

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOD MAMMERI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Génie civil
Option : Structure

Thème

Simulation numérique du comportement thermomécanique d'une structure sandwich multicouche à base de matériaux à gradient fonctionnel

Proposé et dirigé par :

M^{me} Ait Taleb Souad

Réalisé par :

M^{lle} Amichi Malha

Promotion 2019/2020

Remerciements

Avant tout, je remercie Dieu de m'avoir donné la patience, ainsi que la volonté et le courage de réaliser ce travail.

Je tiens à adresser mes profonds remerciements à M^{me} Ait Taleb Souad de m'avoir confié un sujet de recherche prestigieux et passionnant. Je tiens à lui témoigner toute ma gratitude pour son aide et sa rigueur scientifique.

J'exprime également toute ma reconnaissance à Mr Abdelmadjid Si Salem qui a apporté un soutien scientifique constant à mon travail de recherche, je le remercie pour sa disponibilité sa modestie et ses conseils, je remercie ainsi M^{me} Chahour Kahina pour sa gentillesse et sa disponibilité.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les membres de jury qui m'ont fait l'honneur d'examiner ce mémoire de fin d'étude et lui apporter ainsi l'accréditation de la communauté scientifique.

Enfin, je tiens à exprimer ma sincère gratitude pour tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire. Particulièrement ma chère famille.

A tous ceux qui m'ont répété tous les matins,

- Et alors il avance ton mémoire ?*
- Et ton mémoire, quand est ce que la soutiens ?*
- Alors, toujours pas finie ce mémoire ?*

A tous ceux-là, je leur dis...merci !

Malha

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A Celle qui m'a donné la vie, à celle qui était toujours derrière mon succès, à celle qui a attendu avec patience les fruits de sa bonne éducation, et ses sacrifices à ma mère bien-aimée.

A celui qui a veillé sur moi pour qu'il ne me manque rien, celui qui était toujours fier de moi à l'homme de ma vie mon cher père.

A mes chers frères qui étaient toujours là pour moi

Achour, Ali, Youcef et Said

A mes deux sœurs, mes belles sœurs, mes beaux frères

A mes nièces et mes neveux

A mes chers ami (es) Billal, Cylia, Lylia, Sara, Lydia....

A tous ceux qui me connais son exception et tous ceux qui m'ont encouragée et aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce mémoire

Résumé

Les structures sandwiches connaissent un essor très important, elles présentent un intérêt pour des applications qui requièrent à la fois rigidité, légèreté et isolation. L'industrie de ces dernières ne cesse d'évoluer et de croître en mettant en place de nouveaux matériaux et de nouvelles technologies. Faisant ainsi appel, à des matériaux innovants dans le but d'améliorer les performances de ces structures et de résoudre la majorité de leurs problèmes c'est pourquoi les chercheurs ont optés pour les matériaux FGM (*Functionally Graded Materials*).

Les matériaux à gradient fonctionnel sont une nouvelle classe de matériaux composites dont les propriétés thermomécaniques varient selon une loi de fonction continue à travers l'épaisseur. Les FGMs ont une microstructure et une composition qui varie graduellement et continûment de manière qui permet d'éviter les concentrations de contraintes au niveau des interfaces.

En effet, le but de ce travail est de mettre en évidence à travers une simulation numérique par élément finis le comportement mécanique et thermomécanique des panneaux sandwichs avec une âme graduée FGM à base de deux mousses PVC à l'aide du code ABAQUS. Les différents résultats obtenus, présentent une bonne concordance avec les résultats expérimentaux tirés de la littérature. Ils montrent l'efficacité du modèle proposé en termes prédiction de résistance et de déformabilité.

Mots clés : Structure sandwiche, Matériaux FGM, Simulation, Isolation, Comportement thermomécanique.....

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
-----------------------------	---

CHAPITRE I

I.1 INTRODUCTION	3
I.2 ISOLATION THERMIQUE ET PHONIQUE DES STRUCTURES	3
I.2.1 Isolation thermique	3
I.2.1.1 Types d'isolation thermique.....	4
I.2.1.1.1 Isolation par l'intérieur	4
I.2.1.1.2 Isolation par l'extérieur.....	5
I.2.1.2 Caractéristiques principales de l'isolation thermique	5
I.2.1.2.1 La conductivité thermique	5
I.2.1.2.2 La résistance thermique ($R = 1/K$) ou coefficient de conductance K	5
I.2.1.3 Les types d'isolants thermiques	6
I.2.1.3.1 les isolants naturels	6
I.2.1.3.2 Les isolants synthétiques.....	7
I.2.2 ISOLATION PHONIQUE.....	7
I.2.2.1 Définition	7
I.2.2.2 Les méthodologies d'isolation phonique	7
I.3 LES MATERIAUX COMPOSITES	8
I.3.1 Définition	8
I.3.2 Différents types de constituants de base	9
I.3.2.1 Les matrices	9

I.3.2.2 Les renforts	9
I.3.2.2.1 Architecture des fibres	9
I.3.2.2.2 Les différentes fibres.....	10
I.3.3 Avantages / limitations	11
I.3.4 les structures composites.....	12
I.3.4.1 Monocouches	12
I.3.4.2 Stratifiés	12
I.3.4.3 Structure sandwiche	13
I.3.4.3.1 Sandwichs symétriques	13
I.3.4.3.2 Sandwiches dissymétriques	14
I.3.4.4 La classification des sandwichs	14
I.3.4.5 Les constituants des matériaux multicouches	15
I.3.4.5.1 Les semelles	15
I.3.4.5.2 L'âme	16
I.4 LES MATERIAUX FGM	17
I.4.1 Introduction.....	17
I.4.2 Définition et concept.....	17
I.4.3 Comparaison des matériaux types FGM et les matériaux composites traditionnels	18
I.4.4 Notions sur le gradient des FGM	19
I.4.5 Les propriétés matérielles effectives des FGMs (homogénéisation)	20
I.4.5.1 La fraction volumique P-FGM.....	20
I.4.5.2 La fraction volumique E-FGM	21
I.4.5.3 La fraction volumique S-FGM.....	22
I.4.6 Domaine d'application des FGMs	22
I.5 CONCLUSION	23

CHAPITRE II

II.1 INTRODUCTION	24
II.2 Sandwiches sous chargement mécanique	24
II.2.1. Normes de confection et d'essai	24
II.2.2 Comportement des sandwichs en flexion	26
II.2.2.1 Flexion trois points	26
II.2.2.2 Flexion quatre points	27
II.2.3 Flambement des structures sandwiches	27
II.2.4 Mécanisme de rupture	28
II.2.4.1 Rupture des peaux en traction ou en compression.....	29
II.2.4.2 Modes locaux de rupture	29
II.2.4.3 Rupture de l'âme en cisaillement	29
II.2.4.4 Dégradation de l'adhésive	30
II.3 Sandwiches sous chargement thermique	30
II.3.1 Les transferts de chaleurs	30
II.3.1.1 Transfert de chaleur par conduction	31
II.3.1.2 Transfert de chaleur par convection	31
II.3.1.3 Transfert par rayonnement.....	32
II.3.2 Thermo élasticité	33
II.4. Théorie des sandwichs.....	33
II.5 Revue des travaux antérieurs sur les F.G.M.....	35
II.5.1. Modèle CPT.....	35
II.5.2 Modèle FSDT	35
II.5.3 Modèle HSDT.....	36
II.6 Synthèse des travaux antérieurs sur les sandwichs.....	36
II.6.1 sandwich en âme pleine	36
II.6.2 sandwichs en âme PVC	37
II.6.3 sandwichs en âme nida	38
II.6.4 sandwichs en semelles FGM	39
II.6.5 sandwichs en âme FGM	40

II.7 Conclusion	41
-----------------------	----

CHAPITRE III

III.1 INTRODUCTION.....	41
III.2 Présentation générale d'ABAQUS	41
III.3 Bases de l'interface d'ABAQUS.....	42
III. 4 Présentation des variantes d'étude	43
III.5 Identification des paramètres et modèles adoptés	44
III.5.1 Modèle élastique orthotrope pour les composites de semelles	44
III.5.2 Modèle élasto-plastique pour les matériaux d'âme.....	44
III.6 Étapes de la modélisation.....	46
III.6.1 La géométrie des éléments (module part)	46
III.6.2 Propriétés des matériaux (Module Property)	47
III.6.3 Assembler le modèle : (le module ASSEMBLY)	48
III.6.4 Définition du « Steps » et des variables à calculer (le module step).....	48
III.6.5 Définition des contacts (Module Interaction).....	49
III.6.6 Définition des conditions aux limites et chargement (Module Load).....	50
III.6.7 Le maillage de modèle (module mesh)	51
III.6.8 Étude de sensibilité de maillage	51
III.6.9 Création du fichier résultats (Module Job).....	53
III.6.10 Visualisation des résultats (Module visualisation).....	53
III.7 CONCLUSION	54

ChapitreIV

IV.1 INTRODUCTION	55
-------------------------	----

IV.2 VALIDATION DE MODELE NUMERIQUE.....	55
V.3 RESULTATS DE L'ANALYSE NUMERIQUE.....	56
IV.3.1 Sandwiches sous chargement mécanique	56
IV.3.1.1 Effet de paramètre du matériau « P ».....	57
IV.3.1.2 Effet de nombres de couche	58
IV.3.1.3 CARTOGRAPHIE DES CONTRAINTES	60
IV.3.1.3.1 l'évolution des contraintes dans l'âme.....	61
IV.3.1.3.2 l'évolution des contraintes dans les semelles.....	63
IV.3.2 SANDWICHES SOUS CHARGEMENT THERMOMECHANIQUE.....	65
IV.3.2.1 Effet de paramètre du matériau « P » :.....	65
IV.3.2.2 Effet de nombres de couches.....	68
IV.3.2.3 Cartographie des contraintes	69
IV.3.2.3.1 les contraintes dans l'âme	70
IV.3.2.3.2 les contraintes dans les semelles	72
IV.4 Conclusion	74
Conclusion générale	75
Références bibliographiques.....	76
Résumé	78

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1 : Répartition moyenne des déperditions Dans une maison individuelle neuve	4
Figure I.2 : Isolation par l'intérieur simple à mettre en œuvre	4
Figure I.3 : Isolation par l'extérieur	5
Figure I.4 : Isolation de la toiture, des murs creux et des toitures et des combles isolés	6
Figure I.5 : Constituants d'un matériau composite	8
Figure I.6 : Différents types de matrices	9
Figure I.7 : Organigramme de différentes familles de renfort	10
Figure I.8 : Constitution d'une monocouche	12
Figure I.9 : Constitution d'un stratifié	12
Figure I.10 : Désignation d'une structure composite stratifiée	13
Figure I.11 : Constituants d'une structure sandwich symétrique	13
Figure I.12 : Constituants d'une structure sandwich dissymétrique	14
Figure I.13 : Schéma d'un sandwich	14
Figure I.14 : Les différents matériaux de fabrication des peaux	15
Figure I.15 : Schéma d'une âme en nid d'abeille	16
Figure I.16 : Matériaux utilisés pour la confection des âmes de structures multicouches	17
Figure I.17 : Caractéristiques des matériaux composites FGM selon Koizumi	18
Figure I.18 : Les concentrations de contraintes dans les panneaux au niveau des interfaces .	19
Figure I.19 : Changement de la microstructure d'un FGM	19
Figure I.20 : Modèle analytique pour une couche en FGM	20
Figure I.21 : Variation de la fraction volumique dans une poutre P-FGM	21
Figure I.22 : Variation de la fraction volumique dans une poutre E-FGM.	21
Figure I.23 : Variation de la fraction volumique dans une poutre S-FGM	22
Figure I.24 : Les principaux domaines d'application des FGM.....	23

CHAPITRE II

Figure II.1 : Méthodes de Caractérisation des sandwichs selon les normes ASTM	25
Figure II.2 : Dimension des sandwichs selon la norme AFNOR	25
Figure II.3 : Plaque sandwich	26
Figure II.4 : Flexion trois-points	27
Figure I.5 : Flexion 4 points	27
Figure II.6 : Flambement global du sandwich; b) flambement local du sandwich	28
Figure II.7 : déférentes sollicitations des panneaux sandwichs	28
Figure II.8 : Rupture des peaux en traction ou en compression	29
Figure II.9 : Modes locaux de rupture par indentation	29
Figure II.10 : Rupture de l'âme en cisaillement	30
Figure II.11 : Type de dégradation de l'adhésif	30
Figure II.12 : Les matériaux utilisés par Hami pour le sandwich	36
Figure II.13 : Représentation des séries de structures sandwichs testées par Hami	37
Figure II.14: Les résultats de flexion 3 et 4 points obtenu par les essais de Hami	37
Figure II.15 : Coupe schématique des échantillons utilisés par H. M Bahabadi et al	38
Figure II.16 : Les essais de flexion 3 points des travaux de H. M Bahabadi et al	38
Figure II.17 : Les panneaux sandwichs nida Nomex utilisés par X. Wu et al	39
Figure II.18 : Résultats obtenus par X. Wu et al	39
Figure II.19 : Les plaques FGM et le sandwich utilisé par K. Arslan, R. Gunes	40
Figure II.20 : Variation de la fraction volumique à travers l'épaisseur utilisé par K. Arslan .	40
Figure II.21 : Croquis d'empilage de sandwich en mousse FGM utilisé par J.Zhou et al	41
Figure II.22 : les résultats des essais expérimentaux de J. Zhou et al	41

CHAPITRE III

Figure III.1: Quelques formes complexes possibles à programmer sur ABAQUS	42
Figure III.2 : Présentation de l'interface ABAQUS	43
Figure III.3 : Déférentes structures de sandwichs utilisées dans la présente étude	44
Figure III.4 : Modélisation géométrique de l'âme du panneau sandwich	48
Figure III.5 : Modélisation géométrique des semelles du panneau sandwich	48

Figure III.6 : Propriétés mécanique de l'âme et de semelles.....	49
Figure III.7 : Assemblage des éléments	49
Figure III.8: Gestion de la méthode de calcul dans le module step.....	50
Figure III.9 : Contact de l'âme avec les deux semelles.....	51
Figure III.10 : Conditions aux limites de module load	51
Figure III.11 : Définition des forces de module load. (Chargement en flexion a 3 points)	52
Figure III.12 : Chargement thermique des semelles	52
Figure III.13 : Configurations pour la validation de la sensibilité au maillage.....	53
Figure III.14 : Étude de la sensibilité du maillage (maillage en fonction de la force max correspondante)	54
Figure III.15 : Création de fichier job	54
Figure III.16 : Visualisation et exploitation des résultats.....	55

CHAPITRE IV

Figure IV.1 : Histogramme force max déplacement correspondant	56
Figure IV.2 : Confrontation des courbes forces-déplacements du modèle numérique vs le courbe expérimental disponible en littérature	56
Figure IV.3 : Effet de P sur une âme de deux couches	57
Figure IV.4 : Effet de P sur une âme de trois couches	58
Figure VI.5 : Effet de P sur une âme de cinq couches	58
Figure IV.6 : Effet de nombre de couches pour $p=0.1$	59
Figure IV. 7 : Effet de nombre de couches pour $p=1$	59
Figure IV.8 : Effet de nombre de couches pour $p=10$	59
Figure IV.9 : Propagation des contraintes dans l'âme simple âme et âme FGM 2 couches. ..	61
Figure IV.10 : Propagation des contraintes dans âme graduée : 3 couches et âme 5 couches.62	
Figure IV.11 : Propagation des contraintes dans les semelles de la structure simple et structure âme graduée 2 couches.....	63
Figure III.12 : Propagation des contraintes dans les semelles de la structure âme graduée : 3 et 5 couches	64
Figure IV.13 : Effet de P sur une âme de deux couches	66
Figure IV.14 : Effet de P sur une âme de trois couches	66
Figure IV.15 : Effet de P sur une âme de cinq couches	67

Figure IV.16 : Effet de nombre de couches pour $p=0.1$	67
Figure IV.17 : Effet de nombre de couches pour $p=1$	68
Figure IV.18 : Effet de nombre de couches pour $p=10$	68
Figure IV.19 : Évolution des contraintes de Von-Mises dans l'âme simple et 2 couches sous charge thermomécanique.....	70
Figure IV.20 : Evolution des contraintes de Von-Mises dans l'âme 3 couches et 5 couches sous charge thermomécanique.....	71
Figure IV.21 : Evolution des contraintes de Von-Mises dans la semelle de la structure simple et âme 2 couches, 3 couches et 5 couches sous charge thermomécanique	72
Figure IV.22 : Evolution des contraintes de Von-Mises dans la semelle de la structure de 3 couches et 5 couches sous charge thermomécanique	73

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III.1 : Tableau des unités correspondant à ABAQUS	42
Tableau III.2 : Paramètres du modèle élastique orthotrope pour le tissu en fibre de verre.....	44
Tableau III.3 : Les densités et rigidités pour âme avec deux couches	45
Tableau III.4 : Les densités et rigidités pour âme avec 3 couches	45
Tableau III.5 : Les densités et rigidités pour âme avec 5 couches	46
Tableau III.6 : Les densités et rigidité pour les matériaux 1 et 2	46
Tableau III.7 : Paramètres du modèle élasto-plastique pour les matériaux d'âme	46

NOTATIONS & NOMENCLATURE

FGM : Functionally graded materials (matériaux à gradient fonctionnel).

CBT : La théorie du premier ordre d'Euler-Bernoulli

FSDBT : La théorie de Timoshenko.

$g(\mathbf{z})$: La fraction volumique des matériaux à gradient fonctionnel.

P : Paramètre qui tient compte du changement du matériau suivant la hauteur.

θ : température (c°)

E : module de Young

D : la densité kg/m³

α : Coefficient de dilatation thermique

ν : Coefficient de poisson

C : Coefficient de conductivité thermique

λ : La conductivité thermique

M : Moment de flexion

N : Un effort normal

T : Un effort tranchant

R : La résistance thermique

T : Température (C°)

Introduction

général

Pour répondre aux besoins des structures civiles en terme d'isolation thermique, phonique et acoustique, les structures sandwichs multicouches reçoivent une attention considérable et deviennent de plus en plus incontournables, grâce à leurs rapports : rigidité-poids et résistance-poids élevé, capacité d'absorption d'énergie, ainsi que leur excellente durabilité. Ces structures sont destinées à des applications d'isolation de toiture et de parois de cloison, permettant ainsi d'améliorer les propriétés thermiques et acoustiques de la structure.

La construction en sandwich est un concept qui existe depuis 1820 [1]. Cependant, il a fallu un siècle pour que l'utilisation en masse commence. Contrairement aux structures métalliques, sa structure en panneaux sandwichs avec des peaux et une âme confère une grande légèreté. Plus récemment, la construction sandwich est de plus en plus utilisée dans les projets de réhabilitation des infrastructures routières (Génie civil) telles que la fabrication des tabliers de ponts où la légèreté, la durabilité et la résistance à la corrosion sont indispensables. Cependant là, il existe une incohérence dans les caractéristiques thermiques et mécaniques à l'interface des « deux matériaux différents » qui constituent les structures sandwichs classiques. Cela provoque des changements brusques dans les contraintes inter faciales. Une solution à ce problème est de prendre en compte les « matériaux de qualité fonctionnelle » (FGM) dans la conception des sandwichs [2].

Les matériaux à gradient fonctionnel sont une nouvelle classe de matériaux composites dont les propriétés thermomécaniques varient selon une loi de fonction continue à travers l'épaisseur. (Les FGM) (*Functionally Graded Materials*) ont une microstructure et une composition qui varie graduellement et continûment de manière qui permet d'éviter les concentrations de contraintes au niveau des interfaces. Cette classe de matériaux a suscité une attention particulière et un intérêt grandissant dernièrement grâce à l'avantage de la continuité des propriétés physiques dans une ou plusieurs directions. C'est en 1984 [3] qu'un groupe de recherche japonais ont introduit pour la première fois cette philosophie des matériaux intelligents capables de résister à des gradients de température très importants.

Dans cette optique, le travail de mémoire proposé, est porté sur la simulation numérique d'une structure sandwich à base d'une âme en FGM en mousse de PVC, et des semelles identiques en fibres de verre destinées à des applications d'isolation de toiture et de parois de cloison, permettant ainsi d'améliorer les propriétés thermiques et acoustiques. En effet, une modélisation du comportement mécanique et thermomécanique d'une structure composite multicouche, avec des propriétés matérielles différentes (densité et module de Young) pour chaque couche constitutive est menée à l'aide du logiciel ABAQUS. L'originalité de la conception proposée est de souligner l'apport des FGM sur les caractéristiques physiques et mécaniques des structures sandwichs. Les grandes directives entreprises dans ce travail de mémoire se résument comme suites :

- Présenter un état de l'art actualisé sur les structures composites multicouches et FGM, ainsi que leur intérêts et applications en génie civil ;
- Modélisation des matériaux qui constituent la conception proposé (matériaux : FGM et élastiques orthotropes)
- Développer un modèle élément fini pour de prédire la réponse des sandwichs sous chargement mécanique et thermique à l'aide du code de calcul ABAQUS ;

- Valider le modèle proposé par les études ultérieures disponible dans la littérature scientifique, et enfin présenter les différents résultats (âme continue, âme graduée) en termes de contraintes et déformations.
- Mettre en évidence l'effet de la disposition de l'âme en FGM sur le comportement mécanique et thermique des structures sandwiches.

Pour atteindre nos objectifs nous avons scindé le mémoire en deux grandes parties. La première partie est une synthèse bibliographique composée de deux chapitres :

Le premier chapitre présente une revue sur les matériaux et structures composites ; on a commencé par une présentation d'isolation thermique et phonique des structures, suivie d'une présentation sur les matériaux composites (définition les monocouches UD, les multicouches, les sandwiches, les stratifiés, procédés de fabrication...etc.) ; avec le détail de la présentation d'un sandwich. On a clôturé ce chapitre par un préambule sur les matériaux à gradient fonctionnel « FGM », l'histoire de leur développement, leurs propriétés et leurs domaines d'application.

Le deuxième chapitre porte sur « Le Comportement des sandwiches gradués » ce chapitre est dédié à la description du comportement des structures sandwiches sous différent chargement que ça soit mécanique ou bien thermique, les différentes théories des sandwiches en FGM. Enfin une synthèse des travaux antérieurs sur les sandwiches est réalisée, listant ainsi les différents travaux expérimentaux menés sur les structures sandwiches y compris ceux en âme en FGM.

La deuxième partie est consacrée à la modélisation et simulation numérique, présentation des résultats et discussions ainsi que les différentes étapes suivies pour réaliser ce travail elle comporte aussi deux chapitres :

Le troisième chapitre, « Modélisation et simulation par éléments finis » tout d'abord une brève présentation du logiciel utilisé, puis on donne un aperçu sur les modèles de matériaux utilisés : comportement expérimental des matériaux utilisés, modèle numérique adoptés jusqu'au lancement du calcul. Les principales étapes de la simulation et les variantes de l'étude considérées sont aussi présentées.

Le quatrième chapitre regroupe les principaux résultats obtenus sur le comportement mécanique et thermomécanique des sandwiches en FGM en utilisant ABAQUS.

Enfin, conclusion, discussions et perspectives pour terminer ce travail.

Chapitre I

Revue sur les structures composites

I.1 Introduction

Le point de départ de cette revue bibliographique est lié à l'étude d'isolation thermique et phonique des structures qui est une partie indispensable lors de la construction. Le choix de bons matériaux isolants qui ont pour rôle de ralentir le transfert de chaleur à travers l'enveloppe est une étape importante. Donc pour améliorer les performances de ces matériaux les chercheurs ont développées des matériaux qui ont des hautes caractéristiques qui sont les matériaux composites. Ce type de matériau est généralement constitué de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes et disposés sous forme de stratifié dont l'association aboutit à un assemblage avec des performances supérieures à celles des composants pris séparément [1]. Par la suite des problèmes de l'interface sont remarqués lors d'optimisation locale des propriétés des composites, par association d'un matériau de haute dureté à la surface d'un matériau tenace, comme solution ils ont opté pour les FGM (Functionally graded materials).

Les matériaux à gradient variable FGM sont un type de matériaux composites dans lesquels les propriétés du matériau sont conçues pour faire varier de façon continue et progressivement d'une surface à l'autre. À la différence des composites stratifiés, les FGM éliminent la contrainte indésirable de discontinuité existante entre deux surfaces en matériaux composites stratifiés. En effet, ce chapitre a pour objectif de définir les matériaux composites et FGM par une description de leurs constituants, comportements et propriétés.

I.2 Isolation thermique et phonique des structures

L'isolation des bâtiments comprend la prévention du bruit (isolation phonique), la prévention contre la chaleur (isolation thermique). L'isolation thermique et acoustique d'une maison ne doit pas être prise à la légère. Elle va conditionner le confort de vie des habitants. C'est pourquoi la nécessité de choisir les bons matériaux isolants et les bonnes techniques d'isolation. [2] L'isolation thermique permet à la fois de réduire les consommations d'énergie de chauffage et/ou de climatisation et d'accroître le confort. [3]

I.2.1 Isolation thermique

L'isolation thermique désigne l'ensemble des techniques mises en œuvre pour limiter les transferts de chaleur entre un milieu chaud et un milieu froid. On retrouve de l'isolation thermique dans : le bâtiment (maintien d'une température de confort à l'intérieur des habitations), l'industrie, l'automobile, le textile ...etc. [6]

Les isolants dans les bâtiments sont utilisés pour assurer un certain confort : prévoir un générateur de chaleur et frein des déperditions. L'isolation est utilisée surtout à cause du mode constructif moderne qui tend à limiter l'épaisseur des parois opaques et à augmenter les surfaces vitrées. Elle permet d'éviter qu'il se produise de la condensation sur les parois et dans les parois. Comme elle évite la sensation de la paroi froide en hiver. Des murs bien isolés diminuent les transferts de chaleur de 25 à 35 % des transferts totaux du bâtiment. [4]

Les maisons climatisées perdent ou absorbent continuellement de la chaleur à travers tous leurs parois. Par conséquent, l'isolement comprendra la réduction des pertes ou des contributions indésirables [5].

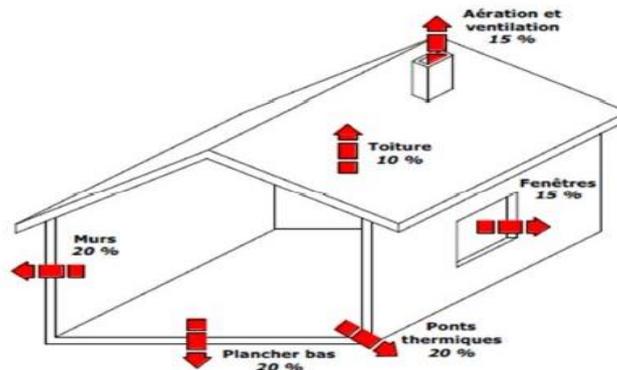


Figure I.1 : Répartition moyenne des déperditions Dans une maison individuelle neuve. Source : Liébard A., De Herde A., 2005 [7]

I.2.1.1 Types d'isolation thermique

La mise en œuvre de l'isolation se fait suivant trois techniques :

I.2.1.1.1 Isolation par l'intérieur

Elle représente l'avantage d'être maîtrisée par tous les intervenants du bâtiment (simple à mettre en œuvre) avec un coût raisonnable, mais elle est loin d'être la plus courante. L'isolation interne des murs consiste à doubler les parois internes d'un isolant thermique. En d'autres termes, il faut intégrer l'isolant sur la face intérieure de l'habitation au niveau des murs extérieurs, des combles et des sols.

Les isolants intérieurs, plus ils sont performants plus l'influence relative de ponts thermiques s'accroît. Rappelons aussi qu'une isolation intérieure, même performante, présente toujours une faible inertie thermique. [7]

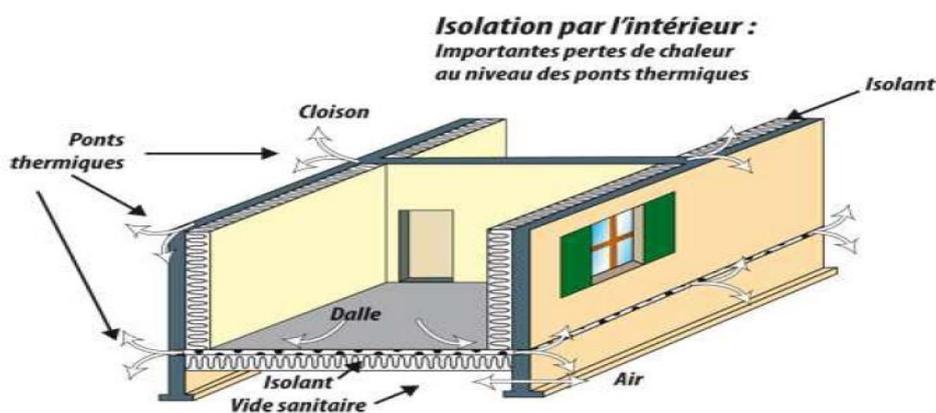


Figure I.2 : Isolation par l'intérieur simple à mettre en œuvre [6]

I.2.1.1.2 Isolation par l'extérieur

L'isolation par l'extérieur est la méthode la plus intéressante grâce à ses avantages multiples et importants, elle est réalisée par un isolant posé sur tous les murs extérieurs, recouvert d'un enduit ou d'un bardage. La toiture peut également être isolée par le même procédé. Elle est efficace pour le traitement des ponts thermiques, elle permet de supprimer la majorité de ces derniers tels que abouts de plancher ou de refends encadrement des baies (avec certaines précautions) notamment ceux des planchers intermédiaires.

L'isolation par l'extérieur permet également de bénéficier pleinement de l'inertie thermique (qui améliore le confort intérieur), des parois en maçonnerie, qu'elle protège des changements de températures. En été, cela permet d'économiser sur la climatisation, en évitant que les murs accumulent la chaleur [7].

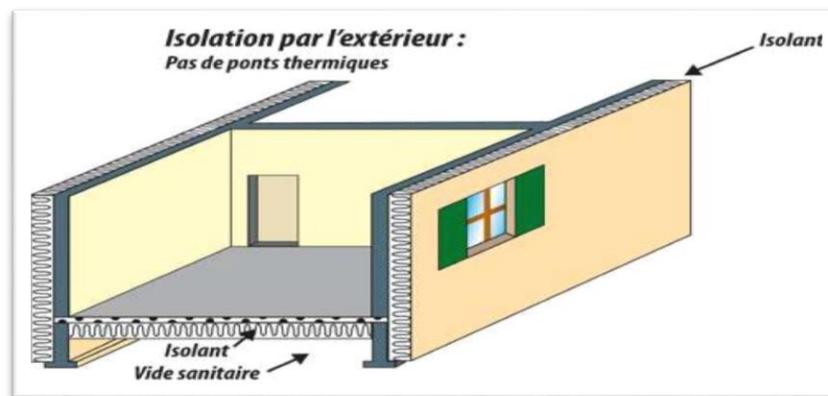


Figure I.3 : Isolation par l'extérieur [6]

I.2.1.2 Caractéristiques principales de l'isolation thermique [7]

Afin de traiter des problèmes thermiques et énergétiques des bâtiments en rapport avec les matériaux isolants, on fait intervenir deux principaux paramètres thermo-physiques qui sont définis comme suit :

I.2.1.2.1 La conductivité thermique

Il s'agit d'une donnée intrinsèque à chaque matériau, qui caractérise uniquement ses performances isolantes. Le coefficient λ d'un matériau caractérise sa capacité à transmettre la chaleur par conduction. Ainsi, plus λ est grand, plus le matériau est conducteur, et plus λ est petit, plus le matériau est isolant thermiquement.

I.2.1.2.2 La résistance thermique ($R = 1/K$) ou coefficient de conductance K [8]

La résistance thermique est le rapport de l'épaisseur d'un matériau à sa conductivité thermique (e/λ). Elle s'exprime en mètre carré et en degré Celsius par watt ($m^2 \cdot ^\circ C/W$). Plus R est élevée, meilleure est la performance d'isolation. Ce qui diminue les déperditions en hiver et les apports thermiques en été (transfert de chaleur par parois et vitrage).

Dans un mur constitué de plusieurs couches de matériaux d'épaisseurs différentes, la relation donnant la résistance thermique s'écrit comme suit :

$$\frac{1}{k} = \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} \quad (\text{I. 1})$$

$1/h_e + 1/h_i$: somme des coefficients d'échange superficiels externe et interne en ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$).

$R = 1/K$: somme des résistances thermiques ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$)

I.2.1.3 Les types d'isolants thermiques

Les isolants thermiques sont classés en deux grandes familles : les isolants naturels et les isolants synthétiques :

I.2.1.3.1 les isolants naturels

- **Laine de roche** : est un isolant à base de silice, a une composition non uniforme, elle se présente sous forme des panneaux nus ou composites et sous forme des rouleaux.
- **Laine de verre** : se présente sous forme des rouleaux et des panneaux nus ou composites.
- **Perlite expansée** : se présente sous forme des panneaux, en vrac (billes ou paillettes brutes et en blocs de construction.
- **Verre cellulaire** : est une mousse de verre obtenue par expansion de verre lorsqu'il est en fusion. Elle se présente également sous forme de panneaux rigides.

Les isolants en fibres végétales : de lin, laine de mouton, plumes de canard, fibres de coco, panneaux de roseaux, ouate de cellulose...

- **Fibre de bois** : Le bois, matériau cellulosique est un faible conducteur thermique étant donné qu'il dispose de très peu d'éléments libres et qu'il est très poreux. Il est donc souvent utilisé comme matériau d'isolation ou coupe-feu.
- **Le liège** : est un excellent isolant thermique et acoustique, il démontre une faible conductivité en relation à la chaleur, au son et aux vibrations.



Figure I.4 : Isolation de la toiture, des murs creux et des toitures et des combles isolés [9]

I.2.1.3.2 Les isolants synthétiques

Les isolants synthétiques sont généralement utilisés comme isolation par l'extérieur. Il existe plusieurs types d'isolant synthétiques, nous citons quelques exemples :

- **Le polystyrène expansé** : Il s'agit de panneaux à base de mousse expansée de polystyrène. L'EPS ne peut pas être exposé à des températures excédant 70°C.
- **Le polyuréthane et le polyisocyanurate** : Il s'agit de panneaux à base de mousse expansée de polyuréthane ou de polyisocyanurate.
- **La mousse phénolique** : Il s'agit de panneaux à base de mousse phénolique à structure cellulaire fermée. Elle possède un bon comportement au feu [9].

I.2.2 Isolation phonique

I.2.2.1 Définition

L'isolation acoustique aussi appelée isolation phonique, permet de limiter le bruit émanant de l'extérieur et des habitations voisines ainsi que des autres pièces d'un même logement et permet d'éviter sa propagation [2]. Dans un milieu compressible, le plus souvent dans l'air, le son se propage sous forme d'une variation de pression créée par la source sonore. La vibration se propage, et non les atomes qui ne font que vibrer très faiblement autour de leur position d'équilibre. [2] [10]. La performance acoustique va dépendre de 3 facteurs :

- les propriétés techniques des différents matériaux utilisés dans la construction
- la mise en œuvre des systèmes acoustiques : liaisons entre les matériaux constituant une paroi.
- le contexte architectural du bâtiment existant.

I.2.2.2 Les méthodologies d'isolation phonique

La loi de masse ou loi des masses est une loi de l'isolation phonique. Les bruits provenant d'un milieu (émetteur) sont transmis jusqu'à un milieu récepteur. Toute paroi homogène soumise à une onde sonore d'incidence normale à l'une des surfaces de cette paroi, génère un isolement régi par la loi de masse : [11]

$$R = 20 * \lg \frac{\omega M}{2\rho c} \quad (\text{I. 2})$$

R : l'indice d'affaiblissement acoustique de la paroi,

$\omega = 2\pi f$: la pulsation, en rad/s.

M : la masse surfacique de la paroi, en kg/m²

$Z=\rho c$ l'impédance caractéristique (ou impédance spécifique) de l'air (~410 Ns/m³).

En général, plus un matériau est dense, plus il est isolant acoustique (loi de masse). Des effets de peau et de résonance sont toutefois à prendre en compte si le matériau n'est pas rigide (tôle, plaque fine...). Exemple de liège ; Le liège allie l'effet « amortisseur » en faisant un très bon absorbant du bruit à un effet « masse » qui est la base de l'isolation acoustique. [9]

I.3 Les matériaux composites

Du fait que les matériaux métalliques conventionnels ont commencé à montrer leurs limites face à une conception de pièces et de machines, puisque leur tenue aux contraintes thermiques est très limitée ; donc, le soucis des chercheurs est orienté vers la recherche de matériaux avec un rapport résistance/poids assez élevé ; donc des matériaux composé de plus d'une matière, ont été utilisés avec succès dans l'industrie aéronautique et dans d'autres applications technologiques avant d'être appliqués dans le domaine de génie civil. Ces matériaux sont appelés matériaux composites qui sont venus apporter quelques solutions à ces limites [12].

I.3.1 Définition

Un matériau composite est l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux non *miscibles*¹ et *anisotropes*², de nature différente, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieure à celui des composants pris séparément d'après Berthelot [1]. Leurs principaux avantages en comparaison avec les matériaux de construction traditionnels sont : leur haute résistance mécanique et chimique, grande rigidité, liberté de forme, légèreté, ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés, Ils offrent une meilleure isolation thermique. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger les structures et de réaliser des formes complexes aptes à remplir plusieurs fonctions.

