utilisation pour le
cas des poutres stratifiées

IV.1. Introduction à CSB

IV.1.1. Présentation

Le logiciel CSB (Cross Section & Beam analysis) est une suite de logiciels qui permet le calcul de poutres à sections uniformes ou hétérogènes. Conçu et développé par le Professeur Rached El Fatmi de l'École Nationale des Ingénieurs de Tunis, CSB s'adresse à l'ingénieur; il forme un ensemble de deux outils numériques complémentaires CSection et CBeam, qui pour le problème des poutres sont structurés comme suit :

- CSection calcule les propriétés d'une pièce droite en tenant compte de sa forme et du matériau qui la compose ;
- CBeam utilise ces caractéristiques de section pour garantir les propriétés de la poutre :
 - ✓ en statique : sous chargement mécanique ou thermique, pour fournir les sollicitations, la déformée, ...etc;
 - ✓ en dynamique : calcul des premières fréquences et des modes associés;
 - ✓ en stabilité : calcul du facteur d'amplification critique et caractérisation du mode de bifurcation associé.

Les poutres traitées par CSB sont supposées droites et ont une section uniforme. Toutefois, cette pièce peut être de n'importe quelle forme et de n'importe quel matériau. La forme peut ainsi être pleine ou cloisonnée, mince ou épaisse, ouverte ou fermée, symétrique ou non. Pour les matériaux aux propriétés isotropes ou anisotropes, ils peuvent être disposés librement dans la section transversale.

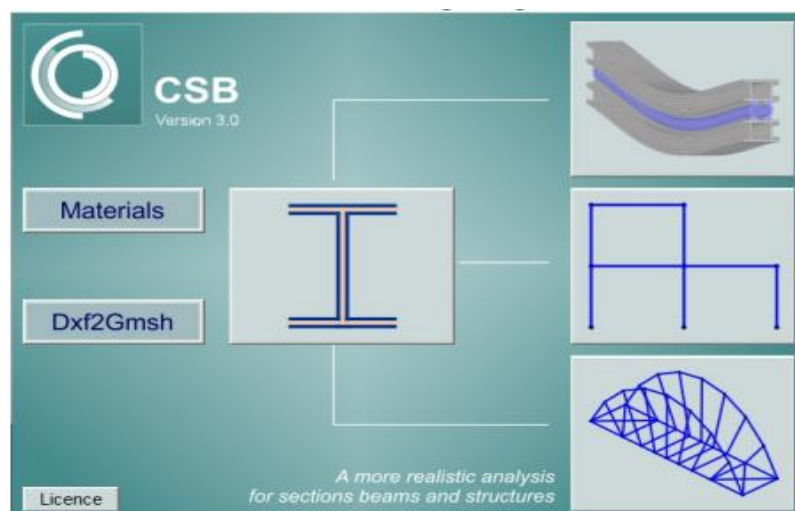


Figure IV.1 : Fenêtre principale de CSB

IV.1.2. Bibliographie résumée de Rached El Fatmi sur la théorie des poutres composites

– Thermo-mechanical analysis of composite beams,

2017, M. Lahmar, F. Naccache, R. E.L. Fatmi.

– « A refined 1D beam theory built on 3D Saint-Venant's

Solution to compute homogeneous and composite beams »,

2016, Journal of Mechanics of Materials and Structures,

R. El Fatmi.

– « A novel tool for composite beam computations », 2013, JEC Composites Magazine, R. El Fatmi.



Prof. El Fatmi

IV.2. L'utilitaire Matériels

CSB propose, par défaut, des listes de matériaux. Matériels est un utilitaire permettant à l'utilisateur de consulter ou de modifier les listes de matériaux proposées par défaut ou de créer (et sauvegarder) de nouvelles listes de matériaux.

Trois types de matériaux peuvent être déclarés :

– isotrope

– isotrope transverse

– orthotrope

Même si une liste de matériaux peut contenir tous les types, il est recommandé de créer des listes par type de matériau. Chaque matériau est défini par son nom, sa masse volumique, ses constantes élastiques, ses constantes thermiques ou thermomécaniques, et les constantes relatives à son seuil élastique. Dans la déclaration d'un matériau, ne sont obligatoire que la masse volumique et les constantes élastiques. Avant de donner le mode d'emploi de Matériels, on précisera les constantes qu'il faut définir pour chaque type de matériau (les unités sont imposées).

IV.2.1. Les différents types de matériaux

IV.2.1.1. Matériau isotrope

Un matériau isotrope est défini par :

ρ la masse volumique (kg/m^3)

E le module de Young (MPa)

ν le coefficient de Poisson

λ la conduction thermique (1010^{-5}°C)

α la constante de dilatation élastique ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)

σ^e la limite élastique (MPa)

IV.2.1.2. Matériau orthotrope

Un matériau orthotrope est défini par :

– 9 constantes élastiques

E_{XX} E_{YY} E_{ZZ} Les modules de Young

ν_{XY} ν_{XZ} ν_{YZ} Les coefficients de Poisson

G_{XY} G_{XZ} G_{YZ} Les modules de cisaillements

Où (X, Y, Z) sont relatifs aux directions des axes matériels. Ces 9 constantes sont celles qui apparaissent dans le triangle inférieur de la matrice de souplesse du matériau (Loi de Hooke) qui exprime les déformations en fonctions des contraintes :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ 2\varepsilon_{yz} \\ 2\varepsilon_{xz} \\ 2\varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{XX}} & \frac{\nu_{YX}}{E_{YY}} & \frac{\nu_{ZX}}{E_{ZZ}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{XY}}{E_{XX}} & \frac{1}{E_{YY}} & \frac{\nu_{ZY}}{E_{ZZ}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{XZ}}{E_{XX}} & \frac{\nu_{YZ}}{E_{YY}} & \frac{1}{E_{ZZ}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{YZ}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{XZ}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{XY}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}$$

– 6 constantes thermomécaniques

$\lambda_X, \lambda_Y, \lambda_Z$, Les conductions thermiques

$\alpha_X, \alpha_Y, \alpha_Z$, Les constantes de dilatation thermique

– 6 constants seuils relatifs au critère de Tsai-Hill

$\sigma^e_X, \sigma^e_Y, \sigma^e_Z$, Les contraintes normales limitent

$\tau^e_{XY}, \tau^e_{XZ}, \tau^e_{YZ}$, Les cisaillements limitent

Les unités pour chaque type de constante sont celles précisées pour le cas isotrope.

IV.2.1.3. Matériau isotrope transverse

Un matériau isotrope transverse est défini par :

– 5 constantes élastiques

E_L, E_T Les modules de Young

ν_{LT} Le coefficient de Poisson

G_{LT}, G_{TT} , Les modules de cisaillement

Ces constantes correspondent au cas particulier orthotrope pour lequel X correspond à la direction longitudinale L, et où les directions transverses (Y, Z) sont équivalentes.

– 4 constantes thermomécaniques

λ_L, λ_T , Les conductions thermiques

α_L, α_T , Les constantes de dilatation thermiques

– 6 constants seuils relatifs au critère de Tsai-Hill

σ^e_L, σ^e_T , Les contraintes normales limitent

τ^e_L, τ^e_T , Les cisaillements limitent

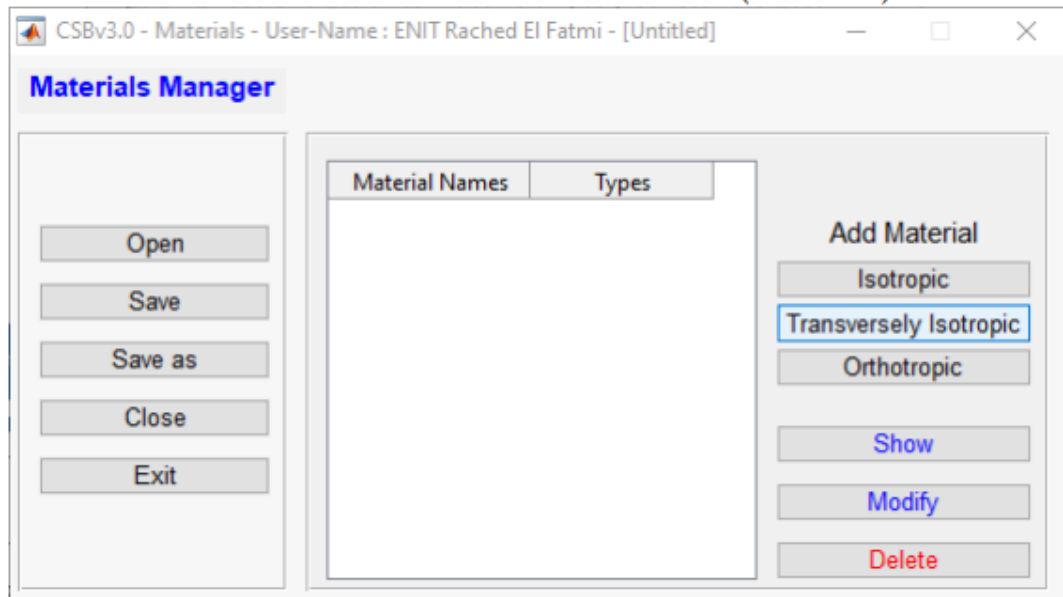


Figure IV.2 : Interface de Matériels (liste vide)

IV.3. Utilisation résumée de CSection

Le module CSection assure le calcul exact des Caractéristiques Mécaniques d'une Section (CMS) homogène ou composite quelconque (figure IV.3)

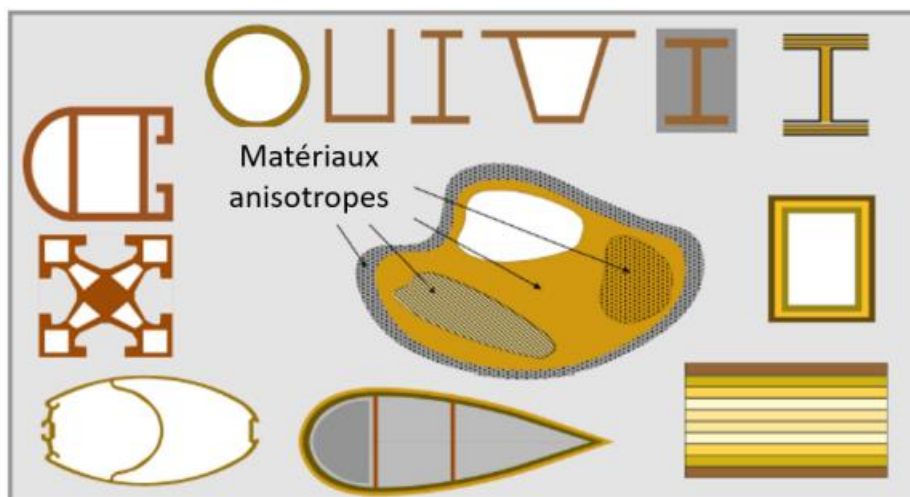
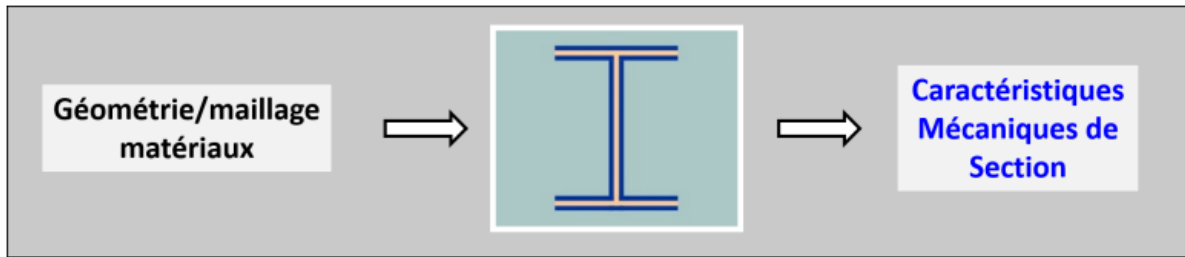


Figure IV.3 : Sections homogènes ou composites

Ce calcul est effectué par éléments finis (EF-2D) sur la section, de manière systématique, à partir des données de section qui se résument à sa géométrie et aux matériaux qui la constituent.