Un matériau composite est constitué d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase continue est appelée la *matrice*. La phase discontinue est notée *renfort*, elle présente usuellement des propriétés mécaniques (rigidités et résistances) supérieures à celle de la matrice.

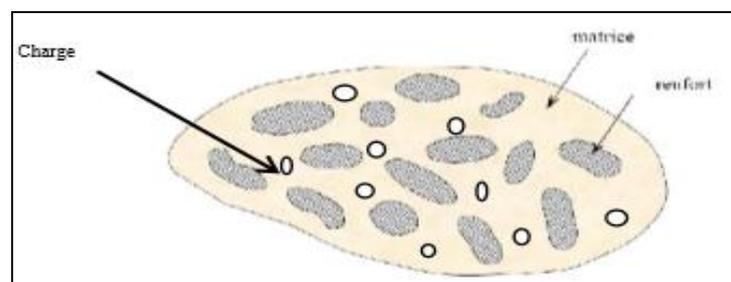


Figure I.5 : Constituants d'un matériau composite [1]

¹ Les matériaux sont dits non-miscibles s'ils ne peuvent pas se mélanger et forment un mélange [hétérogène](#)

² *Anisotrope* : les propriétés sont différentes selon les différentes directions.

I.3.2 Différents types de constituants de base

Un matériau composite est l'association de deux constituants :

- La matrice (la résine). Une matrice organique, résine thermoplastique (TP) ou thermodurcissable (TD).
- Une structure de renfort constituée de fibres, qui peuvent être de verre, de carbone, d'aramide ou de fibres naturelles (lin, chanvre, sisal).

Ces deux constituants principaux reçoivent des additifs ou charges nécessaires pour assurer une adhérence suffisante entre le renfort fibreux et la matrice. Ils permettent également de modifier l'aspect ou les caractéristiques. [13]

I.3.2.1 Les matrices

La matrice : lie les fibres renforts, répartie les efforts, assure la protection chimique. Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés. [14]

Les résines les plus employées dans les matériaux composites sont les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques.

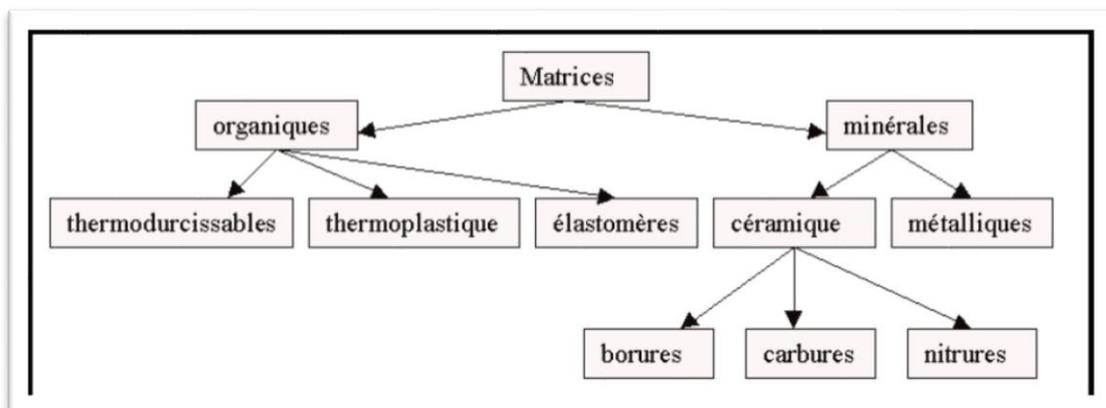


Figure I.6 : Différents types de matrices [15]

I.3.2.2 Les renforts

Ils constituent l'armature ou le squelette du matériau composite, il assure la tenue mécanique (résistance à la traction et rigidité). Ils sont souvent de nature filamentaire (des fibres organiques ou inorganiques).

I.3.2.2.1 Architecture des fibres

- **Les unidirectionnels (1D)** : fibres assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres (employés pour la reprise d'effort dans le sens des fibres).

- **Toile ou taffetas** : bonne planéité et rigidité, mais les nombreux entrecroisements successifs imposent une longueur de fil importante.
- **Serge** : a une plus grande souplesse que la toile et une bonne densité de fils, ci-dessous un sergé 2/2 (employé pour les pièces difficiles à mettre en œuvre).
- **Satin** : Tissu souple et adapté pour surfaces complexes (employé pour de grandes résistances).
- **Mats** : Fibres coupées ou continues disposées aléatoirement suivant toutes les directions. Non compatibles avec les résines époxydes.

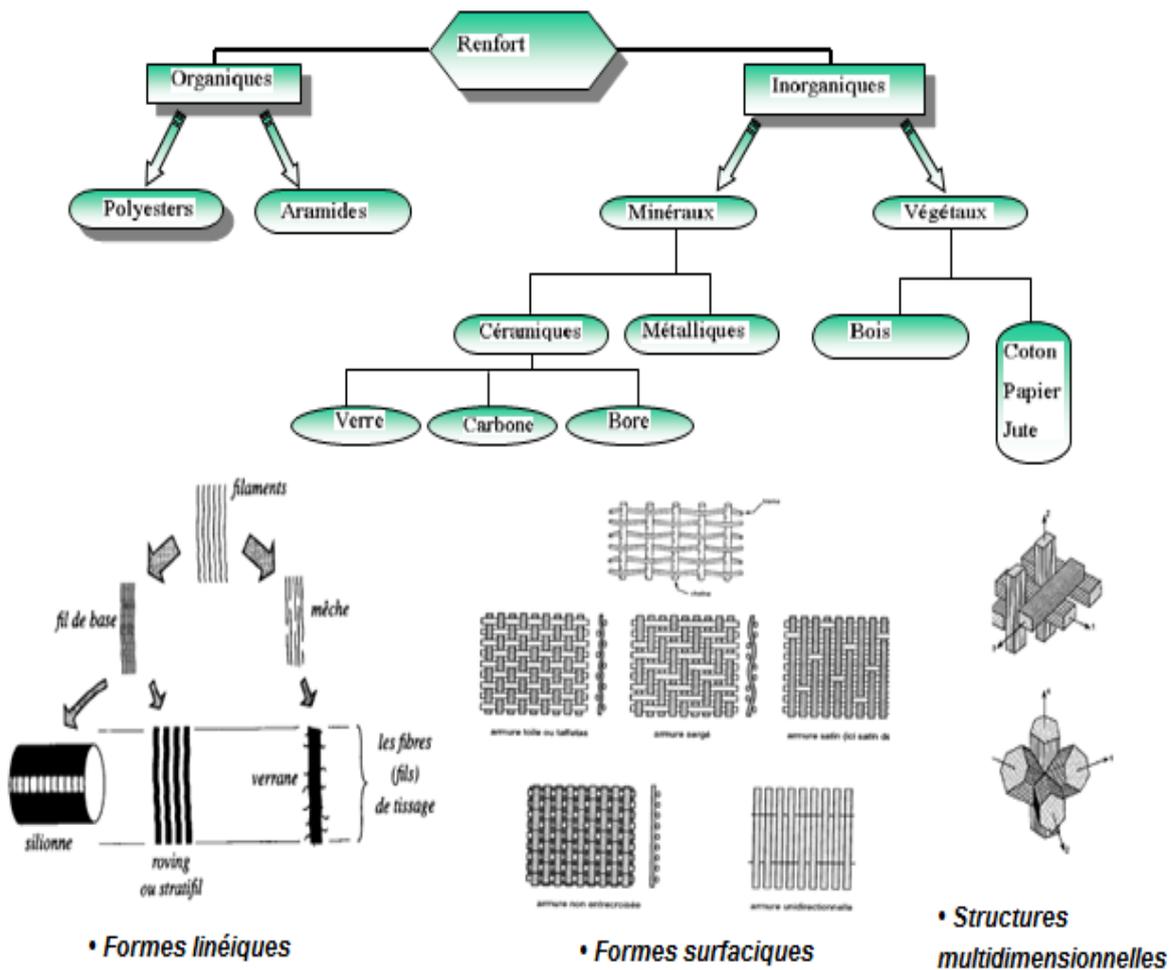


Figure I.7 : Organigramme de différentes familles de renfort [16]

I.3.2.2.2 Les différentes fibres

- **Les fibres de carbone** : présentent des propriétés mécaniques très élevées (haut module, haute résistance, faible dilatation thermique) et sont utilisées pour les applications

industrielles de hautes performances. Le diamètre d'une fibre de carbone est de l'ordre de 5mm. Il s'agit par sa structure moléculaire d'un matériau anisotrope³.

- **La fibre d'aramide** est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes : Les fibres à bas et haut module.
- **Les fibres de verre** : Plus abordables, présentent des propriétés mécaniques plus faibles mais néanmoins intéressantes. Les fibres de verre, constituées essentiellement de silicate, ont un diamètre d'environ 10mm et sont des matériaux *isotropes*.⁴ . [17]
- **Les fibres végétales** Comme le chanvre ou le coton, présentent des propriétés mécaniques faibles mais ont un coût de fabrication dérisoire comparativement aux autres types de fibres.

I.3.3 Avantages / limitations

L'usage des matériaux composites augmente d'un jour à l'autre, et cela couvre plusieurs domaines ; ces matériaux possèdent beaucoup d'avantages :

- Poids négligeable par rapport aux solutions métalliques précédentes. En effet, ces matériaux confèrent aux structures une rigidité et résistances spécifique.
- Possibilité de réaliser des structures de formes complexes, réduisant ainsi les coûts d'assemblages.
- Faible sensibilité à la fatigue et à la corrosion.
- Possibilité de fabriquer des matériaux avec des propriétés particulières.

Toutefois, ces matériaux présentent des inconvénients, tels que :

- Faible conductivité électrique des composites à matrice organique, ce qui constitue un problème important pour la résistance aux impacts de foudres des fuselages composites.
- Forte sensibilité aux singularités géométriques (de type trou, entaille...) constituant des maillons faibles au sein de la structure.
- Coût important du passage matériau métallique à matériau composite, prenant en compte le coût matériau (des constituants) et le coût associé au procédé de fabrication.
- Dispersion du matériau plus importante que pour les matériaux métalliques induisant un surcoût des campagnes de qualification (nombres de répétitions d'essais imposées).
- Sensibilité à l'environnement des matrices organiques entraînant une perte de propriétés mécaniques notables après vieillissement thermique ou hydrique. [14]

³ Les propriétés sont différentes selon les différentes directions

⁴ Même propriétés dans toutes les directions

I.3.4 les structures composites

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types : les monocouches, les stratifiées Les sandwiches.

I.3.4.1 Monocouches

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes. [15]

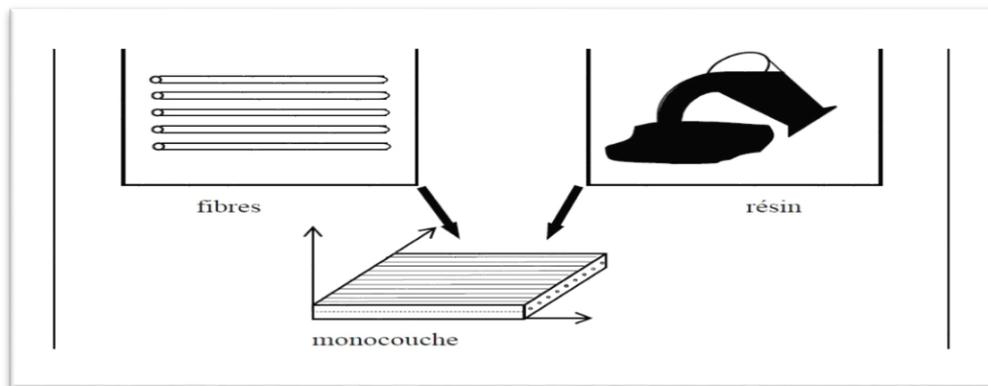


Figure I.8 : Constitution d'une monocouche [15]

I.3.4.2 Stratifiés

Un stratifié, est un matériau qui résulte de la superposition de plusieurs plis unidirectionnels, tissus ou avec des orientations propres à chaque pli. Cette opération est appelée drapage [18].

Les avantages des stratifiés résident dans la possibilité d'adapter et de contrôler l'orientation des fibres pour que le matériau résiste à des sollicitations déterminées.

Les stratifiés de plis unidirectionnels présentent des rigidités et des résistances dans le plan très élevés. Toutefois, Le décollement de deux plis, nommé délaminage, constitue le point faible majeur de ce type de matériaux et explique leur faible tenue à l'impact [19] [20]

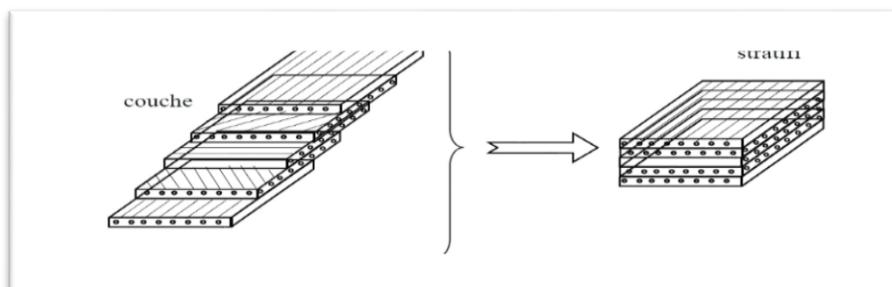


Figure I.9 : Constitution d'un stratifié [15]

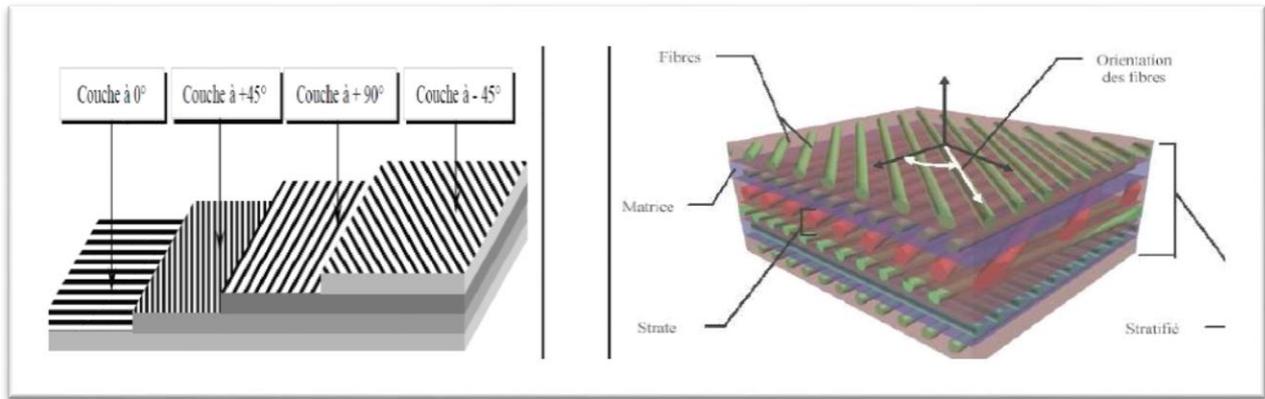


Figure I.10 : Désignation d'une structure composite stratifiée [21]

I.3.4.3 Structure sandwich

Un sandwich est une structure à trois couches se composant de deux peaux (faces) inférieure et supérieure qui sont de faibles épaisseurs réalisées dans un matériau ayant de très bonnes caractéristiques mécaniques (module élevé, grande résistance), collées à l'aide d'une résine compatible avec les matériaux en présence (ou soudées) sur une âme intermédiaire de forte épaisseur, réalisée avec un matériau très léger et ayant de faibles caractéristiques mécaniques (faible densité). Une telle structure présente des rapports résistance/masse et rigidité/masse très importants sous chargement de flexion (l'épaisseur important d'âme permet d'augmenter le moment d'inertie de la structure, et par conséquent sa rigidité en flexion, tout en minimisant la masse de l'ensemble).

Dans un sandwich, il ne faut pas oublier un troisième composant : l'adhésif. C'est ce dernier qui permet un bon assemblage de la structure et aussi une bonne transmission des contraintes d'un milieu à l'autre. [21] [14]

Ces structures ont une grande rigidité en flexion et torsion. L'âme de la structure sandwich résiste principalement aux contraintes de cisaillement et de compression hors plan, les peaux inférieures et supérieures supportent quant à elles les efforts dans leur plan. [14]

I.3.4.3.1 Sandwichs symétriques

Une structure sandwich symétrique est constituée de deux peaux ou semelles identiques.

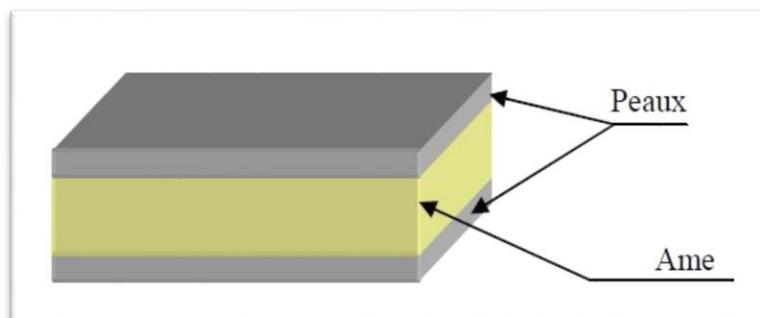


Figure I.11 : Constituants d'une structure sandwich symétrique [22]

I.3.4.3.2 Sandwiches dissymétriques

A l'instar des structures sandwichs classiques constitués d'une âme placée entre deux semelles identiques, les structures sandwichs dissymétriques reposent sur une idée différente. Un sandwich dissymétrique est constitué d'une âme et de deux peaux différentes, voir (Figure I.2).

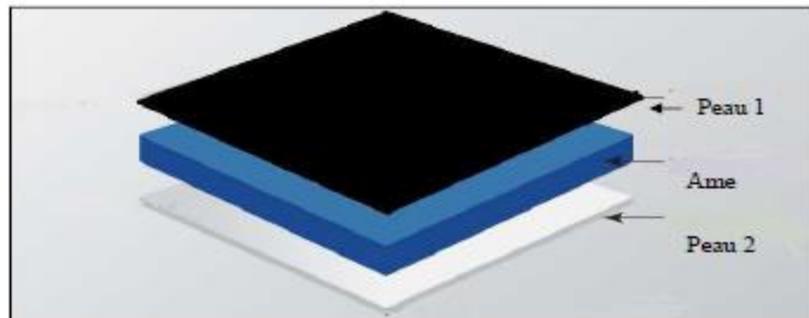


Figure I.12 : Constituants d'une structure sandwich dissymétrique [22]

I.3.4.4 La classification des sandwichs

Les sandwichs sont classés en trois catégories en fonction des valeurs du rapport d/t_f (d étant la distance séparant l'axe neutre de chacune des peaux). Pour un sandwich symétrique (peaux de même épaisseur) $d = t_c + t_f$.

- Si le rapport d/t_f est supérieur à 100, on parle de sandwichs à peaux très fines.
- Si d/t_f compris entre 100 et 5,77 le sandwich est considéré comme ayant des peaux fines.
- Si d/t_f est inférieur à 5,77 la structure est dite à peaux épaisses.

On définira les bornes limites par rapport à la contribution de chaque constituant vis-à-vis de la rigidité en flexion et en cisaillement du sandwich.

En plus de leur bonne rigidité en flexion, de leur bonne résistance au flambement et de leur légèreté, les matériaux sandwichs possèdent également de bonnes propriétés d'isolation thermique et phonique. Ceci explique leur emploi de plus en plus fréquent comme cloison. [23]

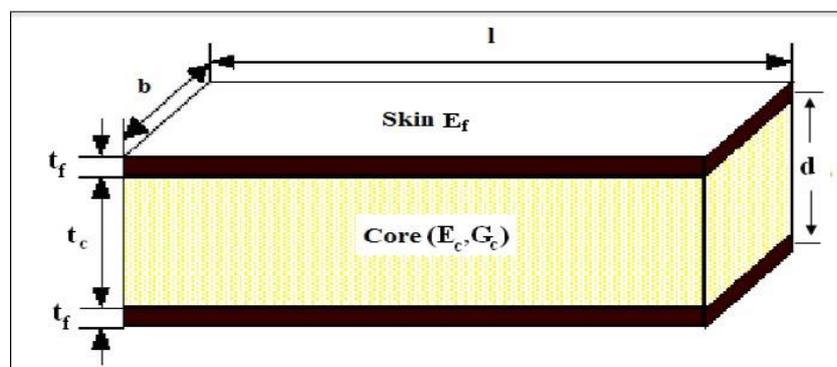


Figure I.13 : Schéma d'un sandwich [23]

I.3.4.5 Les constituants des matériaux multicouches

I.3.4.5.1 Les semelles

Les peaux généralement de faibles épaisseurs, les peaux sont constituées de tout matériau pouvant être obtenu sous forme de couche. Le choix de la nature de la peau s'effectue principalement en fonction des performances mécaniques exigées. Mais en général, une rigidité élevée et une excellente résistance à la compression et à la tension sont les principales qualités recherchées reprendre les efforts de flexion traduit par des contraintes normales (traction ou compression). [24]

La nature de matériaux composant les semelles peut être métalliques ou non métallique, dans cette dernière catégorie, les matériaux les plus intéressants sont les composites à base de fibres. En effet, ils peuvent offrir de bonnes propriétés de raideur et de résistance pour une masse moins importante que les matériaux métalliques. Ils sont anisotropes : l'orientation des fibres permet de reprendre les efforts dans une ou plusieurs directions préférentielles. [25]

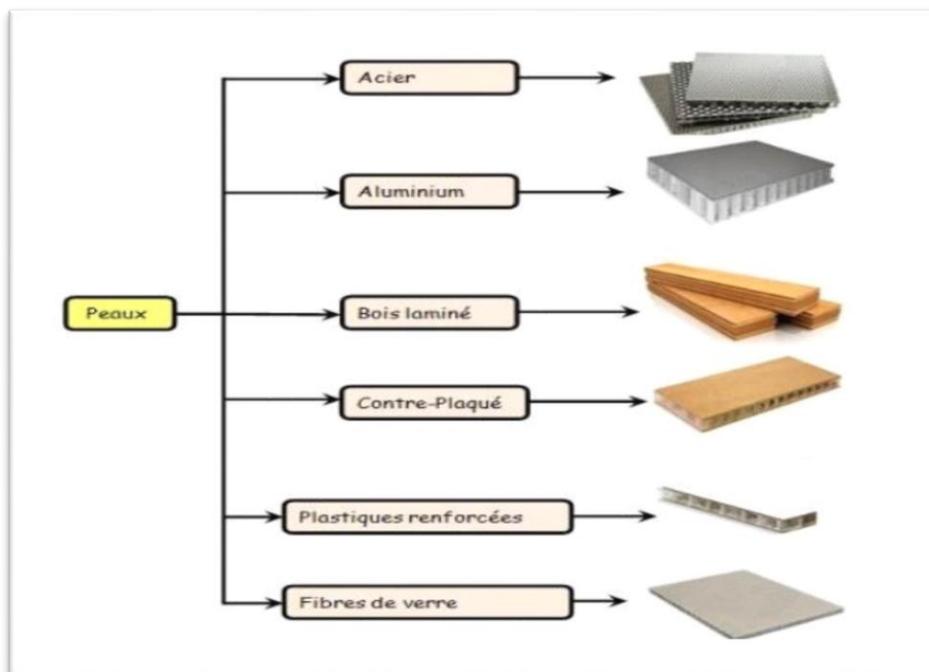


Figure I.14 : Les différents matériaux de fabrication des peaux [26]

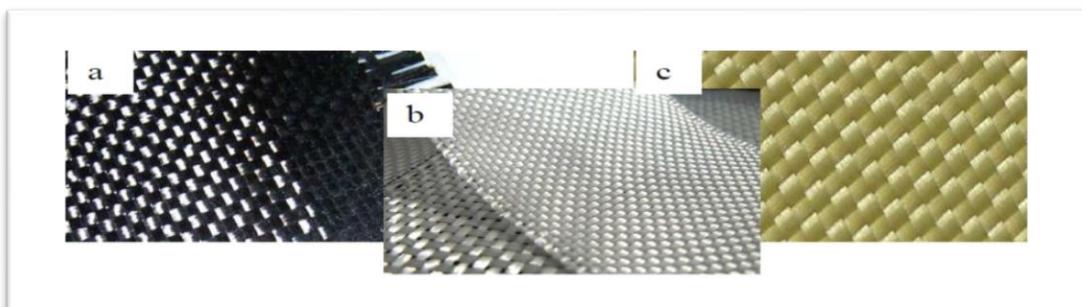


Figure I.15 : Les différents tissus : a) fibre de verre ; b) fibre de carbone c) ; fibre de kevlar [27]

I.3.4.5.2 L'âme

C'est l'élément central d'une structure sandwich. Elle se caractérise par une faible masse et des faibles caractéristiques mécaniques. Son rôle principal est de supporter les efforts de compression et de cisaillement engendrés suite au mouvement de glissement des peaux sous chargement, et de maintenir leur écartement.

En effet, si l'épaisseur des panneaux n'est pas maintenue constante, il en résulte une diminution des capacités des peaux externes à résister à la flexion. L'épaisseur élevée de l'âme a pour but d'accroître le moment d'inertie du panneau sans augmenter la masse volumique [18]. Les formes d'âme les plus utilisés se présentent principalement sous deux formes [28] :

- **Âmes pleines** : parmi lesquelles on trouve le balsa (ou bois cellulaire), diverses mousses cellulaires et des résines chargées de microsphères creuses de verres (mousses).
- **Âmes creuses** : essentiellement de type nid d'abeilles et profilé (réseaux métalliques légers, réseaux en papier enduit ou non, réseaux en polycarbonate et en polypropylène).

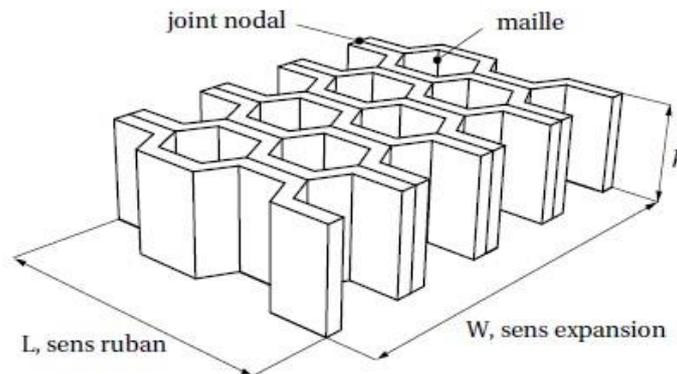


Figure I.15 :schéma d'une âme en nid d'abeille [1]

Les matériaux les plus utilisés dans la fabrication des âmes sont :

- **Les mousses** : ce sont les plus fréquemment utilisées, elles sont produites à partir de polychlorure de vinyle, de PVC, polystyrène, polyuréthane ou d'autres polymères synthétiques. Elles sont thermo formables et permettent donc de réaliser des pièces de formes complexes. Leurs propriétés mécaniques sont bonnes, elles adhèrent bien à la résine et absorbent peu d'eau. Néanmoins, leur point faible réside dans une faible résistance à l'impact [27].
- **Le nid d'abeilles** : l'âme en nid d'abeilles, connue sous le nom « Nida », est un matériau structural souple constitué de mailles hexagonales. Elle est réalisée à partir de différents matériaux métalliques et non métalliques. Le Nida étant une structure *anisotrope*⁵, ses propriétés varient selon le sens transversal ou longitudinal des alvéoles (taille de mailles). De plus, la taille de celles-ci, l'épaisseur des parois du Nida et la méthode de mise en œuvre sont des paramètres qui influencent la résistance au cisaillement transversal et longitudinal du Nida.

⁵ Les propriétés sont différentes selon les différentes directions

- **Le bois** Il est utilisé pour sa très bonne résistance à la compression notamment pour les supports d'accastillage. Le balsa est la variante la plus utilisée pour sa légèreté : 100 kg/m³ de densité volumique. Considérant que le bois est le matériau le moins cher, mais il présente l'inconvénient d'être poreux. [30]

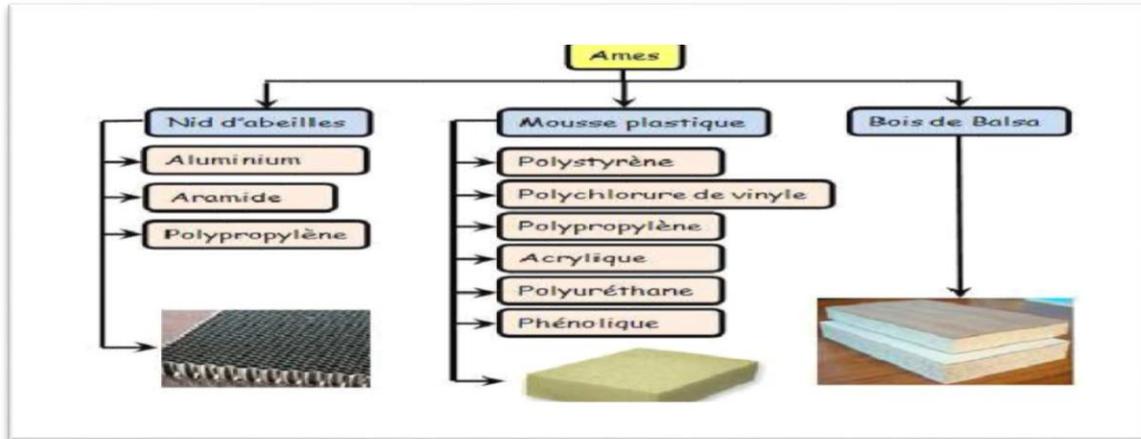


Figure I.16 : Matériaux utilisés pour la confection des âmes de structures multicouches [27]

I.4 Les matériaux FGM

I.4.1 Introduction

Le développement des matériaux composites a permis d'associer des propriétés spécifiques à différents matériaux au sein d'une même pièce. L'optimisation locale de ces propriétés, par association d'un matériau de haute dureté à la surface d'un matériau *tenace*⁶ par exemple, pose alors le problème de l'interface (provoquant le délaminage).

L'interface de couches est une discontinuité des propriétés et des contraintes à ce niveau, cette discontinuité provoque de fortes concentrations de contraintes, un décollement entre les couches dus à un passage brusque dans la composante matérielle. Une technique a été élaborée par un groupe de chercheurs japonais pour surmonter ces effets nuisibles ; il consiste à utiliser un matériau à gradient évalué, sa signification originale est FGM : Fonctionnaly Graded Matériel. [23]

I.4.2 Définition et concept

Les matériaux fonctionnellement gradués sont une nouvelle catégorie de matériau composite non homogène fabriqué à partir de différents composants de matériaux, ces matériaux ont une microstructure et une composition qui varie graduellement et continuellement de manière à optimiser les performances mécaniques et thermiques de la structure qu'ils constituent.

L'idée d'intégration des fonctions désirées dès la conception, au cœur de la même matière les rend des matériaux intelligents. Les applications spécifiques et les conditions environnementales conduisent à choisir chaque interface, ainsi du point de vue de leur potentiel d'application, ces matériaux possèdent un certain nombre d'avantages : amélioration en termes de rigidité, tenue à

⁶ Propriété d'un **matériau** possédant à la fois une forte résistance à la rupture et une faible aptitude à la propagation des fissures-wikipédia- (ils présentent une bonne résistance à la propagation brutale de fissures)

la fatigue, résistance à la corrosion ou conductivité thermique. En plus d'avoir une gradation des propriétés permettant ainsi d'augmenter ou de moduler des performances telles que la réduction des contraintes locales, une meilleure répartition des contraintes résiduelles [31] [32] ou encore l'amélioration du transfert de chaleur.

En 1987, un programme national de recherche et de développement sur les FGM a vu le jour au Japon. Grâce à l'union de chercheurs, des institutions publiques et de l'industrie qui ont collaboré pour maitre a fin un grand projet qui été lancé par le gouvernement Japonais le projet intitulé « la recherche sur la technologie de base pour développement de Matériaux à Gradient de propriétés et l'étude de la relaxation des contraintes thermiques » le fruit de cette collaboration était la construction d'une enveloppe extérieure d'une navette intercontinentale à base d'un matériau FGM. H b. [33]

Le flux de chaleur énorme frappant la majorité des surfaces qui sont exposées à la friction par l'air, lors de la période de rentrée de navette dans l'atmosphère terrestre et la protection intérieure contre un réchauffement étaient les défis majeurs. D'où la nécessité d'utilisation d'un revêtement céramique pour protéger le fuselage contre des températures qui se développent à la surface. L'idée fût alors de produire une transition douce, donc graduelle entre métal pur et céramique pure, appelée matériau à gradient fonctionnel.

En 1990 a eu lieu la première conférence internationale sur les FGM à Sendai-city au Japon. En 1992, les matériaux à gradient fonctionnel ont été sélectionnés parmi les dix premières technologies de pointe au Japon et actuellement dans le monde entier.

I.4.3 Comparaison des matériaux types FGM et les matériaux composites traditionnels

Généralement, les F.G.M sont des matériaux constitués de plusieurs couches contenant des composants différents. Ils sont donc des composites présentant des caractéristiques macroscopiquement inhomogènes. Le changement continu dans la composition et donc dans la microstructure du matériau distingue les F.G.M des matériaux composites conventionnels comme illustré sur la (figure I.17) [34]. Il en résulte un gradient qui déterminera les propriétés matérielles.

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

Figure I.17 : Caractéristiques des matériaux composites FGM selon Koizumi [34].

Des concentrations de contraintes dans les panneaux de protection thermiques conventionnels au niveau des interfaces sont montrées sur (la figure I.19). Il montre également comment un FGM

peut alléger Ces concentrations de contraintes en changeant graduellement les propriétés matérielles et assure toujours la protection thermique trouvée dans les barrières thermiques conventionnelles.

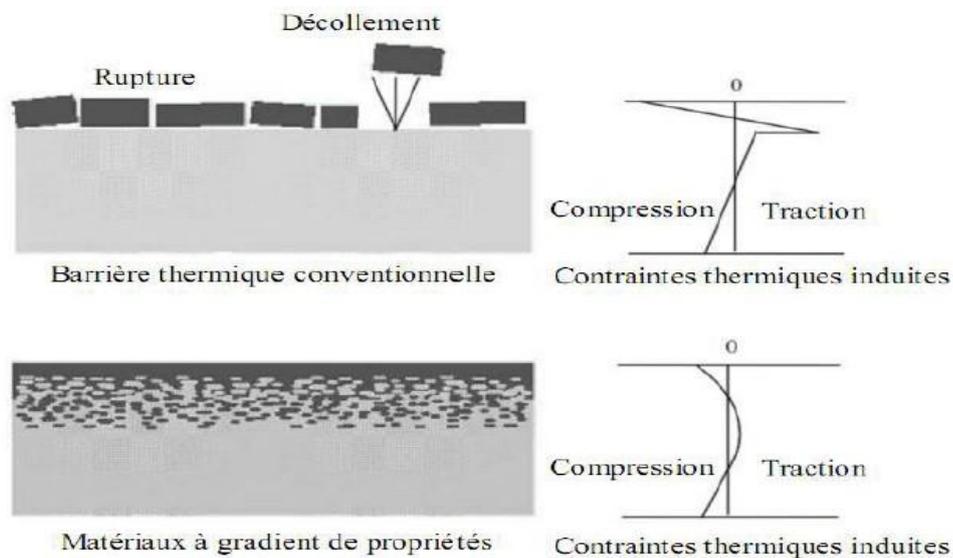


Figure I.18 : les concentrations de contraintes dans les panneaux au niveau des interfaces [35]

I.4.4 Notions sur le gradient des FGM

Contrairement aux matériaux homogènes, les propriétés des FGM changent non seulement en fonction de leur composition mais également en fonction de la connectivité du réseau interne de la structure. Sur la (figure I.19), nous montrons une représentation schématique de la microstructure d'un matériau FGM suite à l'augmentation du contenu de la deuxième phase. Pour des fractions faibles, la deuxième phase existe sous forme de grains isolés éparpillés dans une matrice (a). Quand le contenu de la deuxième phase accroît, les particules débutent à être en contact et à former des tas agglomérés (b).

Si l'augmentation de la phase deux continue, une transition microstructurale critique aura lieu, dans ce cas la deuxième phase n'est plus éparpillée, mais elle devient plutôt reliée entre elles sur des volumes importants (c, d, e). Cette phase de transition a un effet important sur l'évolution des propriétés du matériau FGM final. Nous remarquons qu'une petite transformation de la composition du FGM va se traduire par une variation distincte des propriétés telle que la conductivité thermique ou électrique [36].