IV.3.1. Fonctionnalités

Selon l'approche « ingénieur » de la théorie des poutres, CSection établit la relation linéaire entre les 6 contraintes généralisées et les déformations associées :

$$[S] = [[K]] \cdot [\varepsilon]$$

La matrice de comportement $[[K]]$ est exprimée dans le système d'axes naturel de l'utilisateur qui peut différer du système d'axes principaux. C'est une des raisons pour lesquelles la matrice 6×6 est « complète » (non-diagonale).

Une des fonctions de CSection est ainsi la détermination de la matrice de comportement qui peut ensuite être traduite en termes de caractéristiques :

- aire de section droite,
- inerties quadratiques,
- sections réduites,
- inertie de torsion.

CSection permet également la position des points de pièce singuliers :

- centre d'inertie,
- centre de torsion,
- orientation des axes d'inertie.

Des contraintes génériques sont introduites, CSection peut également être définie :

- le champ des contraintes normales et de cisaillement,
- les variations dimensionnelles dues à l'effet Poisson,

– les effets de gauchissement.

IV.3.2. Étapes de calcul

1. Déterminer la géométrie d'une pièce. Pour cela nous utilisons l'outil de maillage externe Gmsh. Il suffit d'écrire un script descripteur et de le sauvegarder pour générer un maillage composé d'éléments triangulaires ;
2. Définir le matériau à l'aide du module CMaterial sauf s'il est déjà inclus dans le catalogue fourni avec le logiciel ;
3. Importez le maillage dans CSection en utilisant la commande « Import mesh » du menu CS File et définit un bloc constitué d'un seul sous-domaine partiellement uniforme ;
4. Sélectionner le matériau de son choix dans la bibliothèque par la commande « open matériels data » puis « select matériel » et l'associer au sous-domaine ;
5. CSB offre la possibilité de définir des « charges de déformation » pour observer l'influence du mode de force appliqué agissant sur un profil mince.
6. Enregistrer les données ainsi créées par la commande « Save » du menu CSFile;
7. Enfin, "résoudre" la section de manière simple pour obtenir toutes les propriétés mécaniques de la section.

IV.3.3. Adaptation des conventions et notations

CSB est basé sur la convention nord-américaine de l'Axe Structural ;

convention CSB
$+ \vec{z}$
$+ \vec{y}$
$- \vec{x}$

IV.3.4. CBeam

A partir d'une section droite créée par Gmsh et par CSection, CBeam permet de créer une poutre extrudée droite. Nous pouvons alors charger la poutre dans des directions ponctuelles et/ou superficielles en spécifiant les régions du contour exposées à la force. Bien entendu, les conditions de support peuvent être entièrement configurées.

CBeam permet les calculs de la poutre (solllicitations, déplacements, déformations et contraintes) selon deux modèles :

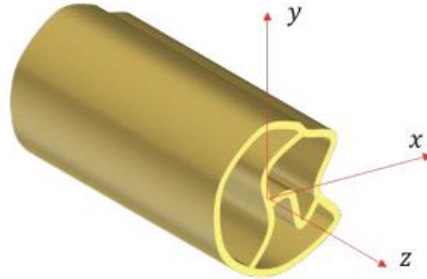


Figure IV.4 : Système d'axes

1. SVBT : modèle de Saint-Venant natif;
2. RBT : modèle « Refined Beam Theory ». Ce dernier élargit le champ des possibles et des résultats grâce à la prise en compte de modes cinématiques riches dépendants de la forme de la section. Par conséquent, nous pouvons supprimer les déformations horizontales dues à Poisson et même la déformation des blocs. Les contraintes de terrain au niveau du support sont bien plus pratiques. Qui plus est, on récupère également les composantes de contraintes hors plan de section droite σ_{yy} σ_{zz} σ_{yz} que gomme la théorie native.

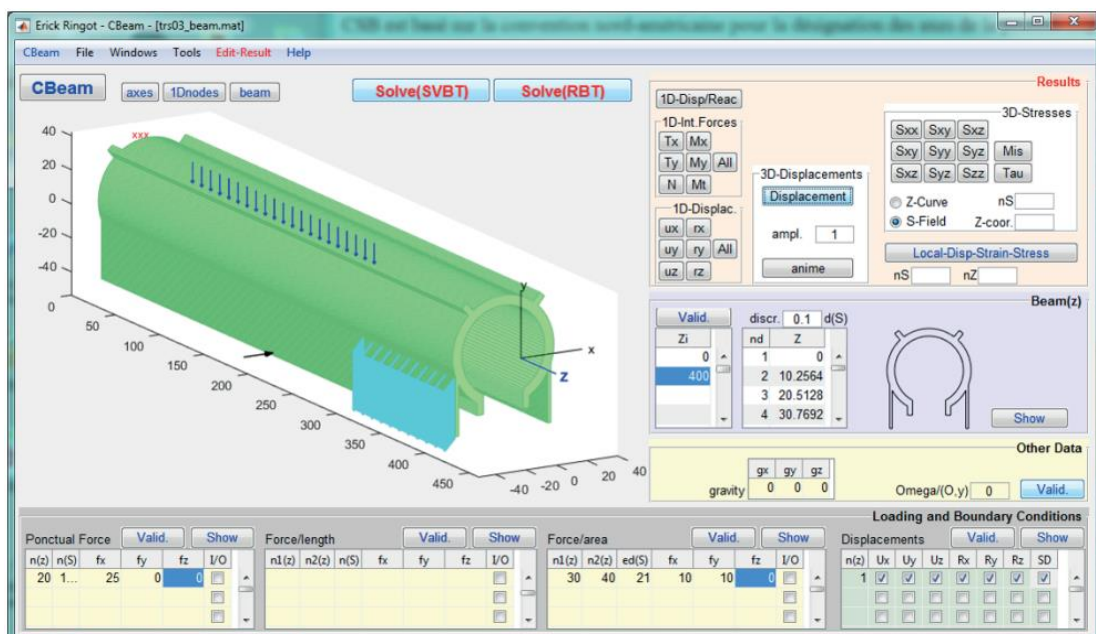


Figure IV.5 : Page de saisie du module CBeam illustrant la possibilité de charger la surface d'une poutre par des forces ponctuelles, linéiques ou surfaciques

IV.4. Le module Plane Structure

Plane Structure assure le calcul par EF-1D de structures planes constituées d'un assemblage de poutres droites. Les calculs de structure sont menés conformément à la théorie classique 1 des poutres (Annexe-A) réduite au cas plan. Ce module propose des analyses d'équilibre, de vibration et de flambement; une originalité de Plane Structure est de fournir aussi le calcul automatique de la longueur de flambement d'un élément quelconque de la structure.

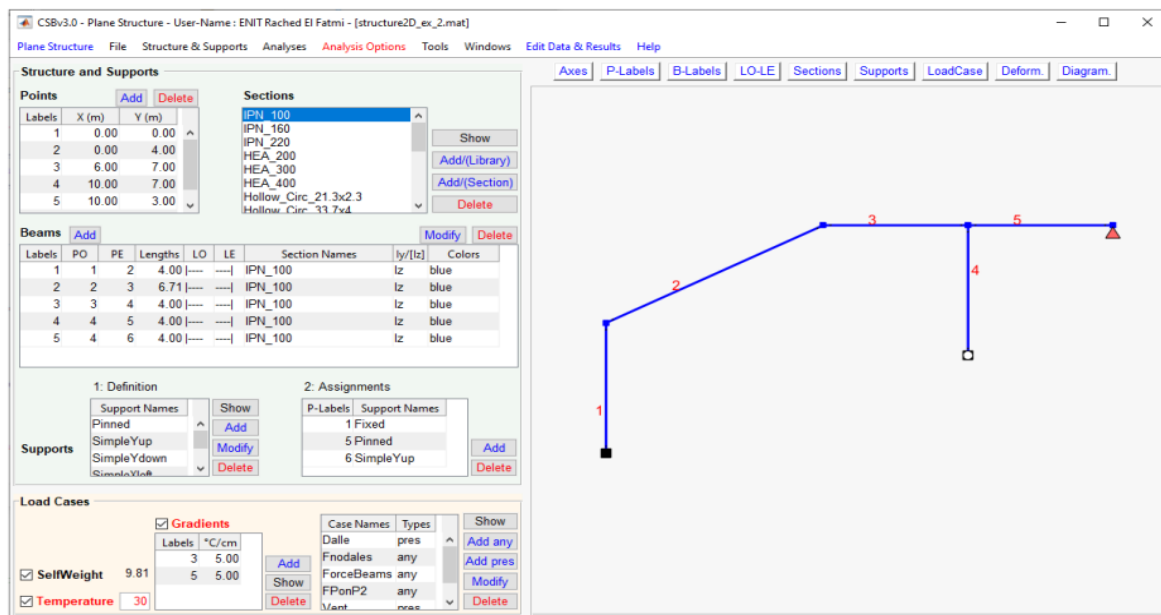


Figure IV.6 : L'interface de Plane Structure : Structure et chargements

IV.4.1. L'utilisation de Plane Structure

L'interface de Plane Structure comporte (figure IV.6) : comme toute application, une barre de menu en haut de sa fenêtre. Le reste de la fenêtre offre :

– à droite, principalement sur l'espace d'affichage

– à gauche, deux zones :

- celle du bas, intitulée Load Cases, est dédié aux déclarations des chargements ;
- celle du haut, est dédiée à des affichages différents selon que l'on clique sur Structure & Supports ou sur Analyses de la barre des menus. Structure & Supports conduit à l'affichage (figure-6) du cadre intitulé Structure & Supports dédié aux données qui définissent la

structure et ses appuis. Analyses conduit à l’affichage (figure IV.7) d’un cadre au-dessus du quel apparaissent 3 onglets : correspondant aux 3 types d’analyse :

- Equilibrium, pour lancer les calculs d’équilibre et visualiser les résultats
 - Vibration, pour lancer des calculs de vibration et visualiser les résultats
 - Buckling, pour lancer des calculs de flambement et visualiser les résultats
- Les onglets Vibration et Buckling n’apparaissent que s’ils ont été sélectionnés dans le menu **Analysis Options** de la barre des menus.

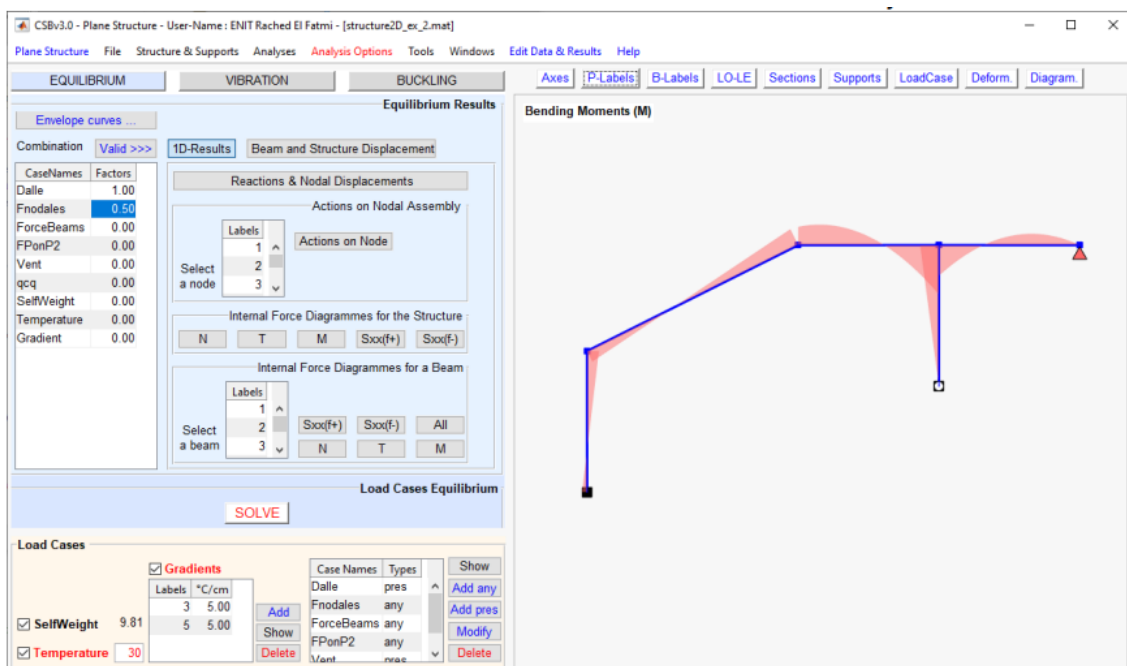


Figure IV.7 : Interface de Plane Structure : Analyses

IV.5. Le module Spatial Beam

Spatial Beam traite une poutre droite de section constante sur plusieurs appuis soumis à des chargements quelconques de type mécanique ou variation de température. La section, qui est supposée préalablement calculée avec le module de calcul de section CSection, peut être de forme quelconque et constituée de plusieurs matériaux (isotropes ou anisotropes) librement agencés.

Qu’il s’agisse de calculs d’équilibre, de vibration ou de flambement, deux méthodes de calcul sont proposées :

- selon la méthode classique désignée par CBT (Classical Beam Theory) ;
- selon une méthode avancée, désignée par RBT (Refined Beam Theory), dont l'essentiel est présenté dans l'Annexe-B

Il est à ce propos, recommandé de parcourir les Annexes-A-B, pour une utilisation cohérente de Spatial Beam.

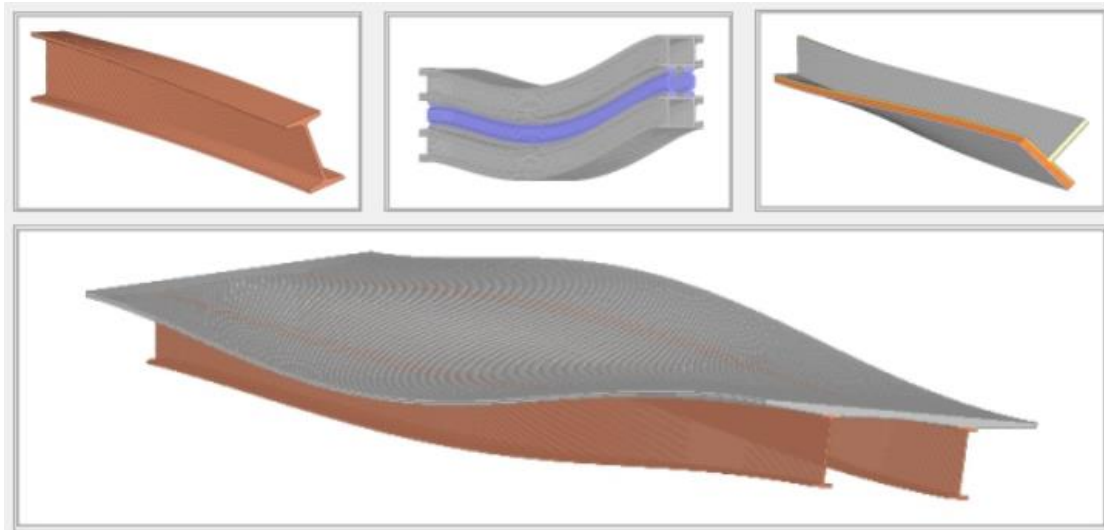


Figure IV.8 : Déformées 3D

Mis à part le caractère quelconque de la section (homogène ou hétérogène) et le fait que la poutre est dans l'espace, qu'y a-t-il de particulier dans ce module ?

- si le calcul est mené selon CBT, ce module est en mesure de fournir à l'équilibre, au-delà de la solution 1D (en termes d'efforts intérieurs et de mouvement), la solution 3D intérieure (loin des bords) en termes de mouvement et surtout en termes de contraintes dans chacun des matériaux de la section.
- si le calcul est effectué selon RBT, cela permet également de signaler :
 - de la localisation précise du chargement 3D sur la poutre
 - de la distribution réelle du champ de température pour des conditions quelconques (conduction et convection) imposées le long de la poutre
 - des effets de bords dus aux conditions d'extrémité (par exemple l'effet d'une déformation gênée au droit d'un encastrement, ou bien les effets de la présence d'un diaphragme dans une poutre en caisson).

Enfin, au niveau visuel, la déformée d'une poutre est proposée en 3D, qu'il s'agisse d'équilibre, de mode de vibration ou de mode de flambement, ce qui apporte un effet réaliste aux simulations effectuées par Spatial Beam.

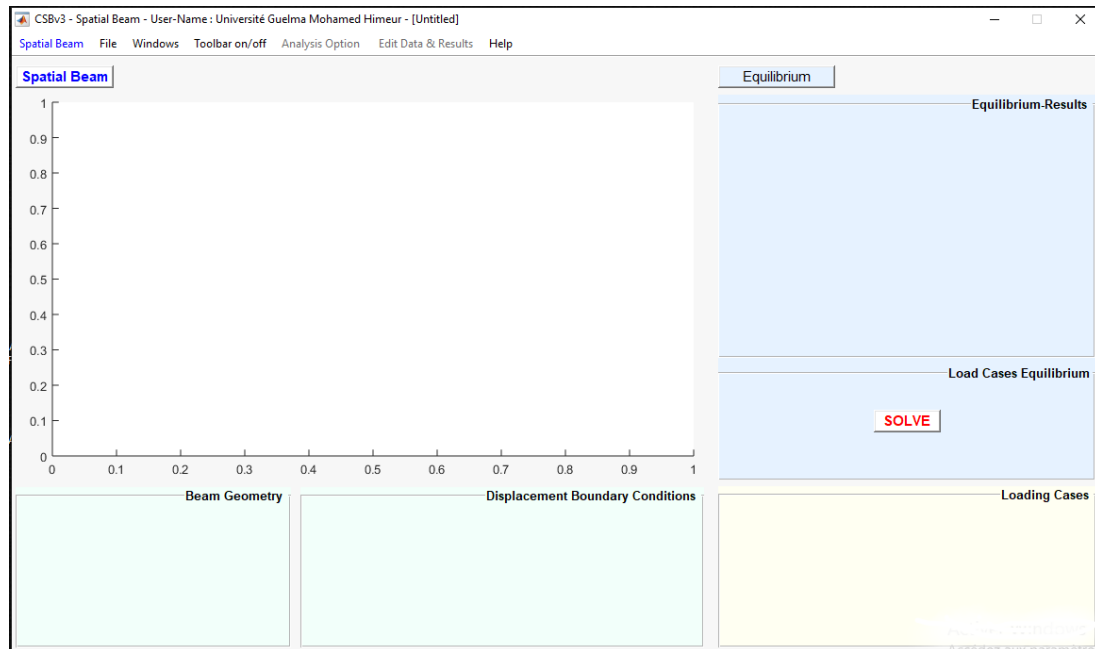


Figure IV.9 : La fenêtre principale de Spatial Beam

IV.6. Le module Spatial Structure

Spatial Structure assure le calcul par éléments finis (1D) de structures dans l'espace constituées d'un assemblage de poutres droites de section quelconque homogène ou hétérogène.

Ce module propose des analyses d'équilibre, de vibration et de flambement; une originalité de Spatial Structure est de proposer le calcul systématique des deux longueurs de flambement d'un élément quelconque de la structure.

Par ailleurs, quel que soit le type d'analyse effectué, deux méthodes de calcul sont proposées :

- selon la méthode classique, désignée par CBT (Classical Beam Theory), et conformément à la présentation qui en est faite dans l'Annexe-A;
- selon une méthode avancée, désignée par RBT (Refined Beam Theory) qui va au-delà de la méthode classique pour rendre compte des conditions d'extrémités (telle que par exemple un

gauchissement gêné au droit d'un encastrement), et conformément à la présentation qui en est faite dans l'Annexe-B.

Les chargements mécaniques sont quelconques, mais déclarées sur la ligne moyenne de la poutre. La prise en compte du poids propre est automatique et il est possible d'imposer une variation de température globale pour la structure. Les chargements sont déclarés par cas de charge, et deux cas de charge sont proposés par défaut : le poids propre et la variation globale de température.

Avant tout calcul, Spatial Structure vérifie si la structure inclut un mécanisme (local ou global). Si un ou plusieurs mécanismes sont détectés, l'utilisateur est averti et il est possible de visualiser (animation) le ou les mécanismes afin qu'il puisse corriger la structure.

IV.6.1. L'utilisation de Spatial Structure

L'utilisation de ce module est similaire à celle du module Plane Structure sauf que :

- la structure est dans l'espace
- les sections des poutres peuvent être hétérogènes
- les calculs peuvent être menés selon deux méthodes : CBT ou RBT

L'interface de ce module est identique à celle du module Plane Structure avec :

- une zone graphique à droite,
- un cadre en bas à gauche pour la déclaration des cas de charge,
- un cadre en haut à gauche dédié
 - soit à la déclaration de la structure et des appuis,
 - soit aux analyses (d'équilibre de vibration ou de flambement) selon que Structure & Supports ou bien Analyses est sollicité dans la barre des menus.

IV.7. CSB pour une nouvelle vision des poutres

Les hypothèses communément consenties par les théories classiques des poutres (Timoshenko, Bernoulli, RDM) conduisent à pratiquement « assimiler » une poutre à un milieu unidimensionnel (1D). Cette vision très réductrice a l'avantage d'être simple mais

insuffisante pour décrire le caractère spatial (3D) du comportement mécanique réel d'un profilé mince ou d'une poutre composite à phases anisotropes.

Pourtant, l'utilisation des profilés minces est de rigueur dans biens des secteurs et le recours aux matériaux composites ne cesse de gagner du terrain. Il est aujourd'hui temps que l'enseignement accorde la place qu'il faut à l'analyse de telles structures, même si la tâche est plus délicate. CSB peut efficacement y contribuer parce qu'il permet une analyse quasi-3D pour les poutres.

IV.8. CSB pour l'analyse des sections minces

Pour des raisons évidentes d'économie et de poids, le recours aux profilés minces est de rigueur dans tous les domaines de la construction (construction métallique, menuiserie aluminium, plasturgie, ...). L'analyse précise du comportement mécanique des pièces uniques, qu'elles soient ouvertes ou fermées, épaisses ou fines, est au cœur de la conception et de l'optimisation des profilés. Le module de calcul des sections CSB peut effectuer cette tâche efficacement, car il permet, quelles que soient la forme et l'épaisseur du profil. D'obtenir ou de visualiser:

- la répartition des cisaillements et les gauchissements de la section qui sont dus aux efforts tranchants et au moment de torsion ;
- l'effet de la non symétrie de la section sur le couplage flexion-torsion du profilé, ou sur la position du centre de cisaillement ;
- les rigidités associées aux efforts tranchants et la notion de section réduite ;
- la rigidité de torsion, et la constante de gauchissement pour la torsion gênée ;

Ces résultats, obtenus rapidement et systématiquement, constituent une véritable aide à l'exposé de la compréhension de ces points, et conduisent à une réelle compréhension de l'état mécanique des sections minces et des profilés.

IV.9. CSB pour l'introduction de la Mécanique des composite

L'utilisation de matériaux de comportement et de résistance différents est à la base de la conception composite. L'agencement des matériaux et leur éventuelle anisotropie ont une influence importante sur le comportement mécanique d'une pièce composite et en particulier

sur la distribution des contraintes entre les matériaux. Il est donc essentiel, lors du calcul d'une pièce composite, d'être en mesure d'accéder à l'état (3D) de contraintes dans chacun des matériaux.

Parce que CSB permet d'obtenir de tels résultats pour des poutres de n'importe quelle section composite, il peut contribuer à la présentation et à la compréhension de la mécanique des composites dont l'exposé est, pour le moins, délicat.

IV.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le logiciel CSB, ensuite en résumant les différents modules à effectuer pour créer nos modèles, il nous a permis de stimuler le comportement mécanique de la poutre en FGM, et aussi l'utilisation de logiciel pour le cas des poutres stratifiées.