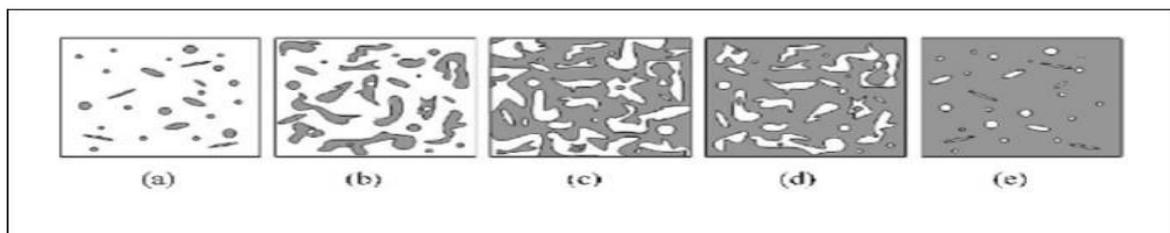


Figure I.19 : Changement de la microstructure d'un FGM [36]

I.4.5 Les propriétés matérielles effectives des FGMs (homogénéisation)

Les FGMs sont très *hétérogènes*⁷, il sera très utile de les idéaliser comme continua avec leurs propriétés mécaniques variant continûment par rapport aux coordonnées spatiales. Les schémas d'homogénéisation sont nécessaires pour simplifier leurs microstructures hétérogènes complexes afin de les analyser d'une manière efficace.

Un FGM typique représente un composite de particules avec une distribution prescrite des fractions de volume des phases constitutives. Les propriétés des matériaux sont généralement supposées suivre une gradation à travers l'épaisseur d'une manière continue. Deux types de fraction volumique (variations/gradations) sont populaires dans la littérature qui couvre la plupart des modèles analytiques existants :

1. Une variation par morceaux de la fraction volumique des matériaux est assumée, et le FGM est pris pour être posé avec la même fraction volumique dans chaque région, (figure I.20-a).

2. Une variation continue de la fraction volumique des matériaux est assumé (figure I.20-b), et la fraction volumique peut être représentée comme une fonction de coordonnées suivant l'épaisseur.

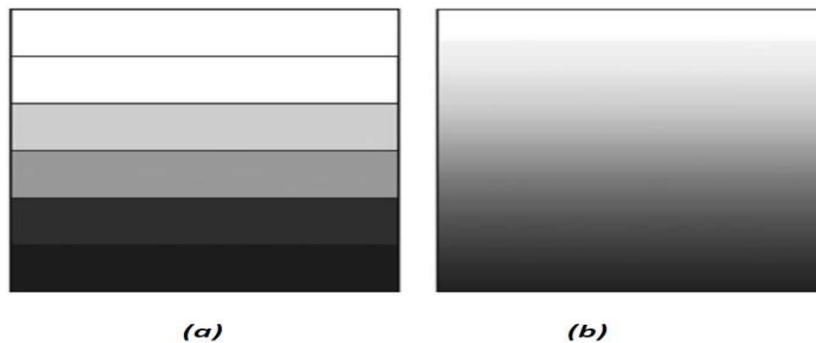


Figure I.20 : Modèle analytique pour une couche en FGM

I.4.5.1 La fraction volumique P-FGM

La fraction volumique des matériaux P-FGM est supposée obéir à une fonction en loi de puissance représentée par la relation :

$$G(z) = \left(\frac{2z+h}{2h} \right)^p \quad (\text{I. 3})$$

Où 'P' est un paramètre matériau et 'z' est dirigé suivant l'épaisseur 'h' la hauteur ; les propriétés matérielles d'un matériau P-FGM [11], peuvent être déterminées par la loi des mélanges :

$$E(z)_{p-FGM} = E_1 + \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right)^p (E_2 - E_1) \quad (\text{I. 4})$$

⁷ Hétérogène : en deux-points différents, implique propriétés différentes

Où E_1 et E_2 sont respectivement les modules de Young de la surface inférieure ($z = -h/2$) et de la surface supérieure ($z = h/2$) de matériau FGM. La variation du module de Young dans la direction d'épaisseur de matériau P-FGM est représentée sur la (figure I.21).

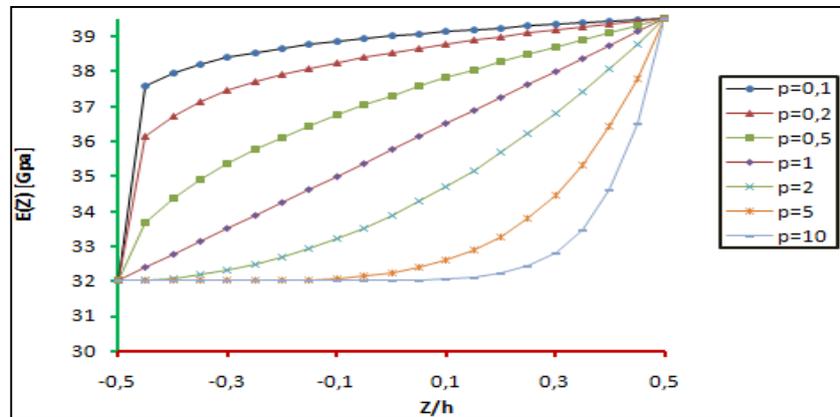


Figure I.21 : Variation de la fraction volumique dans une poutre P-FGM [37]

I.4.5.2 La fraction volumique E-FGM

La majorité des chercheurs utilisent la fonction exponentielle, pour décrire les propriétés matérielles des matériaux E-FGM, qui s'écrit sous la forme des relations (I.5) et (I.6) :

$$E(z)_{P-FGM} = E_2 e^{\beta(z+\frac{h}{2})} \quad (\text{I.5})$$

$$\beta = \frac{1}{h} \ln\left(\frac{E_1}{E_2}\right) \quad (\text{I.6})$$

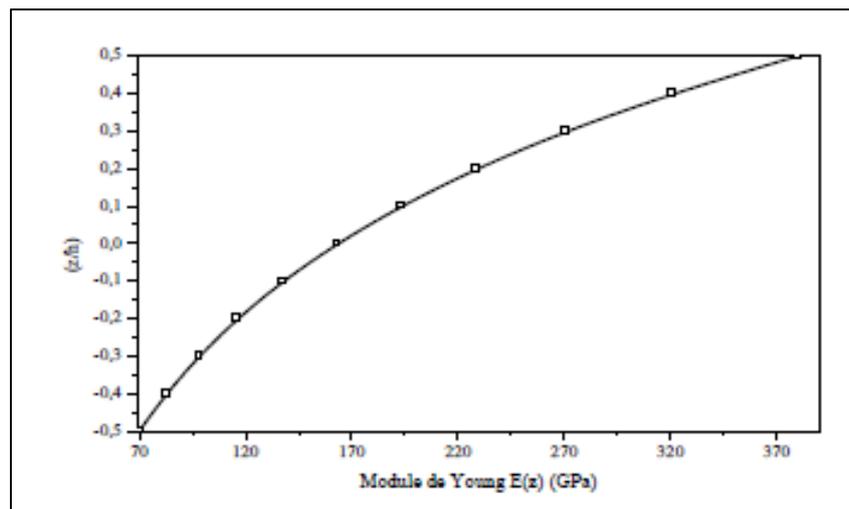


Figure I.22 : Variation de la fraction volumique dans une poutre E-FGM. [37]

I.4.5.3 La fraction volumique S-FGM

Pour définir la fraction de volume de matériau S-FGM, deux fonctions de loi de puissance sont utilisées, ayant comme objectif l'assurance d'une bonne distribution des contraintes parmi toutes les interfaces. Les deux fonctions de loi de puissance sont définies par les relations (I.7) et (I.8) :

$$g_1(z) = \frac{1}{2} \left(\frac{h-z}{\frac{h}{2}} \right)^P \quad \text{pour } -\frac{h}{2} \leq z \leq 0 \quad (\text{I. 7})$$

$$g_2(z) = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{h-z}{\frac{h}{2}} \right)^P \quad \text{pour } 0 \leq z \leq h/2 \quad (\text{I. 8})$$

En utilisant la loi des mélanges, le module de Young de matériau S-FGM peut être calculé par les relations (I.9) et (I.10), sa variation est représentée sur la (Figure I.23) :

$$E(z)_{P-FGM} = g_1(z)E_1 + (1 - g_1(z))E_2 \quad \text{pour } -\frac{h}{2} \leq z \leq 0 \quad (\text{I. 9})$$

$$E(z)_{P-FGM} = g_2(z)E_1 + (1 - g_2(z))E_2 \quad \text{pour } 0 \leq z \leq h/2 \quad (\text{I. 10})$$

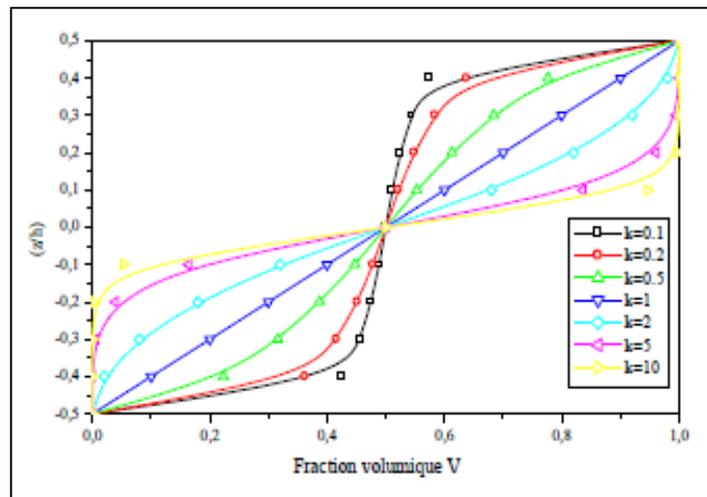


Figure I.23 : Variation de la fraction volumique dans une poutre S-FGM [37]

I.4.6 Domaine d'application des FGMs

Le concept des matériaux à gradient de propriétés est applicable dans des nombreux domaines Il a été initialement conçu pour l'industrie de l'aéronautique, où les FGM ont fournis deux propriétés contradictoires telles que la conductivité thermique et d'isolation thermique dans un matériau. Actuellement, elles permettent la production des matériaux légers, forts et durables, et elles sont applicables dans un large intervalle des domaines :

- Les matériaux de construction Blocs en béton résistant : au feu, rayonnement, absorbant de l'humidité, milieu agressive.

- Les matériaux de conversion d'énergie : Générateur thermoélectrique, pile à combustible, une cellule solaire.
- Nucléaire : Composants de réacteurs nucléaires, première paroi de du réacteur fusion.
- Biomatériaux : Implant, peau artificielle, le système de délivrance de médicaments.

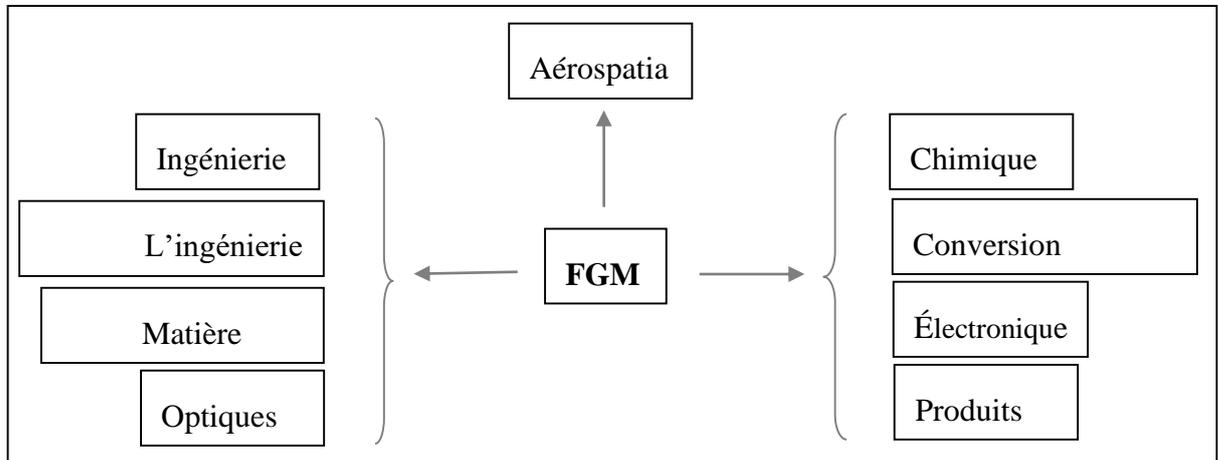


Figure I.24 : Les principaux domaines d'application des FGM

I.5 Conclusion

Ce chapitre contient deux grands titres : l'isolation et les matériaux composites plus précisément les matériaux composites à gradient fonctionnel FGM. Dans un premier temps on a fait une présentation sur l'isolation thermique et phonique définition but type méthodes et matériaux utiliser pour l'isolation. En deuxième lieu une présentation générale sur les matériaux composites leurs différentes classes et le rôle des différentes phases (fibre, interface, matrice...) domaine d'application, leurs avantages et leurs inconvénients.

Par la suite on a défini les différentes structures composites et les matériaux de sandwichs, nous avons présenté les principaux constituants de ces matériaux, les procédés essentiels de leurs mises en forme. On a abordé le phénomène de délaminage des matériaux multicouche et on a proposé les FGM comme solution ; nous avons défini les matériaux à gradient fonctionnel « FGM », l'histoire de leur développement, leurs propriétés et leurs domaines d'application.

L'objectif assigné dans le deuxième chapitre est de présenter une revue détaillée, sur le comportement mécanique et thermomécanique des sandwichs gradués.

Chapitre 2

Comportement des sandwichs gradués

II.1 Introduction

Les structures sandwichs occupent un large créneau dans la construction des pièces composites, leurs intérêts principaux, par opposition aux composites traditionnels dits monolithique, réside dans leur rigidité spécifique très élevée. En modifiant la nature et l'épaisseur de la peau et/ou de l'âme, on parvient à donner à la structure le matériau qui convient le mieux. Ainsi, l'amélioration de la rigidité qui traduit le comportement en flexion du matériau, s'obtient en augmentant soit l'épaisseur de l'âme qui conduit à l'augmentation de son moment d'inertie, soit le module d'élasticité des peaux. Puisque l'âme du sandwich possède une faible densité, la masse du composite n'évolue pas de façon importante. [25]. Afin d'optimiser les caractéristiques des matériaux de l'âme et de la peau pour une application donnée, il convient donc de connaître leur comportement pour ce type de sollicitation.

L'objectif de cette partie est de mettre en évidence leurs comportements vis-à-vis de différentes sollicitations mécaniques et thermique. À cet effet, ce chapitre débute par une description réglementaire du dimensionnement des structures, suivie d'une présentation de leur comportement suivant les sollicitations. Après avoir lister les différents mécanismes de ruines, une revue de littérature sur les travaux antérieurs portant sur le comportement des sandwichs est mis en point.

II.2 Sandwichs sous chargement mécanique

Le comportement mécanique élastique d'une structure constituée de matériaux sandwichs est généralement analysé par la théorie des plaques sandwichs [38]. Elle est basée sur la théorie des stratifiés prenant en compte le cisaillement qui considère qu'une normale au plan moyen d'un stratifié reste un segment de droite lors de la déformation.

II.2.1. Normes de confection et d'essai

Afin d'évaluer les performances structurelles des panneaux sandwichs, différents tests mécaniques doivent permettre de démontrer la conformité de ces derniers aux différentes spécifications demandées. La recherche des normes permet de faire un état de l'art des méthodes d'essais existantes, de préciser les modes opératoires, les dimensions des éprouvettes et l'exploitation des résultats [39]. Il existe plusieurs normes telles que les normes **CEN**, les **normes AFNOR**, les **normes ASTM** et les **normes militaires...**etc. En ce que suit on fera une présentation de différentes méthodes d'essais les plus utilisés pour les sandwichs en nids abeilles, en mousse et les constructions en FGM selon les normes ASTM et quelques normes AFNOR :

Normes ASTM : [40]

- Test de flexion 3 et 4 points, ASTM C-393 : **(Figure II.1.a)**
- Test de traction à plat, ASTM C-297 : **(Figure II.1.b)**
- Test de compression à plat, ASTM C-365 : **(Figure II.1.c)**
- Test de compression debout, ASTM C-364 : **(Figure II.1.d)**

- Test de cisaillement, ASTM C-273 : (Figure II.1.e)

Normes AFNOR :

- Test de compression perpendiculaire NF T54-602 (1983) : (Figure II.2.1) [40]
- Test de traction perpendiculaire NF T 54-603 (1983) : (Figure II.2.2) [41]
- Test de compression pure NF T54-604 (1986) : (Figure II.2.3) [42]
- Test de compression avec flambage NF T54-604 (1986) : (Figure II.2.4) [42]
- Test de cisaillement NF T 54-605 (1983) : (Figure II.2.5) [43]
- Test de flexion 3 points, NF T 54-606 (1987) : (Figure II.2.6) [43]
- Test de flexion 4 points NF T 54-606 (1987) : (Figure II.2.7) [44]

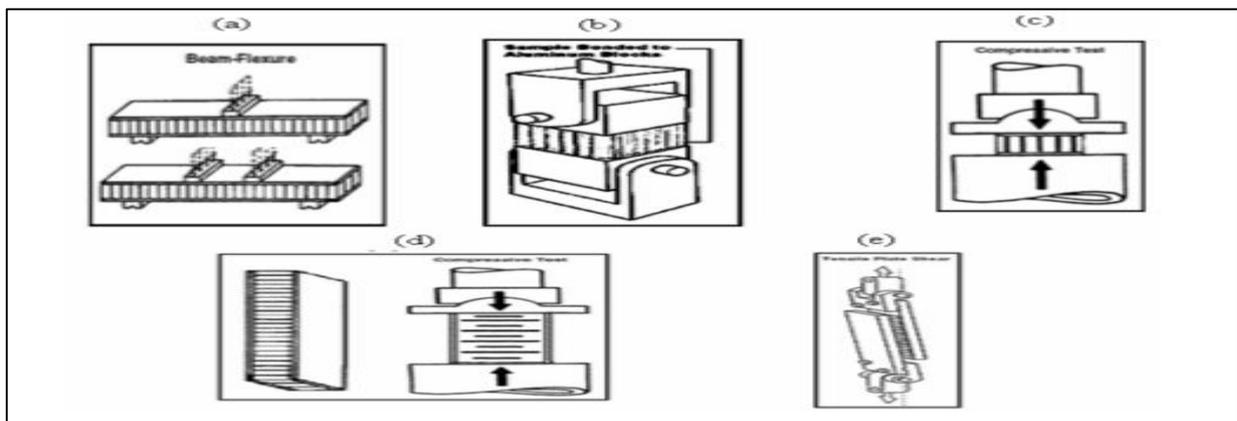


Figure II.1 : Méthodes de Caractérisation des sandwichs selon les normes ASTM [39]

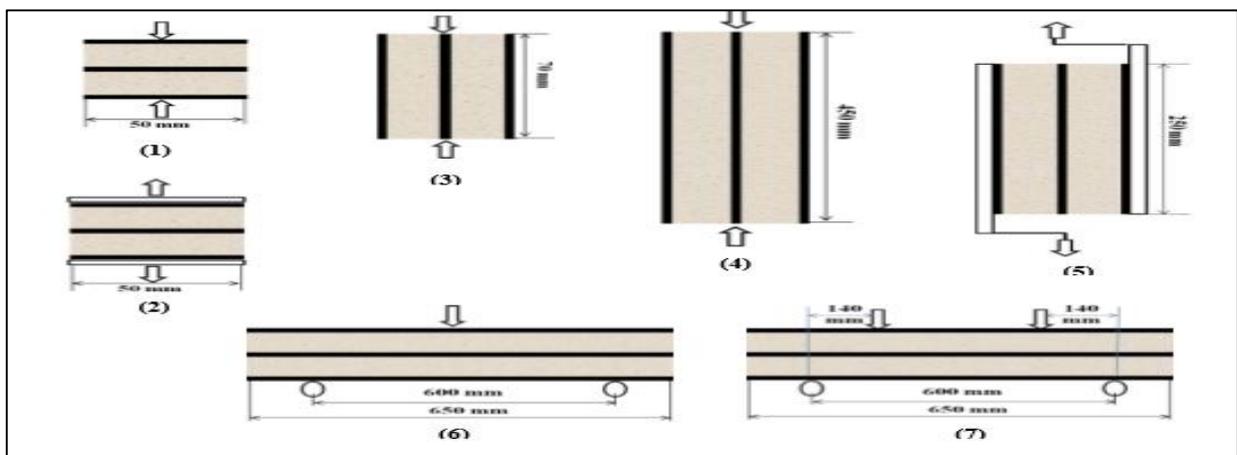


Figure II.2: Dimension des sandwichs selon la norme AFNOR [39]

II.2.2 Comportement des sandwichs en flexion

Le comportement mécanique élastique d'une structure constituée de matériaux sandwichs est généralement analysé par la théorie des plaques sandwichs. Elle considère que seule l'âme du matériau sandwich est soumise à une déformation de cisaillement transverse. La théorie des stratifiés avec cisaillement transverse et la théorie des plaques sandwichs sont les outils qui peuvent être utilisés usuellement pour analyser le comportement élastique des structures en matériaux sandwich. [45]

Dans les structures multicouches, les contraintes normales dans les peaux diminuent en fonction du carré de l'épaisseur de l'âme. Cela augmente très rapidement la rigidité en flexion de la structure. Les contraintes normales dues à la flexion se concentrent dans les peaux. La flexion induit des contraintes de traction dans la peau inférieure, de la compression dans la peau supérieure. Celles-ci ont tendance à se rapprocher de l'axe neutre (compression de l'âme) et s'éloigner (traction de l'âme). Le rôle de l'âme d'une structure sandwich est donc de résister aux contraintes importantes d'arrachement, de compression et de cisaillement. [46]

Les structures sandwichs sont généralement chargées en flexion ou en flambement. Les essais de flexion trois points ou quatre points sont largement utilisés pour la caractérisation du comportement mécanique et de l'endommagement. Il est donc convenable de maîtriser le comportement mécanique de l'âme et des peaux pour ces types de sollicitations.

Les peaux peuvent être constituées par des matériaux métalliques ou plus généralement par des stratifiés d'épaisseur h_1 (peau inférieure) et d'épaisseur h_2 (peau supérieure). L'épaisseur de l'âme sera notée h , le système de coordonnées sera choisi de manière que le plan (x, y) soit le plan moyen.

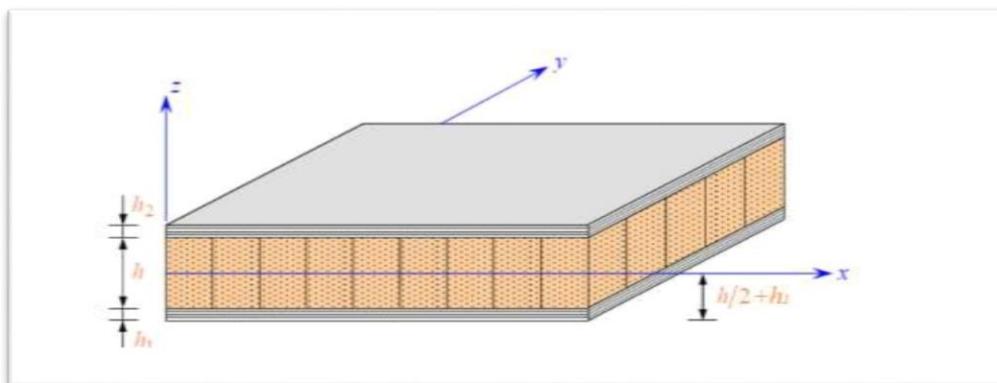


Figure II.3: Plaque sandwich [1]

II.2.2.1 Flexion trois points

La flexion trois points est un essai mécanique qu'on effectue en posant une poutre sur deux appuis simples. Les contacts entre ces appuis et la poutre sont considérés ponctuels et sont situés sur les extrémités de la poutre. On applique une charge concentrée au milieu de cette poutre. Le contact entre la charge et la poutre est considéré aussi comme une liaison ponctuelle. Lorsqu'on augmente

progressivement la charge sans dépasser la limite de résistance pratique, la poutre se déforme suivant une flèche déterminée selon la nature des composants constituant de la poutre [21].

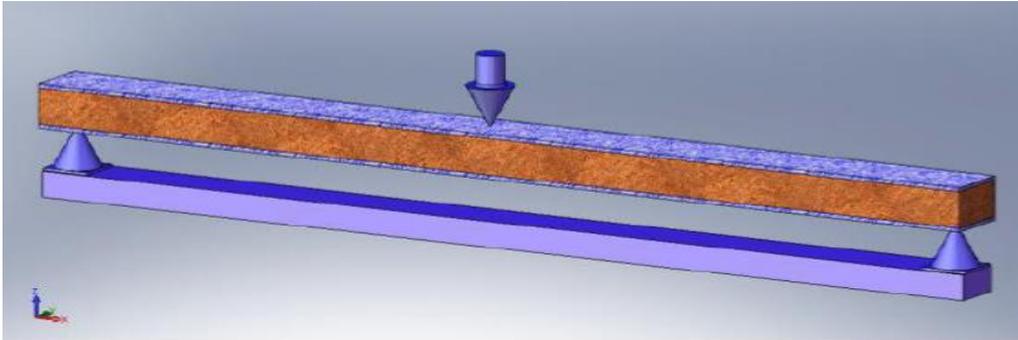


Figure II.4: Flexion trois-points [47]

II.2.2.2 Flexion quatre points

Dans ce cas on utilise les mêmes appuis simples, mais on applique deux charges au lieu d'une seule charge concentrée. Ces essais normalisés permettent de déterminer certaines caractéristiques telles que :

- Caractéristiques élastiques des peaux (flexion 4 points) et de l'âme (flexion 3 points) ;
- Résistances de l'âme ou des peaux suivant les modes de rupture.

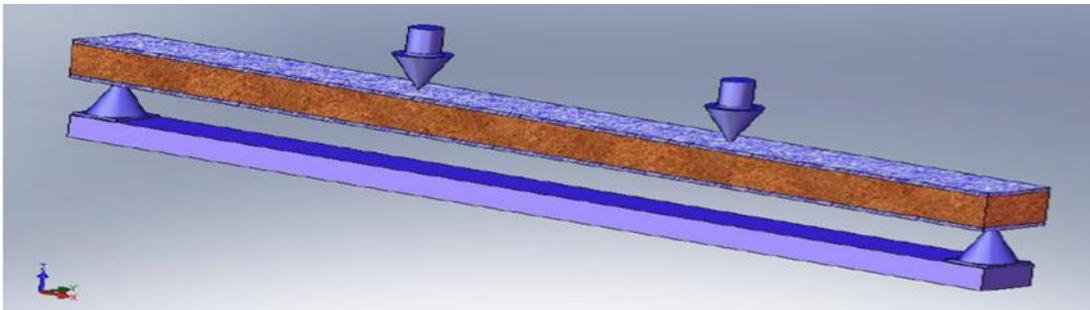


Figure I.5: Flexion 4 points. [47]

II.2.3 Flambement des structures sandwichs

Dans le domaine de la résistance des matériaux on définit le flambement par un phénomène d'instabilité d'une structure, qui est soumise à un effort normal de compression, a tendance à fléchir et se déformer dans une direction perpendiculaire à l'axe de compression. Si les conditions d'appuis sont les mêmes selon ces deux axes, le flambement se fera suivant l'axe présentant l'inertie la plus faible. Le flambage dépend aussi des conditions aux limites, à savoir la nature des liaisons aux extrémités de la plaque. La (Figure II.6) présente le cas d'une poutre sandwich chargée sur son axe. Ce cas de chargement peut entraîner des instabilités globales (flambement de la poutre) ou locales (voilement des peaux) si la charge appliquée est trop importante. [48]

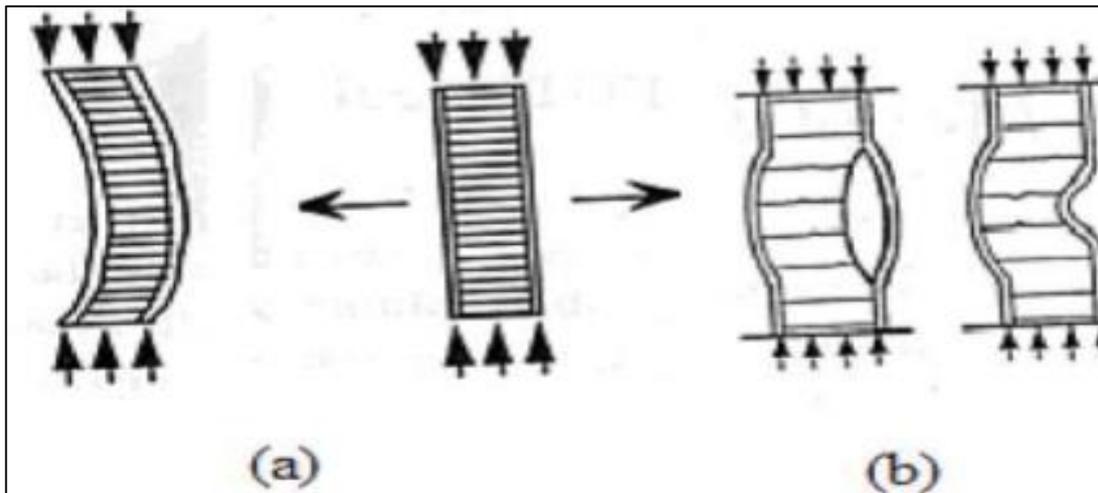


Figure II.6 : Flambement global du sandwich; b) flambement local du sandwich [49]

II.2.4 Mécanisme de rupture

Un panneau sandwich peut être soumis à des sollicitations mécaniques suivantes : Un moment fléchissant M ; Un effort normal N ; Un effort tranchant T .

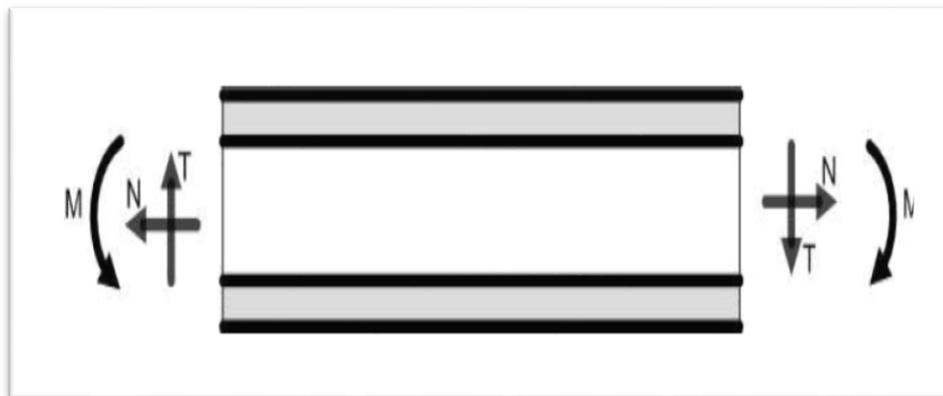


Figure II.7 différentes sollicitations des panneaux sandwichs

Les modes d'endommagement et de ruine des structures sandwich ont été étudiés par plusieurs chercheurs, ils ont montré que le processus des modes d'endommagements lors du chargement en flexion, dépend de la charge, du rapport de la longueur entre appuis et de l'épaisseur des peaux et de la densité de l'âme. Triantafillou et Gibson [50] répertorient les différents modes de dégradations d'un sandwich soumis à la flexion :

- Rupture des peaux en traction ou en compression.
- Modes locaux de rupture.
- Rupture de l'âme en cisaillement.
- Dégradation de l'adhésive.

II.2.4.1 Rupture des peaux en traction ou en compression

Il s'agit du cas où les contraintes dans les peaux sont supérieures aux contraintes admissibles pour le matériau constituant les peaux (Figure II.8). Ce phénomène peut être évité en utilisant un matériau dont les contraintes à rupture sont plus élevées, en augmentant l'épaisseur des peaux (ce qui réduit les contraintes appliquées), ou en augmentant l'épaisseur de l'âme (ce qui permet également de réduire les contraintes dans les peaux).

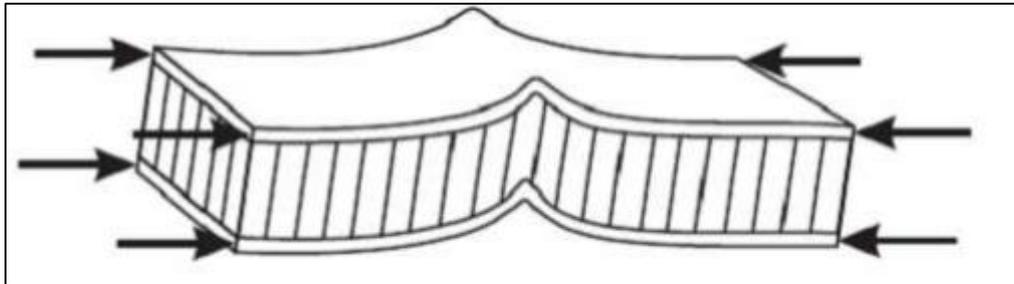


Figure II.8: Rupture des peaux en traction ou en compression [49]

II.2.4.2 Modes locaux de rupture

L'indentation locale est un mode localisé de rupture dû à une concentration de contraintes résultant, soit de l'application d'une charge localisée, soit de la position d'un appui de type ponctuel ou linéique (Figure.II.9)

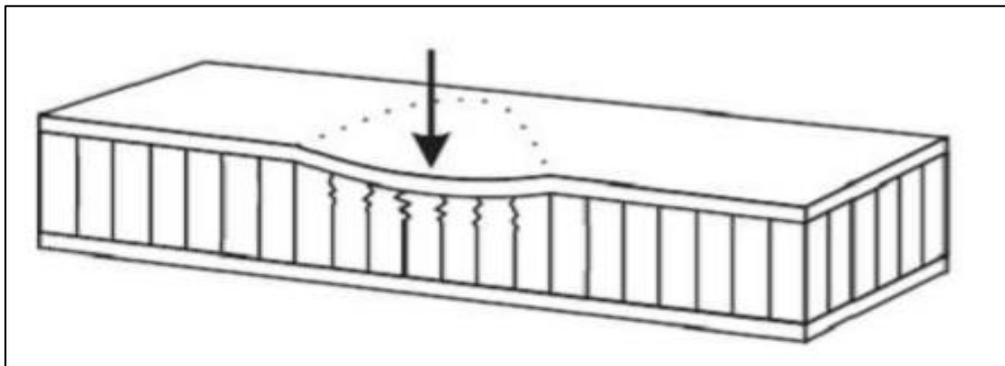


Figure II.9: Modes locaux de rupture par indentation [49]

II.2.4.3 Rupture de l'âme en cisaillement

La rupture de l'âme se produit dans le cas où la contrainte de cisaillement (prépondérante dans l'âme) dépasse la résistance au cisaillement du matériau de l'âme (Figure II.10). Si l'on se trouve dans ce cas, on peut soit utiliser un matériau d'âme qui possède une résistance au cisaillement plus élevée, soit augmenter l'épaisseur de l'âme. Par contre, utiliser un matériau différent pour les peaux, ou changer leur épaisseur n'aura pas d'effet. [39]

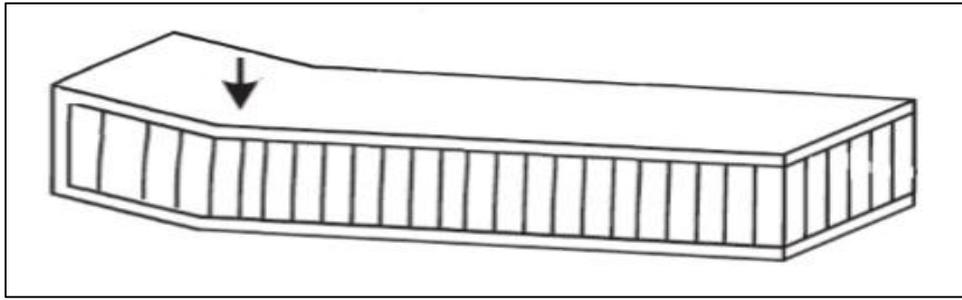


Figure II.10 : Rupture de l'âme en cisaillement [49]

II.2.4.4 Dégradation de l'adhésive

La dégradation de l'adhésive, entre les peaux et l'âme se fait selon trois types

- Dégradation de l'adhésive entre les peaux et l'âme.
- Dégradation de l'attachement des cellules de l'âme.
- Dégradation de l'attachement du nœud des cellules de l'âme.

La (Figure II.11) illustre les modes de dégradation de l'adhésif. L'exposition à l'humidité provoque des dégradations remarquables de la résistance de l'adhésif ce qui peut changer le mode de dégradation et causer la ruine avancée du panneau sandwich [48].

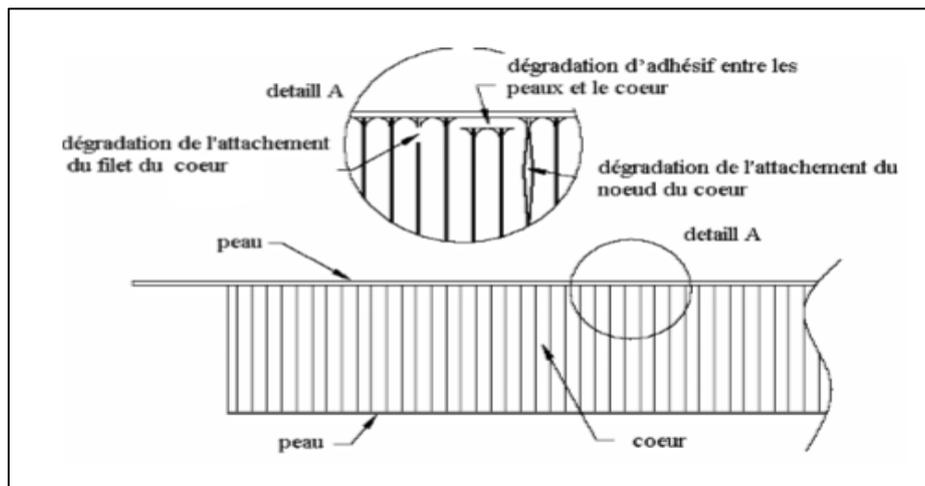


Figure II.11 : Type de dégradation de l'adhésif [48].