Chapitre V : Validation de l'approche pour le cas d'une poutre stratifiée

V.1. Introduction

La simulation et l'analyse numériques sont très utiles pour étudier le comportement mécanique complexe, Ceci est presque obligatoire dans le domaine de la recherche, où les résultats donnés par les nombres de simulation doivent toujours être comparés à ceux donnés par des calculs manuels.

Dans ce chapitre, nous allons proposer un modèle numérique d'une poutre en béton sous chargement mécanique, et ensuite nous allons faire un renforcement par une plaque métallique sur la face tendue.

V.2. Présentation de la structure utilisée

Il s'agit d'une poutre d'élanement $L/B=100$ (Figure V.1). Etudiée dans le cas des contraintes planes.

Les caractéristiques mécaniques adoptées sont :

$$E = 30000 \text{ MPA} ; \nu = 0,20.$$

La poutre est encastree à une extrémité et est sollicitée à l'autre extrémité libre de la console, par une charge $P = 10 \text{ KN}$.

Le déplacement V à l'extrémité (au point de coordonnée $x=100$; $y=0$) est, selon la théorie des poutres:

$$V = \frac{PL^3}{3EI} + \frac{6PL}{5GA} \quad \text{Avec: } G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

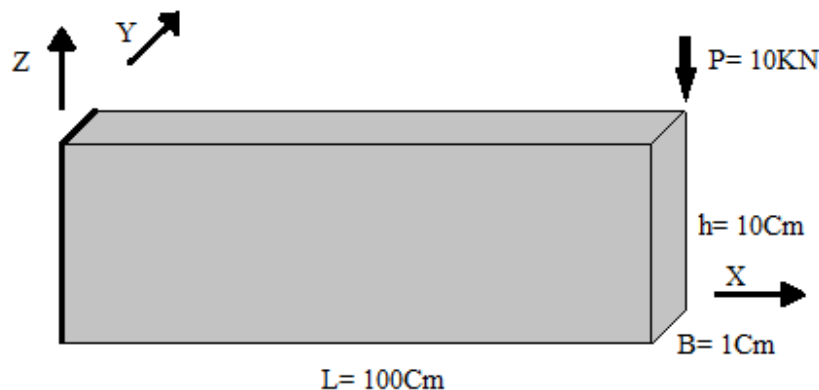


Figure V.1 : Poutre console

V.3. Modélisation utilisée

L'étude de cette structure est effectuée selon deux principaux modèles :

- L'approche du CSB qui est une approche de calcul des structures linéiques (Poutres, Treillis plans, Treillis en 03 dimensions) entrepris par un calcul préalable des sections homogènes, composite et de géométrie quelconque.
- L'approche par éléments finis utilisant un élément fini développé par Docteur Himeur

Par ailleurs, la modélisation des interfaces entre les couches composites (Section en béton renforcée par une couche d'acier (Figure V.2)), est établie selon deux cas de figure :

- Homogénéisation de la section composite en une section homogène équivalente (Caractéristiques mécaniques homogènes équivalentes) par l'utilisation de l'approche « FGM », en considérant plusieurs rigidités des liaisons entre les couches.
- Utilisation du module « Section » du logiciel CSB pour le calcul des caractéristiques mécaniques et géométriques des différentes sections simulées (composite et homogénéisées).

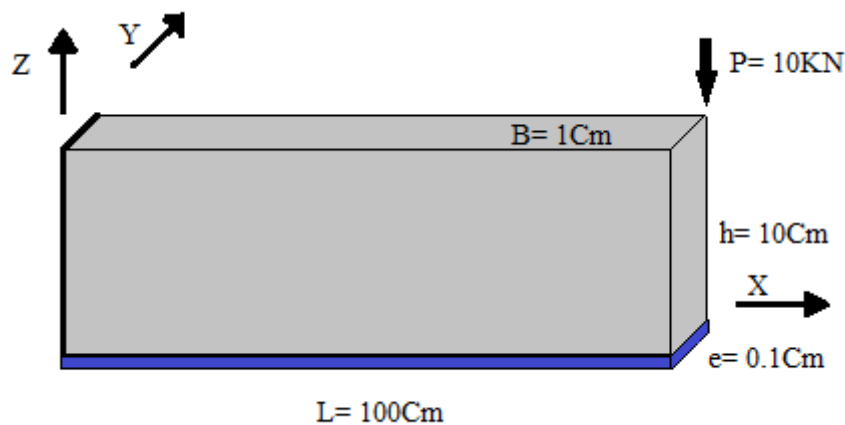


Figure V.2 : Poutre console renforcé par une plaque métallique

- **Caractéristiques de la section composite**

$$E_b = 30000 \text{ MPA} ; \quad \nu = 0.2$$

$$E_c = 210000 \text{ MPA} ; \quad \nu = 0.3$$

Ces modèles ont pour objectifs :

- De vérifier les résultats obtenus par les différents modèles aux solutions théoriques respectives, en considérant le déplacement de l'extrémité libre de la poutre console et les contraintes normale et cisaillement au niveau de la section la plus sollicitée de la poutre (extrémité encastree) comme critères de validation.
- La comparaison des résultats obtenus par les différents modèles.
- La validation du modèle de notre étude concernant « l'homogénéisation des sections composites par l'utilisation de l'approche FGM ».

V.4. Homogénéisation des sections (Approche FGM)

V.4.1. Principe

Le principe d'homogénéisation de la section de la poutre renforcée est établi, comme l'illustre le schéma qui suit, repose sur trois principales étapes :

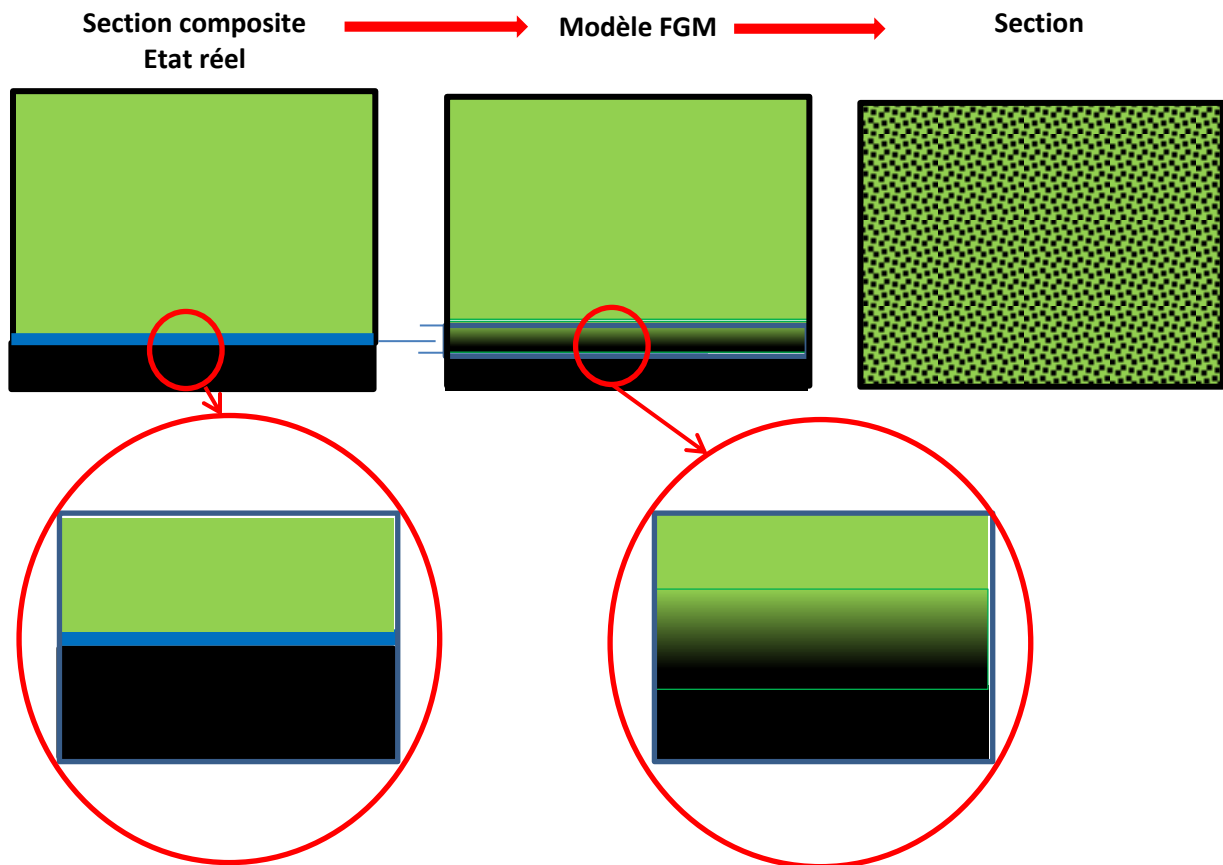


Figure V.3 : principe d'homogénéisation de la section

Etape 01 : Section composite Etat réel

A ce niveau, la section de la poutre est dans son état réel initial, décrite par les caractéristiques mécaniques et géométriques des deux constituants de la section composite :

$$E_b = 30000 \text{ MPA} ; \quad \nu_b = 0.2 ; \quad \text{hauteur } h_b = 9.9 \text{ cm}$$

$$E_c = 210000 \text{ MPA} ; \quad \nu_c = 0.3 ; \quad \text{hauteur } h_c = 0.1 \text{ cm}$$

Etape 02 : Modèle FGM

On considère une section de poutre FGM de hauteur ayant les caractéristiques suivantes :

- Hauteur : $h_{FGM} = 2 \cdot \alpha \cdot \min(h_b; h_c)$.
- Axe de la poutre FGM confondu avec la ligne de l'interface entre les deux matériaux.
- Raideur de l'interface représentée par un facteur $k = 2 \cdot \alpha$ où :

$$\alpha = 0 \text{ S'il n'y a pas de liaison entre les deux composites } (k = 0).$$

$$\alpha = 0.5 \text{ S'il y a une liaison parfaite entre les deux composites } (k = 1).$$

- Les grandeurs mécaniques sont E_b et ν_b sur une face et E_c et ν_c sur l'autre face.
- Variation des propriétés mécaniques selon une fonction exponentielle sur la hauteur de la section FGM et constantes sur les autres parties des sections restantes des différents composites.

La fonction exponentielle utilisée pour ce modèle est celle la plus utilisée et celle la plus adaptée pour les problèmes de génie civil. Celle-ci s'écrit :

$$E(z) = E_c e^{B(z+h/2)} \quad \text{Avec} \quad B = \ln\left(\frac{E_b}{E_c}\right)$$

Etape 03 : Section homogénéisée

Intégration de ces fonctions sur leurs domaines respectifs et calcul des caractéristiques homogénéisées des grandeurs mécaniques.

V.4.2. Sections homogénéisées

Dans la présente étude, six (06) sections homogénéisées ont été développées selon l'intensité de la raideur de l'interface entre le béton et le renfort en acier allant de la liaison libre à la liaison parfaite :

Tableau V.1 : Type de sections homogénéisées

Raideur de l'interface k	Liaison	
	Niveau	Etat
0	00%	de liaison libre
0,2	20%	Intermédiaire
0,4	40%	
0,6	60%	
0,8	80%	
1	100%	Liaison parfaite

L'utilisation d'un programme de calcul basé sur cette approche et écrit en langage Fortran (Source Docteur M. Himeur) a donné pour ;

$$E_b = 30000 \text{ MPA} ; \quad v_b = 0.2 ; \quad \text{hauteur } h_c = 9.9 \text{ cm}$$

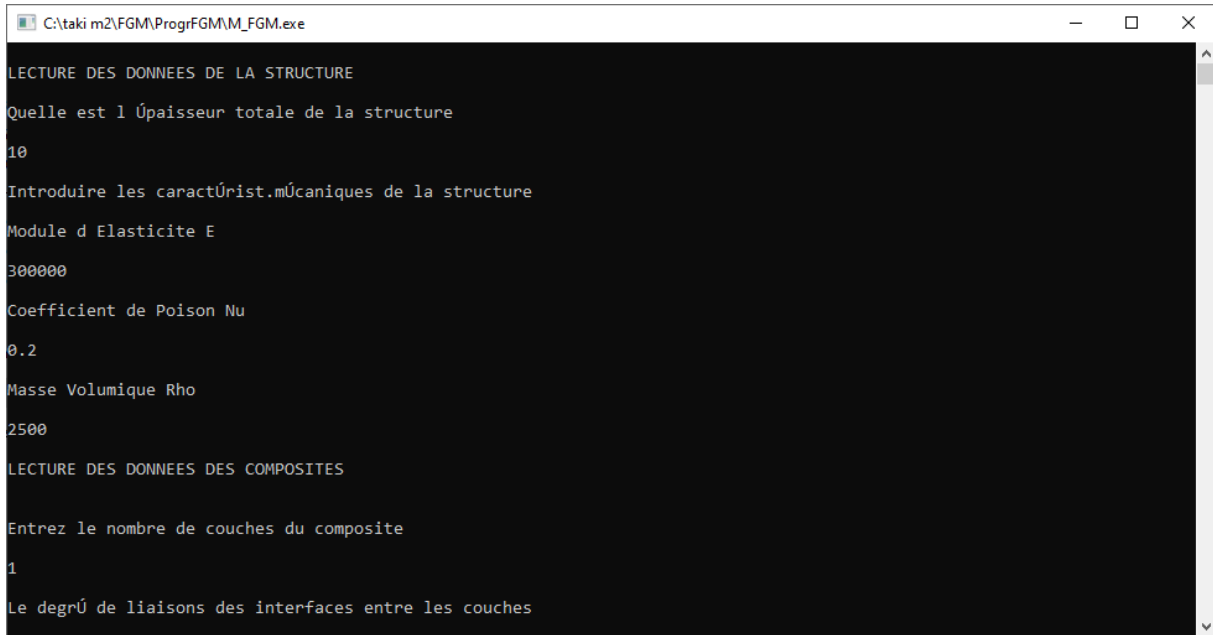
$$E_c = 210000 \text{ MPA} ; \quad v_c = 0.3 ; \quad \text{hauteur } h_c = 0.1 \text{ cm}$$

Les résultats suivants :

Tableau V.2 : Les caractéristiques mécaniques spécifiques des sections homogénéisées

Dénomination de la section homogénéisée	Niveau de la liaison	$E_{HOMOGENEISE}$	$v_{HOMOGENEISE}$
SH0	00%	30000	0.2000
SH1	20%	32855.03	0.20235
SH2	40%	33910.05	0.20370
SH3	60%	34965.07	0.20505
SH4	80%	36020.09	0.20640
SH5	100%	37075.12	0.20770

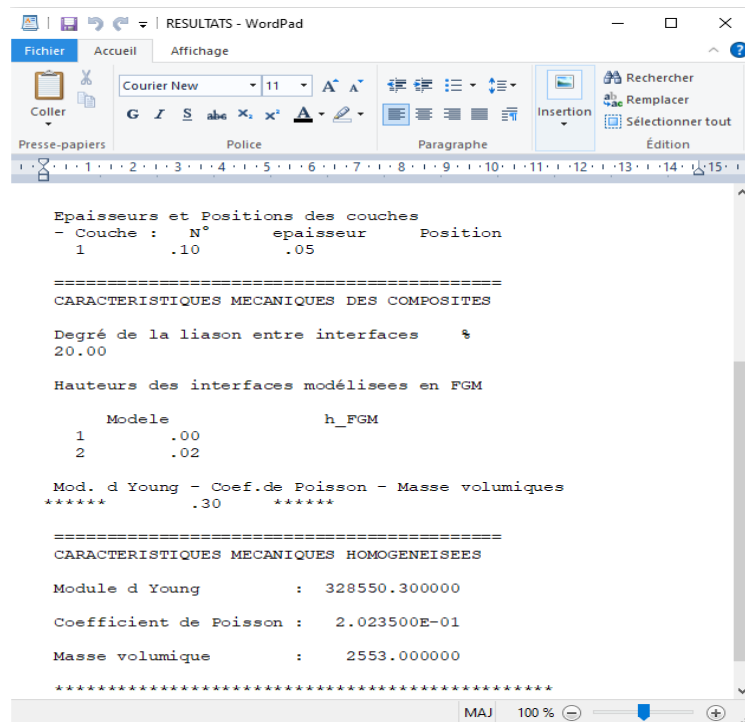
Les Figure V.4 et V.5 suivantes illustrent le calcul des caractéristiques homogénéisées pour l'exemple de la section SH1



```
C:\taki m2\FGM\ProgrFGM\M_FGM.exe
LECTURE DES DONNEES DE LA STRUCTURE
Quelle est l'épaisseur totale de la structure
10
Introduire les caractéristiques mécaniques de la structure
Module d'Elasticité E
300000
Coefficient de Poisson Nu
0.2
Masse Volumique Rho
2500
LECTURE DES DONNEES DES COMPOSITES
Entrez le nombre de couches du composite
1
Le degré de liaisons des interfaces entre les couches
```

Figure V.4 : L'interface de la console d'entrée des données FORTRAN

Les résultats de calcul sont affichés dans un fichier DAT est présenté dans la figure V.4.



```
RESULTATS - WordPad
Fichier Accueil Affichage
Coller
Police Paragraphe Insertion Rechercher Remplacer Sélectionner tout
Epaisseurs et Positions des couches
- Couche : N° épaisseur Position
1 .10 .05
=====
CARACTERISTIQUES MECANIKES DES COMPOSITES
Degré de la liaison entre interfaces %
20.00
Hauteurs des interfaces modélisées en FGM
Modèle h_FGM
1 .00
2 .02
Mod. d Young - Coef. de Poisson - Masse volumiques
***** .30 *****
=====
CARACTERISTIQUES MECANIKES HOMOGENEISEES
Module d Young : 328550.300000
Coefficient de Poisson : 2.023500E-01
Masse volumique : 2553.000000
*****
```

Figure V.5 : Fichier « *.dat » de sortie de résultat des calculs des caractéristiques mécaniques

V.4.3. Déplacements de références selon les sections homogénéisées

Le déplacement vertical de référence de l'extrémité libre de la poutre console est donné comme suit :

$$V = \frac{PL^3}{3EI} + \frac{6PL}{5GA}$$

Ainsi pour chacune des sections à considérer pour l'analyse de la poutre, les références se présentent comme suit :

Tableau V.3 : Solution de références des sections homogénéisées

Sections	P(KN)	L(cm)	I (cm ⁴)	A (cm ²)	E (KN/Cm ²)	u	G (KN/Cm ²)	V _{REFERENCE} (Cm)
SH0 (0%)	10	100	83.333	10	3000	0.2	1250	13.429
SH1 (20%)	10	100	83.333	10	3285.50	0.20235	1366.3	12.262
SH2 (40%)	10	100	83.333	10	3391.0	0.2037	1408.5	11.881
SH3 (60%)	10	100	83.333	10	3496.51	0.20505	1458.7	11.522
SH4 (80%)	10	100	83.333	10	3602.0	0.2064	1492.8	11.185
SH5 (100%)	10	100	83.333	10	3707.51	0.2077	1534.9	10.867

V.5. Application du modèle CSB

L'application du CSB se fait selon plusieurs étapes :

- Création et maillage de la section par utilisation d'un logiciel libre Gmsh.
- Définition dans le module « matériel » du CSB des caractéristiques mécaniques des matériaux composant les différents domaines de la section composite.

- Importation de la section dans le module « Section » du CSB en vue d'affecter les matériaux correspondant aux différents domaines et calcul des caractéristiques géométriques et mécaniques de la section considérée.
- Utilisation du module Beam du CSB pour modéliser la poutre et la calculer.

V.5.1. Création de la section par Gmsh

La section de notre poutre est rectangulaire.

Pour les besoins des simulations de l'étude on a confectionné à l'aide de Gmsh deux types de sections (Figure V.6 et V.7) :

- Une section homogène de dimensions $b=1.0$ cm et $h=10$ cm (Figure V.1)
- Une section composite correspondant à la poutre en BA renforcée dans la partie tendue par une plaque d'acier de 0.10 cm, d'épaisseur (hauteur des deux domaines $h=10.0$ cm) (Figure V.2)

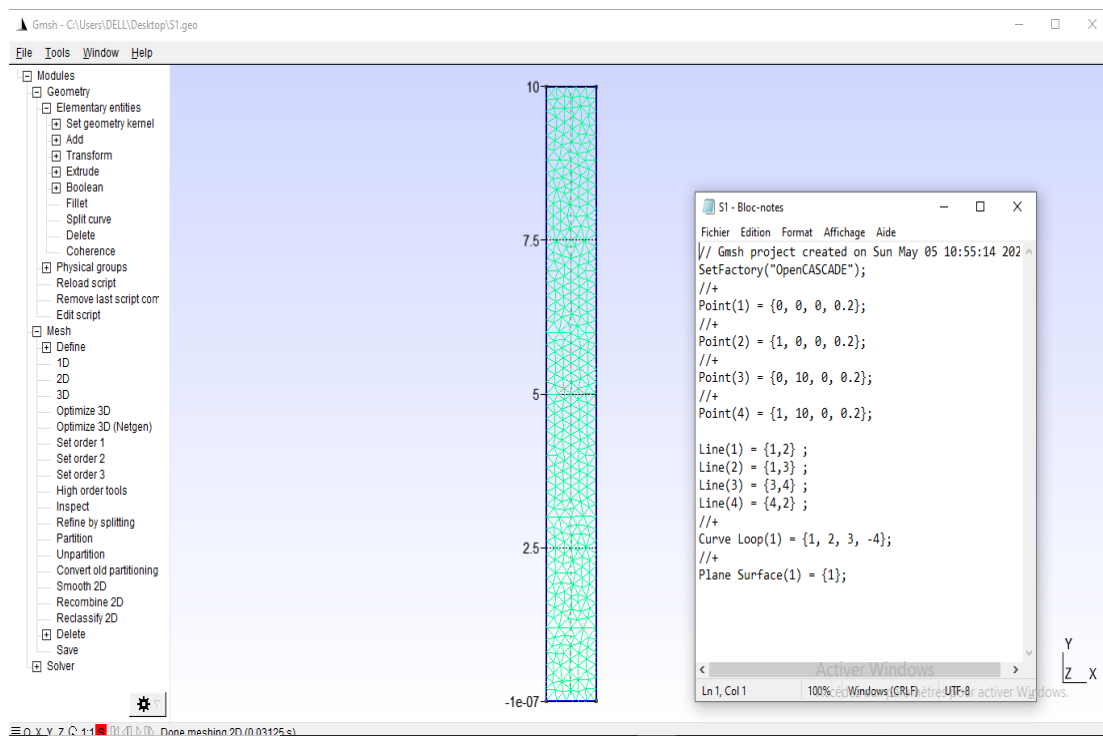


Figure V.6 : Géométrie et maillage de la section homogène et le script correspondant