II.3 Sandwiches sous chargement thermique

II.3.1 Les transferts de chaleurs

Les transferts de chaleur se font spontanément d'un corps chaud vers un corps plus froid, l'expérience montre que deux corps isolés de l'ambiance et à température différente échangent de l'énergie sous forme de chaleur jusqu'à disparition complète de leur différence de température. On distingue 3 types de transfert de chaleur :

- La conduction, due à la diffusion progressive de l'agitation thermique dans la matière.

- La convection, transfert thermique qui accompagne les déplacements de la matière.
- Le rayonnement, qui correspond à la propagation de photons.

II.3.1.1 Transfert de chaleur par conduction

Le phénomène de la conduction de la chaleur existe dans tous les corps, solides ou fluides, c'est un transfert par contact sans mouvement de matière. Il correspond à un accroissement de l'énergie de vibration du réseau cristallin pour les solides, et à une transmission d'énergie cinétique opérée par les chocs entre les molécules. Le transfert de chaleur par conduction s'appuie sur la *loi de Fourier*¹ énonçant que « le flux surfacique est proportionnel au gradient de température », ce qui se traduit pour un matériau isotrope homogène par la relation :

$$\vec{q} = -k \overrightarrow{\text{grad}T} \quad (\text{II. 1})$$

T : Température (K) ;

K : Conductivité thermique ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) ;

\vec{q} : Vecteur densité de flux thermique ($\|\vec{q}\|$ s'exprime en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) ;

Le flux de chaleur à travers une surface S s'obtient par intégration sur S :

$$Q = \iint_S \vec{q} \cdot \vec{n} dD \quad (\text{II. 2})$$

\vec{n} : Vecteur normal à la surface S.

Le flux de chaleur est donc nul si le champ de température est uniforme (le système est alors dans un état d'équilibre thermique), et augmente avec les variations spatiales de température. Par ailleurs, à gradient de température fixé, le flux est d'autant plus grand que la conductivité thermique k est élevée.

II.3.1.2 Transfert de chaleur par convection

La convection est un transfert de chaleur qui se produisant dans un milieu matériel avec mouvement de matière. Dans le domaine du bâtiment en particulier, on distingue deux types de convection : la convection naturelle et la convection forcée.

- La convection naturelle recouvre les écoulements des fluides interstitiels, induit par les variations de masse volumique dues aux différences de température.

¹ Loi de Fourier (1807) décrit le phénomène de conductivité thermique, elle exprime la diffusion de la chaleur à travers un matériau solide. Fourier a découvert que le flux de chaleur qui traverse un matériau d'une face A à une face B est toujours proportionnel à l'écart de température entre les deux faces.

- La convection forcée se produit quand le mouvement du fluide est imposé par une intervention extérieure d'origine mécanique (pompe, mise en pression, ventilateur, etc.

Dans le cas d'un transfert entre un solide et un fluide, le flux thermique échangé entre la surface et le fluide en mouvement est donné par la loi de Newton :

$$\Phi = hS(T_C - T_F) \quad (\text{II. 3})$$

Φ : Flux thermique traversant la paroi. (W)

T_C : température de la paroi chaude. (°C ou K)

T_F : température du fluide loin de la paroi. (°C ou K)

S : surface d'échange. (m²)

h : coefficient d'échange par convection. (W/m² K)

II.3.1.3 Transfert par rayonnement

Le rayonnement est un transfert de chaleur entre deux corps, séparés par du vide ou par un milieu transparent par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques. Ce mode de transfert ne nécessite pas de support matériel solide ou fluide. Dans la pratique, le rayonnement s'effectue en présence d'un gaz, c'est la raison pour laquelle le rayonnement est rarement le seul type d'échange thermique mis en jeu, la convection et la conduction sont également présentes, il reste négligeable tant que la température du solide se trouve en dessous de 200°C.

Les parois qui composent l'enveloppe des bâtiments sont le siège de transferts thermiques complexes dues au couplage conduction- convection- rayonnement. Dans la structure du bâtiment, les pores des matériaux utilisés étant de faibles dimensions, la part de transfert convectif peut être négligée. De même, au voisinage de la température ambiante, les parts de rayonnement et de transfert de masse ne seront pas également prises en compte.

L'intensité du rayonnement thermique provenant d'une surface dépend non seulement de la température de cette surface, mais aussi de son émissivité, cette intensité est donnée par l'équation suivante :

$$M = \varepsilon\sigma T^4 \quad (\text{II. 4})$$

ε : est l'émissivité de la surface

σ : est la constante de Stephan Boltzmann est vaut $5.67.10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$

Dans de nombreux problèmes de transformation d'énergie thermique, les trois modes de transfert de chaleur coexisteront mais, généralement, au moins une des trois formes pourra être négligée, ce qui simplifiera le traitement mathématique.

II.3.2 Thermo élasticité

Un incrément de déformation dans un solide peut résulter d'un changement de contrainte ou d'un changement de température imposé au système. L'origine physique de ces deux modes de déformation a été décrite dans la sous-section précédente. De façon générale la relation est peut-être donnée sous la forme suivante :

$$\varepsilon = \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma}\right)_T d\sigma + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial T}\right)_{T\sigma} dT \quad (\text{II. 5})$$

Avec $\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma}\right)_T d\sigma$: $d\varepsilon$ mécanique ; $\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial T}\right)_{T\sigma} dT$: $d\varepsilon$ thermique

Cette relation est exprimée sous forme tensorielle. Ainsi rien n'empêche qu'une contrainte appliquée dans une direction puisse générer des composantes de déformations à la fois d'élongation et de cisaillement toutes non-nulles. De même, dans le cas général, un incrément de température peut générer une élongation dans toutes les directions (dilatation) mais également des cisaillements. Les paramètres $\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma}\right)_T$ et $\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial T}\right)_{T\sigma}$ peuvent être dérivés à partir des relations qui existent entre la déformation et la contrainte ou entre la déformation et la température.

De façon générale ces paramètres peuvent varier avec la déformation et ne sont pas nécessairement des constantes. Les paramètres $\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma}\right)_T$ appelées coefficients de souplesse.

La littérature scientifique montre que le comportement thermomécanique des structures et panneaux sandwichs a été amplement investis. On peut citer les travaux :

- **S.J. SINGH, S.P. HARSHA [51]** ont fait une analyse dynamique non linéaire d'une plaque sandwich s-FGM reposant sur une fondation sous environnement thermique.
- **VUONG NGUYEN NAN DO, CHIN-HYUNG LEE [52]** : ont mené une étude d'analyse de flambement thermique des plaques sandwich FGM à l'aide de méthode sans maillage par interpolation radiale.
- **Les essais de Zhai et al. [53]** menés sur les performances thermiques du mur sandwichs à base de mortier de ciment.
- **Les essais de K. Mak et al. [54]** portés sur des panneaux exposés à différentes températures.

II.4. Théorie des sandwichs

Le champ de déplacement de n'importe quel point situé à (x, z) de la poutre s'écrit comme montré dans la relation (II.6)

$$U(M) = \begin{cases} u_x(x) = u(x) - zw, x(x) + \psi(z)\varphi_x \\ u_z(x, z) = w(x) \end{cases} \quad (II.6)$$

$U(x), W(x)$: Le déplacement dans le plan et le déplacement transverse respectivement.

$w, x(x)$: La rotation de la section.

$\psi(z)$: La fonction de gauchissement.

φ_x : La rotation suivant x.

Dans le cas des petites perturbations, le tenseur des déformations s'écrit :

$$\begin{cases} \varepsilon_x(x, z) = \frac{\partial u(x)}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \psi(z) \frac{\partial \varphi_x}{\partial x} \\ \gamma_{xz}(x, z) = \psi'(z) \cdot \varphi_x \end{cases} \quad (II.7)$$

On se limite à un comportement linéaire élastique du matériau P-FGM, l'expression des contraintes peut être déterminée comme suit :

$$\begin{cases} \sigma_x = E(z)_p \cdot \varepsilon_x \\ \tau_{xz} = G(z)_p \cdot \gamma_{xz} \end{cases} \quad (II.8)$$

Les expressions des efforts internes N_x, M_x, S_x et Q_{xz} respectivement effort normal, moment fléchissant, moment dû au cisaillement transverse et effort de cisaillement sont données par les relations suivantes :

$$\begin{cases} N_x = \int_s \left[E(z)_p \frac{\partial u(x)}{\partial x} - E(z)_p z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + E(z)_p \psi(z) \frac{\partial \varphi_x}{\partial x} \right] ds \\ N_x = A_{11} \frac{\partial u(x)}{\partial x} - B_{11} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + C_{11} \frac{\partial \varphi_x}{\partial x} \end{cases} \quad (II.9)$$

$$\begin{cases} M_x = - \int_s z \sigma_x ds = - \int_s z \left[E(z)_p \frac{\partial u(x)}{\partial x} - E(z)_p z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + E(z)_p \psi(z) \frac{\partial \varphi_x}{\partial x} \right] ds \\ M_x = -B_{11} \frac{\partial u(x)}{\partial x} + D_{11} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - D_{11}^a \frac{\partial \varphi_x}{\partial x} \end{cases} \quad (II.10)$$

La solution analytique de la poutre FGM de longueur L, de largeur b et d'épaisseur h soumise à un chargement de flexion quatre points qui est transformé à un chargement répartie sur toute la poutre $q_z(x)$ est la suivante :

$$\begin{cases} u(x) \\ w(x) \\ \varphi(x) \end{cases} = \sum_{m=1}^{\infty} \begin{cases} u_m \cos(\lambda x) \\ w_m \sin(\lambda x) \\ \varphi_m \cos(\lambda x) \end{cases} \quad (II.11)$$

Et

$$q_z(x) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{q_m}{L} \sin(\lambda x) \quad \text{ou} \quad \lambda = \frac{m\pi}{L}$$

u_m, w_m, φ_m : Sont des paramètres arbitraires

Finalement on obtient les équations finales de la contrainte normale et du cisaillement transverse, comme indiqué par la relation II.12 :

$$\begin{cases} \sigma_x = -E_p(z) \sum_{m=1}^{\infty} [\lambda(u_m + z\varphi_m) - \lambda^2 z w_m] \sin(\lambda x) \\ \tau_{xz} = \frac{E_p(z)}{2(1+\nu)} \sum_{m=1}^{\infty} [\varphi_m] \cos(\lambda x) \end{cases} \quad (II.12)$$

II.5 Revue des travaux antérieurs sur les F.G.M

II.5.1. Modèle CPT

(Javaheri et Eslami 2002a, 2002b), utilisent le modèle CPT pour étudier le comportement de flambement des plaques FGM sous chargement thermique et mécanique. La charge de flambement a été calculée en choisissant la méthode de bandes finies au lieu de la solution de Navier. Le flambement des plaques FGM soumises à une compression non uniforme a été examiné par (Mahdavian 2009) en utilisant les solutions de Fourier et la théorie CPT.

(Pouladvand 2009) a étudié une plaque rectangulaire FGM avec épaisseur variable sous une charge thermique uniforme, linéaire et non linéaire à travers l'épaisseur. (Kazerouni et al. 2010) ont présenté une solution analytique exacte pour l'analyse de flambage thermique des plaques FGM simplement appuyée utilisant le principe de l'énergie potentielle totale minimale. (Kiani 2011) a présenté des solutions analytiques pour la température critique de flambement des plaques FGM reposant sur une fondation élastique sous divers types de charges thermiques. (Ghannadpour et al. 2012) ont également examiné le flambage thermique des plaques FGM en utilisant le CPT.

II.5.2 Modèle FSDT

Plusieurs auteurs ont utilisé cette théorie pour analyser les plaques FGM, par exemple, Praveen et Reddy (Praveen G.N., 1998) ont utilisé la méthode des éléments finis avec des hypothèses de von Karman pour avoir des réponses transitoires non linéaires des plaques FG sous des charges thermiques et mécaniques. Bouazza et al. (Bouazza M., 2010). Ont proposé des solutions analytiques pour étudier la température de flambement d'une plaque FGM simplement appuyée sous deux types de charges thermiques utilisant la FSDT et solution de Navier. Mohammadi et al.

(Mohammadi M., 2010) ont transformé cinq équations de gouvernance du FSDT en deux équations indépendantes résolues pour la charge de flambement des plaques FG sous des charges dans le plan en utilisant l'approche de la solution de type Levy. Aussi, cette théorie a été utilisée par Saidi et Jomehzadeh (Saidi AR., 2009) pour dériver une solution de type Levy pour la déflambement et les contraintes des plaques FG soumises à des chargements transversaux.

II.5.3 Modèle HSDT

Javaheri et Eslami (Javaheri R, 2002c) ont adopté la TSDT avec les solutions de Navier pour avoir des solutions analytiques pour la température de flambement critique de plaques FGM simplement appuyées sous quatre types de charges thermiques. Un travail similaire a été réalisé par Samsam Shariat et Eslami (Shariat BS., 2007) pour des plaques FG soumises aux trois types de chargements mécaniques et deux types de chargements thermiques. Foroughi et Azhari (Foroughi H., 2014) ont utilisé spline finite strip pour étudier le flambement et la vibration libre des plaques FG reposant sur une fondation élastique. Jari et al. (Jari H., 2015) ont adopté le TSDT et l'IGA pour étudier les comportements linéaires et non linéaires de flexion, flambement et vibration libre des plaques FG sous sollicitations thermiques et mécaniques.

II.6 Synthèse des travaux antérieurs sur les sandwichs

II.6.1 sandwich en âme pleine

En 2018 **Hami** [55] a présenté une étude expérimentale qui consiste à déterminer les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques d'un matériau de type sandwich multicouche.



Figure II.12 : Les matériaux utilisés par **Hami** pour le sandwich [55]

Les matériaux utilisés par **Hami** dans le cadre de son étude ont été présentés et caractérisés par des essais physico-mécaniques ; le matériau de l'âme de la structure sandwich est le liège aggloméré. Tandis que les peaux sont constituées de couches en matériaux composites, stratifiées, à base d'une résine époxy renforcée par des fibres de verre du type tissé et mat (FigureII.12), pour chaque type de structure sandwich il existe trois variantes (FigureII.13).

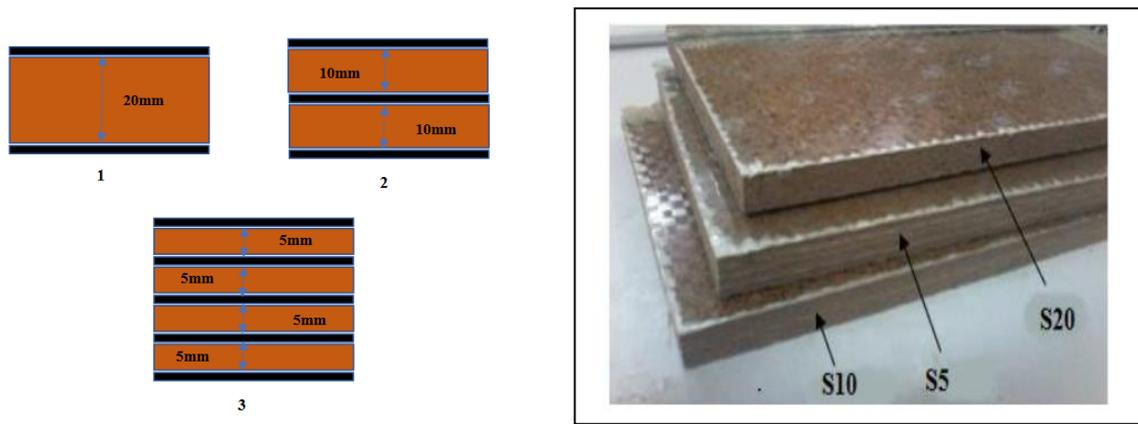


Figure II.13 : Représentation des séries de structures sandwichs testées par **Hami** [55]

Hami a effectué les essais de flexion trois et quatre points sur trois types de structures sandwichs, les dimensions des éprouvettes utilisées pour les structures sandwichs sont de (320 x 20) mm. Les résultats obtenus sont représentés sur les (figures II.14).

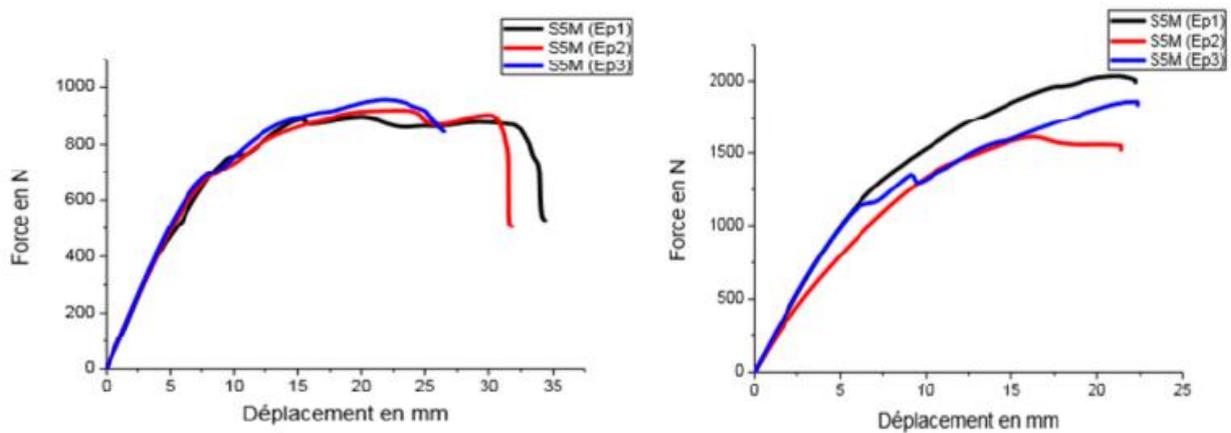


Figure II.14: Les résultats de flexion 3 et 4 points obtenus par les essais de Hami[55].

D'après les résultats ci-dessus, Hami a constaté que les trois types de structures sandwichs testées présentent un comportement linéaire élastique depuis le début de chargement, mais il existe une légère déformation plastique pour des déplacements plus élevés. En fait, la dégradation affectant les structures sandwichs commence par une petite fissure de cisaillement au niveau de l'âme (liège), qui se propage depuis la zone chargée suivant la direction du plan médian.

II.6.2 sandwichs en âme PVC

En 2020 **H. M Bahabadi et al** [56], ont mené une étude expérimentale et numérique afin d'examiner la résistance à la séparation entre les peaux composites et les différentes géométries complexes d'une âme graduée remplie de mousse PVC. A cet effet, **H. M Bahabadi et al**, ont utilisés trois géométries différentes comprenant une âme en mousse simple sans aucun composite

graduée, un trapèze longitudinal et des âmes carrés sont considérés et fabriqués comme une âme composite graduée (Figure II.15).

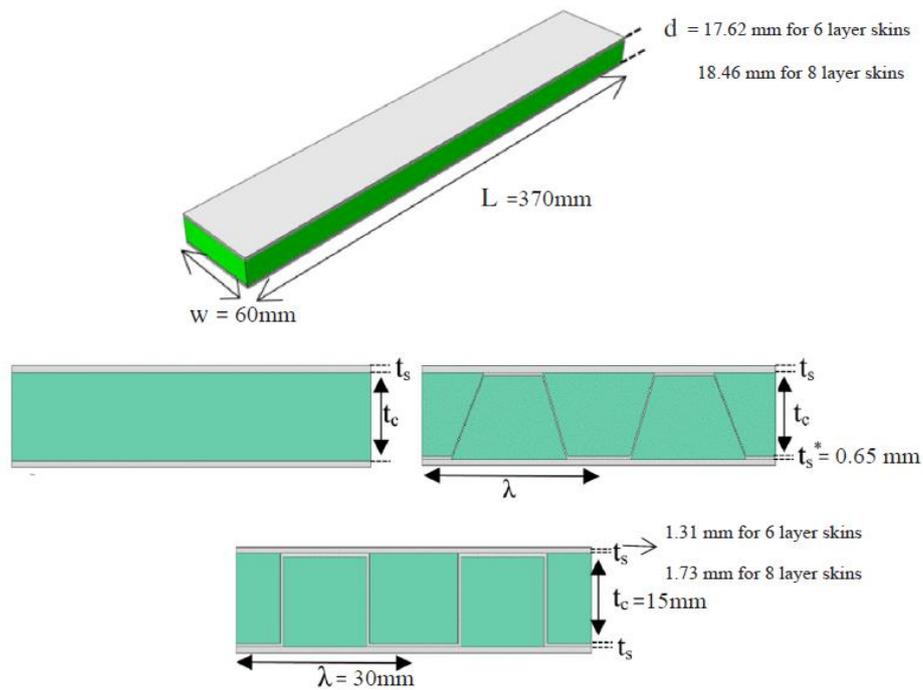


Figure II.15 : Coupe schématique des échantillons utilisés par **H. M Bahabadi et al [56]**



Figure II.16 : Les essais de flexion 3 points des travaux de **H. M Bahabadi et al [56]**

H. M Bahabadi et al ont conclu d'après leurs travaux que la rigidité en flexion la plus élevée appartient à l'échantillon en âme carré contenant avec semelle six couches dans lesquelles le décollement ne se produit pas, de plus ils ont trouvé que l'échantillon avec une âme carrée et semelle contenant huit couches possède la force de liaison maximale. Ils ont sorti avec la conclusion suivante : entre les panneaux étudiés, pour la même chargement, l'âme carré avec nombre de couche important pour les semelles est suggérée comme une conception optimale.

II.6.3 sandwichs en âme nida

X. Wu et al [57] en 2019 ont mené une étude expérimentale et numérique des comportements statiques et en fatigue de la structure sandwich en nid d'abeille composite Nomex. Le panneau sandwich est de dimension 350×210 mm. La peau (semelle) est composée de résines composites

renforcées de fibre de carbone, l'âme est constituée de fibres d'aramide pliées et collées ensemble pour former une structure cellulaire hexagonale. La figure (II.17) montre la structure testées.

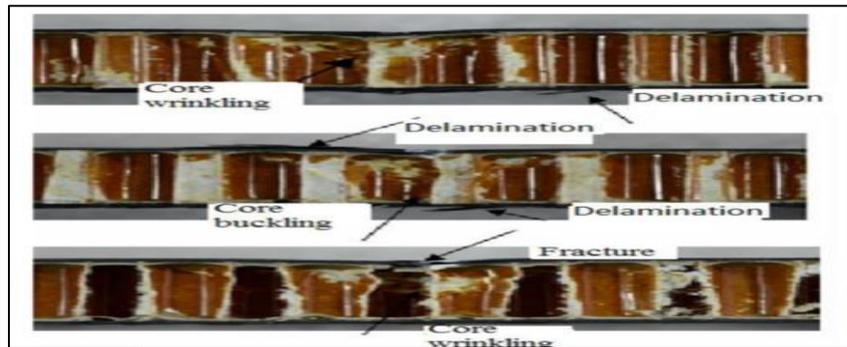


Figure II.17 : Les panneaux sandwichs nida Nomex utilisés par X. Wu et al [57].

X. Wu et al [57] ont effectué les essais de fatigue en compression hors plan à la température ambiante sous contrôle direct de la charge, avec une fréquence de $f = 10\text{Hz}$ et un rapport de charge de $R = 0,2$ et une charge d'amplitude constante. L'essai a permis d'extraire les courbes forces-contrainte suivantes :

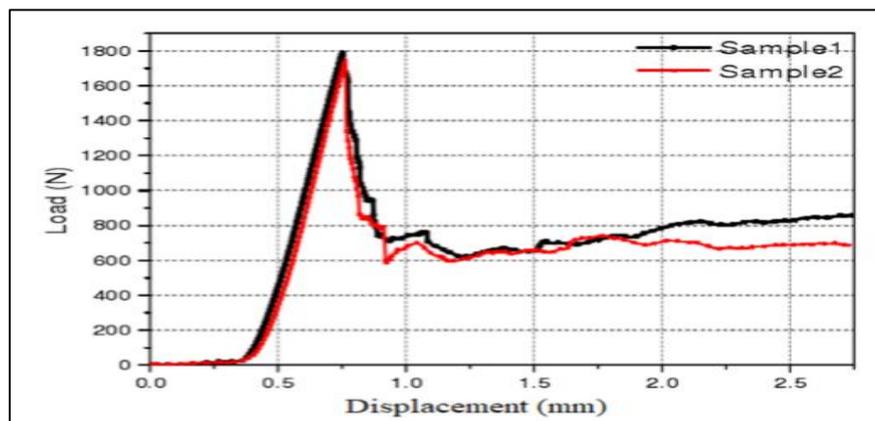


Figure II.18 : Résultats obtenus par X. Wu et al [63]

Les auteurs ont approximé le fait que le module de Young de la structure est l'équivalent du module de Young de l'âme en nid d'abeille, la deuxième phase de comportement est plastique. La capacité portante de la structure est augmentée à la troisième étape, car l'âme en nid d'abeille apparaît plissé et est continuellement compacté. X. Wu et al ont déduit que pour la structure en nid d'abeille, la charge de rupture est la charge maximale du panneau.

II.6.4 sandwichs en semelles FGM

En 2018 Kemal Arslana et Recep Gunesb [58] ont présentés une étude expérimentale qui consiste à déterminer le comportement à l'impact des structures sandwich en nid d'abeille avec des semelles en FGM. La composition du matériau de ces dernières a été représentée selon une variation de la loi de puissance à travers l'épaisseur de la plaque (Figure II.19).

Ils ont produit les spécimens pour six types de semelles FGM différentes ($n = 0,1$, $n = 0,5$, $n = 1,0$, $n = 5,0$ et $n = 10,0$), d'une composition riche en métal à une composition riche en céramique Les

résultats des essais d'impact des échantillons ont été évalués en termes de mécanismes d'endommagement et de déformation (Figure II.20).

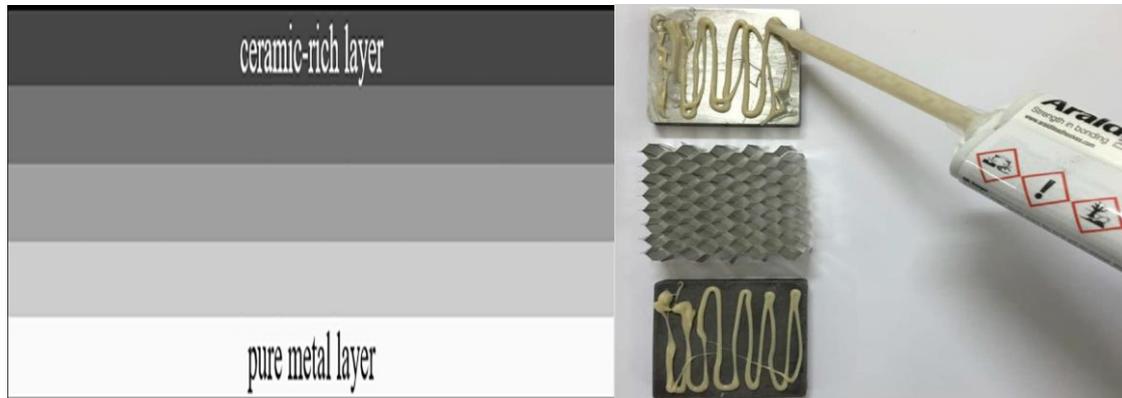


Figure II.19 : Les plaques FGM et le sandwich utilisé par K. Arslan, R. Gunes [58]

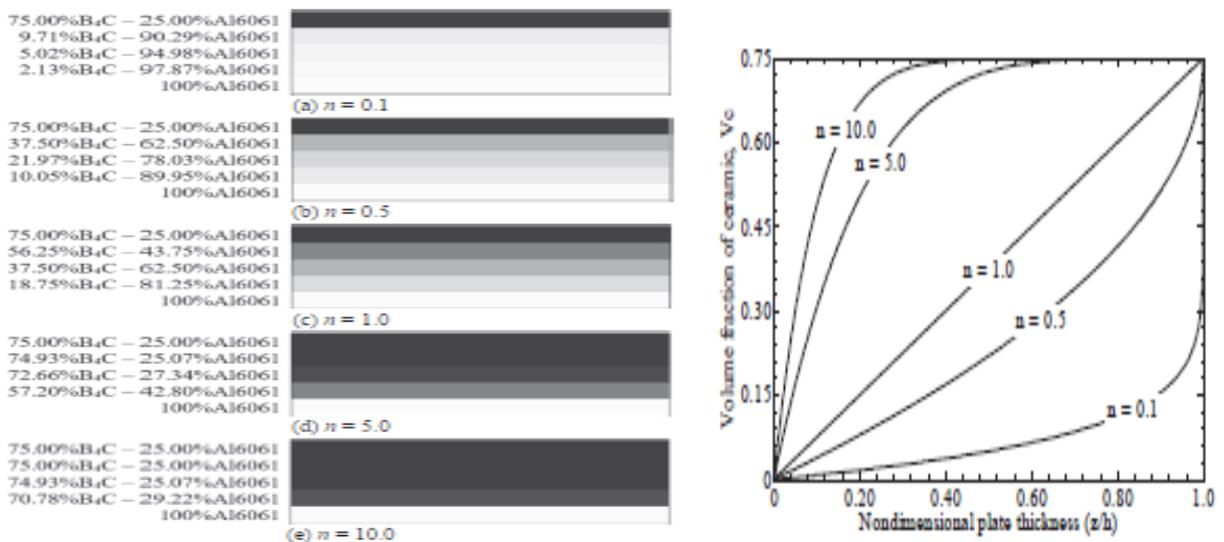


Figure II.20 : Variation de la fraction volumique à travers l'épaisseur utilisé par K. Arslan [58]

D'après les essais effectués par K. Arslan, R. Gunes, les échantillons avec les semelles FGM ont montré une meilleure performance d'impact que l'échantillon avec les semelles ordinaires.

II.6.5 sandwichs en âme FGM

En 2013 J. Zhou et al [59] ont réalisés des essais afin d'étudier la réponse aux chocs à faible vitesse des structures sandwich en âmes FGM, ces âmes sont fabriquées en couches de mousses PVC de différentes densités, les semelles de ses structures sandwichs sont en fibre de carbone d'épaisseur de 0,35 mm et sont collées à l'âme à l'aide d'une résine époxy.

Les matériaux d'âme avec des propriétés d'épaisseur variables ont été fabriqués en liant trois feuilles de mousse de 10 mm d'épaisseur à l'aide d'un adhésif (Figure II.21). La densité moyenne

d'âme variait d'environ 77 kg / m^3 à 113 kg / m^3 . Des tests d'impact ont été réalisés sur des panneaux carrés de 200 mm à l'aide d'un tour d'impact à contrepoids.

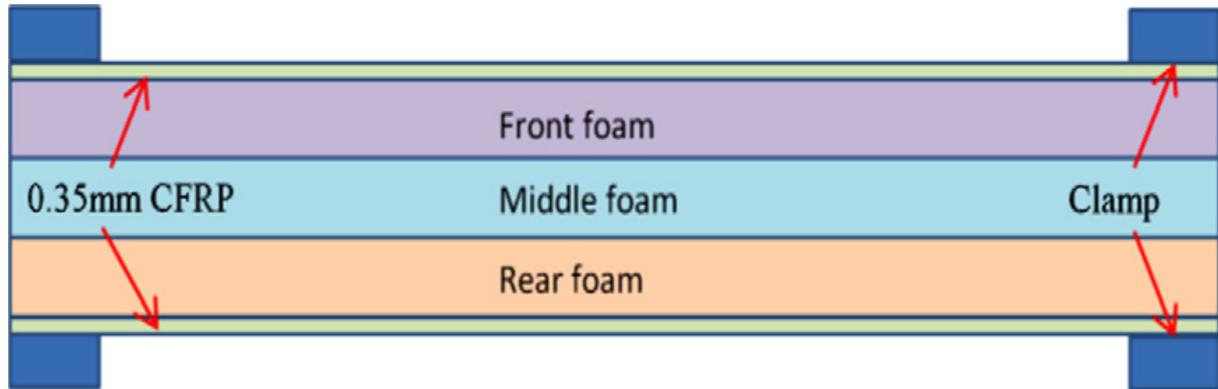


Figure II.21 : Croquis d'empilage de sandwich en mousse FGM utilisé par **J.Zhou et al** [59]

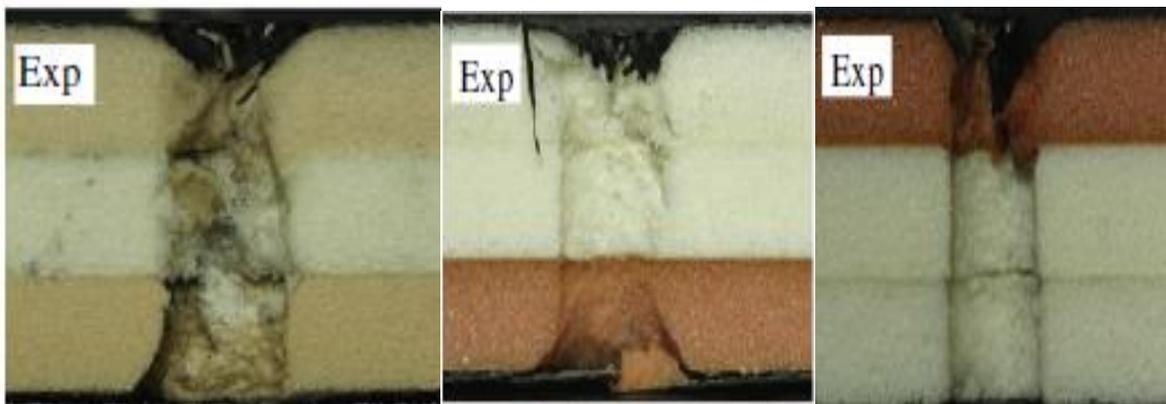


Figure II.22 : les résultats des essais expérimentaux de **J. Zhou et al** [59]

J. Zhou et al ont observé que la majorité des panneaux sont rompus avec un mode de cisaillement à travers l'épaisseur, laissant un trou cylindrique clair dans le noyau multicouche. Des avantages secondaires associés au placement de la mousse de densité la plus faible au centre du noyau et d'une mousse ductile contre la semelle inférieure ont également été observés.

II.7 Conclusion

À travers ce chapitre nous avons exposé le comportement des sandwichs stratifiés et FGMs sous chargement mécanique (Normes de confection, Sandwiches en flexion, Sandwiches en flambement, mécanismes de rupture...) et chargement thermique (transfert de chaleur, conduction, rayonnement, thermoélasticité) et puis nous avons exposée des théorie des sandwichs (modélisation orthotrope, champs de déplacement, déformation et contrainte, ...) ; ainsi qu'une revue des travaux antérieurs sur les F.G.M et certaines recherches expérimentales mener sur les structures sandwichs.

L'analyse des différentes techniques proposées dans la littérature scientifique, nous a conduits à orienter notre travail vers une conception basée sur une âme en FGM à base de mousse polymère

de différentes. En effet, on se propose d'optimiser les paramètres adéquats de cette conception à travers une simulation numérique.

Chapitre III

Simulation numérique

III.1 Introduction

La simulation et l'analyse numérique par éléments finis est un moyen très performant pour l'étude de phénomènes mécaniques complexes, qui est une technique d'approximation de la réalité. Cette dernière est devenue aujourd'hui quasi nécessaires dans le domaine de la recherche, les résultats donnés par la simulation numérique doivent être toujours confrontés aux résultats donnés par les essais expérimentaux. La méthode des éléments finis a un impact direct sur la qualité et le temps, elle est apparue dans le désir de minimiser le coût d'une étude expérimentale, elle est plus économique que les tests au laboratoire avec un nombre d'essais optimisés.

Dans ce chapitre, nous présentons les différentes étapes menées pour la modélisation de comportement d'une structure sandwich multicouche à base de matériaux à gradient fonctionnel sous chargement mécanique et thermique à l'aide du code de calcul ABAQUS. Le modèle géométrique et le choix des modèles éléments finis pour le maillage sont générés dans un espace tridimensionnel (3D). Une étude de sensibilité du maillage est réalisée, l'objectif est de définir la dimension optimale des éléments finis choisis qui permet de mieux converger vers la solution exacte. Les différents matériaux constitutifs sont modélisés suivant des modèles numériques après identification de leurs paramètres mécaniques. L'interaction entre les différents éléments ainsi que les étapes d'assemblage et de chargement des panneaux sandwichs sont présentées.

III.2 Présentation générale d'ABAQUS

ABAQUS est un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés en mécanique. Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants de problèmes non-linéaires. ABAQUS peut simuler n'importe quelle géométrie telles que : poutres, plaques, coques et éléments spéciaux (ressorts, masses...) en deux dimensions ou en trois dimensions (figure III.1). ABAQUS ne gère pas les unités ; c'est à l'utilisateur d'utiliser un système d'unités cohérent.