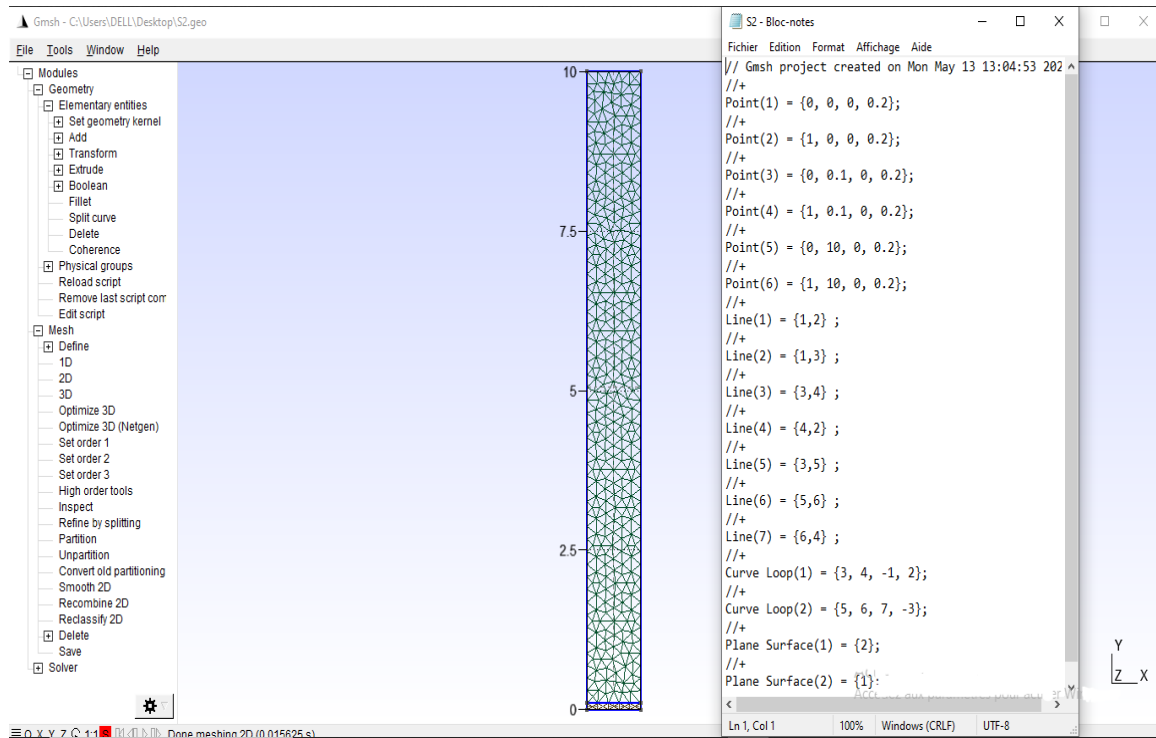


Figure V.7 : Géométrie et maillage de la section composite et le script correspondant

V.5.2. Définition des caractéristiques des matériaux

Les caractéristiques mécaniques des matériaux de la structure (Béton et acier) existent déjà dans la bibliothèque du CSB.

Béton : $E = 30000$ MPA ; $\nu = 0,20$

Acier : $E = 210000$ MPA ; $\nu = 0,30$

Il s'agit maintenant de définir, à l'aide du module « matériel » de CSB, les caractéristiques mécaniques spécifiques aux sections objets des simulations dans notre étude et à les introduire dans la bibliothèque de CSB pour leur utilisation. Celles-ci, calculées à l'aide de l'approche d'homogénéisation « FGM », sont données au tableau V.2.

V.5.3. Export de la section ver le module CSection et calcul des caractéristiques des sections développées

Le calcul des caractéristiques géométriques et mécaniques des différentes sections et effectué par le module « CSection » du CSB, qui au préalable importe la section construite et maillée sous format *.inp.

Après affectation des matériaux aux domaines constituant la section composite et résolution, les résultats apparaissent sur la même interface. Les figures V.8 et V.9 illustrent les résultats concernant la section homogénéisée (SH1) et la section composite.

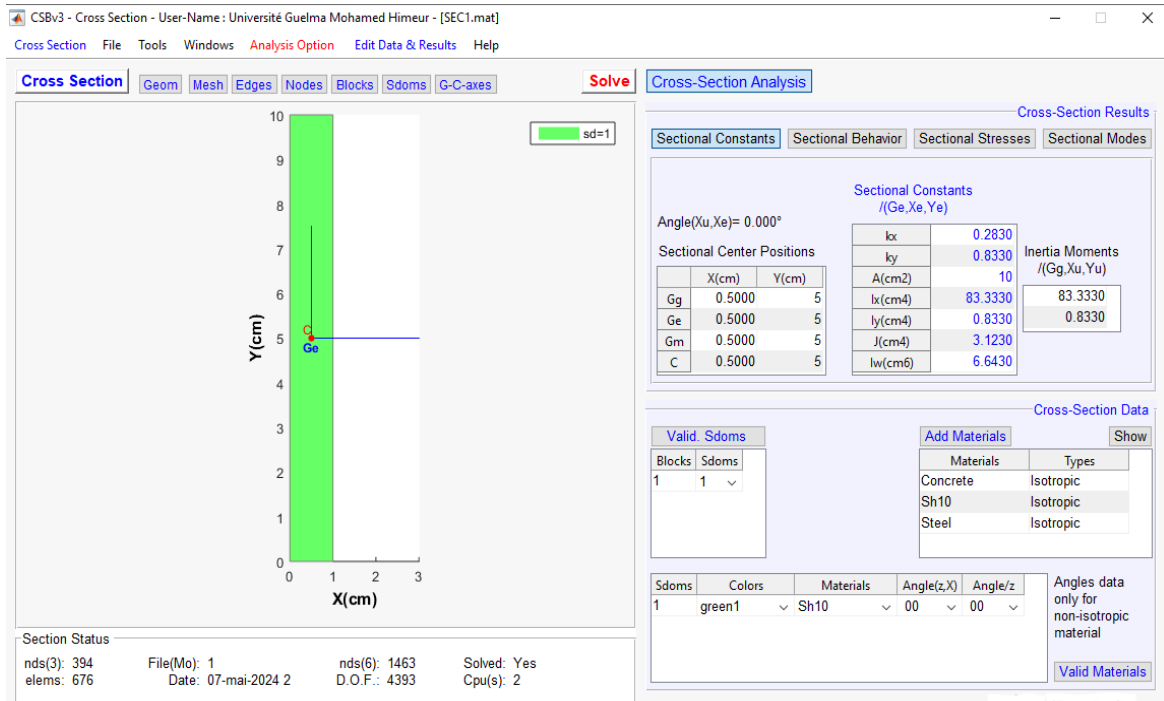


Figure V.8 : La fenêtre principale de CSection pour la section homogénéisée (SH1)

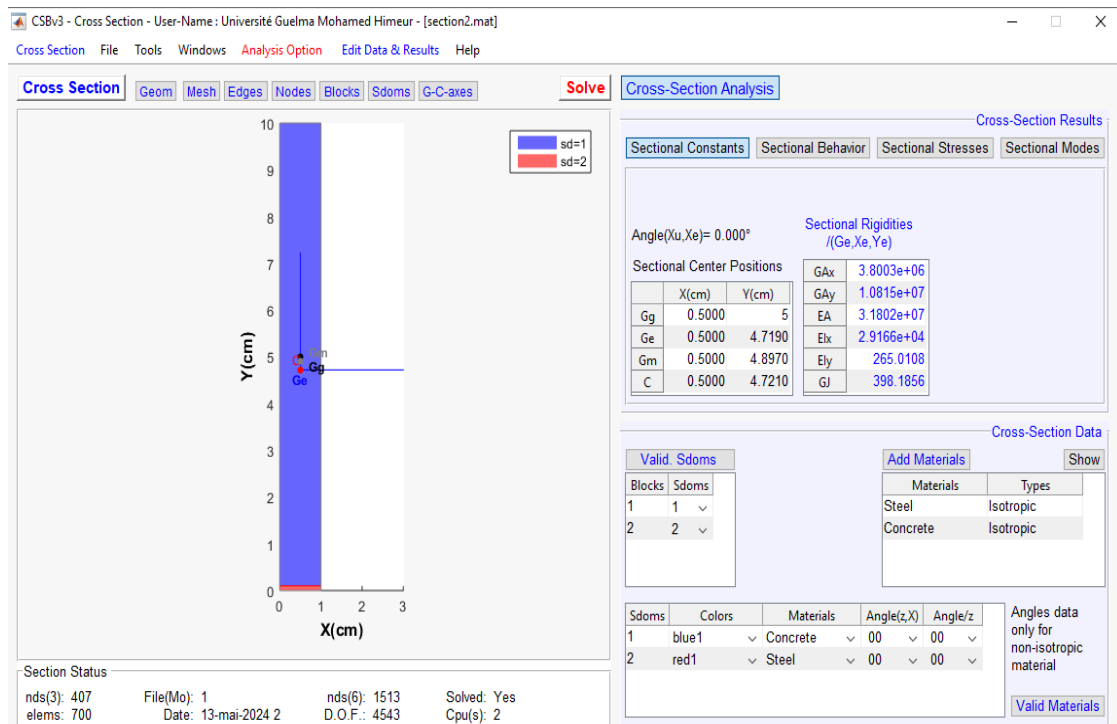


Figure V.9 : La fenêtre principale de CSection pour la section composite

A cette étape le CSB permet de visualiser sous forme numérique et graphique les différentes caractéristiques mécaniques et géométriques des différentes sections.