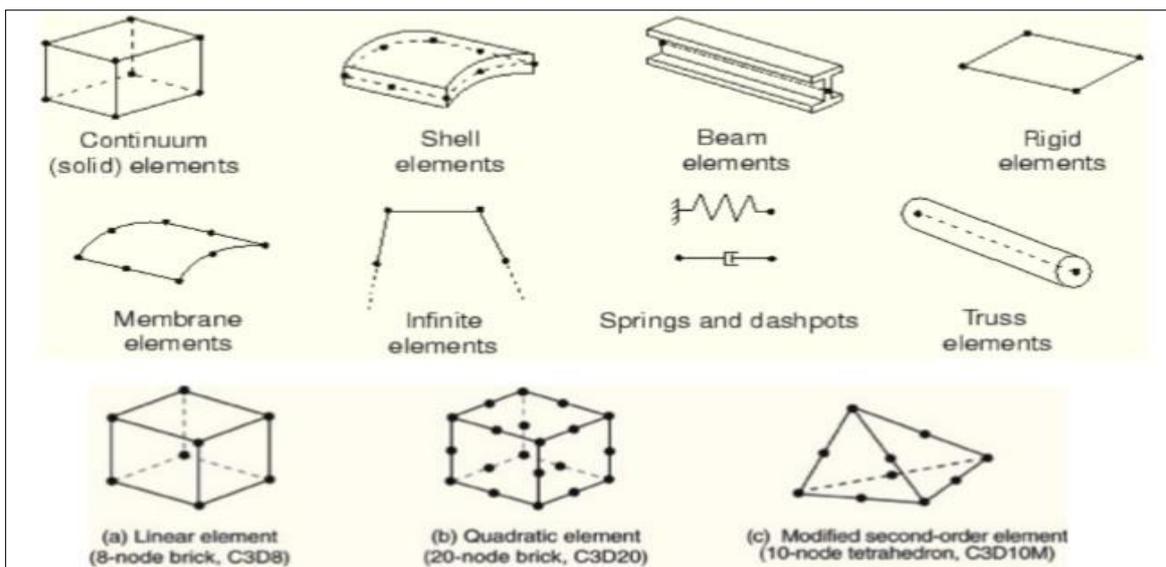


Figure III.1: Quelques formes complexes possibles à programmer sur ABAQUS

Choix des unités pour notre simulation : Distance : mm ; Temps : s ; Force : N ; Contrainte/pression : Mpa ; Température : degrés Celsius°.

MASSE	LONGUER	TEMPS	FORCE	PRESSION	ENERGIE
M	L	T	M.L.T ⁻²	M.L ⁻¹ .T ⁻²	M.L ² .T ⁻²
Kilogramme	Mètre	Seconde	Newton	Pascal	Joule
Gramme	Millimètre	Milliseconde	Newton	MPa	Mili joule
Tonne	Millimètre	Seconde	Newton	MPa	Mili joule

Tableau III.1 : Tableau des unités correspondant à ABAQUS

III.3 Bases de l'interface d'ABAQUS

ABAQUS/CAE : Une interface idéale pour la modélisation, la gestion et le post traitement des modèles dans laquelle l'utilisateur peut effectuer la totalité de la mise en donnée.

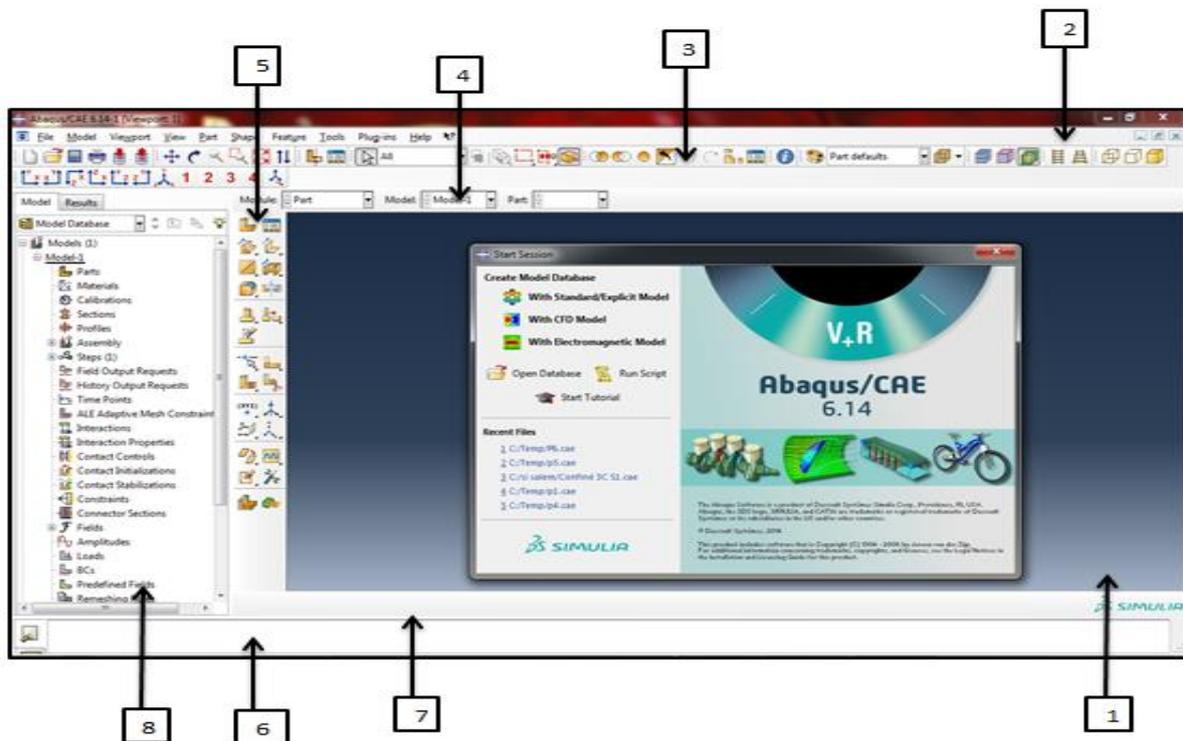


Figure III.2 : Présentation de l'interface ABAQUS.

1. Fenêtre d'affichage graphique.
2. Barre de menu en haut, ces menus sont relatifs au module correspondant.
3. Barre horizontale d'outil, y sont disposées les icônes correspondant aux commandes les plus courantes.
4. Une troisième barre de menus déroulant permettant d'accéder aux autres modules, ou de sélectionner le modèle ou la pièce sur lesquels on souhaite travailler.
5. On dispose à gauche d'une colonne d'icône permettant d'accéder aux outils disponibles à l'intérieur du module dans lequel on se trouve.
6. L'espace juste sous la fenêtre d'affichage graphique correspond aux messages affichés par ABAQUS lors de la modélisation ; ils permettent d'être mieux guider dans les actions entreprises.
7. une fenêtre en dessous sur fond blanc est utilisée pour afficher des messages informatifs : réponses à des questions posées, avertissements liés à des problèmes rencontrés, etc.
8. Enfin, arbre du modèle et résultats.

III. 4 Présentation des variantes d'étude

Dans le cadre de la présente étude numérique, la modélisation de la structure multicouche est menée dans un espace tridimensionnel (3D). Les analyses numériques sont de type non linéaire. On a simulé deux types panneaux sandwichs à savoir : âme pleine et âme pleine gradué (2couches, 3 couches, 5 couches). On a simulé un panneau sandwich à base de mousse en PVC de densité 80 kg/m^3 et semelle en fibre de verre on a considéré que le contact est parfait. Ce dernier est dimensionné et expérimenté par **H.M. Bahabadi, et al [56]** (Voir la (Figure II.15 du chapitre précédent). Le sandwich de notre étude est modélisé est illustré sur la figure III.3 suivante :

- L'âme : Épaisseur ($H = 15 \text{ mm}$) ; Longueur ($L = 370 \text{ mm}$) ; Largeur de 60 mm
- La semelle : Épaisseur de 1.73 mm (6 plies de $e=0.28 \text{ mm}$) ; Longueur ($L= 370 \text{ mm}$) ; Largeur de 60 mm

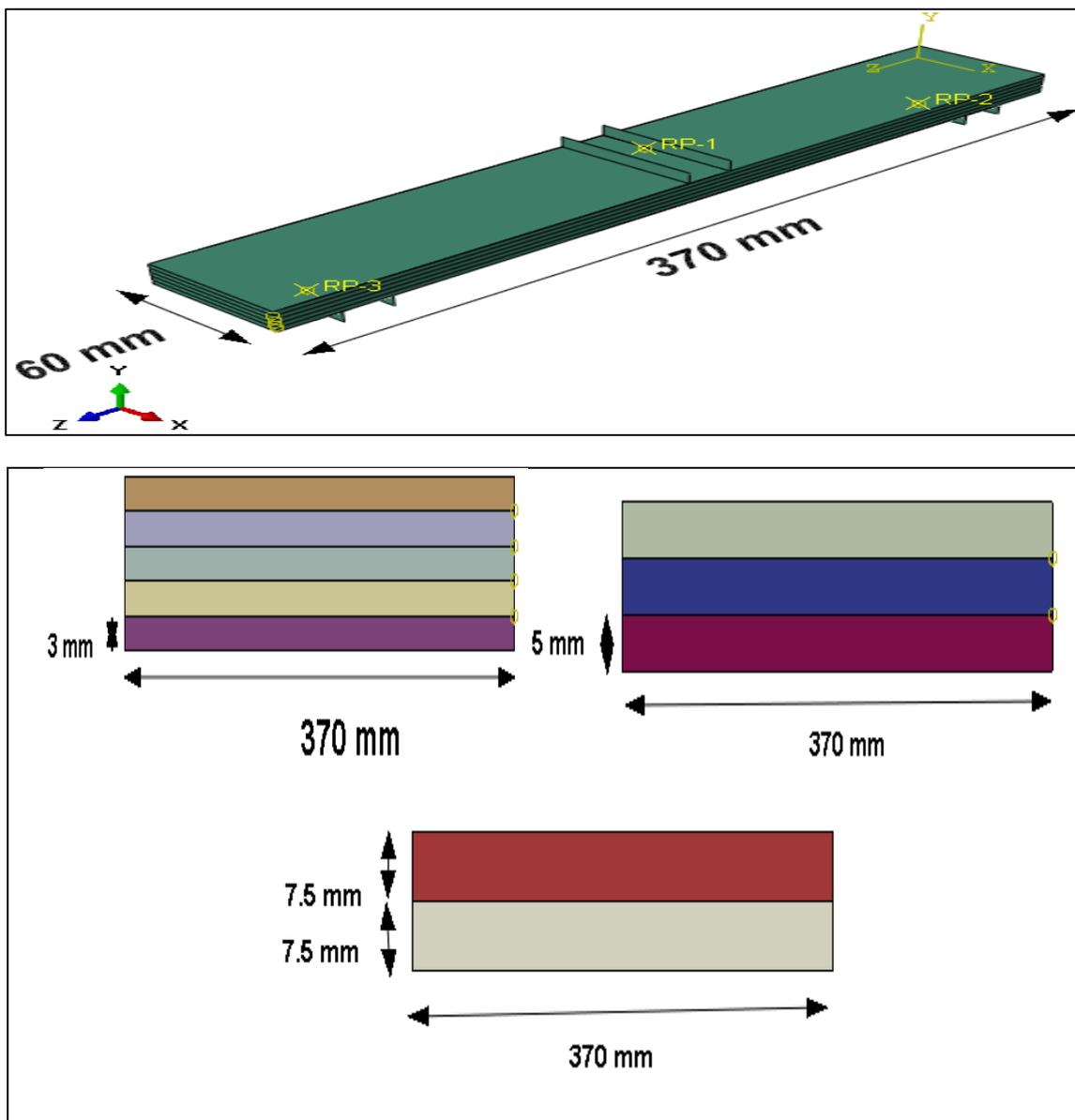


Figure III.3 : Différentes structures de sandwichs utilisées dans la présente étude

III.5 Identification des paramètres et modèles adoptés

Toutes les dimensions ainsi que toutes les propriétés mécaniques des matériaux constitutifs sont soigneusement et séparément introduites pour chaque élément du notre modèle. Afin de modéliser le comportement des différents matériaux on fait appel à des modèles éléments finis : Modèle élastique orthotrope pour les composites des semelles (tissu en fibre de verre), Modèle élasto-plastic pour les matériaux d'âme en mousse PVC.

III.5.1 Modèle élastique orthotrope pour les composites de semelles

Les composites orthotropes sont des composites dont le renfort est généralement constitué de fils unidirectionnels croisés à 90°. Les symétries orthogonales, deux à deux des plans font que ces matériaux se comportent, du point de vue élastique, comme les matériaux orthotropes. Le tissu composite utilisé dans notre étude est constitué d'un ensemble de filaments unidirectionnel croisé à 90°, il possède trois plans de symétrie orthogonaux deux à deux. Son comportement orthotrope dans l'hypothèse des contraintes planes est décrit en introduisant les constantes de rigidité dans les directions principales données par :

Notations	Valeur	Dénotation
C (W /m. K)	0.04	Conductivité thermique
α ($\mu\text{m}/\text{m } ^\circ\text{C}$)	$9. 10^{-6}$	Coefficient de dilatation thermique
E1(Mpa)	13700	Module de Young longitudinal
E2(Mpa)	13700	Module de Young transversal
ν_{12}	0.3	Coefficient de poisson sur le plan longitudinal/transversal
ν_{13}	0.3	Coefficient de poisson sur le plan longitudinal/vertical
G ₁₂ (Mpa)	1 700	Module de cisaillement sur le plan transversal

Tableau III.2 : Paramètres du modèle élastique orthotrope pour le tissu en fibre de verre

III.5.2 Modèle élasto-plastique pour les matériaux d'âme

Une étude paramétrique est menée pour étudier l'effet de la variation de nombre de couches en utilisant la loi de mélange avec différentes valeurs de l'indice matériel de la loi de mélange p. Les paramètres recherchés sont la densité et le module de Young pour chaque couche.

$$E(z)_{p-FGM} = E_1 + \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2}\right)^p (E_2 - E_1) \quad \text{III. 1}$$

E₁ : rigidité de matériaux 1 (mousse pvc E=45)

E₂ : rigidité de matériaux 2 (mousse pvc E=175)

H : la hauteur de l'âme

Z : la distance entre centre de gravité d'une couche donnée et le centre de gravité de l'âme

P : l'indice matériel de la loi de mélange

$$D(z)_{p-FGM} = D_1 + \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2}\right)^p (D_2 - D_1) \quad \text{III. 2}$$

D_1 : la densité de matériaux 1 (mousse pvc densité $D= 60 \text{ kg/m}^3$)

D_2 : la densité de matériaux 2 (mousse pvc densité $D=200 \text{ kg/m}^3$)

	Rigidité E (MPa) Densité D (kg/m ³)	COUCHE 1	COUCHE 2
P=1	E	77.5	142.5
	D	95	165
P=0.1	E	158.43	171.37
	D	181.87	196.029
P=10	E	45	52.32
	D	60.00	67.88

Tableau III.3 : Les densités et rigidités pour âme avec deux couches

	Rigidité (E) (MPa) Densité D (kg/m ³)	COUCHE 1	COUCHE 2	COUCHE 3
P=1	E	66.66	110	153.33
	D	83.33	130	176.66
P=0.1	E	153.67	166.29	172.65
	D	177.03	190.62	197.47
P=10	E	45	45.12	65.99
	D	60	60.13	82.61

Tableau III.4 : Les densités et rigidités pour âme avec 3 couches

	Rigidité E(MPa) Densité D (kg/m ³)	COUCHE 1	COUCHE2	COUCHE 3	COUCHE 4	COUCHE 5
P=1	E	58	84	110	136	162
	D	74	102	130	158	186
P=0.1	E	148.26	160.25	166.29	170.44	173.63
	D	171.20	184.11	190.62	195.09	198.53
P=10	E	45	45	45.12	48.67	90.32
	D	60	60	60.13	63.95	108.81

Tableau III.5 : Les densités et rigidités pour âme avec 5 couches

	Matériaux 1	Matériaux 2
Rigidité E (MPa)	45	175
Densité D (kg/m ³)	60	200

Tableau III.6 : Les densités et rigidité pour les matériaux 1 et 2

Un modèle numérique élasto-plastique intégrer dans le code élément finis ABAQUS utilisé pour modéliser le comportement expérimental des matériaux d'âme, il permet de gérer les problèmes de plasticité et il inclut les déformations irréversibles pour allier les avantages de la modélisation des effets de la microfissuration sur la rigidité du matériau au niveau macroscopique et de la théorie de la plasticité pour modéliser des déformations irréversibles. Ce modèle fournit une capacité générale pour la modélisation des matériaux quasi fragiles dans tous les types de structures. Il utilise le concept d'élasticité isotrope en combinaison avec la traction et la plasticité isotrope de compression pour représenter le comportement inélastique.

Notations	Valeur	Dénotation
C (W /m. K)	0.063	Conductivité thermique
α ($\mu m / m \text{ } ^\circ C$)	$6 \cdot 10^{-5}$	Coefficient de dilatation thermique
E (Mpa)	84.77	Module de Young
ν	0.1	Coefficient de poisson
σ_e (Mpa)	1.20	Contrainte qui correspond à la limite élastique
σ_u (Mpa)	2.20	Contrainte de rupture

Tableau III.7 : Paramètres du modèle élasto-plastique pour les matériaux d'âme

III.6 Étapes de la modélisation

ABAQUS CAE est divisé en unités fonctionnelles appelées modules. Chaque module contient les outils qui sont propres à une partie de la tâche de modélisation à savoir : le module Part ; Module Property ; Module Assembly ; Module Step ; Module Interaction ; Module Load ; Module Mesh ; Module Job et Module de visualisation.

III.6.1 La géométrie des éléments (module part)

Dessiner le modèle : le module PART permet de créer tous les objets géométriques nécessaires au problème. Dans le cas d'une modélisation tridimensionnelle. On a créé le panneau sandwich dans le module part en utilisant les coordonnées des points en deux dimensions et on a créé la 3eme dimension par extrusion. On a utilisé un solide déformable en 3D pour l'âme pleine (dimensions : 60mm, 370mm, 15mm).

Les semelles sont créés avec un modèle 3D on a utilisé « shell planer » ensuite nous avons dessiné avec « Creat lignes » (dimensions : 370mm, 60mm).

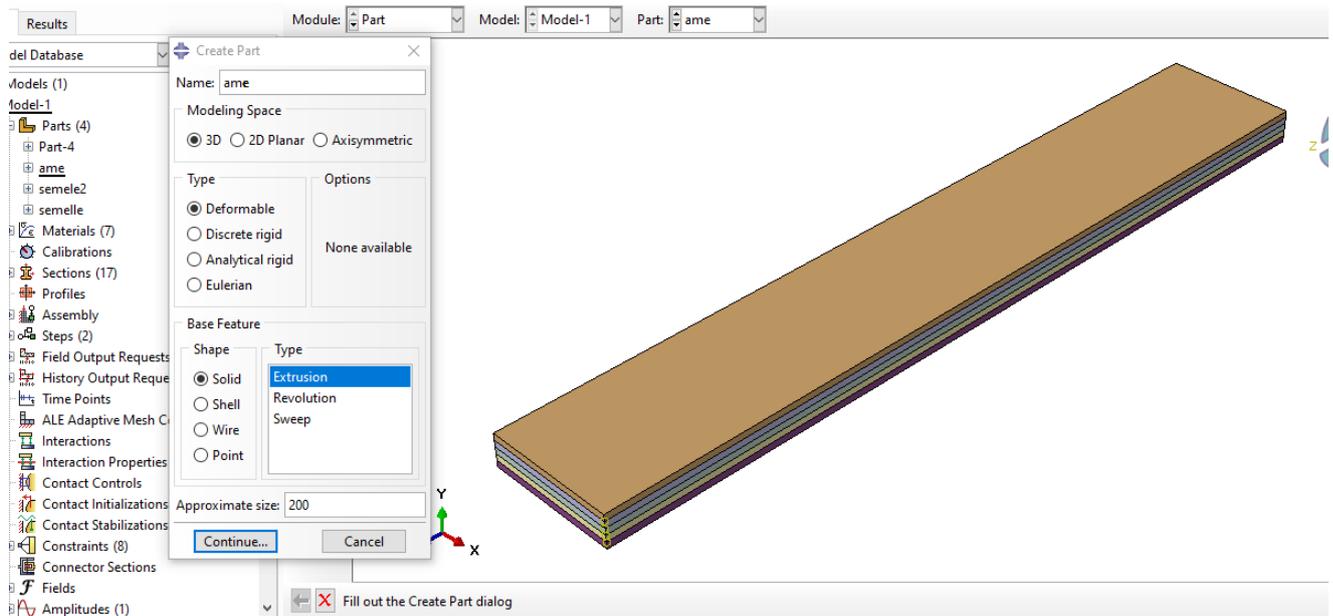


Figure III.4 : Modélisation géométrique de l'âme du panneau sandwich

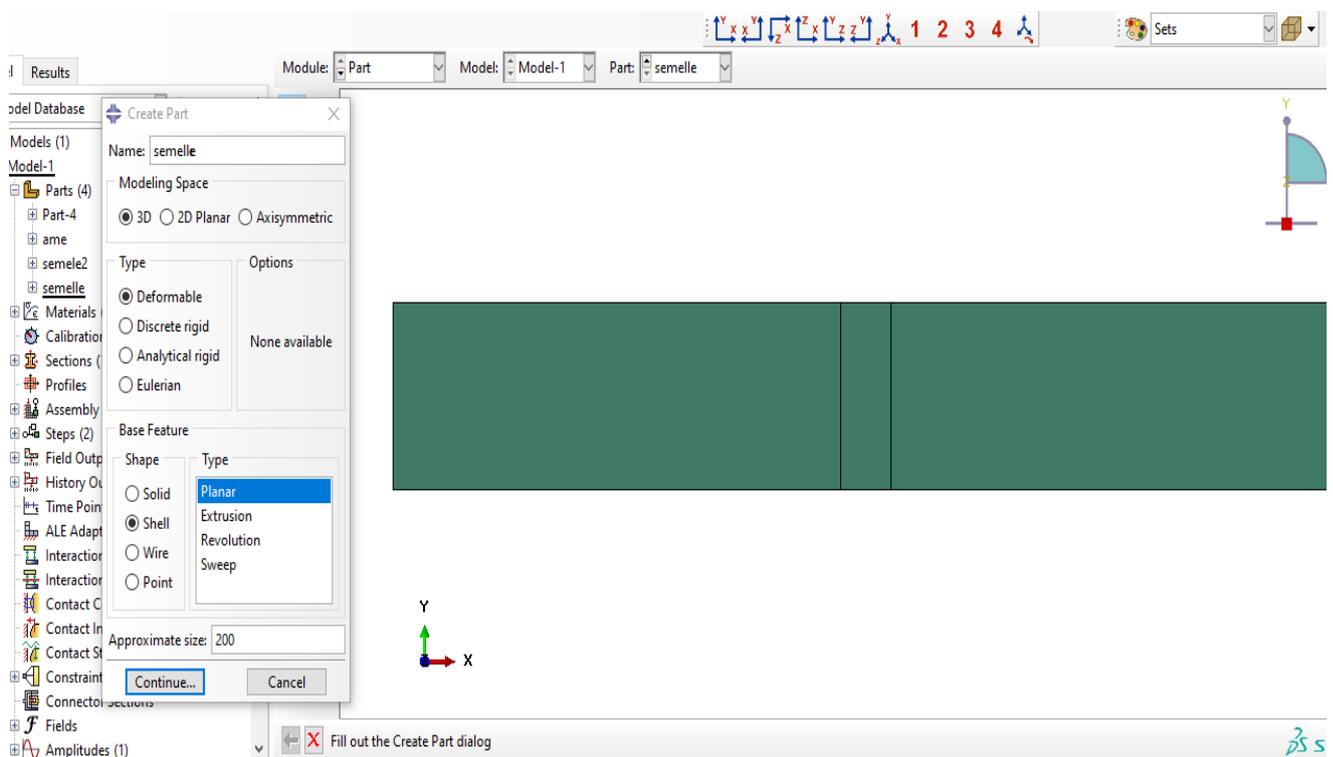


Figure III.5: Modélisation géométrique des semelles du panneau sandwich

III.6.2 Propriétés des matériaux (Module Property)

Le rôle de ce module dans la modalisation numérique comme son nom l'indique est d'affecter toutes les propriétés matérielles d'un objet géométrique ou d'une partie de ces objets. Pour un calcul élastique il faut introduire les paramètres suivants : le module de Young et le coefficient de poisson.

- Créer le matériau 
- Créer les sections sur lesquelles appliquer ces matériaux 
- Affecter (assimiler) les matériaux aux sections correspondantes 

III.6.3 Assembler le modèle : (le module ASSEMBLY)

Dans ce module, nous importons les deux pièces auparavant dessinées, on les rassemble avec « **Creat instance** », on peut répéter chaque part créé plusieurs fois et lui faire des translations et rotations s'il est nécessaire jusqu' à voir notre modèle. On fait l'assemblage de l'âme en PVC avec les semelles en fibre de verre.

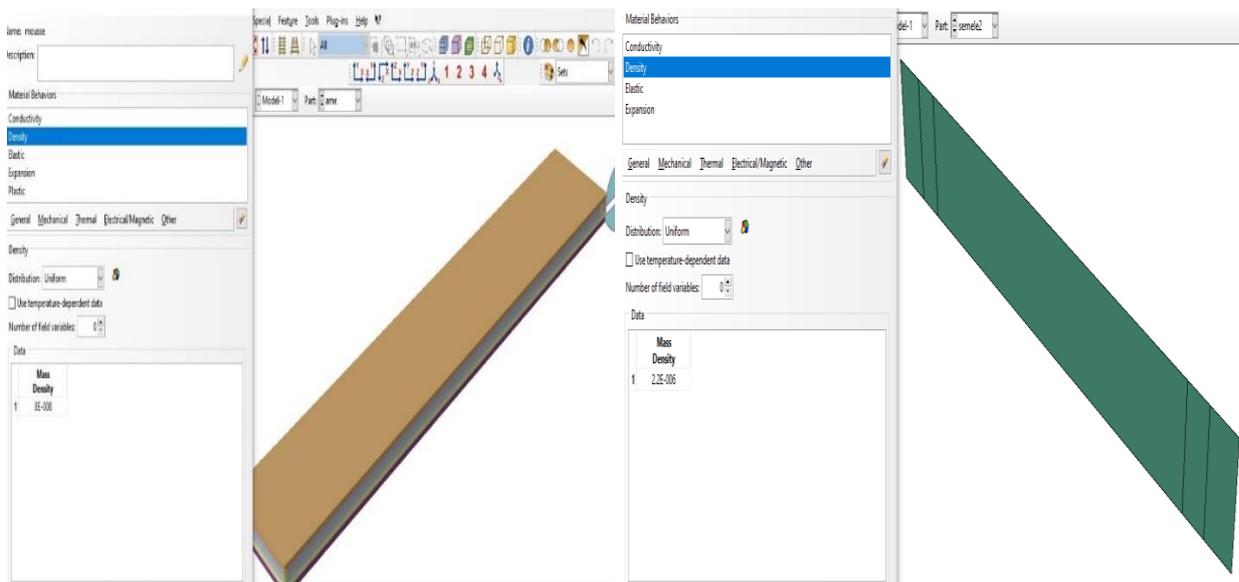


Figure III.6: propriétés mécaniques de l'âme et de semelles

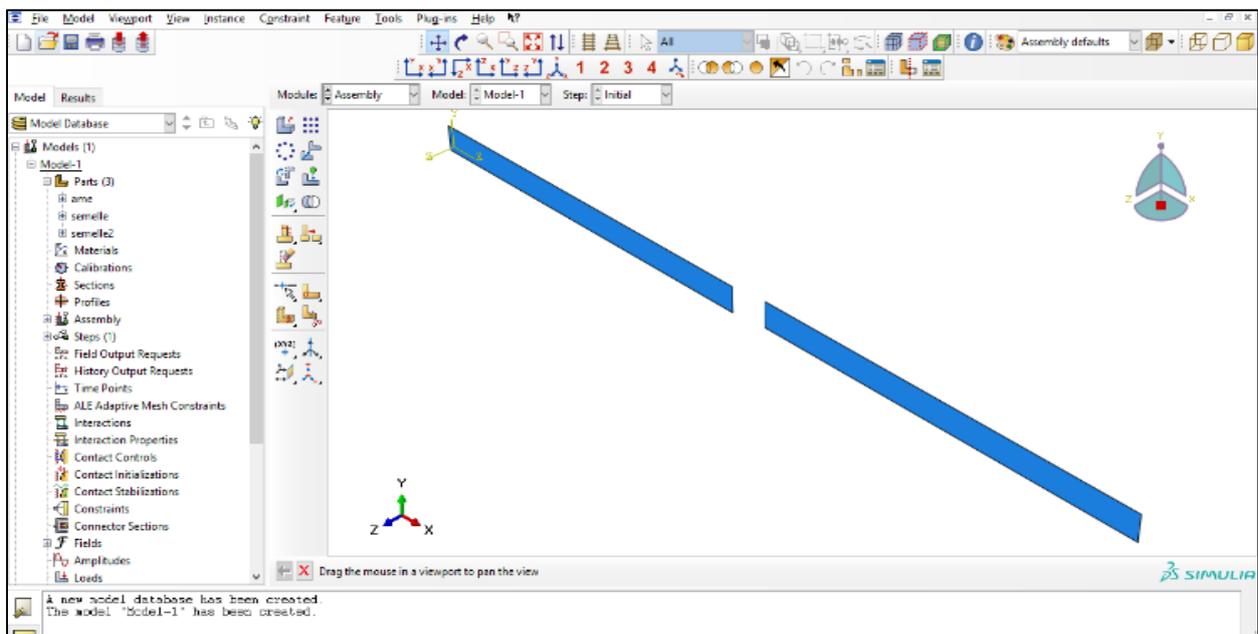


Figure III.7 : Assemblage des éléments

III.6.4 Définition du « Steps » et des variables à calculer (le module step)

Ce module permet de définir les étapes d'analyse. Nous créons une procédure explicite. Un point important pour cette simulation est de bien définir le temps de calcul ainsi que l'incrément. Pour notre simulation on a choisi un calcul « **dynamique explicite** ». Nous avons spécifié un temps de simulation de 1 s avec un facteur d'échelle de temps pour une incrément de 0.2 s.

III.6.5 Définition des contacts (Module Interaction)

Le module interaction permet de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, elles peuvent être de différentes natures mécaniques, thermiques ou autres. Il faut savoir qu'Abaqus ne prend en compte que les interactions explicitement définies, la proximité géométrique n'étant pas suffisantes, la procédure de spécification des interactions est la suivante :

- Créer les surfaces.
- Définir les types de contacts. Dans notre simulation on a créé un contact surfacique entre les semelles en fibre de verre et l'âme en pvc avec « **TIE** », qui considère une adhérence parfaite entre les deux surfaces choisies.
- Associer des surfaces avec des types de contact.

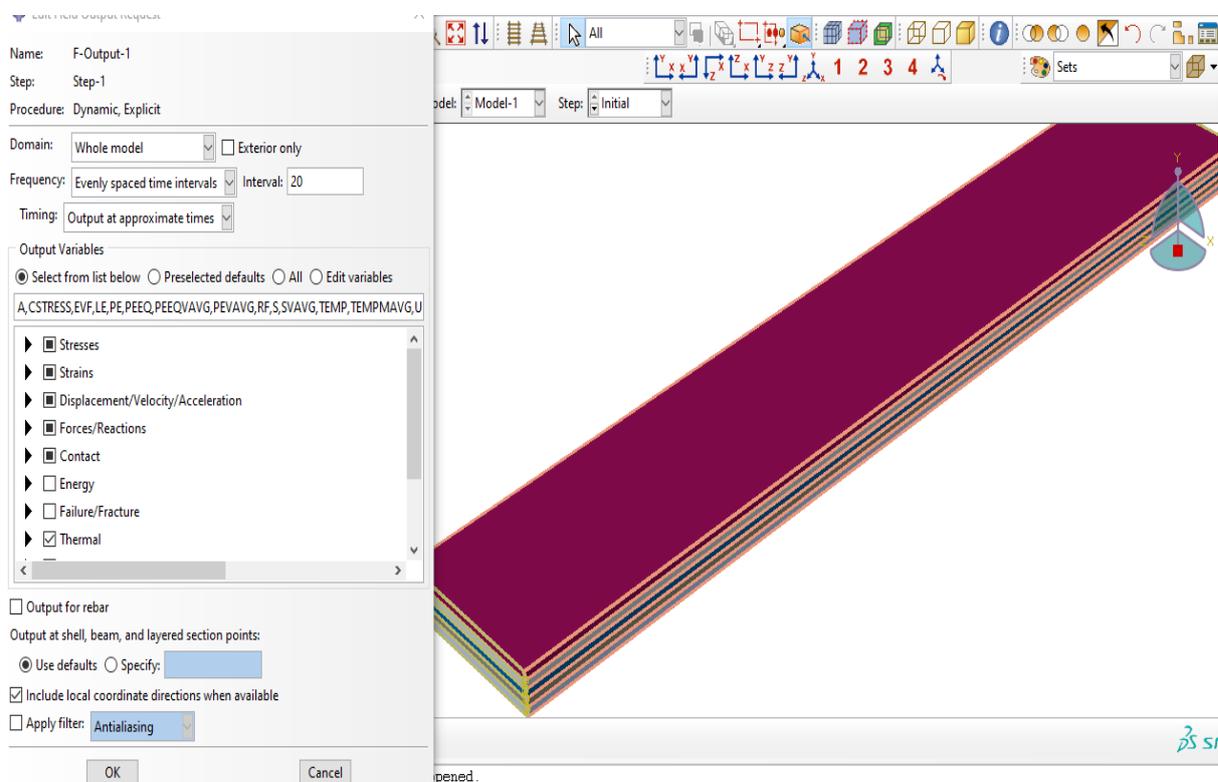


Figure III.8: Gestion de la méthode de calcul dans le module step.

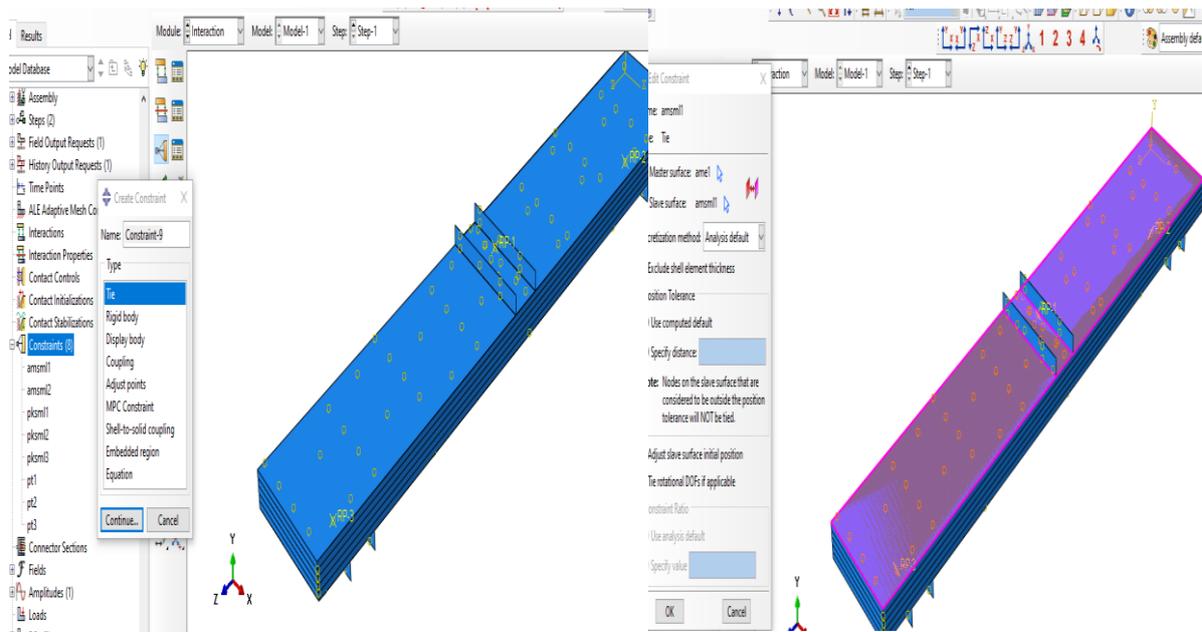


Figure III.9: Contact de l'âme avec les deux semelles.

III.6.6 Définition des conditions aux limites et chargement (Module Load)

Le module load permet de spécifier tous les chargements, conditions aux limites et champs.

- "CreateBoundary Condition"(Bcs) : l'étape de création des conditions aux limites.
- "CreateLoad" (load) : regroupe l'ensemble des forces auxquelles le système est soumis.

Afin de pouvoir valider les résultats expérimentaux et vérifier la pertinence de la technique proposée, on a réalisé des conditions de chargements similaires pour le panneau multicouche modélisée qui est soumis à un chargement mécanique monotone de flexion trois points et un chargement thermique. Les figures ci-dessous illustrent clairement les conditions aux limites ainsi que les deux modes de chargement :

Conditions aux limites (Appuis) :

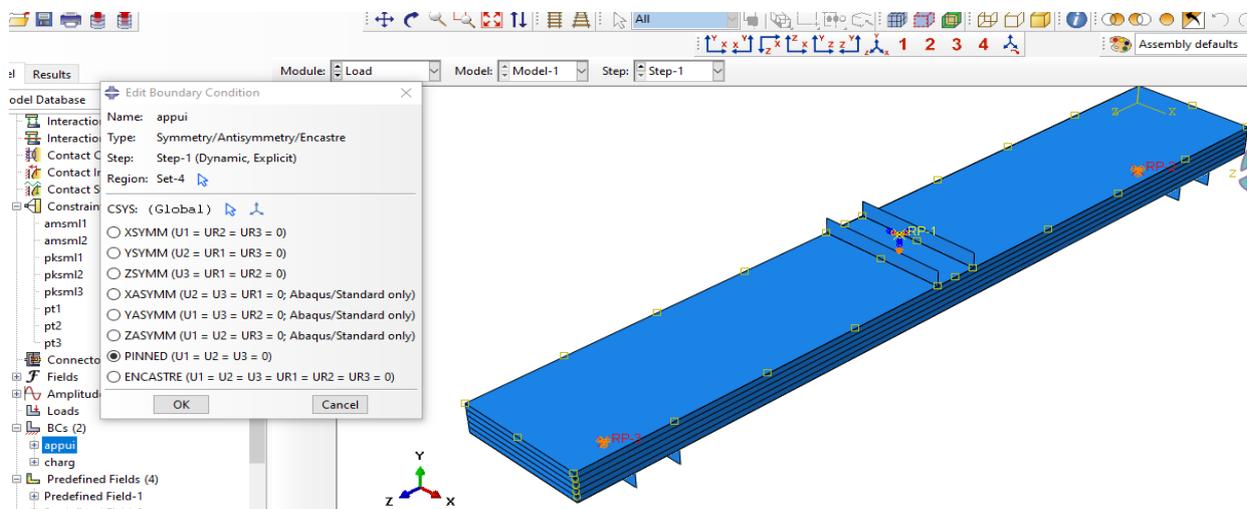


Figure III.10 : Conditions aux limites de module load

Chargement mécanique

Un chargement mécanique de flexions 03 points est appliqué, ce chargement est monotone jusqu'à la rupture il est piloté en déplacement imposé comme montré sur la figure :

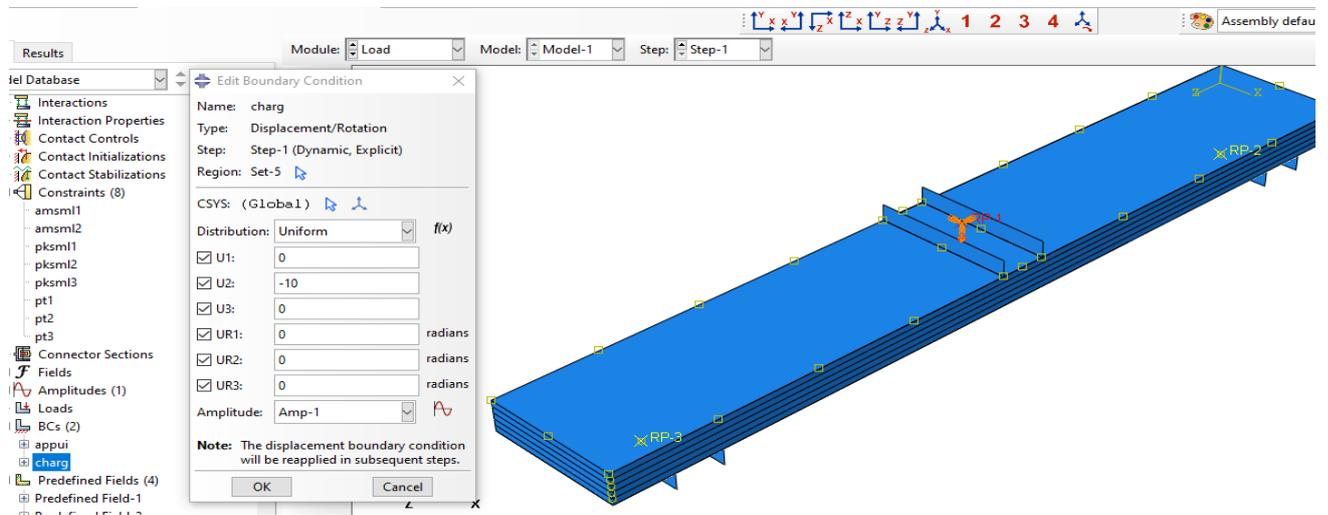


Figure III.11 : Définition des forces de module load. (Chargement en flexion a 3 points)

Chargement thermique

Un chargement thermique est également appliqué sur les semelles supérieures des structures sandwichs modélisés, de la manière suivante :

- Un chargement initial de température constante de 10° ;
- Un chargement thermique de température variable monotone, avec un incrément de 10° ;
- La température finale maximale appliquée est considérée variable (100°).

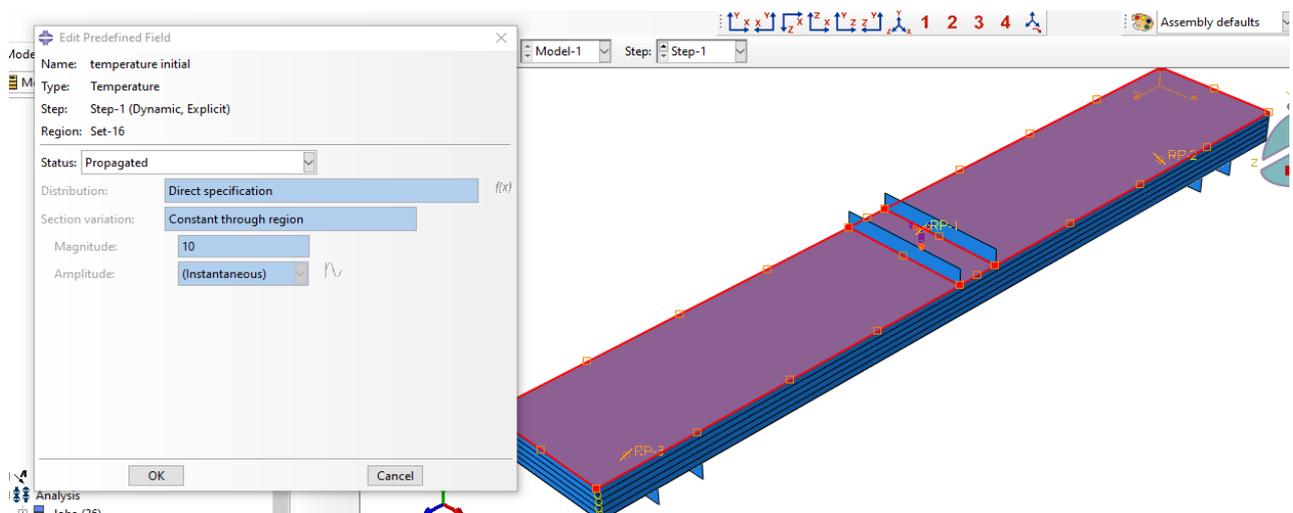


Figure III.12 : Chargement thermique des semelles

III.6.7 Le maillage de modèle (module mesh)

Dans ce module nous générons le maillage à notre ensemble. On définit les éléments du Maillage avec l'outil « mesh ». En effet, l'art du maillage repose essentiellement sur deux critères : les éléments de maillage (par exemple, hexaédriques, cubiques, tétraédriques dans « Mesh contrôle

») et la complexité topologique de chaque pièce. Notre choix s'est porté sur l'élément hexaédrique du premier ordre (fonctions de forme linéaires) à 8 nœuds, car il est très performant pour les problèmes à géométrie simple et parce qu'il offre la possibilité d'une intégration réduite. Il est possible aussi de mailler différemment une même pièce pour mettre en exergue les surface les plus déformables.

III.6.8 Étude de sensibilité de maillage

On a réalisé une étude de sensibilité du maillage pour les panneaux sandwichs avec l'âme en mousse pvc et âme graduée, afin de définir la dimension optimale des éléments finis choisis qui permet de mieux converger vers la solution exacte. À cet effet une étude comparative est réalisée, lors de la simulation des panneaux sandwichs, cette dernière est effectuée avec des dimensions variées à savoir : **20 mm, 15 mm, 10 mm, 8 mm, 6 mm, 4mm, 3 mm et 2 mm**

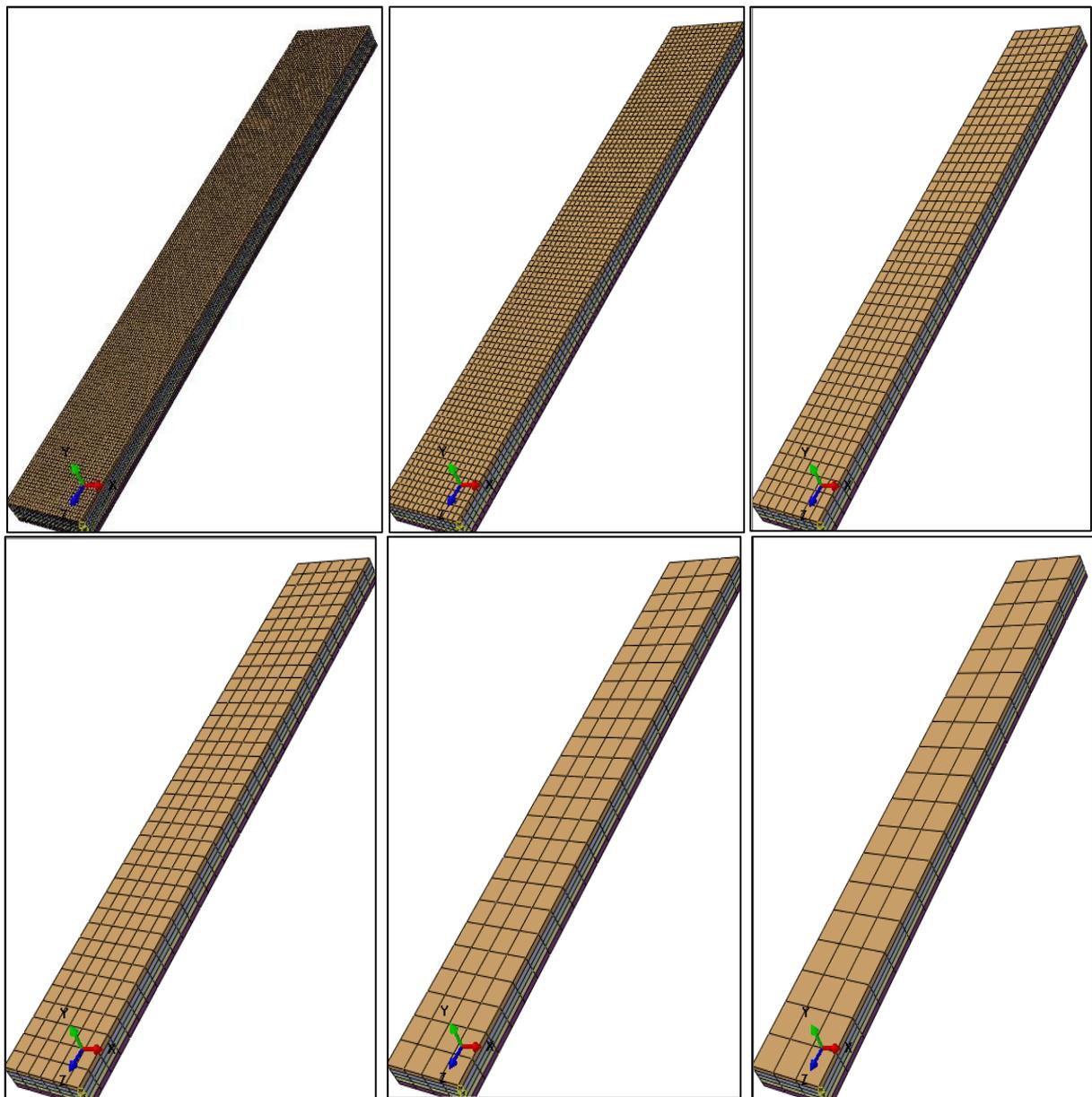


Figure III.13 : Configurations pour la validation de la sensibilité au maillage

La figure ci-dessous montre la réponse des panneaux multicouches en flexion à travers l'évolution du chargement extérieur appliqué en (N) en fonction du déplacement vertical à mi-travée (flèche en (mm)) jusqu'à la rupture pour les variantes de dimensions des éléments finis considérées.

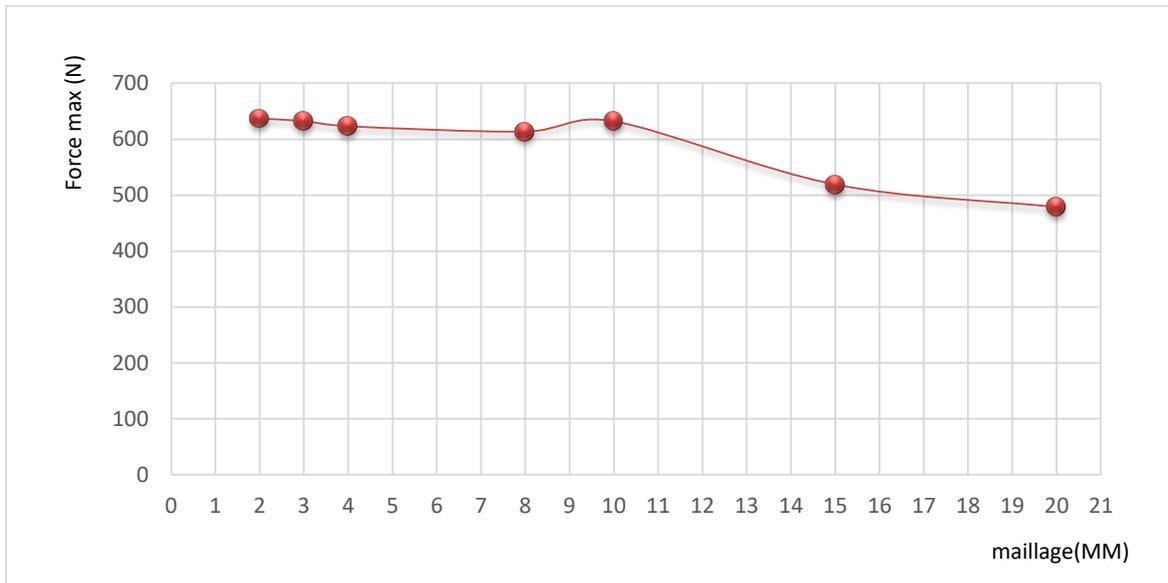


Figure III.14 : Étude de la sensibilité du maillage (maillage en fonction de la force max correspondante)

Après observation on constate que les courbes commencent à se stabiliser (force constante) à une valeur approximative de 10 mm. Par conséquent, les éléments de sandwichs sont maillés par des éléments finis de 6 mm dans les trois directions de l'espace, ce qui assure un maillage très raffiné.

III.6.9 Création du fichier résultats (Module Job)

La tâche de module « **Job** » est d'analyser le modèle à simuler bien définie auparavant (géométrie, matériaux, lois de comportements, les chargements...). On lance le calcul après la création d'un fichier job, en cliquant sur « **Submit** », Abaqus va alors réaliser tous les calculs nécessaires et post-traite les résultats demandés.

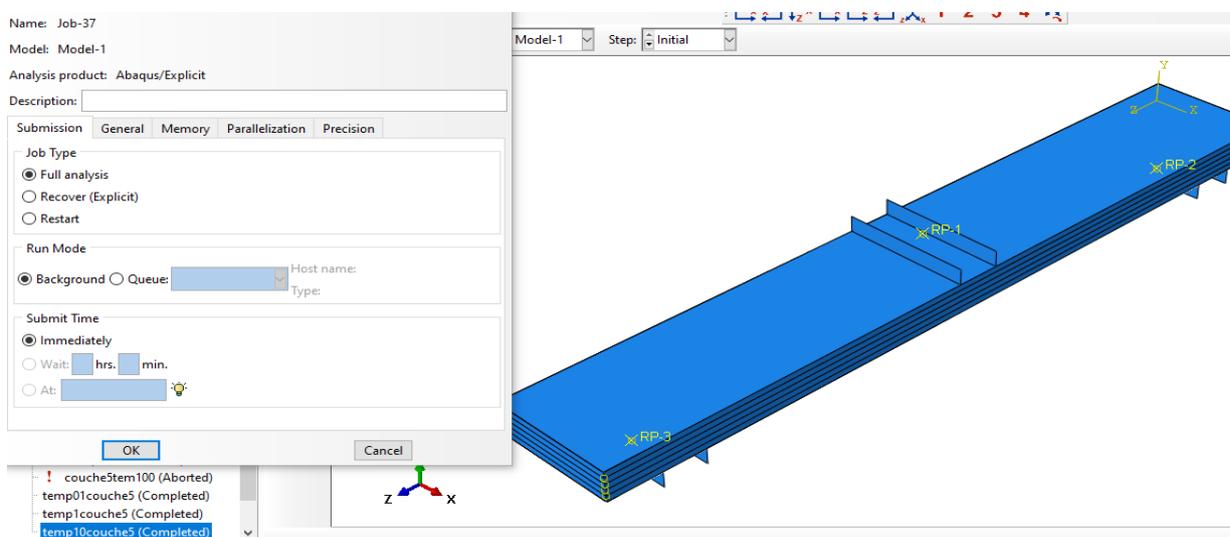


Figure III.15 : Création de fichier job

III.6.10 Visualisation des résultats (Module visualisation)

Le module visualisation permet l'affichage graphique ou numérique des résultats. L'utilisateur voit le résultat du calcul numérique dans « **Results** » : soit par la visualisation des déformations dans « Field output » comme les déformations, les contraintes, la vitesse ou les force ; soit par les courbes dans « History Output » comme l'énergie cinétique ou l'énergie totale de l'ensemble du modèle, l'énergie de dissipation ou des déformations. On peut visualiser la forme déformé du modèle, en cliquant sur les outils :  ou .

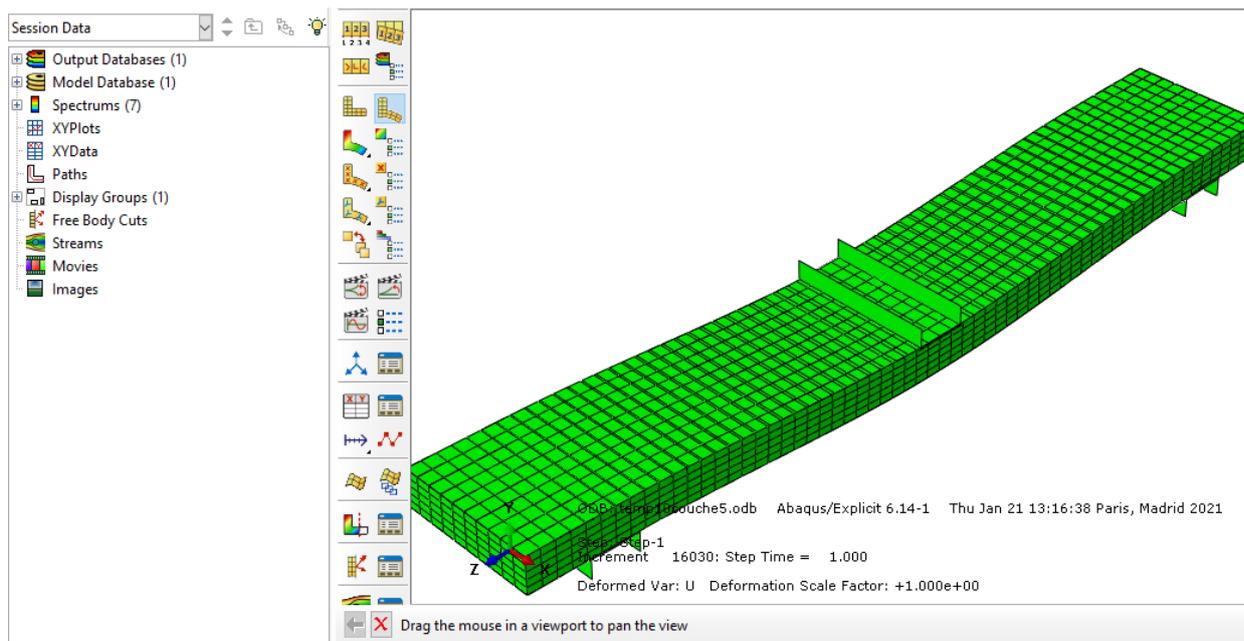


Figure III.16 : Visualisation et exploitation des résultats

III.7 Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons présenté le code de calcul ABAQUS, en résumant les actions principales à effectuer pour créer nos modèles. Il nous a permis de simuler le comportement mécanique et thermique des panneaux sandwichs en âme pleine et en âme en FGM.

Les matériaux constitutifs sont modélisés à travers des modèles numériques intégrés dans code **ABAQUS** le modèle choisi pour le calcul mécanique est élastique orthotrope pour les peaux constituées de fibre de verre plus la résine, on a adopté le modèle élasto-plastique pour le pvc permettant d'évaluer la réponse ultime et le mode de rupture des sandwichs.

Chapitre IV

Présentation des résultats et discussions

IV.1 Introduction

A travers ce chapitre nous allons présenter et interpréter les résultats obtenus à l'issue des simulations numériques menées sur le comportement mécanique et thermomécanique des panneaux sandwichs gradués (FGM) en flexion trois -points, les modèles géométriques virtuels des sandwichs sont conçus sous la plateforme du logiciel Abaqus.

Quatre variantes d'étude sont prises en considération, les caractéristiques mécaniques des matériaux constituant les couches de l'âme graduée sont citées préalablement dans la partie simulation numérique Tableaux (III.3) (III.4) (III.5), qui sont bien calculés avec la loi de mélange. Les propriétés du matériau varient de façon continue, dans le sens de l'épaisseur. Pour toutes les variantes les semelles sont identiques en fibre de verre. Le modèle élément fini proposé est validé à travers des confrontations avec les résultats expérimentaux disponibles en littérature [56].

Les 4 variantes étudiées sont :

- Sandwich avec âme simple en mousse PVC ;
- Sandwich avec âme FGM deux (2) couches ;
- Sandwich avec âme FGM trois (3) couches ;
- Sandwich avec âme FGM cinq (5) couches.

A cet effet, tous les résultats obtenus, en termes d'évolution des contraintes, déformations en fonction du chargement mécanique et thermomécanique sont discutés et présentés sous forme de graphiques force-déplacement et de cartographies contraintes de Von mises, ceci nous a permis de mettre en valeur l'apport de la conception proposée.

IV.2 Validation de modèle numérique

La procédure numérique et le modèle élément fini proposé sont validés à travers des confrontations avec les résultats expérimentaux tirés de la revue de littérature déjà menée dans le chapitre précédent [56], elles ont pour objectif de valider les apports observés dans les simulations. La (figure IV.1) et la (figure IV. 2) montrent la confrontation des courbes forces-déplacements et histogramme force maximale et son déplacement correspondant de courbe tirée des essais expérimentaux et le modèle numérique proposé.

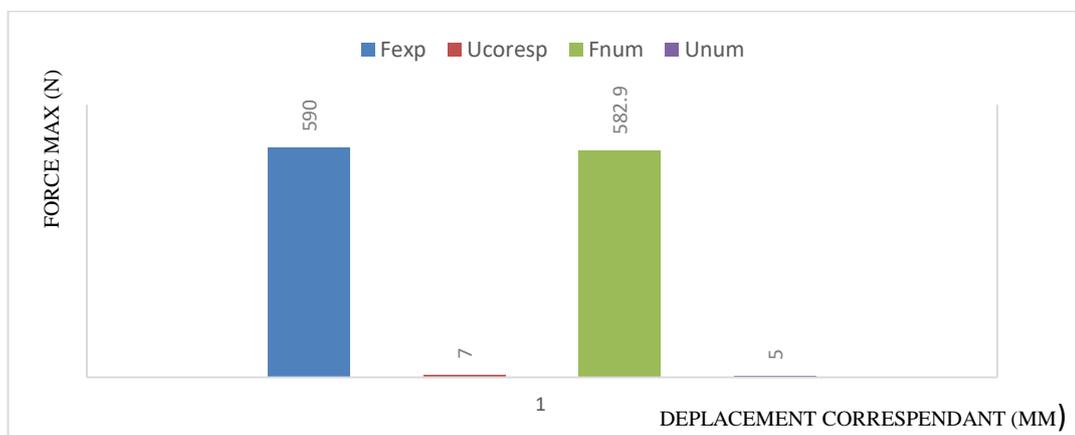


Figure IV.1 : Histogramme force max déplacement correspondant

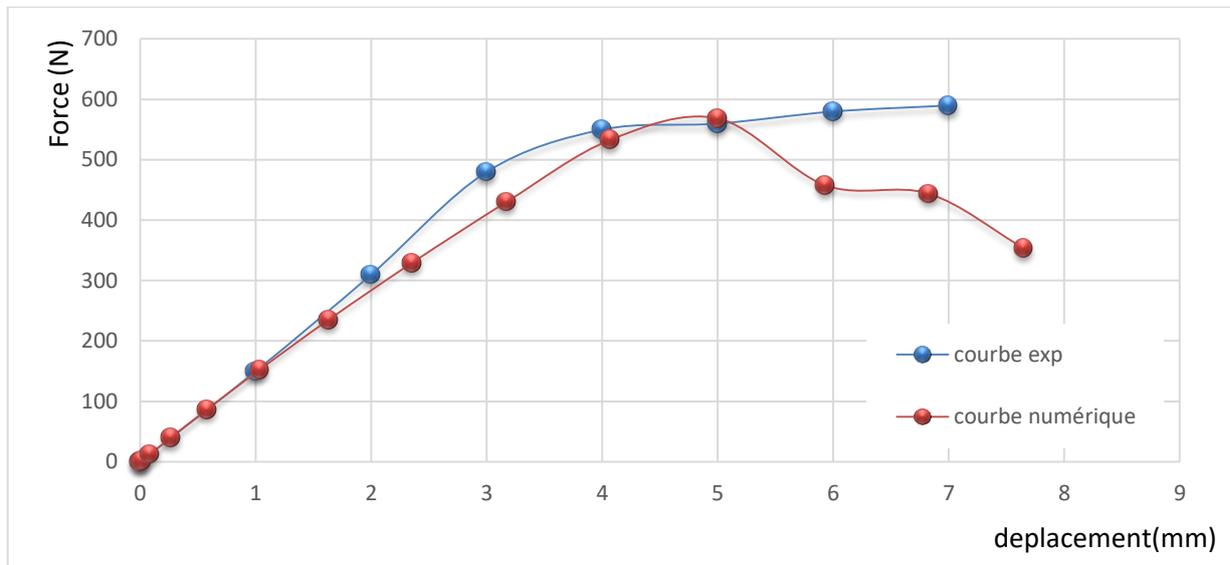


Figure IV.2 : Confrontation des courbes forces-déplacements du modèle numérique vs le courbe expérimental disponible en littérature

D'après, les résultats obtenus de la confrontation des courbes force-déplacement et histogramme force maximale vs. Déplacement correspondant, on constate une bonne concordance entre les résultats numériques et expérimentaux (littérature) en termes du comportement global des sandwichs sous chargement de flexion.

La force maximale du modèle proposé est de **582.9 N**, tandis que **H.M. Bahabadi, et al [56]** ont obtenus expérimentalement de résistances maximales de l'ordre de : **590 N**. En effet, la conception proposée présente un seuil de résistance excellent vis-à-vis le modèle tiré de la littérature scientifique.

V.3 Résultats de l'analyse numérique

Dans cette partie, on a discuté et interprété les graphiques force-déplacement obtenus lors de la simulation numérique et les cartographies des contraintes sous chargement mécanique et thermomécanique qui varie de 10° à 100° avec un incrément de 10° .

IV.3.1 Sandwiches sous chargement mécanique

Les figures suivantes représentent l'évolution du déplacement en fonction de la charge appliquée pour des structures en âme graduée (FGM) sollicitées en flexion 3-points pour une portée ($L = 370$ mm). Quel que soit le type de structure composite testé, le comportement en flexion est similaire et peut se décomposer en 3 phases principales, à savoir :

- Une première phase qui correspond à une augmentation linéaire de la charge appliquée avec le déplacement (partie élastiques, déformation réversible) ;
- Une deuxième phase de comportement non linéaire dans laquelle la charge maximale est atteinte (phase de début d'apparition de fissure) ;
- La dernière phase, on observe une chute de résistance jusqu'à la rupture.

Dans ce qui suit on va présenter une étude sur l'effet de nombre de couches et paramètre du matériau **P** sur le comportement des sandwichs avec l'âme en FGM.

IV.3.1.1 Effet de paramètre du matériau « P »

On a réalisé une étude paramétrique où on a varié le paramètre **P** entre les valeurs (0.1, 1, 10) pour le même nombre de couche pour chaque courbe.

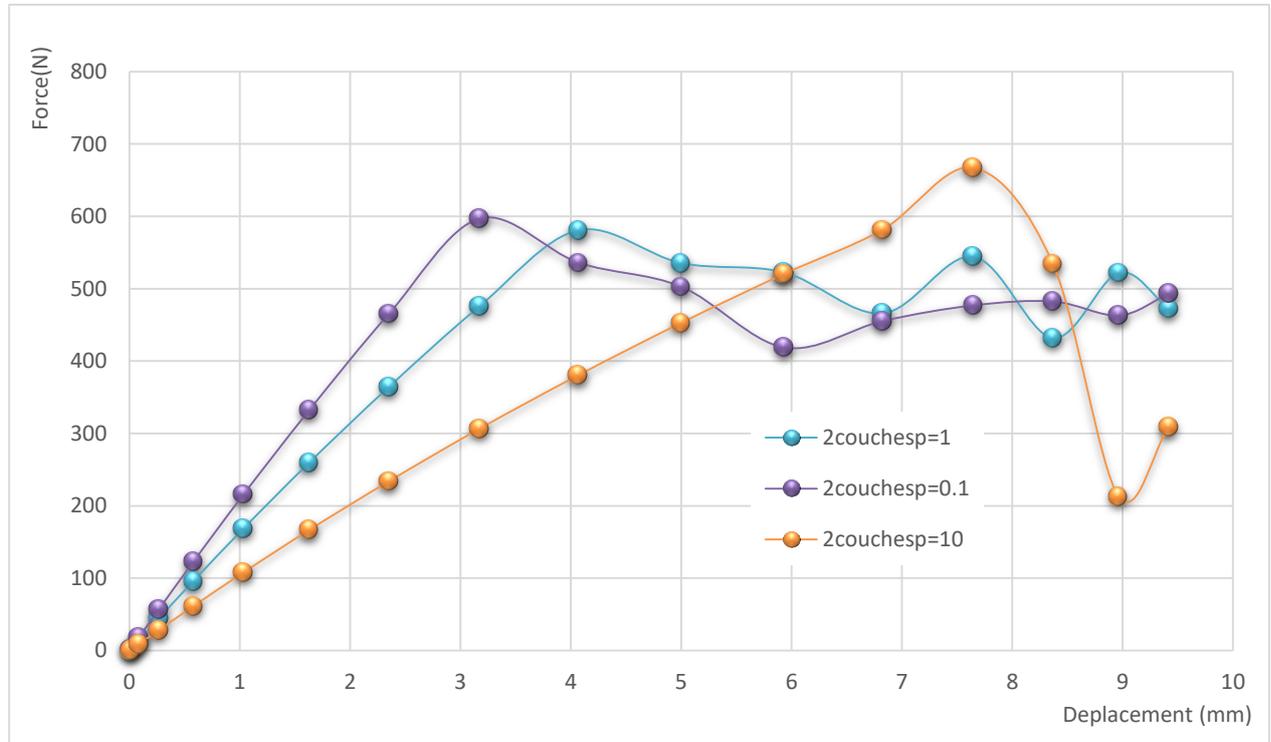


Figure IV.3 : effet de P sur une âme de deux couches

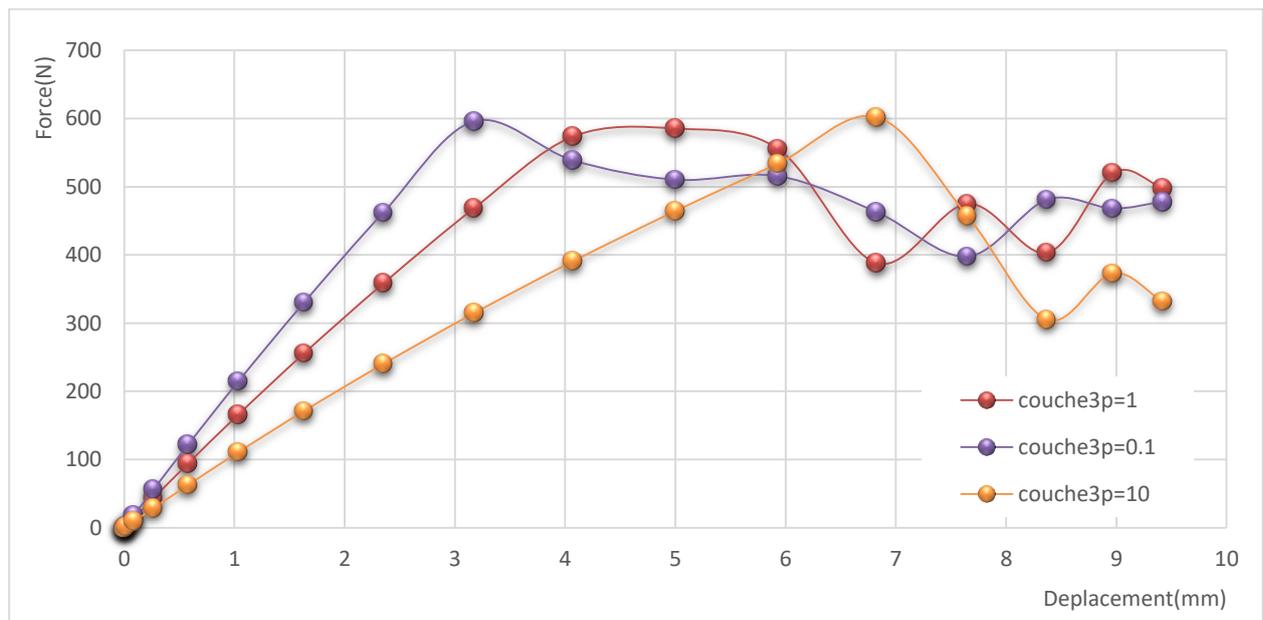


Figure IV.4 : Effet de P sur une âme de trois couches

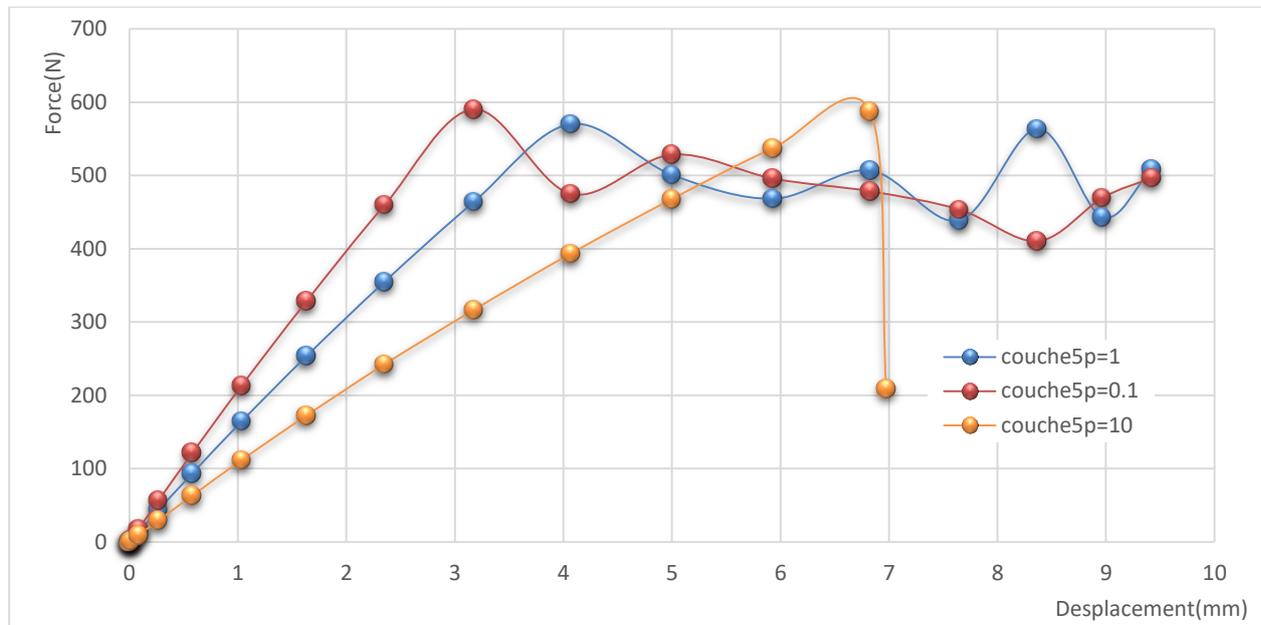


Figure VI.5 : Effet de P sur une âme de cinq couches

Les figures ci-dessus (IV.3, IV.4 et VI.5) illustrent l'évolution des déformations (déplacement) et la capacité portante des structures à travers l'épaisseur de sandwiches P-FGM pour divers paramètres du matériau **P** à savoir ($p=0.1$, $p=1$, $p=10$), sous un chargement mécanique.