- Section HOMOGENE – SH1

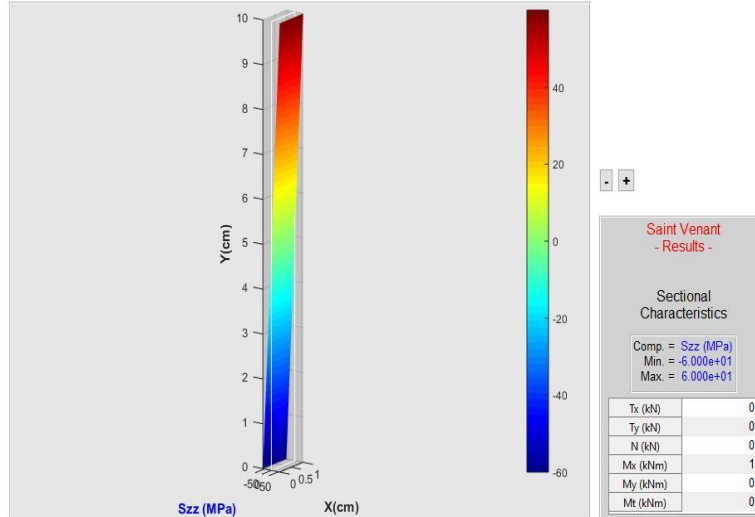


Figure V.10 : Variation de la contrainte axiale σ_{zz}

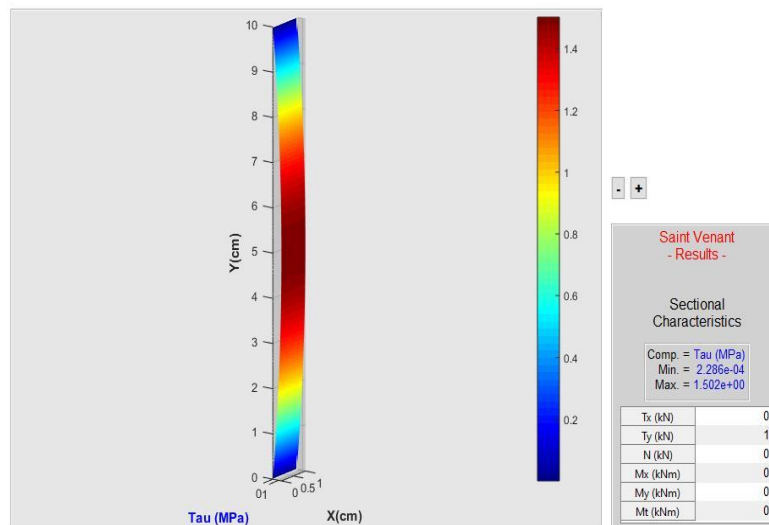


Figure V.11 : Variation d'une contrainte de cisaillement τ



Figure V.12 : Effets de Poisson

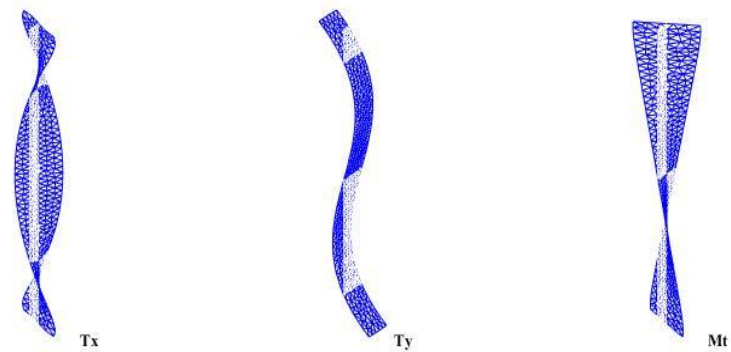


Figure V.13 : Distorsions et Gauchissements

- Exemple de Section COMPOSITE

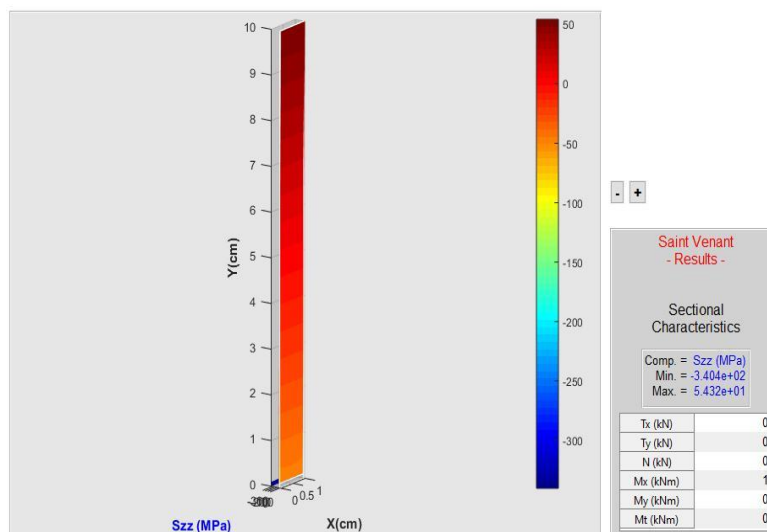


Figure V.14 : Variation de la contrainte axiale σ_{zz}

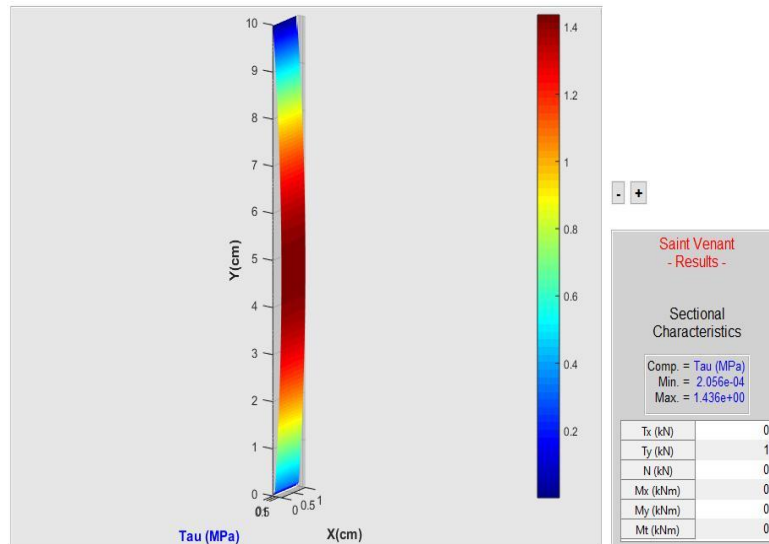


Figure V.15 : Variation d'une contrainte de cisaillement τ



Figure V.16 : Effets de Poisson

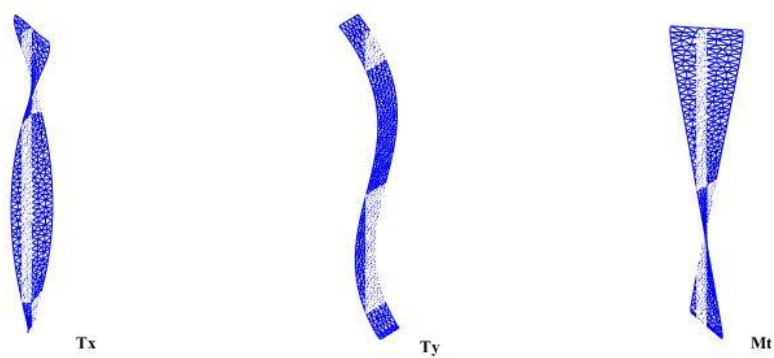


Figure V.17 : Distorsions et Gauchissements

- **Commentaires**

- Pour le cas hétérogène ou composite, un champ de contrainte est fourni (ou affiché) par sous domaine, c'est à dire par matériau. Ainsi pour un point à l'interface entre deux matériaux, deux valeurs seront fournies. A l'interface, la continuité des contraintes dépend de l'orientation de l'interface.
- La variation de la contrainte de cisaillement σ_{yz} dû à un effort tranchant T_y apparaît continue à l'interface, cela est significatif de la qualité des résultats fournis par CSection.

V.6. Modélisation de la poutre

V.6.1. Utilisation du CSB

Le module **Spatial Beam** permet de modéliser la poutre console en effectuant les tâches suivantes :

- Définition de la géométrie de la poutre et son maillage,
- L'affectation de la section calculée par CSbeam,
- L'introduction des conditions aux limites,
- L'introduction des cas de chargement (dans notre exemple on a un seul cas de chargement),
- La résolution.

Après analyse on peut extraire pour n'importe combinaison de charge et en tout point de la poutre tous les résultats escomptés : Déplacements, efforts dans les sections, contraintes, déformations. Comme on peut visualiser les graphes montrant l'évolution de ces paramètres à travers la poutre. En voici des exemples pour le cas de la poutre utilisant la section SH1.

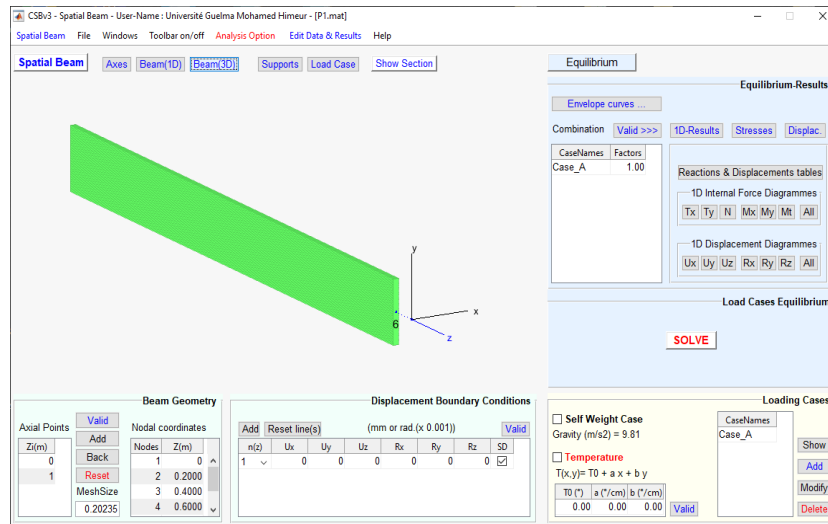


Figure V.18 : La fenêtre principale de Spatial Beam pour SH1 (20%)

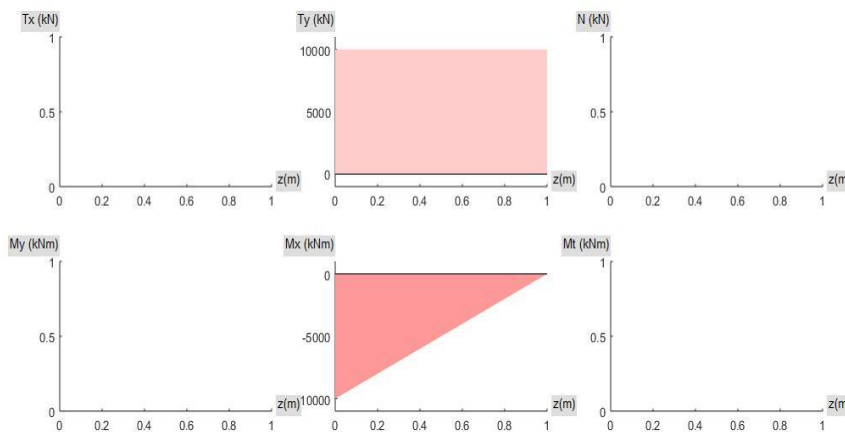


Figure V.19 : Les diagrammes des efforts intérieurs

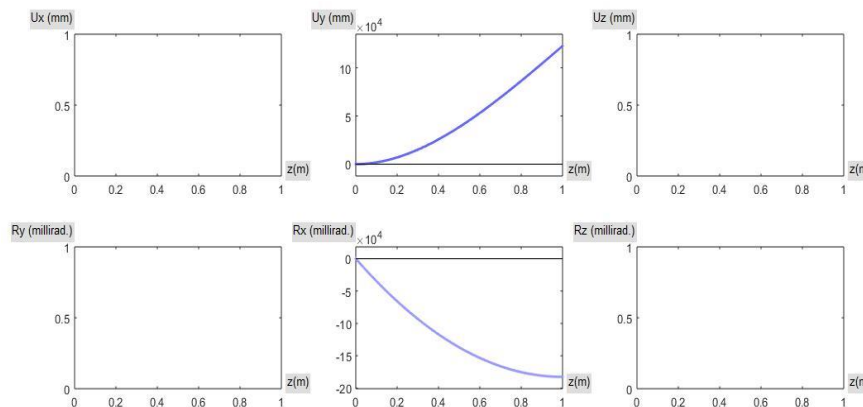


Figure V.20 : Les diagrammes des déplacements (translations et rotations)

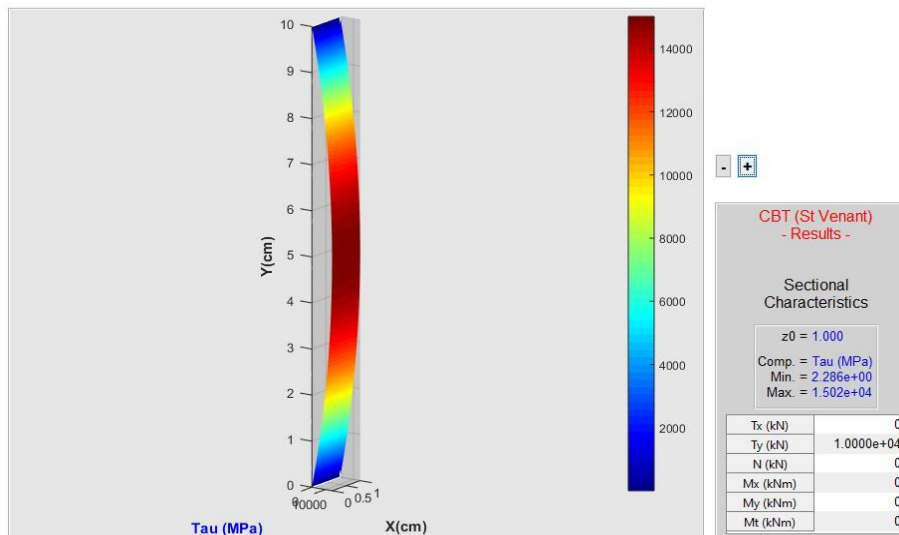


Figure V.21 : Variation d'une contrainte de cisaillement de la section SH1 à l'encastrement

Déplacements et Réactions

Reactions: Forces and couples

Nz	Zcoor	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Cx (kNm)	Cy (kNm)	Cz (kNm)
1	0	0	-10.0000	0	10.0000	0	0

Déplacements: translations et rotations

	Zcoor	Ux (mm)	Uy (mm)	Uz (mm)	Rx (rad. x 0.001)	Ry (rad. x 0.001)	Rz (rad. x 0.001)
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0.2000	0	6.9935	0	-65.7434	0	0
3	0.4000	0	25.6747	0	-116.8771	0	0
4	0.6000	0	53.1217	0	-153.4012	0	0
5	0.8000	0	86.4125	0	-175.3157	0	0
6	1	0	122.6253	0	-182.6205	0	0

OK

Figure V.22 : Les déplacements des nœuds de la poutre et les réactions

V.6.2. Modélisation par éléments finis

Le modèle élément fini utilisé est celui développé par Docteur Himeur et écrit sous forme d'un Langage Fortran.