D'après ces courbes on constate que le paramètre du matériau **P** a une influence sur la rigidité des sandwiches et sur la ductilité (domaine plastique). Autrement dit le coefficient de pente pour les courbes qui désigne la rigidité flexionnelle des structures se défient d'une courbe à l'autre. Les structures dont la variation du matériau 1 vers le matériau 2 se fait rapidement (pour **P=0.1**) sont les plus rigides, tandis que les structures dont la variation du matériau 1 vers le matériau 2 se fait lentement (pour **P=10**) sont les moins rigides.

Le paramètre **P** a un effet sur la ductilité, en effet les structures dont la variation du matériau 1 vers le matériau 2 se fait lentement (pour **un P=10**) se comporte d'une manière fragile et la rupture se produit brusquement.

Tant dis que le paramètre **P** a un effet négligeable sur la résistance des structures (Figure IV.3)

- **P=0.1** la résistance max = **597.29N** avec un déplacement de **3.17mm**
- **P=1** la résistance max= **580.78N** avec un déplacement de **4.06 mm**
- **P= 10** la résistance max= **667.22N** avec un déplacement de **7.64 mm**

IV.3.1.2 Effet de nombres de couche

Afin d'étudier l'effet de nombres de couche sur les structures en FGM, une étude comparative en fonction de nombre de couche (2 couches, 3 couches, 5 couches) est réalisée. En effet, la valeur de P est constante.

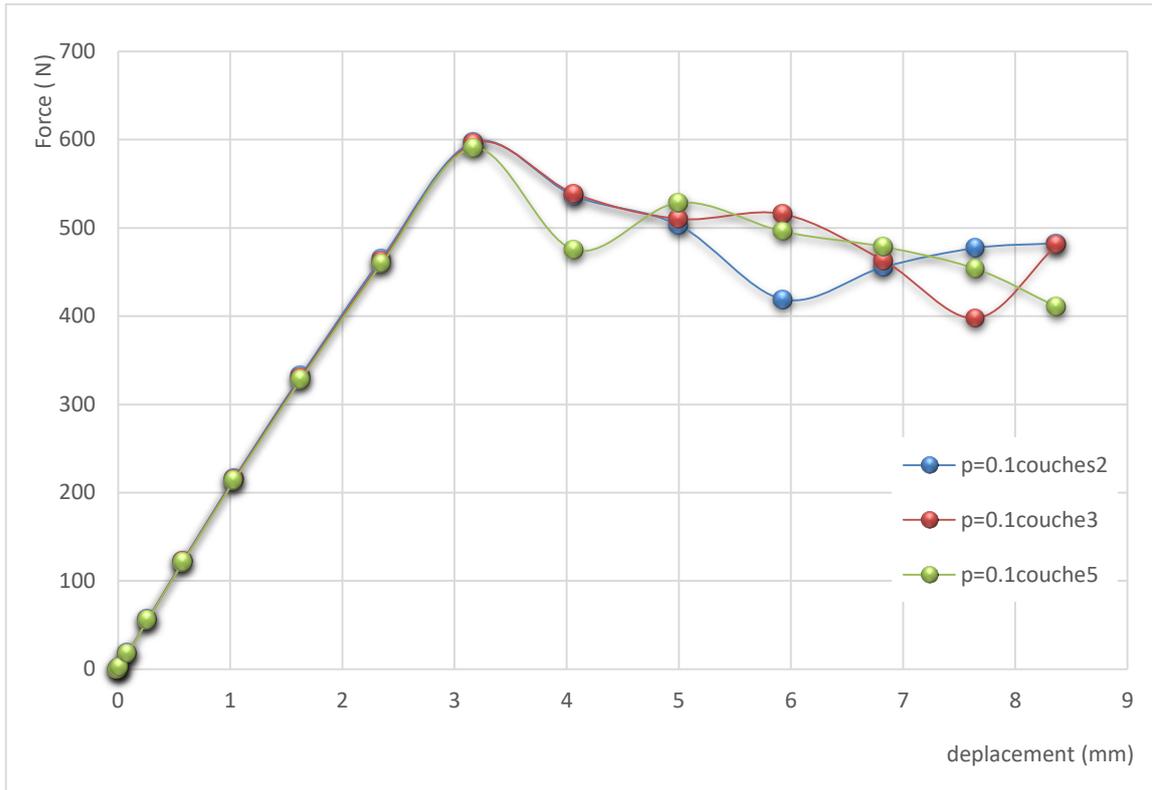


Figure IV.6 : Effet de nombre de couches pour p=0.1

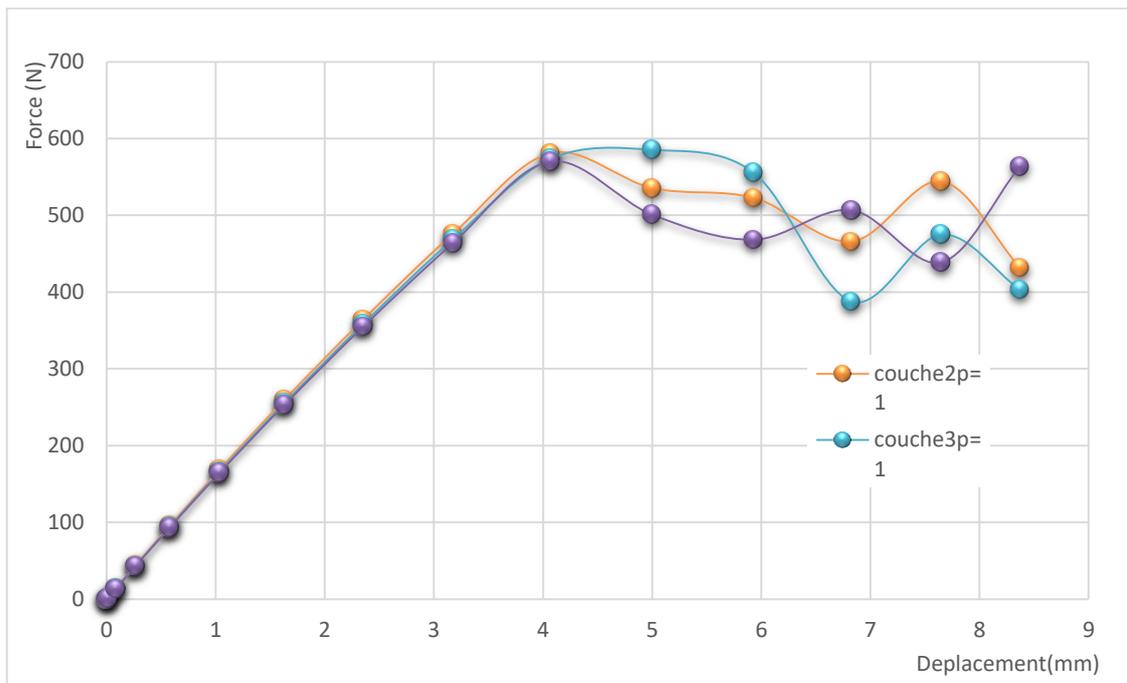


Figure IV.7 : Effet de nombre de couches pour p=1

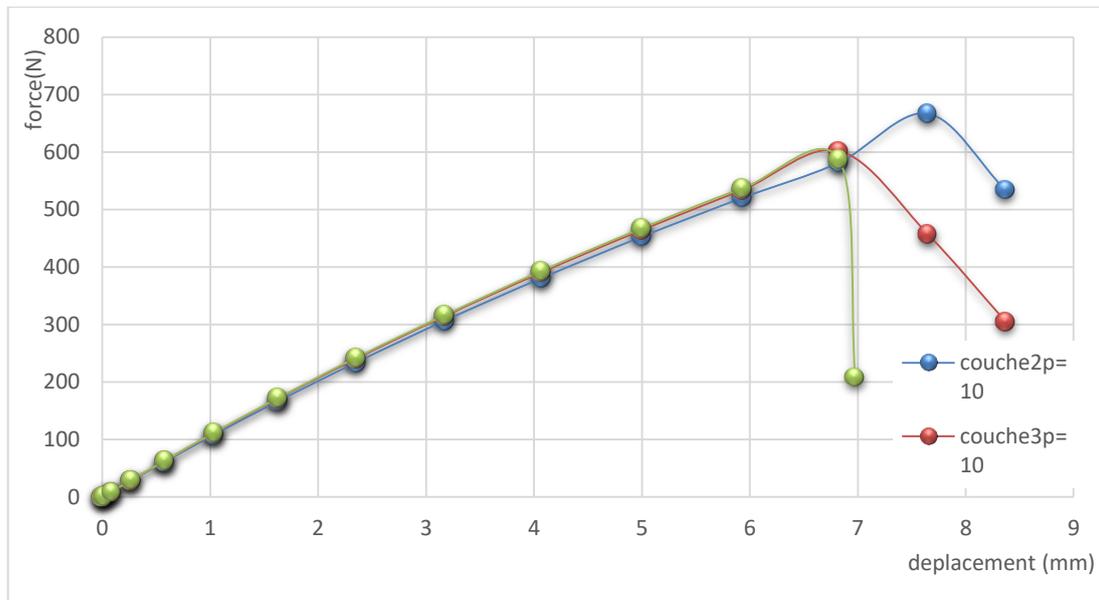


Figure IV.8 : Effet de nombre de couches pour $p=10$

Les figures (IV.6) (IV.7) (IV.8) représentent la courbe force -déplacement des trois structures sandwichs (âme 2 couches, âme 3 couches, âme 5 couches) sous chargement mécanique avec paramètres P constant à des valeurs de (0.1, 1, 10) respectivement pour chaque figure.

On constate que les courbes des trois figures ont la même allure avec des rapports force-déplacement différents. Dans le domaine élastique les courbes des trois figures sont superposées sous forme d'une ligne droite :

Figure IV.8: Force max des trois courbes = **590.53 N** pour un déplacement de **3.17 mm**

Figure IV.9 : Force max des trois courbes= **570.19 N** pour un déplacement de **4.06 mm**

Figure IV.10 :Force max des courbes de 3 et 5 couches = **600 N** pour un déplacement de **6.82 mm**

Force max de courbe de 2 couches = **667.22N** pour un déplacement de **7.64 mm**

Dans une structure en FGM le nombre de couche n'a aucun effet sur la rigidité la ductilité et la résistance. Tant dit que les conclusions apportées sur les variations de P sont valables quelle que soit le nombre de couches.

IV.3.1.3 Cartographie des contraintes

Les différentes cartographies ci-dessous montrent l'évolution de la distribution des contraintes de Von Mises dans l'âme simple et âmes graduées (FGM) pour un coefficient de paramètre $P=1$ et dans les semelles séparément des panneaux sandwichs sous chargement mécanique en flexion, pour des valeurs d'incrément de charge de **9** et **18**.

IV.3.1.3.1 l'évolution des contraintes dans l'âme :

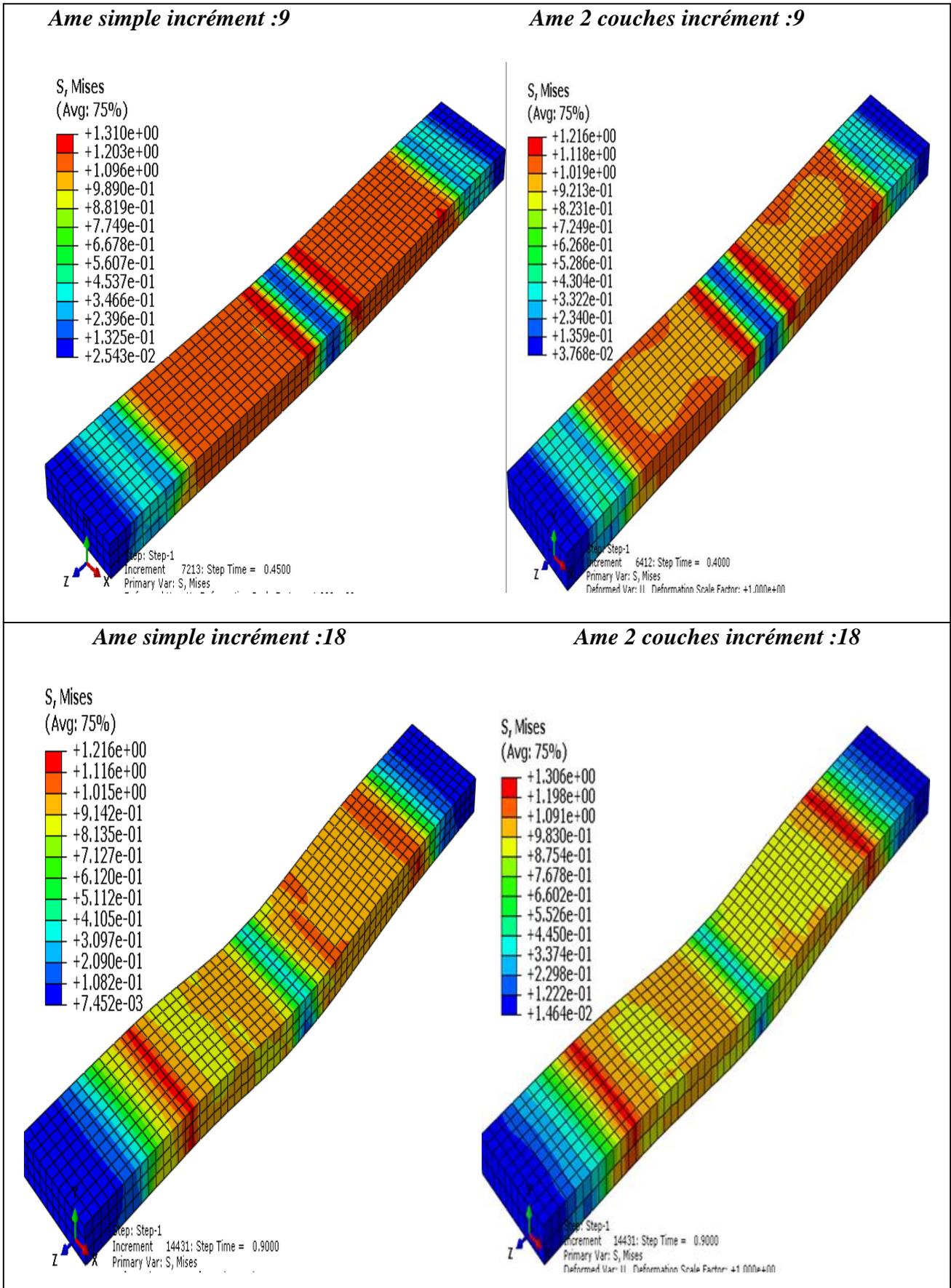


Figure IV.9 : Propagation des contraintes dans l'âme simple âme et âme FGM 2 couches.

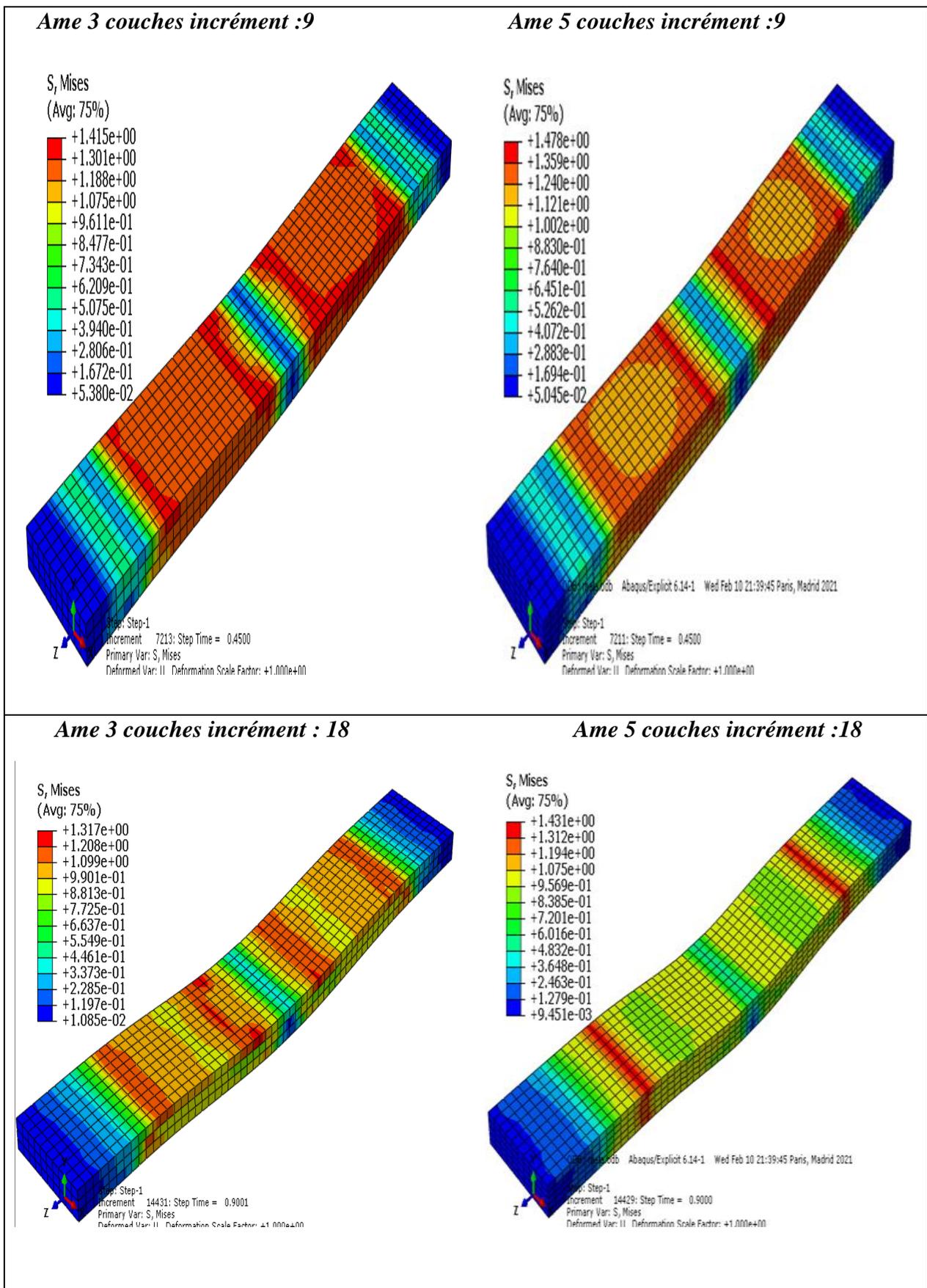


Figure IV.10 : Propagation des contraintes dans âme graduée : 3 couches et âme 5 couches.

IV.3.1.3.2 l'évolution des contraintes dans les semelles

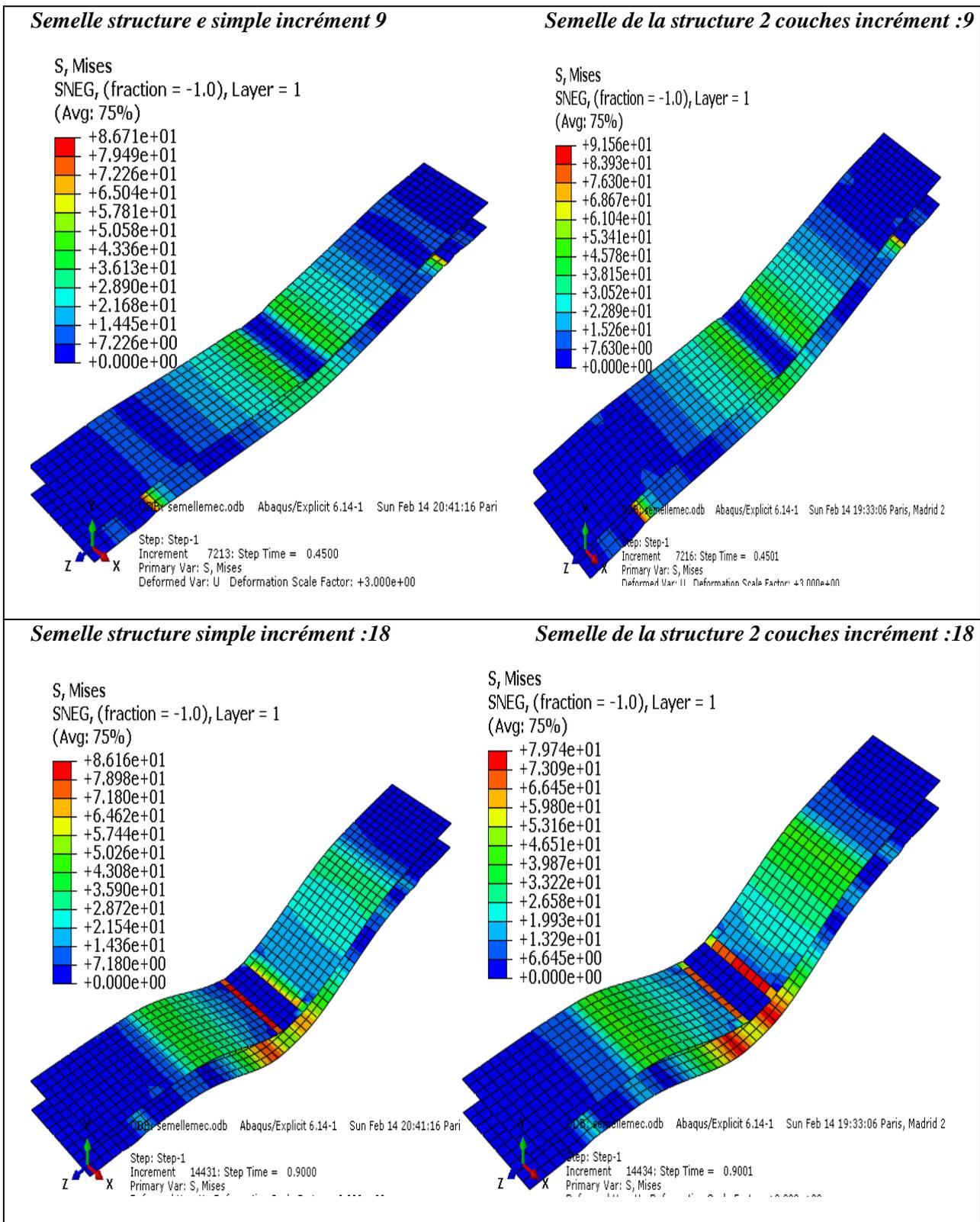


Figure IV.11 : Propagation des contraintes dans les semelles de la structure simple et structure âme graduée 2 couches

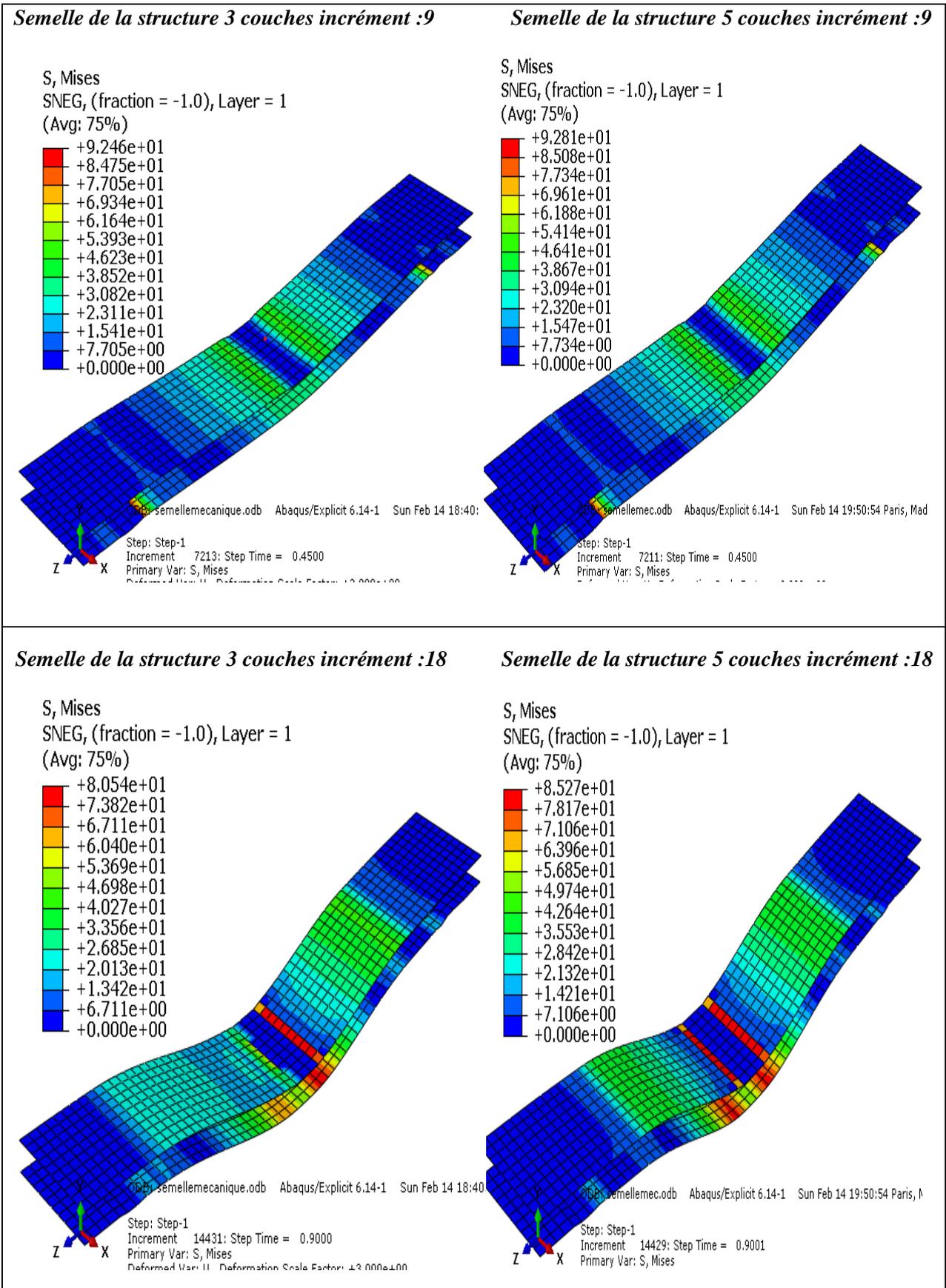


Figure III.12 : Propagation des contraintes dans les semelles de la structure âme graduée : 3 et 5 couches

L'évolution du chargement mécanique extérieur appliqué entraîne une évolution significative du champ des contraintes dans l'âme de sandwich. Depuis ces figures on peut noter que le champ de contrainte pour toutes les variantes avec un **incrément de 9** apparaît au voisinage du point d'application de la charge puis se propage vers les extrémités (appuis).

L'évolution du champ de contrainte dans la l'âme simple se propage rapidement comparé aux structures en âme FGM.

Pour un incrément de 9 : l'âme simple présente une contrainte maximale de **1.3 MPA**, cependant l'âme avec 2 couches, 3 couches et 5 couches présentent les contraintes suivantes respectivement de **1.2MPa, 1.4 MPA, 1.47MPa**. Les performances mécaniques des âmes graduées avec nombre de couche important procurent à l'élément panneau un seuil de résistance et une rigidité flexionnelle élevé.

Les structures sandwiches présente un certain degré de résistance et vers la fin du chargement, le champ de contrainte est localisé au niveau des appuis, l'élément analysé soumis à un chargement mécanique connaît des concentrations de champs de contraintes dans la zone du chargement avec une vitesse de propagation du champ des contraintes largement réduite. L'effet de couches à un rôle sur la diminution de champs de contrainte.

Dans le cas des semelles du panneau sandwich en âme gradué avec nombre de couche important les contraintes atteignent des valeurs plus importantes comparativement au panneau classique ou aux panneaux avec moins de nombre de couches. Ce dernier atteint la phase de densification du champ de contraintes après un temps de chargement lent.

Pour le même incrément de 9 : semelle de sandwich classique présente une contrainte de **4.33MPa**, pour les sandwiches gradués avec 2 couches, 3 couche, 5 couches présentent de contraintes de **4.57 MPa, 4.62 MPa, 4.64 MPa**.

Ces résultats numériques sous forme de cartographies nous renseignent sur le rôle des matériaux FGM dans la reprise des sollicitations, la propagation de champs de contraintes et son influence sur les modes de rupture. Ils mettent en évidence la conjugaison des performances mécaniques des matériaux composites, pour empêcher la propagation du champ de contrainte dans la direction de la portée et de la hauteur des panneaux multicouches.

IV.3.2 Sandwiches sous chargement thermomécanique

Les Figures ci-dessous présentent les différentes courbes de force/ déplacement des structures sandwiches en âme FGM, sous chargement thermomécanique avec des températures allant de 10° à 100° avec incrément de 10°.

IV.3.2.1 Effet de paramètre du matériau « P » :

On a refait la même procédure que le chargement mécanique, le paramètre **P** varie entre les valeurs (0.1, 1, 10) pour le même nombre de couche pour chaque courbe.

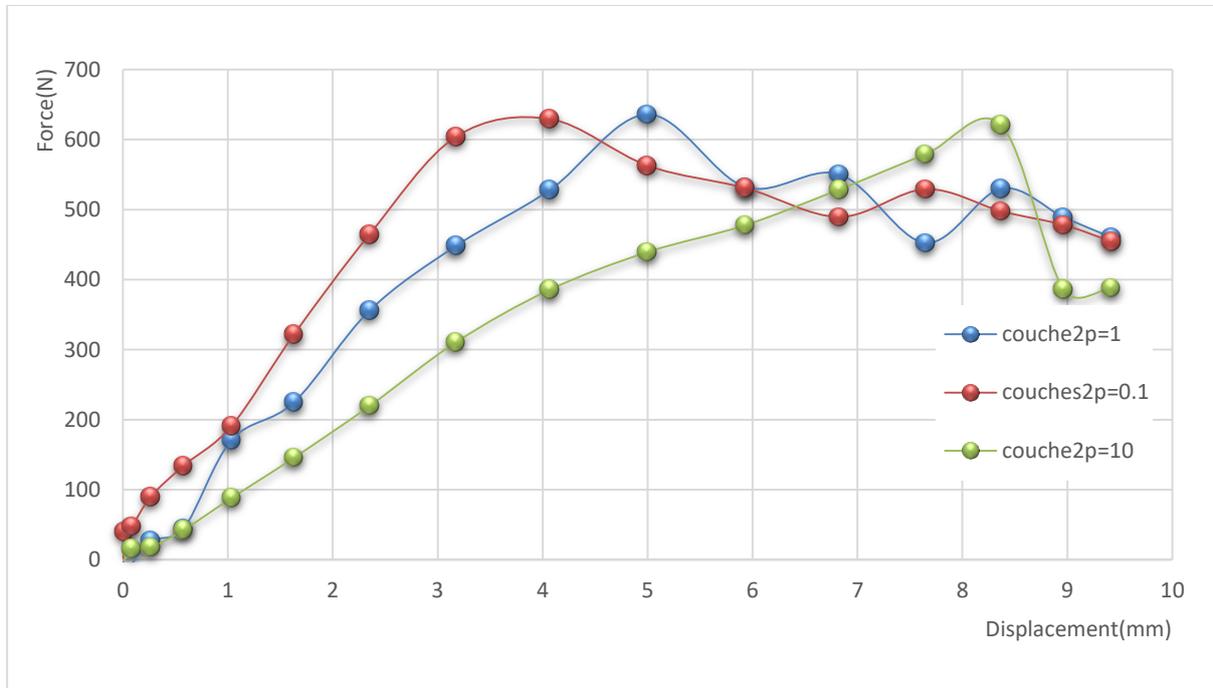


Figure IV.13 : Effet de P sur une âme de deux couches

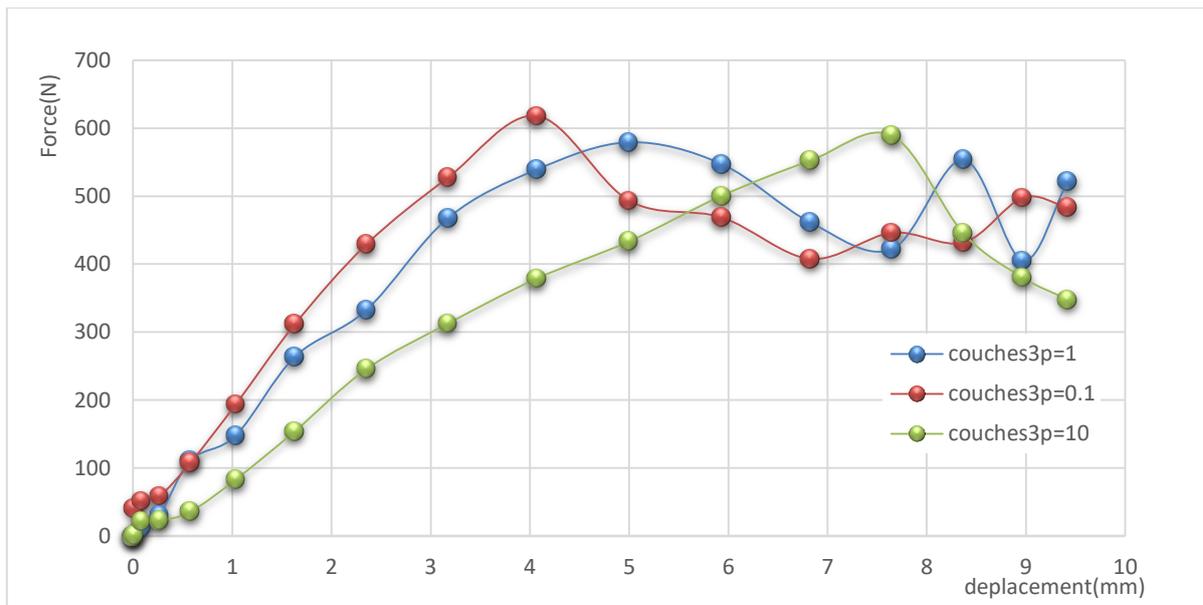


Figure IV.14 : Effet de P sur une âme de trois couches

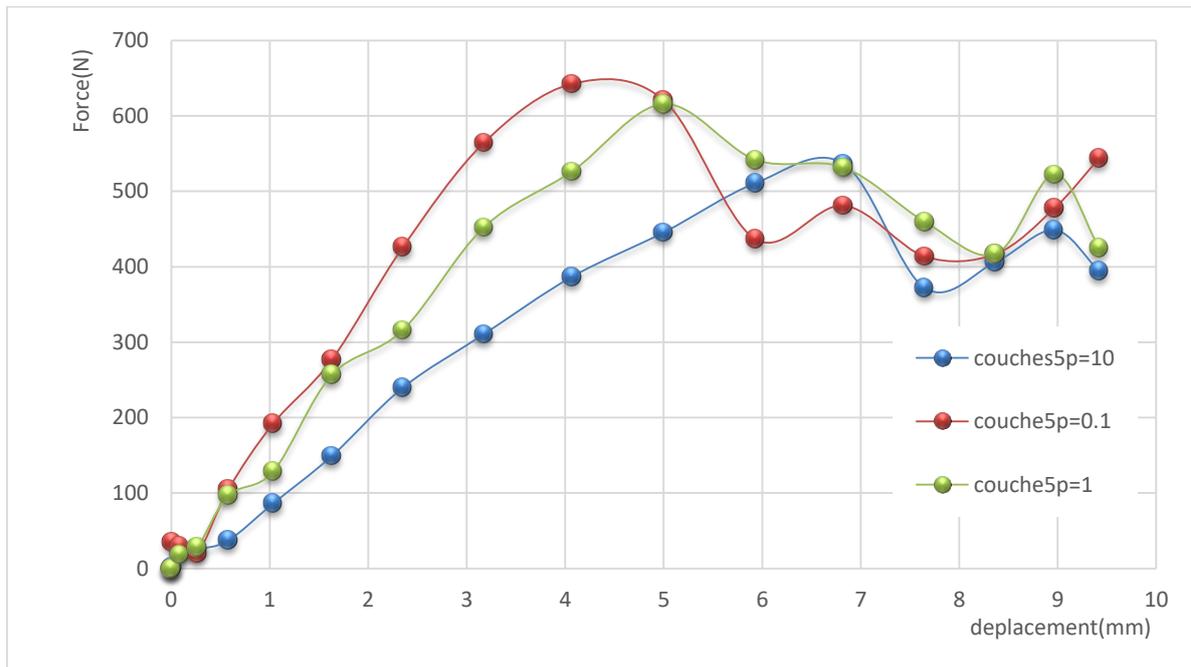


Figure IV.15 : Effet de P sur une âme de cinq couches

Les figures ci-dessus présentent le comportement en terme force /déplacement des structures sandwiches en âme FGM sous un chargement thermomécanique pour divers paramètres du matériau **P** à savoir (**p=0.1, p=1, p=10**).

Les courbes de ces figures présentent la même allure pour des valeurs de déformations et déplacement différents. On constate que le paramètre du matériau **P** a une influence sur la rigidité et la ductilité des sandwiches (domaine plastique). Cependant qu'il a un effet négligeable sur la résistance des structures.

Les structures dont la variation du matériau 1 vers le matériau 2 se fait rapidement (**P=0.1**) sont les plus rigides, tandis que les structures dont la variation du matériau 1 vers le matériau 2 se fait lentement (pour un **P=10**) sont les moins rigides.

Figure IV.13 **P=0.1** la structure présent un déplacement de **4.06 mm** pour une force de **629.21N**

P=1 la structure présent un déplacement de **5 mm** pour une force de **635.99N**

P=10 la structure présent un déplacement de **8.36 mm** pour une force de **621.08N**

Le paramètre P a un effet sur la ductilité, en effet les structures dont la variation du matériau 1 vers le matériau 2 se fait lentement (pour un **P=10**) se comporte d'une manière fragile et la rupture se produit brusquement.

IV.3.2.2 Effet de nombres de couches

Une étude de l'effet de nombre de couches sur les structures en FGM est réalisée (2 couches, 3 couches, 5 couches) en fixant la valeur de P pour chaque cas de figure.

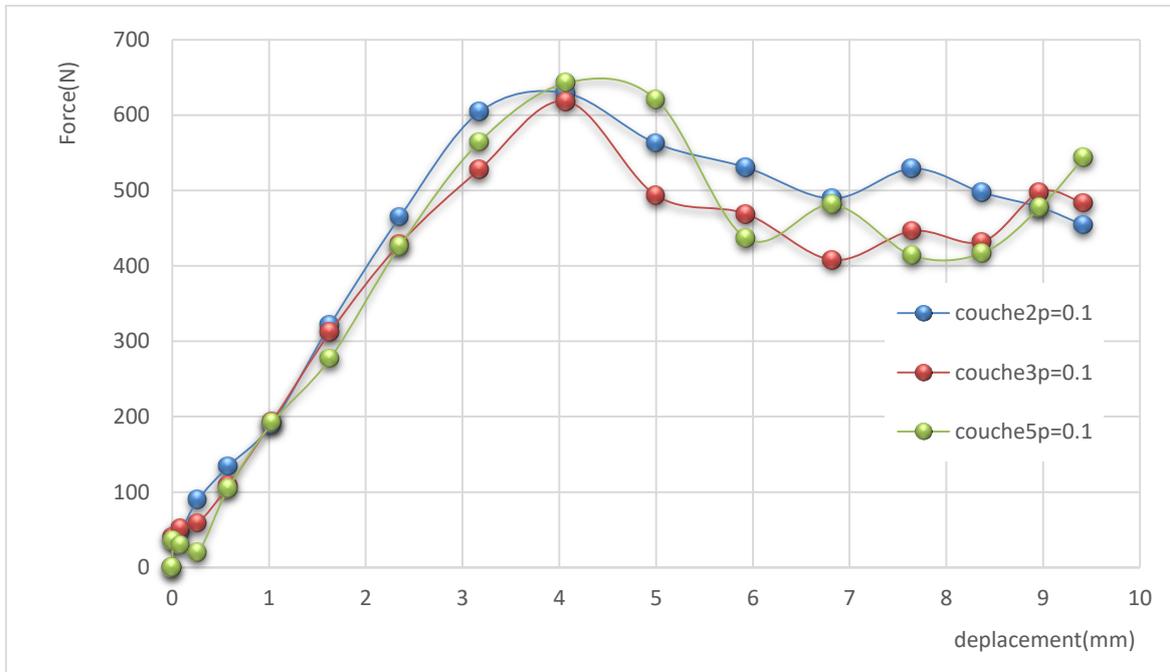


Figure IV.16 : Effet de nombre de couches pour $p=0.1$

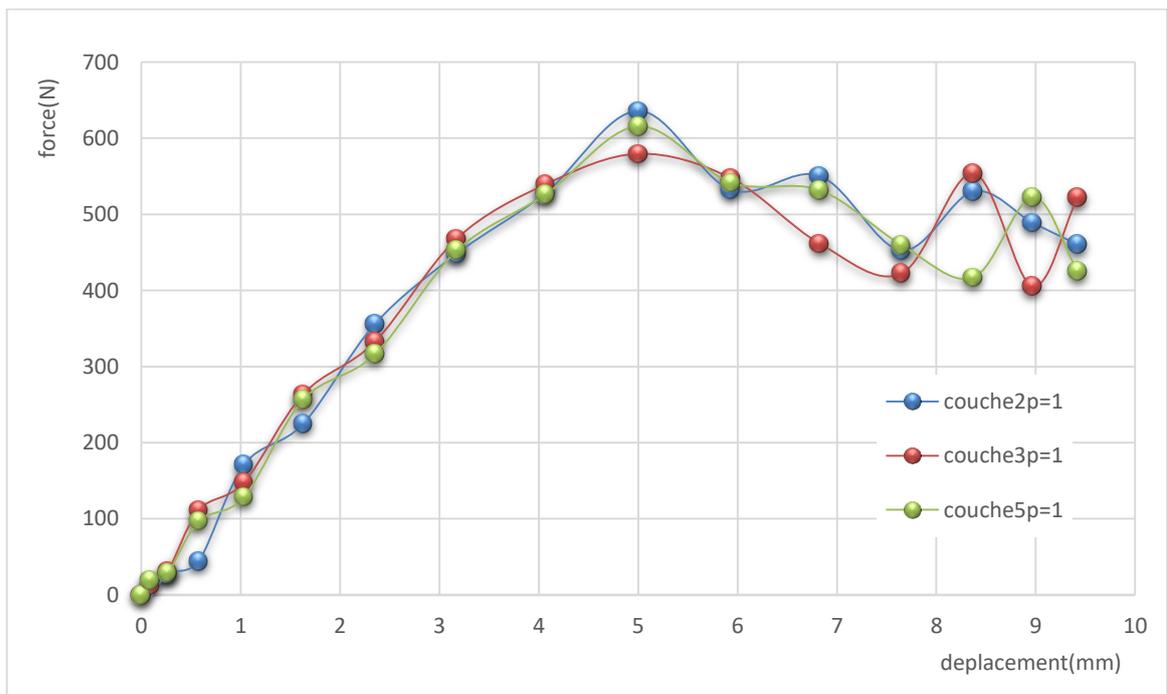


Figure IV.17 : Effet de nombre de couches pour $p=1$

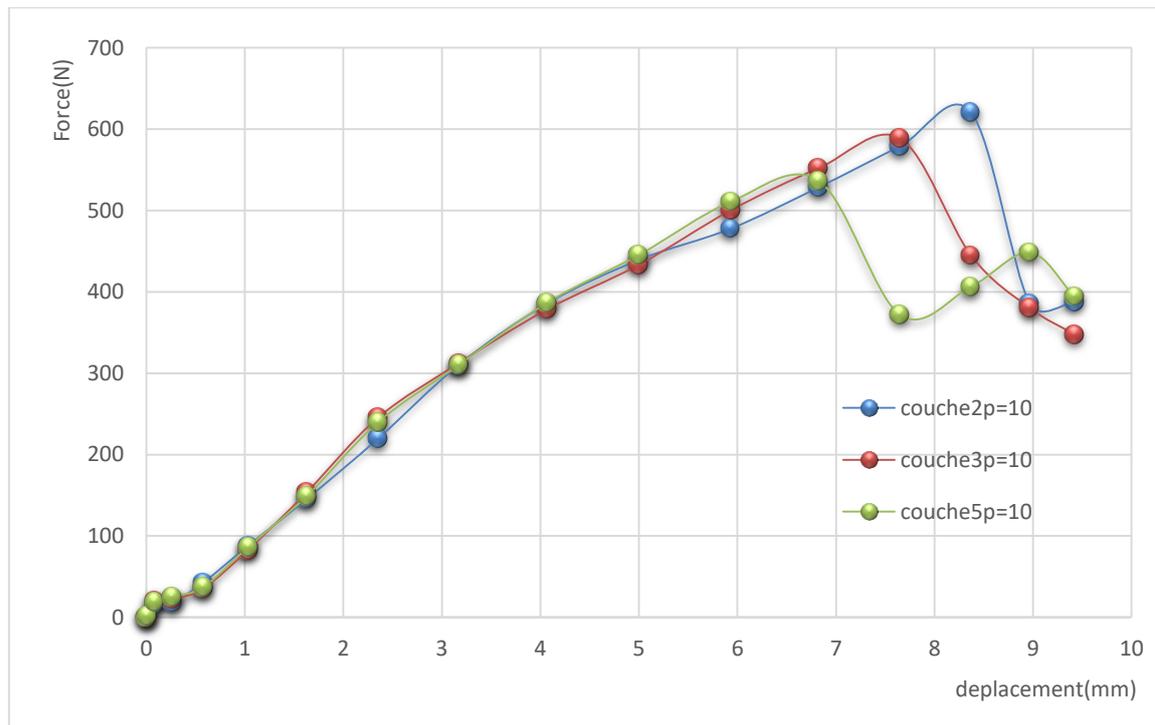


Figure IV.18 : Effet de nombre de couches pour $p=10$

Les figures (IV.16) (IV.17) (IV.18) présentent l'évolution des déformations et la capacité portante de sandwichs pour de nombre de couches différents d'une structure à l'autre (2couches, 3couches, 5 couches) pour la même valeur de P sous un chargement thermomécanique. Les courbes sont presque toutes identiques pour nombre de couche différent.

Figure IV.16 pour $P=1$; les structures en âme deux couches, trois couches et cinq couches présentent une capacité portante de **635N**, **580N** et **616N** pour le même déplacement **5mm**. On constate que la variation nombres de couches a un effet négligeable sur la résistance à la contrainte thermique.

En comparant entre les courbes des trois figures on remarque que les structures avec 5 couches sont les premières qui se déforment ça nous conduit à une conclusion que le nombre de couche à un effet sur la ductilité, en effet les structures avec un nombre de couches important se comportent d'une manière fragile, et la rupture se produit brusquement.

IV.3.2.3 Cartographie des contraintes

Les différentes cartographies ci-dessous montrent l'évolution de la distribution des contraintes de Von Mises dans les sandwichs simples et sandwichs en âmes graduées (FGM) pour un coefficient de paramètre $P=1$ des panneaux sandwichs sous chargement thermomécanique :

IV.3.2.3.1 les contraintes dans l'âme

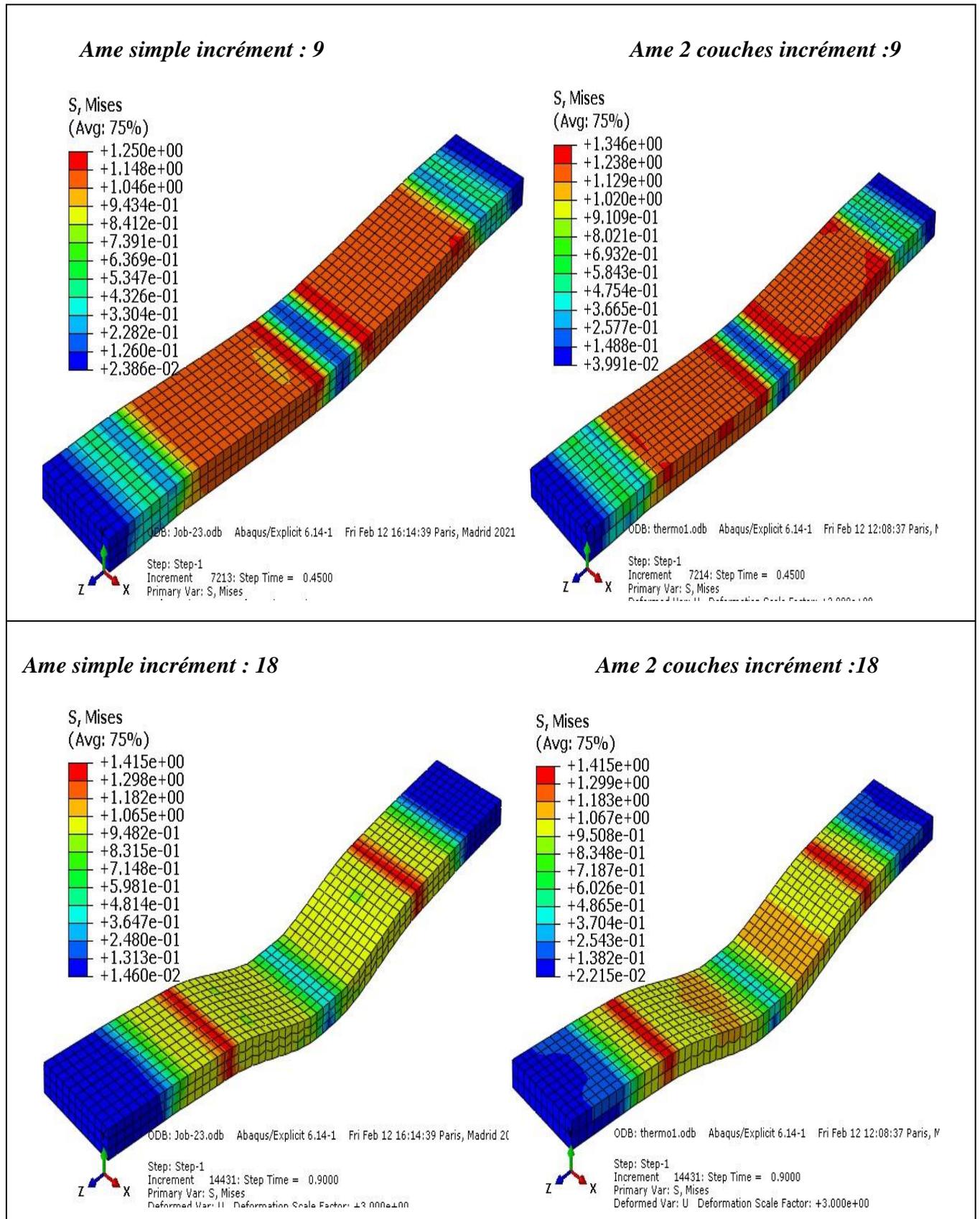


Figure IV.19 : Évolution des contraintes de Von-Mises dans l'âme simple et 2 couches sous charge thermomécanique

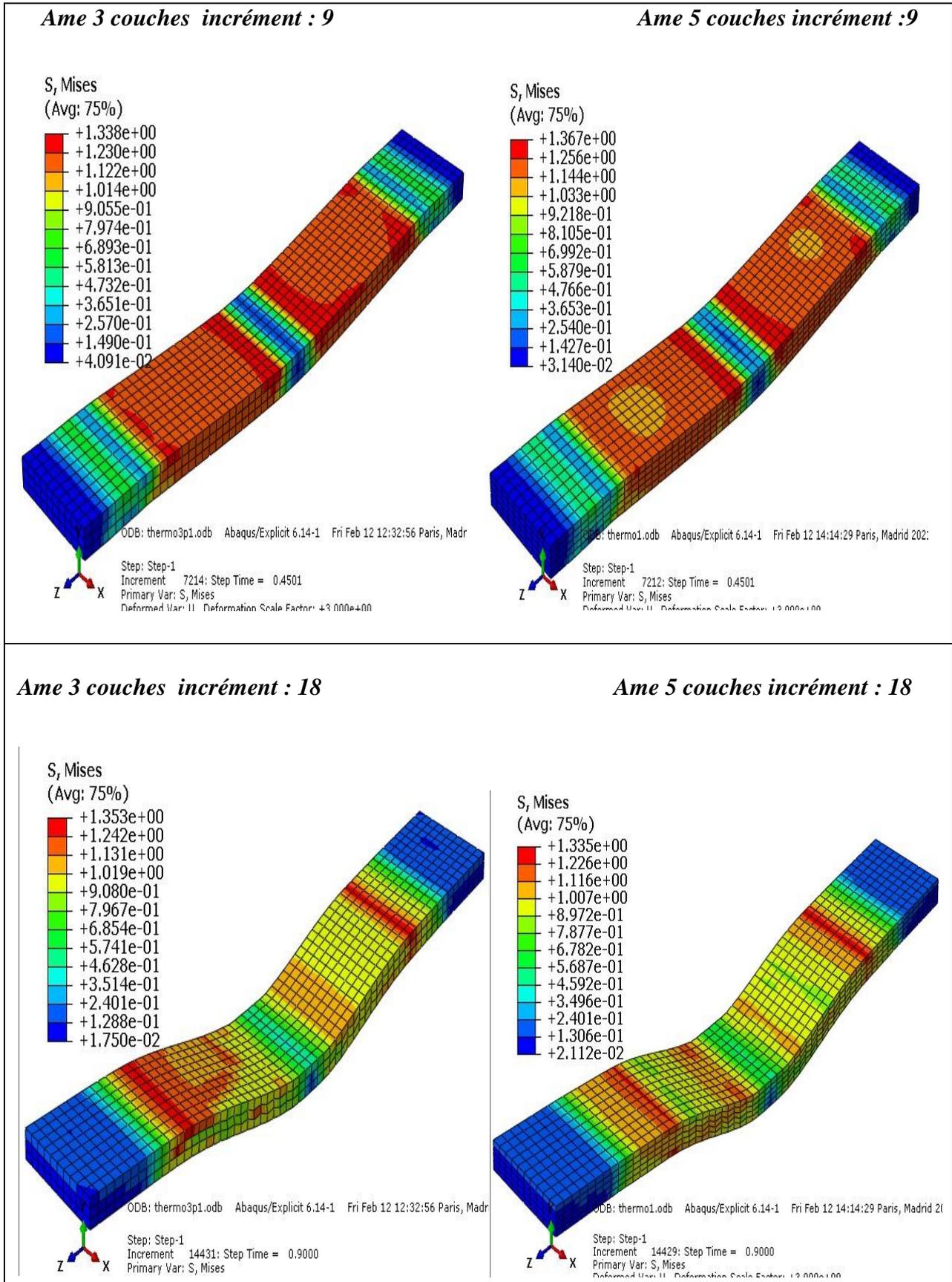


Figure IV.20 : Evolution des contraintes de Von-Mises dans l'âme 3 couches et 5 couches sous charge thermomécanique

IV.3.2.3.2 les contraintes dans les semelles

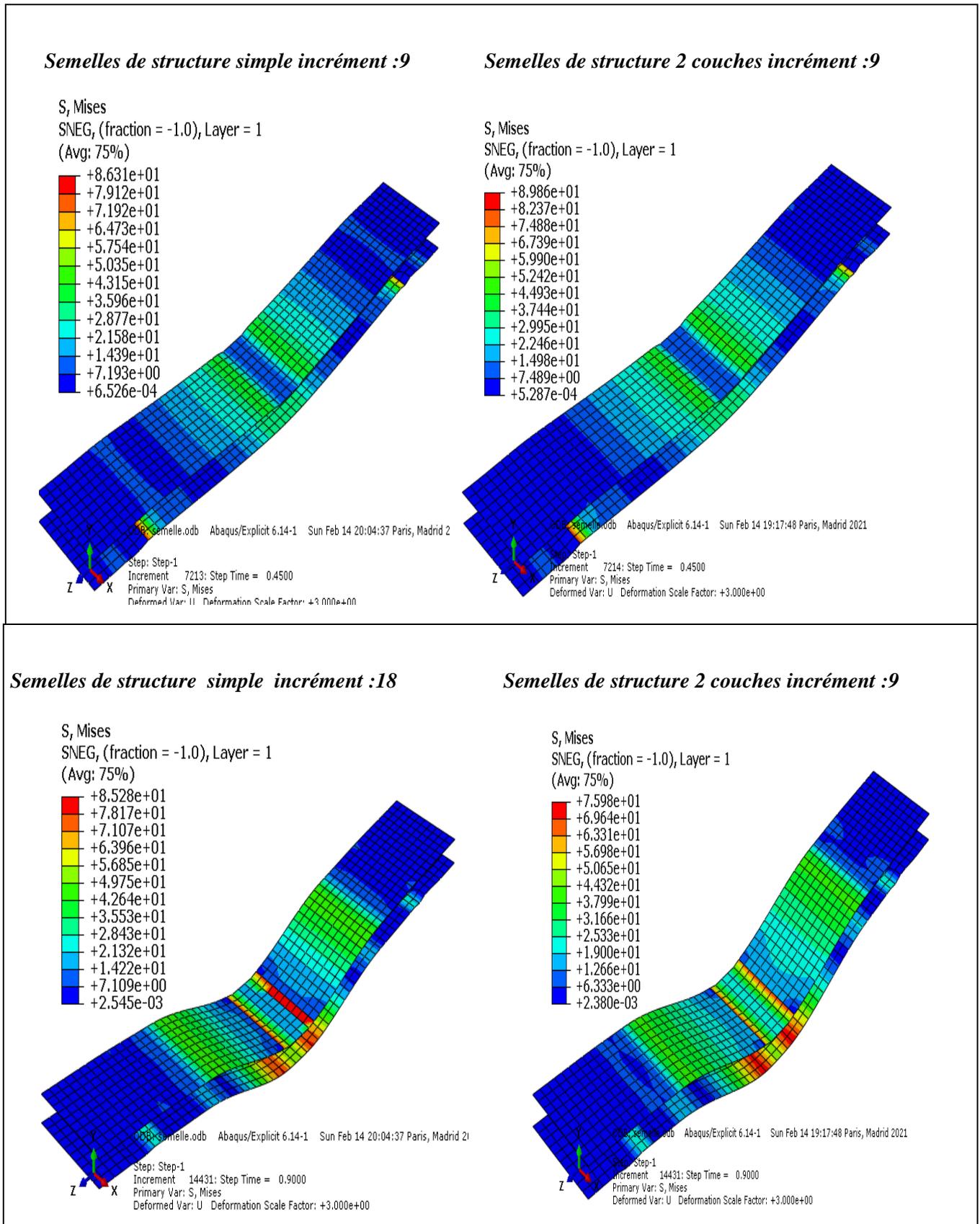


Figure IV.21 : Evolution des contraintes de Von-Mises dans la semelle de la structure simple et âme 2 couches, 3 couches et 5 couches sous charge thermomécanique

Les figures ci-dessus montrent que l'élément analysé soumis à un chargement thermomécanique connaît des concentrations de champs de contraintes dans la zone du chargement avec une vitesse de propagation du champ des contraintes largement réduite.

L'évolution du champ de contrainte dans l'âme simple se propage rapidement comparé aux structures en âme FGM, nous observons une diminution des déformations qui indique une augmentation de la résistance.

Pour le même incrément de charge (9) : l'âme simple présente une contrainte maximale de **1.25 MPA**, cependant l'âme avec 2 couches, 3 couches et 5 couches présentent les contraintes suivantes respectivement de **1.34 MPa**, **1.33 MPa**, **1.36MPa**. Les structures en FGM avec nombre de couche important ont un effet sur la propagation de champs de contraintes (amélioration).

Les structures sandwichs présente un certain degré de résistance et vers la fin du chargement, le champ de contrainte est localisé au niveau des appuis, l'élément analysé soumis à un chargement mécanique connaît des concentrations de champs de contraintes dans la zone du chargement avec une vitesse de propagation du champ des contraintes largement réduite.

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents résultats de la simulation numérique, permettant ainsi de déduire les paramètres influençant le comportement mécanique des structures sandwichs à savoir : le paramètre du matériau **P** et le nombre de couche.

La confrontation des résultats numériques et ceux disponible dans la littérature scientifique présentent une bonne concordance en terme de force déplacement.

Notre modèle élément fini, permet de quantifier la réponse globale de la structure étudiée, à travers l'évolution des contraintes, des déplacements en fonction de l'évolution de la charge appliquée avec une adéquation satisfaisante. En conclusion, une étude comparative est bien menée entre les différentes variantes d'étude à savoir : (âme en deux couches, trois couches, cinq couches) dans le but d'étudier le comportement de ces structures vis-à-vis de la capacité portante et de la ductilité sous un chargement mécanique et thermomécanique.

conclusion

général

Dans ce travail de recherche, une étude numérique est réalisée en utilisant le code ABAQUS. L'étude est basée sur la méthode des éléments finis, l'objectif principal consiste à mettre en évidence le comportement mécanique et thermomécanique des panneaux sandwichs avec une nouvelle conception en âme gradué (FGM).

Les structures composites développées sont conçues avec des âmes graduées fonctionnellement et des semelles en fibre de verre collées à l'aide d'une résine époxy, les matériaux d'âme sont modélisés suivant un modèle élasto-plastique, et un modèle élastique fragile orthotrope pour les matériaux composites des semelles.

Par la suite les différents résultats obtenus de la simulation présentent une bonne concordance avec les résultats expérimentaux tirés de la littérature. Ils montrent l'efficacité du modèle proposé en termes de prédiction de résistance et de déformabilité. En effet, l'analyse de ces résultats, en termes de comportement global (courbes force-déplacement) et local (visualisation des cartographies contrainte) a permis de tirer les conclusions suivantes :

- ❖ La rigidité et la ductilité des structures sont les paramètres intrinsèques nettement améliorés par la conception en matériaux gradués ;
- ❖ La conception FGM permet de réduire l'évolution, la propagation et la concentration des champs de contrainte.
- ❖ Les structures en FGM présentent sous chargement thermique des ductilités assez faibles comparées aux conceptions en âme classique.

En dépit des résultats satisfaisants obtenus, qui laisse entrevoir tout l'intérêt de l'utilisation des matériaux fonctionnels pour améliorer les performances mécaniques et thermique, néanmoins il est nécessaire de compléter la présente étude par d'autres analyses. En effet, il convient de préciser les perspectives futures suivantes :

- ❖ Réaliser des essais au laboratoire à fin d'auto-valider notre modèle numérique et enrichir les observations sur les modes de rupture;
- ❖ Prendre en compte dans la modélisation les glissements relatifs entre les différents composantes des multicouches ;
- ❖ Intégrer dans les simulations des modèles d'endommagement des matériaux utilisés à fin de lister les mécanismes de rupture ;

Références

Bibliographiques

Référence

- [1] **J.M. Berthelot** « *Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures* » Edition. Lavoisier, (2005), ISBN : 2-7430-0771-0. pp 72 .
- [2] **Groupe BATIWED** : « Isolation thermique et phonique : définitions, normes et aides [Nouveaux produits du BTP](#) » ; Article en ligne consulté le :_14.03.2020.
- [3] **BELOUAR Lycia** « Étude d'une maison écologique à isolation extérieure (polystyrène expansé) » Mémoire de Master université de Tizi Ouzou 2018.
- [4] **D. Medjelekh**« *Le Moniteur Architecture 'A.M.C'* », N°140, pp. 89-99, Février 2004.
- [5] **HESSAD Ahmed**, « apport des matériaux nouveaux dans le confort thermique des bâtiments : cas des matériaux a changement de phase (MCP) » Mémoire de Master université de Tizi Ouzou 2017.
- [6] **OUANECHÉ SAMIRA** « Nouveaux matériaux composites isolants » Mémoire de Master université de Tizi Ouzou 2014
- [7] **YESSAD AMINE** « ETUDE D'UNE MAISON ECOLOGIQUE A ENERGIE SOLAIRE (PV/T). » Mémoire de Master Université de Tizi Ouzou, 2017
- [8] **Amorim Luís Filipe, Ribeiro Alli** « Comportement à la compression et à la traction de liège, Etude numérique, Nature et Technologie - La solution idéale », Université d'Aveiro 2010.
- [9] **Dilem A.E.K.**, « Contribution à l'étude de la détermination de quelques propriétés de base du bois de pin d'Alep (pinus halepensis Mill) »; Thèse de doctorat à l'INPL (France), Centre de recherche de Nancy (INRA), Université des Sciences et Techniques du Languedoc, (1992).
- [10] **Labbaci Halima** « isolation du bâtiment thermique et phonique » polie-copié de cours université de Bechar,2018 ;
- [11] **Asmaa Fahmi** « Analyse Du Flambement Des Plaques FGM Sous Différents Chargements » thèse de doctorat, université SIDI BEL ABBES 2018
- [12] **Pierre JACQUINET** « *Utilisation de matériaux composites* » Ed. HERMES.1991
- [13] **Lakreb Nadia** « Élaboration, caractérisation thermomécanique et hygrothermique d'un composite sandwich multicouches à base de liège et bois de déroulage » thèse de doctorat université de Boumerdes, 2015
- [14] **Laurent Gornet** « Généralités sur les matériaux composites » Ecole d'ingénieur. 2008.cel-00470296
- [15] **J. Molimard**, « Mécanique des Matériaux composites » Version 2, EMSE 2004.

- [16] **Madouni Lyliia** ; « simulation numérique des éléments en bétons confinés par des grilles métalliques » Mémoire de Master ; p 26 Université de Tizi-Ouzou, 2011
- [17] « GLOSSAIRE DES MATERIAUX COMPOSITES » centre d’animation régional en matériaux avances, 2006
- [18] **Daniel Gay**. "Matériaux composites". 5ème édition, Lavoisier Paris 2005, ISSN 2-7462-1098-3
- [19] **Reid S.R., Zou G.**, “Impact Behaviour of Fibre-reinforced Composite Materials and Structures”, éditionCRC Press, 2000
- [20] **Abrate S.**, “Impact on composite structures”, édition S. Abrate, Southern Illinois University, Carbondale, 1998
- [21] **Samir Bensaid** « Contribution à la caractérisation et à la modélisation électromagnétique et thermique des matériaux composites anisotropes » Mémoire de Master Université de Nantes, 2006.
- [22] **B. castanié** « contribution à l’étude des structures sandwichs dissymétriques » thèse de doctorat, Ecole national supérieur de l’aéronautique et de l’espace.
- [23] **Bouguerra A., el al** "Isothermal moisture properties of wood -cementitious composites", Cement and concrete research, Vol. 29, N° 3, P. 339-347, (1999).
- [24] **F. BERBAIN and A. CHEVALIER**, ‘‘Mise en œuvre des composites’’ Techniques de l’Ingénieur, vol. A 3 727 ,2010
- [25] **Christian DECOLON** « Calcul des plaques et des poutres multicouches » Ed. HERMES 2000
- [26] **ANNANE Sara** « Simulation numérique du comportement d’un panneau sandwich à matrice légère » Mémoire de Master, Université de Tizi-Ouzou, 2019
- [27] **LACHGUER Abdelkarim AKYOUD Mohamed** « les matériaux sandwich et les risques d’instabilités géométriques locales » thèse de doctorat, Ecole Des Mines De Douai, 2014
- [28] **GOUASMIA Salsabil** « Comportement mécanique en traction monotone d’un composite a pli unique (resine acrylique/tricot de verre E » Mémoire de Master Université de – Annaba, 2017
- [29] **Moustapha IDRIS** « Analyse expérimentale et par éléments finis du comportement statique et vibratoire des matériaux composites sandwichs sains et endommagés ». Thèse de doctorats, Université du Maine. 2010
- [30] **BENFADEL Karima** « Élaboration et caractérisation de panneaux sandwichs à matrice cimentaire destinés à la construction », Mémoire de Magister Université de BOUMERDES 2015.

- [31] **MIYAMOTO, M., KAYSSER, W.A., RABIN, B.H.** "Functionally Graded Materials Design". Processing and Applications, 298-217 (1999),
- [32] **ÖCHSNER, A., MURCH, G.E. ET DE LEMOS, M.J.S.** "Cellular and Porous Materials", WILEY-VCH, 398-417. (2008),
- [33] **Koizumi M.** "The concept of FGM" Ceramic transaction, functionally graded materials 34, 3-10
- [34] **Koizumi.M,** "FGM activities in Japan, Composites" 28(1-2):1-2.1997
- [35] **Boch. P Chartier. Huttepain. M Tapa** "casting of AL2O3/ZrO2 laminated composites" EDITOR—A. BLEIER C-191-C-192 August 1986.
- [36] **K. Morinaga and K. U. Toto,** "Fabricate Thick Alumina-Tungsten FGM Using Slip Cast Method," Sci. Technol, p. 4, December 1993
- [37] **DELALE. F, ERDOGAN. F** "The crack problem for a non-homogeneous plane". ASME « Journal of Applied Mechanics »; 50 (3): 609-614. (1983),
- [38] **SOROKA I., SEREDA P** " Interrelation of hardness, modulus of elasticity and porosity in various gypsum systems" Journal of the American Ceramic Society, 1968, vol 51, n°6, p.337-340.
- [39] **KESKES Boualem** « comportement en fatigue des composites types sandwiché en Nid d'abeille » thèse doctorat, Université de Sétif Décembre 2007.
- [40] **NF T 54-602,** Norme Française, « Structures sandwiché à base de plastique, essai de la compression perpendiculaire ». Afnor 83647 ; Novembre (1983).
- [41] **NF T 54-603, Norme Française,** « Structures sandwiché à base de plastique, essai de traction perpendiculaire », Afnor 83648 ; Novembre (1983).
- [42] **NF T 54-604, Norme Française,** « Structures sandwiché à base de plastique, essai de la compression longitudinale sans ou avec flambage », Afnor 86618 ; Décembre (1986).
- [43] **NF T 54-605, Norme Française,** « Structures sandwiché à base de plastique, essai de cisaillement », Afnor 83650 ; Novembre (1983).
- [44] **NF T 54-606, Norme Française,** « Structures sandwiché à base de plastique, essai de flexion. Afnor 87461 ; Octobre (1987).
- [45] **Reid S.R., Zou G.,** "Impact Behaviour of Fibre-reinforced Composite Materials and Structures", éditionCRC Press, 2000
- [46] **L.Al Bachi,** « Modélisation numérique et expérimentale du comportement des matériaux sandwichés appliqués à l'aéronautique », thèse de l'ENI de Tarbes, (2002).
- [47] **A. MIR, B. BEZZAZI, R. ZITOUNE, F. COLLOMBET** « Caractérisation mécanique d'un panneau sandwich à âme en liège et peaux jute/époxy » Comptes Rendus des JNC 17 - Poitiers 2011

- [48] **Jamal Eddine ARBAOUI** « Étude comparative et caractérisations mécaniques des structures sandwichs multicouches » thèse doctorat, Université Paul Verlaine – METZ 2009
- [49] **Jin Dai, Hahn H** “ Flexural behavior of sandwich beams fabricated by vacuum-assisted resin transfer molding”, *composite structures*, 61 : 247-253, 2003.
- [50] Triantafillou T.C. and Gibson L.J. “Failure mode maps for foam core sandwich beams” *Materials Science and Engineering*, Vol. 95, (1987), pp 37-53.
- [51] **S.J. SINGH, S.P. HARSHA** “Nonlinear dynamic analysis of sandwich S-FGM plate resting on pasternak foundation under thermal environment”, *European Journal of Mechanics A Solids* 76 (2019) 155–179
- [52] **Vuong Nguyen Van Doa, Chin-Hyung Leeb** « Mesh-free thermal buckling analysis of multilayered composite plates based on an nth-order shear deformation theory » Chung-Ang University, 84, Huksuk-ro, Dongjak-ku, Seoul 06974, Republic of Korea, 2019
- [53] **X. Zhai et al.** “Thermal performance of precast concrete sandwich walls with a novel hybrid connector” *Energy & Buildings* 166 (2018) 109–121
- [54] **K. Mak, A. Fam** “Performance of flax-FRP sandwich panels exposed to different ambient temperatures” *Construction and Building Materials* 219 (2019) 121–130
- [55] **Mr. HAMI Brahim** « Elaboration et caractérisation physico-mécanique d’une structure Sandwich multicouches thèse doctorat, Université M’hamed Bougara Boumerdes 2017/2018.
- [56] **H.M. Bahabadi, et al** « Investigation of debonding growth between composite skins and corrugated foam-composite core in sandwich panels under bending loading” *Engineering Fracture Mechanics* 230 (2020) 106987
- [57] **Xiaorong Wu, Hongjun Yu, Licheng Guo, Li Zhang, Xinyang Sun, Zilong Chai** « Experimental and numerical investigation of static and fatigue behaviors of composites honeycomb sandwich structure ». Department of Astronautic Science and Mechanics” Harbin Institute of Technology, Harbin 150010, China, 2019.
- [58] **K. Arslan, R. Gunes** “Experimental damage evaluation of honeycomb sandwich structures with Al/B4C FGM face plates under high velocity impact loads” *Composite Structures* 202 (2018) 304–312
- [59] **J. Zhou et al** “The impact response of graded foam sandwich structures” *Composite Structures* 97 (2013) 370–377

Résumé

Les structures sandwiches connaissent un essor très important, elles présentent un intérêt pour des applications qui requièrent à la fois rigidité, légèreté et isolation. L'industrie de ces dernières ne cesse d'évoluer et de croître en mettant en place de nouveaux matériaux et de nouvelles technologies. Faisant ainsi appel, à des matériaux innovants dans le but d'améliorer les performances de ces structures et de résoudre la majorité de leurs problèmes c'est pourquoi les chercheurs ont optés pour les matériaux FGM (*Functionally Graded Materials*).

Les matériaux à gradient fonctionnel sont une nouvelle classe de matériaux composites dont les propriétés thermomécaniques varient selon une loi de fonction continue à travers l'épaisseur. Les FGMs ont une microstructure et une composition qui varie graduellement et continûment de manière qui permet d'éviter les concentrations de contraintes au niveau des interfaces.

En effet, le but de ce travail est de mettre en évidence à travers une simulation numérique par élément finis le comportement mécanique et thermomécanique des panneaux sandwichs avec une âme graduée FGM à base de deux mousses PVC à l'aide du code ABAQUS. Les différents résultats obtenus, présentent une bonne concordance avec les résultats expérimentaux tirés de la littérature. Ils montrent l'efficacité du modèle proposé en termes prédiction de résistance et de déformabilité.

Mots clés : Structure sandwiche, Matériaux FGM, Simulation, Isolation, Comportement thermomécanique.....