Il s'agit de la discrétisation de la poutre en utilisant l'élément fini de plaque flexionnelle dont la formulation est basée sur :

- Géométrie de l'élément fini : Triangulaire à 03 Nœuds,

- Typologie de la cinématique : Trois Degrés De Liberté (Translation w le long perpendiculaire à l'élément (axe z) et les rotations autour de axes x et y (θ_x et θ_y))
- Approche en déformation

Les exemples de fichier de données et de fichier de résultats concernant l'analyse de la poutre ayant la section SH1 se présentent comme suit :

Fichier de données

```

POUTRE COMPOSITE AVEC LIAISON PARTIELLE 20%
C Donn,es g,n,r,ales : NNO,NTE,NBC,NIN,NTY,NCLI,INTER
27 32 9 3 4 0 0
C Coordonn,es des noeuds: X Y ( Z )
.00000E+00 .00000E+00 .00000E+00 .50000E+
01 .00000E+00 .10000E+01
.12500E+01 .00000E+00 .12500E+01 .50000E+
01 .12500E+01 .10000E+01
.25000E+01 .00000E+00 .25000E+01 .50000E+
01 .25000E+01 .10000E+01
.37500E+01 .00000E+00 .37500E+01 .50000E+
01 .37500E+01 .10000E+01
.50000E+01 .00000E+00 .50000E+01 .50000E+
01 .50000E+01 .10000E+01
.62500E+01 .00000E+00 .62500E+01 .50000E+
01 .62500E+01 .10000E+01
.75000E+01 .00000E+00 .75000E+01 .50000E+
01 .75000E+01 .10000E+01
.87500E+01 .00000E+00 .87500E+01 .50000E+
01 .87500E+01 .10000E+01
.10000E+02 .00000E+00 .10000E+02 .50000E+
01 .10000E+02 .10000E+01
C Connexions des ,l,ments
8 1 4 5 1 5 2 "
1
"
3 3 3 3 3 3 3
"
C Charges des plaques
C Charges nodales: noeud direction intensite
    
```

Fichier de résultats

```

** CALCUL DE L'EQUILIBRE ELASTIQUE **
....SAUVEGARDE DE LA RIGIDITE SUR W6.BBB
....DEPLACEMENTS AUX NOEUDS
      NOEUD      *1*      *2*      *3*
1         .000E+00      .000E+00      .000E+00
2         .000E+00      .000E+00      .000E+00
3         .000E+00      .000E+00      .000E+00
4         .255E+01      -.408E+01      -.246E+02
5         .262E+01      -.417E+01      -.118E+01
6         .260E+01      -.419E+01      .760E+01
7         .991E+01      -.777E+01      -.392E+02
8         .100E+02      -.782E+01      -.150E+02
9         .101E+02      -.787E+01      .950E+01
10        .216E+02      -.109E+02      -.455E+02
11        .218E+02      -.110E+02      -.241E+02
12        .218E+02      -.110E+02      -.204E+01
13        .369E+02      -.135E+02      -.483E+02
14        .371E+02      -.135E+02      -.307E+02
15        .372E+02      -.136E+02      -.134E+02
16        .550E+02      -.155E+02      -.497E+02
17        .552E+02      -.155E+02      -.364E+02
18        .554E+02      -.155E+02      -.239E+02
19        .753E+02      -.169E+02      -.506E+02
20        .756E+02      -.169E+02      -.418E+02
21        .758E+02      -.170E+02      -.341E+02
22        .971E+02      -.178E+02      -.514E+02
23        .973E+02      -.178E+02      -.474E+02
24        .975E+02      -.178E+02      -.445E+02
25        .120E+02      -.181E+02      -.526E+02
26        .120E+02      -.181E+02      -.535E+02
27        .120E+02      -.181E+02      -.555E+02
    
```

Figure V.23 : Fichier de données et de résultats d'un Langage Fortran de la section SH1

V.7. Résultats et commentaires

V.7.1. Déplacement de l'extrémité libre de la poutre

Les déplacements de l'extrémité libre de la poutre sont selon la section homogénéisée comme suit :

Tableau V.4 : Déplacement de l'extrémité libre de la poutre selon la section homogénéisée

Sections Homogénéisées	W_{REF}	W_{CSB}	W_{MEF}
SH0 (0%)	13.429	13.429	13.2
SH1 (20%)	12.262	12.226	12.0
SH2 (40%)	11.881	11.881	11.6
SH3 (60%)	11.522	11.523	11.3
SH4 (80%)	11.185	11.185	10.9
SH5 (100%)	10.867	10.867	10.6

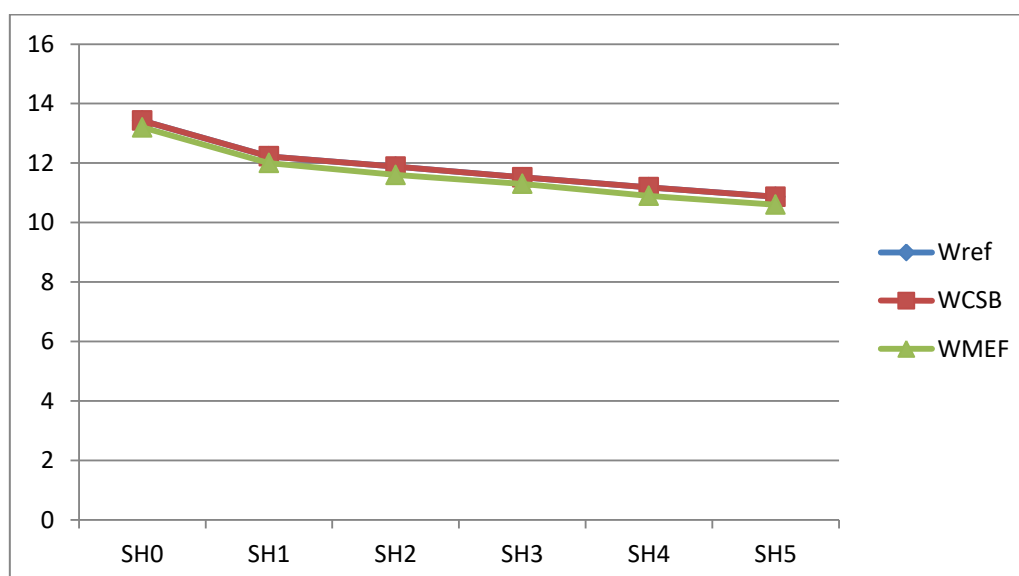


Figure V.24 : Déplacement de l'extrémité libre de la poutre selon la section homogénéisée

V.7.2. Contraintes à l'encastrement

L'évolution des contraintes normales et tangentielles données par CSB agissant sur la section située à l'encastrement se présentent selon la section homogénéisée et section composé comme suit :

Tableau V.5 : Contraintes normales et tangentielles des sections à l'encastrement

Sections	Contrainte normale minimale (MPa)	Contrainte normale maximale (MPa)	Contrainte tangentielle maximale (MPa)
SH	-6×10^6	6×10^6	1.502×10^4
SC	-5.432×10^5	3.404×10^6	1.436×10^4

V.7.3. Commentaire des résultats

- Les caractéristiques mécaniques (contraintes, contraintes tangentielles) sont meilleures (élevées) pour les sections homogénéisées. Ceci dénote l'impact de la raideur des interfaces entre les couches composites.
- Le placement de l'extrême libre de la section homogène est plus petit que celui de la section composite, ce qui indique que plus l'homogénéité des interfaces entre les couches composites est grande, plus la diminution du placement est important.

V.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait la validation de l'approche FGM sur la poutre proposée. L'étude de la structure est effectuée selon deux principaux modèles (L'approche du CSB et l'approche par éléments finis). De plus on a présenté le principe d'homogénéisation de la section de la poutre renforcée, le calcul de déplacement vertical de référence de l'extrémité libre de la poutre console est effectué par six sections homogénéisées ont été développées selon l'intensité de la raideur de l'interface entre le béton et le renfort en acier.

Cette validation permet de confirmer que les FGM peuvent réduire les concentrations de contraintes. De plus, elle contribue à l'optimisation des matériaux et à l'innovation dans la conception de nouvelles structures.

Conclusion générale

La modélisation des interfaces de contact dans les structures stratifiées en utilisant l'approche des Matériaux à Gradient de Propriétés (FGM) représente une avancée technologique significative dans le domaine de l'ingénierie des matériaux. En permettant une transition graduelle des propriétés matérielles entre les différentes couches, les FGM offrent une solution efficace pour atténuer les contraintes localisées et améliorer l'adhésion et la durabilité des structures stratifiées.

Les avantages de cette approche sont nombreux. En réduisant les concentrations de contraintes et en minimisant les risques de délamination et de fissuration, les FGM augmentent la résistance mécanique et thermique des composites stratifiés. De plus, la possibilité d'optimiser les gradients de propriétés matérielles permet de personnaliser les performances des structures en fonction des exigences spécifiques des applications, qu'il s'agisse de l'aérospatiale, de l'automobile, ou de la construction civile.

Les défis associés à la modélisation des interfaces FGM incluent la complexité des calculs nécessaires pour simuler avec précision la distribution des propriétés matérielles et les comportements sous diverses conditions de charge. Cependant, les avancées dans les techniques de simulation numérique, telles que la méthode des éléments finis (FEM), offrent des outils puissants pour surmonter ces défis et réaliser des analyses détaillées et fiables.

En conclusion, l'intégration des FGM dans la conception des structures stratifiées permet non seulement d'améliorer les performances et la durabilité des matériaux composites, mais aussi d'ouvrir la voie à de nouvelles innovations dans de nombreux secteurs industriels. La recherche et le développement continus dans ce domaine promettent de transformer les méthodes traditionnelles de fabrication et de conception des matériaux, offrant ainsi des solutions avancées et robustes pour les défis technologiques de demain.

Références et bibliographiques

Références et bibliographiques

Cours

- ❖ Cour Matériaux et Ouvrages de Génie Civil (**Pr. Mohamadi Saddika 2013-2014**)

Livres

- ❖ Calcul des ouvrages : Applications (**Erick Ringot, Bernard Husson, Thierry Vidal 2023**)
- ❖ Manuel-CSB : Manuel de l'Utilisateur (**Rached El Fatmi 2020**)

Thèses

- ❖ Simulation de la rupture des composites stratifiés dans le cadre de modèles de plaques multicouches (**Paul BOUTEILLER 2022 de l'École des Ponts ParisTech**)
- ❖ Analyse dynamique des plaques en matériaux à gradient de propriétés (**ABUALNOUR Moussa 2019 de l'Université Djilali Liabès de Sidi Bel Abbès**)
- ❖ Comportement mécanique des plaques FGM sandwich avec un cœur en nid d'abeille reposant sur une fondation élastique (**BEKHOUCHE Dina et BEGHADALI Sabrina 2023 de Université Ibn Khaldoun De Tiaret**)
- ❖ Modélisation du comportement thermomécanique d'un réservoir sphérique FGM sous pression (**BABOURI Fatiha et ARAB Siham 2021 d'Université Abderrahmane Mira de Bejaia**)
- ❖ Solution analytique par la théorie de l'élasticité des poutres consoles en FGM soumises à charges d'ordres supérieures (**GHALI Bochra et GUELLIL Hayet 2021 de Université Ibn Khaldoun De Tiaret**)
- ❖ Vibration libre des plaques FGM posées sur fondation élastique (**Aisset Mohamed Et Amine Benamara Nacer 2019 d'Université Ibn Khaldoun De Tiaret**)

Logiciels

- ❖ CSB-V3
- ❖ Gmsh

Cites Internets

- ❖ <https://link.springer.com/article/10.1007/s42114-018-0032-7> ; consulté [Le 6/3/2024]
- ❖ <http://dSPACE.univtiaret.dz/bitstream/123456789/11647/4/ch2%20%20%20fgm%202012.pdf> ; consulté [Le 18/4/2024]
- ❖ <https://nt4e.com/csb/education/> ; consulté [Le 5/5/2024]